

การศึกษาและการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อใช้ทดสอบการเติบโตของรอยร้าวภายใต้อุณหภูมิสูง

นายพลายุทธ ศรีโอพาร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

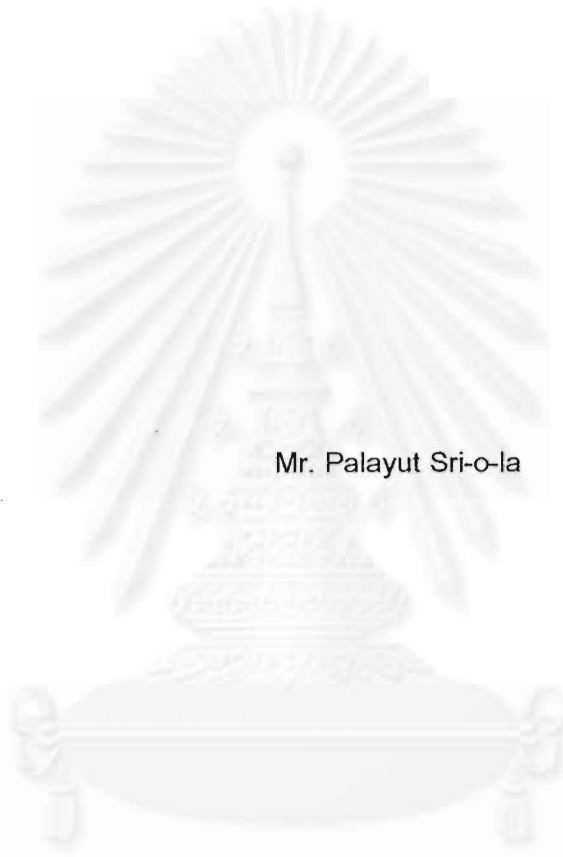
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-452-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY AND DEVELOPMENT OF FIXTURE EQUIPMENT FOR CRACK GROWTH  
TESTING AT A HIGH TEMPERATURE



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-452-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อใช้ทดสอบการเติบโต  
ของรอยร้าวภายใต้อุณหภูมิสูง

โดย

นายพลายุทธ ศรีโอพาร์

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล ปานงาม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)


.....กรรมการ  
(อาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ)

พลาญทศ ศรีโอพาร์ : การศึกษาและการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อใช้ทดสอบการเติบโตของรอยร้าวภายใต้อุณหภูมิสูง. (Study and development of fixture equipment for crack growth testing at a high temperature) อ.ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล, 81 หน้า. ISBN 974-334-452-7.

เครื่องทดสอบ Hydraulic servo testing machine เป็นเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยทั่วไปของวัสดุรวมทั้งคุณสมบัติทางกลศาสตร์การแตกหักด้วย แต่เครื่องทดสอบดังกล่าวสามารถทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้องเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นและมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ติดตั้งบนเครื่องทดสอบดังกล่าวเพื่อใช้ทดสอบชิ้นงานแบบ CT ซึ่งเป็นรูปแบบของชิ้นงานทดสอบทางกลศาสตร์การแตกหักรูปแบบหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และอุปกรณ์จับยึดที่สร้างขึ้นสามารถทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูงโดยไม่ทำให้เครื่องทดสอบเสียหาย

ในงานวิจัยได้ศึกษาและออกแบบสร้างเตาความร้อนที่ใช้ติดตั้งบนเครื่องทดสอบซึ่งสามารถทำอุณหภูมิให้กับชิ้นงานทดสอบได้สูงสุด  $800^{\circ}\text{C}$  จากนั้นได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและรูปร่างที่เป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์จับยึด พบว่าการป้องกันความร้อนของอุปกรณ์จับยึดทำได้โดยการเจาะตำแหน่งของส่วนของ grip ที่อยู่นอกเตา โดยใช้น้ำเป็นของไหล พาความร้อนออกมาจาก grip ซึ่งขนาดของการเจาะใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm จำนวน 2 รู ห่างกัน 30 mm และใช้อัตราการไหล  $0.286 \text{ kg/s}$  จะทำให้ระดับของอุณหภูมิมิบริเวณผิว grip นอกเตานั้นมีค่าประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่กำหนดอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบที่  $800^{\circ}\text{C}$  อุปกรณ์จับยึดดังกล่าวได้ถูกนำไปทดลองใช้งาน โดยการหาค่า J-Integral ของวัสดุ ASME SA-335 Gr22 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เพื่อให้ทราบถึงปัญหาของการใช้งานจริง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า J-Integral ที่อุณหภูมิสูงมีความชันน้อยกว่าอุณหภูมิห้องซึ่งสอดคล้องกับการทดลองโดยทั่วไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ..... พล.บุญมศ. ส.ศ./อ.มศ.  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... 

# # 3971169821 : MAJOR MECHANICAL

KEY WORD: FIXTURE EQUIPMENT / CRACK GROWTH / HIGH TEMPERATURE

PALAYUT SRI-O-LA : STUDY AND DEVELOPMENT OF FIXTURE EQUIPMENT FOR CRACK GROWTH TESTING IN HIGH TEMPERATURE. THESIS ADVISOR: ASSIST.PROF. KAUKERT BOONCHUKOSOL, Dr.Ing. 81 pp. ISBN 974-334-452-7.

The hydraulic servo testing machine of Saginomiya company is the machine for testing general mechanical property of material including fracture mechanic property. This machine can be only used for testing in room temperature, so the objective of this research is to study and develop the fixture equipment for used with the machine and CT specimen, which is typical specimen for test in fracture mechanic area. This new fixture equipment can be used at high temperature without damaging the machine.

In this research, the furnace installed on the machine was studied and designed for test specimen at 800°C maximum temperature. The experiment also included the studies of heat transfer on the fixture equipment and shape limitation. The experiment showed that the suitable diameter of two holes for water (using for increasing convection transfer from grip) was 10 mm each and center to center distance was 30 mm when using the flow rate at 0.286 kg/s and the specimen temperature 800°C, the surface temperature of grip was maintained at 45°C. This study had tested fixture equipment in the real work by determining the J-Integral of material ASME SA-335 Gr22 at 300°C. The test result demonstrated that the slope of the J-Integral was less than when testing at room temperature, which matched with the other experiments.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ..... พ.ล. ยุ. ท. ร. ส. / อ. น. / อ. ร. ส.  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... —————



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คุณฉัตรศักดิ์ เจริญสุข และคุณอดิศักดิ์ ศรีพูนสุข ที่ได้อนุเคราะห์เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณฉัตรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย และคุณภาณุ ประทุม นพรัตน์ ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษาและช่วยแนะนำการใช้เครื่องทดสอบอย่างดียิ่ง

อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องด้วยมีกำลังใจจาก คนรอบข้าง เพื่อน ๆ ที่คอยห่วงใยถามถึง และให้กำลังใจตลอดมา

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตามบูชาแต่ บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีประคุณทุกท่าน

พลายุทธ์ ศรีโอพาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่	หน้า
1. บทนำ.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
2. การออกแบบสร้างเตาความร้อน.....	5
แนวทางที่ใช้ในการออกแบบ.....	6
การเลือกชนิดขดลวดความร้อน.....	8
วิธีการคำนวณหาขนาดลวดความร้อน.....	9
วัสดุที่ใช้สร้างเตา.....	12
การคำนวณหาขนาดขดลวดที่ใช้กับเตา.....	13
3. การออกแบบอุปกรณ์จับยึด.....	21
การออกแบบดินแบบ grip.....	22
4. การทดลองการระบบป้องกันความร้อน.....	28
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
วิธีการทดสอบ.....	28
ผลการทดลอง.....	30
ผลสรุปจากระบบป้องกันความร้อน.....	38
Grip ที่ออกแบบใช้งานจริง.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. การทดลองการนำไปใช้งานจริง .....	40
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	40
รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ .....	41
เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	43
ขั้นตอนการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าว และ resistivity .....	44
ขั้นตอนการทดสอบหาค่า J-Integral .....	44
ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าว และ ค่า resistivity .....	45
ผลการทดสอบ J-Integral .....	47
6. สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ .....	49
สรุปปัญหาและขอเสนอแนะ .....	50
งานวิจัยที่ควรทำต่อจากงานวิจัยนี้ .....	51
รายการอ้างอิง .....	52
ภาคผนวก .....	54
ภาคผนวก ก .....	55
ภาคผนวก ข .....	64
ภาคผนวก ค .....	73
ภาคผนวก ง .....	80
ประวัติผู้วิจัย .....	81



## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพถ่ายเครื่องทดสอบ Hydraulic servo testing machine	2
2.1 แสดงการใช้งาน และตำแหน่งของการติดตั้งเตาที่ออกแบบ	5
2.2 ภาพที่ผนังเตาตามชนิดของขดลวด	7
2.3 ตัวประกอบอุณหภูมิ ( $C_i$ ) ของโลหะผสมคานแทล	9
2.4 ภาพของผิวที่ขดลวดความร้อนที่ในลักษณะรูปแบบต่างๆ	10
2.5 แสดงลักษณะของผนังเตาของแต่ละส่วน	14
2.6 แสดงลักษณะผนังเตาด้านบน	15
2.7 แสดงลักษณะที่ใช้ประมาณความร้อนผ่านทาง grip	16
2.8 ภาพถ่ายเตา	19
2.9 ภาพถ่ายเตา ขณะติดตั้งบนเครื่องทดสอบ (ด้านหลัง)	20
2.10 ภาพถ่ายเตา ขณะติดตั้งบนเครื่องทดสอบ (ด้านหน้า)	20
3.1 แสดงการจับยึดของอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบ และชื่อเรียกที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 รูปแบ่งส่วนของ grip ออกเป็นสามส่วนให้เห็นตำแหน่งการใช้งาน	23
3.3 แสดงแนวความคิดเสมือนที่มีท่อซึ่งมีความหนาอยู่ในส่วน B (รูปเดี่ยว)	26
3.4 แสดงแนวความคิดเสมือนที่มีท่อซึ่งมีความหนาอยู่ในส่วน B (สองรูป)	24
3.5 แสดง grip ดันแบบเพื่อใช้ทดสอบระบบป้องกันความร้อน	27
4.1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิ	29
4.2 ขนาดและรูปร่างของ grip ที่ได้ออกแบบเพื่อใช้งาน	39
5.1 แสดงลักษณะการจัดวางของชิ้นทดสอบ	41
5.2 แสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบแบบ CT	42
5.3 แสดงตำแหน่งการติดสายนำสัญญาณไฟฟ้า	42
5.4 แสดงตำแหน่งในการวัดความยาวรอยแตกร้า	44
5.5 แสดงความยาวรอยร้า กับ resistivity	46
5.6 แสดง load-displacement	47
5.7 แสดง crack extension – J-Integral	48
6.1 แสดงผล J-Integral ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	49

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) ของขดลวดแต่ละชนิดที่ขนาดต่างๆ.....	8
2.2 แสดงอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดและเส้นผ่าศูนย์กลางของการขด.....	12
4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 100°C .....	30
4.2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 200°C .....	31
4.3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 300°C .....	32
4.4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 400°C .....	33
4.5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 500°C .....	34
4.6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 600°C .....	35
4.7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 700°C .....	36
4.8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิขึ้นงานทดสอบ 800°C .....	37
4.9 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิผิว และการถ่ายเทความร้อน .....	38
5.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ASME SA-355 Gr P22.....	40
5.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ASME SA-355 Gr P22.....	41
5.3 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์รอยร้าว กับ resistivity.....	45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 1

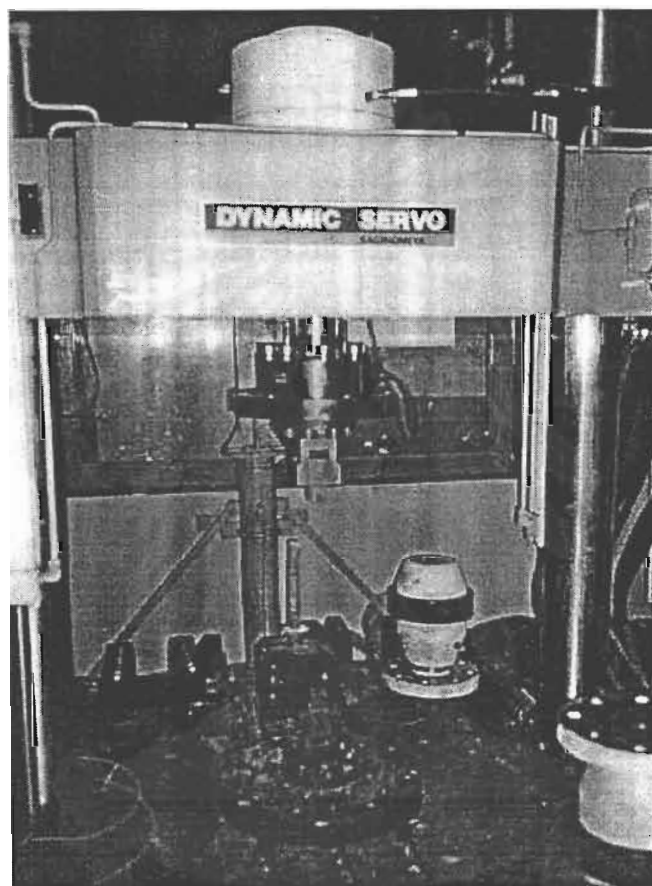
### บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมเช่น โรงกำเนิดไฟฟ้า โรงปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน ฯลฯ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ท่อต่าง ๆ วาล์ว ภาชนะบรรจุความดัน เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ต้องทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิ และความดันสูงติดต่อกันเป็นเวลานาน จึงทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจาก creep ความล้า (fatigue) หรือจากทั้งสองอย่างรวมกัน ความเสียหายที่เกิดขึ้น จะส่งผลกระทบต่อสายงานการผลิตทั้งระบบ ความเสียหายที่เกิดถึงขั้นแตกหักนั้นมีสาเหตุเริ่มต้นมาจากรอยแตก (flaws) หรือรอยบกพร่องที่ปนอยู่ในเนื้อโลหะของชิ้นส่วนที่เป็นโครงสร้างได้ขยายตัวสะสมเรื่อยไปที่ละน้อยจนเกิดเป็นความเสียหายซึ่งจะมองเห็นเป็นรอยร้าว (crack) หากชิ้นส่วนนั้นยังคงรับสภาวะเดิมต่อไปรอยร้าวจะเติบโตจนกระทั่งเกิดความเสียหายในที่สุด

เพื่อเป็นการเข้าใจถึงกลไกของความเสียหาย จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ โดยทำการหาพารามิเตอร์ที่จะบ่งบอกถึงความเสียหายนั้นยกตัวอย่างเช่น อัตราการเติบโตของรอยร้าว พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความต้านทานการแตกร้าวของวัสดุ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเสียหายแบบ creep ฯลฯ พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถหาได้จากการทำการทดสอบ หลายกรณีที่มีลักษณะการนำไปใช้งานของวัสดุเป็นการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างจากการทดสอบโดยทั่วไป ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้นั้นยังไม่ถูกต้องที่สุด การทดสอบในสภาวะแวดล้อมการใช้งานจริงจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ ในการทำนายความเสียหายนั้น ๆ

ในห้องทดสอบภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เครื่องทดสอบที่มีอยู่คือ Hydraulic servo testing machine ของบริษัท SAGINOMIYA ขนาด 30 (รูปที่ 1.1) เป็นเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ สามารถใช้ทดสอบหาคุณสมบัติทางกลทั่วไป และสามารถประยุกต์ใช้ในการวิจัยหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายได้ แต่การวิจัยที่ได้สามารถกระทำได้ภายใต้อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเครื่องทดสอบขาดอุปกรณ์เสริมในการสร้างอุณหภูมิ (เตาความร้อน) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีเตาความร้อนการจับยึดชิ้นงานทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงโดยตรงอาจทำให้ระดับอุณหภูมิที่ความเสียหายกับเครื่องมือหลักที่มีอยู่เดิม ด้วยเหตุผลดังกล่าวรวมทั้งราคาของเครื่องมือทดสอบที่ใช้เสริมในการสร้างการทดสอบให้อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงมี

ราคาแพงมากเกือบทั้งหมดต้องนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษา และพัฒนาอุปกรณ์เสริมให้สามารถใช้ทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยเลือกการทดสอบชิ้นงานแบบ CT ให้สามารถใช้ทดสอบบนเครื่องทดสอบที่มีอยู่เดิม



รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายเครื่องทดสอบ Hydraulic servo testing machine

ในงานวิจัยต้องศึกษาระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมกับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ จึงจำเป็นต้องออกแบบสร้างเตาความร้อน เตาที่ออกแบบต้องมีลักษณะรูปร่าง ขนาดที่เหมาะสมกับการติดตั้งบนเครื่องทดสอบ และสามารถสร้างระดับของอุณหภูมิให้กับชิ้นงานทดสอบได้ตามต้องการ ผู้วิจัยได้กำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่เตาสามารถให้กับชิ้นงานทดสอบไว้ที่ 800°C ต่อมาจะเป็นการศึกษาออกแบบอุปกรณ์จับยึดซึ่งต้องมีลักษณะพิเศษ คือมีระบบป้องกันระดับของอุณหภูมิที่จะสูงขึ้น ให้อยู่ในระดับที่ไม่ทำความเสียหายให้กับเครื่องมือทดสอบเดิม

เมื่อได้รูปแบบของการระบายความร้อนที่เหมาะสม จะออกแบบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงเพื่อศึกษาปัญหาของการใช้งานจริง โดยการนำอุปกรณ์เสริมที่ทดลองออกแบบสร้างขึ้นมา ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมกรรมการแตกร้าว นั่นคือ J-Integral ของวัสดุ ASME SA-335 Gr22 ตามลำดับ

### ความมุ่งหมายของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแบบ CT(Compact tension specimens) สำหรับใช้ทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง โดยชุดอุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้ติดตั้งบนเครื่อง Hydraulic servo testing machine ซึ่งเป็นของบริษัท SAGINOMIYA

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาระบบป้องกันความร้อนที่เหมาะสมในการควบคุมระดับอุณหภูมิจากการทดลองไม่ให้มีผลกระทบกับระบบสร้างภาระของเครื่องทดสอบ

2. ศึกษาลักษณะรูปร่าง ขนาดและอุณหภูมิของเตาความร้อนที่เหมาะสมที่สามารถติดตั้งบนเครื่องทดสอบ

3. ทดลองใช้อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นทดสอบค่า J-Integral เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ผลการศึกษาเพื่อออกแบบสร้างอุปกรณ์จับยึดครั้งนี้จะเป็นประโยชน์กับนักวิจัยที่ต้องการศึกษาวิจัยพฤติกรรมเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องต่อไป

2. ผลงานทำให้มีข้อมูลที่สามารถสร้างและพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาใช้เองแทนการซื้อจากต่างประเทศ นอกจากเป็นการช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังเป็นการพัฒนาความสามารถในการพึ่งตนเองทางเทคโนโลยีด้วย



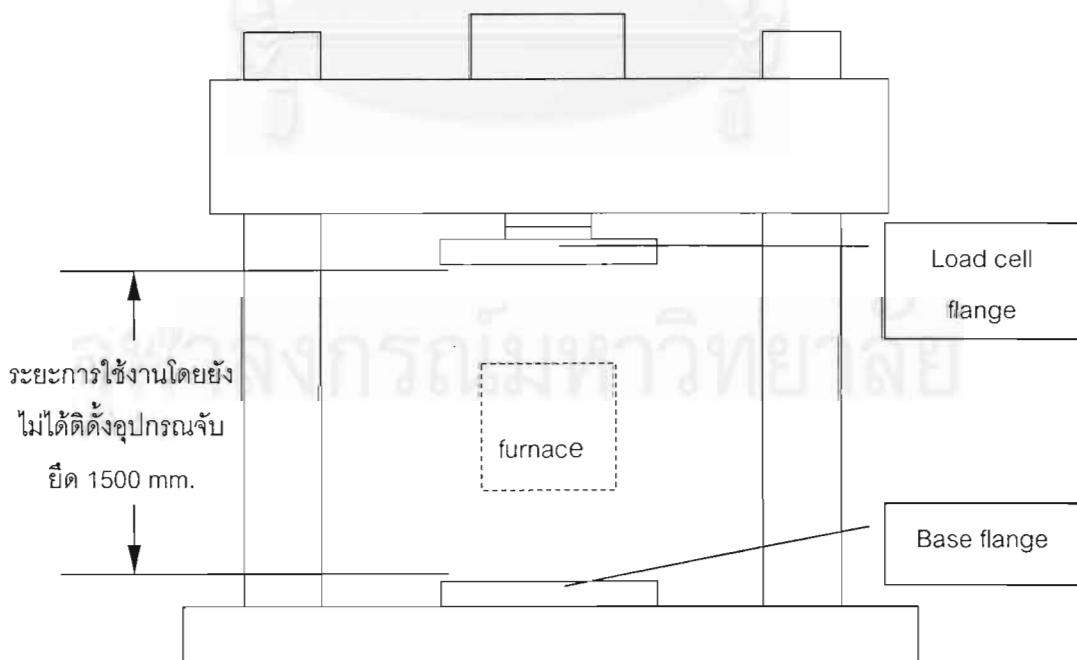
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การออกแบบสร้างเตาความร้อน

งานวิจัยต้องการสร้างสภาวะการทดสอบให้อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบสร้างเตาความร้อนขึ้นมาใช้งาน เตาที่ออกแบบสร้างก่อให้เกิดประโยชน์กับงานวิจัย 2 ประการ ประการแรก จะใช้เป็นอุปกรณ์ทดลองการควบคุมอุณหภูมิที่อุปกรณ์จับยึดที่ต้องศึกษา (รายละเอียดในบทที่ 3) ประการที่สอง จะใช้เตานี้ใช้งานจริงโดยนำไปติดตั้งบนเครื่องทดสอบ hydraulic servo testing machine เมื่อการผลทดลองในประการแรกเป็นที่ยอมรับได้แล้ว

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเครื่องทดสอบ hydraulic servo testing machine (ดูรูปที่ 2.1 ประกอบ) โครงสร้างของเครื่องทดสอบเป็นเสาโลหะสองเสา ซึ่งระยะการใช้งานเมื่อยังไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดใด ๆ มีประมาณ 1500 mm. เตาจะถูกนำไปติดตั้งในช่วงการใช้งานดังกล่าว และการนำเตาไปติดตั้งในตำแหน่งนั้นจะทำให้ระยะที่เหลือของการติดตั้งอุปกรณ์จับยึด น้อยลง เพราะฉะนั้น ขนาดความสูงของเตาจะเป็นปัจจัยในการใช้พิจารณาขนาดของเตา โดย ขนาดของเตาต้องมีขนาดเหมาะสมกับการติดตั้งบนเครื่องทดสอบ และเนื่องจากระยะการใช้งาน มีน้อย จึงออกแบบให้เตาสามารถปิดเปิดได้จากด้านข้างได้ด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงระยะการใช้งาน และตำแหน่งของการติดตั้งเตาที่ออกแบบ

