


ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียว



นาย ทวิช วงศ์กระบอกถาวร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3965-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN PROCESSES AND CONSTRUCTION OF A UNIAXIAL CREEP - RUPTURE TESTING  
MACHINE



Mr. Tawit Wongkrabakthaworn

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
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 2003

ISBN 974-17-3965-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบความคืบแบบ  
แกนเดียว

โดย

นาย ทวีช วงศ์กระบอกถาวร

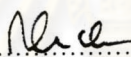
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

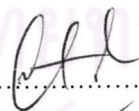
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สathaporn สุปรีชากร)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

ทวิช วงศ์กระบอกถาวร : ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบความคืบ  
แบบแกนเดียว (DESIGN PROCESSES AND CONSTRUCTION OF A UNIAXIAL  
CREEP - RUPTURE TESTING MACHINE) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. จิรพงศ์  
กสิวิทย์อำนาจ , 229 หน้า. ISBN 974-17-3965-6.

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาขั้นตอนการออกแบบ และสร้างเครื่องทดสอบความคืบแบบ  
แกนเดียว เนื้อหาหลักของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการสร้าง  
ขั้นตอนการออกแบบ และการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ ได้แก่ ชุดให้ภาระ  
คานทอดแรง เตาความร้อน และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นการสร้างเครื่อง  
ทดสอบตามแบบ และส่วนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องทดสอบที่สร้าง

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องทดสอบพบว่า เปอร์เซ็นต์การดัดที่เกิดกับชิ้นงาน  
ทดสอบยังมีค่าสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด คือ 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากการเยื้องศูนย์ของ  
ชุดให้ภาระ อัตราทดของคานทอดแรงมีค่าแปรผันในช่วง 16.5-21 เท่า เมื่อคานทอดแรงเอียง  
ทำมุมกับแนวระดับในช่วง 0-10 องศา เตาความร้อนสามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้เท่ากับ  
749 องศาเซลเซียส ความเที่ยงในการควบคุมอุณหภูมิของชุดควบคุม ณ อุณหภูมิใช้งาน  
(550 องศาเซลเซียส) คือ  $\pm 2$  องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และ  
ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานทดสอบในแนวเส้นรอบวง และในแนวแกนบนช่วง  
ความยาวเกจ (30 มม.) มีค่าไม่เกิน 6 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม คุณภาพของเครื่องทดสอบที่  
สร้างขึ้นยังไม่ดีพอสำหรับการทดสอบความคืบ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงาน  
ทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับ และอัตราทดของคานทอดแรงไม่คงที่

ผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ คือ ขั้นตอนการออกแบบที่สามารถใช้ออกแบบเครื่อง  
ทดสอบความคืบแบบแกนเดียวที่มีลักษณะจำเพาะอย่างที่ต้องการได้ และนอกจากนี้ยังได้  
ต้นแบบของเครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียวที่ใช้เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบ  
รุ่นต่อไป

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมเครื่องกล \_\_\_\_\_

สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมเครื่องกล \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2546 \_\_\_\_\_

ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

## 4370307621: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CREEP-RUPTURE TESTING / FURNACE / TEMPERATURE CONTROLLER /  
QUALITY INSPECTION / PRECISION / ECCENTRIC LOADING



TAWIT WONGKRABAKTHAWORN: DESIGN PROCESSES AND CONSTRUCTION OF  
A UNIAXIAL CREEP-RUPTURE TESTING MACHINE. THESIS ADVISOR: JIRAPONG  
KASIVITAMNUAY, Ph.D., 229 pp. ISBN 974-17-3965-6.

This thesis develops the design processes and constructs a uniaxial creep-rupture testing machine. The main thesis consists of 3 parts. The first part is the construction of the design processes and the design of the testing machine components such as the loading system, the lever arm, the furnace and, the temperature controller. The second part is the construction of the testing machine according to the design. And, The last part is the quality inspection of the constructed testing machine.

The quality inspection showed that the percentage of the bending strain was greater than the standard value which is 10%, because of eccentric loading system. The lever arm ratio varied from 16.5-21 while the lever arm angle with respected to the horizontal varied from 0-10 degrees. The rated temperature produced by the furnace was 749°C. The precision of the controlled temperature (550°C) of the running test was ±2°C which in the standard range. And, the temperature variations on the specimen surface in the circumferential direction and in the axial direction of the gage length (30mm) were less than 6°C. However, the quality of the constructed testing machine is insufficient to conduct any creep-test since the bending strain is greater than the standard value and the lever arm ratio is not constant.

Results of this thesis are the design processes which can be applied to design the specific creep rupture-testing machine as desired. And moreover, the prototype of the uniaxial creep-rupture testing machine which can be modified to develop the next model of the testing machine.