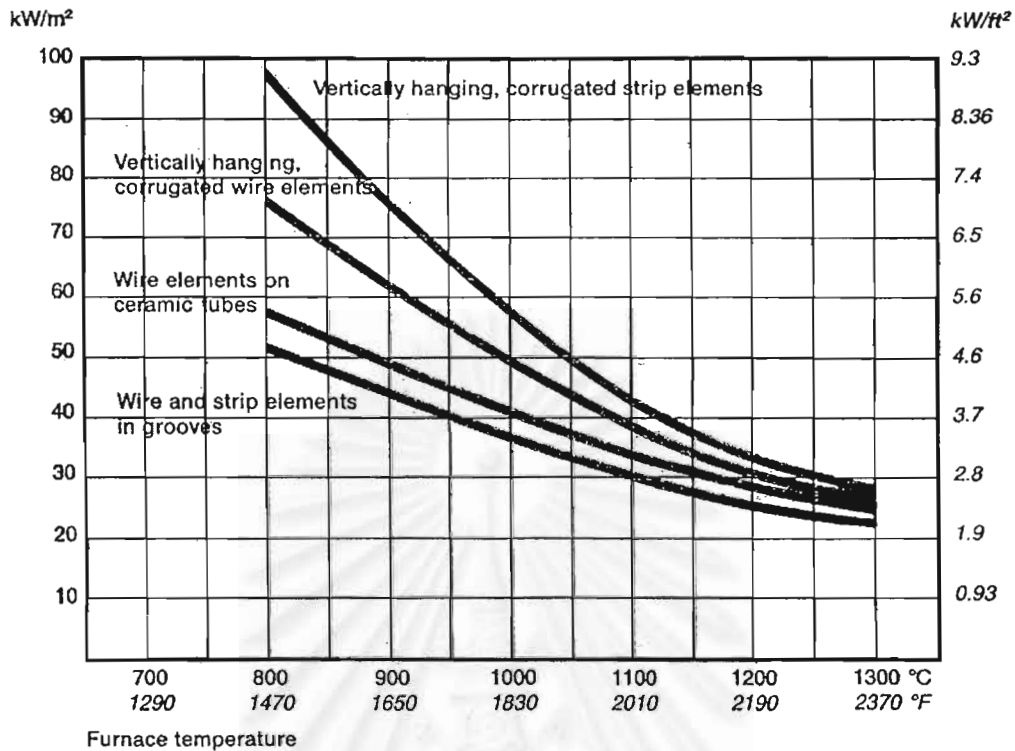
อนึ่งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดความร้อนที่ใช้ประกอบในเตาคือลวดความร้อน ซึ่งการออกแบบเตาจะต้องคำนึงถึงความสามารถ และคุณสมบัติต่าง ๆ ในการใช้งาน และสร้างระดับอุณหภูมิของขดลวดความร้อน ความสามารถ และคุณสมบัติดังกล่าว ผู้ผลิตลวดความร้อนจะแสดงรายละเอียดการนำไปใช้งานของขดลวดชนิด และขนาดนั้น ๆ ไว้ แนวทางและวิธีการต่าง ๆ ของการออกแบบเตาจึงได้ทำตามความสามารถของขดลวด โดยอธิบายไว้ในเนื้อหาดังต่อไปนี้

### แนวทางที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบเตาต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการ แล้วจึงเลือกขนาดของลวดต้านทาน รวมทั้งรูปแบบของลวด ซึ่งจะออกแบบตาม คานแทล (Kanthal, 1994) โดยพิจารณาส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิของเตา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้ เวลาในการใช้ให้ความร้อน และอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างตัวกำเนิดความร้อนและวัสดุ โดยทั่วไปจะให้อุณหภูมิของเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 2 ถึง 10%
2. กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ต้องการใช้ต่อหน่วย เวลา ต้องพิจารณาความต้องการความร้อนของวัสดุภายในเตา ความสูญเสียความร้อนรวมถึงประสิทธิภาพของเตาเพื่อชดเชยพลังงานที่เสียไป โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเตามีค่า 70 ถึง 80%
3. แรงดันไฟฟ้า ในเตาขนาดเล็กใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V แต่เตาขนาดใหญ่มักใช้แรงดันไฟฟ้า 380 V 3
4. รูปร่างของลวดต้านทาน โดยทั่วไปรูปร่างของลวดความร้อนจะมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ เป็นเส้นลวดและเป็นแผ่น ลวดความร้อนที่ใช้ต้องมีขนาดเหมาะสมและแข็งแรงพอที่จะทนอุณหภูมิสูง ตัวต้านทานที่พื้นที่หน้าตัดน้อยจะให้กระแสผ่านได้น้อย จึงควรเลือกตัวต้านทานที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยก่อน ซึ่งเป็นผลให้ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า
5. ภาระที่ผิว (surface load) ภาระที่ผิวของลวดต้านทานเป็นส่วนสำคัญของกำลังที่ใช้ต่อพื้นที่ผิวของลวดต้านทาน การเพิ่มภาระที่ผิวของลวดต้านทานจะทำให้อุณหภูมิล้อม ๆ ลวดสูงขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของภาระที่ผิวด้วย ภาระที่ผิวของลวดต้านทานเป็นส่วนผูกพันกับอุณหภูมิ หรืออาจกล่าวได้ว่าภาระที่ผิวดังกล่าวจะสัมพันธ์กับปริมาณการใช้วัสดุตัวต้านทาน คือถ้าภาระที่ผิวดำ จะต้องใช้ปริมาณตัวกำเนิดที่มากกว่าเมื่อใช้ภาระที่ผิวสูงในเวลาเดียวกัน





รูปที่ 2.2 ภาระที่ผนังเตาตามชนิดของขดลวด (Kanthal, 1994)

6. ภาระที่ผนังเตา (furnace wall loading) ใช้ในการคำนวณหาขนาดของลวดความร้อน ซึ่งต้องคำนึงถึงอุณหภูมิ พื้นที่หน้าตัดของลวดความร้อน และอายุการใช้งาน (รูปที่ 2.2 แสดงภาระที่ผนังเตากับอุณหภูมิ)

7. การติดตั้งขดลวดความร้อน จะต้องติดตั้งให้เหมาะสม เพื่อให้การแผ่รังสีความร้อน เป็นไปอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอ

## การเลือกชนิดขดลวดความร้อน

1. อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานเป็นตัวกำหนดขนาด และชนิดลวดความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิสูงสุด (°C) ของขดลวดแต่ละชนิดที่ขนาดต่าง ๆ

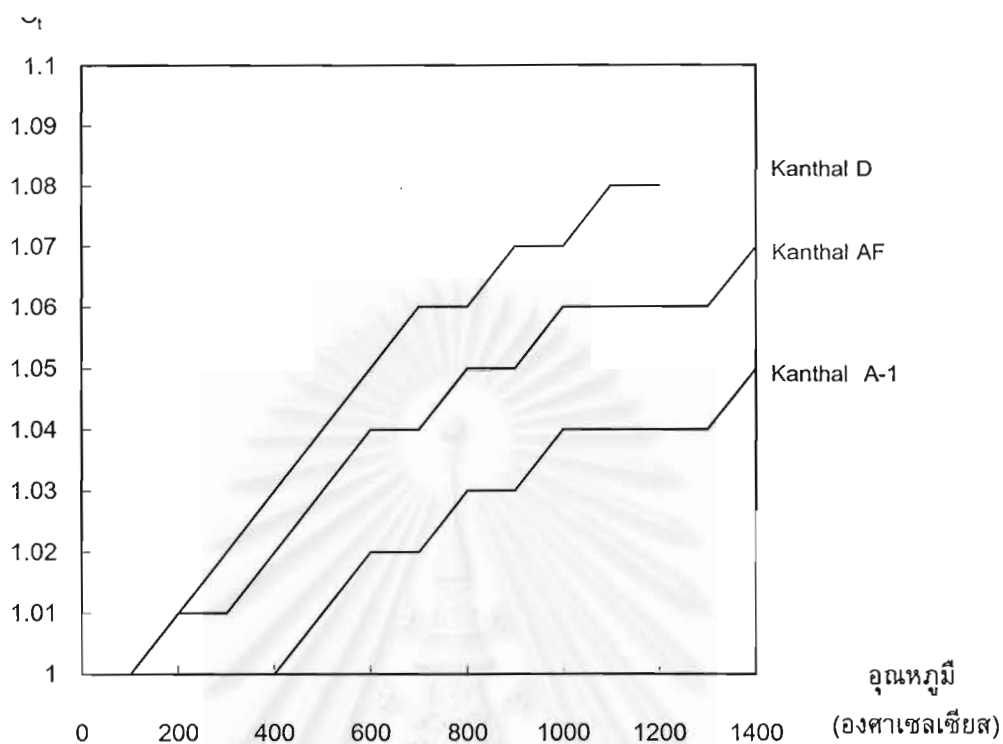
ชนิดของลวด	ขนาดของลวด (มิลลิเมตร)			
	0.15-0.4	0.41-0.95	1.0-3.0	>3
Kanthal A	925-1050	1050-1175	1175-1300	1330
Kanthal DSD	925-1025	1025-1100	1100-1200	1280
Alkrothal	900-950	950-1000	1000-1050	1050
Nikrothal 80	925-1000	1000-1075	1075-1150	1200

Kanthal, 1994

2. ความต้านทานของขดลวดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การคำนวณค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องกับตัวประกอบอุณหภูมิ (temperature factor) สำหรับลวดความร้อนคานแทล (Kanthal) สภาพความต้านทานแปรผันไปตามตัวประกอบ (C) ดังแสดงในรูป 2.3

3. อายุการใช้งานของขดลวดความร้อนขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน เช่น ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ ภาระผิว จำนวนครั้งการใช้งาน และการออกแบบ

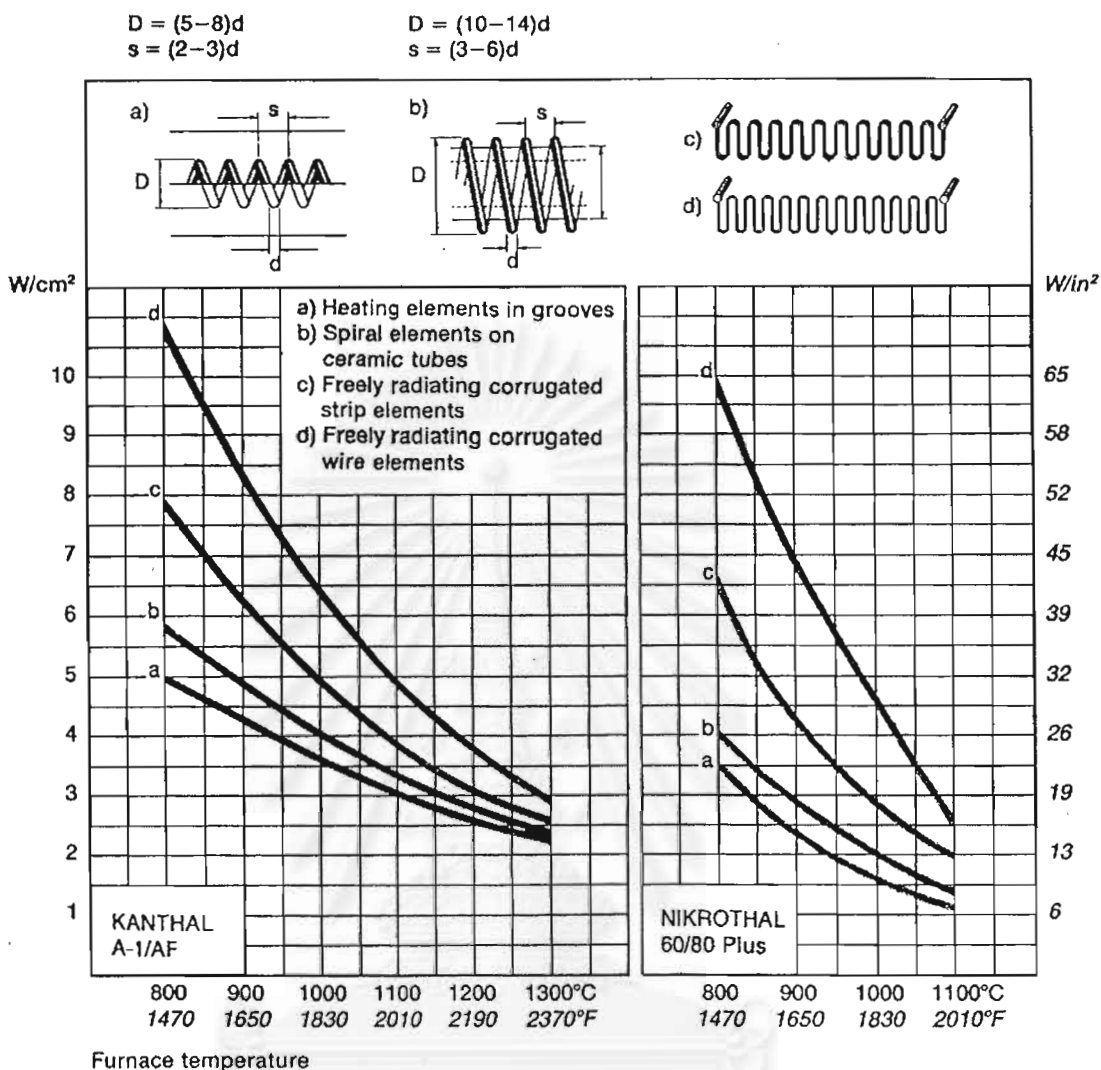
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ตัวประกอบอุณหภูมิ (C) ของโลหะผสมคานแทล (Kanthal, 1994)

### วิธีการคำนวณหาขนาดลวดความร้อน

เมื่อทราบค่าความต้านทาน (resistance) ตัวประกอบอุณหภูมิ และภาวะผิวตัวต้านทาน จะคำนวณค่าต่าง ๆ ต่อไปได้ ภาวะผิวต้านทานเป็นการวัดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนในเตา ซึ่งเมื่อใช้ลวดขนาดเล็กจะทำให้มีอายุการใช้งานสั้น รูปที่ 2.4 เป็นผล การทดลองของขดลวดความร้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และในครัวเรือนที่มีค่าตั้งแต่ 4 ถึง  $6 \text{ W/cm}^2$



รูปที่ 2.4 ภาวะของผิวที่ขดลดความร้อนที่ในลักษณะรูปแบบต่าง ๆ (Kanthal, 1994)

1. การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (d) โดยแทนค่าตามสมการของ คานทาล

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{U}\right)^2 \frac{\rho C_t}{p}} \tag{2.1}$$

โดยที่

- P แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W)
- U แทน แรงดันไฟฟ้า (V)
- $\rho$  แทน resistivity ( $\Omega/\text{mm}^2 \text{m}$ )
- $C_t$  แทน ตัวประกอบอุณหภูมิ

$\rho$  แทน ภาวระที่ผิว ( $W/cm^2$ )

ค่าที่ได้จะเป็นขนาดของลวดความร้อนโดยตรง

2. การคำนวณหาความยาวลวดความร้อน ขนาดการขด ของขดลวดความร้อน เมื่อมีการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหาความยาวของขดลวด การคำนวณหาความยาวของลวดความร้อนเริ่มต้นด้วยการใช้กฎของโอห์มคำนวณหาขนาดความต้านทานที่ใช้

$$R_T = \frac{U^2}{P} \quad 2.2$$

โดยที่

$R_T$  แทน ความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งาน ( $\Omega$ )

$P$  แทน กำลังไฟฟ้า ( $W$ )

และเมื่อทราบค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งานแล้ว ก็จะต้องคำนวณหาความต้านทานที่อุณหภูมิมีปกติโดยหารด้วย ตัวประกอบของอุณหภูมิ

$$R_{20} = \frac{R_T}{C_T} \quad 2.3$$

โดยที่

$R_{20}$  แทน ความต้านทานที่อุณหภูมิ  $20^\circ C$

และจากความสัมพันธ์ของค่า resistivity  $\rho$  ที่พื้นที่หน้าตัดใด ๆ ก็สามารถคำนวณหาความยาวทั้งหมด ( $L$ ) ที่ต้องการใช้

$$L = \frac{RA_c}{\rho} \quad 2.4$$

โดยที่

$A_c$  แทน พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

3. เมื่อมีทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางลวด และความยาวของขดลวดที่จะใช้ ขั้นตอนต่อไปเป็นการเลือก เส้นผ่าศูนย์กลางนอกของขดลวดความร้อน (external diameter of spiral) ค่าที่แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดและเส้นผ่านศูนย์กลางของการขด

อุณหภูมิใช้งาน	วางในท่อ
<1000°C 1830 °F	D/d = 6 ถึง 8
>1000°C 1830 °F	D/d = 5 ถึง 6
อุณหภูมิใช้งาน	วางรอบท่อ
<1000°C 1830 °F	D/d = 14
>1000°C 1830 °F	D/d = 14

Kanthal, 1994

โดยที่ D/d คืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อน จากตารางจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการขดจะเล็กลง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการล้มตัวของขดลวด โดยมีช่วงระยะพิช 2 ถึง 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อนที่ใช้

วัสดุที่ใช้สร้างเตา

ในการออกแบบเตาต้องคำนึงถึงลักษณะที่นำไปใช้งานโดยออกแบบให้สามารถเปิดปิดได้โดยใช้บานพับ และแบ่งเปิดได้ออกเป็นสองส่วนเพื่อสะดวกกับการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ วัสดุที่ใช้ทำ โครงสร้างของเตามีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1. ขดลวดความร้อน ใช้ขดลวดคานแทล A-1(รายละเอียดของขนาดดูตามภาคผนวก ง)
2. วัสดุทนไฟ และฉนวนกันความร้อน ด้านในสุดของเตาเป็นอิฐทนไฟ (insulation fired brick) ชนิด C2 ขนาด 250 × 114 × 65 mm. อิฐทนไฟดังกล่าวมีน้ำหนักเบา และสามารถนำมาตัดเจียนขึ้นรูปให้เป็นร่องเพื่อใส่ขดลวดความร้อนได้ง่าย ถัดจากอิฐทนไฟจะบุด้วยเซรามิคไฟเบอร์ (ceramic fiber) ชนิด bulk แบบผืนผ้า เป็นฉนวนกันความร้อนที่มีการนำความร้อนต่ำมาก และมีน้ำหนักเบา อุณหภูมิใช้งานสูงถึง 1400°C
3. โครงสร้างของเตาใช้เหล็กแผ่นหนา 3 mm. เป็นตัววัสดุทำโครงเตา โครงมีบานพับเพื่อใช้ในการปิดเปิดเพื่อง่ายต่อการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ (รายละเอียดของขนาดดูตามภาคผนวก ค)

4. อุปกรณ์การวัด และควบคุมอุณหภูมิ การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K และใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวควบคุม มีระบบป้องกันกระแสไฟเกินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดลวดความร้อนเสียหาย (ดูรายละเอียดภาคผนวก ข)

#### การคำนวณหาขนาดขดลวดที่ใช้กับเตา

ในการคำนวณหาขนาดขดลวดให้ความร้อน พิจารณาจาก กำลังไฟฟ้า ขนาดลวด ความร้อน และขนาดขดลวดความร้อน

1. กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ โดยให้มีอุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  พลังงานที่สูญเสียให้แก่ผนังเตา grip และอุปกรณ์ให้ความร้อน โดยกำหนดให้

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

โดยที่

$Q_t$  แทน พลังงานที่ใช้ทั้งหมด

$Q_1$  แทน พลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ

$Q_2$  แทน พลังงานที่สูญเสียผ่านทางผนังเตาด้านข้าง

$Q_3$  แทน พลังงานที่สูญเสียผ่านทางผนังเตาบนและล่าง

$Q_4$  แทน พลังงานที่สูญเสียผ่านทาง grip

สมมติฐานในการออกแบบ

ประสิทธิภาพของเตา ( $\eta$ ) = 70%

ค่าความปลอดภัยของขดลวดความร้อน = 1.1

#### พลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ

สำหรับชิ้นงานทดสอบ CT

น้ำหนักชิ้นงานทดสอบโดยประมาณ  $m = 0.1 \text{ kg.}$

ความร้อนจำเพาะของชิ้นงานทดสอบ  $c = 0.711 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

เวลาที่ใช้  $t = 30 \text{ min.}$

อุณหภูมิต้องการ  $T_1 = 800^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0 = 30^{\circ}\text{C}$

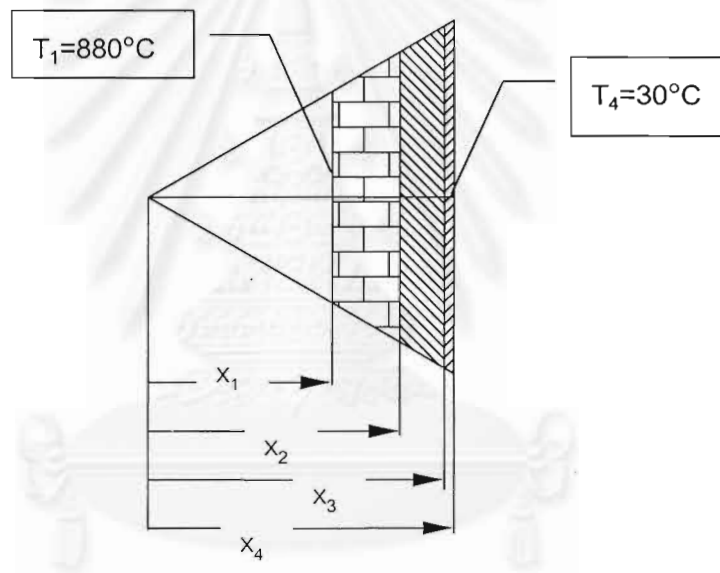
พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ

$$Q_1 = \frac{mc(T_1 - T_0)}{t}$$

$$= 15 \text{ W}$$

พลังงานที่สูญเสียผ่านทางผนังเตาด้านข้าง

เตามีผนังเตาเป็นรูปหกเหลี่ยม (ดูแบบตามภาคผนวก ค) สามารถแบ่งคิดความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาของแต่ละด้าน



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของผนังเตา ของแต่ละส่วน มี 6 ส่วน

ระยะ	$x_1$	=	66.6 mm
	$x_2$	=	131.6 mm
	$x_3$	=	147 mm
	$x_4$	=	150 mm
อุณหภูมิผิวห้องอบ	$T_1$	=	$880^\circ\text{C}$
อุณหภูมิผิวนอก	$T_4$	=	$30^\circ\text{C}$
อิฐทนไฟชนิด C <sub>2</sub> มีค่าการนำความร้อน	$k_{\text{brick}}$	=	0.58 W/m•K
ฉนวนเซรามิคไฟเบอร์มีค่าการนำความร้อน	$k_{\text{fiber}}$	=	0.198 W/m•K



โครงเหล็กมีค่าการนำความร้อน  
ความสูงของผนังห้องอบ

$$k_{\text{steel}} = 60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$L = 228 \text{ mm}$$

$$Q_2' = 2L \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) k_{\text{brick}} (T_1 - T_2) \frac{1}{\ln \frac{x_2}{x_1}} \quad (\text{ก})$$

$$Q_2' = 2L \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) k_{\text{fiber}} (T_2 - T_3) \frac{1}{\ln \frac{x_3}{x_2}} \quad (\text{ข})$$

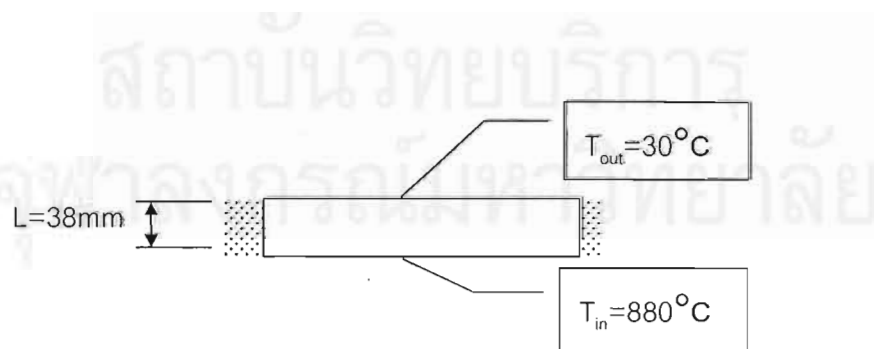
$$Q_2' = 2L \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) k_{\text{steel}} (T_3 - T_4) \frac{1}{\ln \frac{x_4}{x_3}} \quad (\text{ค})$$

แก้สมการจะได้ ก, ข และ ค

$$Q_2' = 129.23 \text{ W}$$

มี 6 ด้าน เพราะฉะนั้น  $Q_2 = 775 \text{ W}$

พลังงานที่สูญเสียผ่านผนังเตาขนและล่าง



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของผนังเตา ด้านบน

พื้นที่ของผนังเตาที่ใช้คำนวณได้จาก พื้นที่หกเหลี่ยมด้านบน(หกเหลี่ยมด้านเท่ายาว ด้านละ 76.9 mm) ของเตาลบด้วยพื้นที่หน้าตัดของ grip (ขนาด 45x45 mm)

พื้นที่ของผนังเตาบนและล่าง	A	=	13356 mm <sup>2</sup>
อุณหภูมิผิวห้องอบ	T <sub>in</sub>	=	880°C
อุณหภูมิผิวนอก	T <sub>out</sub>	=	30°C
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มีค่าการนำความร้อน	k <sub>fiber</sub>	=	0.198 W/m•K
ความหนาของฉนวน	L	=	38 mm

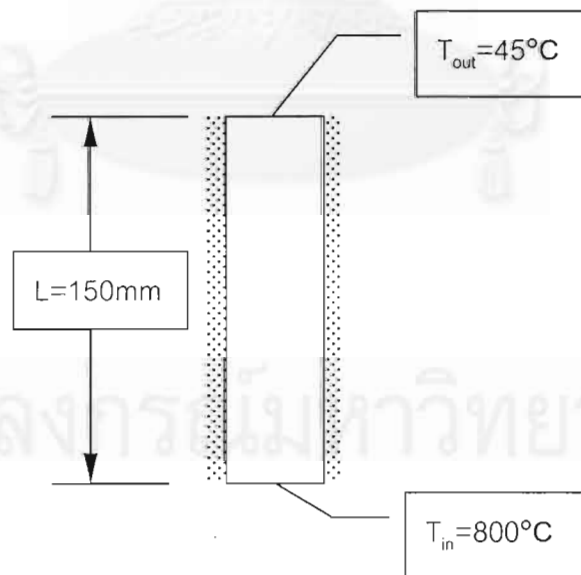
$$Q_{3'} = \frac{k_{\text{fiber}} A}{L} (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$$

$$= 53.59 \text{ W}$$

รวมทั้งด้านบนและด้านล่างของเตาจะได้พลังงานสูญเสีย

$$Q_3 = 107 \text{ W}$$

ความร้อนที่สูญเสียผ่าน grip



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะที่ใช้ประมาณความร้อนผ่านทาง grip

พื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณในส่วนนี้ ได้มาจากการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ยื่นเข้ามาในเตาความร้อน โดยกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดในทิศทางทแยงของความร้อน 45 x 45 mm

พื้นที่หน้าตัดของ grip	A	=	2025 mm <sup>2</sup>
อุณหภูมิภายในเตา	T <sub>in</sub>	=	800°C
อุณหภูมิภายนอกเตา	T <sub>out</sub>	=	45°C
ความยาวของ grip	L	=	150 mm

$$Q_{4'} = \frac{k_{\text{steel}} A}{L} (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$$

$$= 611.55 \text{ W}$$

รวมความร้อนสูญเสียทั้งตัวบนและล่าง จะได้  $Q_4 = 1222 \text{ W}$

นำค่าทั้งหมดมารวมกัน

$$Q_t = 15 + 775 + 107 + 1222$$

$$= 2119 \text{ W}$$

หากอุปกรณ์ให้ความร้อนมีประสิทธิภาพ 70% ค่าปลอดภัยการให้ความร้อนของหลอดความร้อนมีค่า 1.1

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

$$P = 1.1 \times \frac{Q}{\eta}$$

$$= 3330 \text{ W}$$

เลือกกำลังไฟฟ้าใช้ เป็น 3500 W

2. ขนาดหลอดความร้อน จากการเลือกใช้ชนิดของขดลวดคือ กานแทล A-1 จากรูปที่ 2.4 ที่อุณหภูมิของเตา 880 องศาเซลเซียส จะได้ค่าการแผ่รังสีประมาณ 4.5 W/cm<sup>2</sup> จากรูปที่ 2.3 ได้ค่าตัวประกอบอุณหภูมิ 1.03 และค่า resistivity ดูได้จากภาคผนวก ง มีค่า 1.39 ขนาดหลอดความร้อนหาได้จากสมการที่ 2.1

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{U}\right)^2 \frac{\rho C_t}{p}}$$

$$= 1.484 \text{ mm.}$$

เนื่องจากการเลือกขดลวดความร้อนเป็นขนาดมาตรฐาน ซึ่งจะไม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณได้ผู้วิจัยได้เลือกขดลวดความร้อนที่โตกว่า โดยเลือกขนาด 1.8 mm

3. ขนาดความยาวลวดความร้อน จากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้แทนค่าลงในสมการที่ 2.2 จะได้

$$R_T = \frac{U^2}{P}$$

$$= 13.892 \ \Omega$$

เนื่องจากค่าความต้านทานที่ได้เป็นความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งาน หาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (20 องศาเซลเซียส) ได้โดยใช้สมการ 2.3

$$R_{20} = \frac{R_T}{C_T}$$

$$= 13.426 \ \Omega$$

เมื่อได้ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องแล้ว หาค่าความยาวของลวดความร้อนได้โดยใช้สมการ 2.4

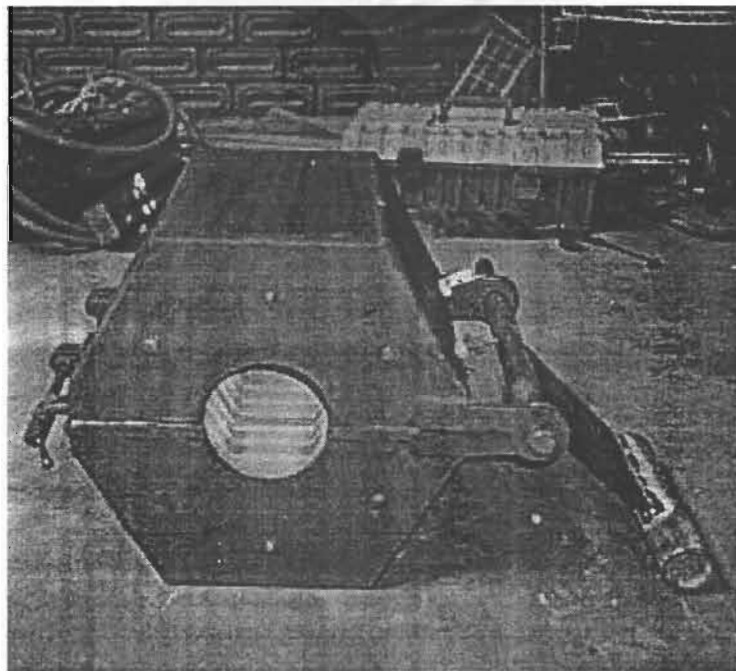
$$L = \frac{RA_c}{\rho}$$

$$= 16.705 \text{ m.}$$

4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดความร้อน เมื่อได้ความยาวของลวดความร้อน ขั้นต่อไปจะเป็นการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดความร้อน และระยะพิชที่ใช้ จากตารางที่ 2.2 คานแทลได้กำหนดอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อนเป็น 6 ถึง 8 เพราะฉะนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดความร้อนมีค่าเท่ากับ 10.8 mm ถึง 14.4 mm เลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดความร้อนเป็น 11 mm

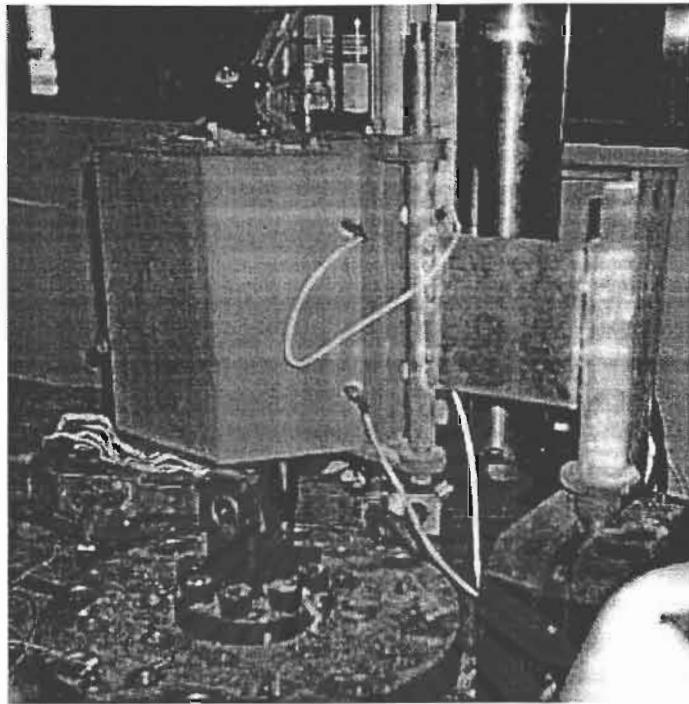
ส่วนระยะพิชได้กำหนดระยะพิชของขดลวดความร้อนไว้ที่ 2 ถึง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางลวด นั่นคือระยะพิชต้องมีค่าระหว่าง 3.6 mm ถึง 5.4 mm

ตามขนาดต่าง ๆ ของขดลวด จะทำการแบ่งขดลวดออกเป็น 12 ส่วน แล้วนำไปติดตั้งบนผนังเตาที่จัดทำขึ้น ทำการต่อปลายลวดความร้อนของปลายแต่ละด้านเข้าด้วยกัน (ต่ออนุกรม) โดยที่ท่าเช่นนี้เพื่อสะดวกกับการซ่อมในกรณีที่ขดลวดความร้อนขาด

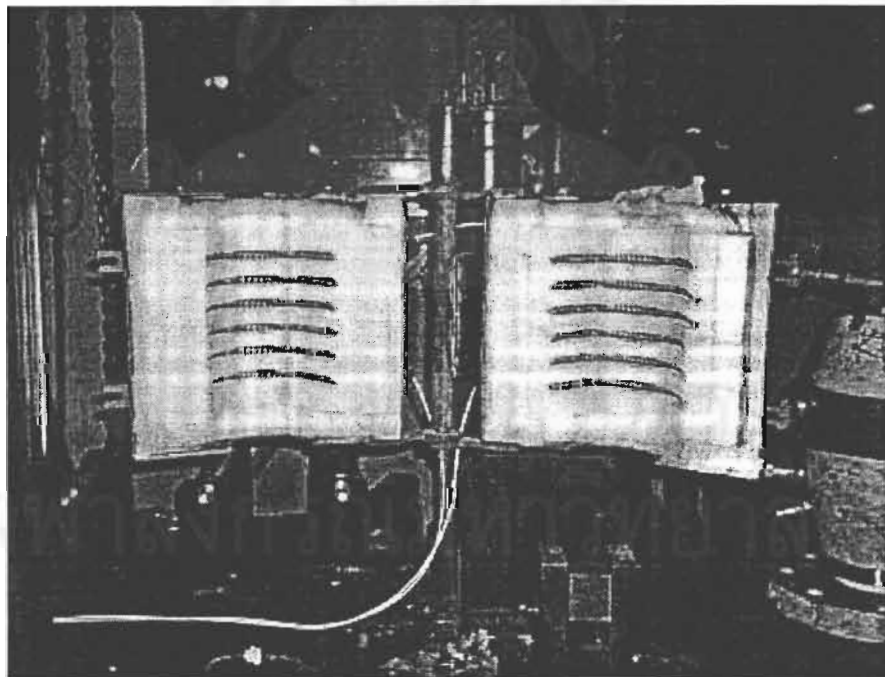


รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายเตา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายเตา ขณะติดตั้งบนเครื่องทดสอบ(ด้านหลัง)



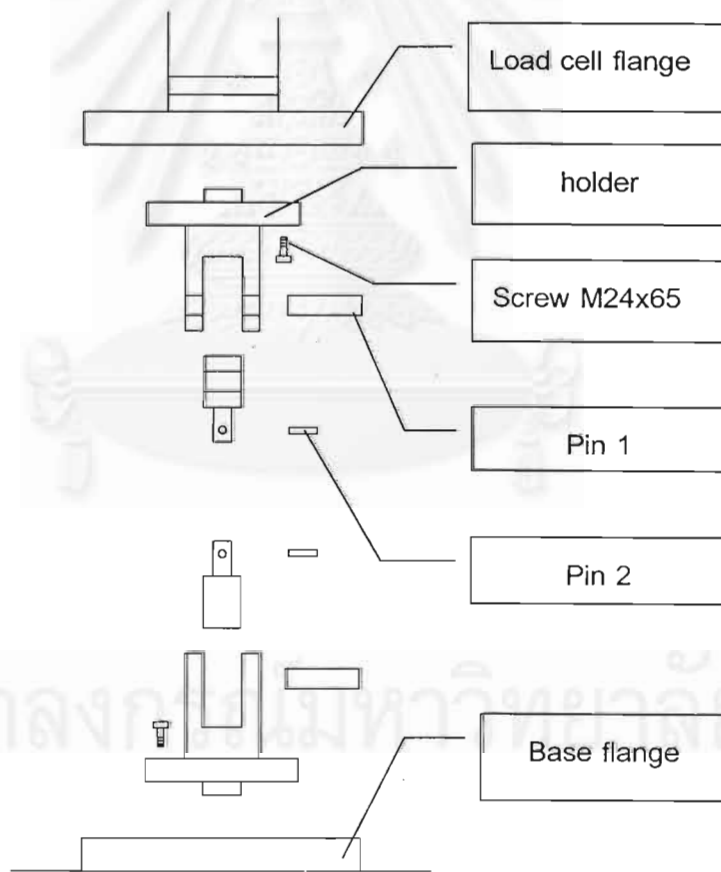
รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายเตา ขณะติดตั้งบนเครื่องทดสอบ(ด้านหน้า)

สำหรับแบบซึ่งแสดงรายละเอียดของเตา จะแสดงไว้ในภาคผนวก ค

### บทที่ 3

#### การออกแบบอุปกรณ์จับยึด

การออกแบบอุปกรณ์จับยึดในงานวิจัย มีจุดประสงค์ให้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถป้องกันระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้มีการสะสมของพลังงานภายในอุปกรณ์จับยึด และทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุปกรณ์จับยึดนั้นได้ยึดกับระบบเครื่องทดสอบคือระบบสร้างภาระ ระบบสร้างภาระดังกล่าวไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ อาจทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องทดสอบ ดังนั้นอุปกรณ์จับยึดต้องมีลักษณะพิเศษจากอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิม โดยมีระบบป้องกันความร้อนขึ้นเสริมจากระบบการใช้งานที่มีอยู่เดิมบนเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.1 แสดงการจับยึดของอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบ และชื่อเรียกที่ใช้ในงานวิจัย

พิจารณารูป 3.1 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์จับยึดแบบ CT ของเครื่องทดสอบเดิม ต้องใช้สลักหมายเลข 2 (pin 2) ยึดกับตัวยึด (grip) และใช้สลักหมายเลข 1 (pin 1) กับที่ยึด (holder) ซึ่งยึดติดกับระบบสร้างภาระ (load cell flange) ด้วยสกรู (M24x65) ในงานวิจัย ต้องสร้างระบบป้องกันความร้อนขึ้น ผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะทำระบบป้องกันอุณหภูมิ โดยให้การเจาะนำวงจรน้ำเพื่อนำความร้อนโดยการผ่านน้ำเข้าไปพาความร้อนออกจากอุปกรณ์จับยึด และจากลักษณะการทำงานของเครื่องจับยึดบนเครื่องทดสอบ สามารถทำวงจรน้ำได้ในตำแหน่งของ holder หรือ ตำแหน่งของ grip อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดของ holder ทั้งด้านบนและด้านล่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของ flange ณ ตำแหน่งที่ยึดติดกับ load cell flange และ base flange มีขนาด 180 mm และความยาวที่ใช้ไม่ต่ำกว่า 150 mm ถ้าระบบระบายความร้อนถ้าถูกสร้างขึ้นในส่วนนี้ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุในส่วนนี้สูงกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างระบบป้องกันความร้อนที่ grip ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พิจารณาการออกแบบระบบป้องกันความร้อนที่ grip เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุ

จากแนวความคิดโดยการใช่วงจรน้ำในการพาความร้อนออกจากอุปกรณ์จับยึดทำให้ต้องศึกษาความรู้พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน ความรู้พื้นฐานของการพาความร้อนแบบบังคับ ลักษณะของการไหล จึงเป็นส่วนช่วยในการออกแบบลักษณะของ grip ต้นแบบ ดังนั้นในบทนี้จึงได้มีความรู้พื้นฐานดังกล่าวแสดงไว้พอสังเขป ในภาคผนวก ก

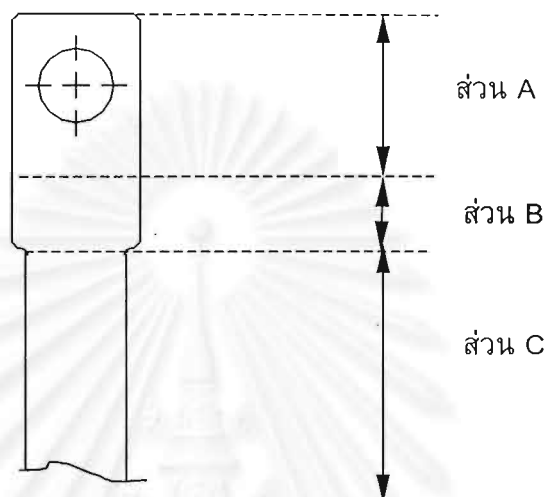
### การออกแบบต้นแบบ grip

การออกแบบส่วนนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้ต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองว่าระบบป้องกันความร้อน ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ว่าอุณหภูมิที่ผิวบริเวณที่ grip สัมผัสกับผิวของ holder จะต้องไม่เกิน  $45^{\circ}\text{C}$  (ต่อไปจะเรียกผิวนี้ว่าผิวควบคุม) จากการที่ไม่มีความรู้พื้นฐานในการระบายความร้อนในการเจาะรูเพื่อเดินวงจรน้ำในลักษณะดังกล่าว ผู้วิจัยได้ใช้ความรู้พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะที่เป็นท่อมี่ความหนา โดยมองส่วนที่ต้องการระบายความร้อนเป็นท่อมี่ความหนาที่มีค่า ๆ หนึ่ง ความหนาของท่อมี่นี้ ต้องมีรัศมีจนถึงส่วนควบคุมอุณหภูมิผิว และตั้งสมมุติฐานให้ผิวนอกของท่อมี่อุณหภูมิคงที่ตามที่อุณหภูมิผิวกำหนด เป็นเพียงแนวทางเริ่มต้นเพื่อออกแบบต้นแบบ และจะได้นำต้นแบบไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

เพื่อความเข้าใจเป็นอันเดียวกันผู้วิจัยจะใช้ชื่อเรียกตามรูปที่ 3.2 โดยแบ่งส่วนต่าง ๆ ของ grip ออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้ ส่วน A เป็นส่วนที่ grip ต่อกับ holder และเป็นส่วนที่ต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน  $45^{\circ}\text{C}$  ส่วน B จะเป็นส่วนที่ผู้วิจัยจะทำการเจาะเพื่อสร้างวงจรน้ำ (จะ



เรียกว่าเป็นส่วนป้องกันความร้อน) และพาความร้อนที่ผ่านมาจาก grip ระบายออกให้หมดเพื่อไม่ให้ความร้อนสะสมจนทำให้อุณหภูมิของผิวควบคุมสูงขึ้น ส่วน C เป็นส่วนที่อยู่ภายในเตาความร้อน

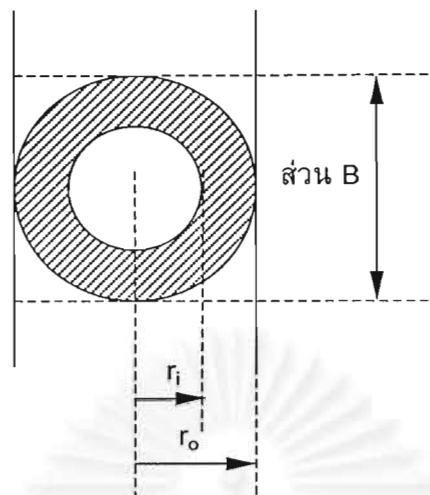


รูปที่ 3.2 รูปแบ่งส่วนของ grip ออกเป็นสามส่วนให้เห็นตำแหน่งการใช้งาน

พิจารณาส่วน A ส่วน A เป็นส่วนที่ grip ยึดติดกับ holder โดยใช้สลัก (Pin 1) ในส่วนนี้ไม่สามารถแก้ไขขนาดได้