Department  Mechanical Engineering   
Field of study  Mechanical Engineering   
Academic year  2003

Student's signature     
Advisor's signature     
Co-advisor's signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาหาทุนเพื่อสนับสนุนงานวิจัยนี้ และยังถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำสั่งสอน ด้วยความเมตตา ทั้งในเรื่องการทำงาน การศึกษาเล่าเรียน และการดำเนินชีวิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร และ อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำ และยืมเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ได้ให้คำแนะนำในการสร้างอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และขอขอบคุณ คุณโสภณ นาคยงค์ คุณสุบิน ชันดี และเจ้าหน้าที่ฝ่ายช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบโครงสร้างของเครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียว รวมทั้งให้คำแนะนำในเรื่องการผลิตชิ้นงาน การใช้เครื่องจักร และความปลอดภัยในการทำงาน

ประโยชน์ และคุณความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตาบูชาแต่ บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ทฤษฎีความเคืบ.....	4
2.1.1 กราฟพฤติกรรมการเคืบ.....	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเคืบ.....	6
2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.2.1 การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น.....	8
2.2.2 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกหลายชั้น.....	8
2.2.3 การพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นแบนวางตั้ง.....	9
2.2.4 การพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นแบนวางนอน.....	11
2.2.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบทรงกระบอก.....	12
2.2.6 การแผ่รังสีระหว่างวัตถุขนาดเล็กกับวัตถุขนาดใหญ่.....	13
2.3 ทฤษฎีการควบคุมแบบพีไอดี.....	14
2.3.1 หลักการทั่วไป.....	14
2.3.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การสร้างระเบียบวิธีเพื่อการออกแบบเครื่องทดสอบความคืบ	
3.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	17
3.2 ส่วนประกอบหลักและการทำงานของเครื่องทดสอบความคืบ.....	18
3.2.1 ส่วนประกอบหลัก.....	18
3.2.2 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบความคืบ.....	20
3.3 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องทดสอบความคืบ.....	21
3.3.1 การกำหนดลักษณะจำเพาะของเครื่องทดสอบ.....	23
3.3.2 การออกแบบชิ้นงานทดสอบ.....	26
3.3.3 การออกแบบก้านดึงชิ้นงานและอุปกรณ์จับยึด.....	27
3.3.4 การออกแบบเตาความร้อน.....	30
3.3.5 การออกแบบโครงของเครื่องทดสอบ .....	33
3.3.6 การออกแบบก้านดึงคานทดสอบและตัวจับยึดคานทดสอบ (ส่วนหน้า)...	35
3.3.7 การออกแบบคานทดสอบ.....	36
3.3.8 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	37
บทที่ 4 ผลการออกแบบ	
4.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่องทดสอบ.....	38
4.1.1 สภาวะทดสอบ.....	38
4.1.2 วิธีให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ.....	40
4.1.3 วิธีให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ.....	41
4.1.4 ลักษณะโดยรวมของโครงสร้าง.....	42
4.2 ผลการออกแบบชิ้นงานทดสอบ.....	42
4.3 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด.....	47
4.3.1 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด(ด้านบน).....	47
4.3.2 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด(ด้านล่าง)....	60
4.4 ผลการออกแบบเตาความร้อน.....	66
4.4.1 ผลการเลือกชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป.....	66
4.4.2 ผลการออกแบบเตาความร้อน.....	68
4.5 ผลการออกแบบโครงของเครื่องทดสอบ.....	80
4.6 ผลการออกแบบก้านดึงคานทดสอบและตัวจับยึดคานทดสอบ (ส่วนหน้า).....	87



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลการออกแบบคานทอดแรงและค้ำน้ำหนักปรับสมดุล.....	97
4.8 ผลการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	107
บทที่ 5 การสร้างและทดสอบเครื่องทดสอบความคืบ	
5.1 ขั้นตอนการสร้าง.....	112
5.2 การสร้างเตาความร้อน.....	112
5.3 การสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	116
5.4 สร้างโครงและชิ้นส่วนต่างๆ.....	118
บทที่ 6 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องทดสอบ	
6.1 บทนำ.....	128
6.2 การวัดเปอร์เซ็นต์การตัดของชิ้นงานทดสอบและอัตราทดของคานทอดแรง.....	128
6.2.1 อุปกรณ์.....	128
6.2.2 ขั้นตอนการวัด.....	131
6.2.3 ผลการวัด และการวิเคราะห์ผล.....	131
6.3 การวัดอุณหภูมิสูงสุดที่เตาความร้อนสามารถทำได้.....	143
6.3.1 อุปกรณ์.....	143
6.3.2 ขั้นตอนการวัด.....	144
6.3.3 ผลการวัด.....	146
6.4 การวัดความเที่ยงของการควบคุมอุณหภูมิ.....	147
6.4.1 ผลการทดลองในสภาวะที่ไม่มีลมพัด.....	147
6.4.2 ผลการทดลองในสภาวะที่มีลมพัด.....	152
6.5 การวัดอุณหภูมิตามแนวแกนและแนวเส้นรอบวงของชิ้นงานทดสอบ.....	153
6.5.1 อุปกรณ์.....	153
6.5.2 ขั้นตอนการตั้งศูนย์เตาความร้อน.....	154
6.5.3 ขั้นตอนการวัดอุณหภูมิ.....	154
6.5.4 ผลการวัด.....	156
บทที่ 7 การอภิปรายผลการตรวจสอบ	
7.1 ความแข็งแกร่งของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบทดสอบ.....	157
7.2 การวิเคราะห์อัตราทดของคานทอดแรง.....	158
7.2.1 อัตราทดของคานทอดแรงที่ได้จากการออกแบบและการสร้าง .....	158

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.2.2 การหาอัตราทดแรงด้วยวิธีเรขาคณิต.....	159
7.3 อุณหภูมิสูงสุดที่เตาความร้อนทำได้.....	161
7.4 อัตราการทำความร้อน.....	161
7.5 ความเที่ยงของการควบคุมอุณหภูมิ.....	161
7.6 การกระจายอุณหภูมิตั้งแต่ขึ้นงานทดสอบ.....	162
<b>บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	165
8.1.1 ข้อเสนอโดยรวม.....	165
8.1.2 ข้อเสนอเกี่ยวกับคุณภาพของเครื่องทดสอบ.....	165
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	166
8.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการออกแบบเตาความร้อน.....	166
8.2.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างโครงของเครื่องทดสอบ...	166
8.2.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างชุดส่งถ่ายภาระ.....	166
8.2.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการตรวจสอบคุณภาพ.....	167
รายการอ้างอิง.....	168
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ผลการวัดความเครียดบนโหนดเซลล์เนื่องจากการถ่วงตุ้มน้ำหนัก.....	171
ภาคผนวก ข ผลการวัดอุณหภูมิภายในเตา .....	179
ภาคผนวก ค วิธีการใช้เครื่องทดสอบความเค้นแบบแกนเดี่ยวและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ..	181
ภาคผนวก ง แบบประกอบและแบบรายละเอียดของเครื่องทดสอบความเค้น แบบแกนเดี่ยว.....	188
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	229

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการคืบในบริเวณต่าง ๆ.....	5
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักสูงสุดของตุ้มน้ำหนัก และความสูงสุทธิของตุ้มน้ำหนัก.....	40
ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาในการทำอุณหภูมิให้ถึงค่าที่ต้องการและกำลังความร้อน ที่ต้องการ.....	80
ตารางที่ 4.3 พิกัดของจุดต่อ และสมบัติของหน้าตัดของเอลิเมนต์ต่าง ๆ.....	85
ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อหาจุดศูนย์ถ่วง.....	87
ตารางที่ 6.1 ระยะเวลาเคลื่อนตัวของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ $\delta_{it}$ (มม).....	132
ตารางที่ 6.2 ผลการคำนวณอัตราทดของคานทอดแรง.....	135
ตารางที่ 6.3 เปอร์เซ็นต์การตัด กรณีคานทอดแรงเอียงทำมุม 0 องศากับแนวระดับ.....	141
ตารางที่ 6.4 เปอร์เซ็นต์การตัด กรณีคานทอดแรงเอียงทำมุม 10 องศากับแนวระดับ.....	142
ตารางที่ ก.1 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่1 (คานทอดแรงอยู่ในแนวระดับ)...	171
ตารางที่ ก.2 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่2 (คานทอดแรงอยู่ในแนวระดับ)...	172
ตารางที่ ก.3 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่3 (คานทอดแรงอยู่ในแนวระดับ)...	173
ตารางที่ ก.4 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่4 (คานทอดแรงอยู่ในแนวระดับ)...	174
ตารางที่ ก.5 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่1 (คานทอดแรงเอียงทำมุม 10 องศากับแนวระดับ).....	175
ตารางที่ ก.6 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่2 (คานทอดแรงเอียงทำมุม 10 องศากับแนวระดับ).....	176
ตารางที่ ก.7 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่3 (คานทอดแรงเอียงทำมุม 10 องศากับแนวระดับ).....	177
ตารางที่ ก.8 ความเครียดบนโหนดเซลล์ในการทดลองครั้งที่4 (คานทอดแรงเอียงทำมุม 10 องศากับแนวระดับ).....	178
ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานตามแนวเส้นรอบวงและแนวแกนในการวัดครั้งที่1.....	179
ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานตามแนวเส้นรอบวงและแนวแกนในการวัดครั้งที่2.....	179
ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานตามแนวเส้นรอบวงและแนวแกนในการวัดครั้งที่3.....	180
ตารางที่ ง.1 แสดงรายชื่อและจำนวนของชิ้นส่วนต่างๆ.....	188

# สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นกราฟพฤติกรรมการคืบ.....	5
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการคืบที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆ.....	6
รูปที่ 2.3 กราฟการเสียหายคืบ.....	6
รูปที่ 2.4 โหมดการสูญเสียความร้อนของเตาความร้อน.....	7
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังรابيبหลายชั้น.....	8
รูปที่ 2.6 การนำความร้อนใน 1 มิติผ่านผนังทรงกระบอกหลายชั้น.....	9
รูปที่ 2.7 การประมาณผนังเตาด้านนอกให้เป็นเสมือนแผ่นแบนตั้งฉากในแนวตั้ง.....	10
รูปที่ 2.8 การพาความร้อนสำหรับแผ่นแบนบางในแนวระดับ (ก) ผิวบน (ข) ผิวล่าง.....	11
รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบกลม.....	13
รูปที่ 2.10 การแผ่รังสีระหว่างวัตถุใหญ่ที่ล้อมรอบวัตถุเล็ก.....	14
รูปที่ 2.11 รูปจำลองของระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	16
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนโดยรวมในการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบความคืบ.....	18
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียว.....	19
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบ และหลักการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	21
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของเครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียวและความสัมพันธ์ ระหว่างองค์ประกอบ.....	21
รูปที่ 3.5 ลำดับการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องทดสอบความคืบ.....	22
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกำหนดอุณหภูมิออกแบบ.....	24
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการกำหนดภาระออกแบบ.....	25
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	27
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์จับยึดและก้านดึงชิ้นงานที่อบบน.....	28
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์จับยึดและก้านดึงชิ้นงานที่อบล่าง.....	30
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเลือกชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป.....	31
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนออกแบบเตาความร้อน.....	33
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการออกแบบโครงของเครื่องทดสอบความคืบ.....	34
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการออกแบบก้านดึงคานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด.....	35
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนออกแบบคานทดสอบ.....	36
รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	37
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ.....	41

# สารบัญญภาพ (ต่อ)

๕๓

	หน้า
รูปที่ 4.2 รูปร่าง และตัวแปรบอกมิติ ของชิ้นงานทดสอบ.....	43
รูปที่ 4.3 รูปร่างและตัวแปรบอกมิติของก้านตั้งชิ้นงานที่ออกแบบ.....	49
รูปที่ 4.4 รูปร่างและตัวแปรระบุขนาด ของก้านตั้งชิ้นงานทดสอบ (ด้านคานทอดแรง).....	54
รูปที่ 4.5 รูปร่างและตัวแปรระบุขนาดของตัวจับยึดคานทอดแรง.....	54
รูปที่ 4.6 ภาพประกอบของการจับยึดระหว่างก้านตั้งชิ้นงานทดสอบกับตัวจับยึดคานทอดแรง ด้วยสลัก.....	56
รูปที่ 4.7 รูปร่าง และตัวแปรบอกขนาดของ ตัวจับยึดชิ้นงาน.....	59
รูปที่ 4.8 วิธีจับยึดจากฐานเครื่องทดสอบถึงปลายของก้านตั้งชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง.....	61
รูปที่ 4.9 ตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะตามแนวแกน.....	62
รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ปรับระยะ และตัวแปรบอกมิติ.....	63
รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งกับตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ.....	67
รูปที่ 4.12 ภาพด้านบนเปลือกเตาขณะที่ประกอบกัน.....	68
รูปที่ 4.13 ภาพตัดวิวด้านข้างของเปลือกเตาแต่ละซีก.....	69
รูปที่ 4.14 ภาพตัดด้านข้างของเตาความร้อนและโหมมการสูญเสียความร้อน.....	70
รูปที่ 4.15 ภาพตัดด้านข้างของเตาความร้อน เพื่อแสดงการสูญเสียความร้อน ที่ผิวด้านบนของเตาความร้อน.....	74
รูปที่ 4.16 การสูญเสียความร้อนผ่านก้านตั้งชิ้นงาน.....	76
รูปที่ 4.17 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านก้านตั้งชิ้นงาน.....	76
รูปที่ 4.18 แสดงแบบร่างโครงของเครื่องทดสอบ.....	81
รูปที่ 4.19 ภาพด้านบนของเปลือกเตาสำหรับประกอบกรหาเนื้อที่ใช้สอยด้านกว้าง.....	81
รูปที่ 4.20 ภาพวิูข้างของเครื่องทดสอบ แสดงตำแหน่งของคานทอดแรงเพื่อประกอบกรหา ความลึกของเครื่องทดสอบ.....	83
รูปที่ 4.21 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงเครื่องทดสอบ.....	84
รูปที่ 4.22 ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้าง.....	85
รูปที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของส่วนต่าง ๆ เพื่อหาจุดศูนย์ถ่วงของโครงสร้าง.....	86
รูปที่ 4.24 การจับยึดระหว่างก้านตั้งคานทอดแรงกับคานทอดแรงและจานรองตุ้มน้ำหนัก.....	88
รูปที่ 4.25 การจับยึดระหว่างก้านตั้งคานทอดแรงกับจานรองตุ้มน้ำหนัก.....	89
รูปที่ 4.26 ภาพหน้าตัดของจานรองตุ้มน้ำหนัก และขนาด.....	92
รูปที่ 4.27 รูปร่าง และตัวแปรบอกขนาดของ ตัวจับยึดคานทอดแรง (ด้านที่แขวนตุ้มน้ำหนัก)..	93
รูปที่ 4.28 ภาวะที่กระทำต่อสลักยึดก้านตั้งคานทอดแรงกับตัวจับยึดคานทอดแรง.....	94