พิจารณาส่วน B เป็นส่วนของการป้องกันความร้อน การประมาณค่าความร้อนจะมองส่วนป้องกันความร้อนเป็นเสมือนท่อที่มีความหนาผนังอยู่ข้างใน โดยมีรัศมีรูเจาะเป็น  $r_i$  และรัศมีของความหนาท่อเป็น  $r_o$  รัศมีของความหนาท่อจะต้องโดนจนถึงบริเวณของผิวควบคุม แสดงดังรูป 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงแนวความคิดเสมือนมีท่อซึ่งมีความหนาอยู่ในส่วน B (กรณีเจาะรูเดียว)

โดยตั้งค่าคงที่ต่าง ๆ ไว้ดังต่อไปนี้

ที่รัศมีขอบนอกมีอุณหภูมิคงที่ ( $r_o$ )	=	45°C
อุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{m,i}$ )	=	30°C
อัตราการไหลของน้ำคงที่ $\dot{m}$	=	0.3 kg/s

แบบที่ 1 กรณีที่เจาะรูเดียว  $r_o$  จะต้องมามีค่า 30 mm

กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการเจาะ 10 mm เพราะฉะนั้น  $r_i = 5$  mm เพราะฉะนั้นจะได้ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เป็น

ใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำที่อุณหภูมิ 30°C จะได้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$c_p$	=	4.179 kJ/kg•K
$\mu$	=	$855 \times 10^{-6}$ N•s/m <sup>2</sup>
$k$	=	$613 \times 10^{-3}$ W/m•K

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}}{2\pi r_i \mu}$$

$$= 4.468 \times 10^4$$

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวก ก เลือกสมการที่ใช้หา ตัวเลขนัสเซิลต์ ได้ค่า

$$\begin{aligned} \text{Nu}_D &= 0.023\text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{0.4} \\ &= 244.37 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$\begin{aligned} h &= \frac{\text{Nu}_D k_{\text{water}}}{2r_i} \\ &= 4.494 \times 10^4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned}$$

จากข้อกำหนดของการใช้สมการหาตัวเลขที่เลือกใช้  $\text{Nu}_D$  จะเห็นว่าค่าของ  $L/D$  ต้องมีค่ามากกว่า 10 แต่ในชิ้นงานที่ออกแบบ มีค่า  $L/D$  เพียง 4.5 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง แต่จากความรู้พื้นฐานบริเวณทางเข้าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าสูงกว่า ในบริเวณที่มีสภาวะการปรับตัว

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการการนำความร้อนในท่อกลม และจากสมการการพาความร้อนในท่อกลมที่อุณหภูมิผิวคงที่ โดยให้

$$q = \dot{m}c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad \text{ก}$$

$$q = \frac{2\pi L_2 k}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} (T_{r,o} - T_{r,i}) \quad \text{ข}$$

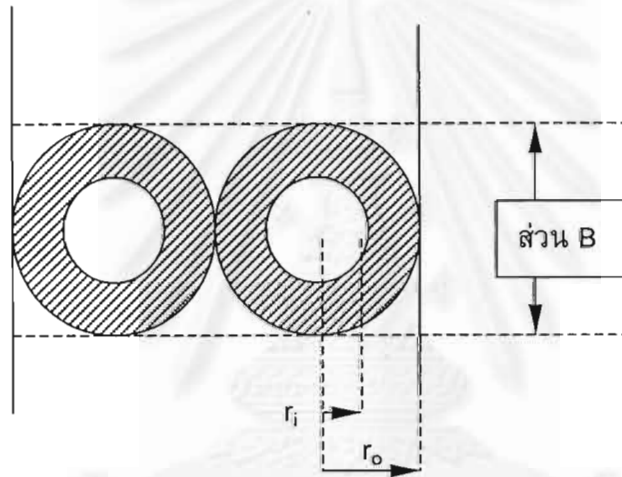
$$q = 2\pi r_i L_2 h \left[ \frac{(T_{r,i} - T_{m,out}) - (T_{r,i} - T_{m,in})}{\ln\left(\frac{T_{r,i} - T_{m,out}}{T_{r,i} - T_{m,in}}\right)} \right] \quad \text{ค}$$

แก้สมการ ก ข และ ค

จะได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนประมาณ 123 W

แบบที่ 2 กรณีเจาะ 2 รูและให้  $r_o$  เป็น 15 mm

จากสมการที่ ข จะพบว่า การลด  $r_o$  ทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ พิจารณากรณีที่ลด  $r_o$  เป็น 15 mm โดยใช้สภาวะเดิม จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นเป็น 185 W

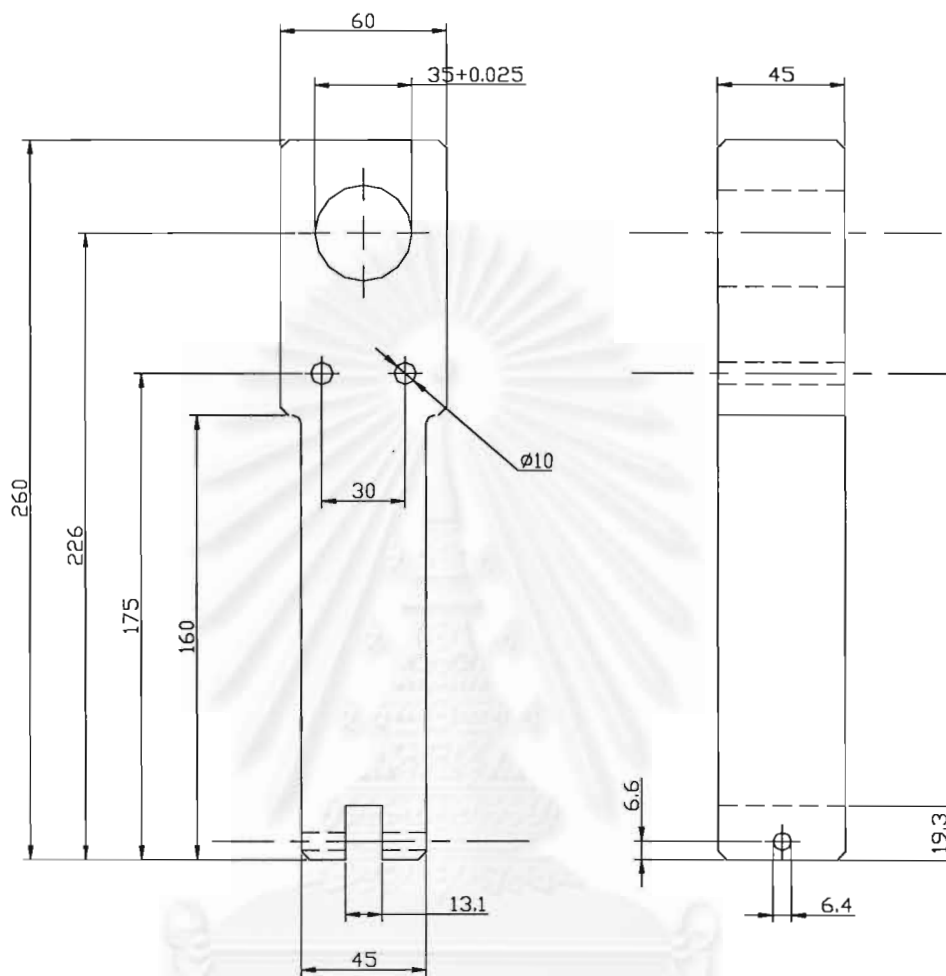


รูปที่ 3.4 แสดงแนวความคิดเสมือนมีท่อซึ่งมีความหนาอยู่ในส่วน B (กรณีเจาะ 2 รู)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ้าเพิ่มการเจาะเป็นการเจาะสองรู โดยเว้นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเป็น 30 mm จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น 368 W ซึ่งน่าจะพอเพียงกับการระบายความร้อนออกได้

พิจารณาส่วน c ภายในเตาจะมีส่วนของการยึดชิ้นงานทดสอบ CT ขนาดในส่วนนี้ ได้ถูกกำหนดโดยขนาดของชิ้นงานทดสอบ CT โดยมีมาตรฐาน ASTM E399 เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดต่าง ๆ ของ grip

เพราะฉะนั้น เลือกรการเจาะ 2 รูเป็นส่วนการป้องกันความร้อน และกำหนดแบบเบื้องต้นตามรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดง grip ดันแบบเพื่อใช้ทดสอบระบบป้องกันความร้อน

เมื่อได้ต้นแบบในการใช้ในการทดสอบแล้วขั้นต่อไปเป็นการนำต้นแบบ ไปทดสอบการป้องกันความร้อนว่าสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมายที่ได้วางไว้หรือไม่ ซึ่งได้ทดสอบตามวิธีการตามบทที่ 4

## บทที่ 4

### การทดลองการระบบป้องกันความร้อน

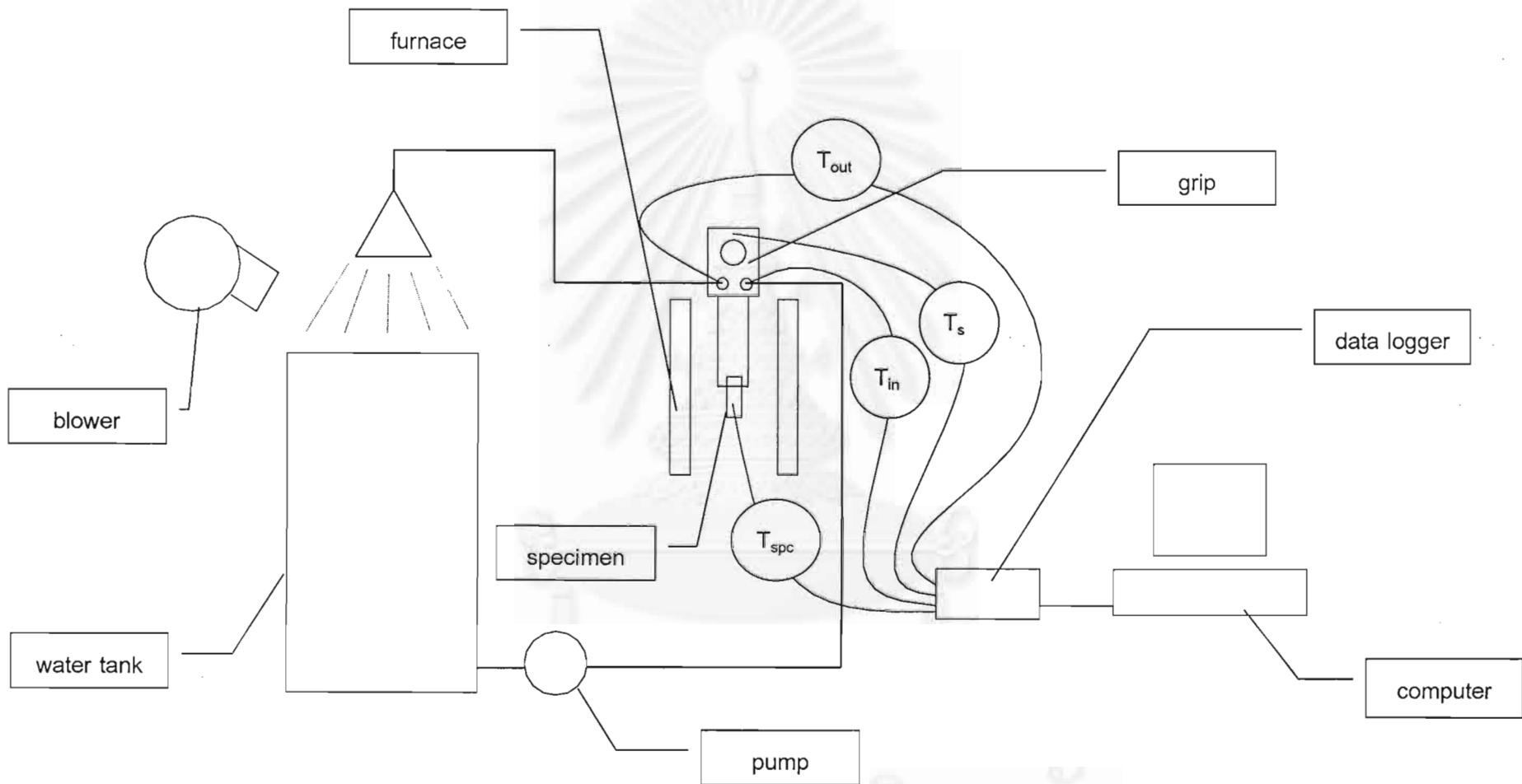
การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อทดสอบการป้องกันความร้อนของ grip ที่ทดลองออกแบบขึ้น มีจุดประสงค์เพื่อดูผลของอุณหภูมิผิวควบคุม และหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งออกจากเตา โดยการนำมาทาง grip ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ นั่นก็คือสามารถบอกได้ว่ารูปแบบการเจาะวงจรมันที่ทดลองสร้างขึ้นสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิของผิวควบคุมไม่ให้เกิน  $45^{\circ}\text{C}$  ได้หรือไม่ และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาอุปกรณ์ต่อไป

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. grip ต้นแบบ
2. เตาสร้างความร้อน ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น
3. ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ใช้เป็นตำแหน่งเทียบอุณหภูมิที่ต้องการ
4. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermocouple) ซึ่งเป็นแบบ K อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (data logger) ซึ่งสามารถต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ และสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ตลอดเวลา
5. บั๊มน้ำ ใช้สร้างอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่วงจรมันน้ำ
6. ถังน้ำ สายน้ำ และเครื่องเป่าลม (blower) อุปกรณ์ในข้อนี้ ใช้ในการระบายความร้อนที่ได้จาก grip มาระบายทิ้งสู่บรรยากาศ

#### วิธีการทดสอบ

การทดสอบเริ่มจากการเปิดบั๊มน้ำให้ทำงาน วัดอัตราการไหลของน้ำ และเริ่มการทดลอง โดยกำหนดอุณหภูมิ  $T_{\text{spc}}$  ให้ได้อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ปล่อยให้ทิ้งไว้ 2-4 ชั่วโมงเริ่มเก็บค่าอุณหภูมิทุกชั่วโมงจนครบ 20 ชั่วโมง (ดูรูปที่ 4.1 ประกอบ)เมื่อทดสอบที่ระดับอุณหภูมิที่  $100^{\circ}\text{C}$  แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น  $200^{\circ}\text{C}$  จนถึงอุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิ

### ผลการทดลอง

อัตราการไหลของน้ำ  $m = 0.286$  กิโลกรัมต่อวินาที

ตาราง 4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชั้นงานทดสอบ  $100^{\circ}\text{C}$

ชั่วโมงที่	$T_{\text{spc}}$	$T_{\text{in}}$	$T_{\text{out}}$	$T_s$
1	108.8	29.7	29.8	30.4
2	108.8	29.8	29.8	30.4
3	108.7	29.7	29.7	30.3
4	108.6	29.6	29.7	30.3
5	108.5	29.6	29.7	30.3
6	108.4	29.7	29.7	30.3
7	108.2	29.7	29.8	30.4
8	108.7	29.7	29.8	30.4
9	108.8	29.8	29.9	30.4
10	108.8	29.8	29.9	30.4
11	108.6	29.8	29.9	30.5
12	108.5	29.8	29.9	30.5
13	108.4	29.7	29.7	30.3
14	108.2	29.8	29.8	30.3
15	108.6	29.8	29.9	30.5
16	108.8	29.7	29.8	30.5
17	108.7	29.8	29.9	30.5
18	108.7	29.7	29.7	30.5
19	108.6	29.8	29.9	30.5
20	108.4	29.6	29.7	30.4
เฉลี่ย	108.6	29.7	29.8	30.4
S.D	0.2	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ตาราง 4.2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 200°C

ชั่วโมงที่	T <sub>spc</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	T <sub>s</sub>
1	209.4	29.9	30.0	31.4
2	209.1	29.9	30.1	31.6
3	208.5	29.9	30.1	31.5
4	209.5	29.9	29.9	31.5
5	209.4	30.1	30.1	31.6
6	209.0	30.0	30.0	31.6
7	209.1	29.9	30.1	31.5
8	209.5	30.0	30.1	31.5
9	209.1	30.0	30.2	31.6
10	208.7	29.9	30.0	31.5
11	209.5	29.9	30.0	31.5
12	209.4	30.1	30.1	31.5
13	209.0	30.1	30.1	31.5
14	209.0	29.9	30.0	31.5
15	209.5	30.1	30.1	31.5
16	209.2	29.9	30.0	31.5
17	208.7	29.9	30.1	31.6
18	209.5	30.0	30.1	31.6
19	209.5	30.0	30.1	31.6
20	209.1	30.0	30.0	31.6
เฉลี่ย	209.2	30.0	30.0	31.5
S.D.	0.3	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชั้นงานทดสอบ 300°C

ชั่วโมงที่	$T_{spc}$	$T_{in}$	$T_{out}$	$T_s$
1	309.4	29.8	30.0	33.7
2	310.3	29.9	30.1	33.7
3	310.1	30.0	30.1	33.7
4	309.3	29.9	30.2	33.8
5	310.3	30.0	30.2	33.8
6	309.8	29.9	30.1	33.8
7	309.8	30.0	30.2	33.8
8	310.2	29.9	30.1	33.7
9	309.6	30.0	30.2	33.8
10	310.2	29.9	30.1	33.7
11	310.2	29.9	30.1	33.7
12	309.4	29.9	30.1	33.7
13	310.3	29.9	30.1	33.8
14	310.0	30.0	30.2	33.8
15	309.5	30.0	30.1	33.8
16	310.4	30.0	30.2	33.8
17	309.7	30.0	30.2	33.8
18	309.9	29.9	30.2	33.8
19	310.2	29.9	30.2	33.8
20	309.5	30.0	30.2	33.8
เฉลี่ย	309.9	30.0	30.1	33.8
S.D.	0.4	0.1	0.1	0.0

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 400°C

ชั่วโมงที่	$T_{spc}$	$T_{in}$	$T_{out}$	$T_s$
1	404.8	30.0	30.4	36.4
2	404.2	30.1	30.3	36.4
3	404.8	30.3	30.5	36.4
4	404.4	30.1	30.3	36.5
5	404.4	30.1	30.4	36.6
6	404.8	30.1	30.3	36.6
7	403.9	30.1	30.2	36.5
8	404.8	30.2	30.5	36.7
9	403.7	30.0	30.3	36.5
10	404.8	30.1	30.4	36.7
11	403.9	30.1	30.2	36.5
12	405.2	30.4	30.3	36.5
13	404.3	30.2	30.4	36.5
14	404.7	30.3	30.4	36.5
15	404.5	30.1	30.4	36.5
16	404.3	30.0	30.3	36.6
17	404.7	30.3	30.5	36.6
18	403.8	30.1	30.4	36.7
19	404.8	30.3	30.5	36.7
20	403.6	30.3	30.5	36.7
เฉลี่ย	404.4	30.2	30.4	36.6
S.D.	0.4	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 500°C

ชั่วโมงที่	T <sub>spc</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	T <sub>s</sub>
1	502.9	31.1	31.2	38.8
2	502.8	30.9	31.2	38.7
3	503.5	31.0	31.2	38.8
4	502.4	30.9	31.2	38.8
5	503.5	30.9	31.1	38.8
6	502.1	30.9	31.2	38.7
7	503.3	30.9	31.2	38.8
8	502.8	30.9	31.1	38.8
9	503.0	31.0	31.3	38.8
10	503.5	31.0	31.2	38.9
11	502.5	31.0	31.1	38.7
12	503.6	30.9	31.1	38.7
13	502.1	30.9	31.3	38.8
14	503.5	31.1	31.3	38.9
15	502.7	31.1	31.2	38.9
16	503.0	30.9	31.1	38.8
17	503.5	31.1	31.3	38.8
18	502.6	31.0	31.2	38.8
19	503.6	30.9	31.2	38.8
20	502.2	31.1	31.4	38.9
เฉลี่ย	503.0	31.0	31.2	38.8
S.D.	0.5	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 600°C

ชั่วโมงที่	T <sub>spc</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	T <sub>s</sub>
1	599.6	30.1	30.5	41.4
2	600.8	30.0	30.4	41.4
3	600.7	30.1	30.4	41.3
4	599.7	30.1	30.5	41.3
5	600.8	30.0	30.4	41.4
6	600.6	30.1	30.4	41.4
7	599.8	30.1	30.3	41.4
8	600.9	30.0	30.3	41.3
9	600.4	30.1	30.3	41.3
10	599.7	30.0	30.3	41.2
11	600.8	30.1	30.3	41.3
12	600.3	30.1	30.3	41.3
13	599.8	30.2	30.5	41.3
14	600.8	30.0	30.3	41.3
15	600.3	30.2	30.4	41.3
16	599.7	30.0	30.3	41.2
17	600.9	30.1	30.3	41.2
18	600.3	30.3	30.5	41.5
19	599.8	30.2	30.5	41.5
20	600.9	30.2	30.6	41.5
เฉลี่ย	600.3	30.1	30.4	41.3
S.D.	0.5	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 700°C

ชั่วโมงที่	T <sub>spc</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	T <sub>s</sub>
1	697.4	30.1	30.5	43.4
2	697.5	30.1	30.5	43.3
3	696.4	30.2	30.6	43.5
4	696.1	30.2	30.6	43.6
5	697.1	30.2	30.6	43.7
6	697.6	30.2	30.6	43.8
7	696.9	30.2	30.5	43.6
8	695.9	30.1	30.5	43.7
9	696.7	30.3	30.7	43.7
10	697.6	30.2	30.7	43.7
11	697.6	30.2	30.6	43.7
12	696.2	30.0	30.6	43.7
13	696.1	30.2	30.6	43.9
14	697.3	30.2	30.6	44.0
15	697.8	30.3	30.6	44.0
16	696.6	30.2	30.5	43.8
17	695.9	30.2	30.7	44.0
18	696.8	30.3	30.7	43.8
19	697.7	30.3	30.7	43.8
20	697.3	30.2	30.7	43.8
เฉลี่ย	696.9	30.2	30.6	43.7
S.D.	0.7	0.1	0.1	0.2

หมายเหตุ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง 4.8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ 800°C