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 คานทอดแรง.....	98
รูปที่ 4.30 แท่นรองรับคานทอดแรง.....	99
รูปที่ 4.31 ลักษณะหน้าตัดของสลักคมมีด.....	100
รูปที่ 4.32 ตำแหน่งของสลักคมมีดและภาวะที่กระทำต่อสลัก.....	100
รูปที่ 4.33 ผังวัตถุอิสระของคานทอดแรง.....	100
รูปที่ 4.34 คานแบบ simply support ที่รับแรงแบบจุด 2 แรง ห่างจากปลายเท่า ๆ กัน.....	102
รูปที่ 4.35 คานทอดแรงและตัวแปรบอกมิติ.....	104
รูปที่ 4.36 แสดงการหมุนของคานทอดแรงรอบจุดหมุน $A$ .....	107
รูปที่ 4.37 แสดงการต่ออนุกรมของขดลวดความร้อนใน ชุดให้ความร้อน 2 ชั้น.....	108
รูปที่ 4.38 บล็อกไดอะแกรมการเดินสายไฟฟ้าในกล่องควบคุมอุณหภูมิ.....	111
รูปที่ 4.39 แสดงรายละเอียดการเดินสายไฟฟ้าในกล่องควบคุมอุณหภูมิ.....	111
รูปที่ 5.1 เปลือกเตา.....	113
รูปที่ 5.2 ฉนวนด้านข้าง.....	113
รูปที่ 5.3 ฉนวนด้านบนและด้านล่าง.....	114
รูปที่ 5.4 ชุดให้ความร้อน 2 ซีก.....	114
รูปที่ 5.5 เตาคำความร้อนเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก 2 ซีก.....	115
รูปที่ 5.6 เตาคำความร้อน.....	115
รูปที่ 5.7 อุปกรณ์สำหรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	117
รูปที่ 5.8 กล่องควบคุมอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล.....	118
รูปที่ 5.9 การตรวจสอบการติดตั้งที่รองรับสลักคมมีด.....	120
รูปที่ 5.10 การติดตั้งที่รองรับสลักคมมีดบนคานบน.....	120
รูปที่ 5.11 การติดตั้งแผ่นเหล็กสำหรับรองรับคานกลางด้วยการเชื่อม.....	121
รูปที่ 5.12 การประกอบเสาคานบนและแผ่นเหล็กสำหรับรองรับคานกลางด้วยการเชื่อม.....	121
รูปที่ 5.13 การติดตั้งเสาที่เชื่อมติดกับคานบนแล้วเข้ากับฐานของเครื่องทดสอบ.....	122
รูปที่ 5.14 ตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะตามแนวแกน ตัวจับยึดคานทอดแรง และสลัก.....	122
รูปที่ 5.15 คานทอดแรง แผ่นเสริมแรง และ ซีแคลมป์.....	123
รูปที่ 5.16 คานทอดแรง สลักคมมีด ตัวจับยึดคานทอดแรง น้ำหนักปรับสมดุลและไดอัลเกจ.....	123
รูปที่ 5.17 ตัวปรับระยะตามแนวแกน ก้านปรับระยะ และก้านหมุนปรับระยะ.....	124
รูปที่ 5.18 ชิ้นงานทดสอบ ก้านดึงชิ้นงานท่อนบนและท่อนล่าง และตัวจับยึดชิ้นงาน.....	124
รูปที่ 5.19 ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า) ก้านดึงตุ้มน้ำหนัก และสลักขนาด 5 มม.....	125