ชั่วโมงที่	$T_{spc}$	$T_{in}$	$T_{out}$	$T_s$
1	791.0	30.3	31.1	46.9
2	790.2	30.6	31.1	46.8
3	789.9	30.5	31.0	46.9
4	790.5	30.6	31.0	47.1
5	791.1	30.7	31.1	47.1
6	792.0	30.6	31.0	46.9
7	792.1	30.5	31.1	46.8
8	791.6	30.7	31.1	46.8
9	790.6	30.6	31.1	46.9
10	790.2	30.7	31.2	46.9
11	790.0	30.4	31.0	47.1
12	790.9	30.4	31.1	47.2
13	791.6	30.5	31.0	46.9
14	792.0	30.7	31.1	46.9
15	792.1	30.7	31.1	46.9
16	791.1	30.6	31.1	46.8
17	790.4	30.5	31.0	47.0
18	790.1	30.5	31.1	47.0
19	790.3	30.6	31.1	47.0
20	791.2	30.7	31.1	47.0
เฉลี่ย	790.9	30.6	31.1	46.9
S.D.	0.8	0.1	0.1	0.1

หมายเหตุ S.D. เป็นส่วนเป็นเบนมาตรฐาน

### ผลสรุปจากระบบป้องกันความร้อน

จากผลการทดลองจะได้ว่ารูปแบบของ grip ที่ได้ทดลองออกแบบขึ้น สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ผิวควบคุมได้เป็นที่น่าพอใจ โดยเมื่ออุณหภูมิของทุกจุดอยู่ในสภาวะคงตัวจะมีระดับของอุณหภูมิ และอัตราการถ่ายเทความร้อนตามตารางที่ 4.9 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิผิว และการถ่ายเทความร้อน

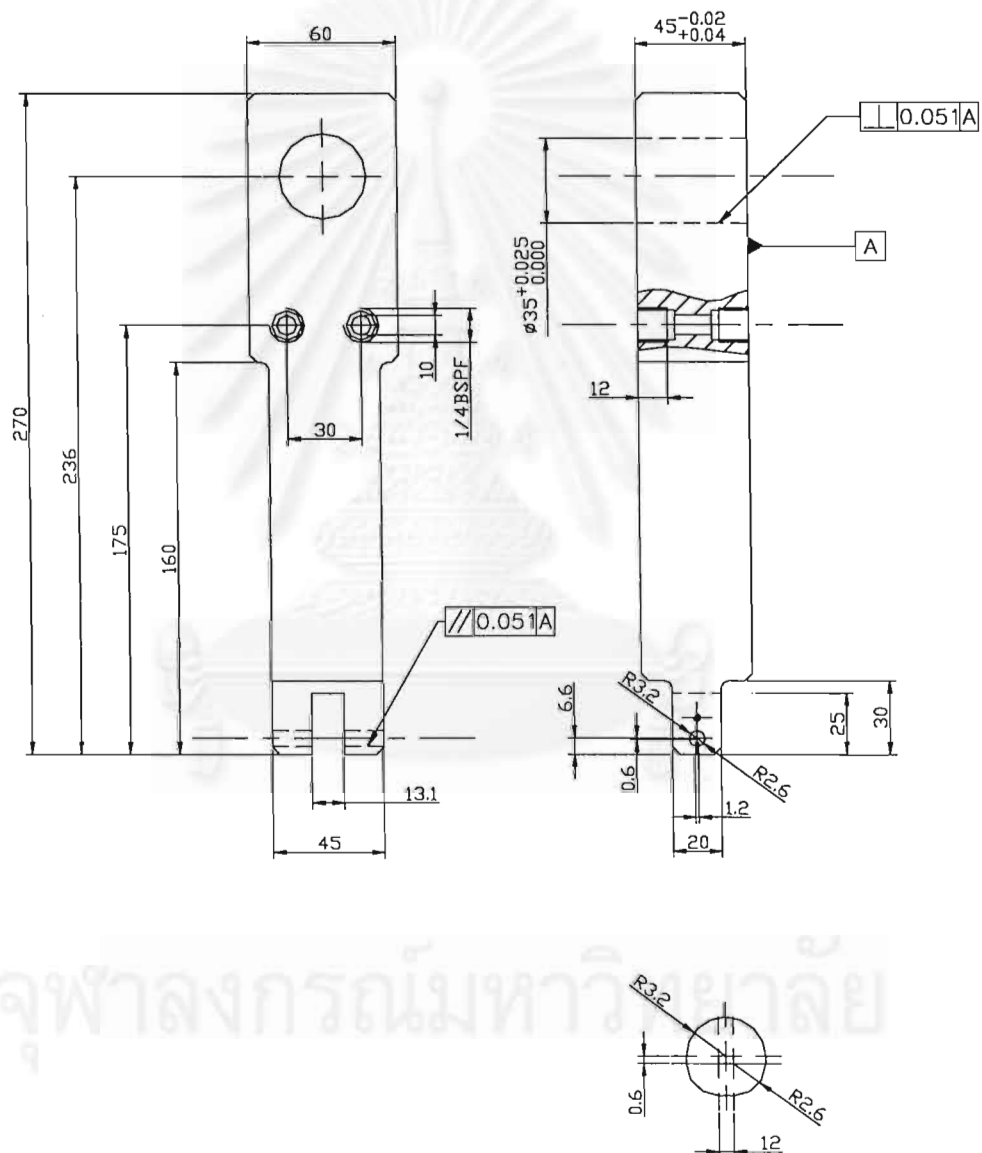
อุณหภูมิชิ้นงาน ทดสอบ (°C)	อุณหภูมิที่ผิว ควบคุม (°C)	อุณหภูมิน้ำเข้า (°C)	อุณหภูมิน้ำออก (°C)	การถ่ายเทความร้อน (W)
100	30.4	29.7	29.8	119.5
200	31.5	30.0	30.1	119.5
300	33.8	29.9	30.1	239.0
400	36.6	30.2	30.4	239.0
500	38.8	31.0	31.2	239.0
600	41.3	30.1	30.4	358.6
700	43.7	30.2	30.6	478.1
800	46.9	30.6	31.1	597.6

จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 100 ถึง 700°C อุณหภูมิที่ผิวควบคุมไม่เกิน 45°C แต่ในอุณหภูมิ 800°C อุณหภูมิผิวควบคุมมีค่าเกิน 45°C เล็กน้อย อย่างไรก็ตามระดับของอุณหภูมิที่ผิวยังคงที่ตลอดเวลาในการทดลองจึงสรุปว่า รูปแบบของการป้องกันความร้อนที่ทดลองออกแบบขึ้นสามารถใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ผิวควบคุมได้เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.286 kg/s



### grip ที่ออกแบบใช้งานจริง

จากผลสรุปที่ได้จากการทดลองระบบป้องกันความร้อน ผู้วิจัยได้ออกแบบ grip สำหรับใช้ในการทดสอบจริง โดยมีขนาดสำหรับการทดสอบชิ้นงานทดสอบ CT ที่ใช้กับชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด  $W = 25.5 \text{ mm}$  และ  $B = 12.75 \text{ mm}$  โดยที่ขนาดและรูปแบบของ pin ส่วน C กำหนดขนาดจาก ASTM E399 เลือกใช้วัสดุ AISI4140 ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขนาดและรูปร่างของ grip ที่ได้ออกแบบเพื่อใช้งาน

## บทที่ 5

### การทดลองการนำไปใช้งานจริง

เมื่อระบบป้องกันความร้อนสามารถใช้งานได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทดสอบการนำไปใช้งานจริง โดยนำเตาที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 2 และ grip ที่ออกแบบ ในบทที่ 4 มาประกอบบนเครื่องทดสอบ โดยสมมุติสถานะการเป็นการทดสอบหา J-Integral (รายละเอียดของ J-Integral แสดงไว้ในภาคผนวก ข) ของวัสดุ ASME SA-355 Gr P22 ในสภาวะอุณหภูมิสูง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาของการนำไปใช้งาน ของเตาความร้อน และ grip ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น ดังนั้นการทดสอบของค่า J-Integral จึงเพียงนำผลมาเปรียบเทียบกับแนวโน้มของผลการทดสอบที่ทำภายใต้อุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิห้อง ไม่ได้เป็นค่าที่ถูกต้องที่สุด เนื่องการทดลองทดสอบในครั้งนี้ เป็นการทดสอบที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง การปฏิบัติการทดสอบใช้เวลานาน และค่อนข้างเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เครื่องทดสอบที่มีอยู่เดิมในกรณีที่ระบบป้องกันความร้อนเกิดเสียหายกระทันหัน จึงได้กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ 300°C เพื่อจะได้แก้ไขสถานะการได้ทันทั่วถึง

#### วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ASME SA-355 Gr P22 มีชื่อเรียกตามมาตรฐานว่า "Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe" เป็นท่อเหล็กกล้าที่ใช้งานที่อุณหภูมิและความดันสูง มีองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ASME SA-355 Gr P22

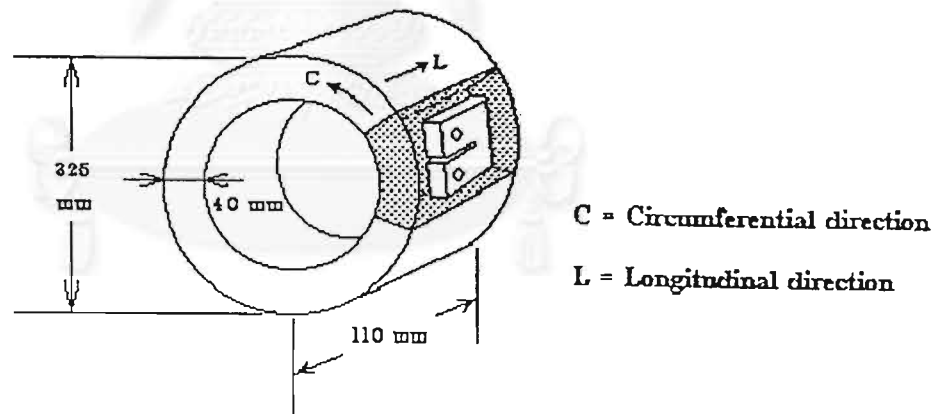
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0.087	0.531	0.014	0.007	0.23	1.186	0.761

ตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ASME SA-355 Gr P22

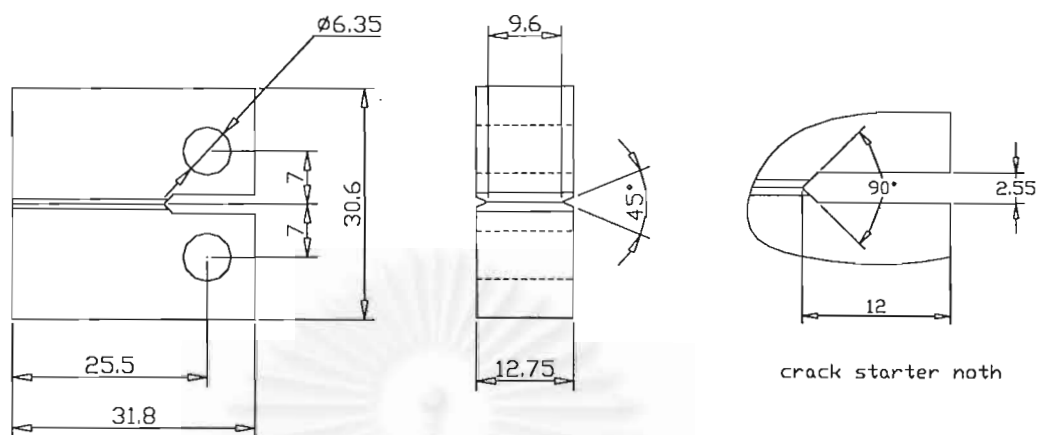
$\sigma_{ys}$ (Mpa)	$\sigma_{ys}$ (Mpa)	E (Gpa)	%Elongation	$\nu$	BHN
376	515	185	25	0.33	140

### รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ

รายละเอียดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีการทดสอบของ ASTM E399 : โดยนำเนื้อวัสดุจากการจัดวางแนวของชิ้นงานทดสอบในท่อเหล็ก(orientation)เป็นแบบ C-L ดังแสดงในรูป 5.1 และแสดงขนาดไว้ในรูปที่ 5.2

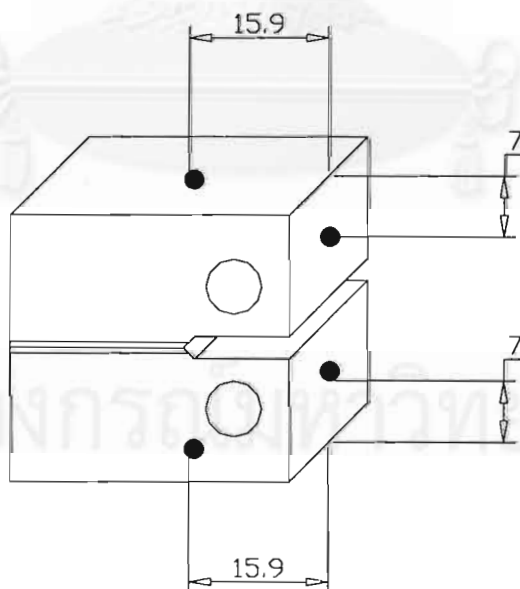


รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการจัดวางของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 5.2 แสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบแบบ CT

การทดสอบจำเป็นต้องติดตามขนาดของรอยร้าวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการวัดค่า resistivity เพื่อนำค่า resistivity มาเปรียบเทียบกับความยาวรอยร้าว การวัดค่าดังกล่าวใช้วิธียึดสายนำไฟฟ้า โดยติดตามตำแหน่งตามรูปที่ 5.3 ของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 5.3 แสดงตำแหน่งการติดสายนำสัญญาณไฟฟ้า

## เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นมีอุปกรณ์เพิ่มเติม และที่จัดสร้างขึ้น

1. เครื่องทดสอบ hydraulic servo testing machine ยี่ห้อ SAGINOMIYA ขนาด 30 ตัน มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1.1 hydraulic servo actuator ทำหน้าที่จับยึด และให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบ

1.2 hydraulic power supply ทำหน้าที่จ่ายกำลังดันไฮดรอลิกให้กับระบบเพื่อใช้ในการสร้างภาระ

1.3 computer controller ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการทดสอบต่าง ๆ เช่นการทดสอบแรงดึง การทดสอบค่าความต้านทานรอยร้าว ควบคุมตัวแปรในการสร้างภาระ เป็นต้น

2. เครื่องวัด resistivity ใช้สำหรับวัดค่า resistivity เพื่อหาความยาวรอยร้าวในความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น เครื่องวัดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เครื่อง AT& T Microhmeter 100 สำหรับการวัดค่า resistivity ของวัสดุ

3. กล้อง microscope เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความยาวรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ มีกำลังขยายเท่ากับ 100, 200, 400, และ 1000 เท่า โดยทำการอ่านความยาวรอยแตกร้าวจากไดอัลเกจซึ่งติดตั้งอยู่กับแท่นวางชิ้นทดสอบ ค่าความยาวรอยแตกร้าวที่อ่านได้ในไดอัลเกจมีความละเอียดถึงทศนิยมสองตำแหน่ง

4. เตาความร้อน และตัวควบคุมความร้อน ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิของ ชิ้นงานทดสอบ ให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการ

5. Grip ที่สร้างขึ้น ตามรูปที่4.2 ทำหน้าที่จับยึดชิ้นงานทดสอบ และป้องกันระดับอุณหภูมิขณะทดสอบไม่ให้ทำลายระบบของอุปกรณ์หลัก

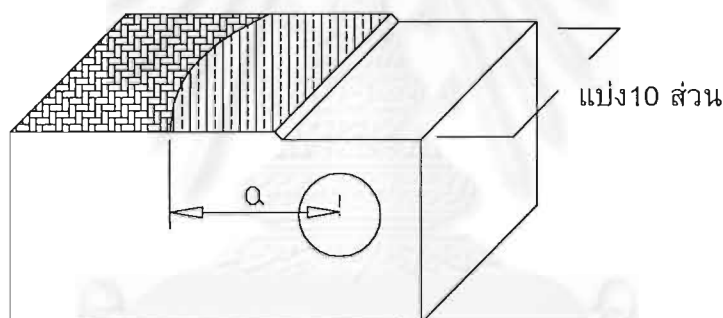
## ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบ J-Integral ครั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบ แบบ single specimen จึงต้องสามารถวัดความยาวรอยร้าวอย่างต่อเนื่องได้ ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า resistivity กับความยาวรอยร้าว ที่สภาวะที่ต้องการทดสอบก่อน หลังจากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์จากผลการทดลองมาติดตามความยาวรอยร้าวในการทดสอบ J-Integral

### ขั้นตอนการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าว และค่า resistivity

สำหรับชิ้นงานทุกชิ้นทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานทดสอบไปสร้างรอยร้าว โดยการใช้ภาชนะและทำภายใต้อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  จนคิดว่า ได้ความยาวรอยร้าวค่าหนึ่ง
2. หยุดเครื่องทดสอบไว้ที่ภาชนะเฉลี่ย และทำการวัดค่า resistivity
3. หยุดการทำความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นตัว
4. ทำภาชนะต่อชิ้นงานทดสอบต่อจนชิ้นงานทดสอบ แยกออกจากกัน
5. ทำการวัดความยาวรอยแตกร้าว โดยการแบ่งเป็น 10 ช่วง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย (รูปที่ 5.4)
6. นำค่าที่ได้ไปพล็อตแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวรอยแตกร้าว และค่า resistivity



รูปที่ 5.4 แสดงตำแหน่งในการวัดความยาวรอยแตกร้าว

### ขั้นตอนการทดสอบหาค่า J-Integral

การทดสอบ J-Integral ผู้วิจัยได้ทำตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ ASTM E813 ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ทำการสร้างรอยร้าวล้าให้กับชิ้นงานทดสอบ (fatigue precracking) ให้ได้อัตราส่วนของ  $a/W = 0.6$  โดยการกระทำได้ดังกล่าว ทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง และตรวจสอบค่า  $a/W$  จากการความสัมพันธ์ของ ขนาดรอยแตกร้าวกับค่า resistivity

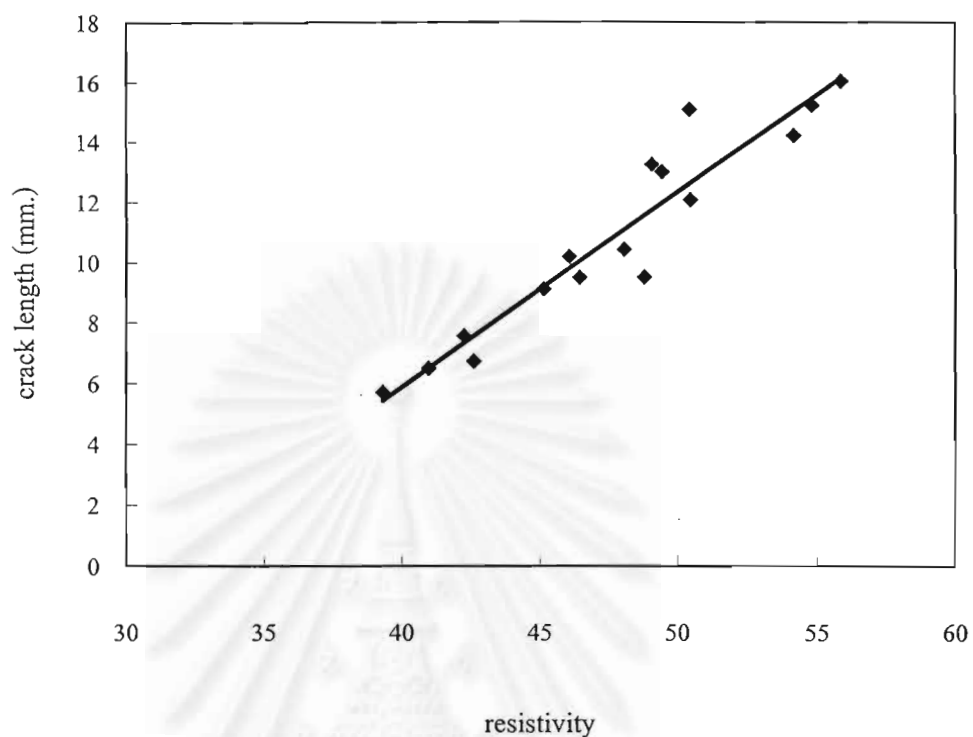
2. ให้ภาระดึงแบบ monotonic tension แก่ชิ้นงานทดสอบ พร้อมทั้งวัดค่า resistivity หยุดวัดเป็นช่วง ๆ
3. นำ P -  $\Delta$  record ที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่า J

### ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าว และค่า resistivity

ผลการทดลองวัดค่าความยาวรอยร้าว และค่า resistivity อยู่ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์รอยร้าว กับ resistivity

ชิ้นงานที่	resistivity	Crack (mm)
1	45.15	9.12
2	49.44	13.03
3	50.43	15.11
4	42.26	7.56
5	55.87	16.06
6	46.07	10.20
7	54.83	15.26
8	42.61	6.72
9	48.79	9.51
10	46.45	9.50
11	50.47	12.10
12	54.17	14.25
13	48.06	10.44
14	49.07	13.27
15	39.32	5.70
16	40.97	6.50



รูปที่ 5.5 แสดงของความยาวรอยร้าว กับ resistivity

นำค่าที่ทดลองได้มาสร้างความสัมพันธ์จะได้

$$a = 0.6483\rho - 20.061$$

$$R^2 = 0.9024$$

โดยที่

a แทน ความยาวรอยร้าว (mm)

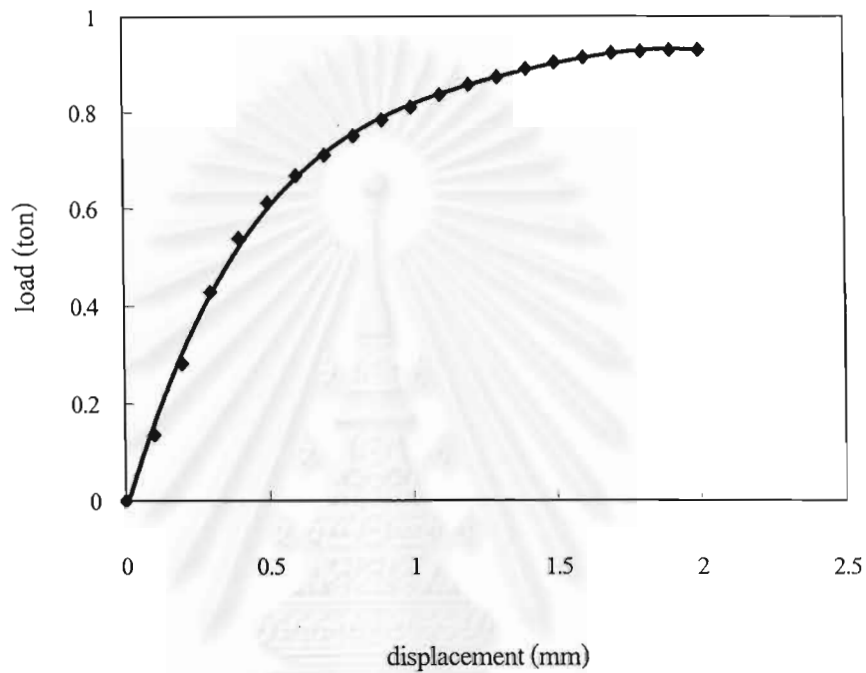
$\rho$  แทน resistivity

$R^2$  สัมประสิทธิ์ของการกำหนด (coefficient of determination)