# สารบัญญภาพ (ต่อ)

๗

	หน้า
รูปที่ 5.20 จานรองตุ้มน้ำหนักที่เชื่อมติดกับก้านตั้งตุ้มน้ำหนัก.....	125
รูปที่ 5.21 ชุดคานกลางที่มีแผ่นรองรับเตาเชื่อมติดอยู่บนคานกลาง.....	126
รูปที่ 5.22 ฐานของตัวปรับระยะ ชุดคานทดแรง ชุดใสน้ำหนัก ชุดคานกลาง และชิ้นส่วนเสริม.....	126
รูปที่ 5.23 เครื่องทดสอบความคืบแบบแกนเดียว.....	127
รูปที่ 6.1 โหลดเซล.....	129
รูปที่ 6.2 สเตรนมิเตอร์.....	129
รูปที่ 6.3 การต่อวงจร half bridge เพื่อเข้าสเตรนมิเตอร์.....	130
รูปที่ 6.4 ตำแหน่ง และลักษณะการวางตัวของสเตรนเกจบนโหลดเซล.....	130
รูปที่ 6.5 ตำแหน่งของไดอัลเกจ และก้านตั้งขึ้นงานทดสอบ.....	130
รูปที่ 6.6 ระยะเคลื่อนตัวของชุดให้ภาระขึ้นงานทดสอบที่ขนาดตุ้มน้ำหนักต่าง ๆ.....	133
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉลี่ย และขนาดตุ้มน้ำหนัก (กรณีคานทดแรงทำมุม 0 องศาับแนวระดับ).....	134
รูปที่ 6.8 ตำแหน่งของสเตรนเกจในการทดลองเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์การตัด.....	136
รูปที่ 6.9 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 1 (คานทดแรงทำมุม 0 องศาับแนวระดับ).....	137
รูปที่ 6.10 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 2 (คานทดแรงทำมุม 0 องศาับแนวระดับ).....	137
รูปที่ 6.11 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 3 (คานทดแรงทำมุม 0 องศาับแนวระดับ).....	138
รูปที่ 6.12 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 4 (คานทดแรงทำมุม 0 องศาับแนวระดับ).....	138
รูปที่ 6.13 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 1 (คานทดแรงทำมุม 10 องศาับแนวระดับ).....	139
รูปที่ 6.14 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 2 (คานทดแรงทำมุม 10 องศาับแนวระดับ).....	139
รูปที่ 6.15 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 3 (คานทดแรงทำมุม 10 องศาับแนวระดับ).....	140
รูปที่ 6.16 ความเครียดตัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองครั้งที่ 4 (คานทดแรงทำมุม 10 องศาับแนวระดับ).....	140

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.17 ชี้นงานทดสอบจำลองที่เชื่อมเทอร์โมคัปเปิล 8 ตำแหน่ง เรียงเป็นแถวเดียว.....	143
รูปที่ 6.18 เครื่องคอมพิวเตอร์ data logger และเครื่องทดสอบความคืบ.....	147
รูปที่ 6.19 ตำแหน่งของชี้นงานทดสอบและตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล.....	144
รูปที่ 6.20 ลักษณะการติดตั้งชี้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบความคืบเพื่อวัดอุณหภูมิ.....	145
รูปที่ 6.21 ระดับอ้างอิง.....	145
รูปที่ 6.22 กราฟระหว่างอุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบกับเวลา (ช่วง 1.7 ชั่วโมงแรก).....	146
รูปที่ 6.23 กราฟระหว่างอุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบกับเวลา (ช่วง 1.7 – 4.2 ชั่วโมง).....	146
รูปที่ 6.24 กราฟระหว่างอุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบกับเวลา (ช่วง 4.2 – 7.3 ชั่วโมง).....	147
รูปที่ 6.25 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิถึงค่าที่ตั้ง.....	148
รูปที่ 6.26 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 21:09:15 - 00:16:30 น....	148
รูปที่ 6.27 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 00:18:18 - 04:46:48น....	149
รูปที่ 6.28 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 05:05:08 - 09:27:50น....	149
รูปที่ 6.29 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 09:29:09 - 13:52:34น....	150
รูปที่ 6.30 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 13:54:11 - 14:34:02น....	150
รูปที่ 6.31 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 14:37:50 - 18:40:30น....	151
รูปที่ 6.32 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 18:42:05 - 22:38:03น....	151
รูปที่ 6.33 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 22:40:50 - 02:09:23น....	152
รูปที่ 6.34 อุณหภูมิบนชี้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง T <sub>1</sub> ในช่วงเวลา 02:11:30 - 06:34:06น....	152
รูปที่ 6.35 อุปกรณ์สำหรับตั้งศูนย์เตาความร้อน.....	153
รูปที่ 6.36 เครื่องอ่านอุณหภูมิ และตัวเลือกช่องสัญญาณ.....	153
รูปที่ 6.37 วิธีตั้งศูนย์เตาความร้อน (แผ่นเหล็กกลมอยู่ในตำแหน่งล่างสุด).....	154
รูปที่ 7.1 ตำแหน่งของจุดที่เชื่อมต่อกับชี้นส่วนอื่น ๆ บนคานทดสอบ.....	158
รูปที่ 7.2 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิบนเส้นรอบวงที่ระยะใด ๆ วัดจากระดับอ้างอิง.....	163
รูปที่ 7.3 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของชี้นงานทดสอบและบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 6 องศาเซลเซียส.....	164