### ผลการทดสอบ J-Integral

ผลการพล็อตข้อมูลของ load และ displacement ที่ได้บันทึกไว้ แสดงไว้ในรูป 6.6



รูปที่ 5.6 แสดง load –displacement

จากรูปแสดง load-displacement จะหา J โดยการประมาณโดยใช้

$$J = \frac{\eta A_{PL}}{B b_0}$$

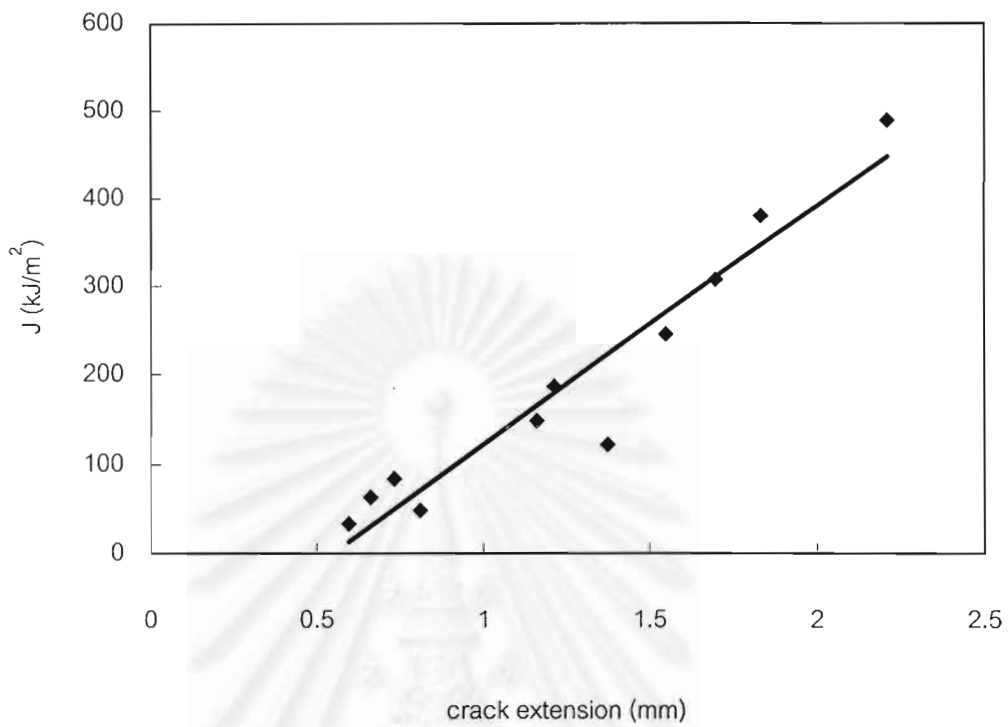
โดยใช้

$A_{PL}$  แทน พื้นที่ใต้ load-displacement

B แทน ความหนาของชิ้นทดสอบ

$b_0$  แทน ความยาวของส่วนที่เหลือ

$\eta$  แทน  $2+0.522b_0/W$

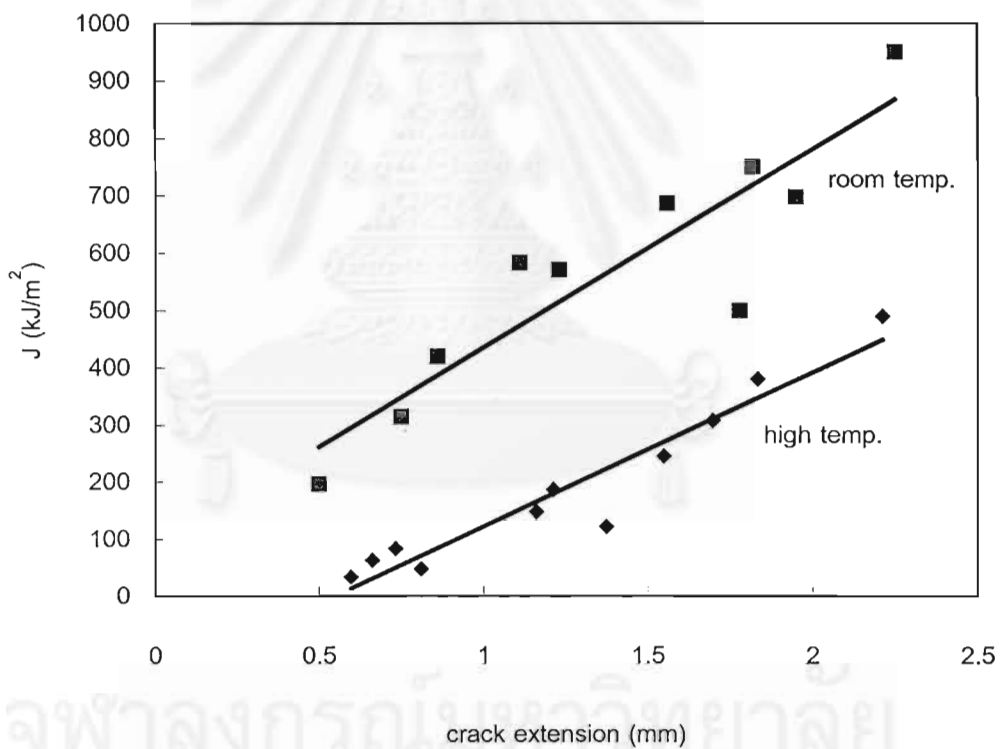


รูปที่ 5.7 แสดง crack extension - J-Integral

## บทที่ 6

### สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

จากการทดลองใช้ grip ที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นนำมาใช้งานหาค่า J-Integral ที่ระดับอุณหภูมิ 300°C เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา พบว่าความชันของเส้น ความสัมพันธ์ J-Integral ต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 6.1) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองโดยทั่วไป และ grip ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นสามารถใช้ทดสอบได้ โดยไม่ได้รับความเสียหายจากการทดสอบ



รูปที่ 6.1 แสดงผล J-Integral ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 300°C

## สรุปปัญหา และข้อเสนอแนะ

จากการใช้ grip ที่สร้างขึ้นโดยทำการทดลองร่วมกับการใช้เตาสร้างความร้อนพร้อมกัน ดังกล่าวใช้ดังกล่าวทำให้ทราบปัญหาของวิธีการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายใต้ อุณหภูมิสูงดังจะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. ปัญหาการติดตามขนาดของรอยร้าว เนื่องจากการตามขนาดของรอยร้าวไม่สามารถกระทำได้โดยการถอดออกมาวัด ผู้วิจัยจึงได้ทดลองแก้ปัญหาโดยการใช้การวัดค่า resistivity เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของรอยร้าวต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการติดตามรอยร้าวโดยใช้วิธีนี้ มีความผิดพลาดค่อนข้างสูง เนื่องจากช่วงของการวัดของเครื่องมือไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความแตกต่างได้ชัดเจน

ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการติดตามขนาดของรอยร้าวเพื่อให้ได้ขนาดของรอยร้าวที่ถูกต้องที่สุด

2. ปัญหาของการขาดระบบป้องกันเมื่อระบบระบายความร้อนเกิดทำงานผิดพลาด เช่น บั้มหยุดทำงาน จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวควบคุมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการพัฒนาในขั้นต่อไปควรมีสร้างระบบป้องกันความร้อนสำรอง ไว้ในกรณีดังกล่าว

3. ที่ปากเตา(ช่องใส่ grip) ส่วนนี้เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างความร้อนสูงที่อยู่ภายในเตากับบรรยากาศภายนอก ต้องมีการใช้ฉนวนที่ให้อุ่นได้ เพื่อป้องกันอากาศร้อนที่อยู่ในเตาออกมาสู่ภายนอก ในระหว่างการทดลองอากาศร้อนที่ออกมา ส่วนหนึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิบริเวณ และบริเวณผิวของ casing เตาผิวควบคุมสูงขึ้นด้วย ในส่วนนี้ควรออกแบบผนังเตาให้ครอบคลุม จนให้เหลือช่องที่ใส่ grip เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพื่อให้ให้ง่ายต่อการนำฉนวนมาติดตั้งในปากเตา

4. เวลาที่ใช้ในการทำให้สภาวะภายในเตาอยู่ในสภาวะคงตัว ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิในการทดลอง การทำการทดลองโดยไม่ปล่อยให้อุณหภูมิภายในเตา อยู่ในสภาวะคงตัว จะมีผลให้การยึดตัวที่ยังไม่สมบูรณ์ของความยาวเนื่องจากอุณหภูมิของ grip ไม่คงที่ จะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ โดยทั่วไปในระดับอุณหภูมิที่ผู้วิจัยทำการทดลอง 100 ถึง 800°C ใช้เวลารอให้สภาวะคงตัวที่ประมาณ 1-2 ชั่วโมง

5. มีความลำบากในการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ เนื่องไม่ได้ออกแบบช่องสำหรับการสอดสาย thermocouple ไว้ สาย thermocouple จึงได้สอดเข้าทางปากเตา(ช่องใส่ grip) ซึ่งมีความยุ่งยากมาก

### งานวิจัยที่ควรทำต่อจากงานวิจัยนี้

1. ควรวิจัยเรื่องวิธีการตามรอยร้าวในระดับอุณหภูมิสูง ที่ขนาดของชิ้นงานทดสอบได้ๆ เพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลในการทดสอบต่าง ๆ
2. ควรวิจัยศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการทำให้อุณหภูมิภายในเตาสร้างความร้อน มีอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ เพื่อใช้ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดใหญ่ได้
3. ควรวิจัยเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแบบอื่น ๆ เพื่อใช้ในการสามารถทำการทดสอบชิ้นงานที่หลากหลายขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ภาณุ ประทุมพรรัตน์. 2539. การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าว ภายใต้สภาวะความเครียดระนาบของท่อเหล็ก เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-335 เกรด พี.22. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. 2539. การศึกษาผลของภาวะเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระที่มีอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- A 335-79a. 1979. Specification for Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe for High-Temperature Service. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- Cohen, R.L. and West, K.W. 1983. Characterization of metals and alloys by electrical resistivity measurements. Materials Evaluation 41 : 1074-1077.
- E 1152-87. 1987. Standard Test Method for Determining J-R Curves. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- E 399-83. 1983. Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- E 561-86. 1986. Standard Practice for R-Curve Determination. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- E 616-82. 1982. Standard Terminology Relating to Fracture Testing. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- E 813-87. 1987. Standard Terminology Relating to Fracture Testing. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- E 992-84. 1984. Standard Practice For Determination of a Fracture Toughness of Steels Using Equivalent Energy Methodology. Philadelphia : American Society for Testing Materials,
- Edwards, H.L., and Wanhill, R.J.H. 1984. Fracture Mechanics. Edward Arnold : The Hague,

Incropera, F.P. 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Wiley,

Jame, L.M. 1979. Frequency effects in the elevated temperature crack growth behavior of austenitic stainless steels – A design approach . Journal of Pressure Vessel Technology 101 : 171-175.

Kanthal, A.B. 1992. Kanthal Handbook Resistance Heating Alloys for Industrial Furnaces. Sweden : Kanthal's Technical Centre,

Knott, J.F. 1973. Fundamentals of Fracture Mechanics. New York : Wiley,

Narendrnath, K.R., Margolin, H., Jung, Y.H., Godavartis, P.S., and Murty, K.L. 1988. A personal computer based system to evaluate J-integral by a single specimen unloading compliance method part II: results on A533B class I steel and Corona-5. Engineering Fracture Mechanics 30 : 349-371.

Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N. 1970. Theory of Elasticity. 3<sup>rd</sup> ed. New York : McGraw-Hill,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### การถ่ายเทความร้อน

#### 1. การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง  $x$  กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad 1$$

โดยที่

$q_x$  แทน อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ในทิศทางบวก

$k$  แทน ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity of material)

สมการ 2 เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการแพร่กระจายความร้อน (Heat diffusion equation) ในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยทั่วไปสมการนี้เรียกว่าสมการความร้อน เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อน จากคำตอบของมันจะได้รับการกระจายของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน ของเวลา และตำแหน่งจากสมการการนำความร้อนดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่า “ที่จุดใด ๆ ในตัวกลางอัตรา การนำความร้อนสุทธิในปริมาตรหนึ่งหน่วย รวมกับอัตราการผลิตความร้อนเชิงปริมาตรต้องมีค่า เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่สะสมไว้ภายในปริมาตรนั้น”

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2$$

ในพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinates)

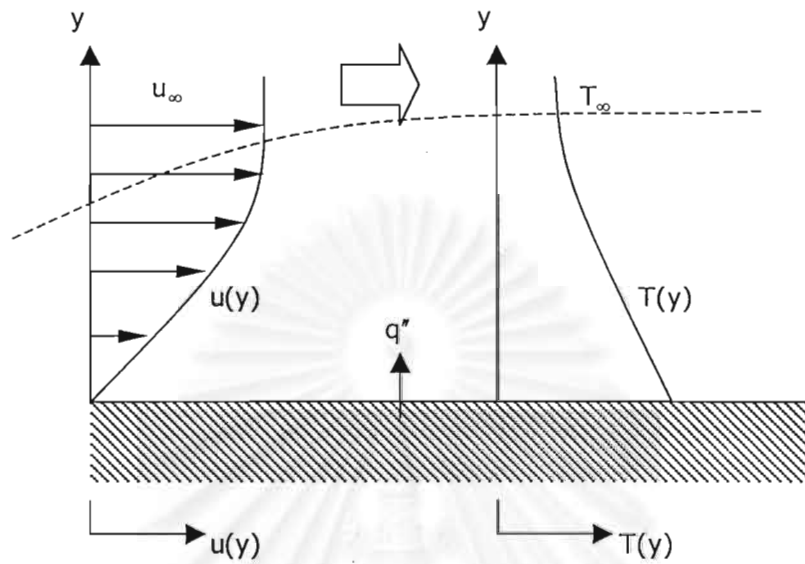
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

## 2. การพาความร้อน(Convection heat transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสผิวของแข็ง กลศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ” (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัวซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ” (free or natural convection) การเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบกับสนามของอุณหภูมิภายในของของไหล การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวที่ร้อน  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลที่เย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ  $T_f$  ตามแสดงในรูป 1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h|T_w - T_f|$$

3



รูปที่ 1 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน

โดยที่  $q''$  เป็นความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น (มีหน่วยเป็น  $W/m^2$ ) ถ้าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h|T_r - T_w| \quad 4$$

โดยที่  $q''$  เป็นความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ 3 เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซลเซียส หรือเคลวินและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส

### 3. การพาความร้อนแบบบังคับ

เนื่องจากการเจาะจงจรรยาเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิ ใช้การเจาะรูปแบบกลม เนื้อหาต่อไปนี้จะอธิบายถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับลักษณะการพาความร้อนโดยการบังคับ เพื่อนำไปใช้ประยุกต์กับงานวิจัย

3.1 การเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อ การผ่านน้ำเพื่อระบายความร้อน ใช้ความรู้ทางด้าน การพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (forced convection for flow inside ducts) ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์ (laminar) หรือแบบเทอร์บูเลนต์ (turbulent) ตัวแปรที่บอกว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไรอย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re_D$ ) สำหรับการไหลภายในท่อกำหนดเป็น

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad 5$$

โดยที่

$\rho$  แทน ความหนาแน่นของของไหล

$u_m$  แทน ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

$D$  แทน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$\mu$  แทน ความหนืดพลวัต (dynamic viscosity)

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤต ( $Re_{D,c}$ ) สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากแบบแบบลามินาร์ เป็นแบบเทอร์บูเลนต์ เริ่มต้นจาก

$$Re_{D,c} \approx 2300 \quad 6$$

3.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity) เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ย ( $u_m$ ) นี้คือ ความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ ( $A_c$ ) และความหนาแน่นของของไหล ( $\rho$ ) แล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวล ซึ่งได้

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad 7$$

สำหรับท่อกลม ( $A_c = \pi D^2 / 4$ ) ค่าของ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สามารถเขียนได้เป็น

$$Re_D \equiv \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad 8$$

3.3 อุณหภูมิเฉลี่ย ในเรื่องอุณหภูมินี้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) ในเหตุผลที่เหมือนกับความเร็วเฉลี่ย ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยจะเปลี่ยนไปตามระยะทางถ้ามีความร้อนเข้า หรือออก

3.4 สภาวะการปรับตัวของอุณหภูมิ เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวทำให้ อุณหภูมิของของไหลยังคงเพิ่มขึ้นตามระยะของของไหลที่เคลื่อนที่ ทำให้สภาวะการปรับตัวของ อุณหภูมิไม่เกิดขึ้น แต่สามารถพิจารณาได้ว่า โปรไฟล์ (profile) ของอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การปรับตัวเต็มที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed) และจะได้ ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r,x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = 0 \quad 9$$

โดยที่

$T$  แทน อุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ

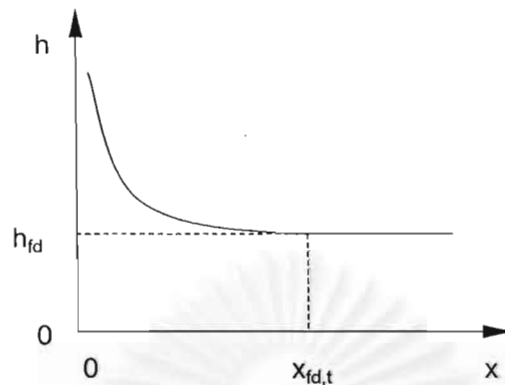
$T_s$  แทน อุณหภูมิผิวท่อ

$T_m$  แทน อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สมการ (9) ซึ่งเกิดขึ้นในท่ออาจจะกรณี  $q_s''$  คงที่ หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่นในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้า หรือผิว ภายนอกได้รับการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามี สภาวะการเปลี่ยนสภาวะ (เนื่องจากการเดือด หรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวนอก

สมการที่ 9 ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (entrance region) ซึ่งที่  $h$  แปรตาม  $x$  ตามที่แสดง ในรูปที่ 2 ค่า  $h$  จะมีค่าสูงมากที่  $x$  เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามค่า  $h$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิด บาวนด์รีเลเยอร์ของอุณหภูมิตั้งขึ้น จนทั้งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงตามแกน h สำหรับการไหลภายในท่อ

### 3.5 การสมดุลย์ของพลังงาน (energy balance)

พิจารณาการไหลในท่อ ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ ( $\dot{m}$ ) และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนที่ของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คัดต่อมวลของไหล และจะอยู่ในรูปผลคูณความดัน (p) และปริมาตรจำเพาะ (v, specific volume) โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3 และจากนิยามของ  $T_m$  จะได้

$$dq_{\text{conv}} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[ \dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0$$

หรือ

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m} d(c_v T_m + pv)$$

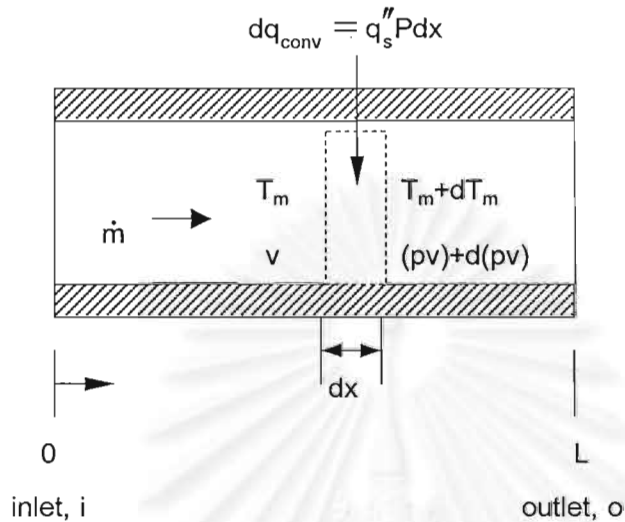
ถ้ากรณีเป็นแก๊สสมบูรณ์ ( $pv = RT_m$  และ  $c_p = c_v + R$ ) จะได้

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m} c_p dT_m \quad 10$$

$$q_{\text{conv}} = \dot{m} c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad 11$$

โดยที่

$q_{\text{conv}}$  แทน อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด



รูปที่ 3 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

สมการ 11 อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูป  $dq_{conv} = q_s'' P dx$  ซึ่ง  $P$  เป็นเส้นรอบรูป ( $P = \pi D$  สำหรับท่อกลม)

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h (T_s - T_m) \quad 12$$

สมการ 12 ค่า  $T_m(x)$  จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของความร้อนที่ผิว คืออาจเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ หรืออุณหภูมิที่ผิวคงที่ก็ได้

3.5.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant surface heat flux) กรณีนี้จะพบว่่าง่ายที่จะหา  $q_{conv}$  ทั้งหมดเพราะว่า  $q_s''$  ไม่ขึ้นกับ  $x$  ดังนั้น

$$dq_{conv} = q_s'' (PL)$$

จากสมการ 7

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} \neq f(x)$$

อินทิเกรตจาก  $x = 0$  ถึง  $x$  ใด ๆ ได้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} x \quad q_s'' = \text{ค่าคงที่}$$

จากสมการ ได้ว่า  $T_m$  แปรเปลี่ยนเชิงเส้นกับระยะ  $x$  ตามท่อ

3.5.2. กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (constant surface temperature)  
กรณีนี้นิยาม  $\Delta T$  เป็น  $T_s - T_m$  สมการที่ 7 เขียนใหม่เป็น

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{d(\Delta T)}{\dot{m}c_p} = -\frac{P}{\dot{m}c_p} h(\Delta T)$$

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจากทางเข้าหรือทางออกของท่อได้

$$\begin{aligned} \ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} &= -\frac{PL}{\dot{m}c_p} \left( \frac{1}{L} \int_0^L h dx \right) \\ &= -\frac{PL}{\dot{m}c_p} \bar{h}_L \end{aligned}$$