## คำอธิบายสัญลักษณ์

- $\varepsilon$  คือ ความเครียด, ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการแผ่รังสี เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำ ซึ่งมีค่า  $\varepsilon$  เท่ากับ 1 ดังนั้น  $0 \leq \varepsilon \leq 1$
- $\varepsilon_i$  คือ ความเครียดที่วัดได้จากเส้นตรงแกน  $i$
- $\varepsilon_{m,i}$  คือ ความเครียดเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่  $i$
- $\bar{\varepsilon}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความเครียดเฉลี่ย  $\varepsilon_{m,i}$
- $\varepsilon_a$  คือ แอมพลิจูดความเครียด
- $\varepsilon_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของความเครียด
- $\nu$  คือ Kinematic viscosity ของอากาศ ( $m^2/s$ )
- $\nu_{max}$  คือ ระยะแอนตัวสูงสุดของคาน ( $mm$ )
- $\alpha$  คือ Thermal diffusivity ของอากาศ ( $m^2/s$ ) , มุมเอียงของคานทดสอบ (degree)
- $\theta_i$  คือ มุมเอียง (degree)
- $\theta_b$  คือ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ( $^{\circ}C$ )
- $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ( $kg/m^3$ ), รัศมีความโค้งของฟิลเลตที่บ่าเพลลา ( $mm$ )
- $n$  คือ จำนวนเกลียว
- $\eta$  คือ ประสิทธิภาพของเตาความร้อน
- $\delta_{lt}$  คือ ระยะเคลื่อนตัวของชุดให้ภาระขึ้นงานทดสอบ ( $mm$ )
- $\delta_{dial}$  คือ ระยะเคลื่อนตัวของไดอัลเกจ ( $mm$ )
- $\sigma$  คือ ความเค้น (Pa) , stefan-boltzmann constant ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K$
- $\sigma_{u,RT}$  คือ ความต้านแรงดึงที่ต่ำที่สุด ณ อุณหภูมิห้อง (MPa)
- $\sigma_{u,HT}$  คือ ความต้านแรงดึง ณ อุณหภูมิใช้งาน (MPa)
- $\sigma_{y,RT}$  คือ ความต้านแรงดึงครากต่ำสุด (MPa)
- $\sigma_{y,HT}$  คือ ความต้านแรงดึงครากที่ต่ำที่สุด ณ อุณหภูมิใช้งาน (MPa)
- $\sigma_{c-1\%}$  คือ ความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 1 เปอร์เซ็นต์ ใน  $10^5$  ชั่วโมง (MPa)
- $\sigma_{allow}$  คือ ความเค้นที่ยอมรับได้ (MPa)
- $\sigma_y$  คือ ความต้านแรงดึงคราก (MPa)
- $\tau_{allow}$  คือ ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ (MPa)
- $\tau_y$  คือ ความเค้นเฉือนคราก (MPa)
- $\%b$  คือ เปอร์เซ็นต์การตัด
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด, พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของครีบกกลม ( $m^2$ )
- $A_s$  คือ พื้นที่ผิวรอบครีบกกลมวัดจากฐานถึงตำแหน่ง  $x$  ( $m^2$ )
- $A_r$  คือ พื้นที่หน้าตัดของก้านดิ่งชิ้นงาน ( $m^2$ )
- $A_0$  คือ พื้นผิวด้านนอกเตาความร้อน;  $A_0 = 2\pi r_3 H$  ( $m^2$ )
- $b$  คือ ความสูงของฐานเกลียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{3}{4}p$  (mm)  
ระยะระหว่างผิวของตัวจับยึดคานทอดแรง หรือ คานทอดแรง, ความสูงของฐานเกลียว (mm)
- $C$  คือ ระยะเผื่อสำหรับตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg-K)
- $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของครีบกกลม, เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปลอก (mm)
- $D_G$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $D_{rL_n}$  คือ แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดิ่งคานทอดแรงส่วนหน้า (mm)
- $d_i$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นส่วน  $i$  (mm)
- $d_r$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วน  $i$  (mm)
- $d_r$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $d_{s_n}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุนของดิ่งชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $d_{r_n}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุนของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $d_{r_r}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ (mm)
- $d_{s_r}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก ของชิ้นงานทดสอบ(mm)
- $d_{i_r}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากเกลียวของก้านปรับระยะ (mm)
- $d_{i_n}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุนของเกลียวของก้านปรับระยะ (mm)
- $d_{rL_n}$  คือ ขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดิ่งคานทอดแรงส่วนหน้า(mm)
- $d_{LC}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโหลดเซลล์ (mm)
- $E$  คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของเหล็ก (GPa)
- $e$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลาง (mm)
- $e_U$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางของชุดให้ภาระท่อนบน(mm)
- $e_L$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางของชุดให้ภาระท่อนล่าง(mm)
- $F$  คือ ขนาดของภาระที่กระทำต่อคาน (N)
- $g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )
- $H$  คือ ความสูงของ Heating module (mm)