ซึ่ง  $\bar{h}$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $h$  สำหรับท่อทั้งหมด และจากสมการที่ 6 ได้

$$q_{\text{conv}} = \dot{m}c_p (\Delta T_i - \Delta T_o) \quad 13$$

แทนค่า  $\dot{m}c_p$  จากสมการ 9 จะได้

$$q_{\text{conv}} = \bar{h} A_s \Delta T_{\text{lm}} \quad 14$$

โดยที่

$A_s$  เป็นพื้นที่ผิวทั้งหมด

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad 15$$

#### 4. สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณ $h$

ส่วนใหญ่ ได้มาจากวิธีวิเคราะห์เชิงมิติ และจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างผิวของแข็งและของไหลเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง ตัวเลขนัสเซลต์ เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์และตัวเลขแพรนเดิล ( $\bar{Nu} = CRe^d Pr^e$ ) การหาค่าของ  $C, d$  และ



e จะต้องใช้ข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งมีความสำคัญมากในการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทของความร้อนโดยการพาความร้อน ถึงแม้ว่าในบางกรณีสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะหาได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีบาวการ์แลเยอร์ แต่สมการที่สำคัญ ๆ และใช้ประโยชน์ได้จริงในการคำนวณเกี่ยวกับการพาความร้อนส่วนใหญ่ได้มาจากการวิเคราะห์เชิงมิติ และผลการทดลองสำหรับตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างของค่าตัวเลขนัสเซอร์ของสภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์การพาความร้อนสำหรับการไหลภายใน

CORRELATION	CONDITION
$Nu = 4.36$	Laminar, fully developed, constant $q_s''$ , $Pr \geq 0.6$
$Nu = 3.65$	Laminar, fully developed, constant $T_s$ , $Pr \geq 0.6$
$\bar{Nu} = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)RePr}{1 + 0.04[(D/L)RePr]^{2/3}}$	Laminar, thermal entry length ( $Pr \gg 1$ or an unheated starting length), constant $T_s$
$\bar{Nu} = 1.68 \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	Laminar, combined entry length $\left[ \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \right] \geq 2$ , constant $T_s$ $0.48 < Pr < 16,700$ , $0.0044 < \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right) < 9.75$
$\bar{Nu} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$	Turbulent, fully developed, $0.6 \leq Pr \leq 160$ , $Re_D \geq 10,000$ , $L/D \geq 10$ , $n = 0.4$ , for $T_s > T_m$ and $n = 0.3$ for $T_s < T_m$
$\bar{Nu} = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu_m}{\mu_w} \right)^{0.14}$	Turbulent, fully developed, $0.7 \leq Pr \leq 16,700$ $Re_D \geq 10,000$ , $L/D \geq 10$ ,

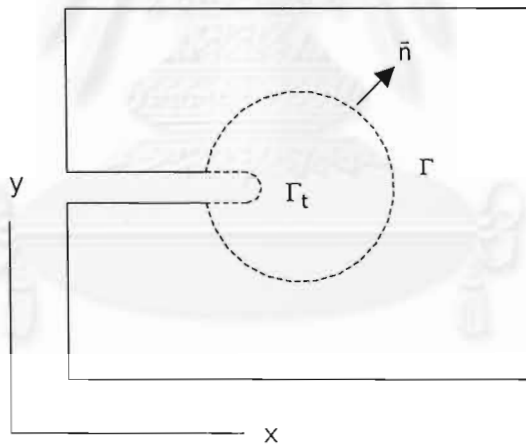
Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1990

## ภาคผนวก ข

### แนวความคิดพื้นฐานของ J-Integral

J-Integral คือ energy line path independent integral ที่ถูกนำเสนอขึ้นโดย J.R.Rice ในปีค.ศ. 1968 เป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งในวิชากลศาสตร์การแตกหักที่สามารถใช้ได้ตั้งแต่ปัญหาของการยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงปัญหาของ fully plastic เราสามารถนำค่า J-Integral ( $J_{IC}$ ) มาใช้เป็นเกณฑ์การแตกหักได้ โดยผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ยอมรับกันนั้นส่วนมากจะอ้างอิงค่า  $J_{IC}$  กับการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว (crack initiation) มากกว่าการแพร่ขยายตัวของรอยแตกร้าว (crack propagation)

พิจารณาวัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ทั้งแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นและแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น ไม่มี body force และอยู่ภายใต้สภาวะการยืดหยุ่นในระนาบ วัตถุดังกล่าวมีรอยบาก (notch) มีพื้นผิวราบ 2 ผิวขนานกันกับแกน x ดังแสดงในรูป



แสดงสนามการยืดหยุ่นที่ปลายของรอยบาก

และปลายรูปส่วนโค้งวงกลมกำหนดโดยส่วนโค้ง พลังงานความเครียด(strain energy) ที่จะใช้คือ

$$W = \int_0^l \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

กำหนดให้ J-Integral อยู่ในรูป

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right)$$

คือ  $\Gamma$  เส้นโค้งที่ล้อมรอบปลายของรอยบาก (notch tip) การอินทิเกรตเป็นไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโดยเริ่มจากผิวราบด้านล่างของรอยบาก  $\bar{T}$  คือ traction vector ตามขอบของ  $\Gamma$  และกำหนดให้ชี้ออกเป็นบวก ( $T_i = \sigma_{ij} \cdot n_j$ )  $\bar{u}$  คือ displacement vector และ  $ds$  คือ เอลิเมนต์ของความยาวส่วนโค้งตาม  $\Gamma$

ในการที่จะพิสูจน์ว่า  $J$  เป็น path independent integral นั้นเราจะกลับไปพิจารณา closed curve  $\Gamma^*$  ที่ล้อมรอบพื้นที่  $A^*$  ในระนาบ 2 มิติที่ไม่มี body force ดังนั้นจาก Green's theorem

$$\int_{\Gamma^*} \left( W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) = \int_{A^*} \left[ \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) \right] dx dy$$

เมื่อพิจารณา  $\frac{\partial W}{\partial x}$  จะพบว่า

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x}$$

$$= \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x} = \sigma_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} \right)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right)$$

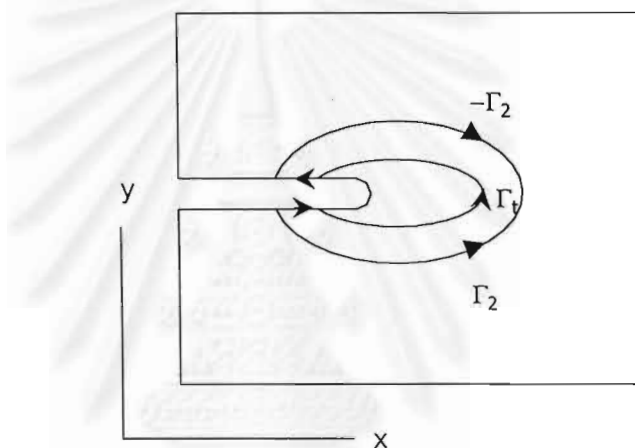
เนื่องจาก  $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า

$$\int_{\Gamma^*} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) = 0$$

สำหรับ close curve  $\Gamma^*$  ใด ๆ

ต่อมาพิจารณา path  $\Gamma_1$  และ  $\Gamma_2$  ที่ล้อมรอบปลายของรอยบาก



แสดง close contour

จะเห็นได้ว่า path ทั้งสองเมื่อพิจารณาตามเส้นทางต่อไปนี้เป็น closed curve  $\Gamma_1$  ทวนเข็มนาฬิกา upper flat notch surface  $\Gamma_2$  ตามเข็มนาฬิกา ( $\Gamma_2$ ) และ lower flat notch surface ดังนั้น

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma^*} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) &= \int_{\text{upper flat}} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) + \int_{-\Gamma_2} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) \\ &= \int_{\text{lower flat}} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) + \int_{\Gamma_1} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) \end{aligned}$$

แต่การอินทิเกรตตามผิวราบมีค่าเป็นศูนย์เพราะ  $\bar{T} = 0$  และ  $dy = 0$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_1} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) &= - \int_{-\Gamma_2} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) \\ &= \int_{\Gamma_2} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds \right) \end{aligned}$$

ซึ่งแสดงว่า  $J$  จะมีค่าเดียวกันเสมอไม่ว่าจะอินทิเกรตตาม path ไหนก็ตาม และเรายังสมมติต่อไปอีกว่าพื้นที่ระหว่าง path ทั้งสองไม่มี singularities

ถ้าเราทำให้  $\Gamma$  เข้าใกล้ปลายของรอยบากได้มากขึ้น เราจะสามารถทำให้อินทิกรัลขึ้นอยู่กับ local field เท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ path นั้นเป็น  $\Gamma_2$  ของ smooth ended notch ซึ่ง  $\bar{T} = 0$  ดังนั้น

$$J = \int_{\Gamma} Wdy$$

ซึ่งหมายความว่า  $J$  เป็นการวัดค่าเฉลี่ยของความเครียดที่ปลายของรอยบาก ดังนั้นประโยชน์ของการใช้  $J$ -Integral จึงอยู่ที่ความสะดวกในการเลือก integration path ซึ่งทำให้สามารถหาค่าของ  $J$  ได้โดยตรง

### การหาค่าของ J-Integral และ $J_{IC}$

มีวิธีการต่าง ๆ มากมายในการหาค่า  $J$ -Integral และ  $J_{IC}$  ซึ่งเป็นเกณฑ์ของค่า  $J$  ในการเริ่มต้นของรอยแตกก้าวภายใต้สภาวะของความเครียดระนาบสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น ทั้งค่าที่แท้จริงและค่าโดยประมาณ โดยทั้งวิธีการคำนวณและวิธีการตรวจสอบ วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสมการ

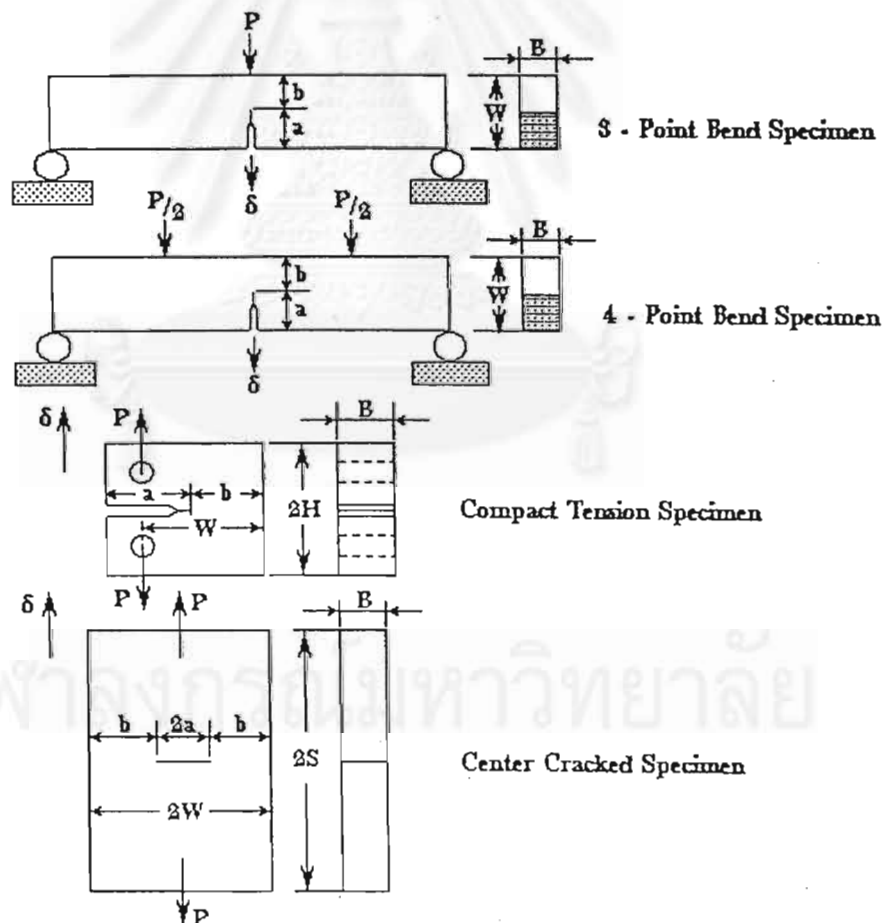
$$J = \int_{\Gamma} \left( Wdy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial a} ds \right)$$

หรือในลักษณะทางกายภาพที่ชัดเจนก็คือ

$$J = - \frac{\partial U}{\partial a}$$

ค่าที่แท้จริงของ  $J$  หาได้จากทั้งสองสมการดังกล่าว ส่วนค่าโดยประมาณนั้นหาได้จากสมการที่เหมาะสมซึ่งถูกดัดแปลงมาจากสมการ  $J = - \frac{\partial U}{\partial a}$  เราจะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการทดสอบเป็นส่วนใหญ่และรวมไปถึงการคำนวณโดยประมาณบางวิธีเท่านั้น

สำหรับชิ้นทดสอบมีได้ 3 แบบคือ compact tension specimen (CT), bend bar test specimen และ center notch specimen



แสดงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบแบบต่าง ๆ

### Experimental Method for Accurate J-Integral Determination

เมื่อขึ้นทดสอบมีความหนา B คงที่

$$J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a}$$

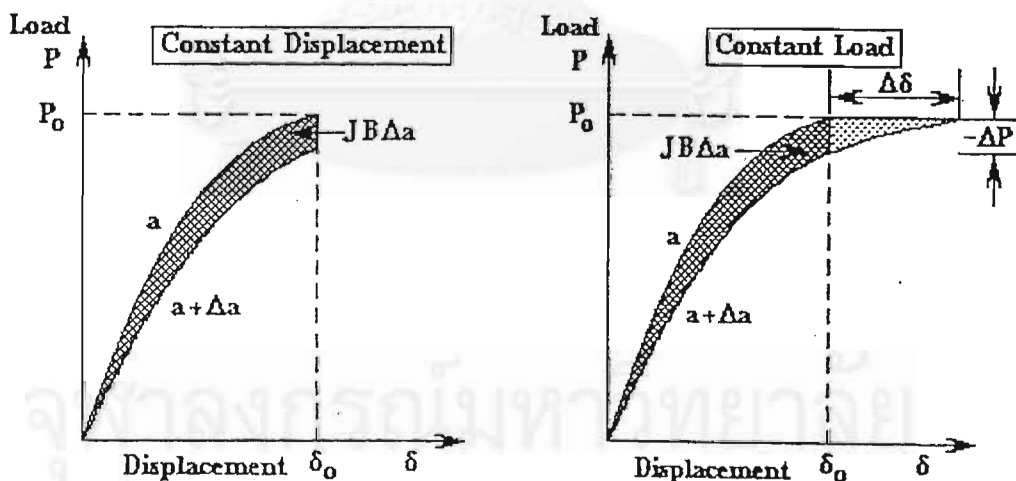
โดยที่

$$U = B \left[ \int_A W dx dy - \int_{\Gamma} \bar{T} \cdot \bar{u} ds \right]$$

ดังนั้น

$$\Delta U = -JB\Delta a$$

ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จาก  $P-\Delta$  curve ทั้งในกรณีของการเคลื่อนตัวคงที่ (displacement constant) และกรณีของภาระคงที่ (load constant)



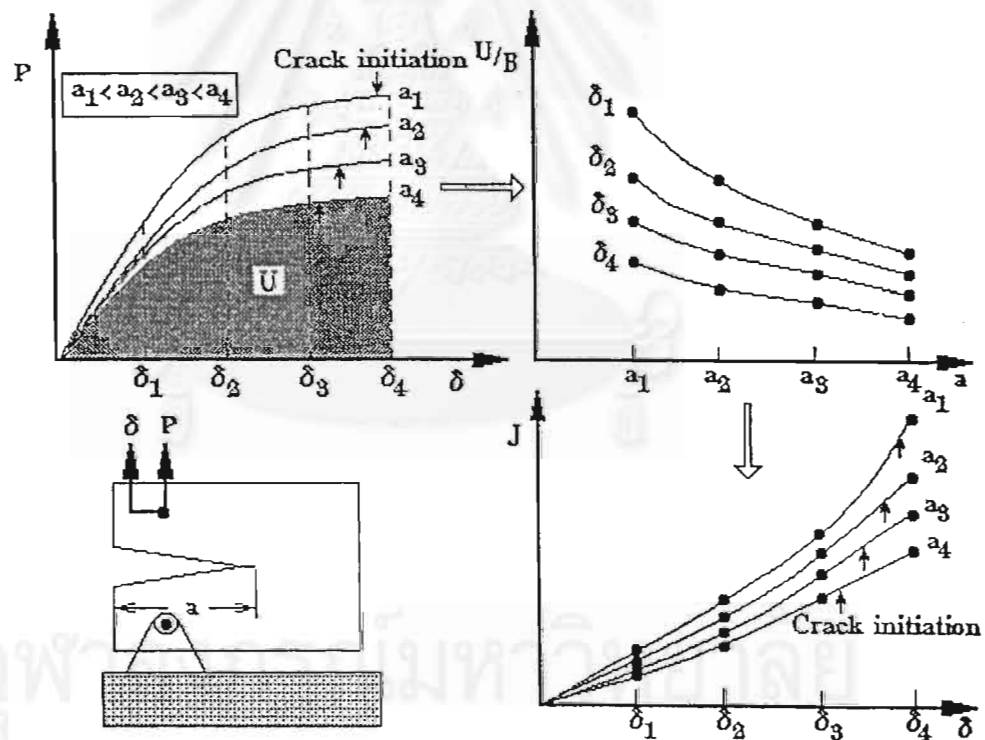
แสดง  $P-\Delta V$  ในกรณีของ constant displacement และ constant load

ในกรณีของ load control นั้น พื้นที่ในสามเหลี่ยมเป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง (second order differential equation) สามารถตัดทิ้งได้

### การทดสอบของ Landes และ Begley มีวิธีการดังนี้

1. ให้ภาระตั้งแก่ชิ้นทดสอบจนถึงที่รอยแตกเริ่มขยายตัว (crack initiation) แล้วกำหนดจุดดังกล่าวไว้บน  $P - \Delta$  curve

2. ดึงต่อไปจนกระทั่งชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน แล้ววัดความยาวของรอยแตก  $\Delta a$  ที่แท้จริง ระวังอย่างทำ unloading ในระหว่างกระบวนการ loading เพราะในวัสดุแบบไม่ยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear material) การเสียรูปในช่วงพลาสติกจะกลับคืนตัวไม่ได้



แสดงขั้นตอนการหา  $J - \delta$  curves



โดยทำการทดสอบเพื่อให้ได้  $P - \Delta$  curve สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีความยาวรอยแตก  $\Delta a$  ต่างกันหลาย ๆ ค่า และสามารถหาค่าของ J-Integral ได้โดยวิธีต่อไปนี้

1. จากค่าการเคลื่อนตัว (displacement)  $\delta$  ค่าหนึ่ง พื้นที่ภายใต้  $P - \delta$  curve จะเป็น pseudo potential energy ที่ค่าของการเคลื่อนตัวนั้น นำเอาพลังงานเหล่านั้นมาเขียนเป็นกราฟ โดยให้อยู่ในรูปของ  $U/B$  เทียบกับความยาวของรอยแตก  $a$  สำหรับในกรณีที่  $\delta$  มีค่าคงที่

$$2. \text{ จาก } J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a}$$

หมายถึง พื้นที่ของ  $P - \delta$  curve ของขนาดรอยแตก  $a$  ที่อยู่ใกล้กัน หรือความชันที่เป็นลบของ  $U/B$  เทียบกับ  $a$  ที่  $\delta$  คงที่ ดังนั้นเราสามารถเขียนกราฟของ  $J$  เทียบ  $\delta$  ได้

3. ค่า  $J_{IC}$  หาค่าได้จาก  $P - \delta$  curve ของแต่ละความยาวของรอยแตก  $a$  ตรงจุดที่รอยร้าวเริ่มขยายตัวจาก  $P - \delta$  curve

เมื่อหาค่า  $J_{IC}$  ได้แล้ว เราต้องกลับมาทดสอบเงื่อนไขความเค้นระนาบของชิ้นทดสอบ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\frac{(a, B \text{ or } W - a)_{\min}}{J_{IC}} \geq 2.5$$

$$\sigma_{\text{flow}}$$

เมื่อ  $\sigma_{\text{flow}}$  แทนค่าเฉลี่ยระหว่างความต้านทานแรงดึงครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุด

### Experimental Method for Approximated J-Integral Determination

ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วนั้นเป็นวิธีการของ Begley และ Lendes ใช้สำหรับหาค่าที่แท้จริงของ J-Integral แต่เป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายอย่างสูง เพราะต้องให้ชิ้นงานทดสอบจำนวนหลายชิ้น ดังนั้นจะเป็นการได้เปรียบอย่างมากถ้าเราสามารถหา  $J - \delta$  curve และค่า  $J_{IC}$  ได้จากชิ้นงานทดสอบเพียงชิ้นเดียว วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Rice และคนอื่น ๆ

โดยมีพื้นฐานอยู่บนสมการ  $J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a}$

จากชิ้นงานทดสอบที่มีความยาวของรอยแตกยาว  $\frac{a}{W} \geq 0.6$  Rice ได้เสนอสมการนี้  
จาก J- $\delta$  curve ดังนี้