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- $H_i$  คือ ความสูงของชั้นส่วน  $i$  (mm)
- $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวนอก , สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของครีป ( $W/m^2$ )  
ระยะห่างในแนวดิ่ง (mm)
- $h_i$  คือ ความสูงของชั้นส่วนที่  $i$  (mm)
- $h_w$  คือ ความสูงของตุ่มน้ำหนัก (m)
- $I$  คือ moment of inertia ( $mm^4$ ) , กระแสไหลด (A)
- $K$  คือ ความแข็งเกร็ง (N/m)
- $k$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ , thermal conductivity ของอากาศ ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $k_t$  คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น
- $k_r$  คือ สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของก้านดิ่งชั้นงาน ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $k_F$  คือ สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของ heating modul ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $k_I$  คือ สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของ insulaion ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $k_S$  คือ สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของ stainless steel ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $k_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในตัวกลางชั้นที่  $i$  ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $L$  คือ ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length) , ความยาวของก้านดิ่งชั้นงาน (m)
- $L_B$  คือ ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length) , ความยาวของก้านดิ่งชั้นงาน (m)
- $L_i$  คือ ความหนาของผนังชั้นที่  $i$  (m) , ความสูงของเตาทรงกระบอก (m) ,
- $L_G$  คือ ความยาวเกจของชั้นงานทดสอบ (m) , ความยาวของตัวจับยึดชั้นงานทดสอบ (mm)
- $L_{adj}$  คือ ระยะใช้งานในแนวแกน ที่อุปกรณ์ปรับระยะสามารถปรับ (mm)
- $L_t$  คือ ความยาวของอุปกรณ์ปรับระยะ (mm)
- $L_{ext}$  คือ ระยะติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว (mm)
- $L_C$  คือ ระยะเผื่อถึงตำแหน่งสิ้นสุดเกลียว (mm)
- $L_S$  คือ ความยาวสุทธิของชั้นงานทดสอบ (mm)
- $L_T$  คือ ความยาวเกลียวของชั้นงานทดสอบ (mm)
- $L_{Tr}$  คือ ความยาวเกลียวที่ปลายของก้านดิ่งชั้นงานทดสอบ (mm)
- $LT_{rL}$  คือ ความยาวเกลียวที่ปลายของก้านดิ่งคานทดสอบส่วนหน้า (mm)
- $L_G$  คือ ความยาวเกลียวตัวจับยึดชั้นงานทดสอบ (mm)
- $M_{max}$  คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด (N.m)
- $m_i$  คือ มวลของชั้นที่  $i$  (kg)

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- $m_w$  คือ มวลของคัมภ์น้ำหนักปรับสมดุล(kg)
- $m_i$  คือ มวลของชิ้นส่วนที่  $i$  (kg)
- $Nu$  คือ Nusselt number
- $P$  คือ เส้นรอบวงของครีป (perimeter; m) , ภาระทดสอบที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ (N), กำลังความร้อนที่ต้องการของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป (W)
- $Pr$  คือ Prandtl number
- $p$  คือ ระยะพิตช์ (mm)
- $Q_i$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านผนังของเตาความร้อนชั้นที่  $i$  (W)
- $Q_{Abs}$  คือ ปริมาณความร้อนที่วัสดุกักเก็บในช่วงเริ่มต้น (J)
- $Q_{Loss}$  คือ กำลังความร้อนที่สูญเสีย (W)
- $Ra$  คือ Rayleigh number
- $r$  คือ อัตราทดของคานทอดแรง
- $r_i$  คือ รัศมีด้านในของเตาความร้อนชั้นที่  $i$  (mm)
- $r_o$  คือ รัศมีด้านนอกของเตาความร้อน (mm)
- $SF$  คือ ตัวประกอบความปลอดภัย
- $S$  คือ ความกว้างของโครง (m)
- $T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
- $T_i$  คือ อุณหภูมิที่ผิว  $i$  ,อุณหภูมิ เริ่มต้น ( $^{\circ}C$ )
- $T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )
- $T_b$  คือ อุณหภูมิที่ฐานของครีปกลม ( $^{\circ}C$ )
- $T_f$  คือ อุณหภูมิสิ้นสุดของวัตถุ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของวัตถุ ( $^{\circ}C$ )
- $t$  คือ เวลา (s)
- $t_r$  คือ อายุความคืบ (hr)
- $t_F$  คือ ความหนาของแผ่นปิด ซึ่งทำจากวัสดุเดียวกับชุดให้ความร้อน (mm)
- $t_s$  คือ ความหนาของเปลือกเตา (mm) , ช่วงเวลาเริ่มต้น (s)
- $w$  คือ ภาระที่กระทำต่อปลายก้านดึงคานทอดแรงส่วนหน้า (N)
- $w_i$  คือ ความกว้างของหน้าตัด  $i$  (mm)
- $w_{max}$  คือ น้ำหนักของคัมภ์น้ำหนักร (kg)
- $\bar{x}_i$  คือ ระยะแนวระดับจากจุดศูนย์ถ่วงของส่วนที่  $i$  ถึงจุดกำเนิด