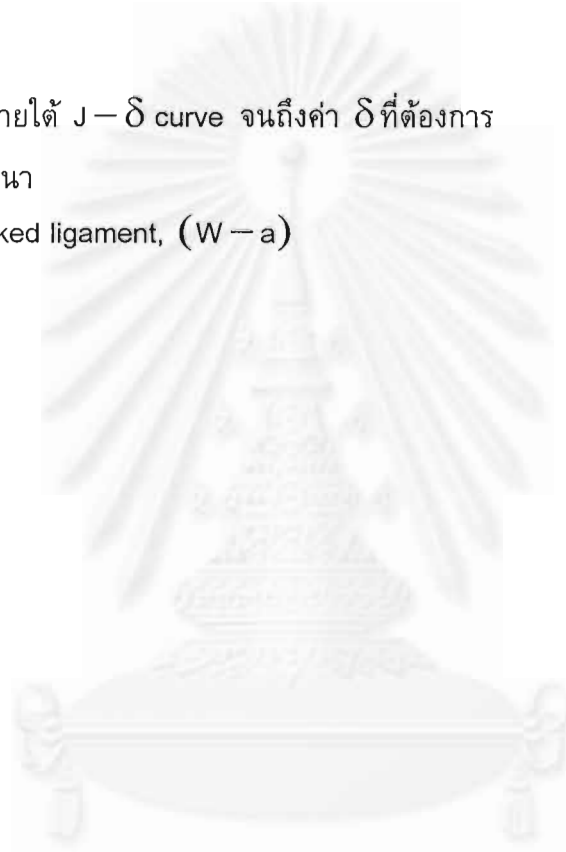
$$J = \frac{2A}{Bb}$$

เมื่อ

A แทน พื้นที่ภายใต้ J- $\delta$  curve จนถึงค่า  $\delta$  ที่ต้องการ

B แทน ความหนา

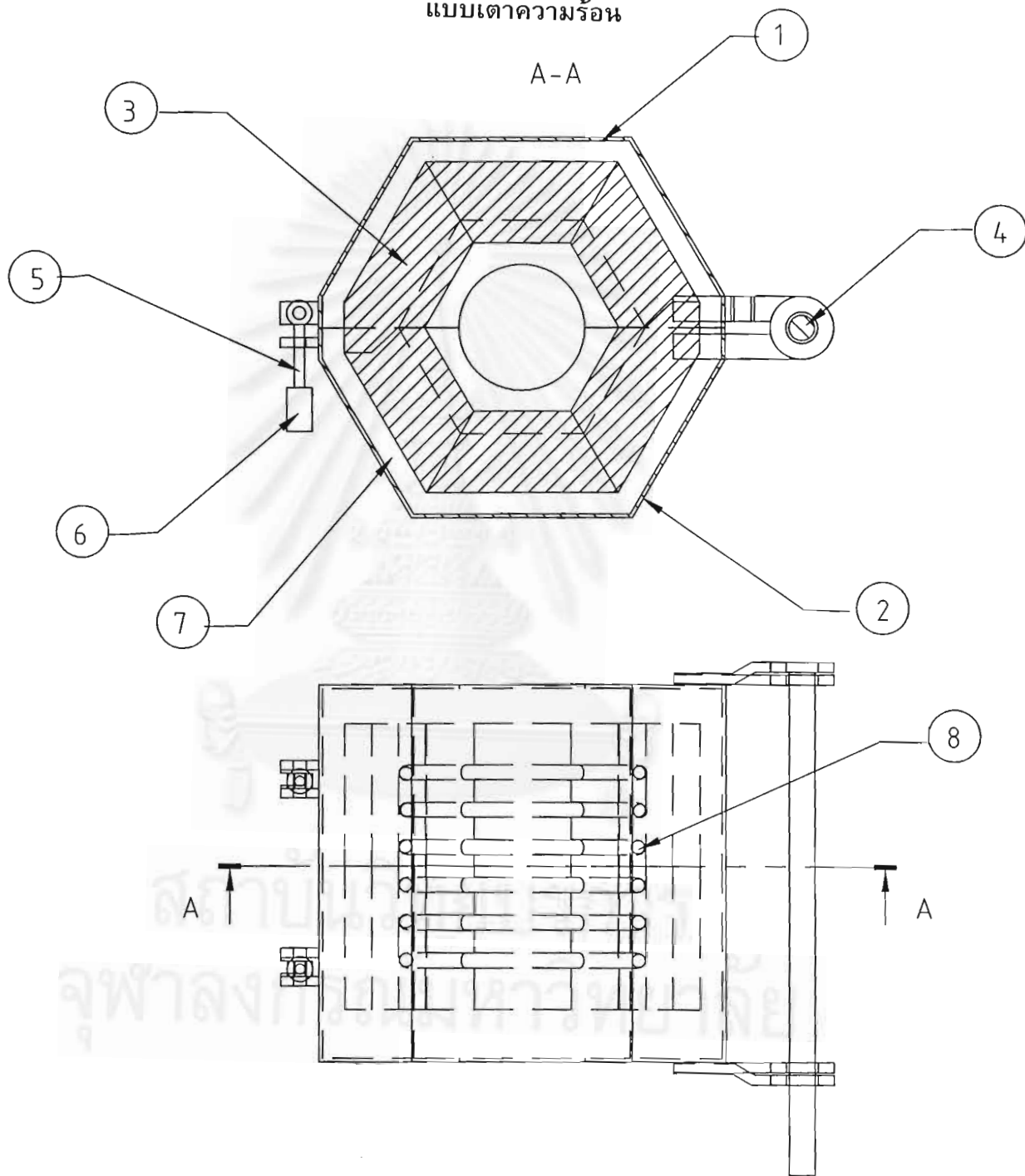
b แทน uncracked ligament,  $(W - a)$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

แบบเตาความร้อน

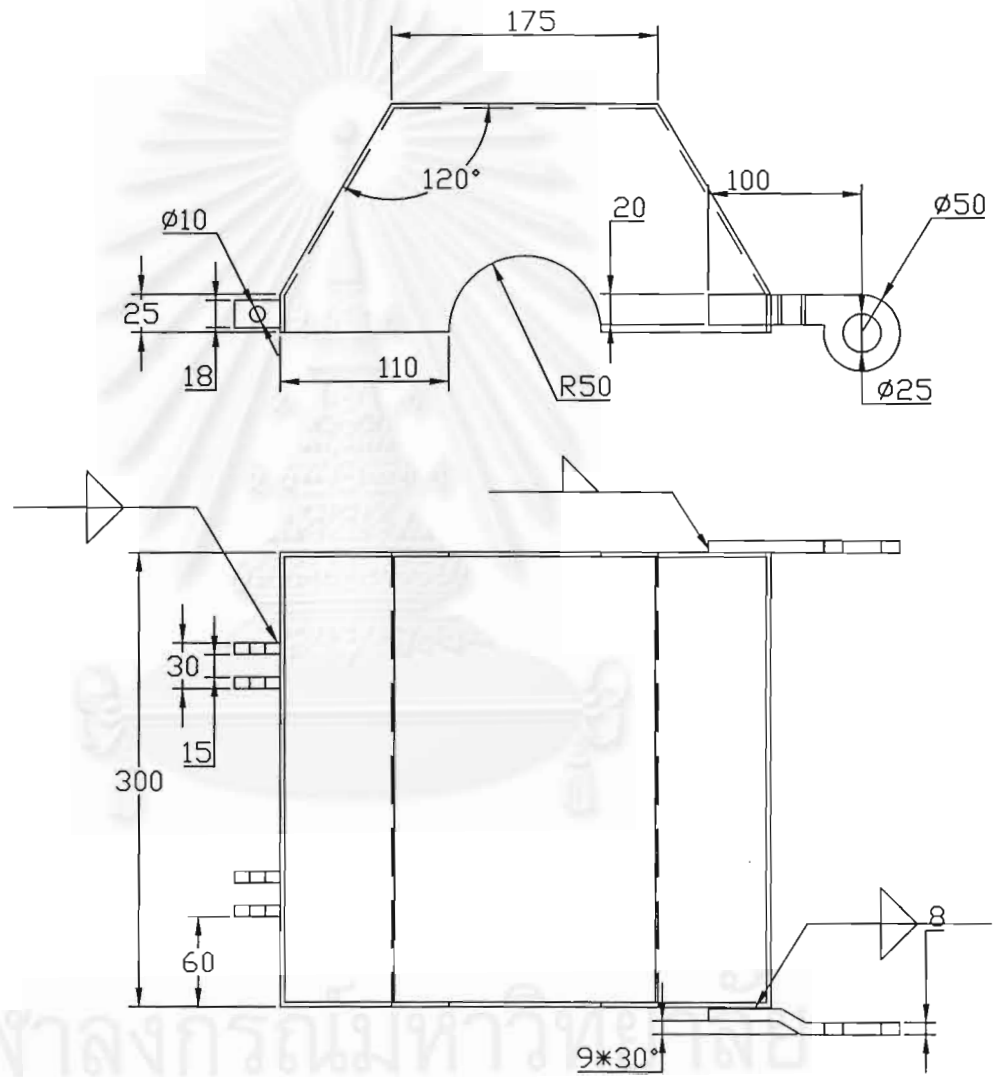


ภาพประกอบเตาความร้อน มาตรฐาน 1 : 5

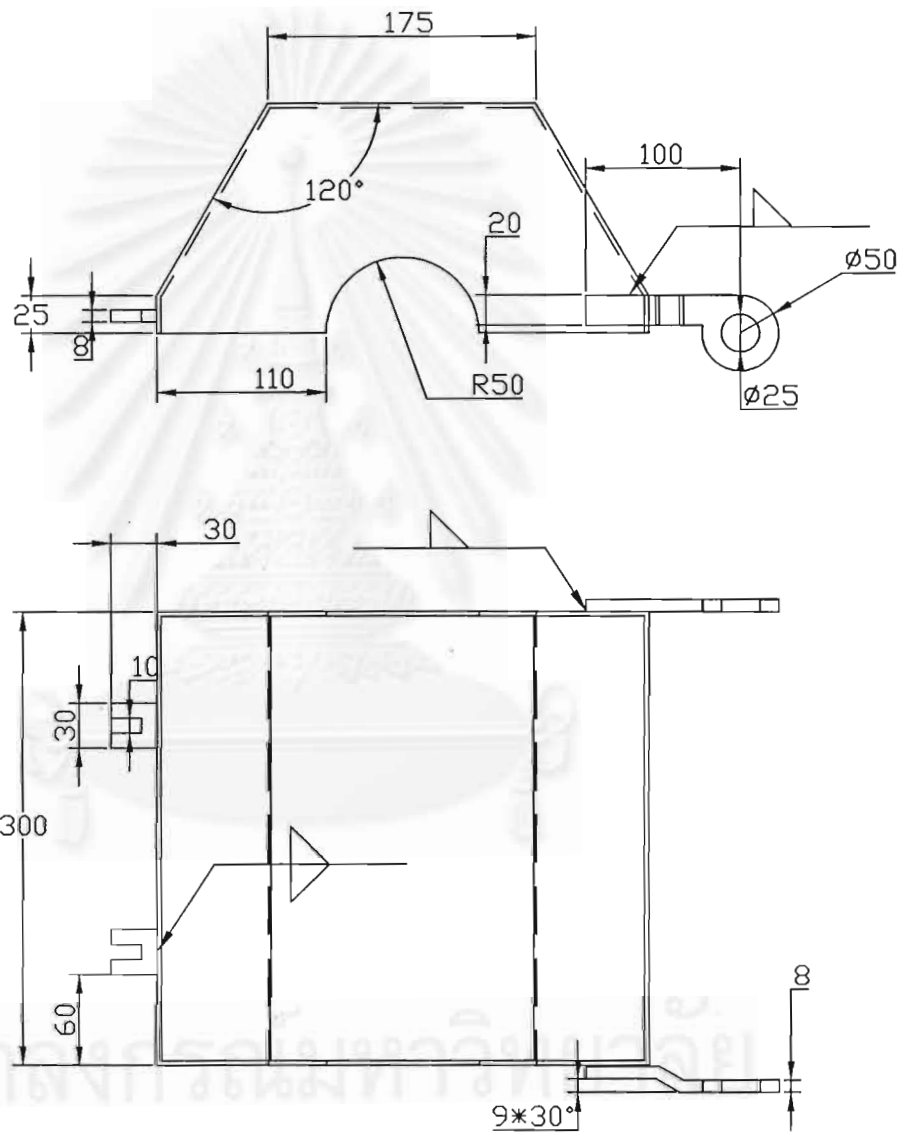
ตารางแสดงชื่อและวัสดุที่ใช้ในภาพประกอบ

ชิ้นงานหมายเลข	ชื่อ	วัสดุ
1	เปลือกเตา (ด้าน 1)	เหล็กแผ่นหนา 3 mm
2	เปลือกเตา (ด้าน 2)	เหล็กแผ่นหนา 3 mm
3	ผนังเตา	อิฐฉนวน C2
4	แกนบานพับ	St40
5	ตัวล็อกฝาตัวผู้	St40
6	ตัวล็อกฝาตัวเมีย	St40
7	ฉนวนไฟเบอร์	
8	ลวดความร้อน	Kanthal A-1

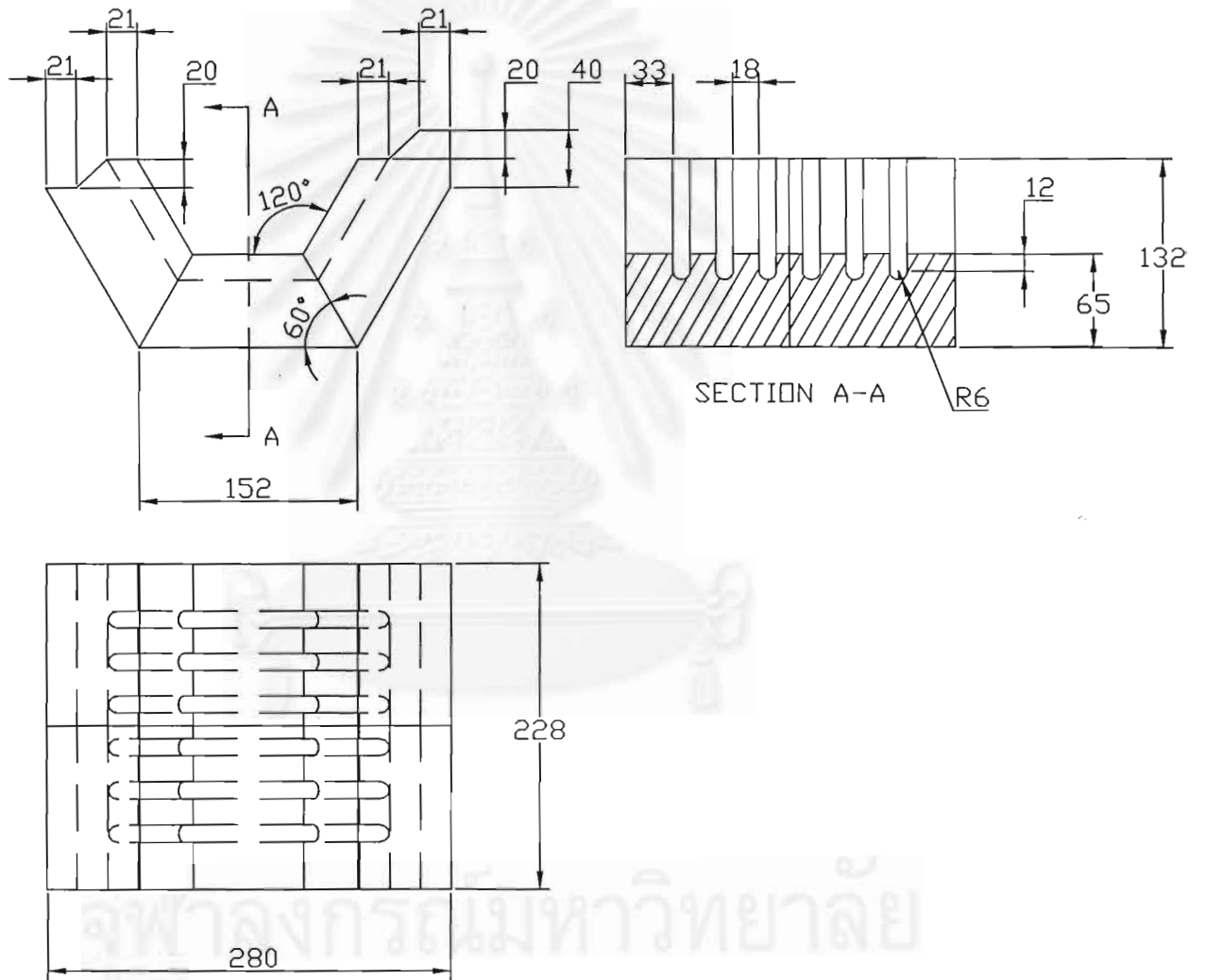
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



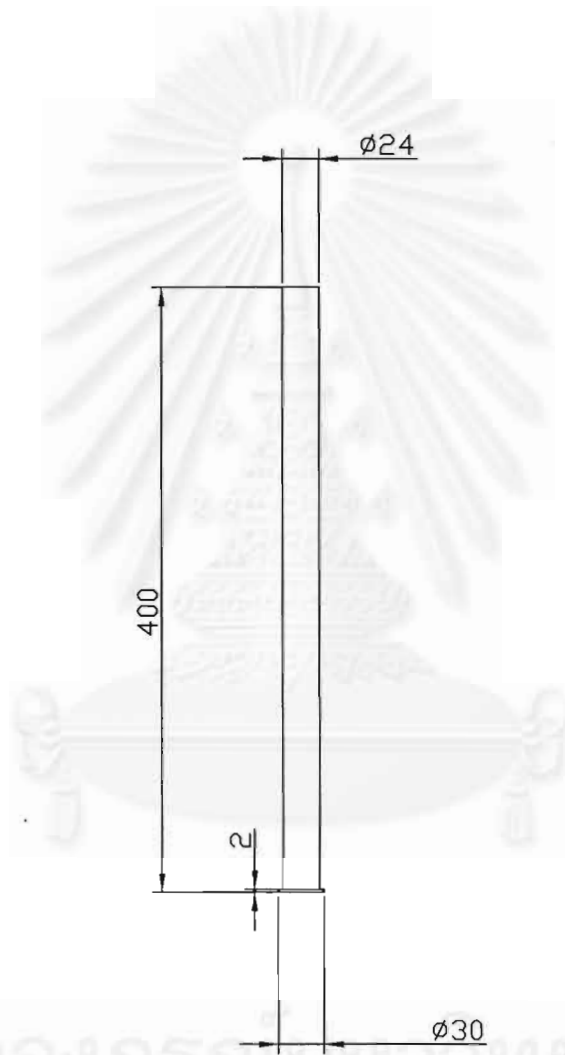
ชิ้นส่วนหมายเลข 1 มาตรฐาน 1 : 5



ชิ้นส่วนหมายเลข 2 มาตรฐาน 1 : 5



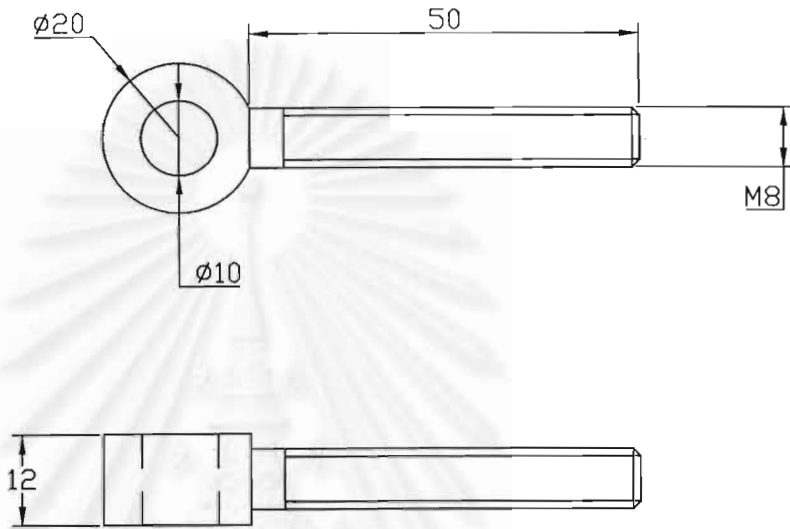
ชิ้นส่วนหมายเลข 3 มาตรฐาน 1 : 5



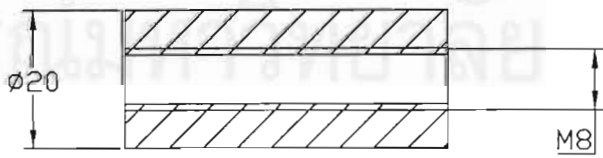
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นส่วนหมายเลข 4 มาตรฐาน 1 : 5





ชิ้นส่วนหมายเลข 5 มาตรฐาน 1 : 1



ชิ้นส่วนหมายเลข 6 มาตรฐาน 1 : 1

ภาคผนวก ง

Physical and Mechanical Properties

Table 1. KANTHAL and NIKROTHAL, Wire and Strip.

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80 Plus	NIKROTHAL 60 Plus	NIKROTHAL 40 Plus
Max continuous operating temp., °C	1425	1400	1300	1300	1200	1150	1100
°F	2600	2550	2370	2370	2190	2100	2010
Nominal composition, % Cr	22	22	22	22	20	15	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-	-	-
Ni	-	-	-	-	80	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cmft	872	872	836	812	655	668	623
Density, g/cm <sup>3</sup>	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.2	7.9
lb/in <sup>3</sup>	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300	0.296	0.285
Coefficient of thermal expansion, K <sup>-1</sup>							
20-750°C, 68-1380°F	14.10 <sup>-6</sup>	14.10 <sup>-6</sup>	14.10 <sup>-6</sup>	14.10 <sup>-6</sup>	17.10 <sup>-6</sup>	16.10 <sup>-6</sup>	18.10 <sup>-6</sup>
20-1000°C, 68-1838°F	15.10 <sup>-6</sup>	15.10 <sup>-6</sup>	15.10 <sup>-6</sup>	15.10 <sup>-6</sup>	18.10 <sup>-6</sup>	17.10 <sup>-6</sup>	19.10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity at 20°C							
W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	13	13	13	13	15	13	13
68°F, Btu inft <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> F <sup>-1</sup>	90	90	90	90	104	90	90
Specific heat capacity							
KJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , 20°C	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50
Btu lb <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> , 68°F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.119
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1390	1390
°F	2730	2730	2730	2730	2550	2535	2535
Mechanical properties (approx.)*							
Tensile strength, N mm <sup>-2</sup>	680	680	680	680	750	750	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000	109000	109000
Yield point, N mm <sup>-2</sup>	445	445	445	445	450	450	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness, Hv	230	230	230	230	180	180	130
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30	30	30
Tensile strength at 900°C, N mm <sup>-2</sup>	40	34	37	34	100	100	120
1650°F, psi	5800	5000	5400	5000	14500	14500	17400
Creep strength at 800°C, N mm <sup>-2</sup>	14	6	8	6	15	15	20
1000°C, N mm <sup>-2</sup>	1.8	1	1.5	1	4	4	4
1470°F, psi	2000	870	1160	870	2160	2160	2900
1830°F, psi	260	145	215	145	580	580	560
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600°C 1100°F)				Non		
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88

\* The values given apply for sizes of 4 mm, 0.16 in diameter for the KANTHAL alloys and of 1 mm, 0.04 in for the NIKROTHAL alloys

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายพลายุทธ์ ศรีโอพาร์  
วัน-เดือน-ปีเกิด 15 กุมภาพันธ์ 2516  
ที่อยู่ 212/182 ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000 โทร. 02-5273200

สถานที่ทำงาน -

ประวัติการศึกษา

- ป.6 ประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนโกคาพานิชกุล กระบี่ พ.ศ. 2528
- ม.3 มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนเบญจมราชูทิศ นครศรีธรรมราช พ.ศ. 2531
- ปวช. ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ พ.ศ. 2535
- วศ.บ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ พ.ศ. 2539
- วศ.ม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ พ.ศ. 2543

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย