

การศึกษาการประเมินอายุหม้อน้ำด้วยกลไกการคืบ
LIFE ASSESSMENT EVALUATION OF CREEP DAMAGED TUBES

ธวัฒน์ชัย	แซ่ควี้
ปิยะ	วีรยวรางกูร
แสนยานุภาพ	เอี่ยมสกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการประเมินอายุหม้อน้ำด้วยกลไกการคืบ

LIFE ASSESSMENT EVALUATION OF CREEP DAMAGED TUBES

ธวัฒน์ชัย	แซ่ควั
ปิยะ	วีรยวรางกูร
แสนยานุภาพ	เอี่ยมสกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

LIFE ASSESSMENT EVALUATION OF CREEP DAMAGED TUBES

Thawatchai
Piya
Sanyanuparb

Saekiew
Werayawarangura
Eiamsakul

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

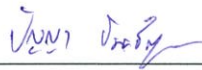
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการประเมินอายุหม้อไอน้ำด้วยกลไกการคืบ

LIFE ASSESSMENT EVALUATION OF CREEP DAMAGED TUBES

ผู้จัดทำ

1. นาย ธวัฒน์ชัย แซ่ควี้ รหัสประจำตัว 57010603
2. นาย ปิยะ วีรยวรางกูร รหัสประจำตัว 57010782
3. นาย แสนยานุภาพ เอี่ยมสกุล รหัสประจำตัว 57011440



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ)

การศึกษาการประเมินอายุหม้อไอน้ำด้วยกลไกการคืบ

นายธวัฒน์ชัย	แซ่ควี้	57010603
นายปิยะ	วีรยารากร	57010782
นายแสนยานุภาพ	เลี่ยมสกุล	57011440
ผศ.ดร.ปัญญา	จันทร์สุวรรณ	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการทำโครงการนี้เพื่อประเมินอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำภายใต้อุณหภูมิสูง ด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบ ในการใช้งานวัสดุภายใต้อุณหภูมิสูง การคืบเป็นปัญหาหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง การคืบทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร อันเป็นปัจจัยหนึ่งของการเสียหายของวัสดุ ในโครงการนี้เราใช้หม้อไอน้ำแบบท่อไฟเป็นตัวอย่างในการประเมินอายุ หลักการเบื้องต้นในการประเมินอายุของหม้อไอน้ำ คือการหาค่าความเค้นครากและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการคืบจากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาตั้งค่าในเครื่องทดสอบ การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาทดสอบพฤติกรรมการคืบ จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสามารถหากราฟคุณสมบัติการคืบของชิ้นงานได้และในขั้นตอนสุดท้ายคือการจำลองอุณหภูมิในหม้อไอน้ำโดยใช้โปรแกรม FEA เพื่อระบุจุดเสี่ยงที่อาจเกิดความเสียหายจากความคืบและนำค่าเวลาจนเกิดการแตกหักจากการทดสอบและความเค้นมาประเมินอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ด้วยวิธี Larson-Miller

คำหลัก:

การคืบ, หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ, การเสียหายของวัสดุ, อุณหภูมิสูง, เวลาจนเกิดการแตกหัก

LIFE ASSESSMENT EVALUATION OF CREEP DAMAGED TUBES

Thawatchai	Saekiew	57010603
Piya	Werayawarangura	57010782
Sanyanuparb	Eiamsakul	57011440
Assis.Prof. Dr.Panya Kansuwan		Advisor
Year 2560		

ABSTRACT

The purpose of this project is to evaluate lifetime of boiler which using under high temperature by analyzes creeping behavior. When working at high temperature, creep is the problem that must consider. Since creep is the cause of plastic deformation that is a part of failure in material. This project mainly focused on fire-tube boiler. First, begin with find yield strength and temperature which creep would occur of the sample material then bring the result to set up in testing machine. Finally, simulate fire tube boiler model to find temperature profile with Finite element analysis program to indicate risk points from creep damage and assembly all the result from testing to evaluate lifetime of fire tube boiler by Larson-Miller method.

Keywords:

Creep, Fire tube boiler, Failure in material, High temperature, Life time, Rupture time.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยมีผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำในทุก ๆ เรื่องรวมทั้งแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาเมื่องานเกิดปัญหาตอนทำการวิจัยตลอดจนความสนใจ เอาใจใส่ คอยดูแลตลอดการศึกษาทำวิจัยโครงการนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านคณาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญในชีวิตคือบิดา มารดา ที่เป็นผู้ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุน ให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มกำลังความสามารถของท่านที่ทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบให้ บิดา มารดา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้ามาตลอด ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายธวัฒน์ชัย	แซ่ควี้
นายปิยะ	วีรยวรางกูร
นายแสนยานุภาพ	เอี่ยมสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงานของโครงการ.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีเทคโนโลยีหม้อไอน้ำ.....	3
2.2 ทฤษฎีความคืบ.....	4
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	7
2.4 ทฤษฎีความเสียหาย.....	13
2.5 การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด(Work hardening)และการคืนตัว(recovery).....	16
2.6 Larson Miller Parameter.....	17
บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการปฏิบัติงาน.....	18
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	18
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	25
ภาคผนวก.....	26
บรรณานุกรม.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ.....	3
2.2.1 กราฟแสดงพฤติกรรมความคืบของโลหะ.....	5
2.2.2 กราฟแสดงผลกระทบต่ออัตราความคืบเมื่อเปลี่ยนแปลงความเค้นและอุณหภูมิ.....	6
2.3.1 การนำความร้อนของทรงกระบอก.....	9
2.3.2 ประเมินค่าการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ.....	10
2.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของสารชนิดต่างๆกับอุณหภูมิ.....	10
2.4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้น.....	14
2.5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดขณะเกิด work hardening.....	16
2.6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ LMP.....	17
4.1 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 180 MPa.....	22
4.2 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 200 MPa.....	22
4.3 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 220 MPa.....	23
4.4 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 550 °C.....	23
4.5 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 570 °C.....	24
4.6 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 590 °C.....	24
5.1 กราฟระหว่าง LMP และ Stress.....	25

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไข.....	21

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในการเลือกวัสดุเพื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์และอุตสาหกรรมแขนงต่าง ๆ การคืบ(Creep)เป็นปัญหาหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุภายใต้ความเค้นคงที่และอุณหภูมิคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอุณหภูมิใช้งานของวัสดุมีค่ามากกว่า $0.4 T_m$ (T_m คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุ) ซึ่งการแตกหักหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อนระยะเวลาอันสมควรจะทำให้ระบบต่าง ๆ ทั้งในอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ต้องหยุดการทำงาน ส่งผลให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมาก

ในการใช้งานจะรู้ได้อย่างไรว่าชิ้นส่วนของอุปกรณ์ดังกล่าว จะมีอายุการใช้งานนานเท่าไร ในงานออกแบบต้องมีข้อมูลของเวลาในการแตกหักเสียหาย และมีข้อมูลของอัตราการคืบต่ำสุด (Minimum creep rate) จึงจะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานของวัสดุชนิดนั้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทดลองหาความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลา (Creep curve) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเค้นต่าง ๆ ของโลหะผสมที่ต้องการทดลองหา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ทำการทดสอบเหล็กชนิด 12Cr1MoVG เพื่อหาอายุการใช้งานที่เหลือภายใต้เงื่อนไขของความเค้นและอุณหภูมิที่จะนำมาใช้งานต่อ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการคืบของเหล็ก 12Cr1MoVG ภายใต้ตัวแปร อุณหภูมิ (Temperature) และ ความเค้นคงที่ (Stress)

1.4 วิธีการดำเนินงานของโครงการ

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบการคืบและการดึง โดยใช้ท่อเหล็กตัวอย่างชนิด 12Cr1MoVG
3. ทดสอบหาช่วงความเค้นที่จะนำมาทดสอบ สามารถหาได้จากกราฟดึงชิ้นงานเพื่อหาค่าความเค้นคราก และกำหนดช่วงความเค้นที่จะทดสอบให้มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นคราก ส่วนการเลือกช่วงที่จะนำมาทดสอบ คำนวณจากความเหมาะสมของระยะเวลาในการทดสอบการคืบ
4. หาอุณหภูมิที่จะนำมาทดสอบของชิ้นงาน จากการนำจุดหลอมเหลวของชิ้นงานคูณ 0.4
5. ทดสอบการคืบของท่อเหล็กตัวอย่าง 12Cr1MoVG
6. ทำแบบจำลองหาอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟเพื่อประเมินหาจุดเสี่ยงที่น่าจะเกิดการเสียหายจากการคืบ
7. วิเคราะห์ผลและสรุปของโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายกราฟการคืบและความสำคัญของอัตราการคืบในโลหะได้
2. สามารถอธิบายสาเหตุการคืบในโลหะ ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนรูปของโลหะเมื่อได้รับความเค้นคงที่ และสามารถบอกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการคืบในโลหะได้
3. สามารถนำข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้มาประยุกต์ใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันการเกิดการคืบในโลหะได้
4. สามารถอธิบายเกี่ยวกับหม้อไอน้ำท่อไฟได้
5. สามารถอธิบายเกี่ยวกับ Larson-Miller approach ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเทคโนโลยีหม้อไอน้ำ

2.1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator)

เครื่องกำเนิดไอน้ำเป็นส่วนประกอบหนึ่งของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ โดยมีหน้าที่ผลิตไอน้ำความดันสูงสู่อันหันไอน้ำ เพื่อที่จะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าที่เจนเนอเรเตอร์ ซึ่งในบางครั้งมักจะเกิดความสงสัยระหว่างเครื่องกำเนิดไอน้ำและหม้อไอน้ำ เครื่องกำเนิดไอน้ำจะใช้กับโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและหม้อไอน้ำจะใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม แต่ในบางครั้งอาจจะใช้ปะปนกันได้เนื่องจากมีหน้าที่ผลิตไอน้ำเหมือนกัน

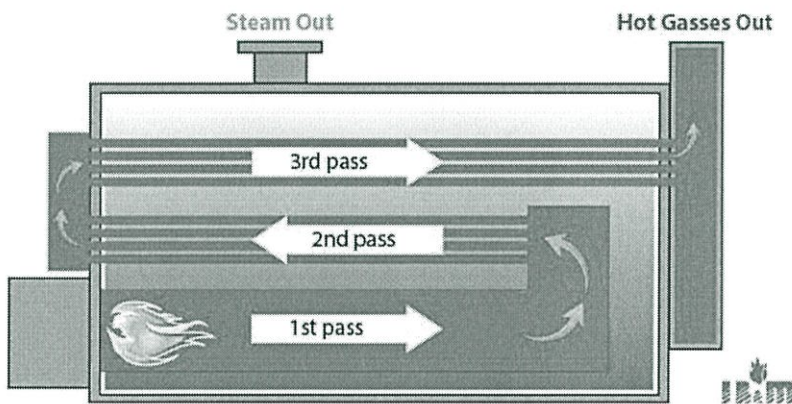
2.1.2 การแบ่งประเภทตามชนิดของของไหลที่ไหลในท่อของหม้อไอน้ำ

1. ท่อไฟ คือ มีไฟวิ่งในท่อโดยมีน้ำอยู่รอบๆ และระเหยกลายเป็นไอน้ำ
2. ท่อน้ำ คือ มีน้ำวิ่งในท่อโดยมีไฟอยู่รอบนอก

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะหม้อไอน้ำแบบท่อไฟเท่านั้นเนื่องจากเป็นชนิดที่ใช้ศึกษา

2.1.3 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

หม้อไอน้ำชนิดนี้จะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก จึงเหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางแนวนอนและมีหัวเผาติดอยู่ด้านข้าง



รูป 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

หม้อไอน้ำชนิดนี้จะมีไฟหรืออากาศร้อนวิ่งในท่อโดยมีน้ำอยู่รอบท่อไฟ โดยอากาศร้อนจะเริ่มวิ่งจากบริเวณหัวเผาผ่านห้องเผาไหม้หรือ 1st pass จากนั้นวกกลับไป 2nd pass และ 3rd pass ตามลำดับ ซึ่งท่อในแนว 2nd pass และ 3rd pass จะมีทั้งท่อสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนในท่อและน้ำ และท่อสำหรับเป็นโครงสร้างให้กับหม้อไอน้ำ

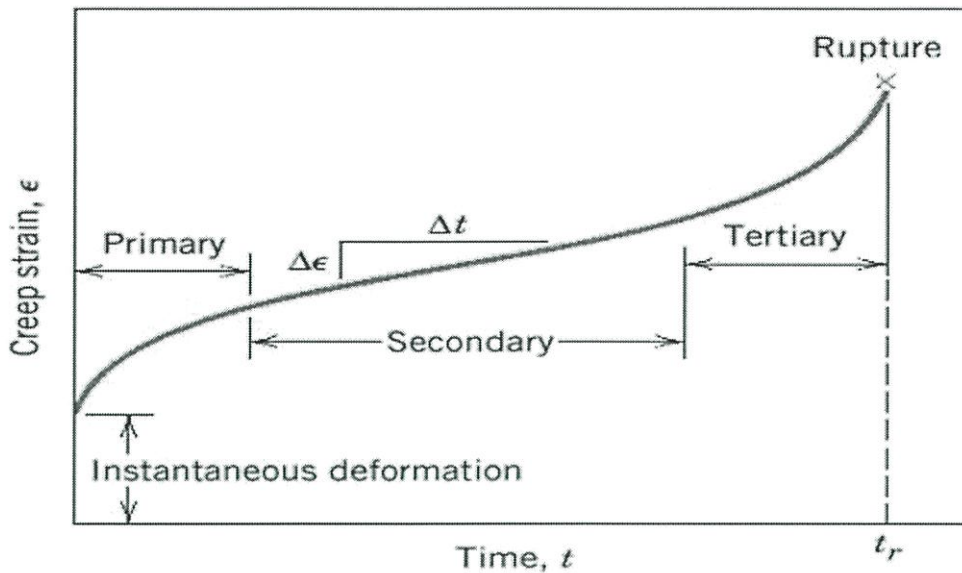
2.2 ทฤษฎีความคืบ

ความคืบ(creep) คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิสูงและรับความเค้นทางกลแบบสถิตย์ เช่น แกนหมุนเทอร์โบตีในเครื่องยนต์เจต และเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ต้องรับความเค้นแบบเหวี่ยงและแรงดันไอน้ำสูง โดยนิยามไว้ เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุอย่างถาวรและขึ้นกับเวลาเมื่อได้รับแรงหรือความเค้นคงที่กระทำโดยปกติความคืบเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงปรารถนา และบ่อยครั้งก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลด้านอายุการใช้งานของชิ้นส่วนนั้น ในวัสดุประเภทโลหะความคืบจะมีส่วนสำคัญมากเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า $0.4T_m$ (T_m = อุณหภูมิหลอมเหลวสัมบูรณ์) ในพอลิเมอร์อสัณฐาน ซึ่งรวมถึงพลาสติกและยาง จะไวต่อความคืบอย่างยิ่ง

2.2.1 พฤติกรรมความคืบทั่วไป (generalized creep behavior)

จากการทดสอบความคืบของวัสดุโลหะด้วยการนำชิ้นงานไปรับแรงหรือความเค้นคงที่กระทำโดยอยู่ที่สภาวะที่อุณหภูมิคงที่ การเปลี่ยนรูปหรือความเครียดสามารถวัดได้และนำไปหาความสัมพันธ์กับเวลา การทดสอบที่สภาวะความเค้นคงที่นี้ถูกนำมาใช้เพื่อใช้ในการศึกษาและเข้าใจถึงกลไกของความคืบ เมื่อนำข้อมูลมาวาดเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมความคืบของวัสดุโลหะเมื่อแรงกระทำคงที่ พบว่ามีเส้นโค้งความคืบแบ่งออกเป็น 3 ระยะ แต่ละระยะจะมีความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลาที่แตกต่างกัน ความคืบระยะแรก (primary or transient creep) จะมีอัตราความคืบลดลงและความชันของเส้นโค้งความคืบลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะว่าวัสดุมีความต้านทานต่อความคืบเพิ่มขึ้นหรือมีความแข็งเนื่องจากความเครียดเพิ่มขึ้น กล่าวคือการเปลี่ยนรูปจะเกิดได้ยากขึ้นเมื่อวัสดุเกิดความเครียด ความคืบระยะที่สอง (secondary creep) หรือที่เรียกกันว่า ความคืบสภาวะคงตัว (steady-state creep) อัตราความคืบและความชันคงที่แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาเป็นเส้นตรง ในสภาวะความคืบนี้ จะเป็นช่วงที่ยาวนานที่สุด สาเหตุที่อัตราความคืบคงที่ อธิบายได้โดยหลักการความสมดุลระหว่างกระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียดกับกระบวนการคืนตัว ความคืบในระยะสุดท้ายหรือความคืบระยะที่สาม (tertiary creep) จะมีอัตราความคืบสูงขึ้นในที่สุดจนทำให้เกิดความเสียหาย ความเสียหายนี้ คือการแตกหัก ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา เช่น การแยกตัวของขอบเกรน (grain boundary) และการเกิดรอยแตกภายใน (internal crack) รูโพรง (cavity) และช่องว่าง (void) ต่าง ๆ ขึ้น และถ้าชิ้นงานอยู่ในสภาวะที่รับแรงดึงก็อาจจะเกิดคอขวดขึ้นในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปได้ สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงอย่างรวดเร็วและมีอัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

Stages of creep

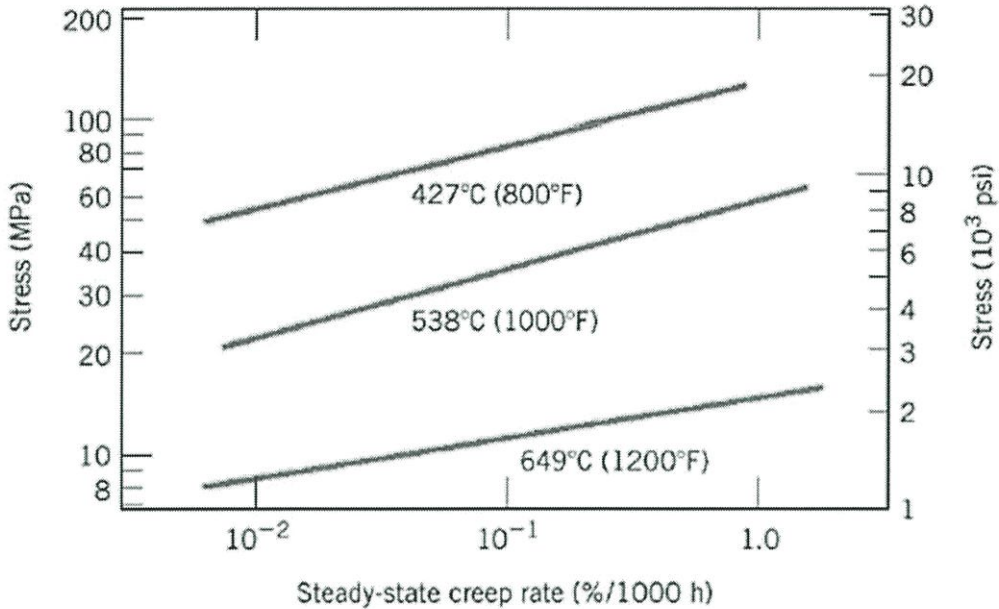


รูป 2.2.1 กราฟแสดงพฤติกรรมความคืบของโลหะ

ในวัสดุประเภทโลหะจะทำการทดสอบความคืบในสภาวะรับแรงแกนเดียว ในทางตรงกันข้ามการทดสอบด้วยการอัดเหมาะสำหรับวัสดุเปราะ สิ่งเหล่านี้ช่วยให้การวัดคุณสมบัติความคืบได้ดียิ่งขึ้นแต่จะไม่พบการขยายความเค้นและไม่มีการขยายตัวของรอยแตก ให้เห็นเหมือนการรับแรงดึง สมบัติความคืบของวัสดุส่วนใหญ่จะไม่ขึ้นกับทิศทางของแรงกระทำ ตัวแปรที่สำคัญมากที่สุดจากการทดลองความคืบคือความชันของเส้นกราฟความคืบในระยะที่สอง ($\Delta\epsilon / \Delta t$) เรียกว่า อัตราความคืบต่ำสุดหรืออัตราความคืบในสภาวะคงตัว (steady-state creep rate, $\dot{\epsilon}_s$) ตัวแปรนี้ใช้สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อพิจารณาลักษณะงานที่ต้องมีอายุการใช้งานยาวนาน เช่น ส่วนประกอบต่าง ๆ ในโรงงานปรมาณูที่ต้องใช้งานหลายทศวรรษ ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดความเครียดมากเกินไปหรือเกิดความเสียหายขึ้นเลย ในทางตรงกันข้ามสำหรับสถานการณ์ที่มีอายุการใช้งานสั้นกว่า เวลาถึงจุดแตกหัก (time to rupture) หรืออายุใช้งานจนแตกหัก (rupture lifetime) เป็นตัวแปรที่ต้องใช้ในการออกแบบ

2.2.2 ผลของความเค้นและอุณหภูมิ (stress and temperature effects)

ทั้งอุณหภูมิและความเค้นมีผลต่อลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือความเค้นอย่างใดอย่างหนึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ความเครียดที่เวลาต่าง ๆ เพิ่มขึ้น อัตราความเค้นที่สภาวะคงตัวเพิ่มขึ้น และอายุใช้งานจนแตกหักลดลง



รูป 2.2.2 กราฟแสดงผลกระทบต่ออัตราความเค้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเค้นและอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ที่ได้จากการสังเกตได้รับการพัฒนา จนกระทั่งพบว่าอัตราความเค้นสภาวะคงตัวเป็นฟังก์ชันของความเค้นและอุณหภูมิ สมการต่อไปนี้แสดงอัตราความเค้นเป็นฟังก์ชันของความเค้น

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$

โดยที่ K_1 และ n เป็นค่าคงที่ของวัสดุ เมื่อพล็อตโดยใช้สเกลลอการิทึมพบว่า $\dot{\epsilon}_s$ มีความสัมพันธ์กับ σ เป็นเส้นตรงและค่าความชันคือ n

และเมื่อเติมอิทธิพลของอุณหภูมิเข้าไป จะทำให้รูปสมการเปลี่ยนไปดังนี้

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

โดยที่ K_2 และ n เป็นค่าคงที่ของวัสดุ และ Q_c เป็นพลังงานกระตุ้นของความเค้น

ทฤษฎีกลไกต่าง ๆ ถูกเสนอเพื่ออธิบายพฤติกรรมความเค้นในวัสดุต่าง ๆ กลไกเหล่านี้มักเกี่ยวข้องกับการแพร่ของช่องว่างเหนียวนำด้วยความเค้น การแพร่ของขอบเกรน การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน และการเลื่อนของขอบเกรน เป็นต้น

2.2.3 วัสดุโลหะผสมที่ใช้ในอุณหภูมิสูง (alloys for high-temperature use)

ปัจจัยหลายตัวที่กระทบต่อลักษณะความคืบของโลหะ ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว มอดูลัสความยืดหยุ่น และขนาดเกรน โดยปกติอุณหภูมิหลอมเหลว มอดูลัสความยืดหยุ่นและขนาดเกรนยิ่งสูงมากเท่าไร ก็ยิ่งส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานความคืบมากขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดเกรน พบว่าถ้ามีขนาดเกรนลดลงจะทำให้ขอบเกรนเลื่อนได้มากขึ้นและส่งผลให้อัตราความคืบสูงเหลือกล้าไร้สนิม โลหะทนความร้อน และโลหะผสมพิเศษ เป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อความคืบดีเยี่ยมจึงถูกนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานต่อความคืบของโลหะผสมพิเศษโคบอลต์และนิกเกิลเพิ่มขึ้นได้ โดยการเติมธาตุผสมเพื่อเป็นสารละลายของแข็ง (solid-solution alloying) และยังเติมเฟสเล็กละเอียดที่ไม่ละลายในเนื้อพื้นอีกด้วย นอกเหนือจากนั้นยังนำเทคนิคกระบวนการผลิตใหม่ ๆ มาใช้ เทคนิคหนึ่งที่ใช้คือการแข็งตัวอย่างมีทิศทางซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีเกรนที่ยาว หรือผลึกเดี่ยว เทคนิคอีกอย่างที่ใช้คือการควบคุมการแข็งตัวไปไหนทิศทางเดียว สามารถสร้างส่วนผสมทางเคมีให้เป็นไปตามต้องการในเนื้อวัสดุและทำให้ได้วัสดุผสมสองเฟส

2.3 การถ่ายเทความร้อน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

- 1) การนำความร้อน
- 2) การพาความร้อน
- 3) การแผ่รังสี

2.3.1 การนำความร้อน

2.3.1.1 สมการพื้นฐานของการนำความร้อน (สมการของ Fourier)

สมมติว่ามีพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในตัววัตถุและให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา (ปริมาณนี้เรียกว่า ฟลักซ์ความร้อน มีหน่วยพื้นฐานเท่ากับ $[W/m^2]$) เท่ากับ q และ q จะแปรผันตามความชันของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น กล่าวคือถ้าให้อุณหภูมิเท่ากับ T [K] ให้ระยะทางตามทิศทางการไหลของความร้อนเท่า x [m] และให้ค่าคงที่ของการแปรผันเท่ากับ λ [$W/(m \cdot K)$] แล้ว

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการความสัมพันธ์พื้นฐานของการนำความร้อน หรือ สมการของ Fourier โดยที่ค่าคงที่ของการแปรผัน λ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว (สมบัติทางกายภาพ) ของวัสดุนั้นๆ ค่า q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ชี้ไปตามทิศทางบวกของ x และเครื่องหมายลบทางด้านขวาของสมการ (2.1) แสดงว่า ความร้อนจะไหลไปในทิศทางที่มีอุณหภูมิต่ำ ($(dT/dx) < 0$)

2.3.1.2 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่น

สมมติว่ามีวัสดุรูปแผ่นมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ l ซึ่งมีอุณหภูมิผิวหน้าทั้งสองด้านเท่ากับ T_1 และ T_2 ในกรณีนี้เราจะสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามทิศทางความหนาเท่านั้น หากภายในแผ่นวัสดุไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ฟลักซ์ความร้อน q จะมีคงที่ ณ ตำแหน่ง x ใดๆ ภายในแผ่นวัสดุ ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ λ แล้ว จะสามารถอินทิเกรตสมการของ Fourier ได้อย่างง่ายดาย

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad dT = \frac{q}{\lambda} dx, \quad T = \frac{q}{\lambda} x + C$$

ในที่นี้เมื่อ $x=0$ แล้ว $T=T_1$ และเมื่อ $x=l$ แล้ว $T=T_2$ ดังนั้น เมื่อนำเงื่อนไขตั้งต้นไปแทนค่าเพื่อกำจัดค่าคงที่ C แล้วจะได้

$$q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{l} \quad (2.2)$$

และปริมาณความร้อน $Q(W)$ ที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หน้าตัด A จะเท่ากับ

$$Q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{l} A = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{l}{\lambda A}\right)} \quad (2.3)$$

ถ้าเราคิดว่าในการนำความร้อนนั้น การที่ความร้อนถ่ายเทจะต้องมีแรงผลักดัน ซึ่งได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิแล้ว ด้านล่างของพจน์ขวาสุดในสมการ (2.3) จะมีความหมายคล้ายกับ “ความต้านทาน” ต่อการถ่ายเทความร้อน บางครั้งจึงเรียกว่า ความต้านทานการนำความร้อน

$$(\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการนำความร้อน}) = \frac{(\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ})}{(\text{ความต้านทานการนำความร้อน})}$$

ดังนั้น หากให้ความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ R_c แล้ว

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{l}{\lambda A} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามทิศทางความหนาแน่นของแผ่นวัสดุแล้ว อุณหภูมิ T ที่ระยะทาง x จะเท่ากับ

$$T(x) = -\frac{q}{\lambda} x + C$$

เมื่อแทนค่าด้วย q ด้วยสมการ (2.2) และแทนค่า C ด้วยค่าที่หาได้จากเงื่อนไขตั้งต้นแล้วจะได้

$$T(x) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{l} \quad (2.5)$$

แสดงว่า อุณหภูมิภายในแผ่นวัสดุจะมีการกระจายเป็นเส้นตรงตามทิศทาง x จาก T_1 ถึง T_2

2.3.1.3 การนำความร้อนของทรงกระบอก

ในทรงกระบอกเช่นรูปที่ 2.2 การกระจายความร้อนของอุณหภูมิตามแนวแกนกลางจะสม่ำเสมอ มีแต่การกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีเท่านั้น ในกรณีนี้ ความร้อนจะไหลจากผิวด้านในออกมาด้านนอก (หรือในทิศทางตรงข้าม) ตามแนวรัศมี

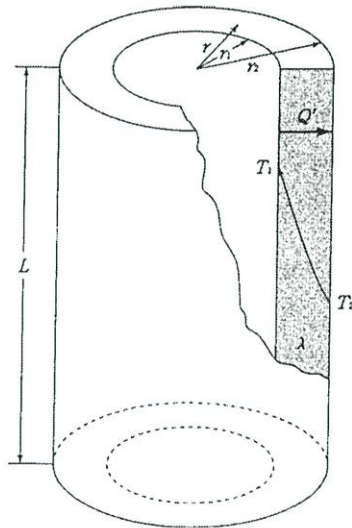
ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ มีค่าคงที่ และภายในทรงกระบอกไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวที่มีรัศมี r และมีความยาวหนึ่งหน่วยตลอดทั่วทั้งพื้นผิว Q' [W/m] จะมีค่าคงที่ตลอด ณ รัศมี r ใดๆ

$$q = \frac{Q'}{2\pi r}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนค่าในสมการของ Fourier และอินทิเกรตแล้ว จะได้ว่า

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (2.6)$$

$$dT = \left(\frac{Q'}{2\pi r}\right) \left(\frac{1}{r}\right) dr, \quad T = \frac{Q'}{2\pi r} \ln r + C$$



รูปที่ 2.3.1 การนำความร้อนของทรงกระบอก

ในที่นี้ เมื่อแทนค่าเงื่อนไขตั้งต้นว่าเมื่อ $r = r_1$ แล้ว $T = T_1$ และเมื่อ $r = r_2$ แล้ว $T = T_2$ จะได้ว่า

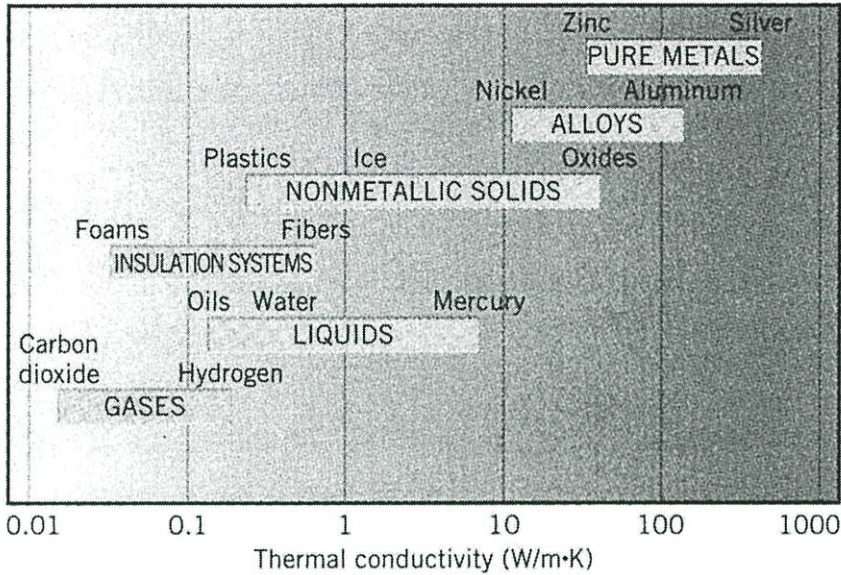
$$T_1 - T_2 = \frac{Q'}{2\pi r} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q'}{2\pi r} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมด Q [W] ที่ถ่ายเทจากผิวด้านในสู่ผิวด้านนอกจะเท่ากับ

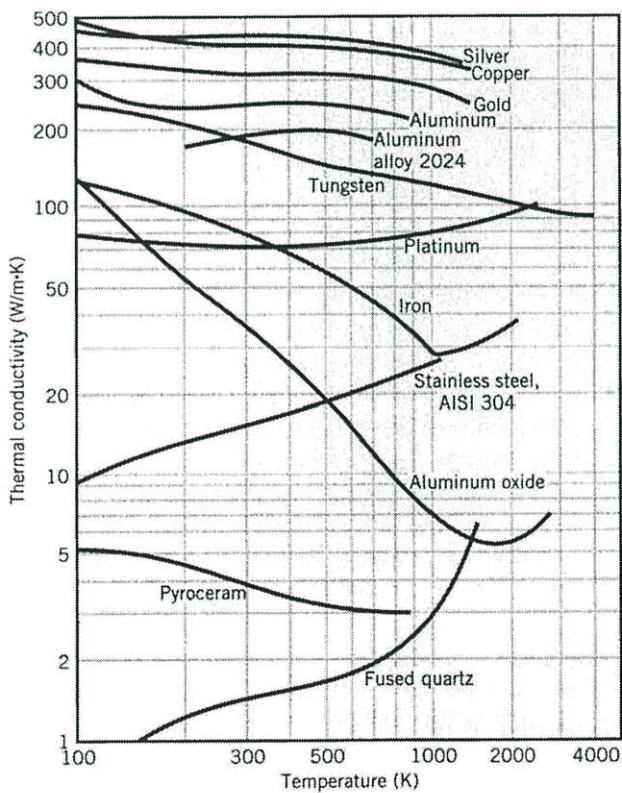
$$Q = Q'L = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{l}{2\pi\lambda L} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (2.7)$$

อุณหภูมิภายในทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ ซึ่งมีการกระจายแบบลอการิทึม

$$T(r) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right), \quad T(r) = T_2 - \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.3.2 ประมาณค่าการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของสารชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ

2.3.2 การพาความร้อน

2.3.2.1 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อพิจารณาในเชิงจุลภาคเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ จะพบว่าที่จริงแล้วการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการนำความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลที่ผิวสัมผัสนั่นเอง โดยปริมาณ ความร้อนที่ถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับการกระจายของอุณหภูมิของชั้นผิวสัมผัส (กล่าวคือขึ้นอยู่กับความชันของเส้น การแผ่กระจายของอุณหภูมิในตัวของไหลที่อยู่ไกลมาๆ กับผิวหน้าของวัตถุ) ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท จึงไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลและรูปร่างของวัตถุเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นราบเรียบหรือปั่นป่วน และขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นอยู่ในช่วงเร่งความเร็วหรือมีความเร็วคงที่แล้ว ฯลฯ อีกด้วย ในที่นี้ เราจะ รวมเอาปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้ไว้ในค่าที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h [W/(m²·K)]) โดยพลັกซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{q} = h(T_{\infty} - T_w) \quad (2.9)$$

T_w เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุ T_{∞} เป็นอุณหภูมิของกระแสหลัก ณ จุดที่ห่างเพียงพอจากผิวหน้า เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่ได้เป็นสมบัติทางกายภาพของสสารเหมือนกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ดังนั้น ค่าของมันบางครั้งจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนผิวหน้าของวัตถุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวหน้า เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (h_x) และค่าเฉลี่ยทั่วผิวหน้าเรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h_m) หากให้พื้นที่ที่มีความร้อนถ่ายเทเท่ากับ A แล้ว ปริมาณ ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านในหนึ่งหน่วยเวลา Q จะเท่ากับ

$$Q = h_m(T_{\infty} - T_w)A$$

2.3.2.2 อุณหภูมิเฉลี่ยผสมในการไหลในท่อ กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม

การคำนวณการพาความร้อนในกรณีที่มีผิวหน้าของวัตถุห่อหุ้มการไหลอยู่ เช่น การไหลในท่อกลม จะต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากการไหลในท่อที่ไหลด้วยความเร็วคงที่นั้น ทุกจุดในท่อจะเสมือนเป็นผิวสัมผัส กล่าวคือ ไม่เพียงแต่อุณหภูมิของของไหล ณ จุดที่ห่างเพียงพอจากผิวหน้าจะมีค่าไม่เท่ากันเท่านั้น แต่อุณหภูมิของของไหลตามทิศทางการไหลก็ไม่คงที่ด้วย ดังนั้นในกรณีนี้ จึงเกิดปัญหาว่าจะใช้ค่าใดเป็นอุณหภูมิของตัวของไหล

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \Delta T_1 = T_{air\ in} - T_{water\ out}, \Delta T_2 = T_{air\ out} - T_{water\ in}$$

ค่า ΔT_{lm} ที่มีนิยามตามข้างต้น เรียกว่า ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ถ้าใช้ ΔT_m นี้แล้ว ปริมาณการพาความร้อนจะเท่ากับ

ปริมาณการพาความร้อน = (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) × (ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม) × (พื้นที่ผิวด้านในท่อ)

2.3.3 การแผ่รังสี

วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุนั้นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

2.4 ทฤษฎีความเสียหาย

2.4.1 ทฤษฎีความเสียหาย

ความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรมแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาด (deformation) , การแตกหัก(fracture) , การสูญเสียมวลที่ผิว (surface mass loss) , การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล (property change) เมื่อได้รับภาระทางกลชิ้นส่วนทางวิศวกรรมจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด หากรับภาระทางกลมากเกินไปจะทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร หรือเกิดการแตกหักโดยในหัวข้อนี้เราจะเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงขนาด (deformation) และการแตกหัก (fracture)

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม หรือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation) มีอยู่ 2 ประเภทคือ 1). การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) 2).การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation)

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) คือ ขบวนการเปลี่ยนรูปที่ เมื่อเราให้แรงกระทำแก่วัสดุ แล้วปลดแรงหรือภาระที่วัสดุได้รับออก วัสดุนั้นสามารถคืนรูปกลับมาอยู่ในสภาพเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) คือ ขบวนการเปลี่ยนรูปที่ เมื่อเราให้แรงกระทำแก่วัสดุเกินพิกัดที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพนั้นได้ แล้วปลดแรงหรือภาระที่วัสดุได้รับออก วัสดุนั้นไม่สามารถคืนรูปกลับมาอยู่ในสภาพเดิม

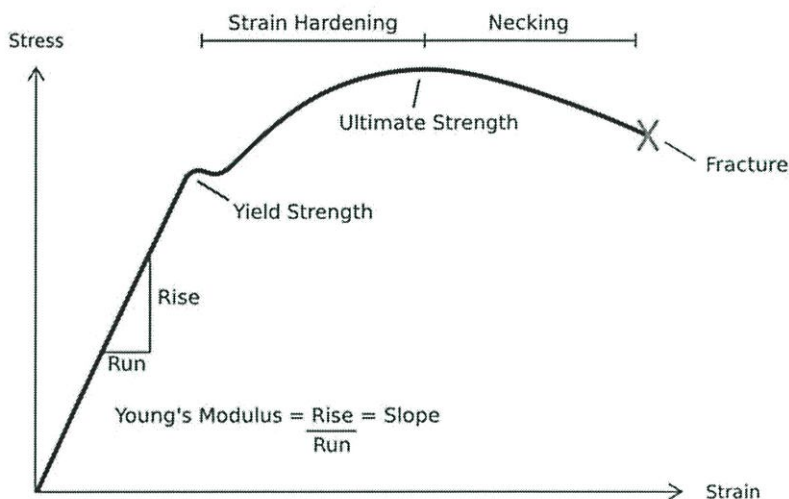
กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่ วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูปร่าง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม มันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

- สลิป (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย
- ทวินนิ่ง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากกระยะหรือ แนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือเหมือนกันโดยที่ ทิศทางในการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลยทีเดียว
- ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดอาการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

2.4.2 คุณสมบัติทางกลที่หาได้จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุเหนียว

คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งเราสามารถหาได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง โดยจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- โมดูลัสความยืดหยุ่น
- ความเค้นที่จุดคราก (Yield strength)
- จุดความเค้นสูงสุด (Ultimate tensile strength)
- เปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด (percentage of elongation)
- เปอร์เซ็นต์การลดของพื้นที่หน้าตัดที่จุดขาด (percentage of area reduction)



รูป 2.4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

โมดูลัสความยืดหยุ่น

เมื่อทำการทดสอบแรงดึงของวัสดุประเภทโลหะที่มีแรงมากกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนรูปยืดตัวออก และถ้าปลดแรงดึงออกจากชิ้นงาน ชิ้นงานนั้นจะคืนสู่สภาพเดิมโดยทั่วไปแล้วสำหรับวัสดุโลหะผสมเหนียวจะมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรงในช่วงการคืนรูปแบบยืดหยุ่น ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฮุกส์ (Hook's Law)

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น

โมดูลัสความยืดหยุ่นจะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมในโลหะ โดยโลหะที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง จะมีความแข็งตึง (stiffness) สูง ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าจะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงประมาณ 30×10^6 psi (207 Gpa) ในขณะที่อะลูมิเนียมผสมมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นประมาณ 11×10^6 psi (69-76 Gpa)

ความเค้นที่จุดคราก (Yield strength)

คือ ความเค้นสูงสุดที่กระทำต่อวัสดุแล้ววัสดุยังเกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นอยู่ หากวัสดุได้รับความเค้นเกินค่า ความเค้นจุดคราก (Yield strength) จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ในการทดลองเพื่อหาจุดครากในแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทำได้ยาก เราจึงกำหนดค่า จุดคราก (Yield strength) โดยการลากเส้นจากจุดที่มีความเครียด 0.002 in/in(m/m) ขนานกับเส้นที่แสดงความสัมพันธ์การคืนตัวเส้นตรง และตัดกับส่วนของเส้นโค้งที่พ้นออกมาจะได้จุดตัดเป็น จุดครากที่เราสร้างขึ้นมา เรียกว่า การหาแบบ “ 0.2 percent offset Yield strength ”

จุดความเค้นสูงสุด (Ultimate tensile strength)

คือ จุดที่แสดงค่าความเค้นมากที่สุดที่วัสดุรับได้ในแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เมื่อวัสดุได้รับความเค้นเลยจุดนี้ ความเค้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากคำนวณใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเท่าเดิม แต่ในความจริงวัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเมื่อความเค้นเลยจุดนี้แล้ว ความเค้นจะยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงนี้วัสดุจะเกิดคอคอดขึ้น (Necking) และได้รับความเค้นต่อจนกระทั่งขาดออกจากกัน

เปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด (percentage of elongation)

คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความเหนียวของวัสดุจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุที่เพิ่มขึ้น โดยปกติหากโลหะยังมีความเหนียวมากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดยิ่งมากขึ้น ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด} = \frac{\text{ความยาวสุดท้าย}}{\text{ความยาวเริ่มต้น}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percentage of area reduction)

คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความเหนียวของวัสดุจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ลดลง โดยปกติหากโลหะยังมีความเหนียวมากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดยิ่งมากขึ้น ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการนี้

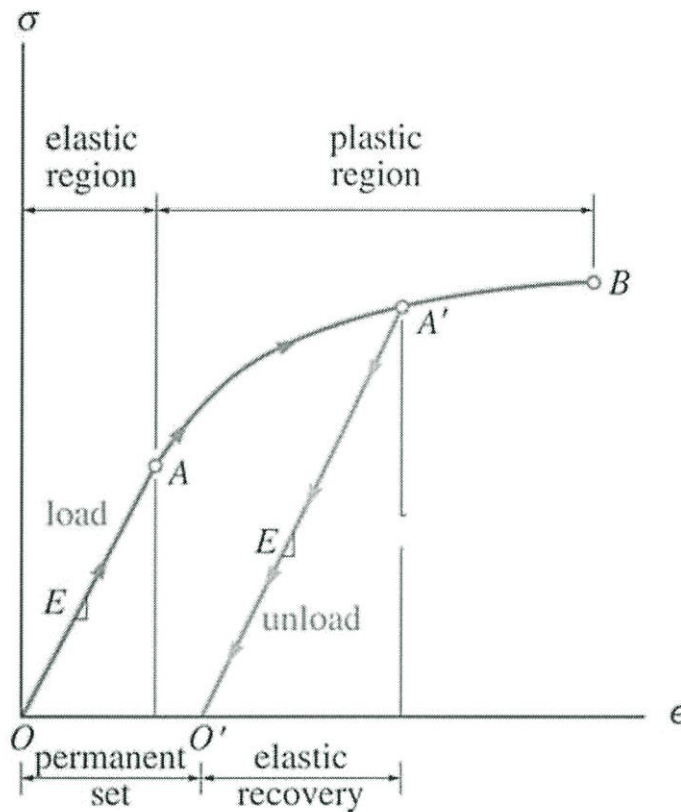
$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด} = \frac{\text{พื้นที่เริ่มต้น} - \text{พื้นที่สุดท้าย}}{\text{พื้นที่เริ่มต้น}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

2.5 การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด (Work hardening) และการคืนตัว (recovery)

2.5.1 การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด

คือปรากฏการณ์หนึ่งที่โลหะเหนียวมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อผ่านการเปลี่ยนรูปถาวร โดยโลหะส่วนใหญ่สามารถเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดขณะเกิด work hardening

การเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียดนี้สามารถแสดงได้โดยใช้แผนภูมิความเค้น-ความเครียด จากรูป 2.5.1 ในตอนโลหะจุดครากที่จุด A เมื่อเราใส่ความเค้นเข้าไปจนถึงจุด A' แล้วเราปลดความเค้นลงและใส่ความเค้นเข้าไปใหม่จะพบว่าความแข็งแรงที่จุดครากเปลี่ยนไปเป็นจุด A' ดังนั้นจะเห็นว่าโลหะแข็งแรงขึ้นจากค่า Yield strength ที่เพิ่มขึ้น จากจุด A ไปจุด A'

กลไกที่ทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาของดิสโลเคชันกับสนามความเครียดดิสโลเคชันคือเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรหรือขึ้นรูปเย็นมากขึ้นจะทำให้เกิดการสร้างดิสโลเคชันขึ้นทำให้มีดิสโลเคชันมีความหนาแน่นมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างดิสโลเคชันจึงลดลง จึงทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยากขึ้นจากการขัดกันเองระหว่างดิสโลเคชันกับดิสโลเคชันตัวอื่นหรือก็คือความต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความเค้นที่จำเป็นต้องใช้ในการแปรรูปโลหะก็จะยิ่งสูงขึ้นเมื่อเกิดการขึ้นรูปมากขึ้น

2.5.2 การคืนตัว (recovery)

ขณะเกิดการคืนตัวพลังงานความเครียดที่สะสมไว้จะถูกปลดปล่อยออกมาเพราะดิสโลเคชันเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของอะตอมที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นดิสโลเคชันมีจำนวนน้อยลงและปรับตัวเพื่อให้มีพลังงานความเครียดต่ำ นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การนำความร้อนก็จะกลับคืนสู่สภาพก่อนการขึ้นรูปเย็น

2.6 Larson-Miller Approach

Larson-Miller Approach เป็นวิธีการคำนวณอายุของวัสดุเนื่องจากการคืบที่ความเค้นและอุณหภูมิใดๆ สมการของ Larson-Miller ประกอบไปด้วยตัวแปรหลายตัวจากข้อมูลของการคืบและมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

Larson-Miller Parameter หรือ LMP มีค่าสัมพันธ์กับเวลาของการคืบ, อุณหภูมิ, ความเค้นที่ใช้, ความเครียดของการคืบและชนิดของวัสดุ ค่าของ LMP คำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$LMP = T(C + \log t)$$

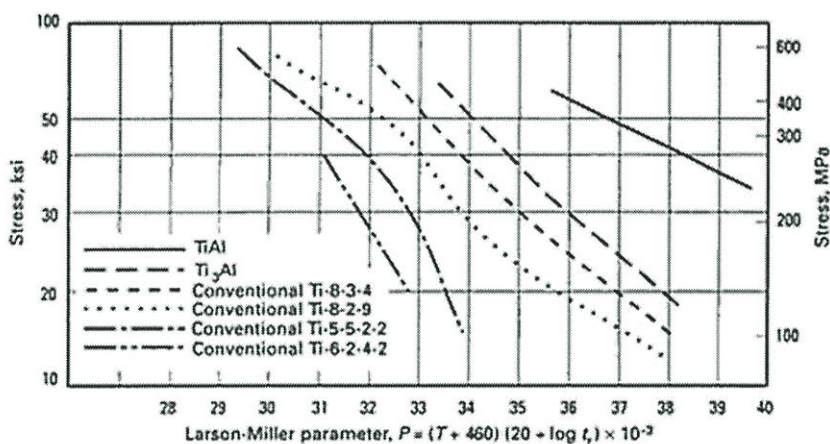
เมื่อ LMP คือ Larson-Miller Parameter

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

t คือ มีหน่วยเป็นชั่วโมง (h)

C คือ ค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 20 เมื่อคำนวณกับเหล็กอัลลอยต่ำและบางครั้งจะมีค่าเท่ากับ 30 เมื่อใช้กับเหล็กอัลลอยสูง

กราฟด้านล่างเป็นตัวอย่างของ Larson-Miller curve ที่ประกอบไปด้วยไทเทเนียมอัลลอยชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิหนึ่ง หากทราบความเค้นที่ใช้กับวัสดุ จะสามารถหาค่า LMP และนำไปคำนวณเพื่อหาอายุของวัสดุได้



รูปที่ 2.6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ LMP

บทที่ 3

อุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการปฏิบัติงาน

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์การให้ความร้อน

ประกอบไปด้วย PID Controller, Solid State Relay, และแผงให้ความร้อน

1. Solid State Relay

- a. เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างส่วนควบคุมกับวงจรไฟฟ้ากำลัง โดยจะมีระบบกราวด์เพื่อป้องกันการลัดวงจรและการรบกวนซึ่งกันและกันได้ เราสามารถใช้ Solid State Relay แทนอาร์เมเจอร์รีเลย์ โดยมีข้อดีก็คือ มีขนาดเล็กกว่า มีความไวในการทำงานสูงกว่า มีอายุการทำงานสูงกว่า
- b. องค์กรประกอบและวงจรพื้นฐานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท
 - i. Non Zero Crossing Type

Solid State Relay แบบ Non Zero Crossing Type มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ Photo Couple, Main Triac, Snubber Circuit การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จากกราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟที่จุดต่างๆ ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะปรากฏทันทีที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวก

- ii. Zero Crossing Type

Solid State Relay แบบ Zero Crossing Type มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ Photo Couple(แบบ Zero Crossing Circuit), Main Triac, และ Snubber Circuit การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จากกราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟที่จุดต่างๆ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะไม่ปรากฏทันทีที่สัญญาณที่ป้อนเข้าเป็นบวกแต่จะหน่วงไปถึงจุดที่แรงดัน AC Power เป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าจึงจะไหลในวงจรโหลด(ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing On) และเมื่อสัญญาณที่ป้อนเข้าเป็นศูนย์ก็จะไม่ตัดกระแสในวงจรโหลดทันทีแต่จะหน่วงไปถึงจุดที่แรงดัน AC Power เป็นศูนย์จึงจะตัดกระแสไฟฟ้า (ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing Off)

2.PID Control

แต่ละรุ่นของ Model M3 จะมีการทำงานต่างกันขึ้นกับการทำงานของ Eurotherm/T0-1 การเปิดเครื่อง ปุ่ม POWER จะอยู่ที่ตำแหน่ง ON เพื่อส่งกำลังไปยังชุดควบคุมอุณหภูมิ ในการควบคุมอุณหภูมิด้วย PID จะมีจอ LED แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ ด้านล่างจะแสดงปุ่มปรับตั้งอุณหภูมิหรือ Percent Power Output จอนี้สามารถสลับการทำงานโดยกดปุ่ม Auto/Manual (A/M) ที่อยู่บนหน้าจอ หากทำงานแบบ Manual (M) ผู้ใช้สามารถควบคุม Percent Power Output หากทำงานแบบ Auto(A) ผู้ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยอัตโนมัติตามค่าที่ตั้งไว้

ตัวอย่างการใช้งาน จากการปรับค่าอุณหภูมิด้วยปุ่ม A/M โดยเลือกแบบ Auto(A) ใช้ปุ่มขึ้นและลงในการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มจนถึงค่าที่กำหนดไว้ และจะปิดการควบคุมอุณหภูมิเมื่อต้องการใช้ที่อุณหภูมิห้อง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ให้แรงกับชิ้นงาน

1.มอเตอร์

มอเตอร์จะอยู่ด้านล่างของเครื่องทดสอบ ทำหน้าที่ดึงชิ้นงานขึ้นลงขณะทำการทดสอบ มอเตอร์มีฟิวส์ขนาด 12 Amp การควบคุมมอเตอร์จะประกอบไปด้วย 3 สวิตช์

I. Main Power Circuit Breaker

การ ON คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องทดสอบ และ Main Power Circuit Breaker มีฟิวส์ขนาด 30 Amp

II. Auto/Manual Toggle Switch

บ่งบอกรูปแบบการหมุนของมอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน Auto Switch ใช้ขณะทำการทดสอบชิ้นงาน ส่วน Manual Switch ใช้เมื่อต้องการนพชิ้นงานเข้าเครื่องหรือปรับตำแหน่งชิ้นงานทดสอบให้อยู่ตรงกลาง โดยการเคลื่อนที่ขึ้นลงจะทำงานร่วมกันกับ UP-Down Toggle Switch

III. Up Down Toggle Switch

เมื่อต้องการเคลื่อนที่ชิ้นงานให้ใช้ Manual Switch แล้วกด UP หรือ DOWN Switch แล้วแต่ที่เราว่าต้องการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง ข้อควรระวังในการใช้ Up Down Toggle Switch ถ้าเราต้องการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับปัจจุบัน เราต้องกดสวิตช์ให้อยู่ในตำแหน่ง Off Switch เป็นเวลา 5 วินาทีก่อนกดสวิตช์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

2. Weight Pan

Weight Pan จะเป็นที่ใช้น้ำหนักให้กับชิ้นงาน (ผ่านการคำนวณมาแล้ว) Weight Pan ยังประกอบไปด้วย Weight Pan ที่มีอัตราการหด 1: 16

3. ก้อนน้ำหนัก

เป็นก้อนน้ำหนักที่ใส่ลงไป Weight Pan ก่อนจะใส่น้ำหนักต้องมีการคำนวณแรงที่วัตถุควรได้รับให้เสร็จก่อน

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1. นำเหล็ก 12Cr1MoVG ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63x7 ไปกลึงให้ได้ตามแบบ
2. ขัดผิวชิ้นงานบริเวณที่จะทำการทดสอบด้วยกระดาษทราย

3.2.2 วิธีการทดสอบการดึง

1. นำเหล็ก 12Cr1MoVG ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63x7 ไปกลึงให้ได้ตามแบบ
2. นำชิ้นส่วนทดสอบเข้าเครื่องทดสอบการดึงเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลที่สภาวะอุณหภูมิปกติ
3. จะได้ข้อมูลการทดสอบการดึงออกมาในรูปแบบของกราฟ
4. หาค่า Yield Strength

3.2.3 ขั้นตอนการหาอุณหภูมิที่วัสดุสามารถเกิดความเค็บ

1. หาค่าอุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมเหลวของวัสดุ
2. นำอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุคูณ 0.4 เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่สามารถเกิดการเค็บได้ตามทฤษฎี

3.2.4 วิธีการทดสอบความเค็บ

1. จัดบันทึกค่าความยาวและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน
2. ติด Thermocouple เข้ากับชิ้นงานและประกอบชิ้นงานเข้ากับ Coupling
3. ใช้ชุดข้อต่อร้อน (hot coupling) มาติดเข้ากับชิ้นงานทดสอบ ชั้นน้อดให้แน่นให้ได้ความยาว เกจเท่ากับที่ตั้งค่าไว้
4. เปิดเตาอุ่นชิ้นงานจนได้อุณหภูมิตามที่ตั้งค่าไว้
5. หมุนไมโครมิเตอร์จนเกือบสุดระยะ (1 นิ้วก่อนสุดระยะ) แล้วปรับค่าที่ AKI SIGNAL ไปที่ 400 จากนั้นที่หน้าปัด Zero ให้หมุนจนได้ค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์ สามารถสังเกตได้ที่มัลติมิเตอร์
6. เมื่อค่าเป็นศูนย์ ให้นำสายสัญญาณที่ออกมาจาก AK-1 Signal Conditioner ซึ่งติดอยู่กับมัลติมิเตอร์ไปเชื่อมกับ Wisco A1210 ในช่องรับสัญญาณความต่างศักย์ รายละเอียดของ Wisco จะอยู่ที่ภาคผนวก
7. ใส่ Load แก่ชิ้นงานตามที่ได้คำนวณไว้ โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักที่ใส่ : 1 ต่อ 6
8. โปรแกรมจะทำการบันทึกค่าความต่างศักย์อันเนื่องมาจากการยืดตัวของชิ้นงานกับเวลาในการทดสอบ
9. เมื่อชิ้นงานขาด นำข้อมูลจาก Wisco ที่บันทึกเป็นความต่างศักย์ มาแปลงเป็นการยืดตัวของชิ้นงานโดยใช้ Microsoft Office Excel
10. เราจะทำกราฟพล็อตค่าระหว่างความเค็บกับเวลาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel เมื่อพล็อตจะได้รูปกราฟแสดงพฤติกรรมการเค็บ

3.2.5 ขั้นตอนการประเมินอายุ

1. นำค่าความเค็บและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบมาคำนวณด้วย Larson-Miller Method และได้อายุที่เหลือของวัสดุมา

บทที่ 4

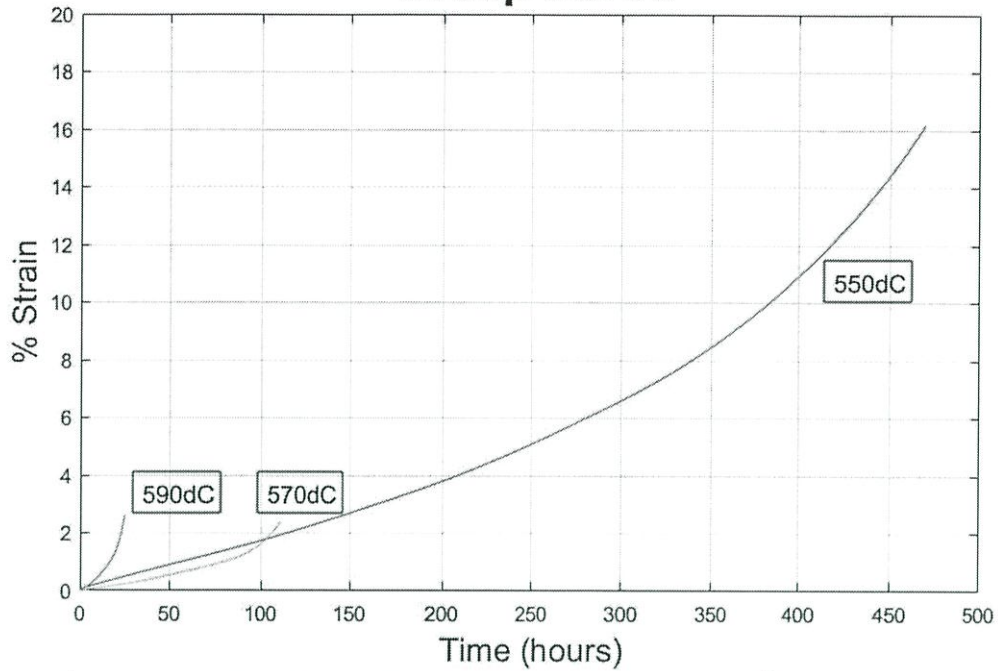
ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้เป็น 9 แบบ คือการทดลองที่ค่าความเค้น 3 ค่า คือ 180 MPa , 200 MPa และ 220 MPa และเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองในแต่ละความเค้น ความเค้นละ 3 ค่าอุณหภูมิ คือ 550°C , 570°C และ 590°C ผลการทดสอบที่ได้คือ เวลาที่เกิดการแตกหัก(Rupture time) และยังสามารถหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา

Sample no.	Diameter (mm.)	Temperature (°C)	Stress (MPa)	Rupture time (hours)
VG01	3.04	550	200	180.079
VG02	3.07	570	200	21.692
VG03	3.0967	590	200	4.616667
VG04	3.88	550	180	468.8417
VG05	3.92	570	180	110.95
VG06	3.08	590	180	24.97222
VG07	3.167	550	220	68.1333
VG08	3.19	570	220	13.9278
VG09	3.197	590	220	17.486

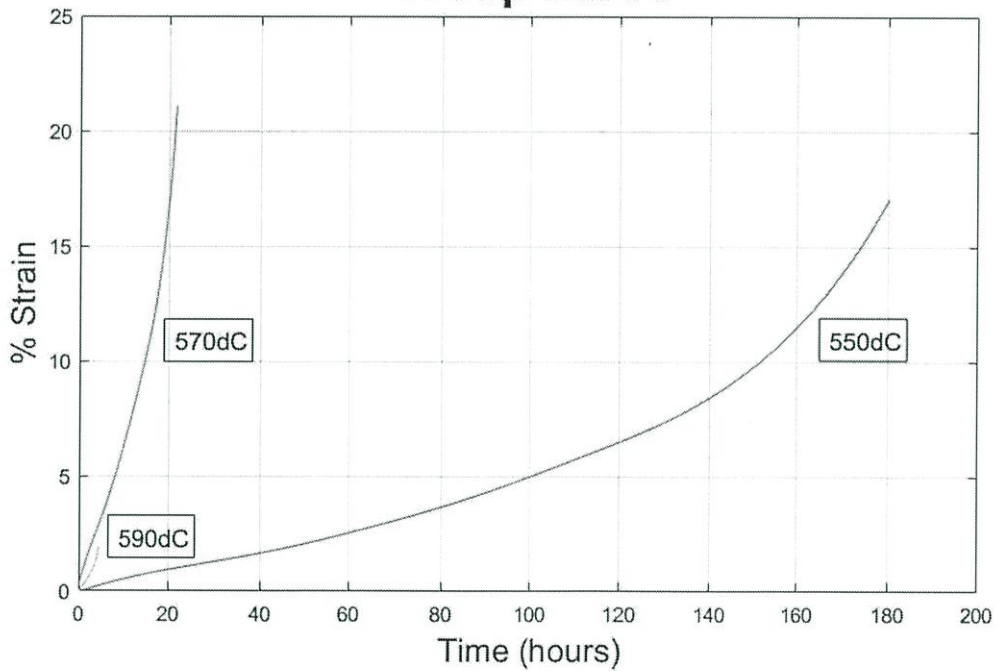
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไข

Creep curve

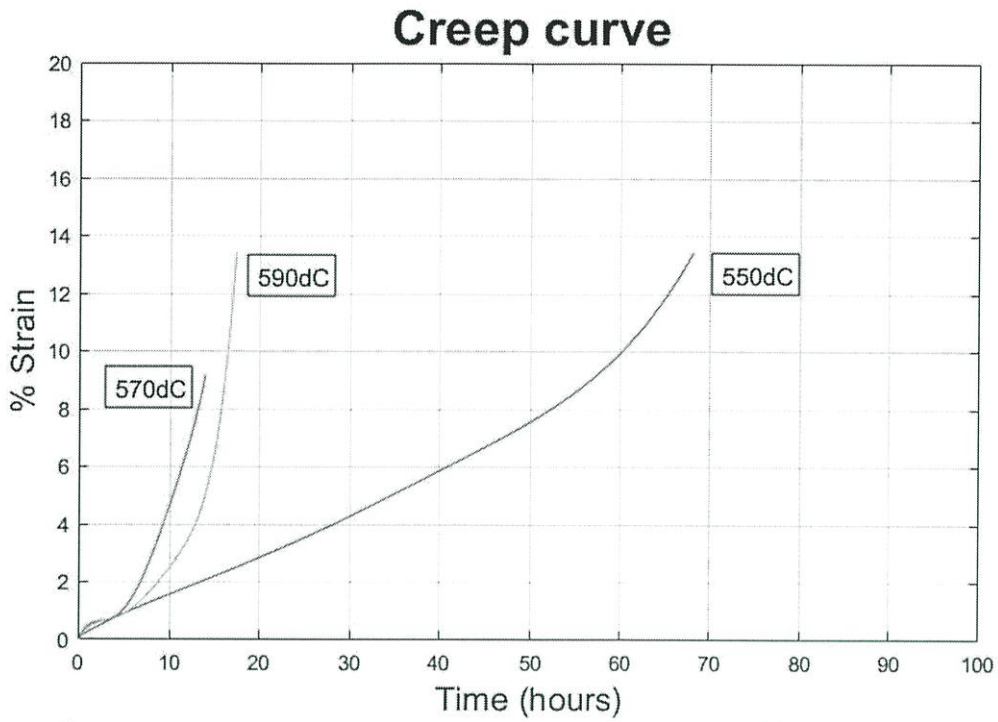


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 180 MPa

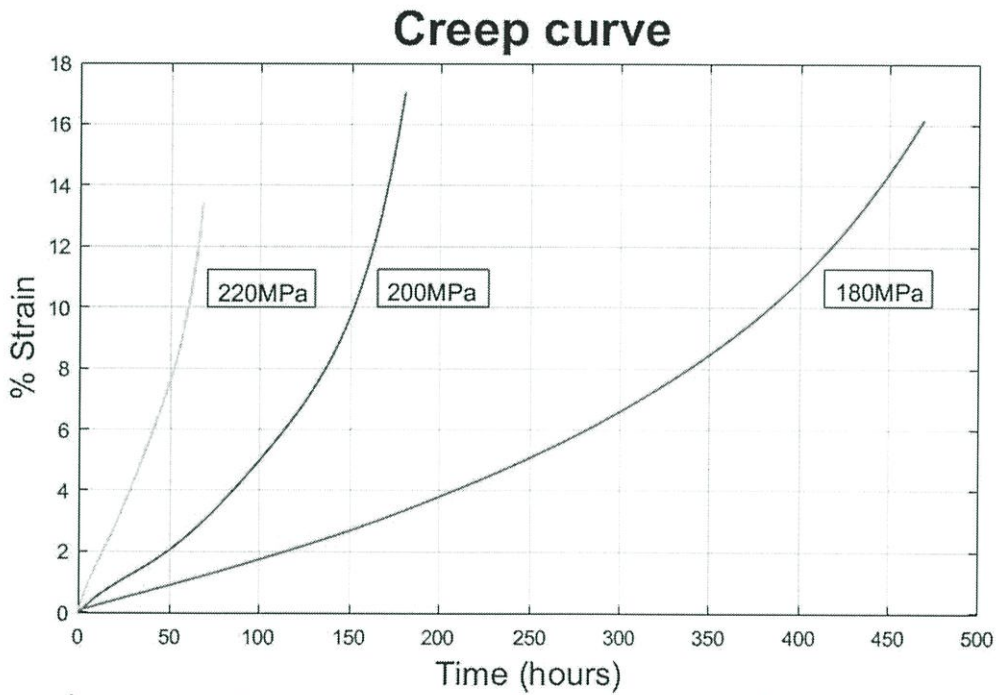
Creep curve



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 200 MPa

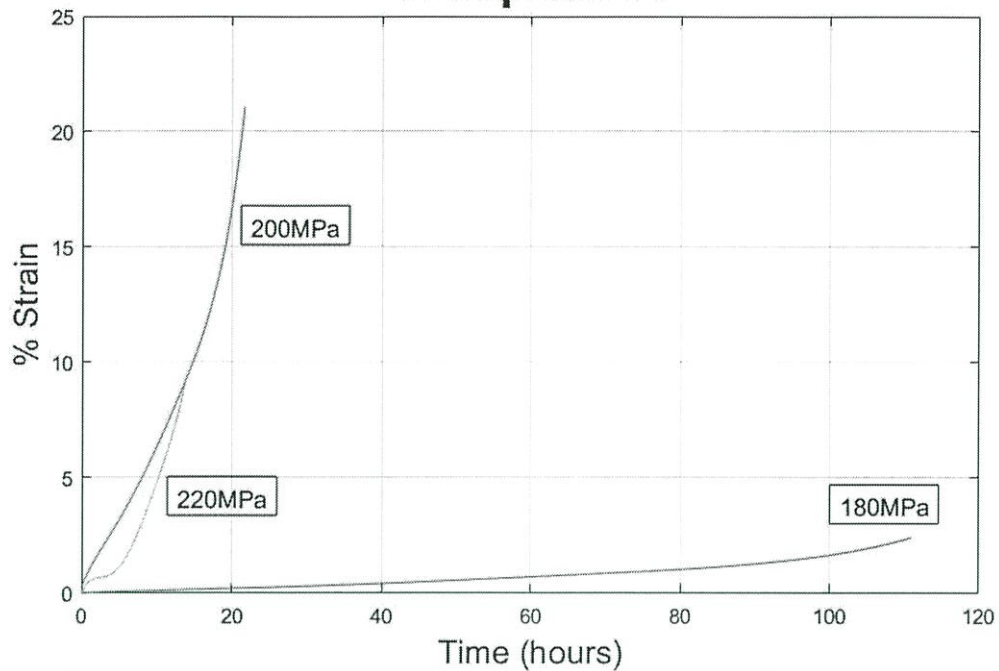


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ความเค้น = 220 MPa



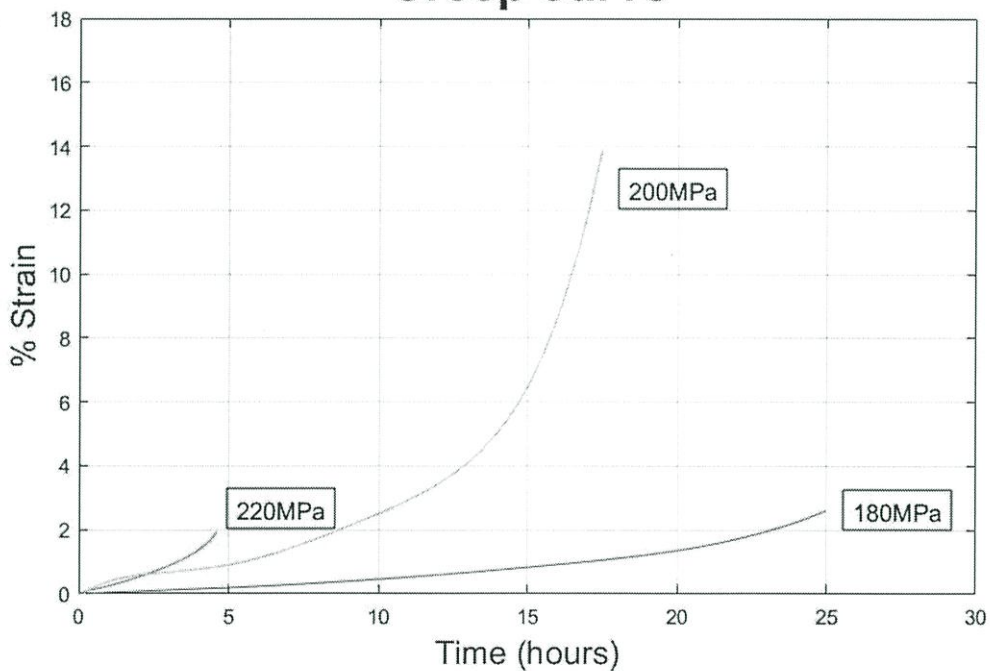
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 550 °C

Creep curve



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 570 °C

Creep curve

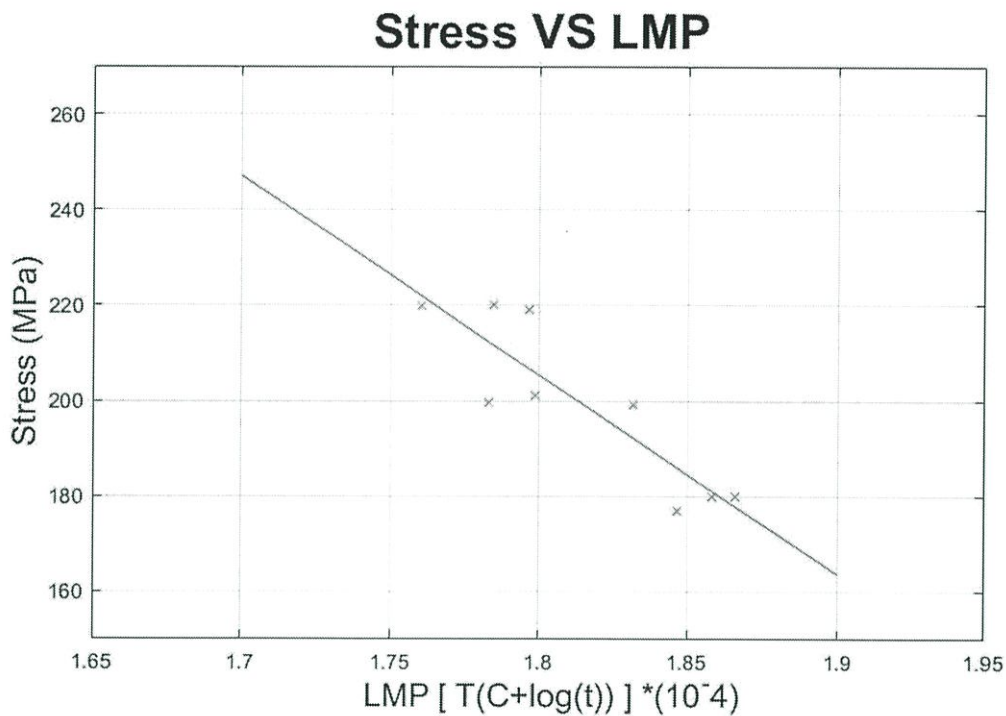


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ = 590 °C

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

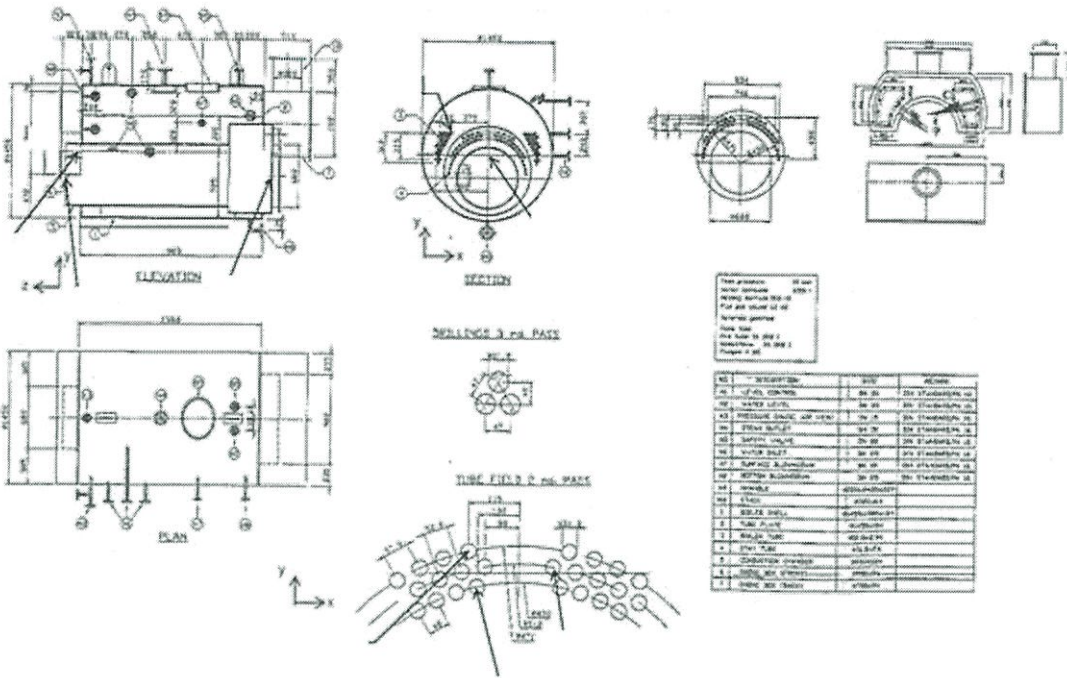
การตีความจากผลการทดสอบความคืบทางวิศวกรรม การเลือกโลหะที่เหมาะสมไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่เราต้องมีข้อมูลจากการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำ ในส่วนของการหาอายุที่เหลือจากการใช้งาน เราหาจากการนำค่าความเค้นจริงที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน และค่า LMP ซึ่งสามารถหาได้จากอุณหภูมิทดสอบ มาวาดกราฟ Larson-Miller ตามรูปที่ 5.1 จากกราฟทำให้เราทราบอายุการใช้งานที่เหลือภายใต้เงื่อนไขของความเค้นและอุณหภูมิที่จะนำมาใช้งานต่อไป



รูปที่ 5.1 กราฟระหว่าง Larson parameter และ Stress

ภาคผนวก

ภาพแบบแปลนหม้อไอน้ำท่อไฟตัวอย่าง



Calculation for setup input in FEA program

Specification of fire tube boiler

Boiler Capacity	500	Kg/hr		
Pressure	10	barg		
Water feed temperature	26	C		
HHV of diesel	43819	KJ/Kg-fuel		
Boiler efficiency	85%			
Enthalpy steam	2780.71	KJ/Kg		
Enthalpy water feed	108.68	KJ/Kg		
Fuel feed	=	$\frac{(\text{Cap.} \cdot 1000)(h_{\text{stem}} - h_{\text{feed}})}{\text{HHV}_{\text{diesel}} - \text{Boiler}_{\text{eff}}}$	=	35.8699 kg/hr

Ultimate analysis

C	=	82.45%
H	=	12.60%
O	=	1.58%
N	=	1.84%
S	=	0.02%
Water	=	0.01%
Ash	=	1.50%
Sum.	=	100%

Exhaust gas

O ₂	=	5%
CO	=	80 ppm
Temp.	=	150 °C
Nox.	=	120 ppm

$$\begin{aligned} \text{Theoretical Air} &= \frac{1}{100} * [(8.89 * C) + \left(26.7 * \left(H - \frac{O}{8}\right)\right) + \\ &\quad (3.3 * S)] \\ &= 10.6419 \\ \text{Excess air ratio} &= \frac{21}{21 - O_2} = 1.3125 \\ \text{Actual air} &= \text{Theoretical air} * \text{Excess air ratio} = 13.9675 \\ \text{Combustion Air} &= \text{Actual air} * \text{Fuel feed} = 501.0139 \end{aligned}$$

Setup input in FEA program

1. Air inlet

a. Velocity

i. Velocity from boiler specification

$$\frac{P_1 \dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \dot{V}_2}{T_2}$$

State 1 is at standard condition for temperature and pressure

$P_1 = 1.01325$ bara (standard pressure)

$V_1 =$ volumetric flow rate from boiler specification (Nm³/s)

$T_1 = 273.15$ K (standard temperature)

$P_2 =$ working pressure = 1.01325 bara

$V_2 =$ volumetric flow rate at actual condition (m³/s)

$T_2 =$ air inlet temperature (K)

Assume temperature = $T_2 = 1053.304$ C

$$\frac{1.01325 * 501.139}{273.15} = \frac{1.0132 * \dot{V}_2}{1053.304 + 273}$$

$$\dot{V}_2 = 2433.6 \frac{m^3}{h} = 0.676 \frac{m^3}{s}$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}_2}{A_{in}} = \frac{0.676}{0.083534} = 8.09 \frac{m}{s}$$

$v_1 =$ velocity from boiler specification (m/s)

$V_2 =$ volumetric flow rate (m³/s)

$A_{in} =$ air inlet area (m²)

ii. Velocity from conduction equation

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= (h_{\text{steam}} - h_{\text{water feed}})\dot{m}_{\text{steam}} \\ &= \left(2780.71 \frac{\text{KJ}}{\text{KG}} - 108.68 \frac{\text{KJ}}{\text{KG}}\right) \times 0.13889 \frac{\text{KG}}{\text{S}} \\ &= 371.12 \frac{\text{KJ}}{\text{S}}\end{aligned}$$

Q = heat flow rate (KW)

h_{steam} , $h_{\text{water feed}}$ = steam and water enthalpy (KJ/Kg)

m_{steam} = steam mass flow rate (Kg/s)

$$\begin{aligned}c_{p\text{average}} &= \frac{c_{p\text{air in}} + c_{p\text{air out}}}{2} \\ &= \frac{1.18933 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} + 1.0145 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}}{2} \\ &= 1.10 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}\end{aligned}$$

$$\Delta T = T_{\text{air in}} - T_{\text{air out}} = 1053.304 \text{ C} - 150 \text{ C} = 903.304 \text{ C}$$

$c_{p\text{average}}$ = average heat capacity (KJ/Kg*K)

ΔT = difference temperature (K)

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{air}} &= \frac{\dot{Q}}{c_{p\text{average}}\Delta T} = \frac{371.12 \frac{\text{KJ}}{\text{S}}}{1.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \times 903.304 \text{ K}} = 0.37 \frac{\text{KG}}{\text{S}} \\ \rho_{\text{average}} &= \frac{\rho_{\text{air in}} + \rho_{\text{air out}}}{2} = \frac{0.26886326 + 0.8345}{2} = \\ &0.176 \frac{\text{KG}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

m_{air} = air mass flow rate (Kg/s)

ρ_{Average} = Average air density (Kg/m³)

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\rho_{\text{average}}} = \frac{0.37 \frac{\text{KG}}{\text{s}}}{0.176 \frac{\text{KG}}{\text{m}^3}} = 2.10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_{\text{in}}} = \frac{0.676 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.083534 \text{ m}^2} = 8.09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

v_2 = velocity from conduction equation (m/s)

V_2 = volumetric flow rate (m³/s)

A_{in} = air inlet area (m²)

$$\begin{aligned} \% \text{ Difference} &= \frac{|v_1 - v_2|}{\frac{1}{2}(v_1 + v_2)} \times 100 = \frac{|8.09 - 8.09|}{\frac{1}{2}(8.09 + 8.09)} \\ &= 0 \% \end{aligned}$$

2. Heat Area

$$\Delta T_1 = T_{\text{air in}} - T_{\text{water out}} = 1053.304 - 184.123 = 869.181 \text{ C}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{air out}} - T_{\text{water in}} = 150 - 26 = 124 \text{ C}$$

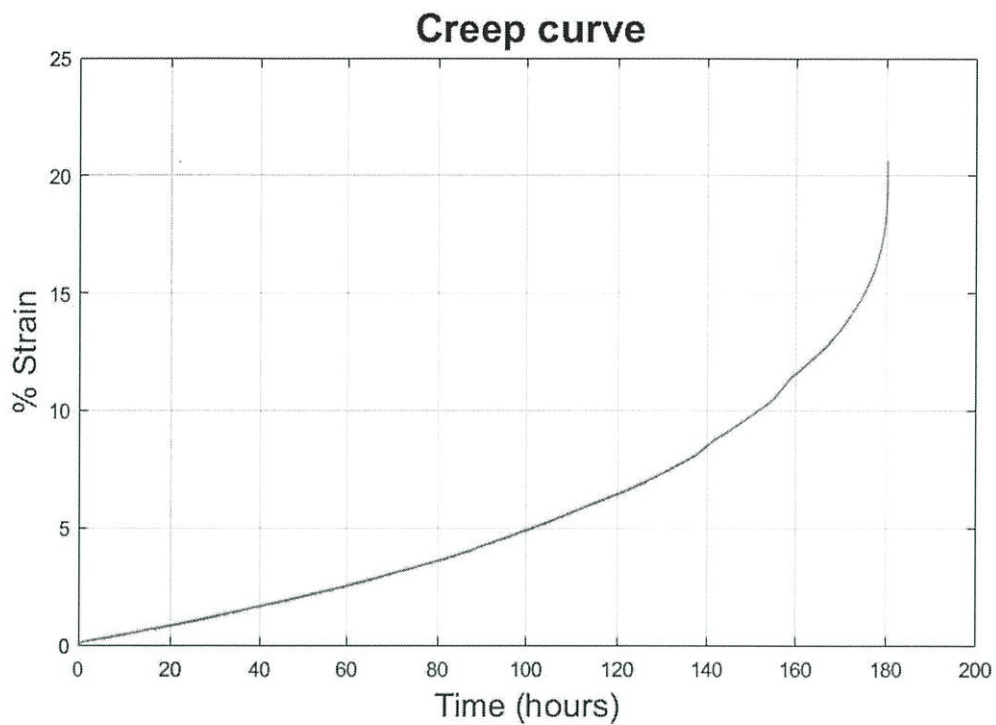
$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(1053.304 - 184.123) - (150 - 26)}{\ln\left(\frac{1053.304 - 184.123}{150 - 26}\right)} = 382.68 \text{ C}$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T_{\text{lm}}} = \frac{371.12 \times 1000}{25.3319 \times 382.68} = 38 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความเค้น 200 MPa

Sample number: VG01

Material: 12Cr1MoVG

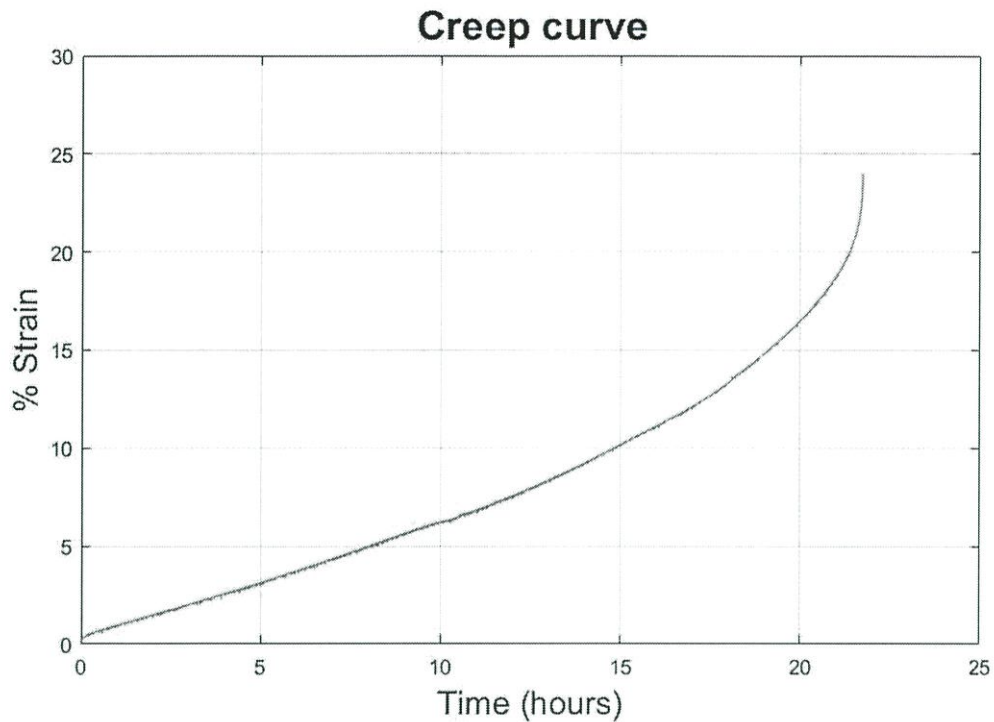


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 550 °C , ความเค้น = 200 MPa

- ❖ Temperature = 550 °C
- ❖ Stress = 200 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.88 mm
- ❖ Gauge length = 29 mm
- ❖ Rupture time = 180.079 hours

Sample number: VG02

Material: 12Cr1MoVG

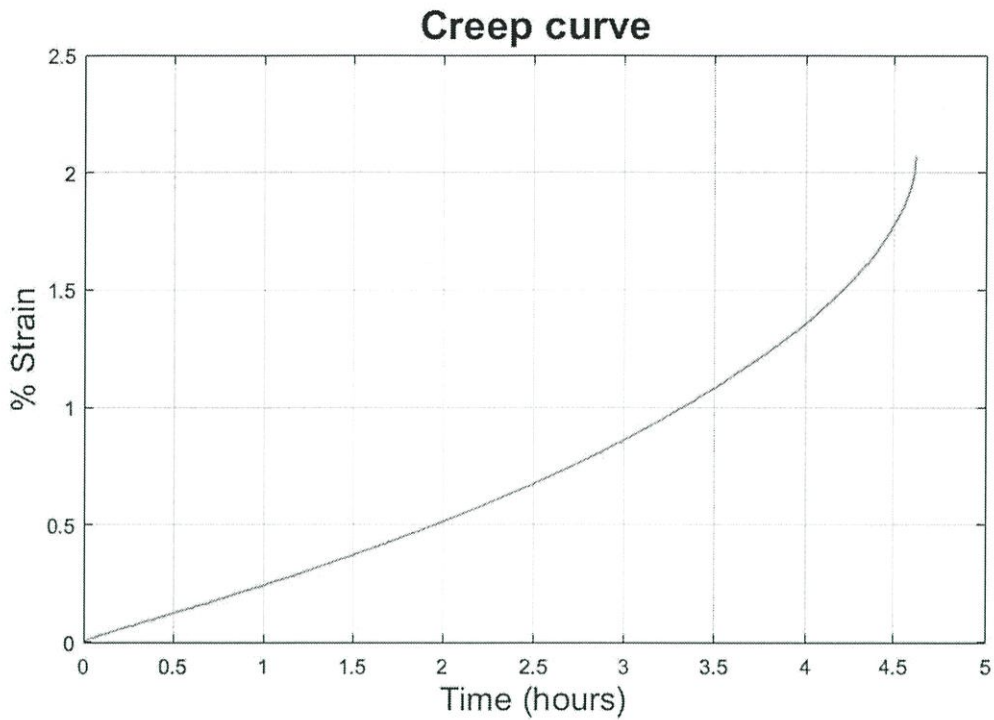


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 570 °C , ความเค้น = 200 MPa

- ❖ Temperature = 570 °C
- ❖ Stress = 200 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.92 mm
- ❖ Gauge length = 27.54 mm
- ❖ Rupture time = 21.692 hours

Sample number: VG03

Material: 12Cr1MoVG



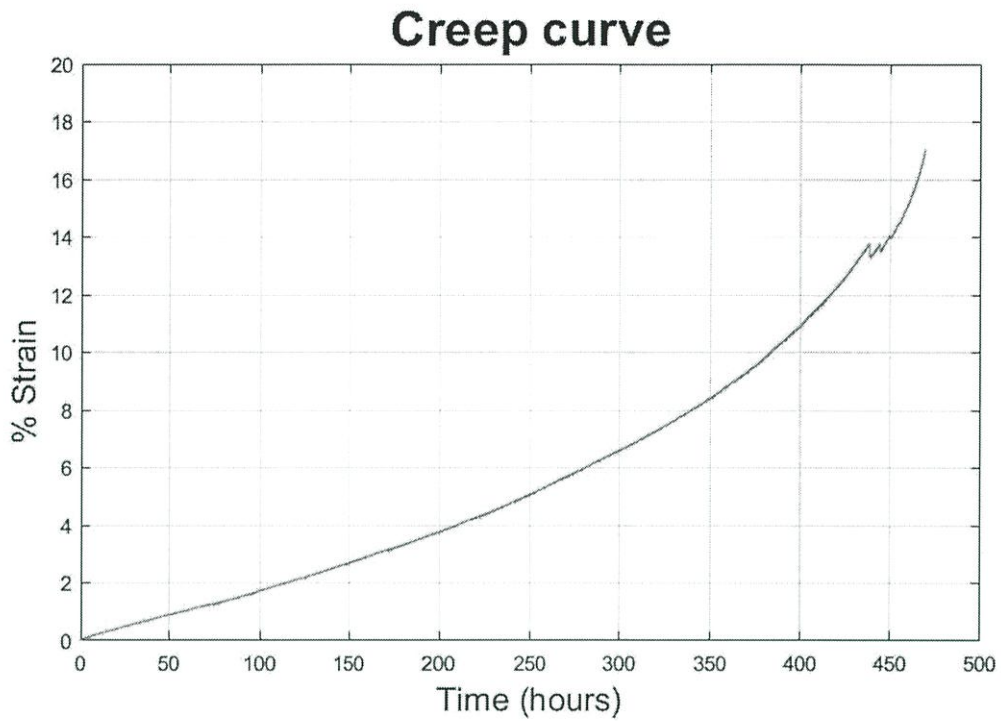
กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 590 °C , ความเค้น = 200 MPa

- ❖ Temperature = 590 °C
- ❖ Stress = 200 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.08 mm
- ❖ Gauge length = 29.16 mm
- ❖ Rupture time = 4.616667 hours

4.2 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความเค้น 180 MPa

Sample number: VG04

Material: 12Cr1MoVG

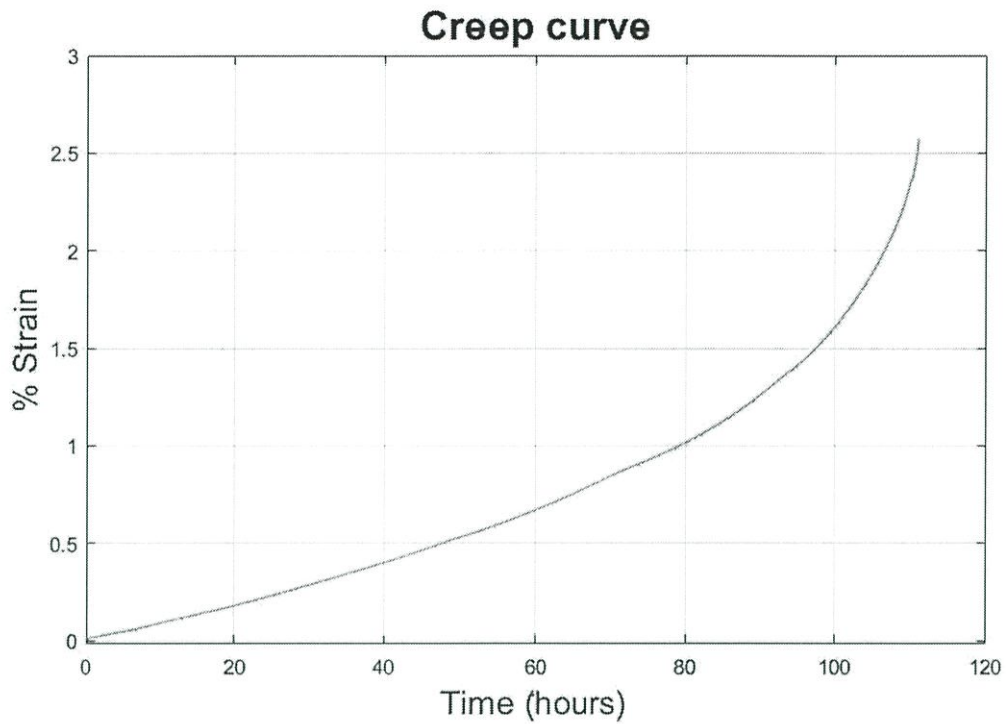


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 550 °C , ความเค้น = 180 MPa

- ❖ Temperature = 550 °C
- ❖ Stress = 180 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.04 mm
- ❖ Gauge length = 30.22 mm
- ❖ Rupture time = 468.8417 hours

Sample number: VG05

Material: 12Cr1MoVG

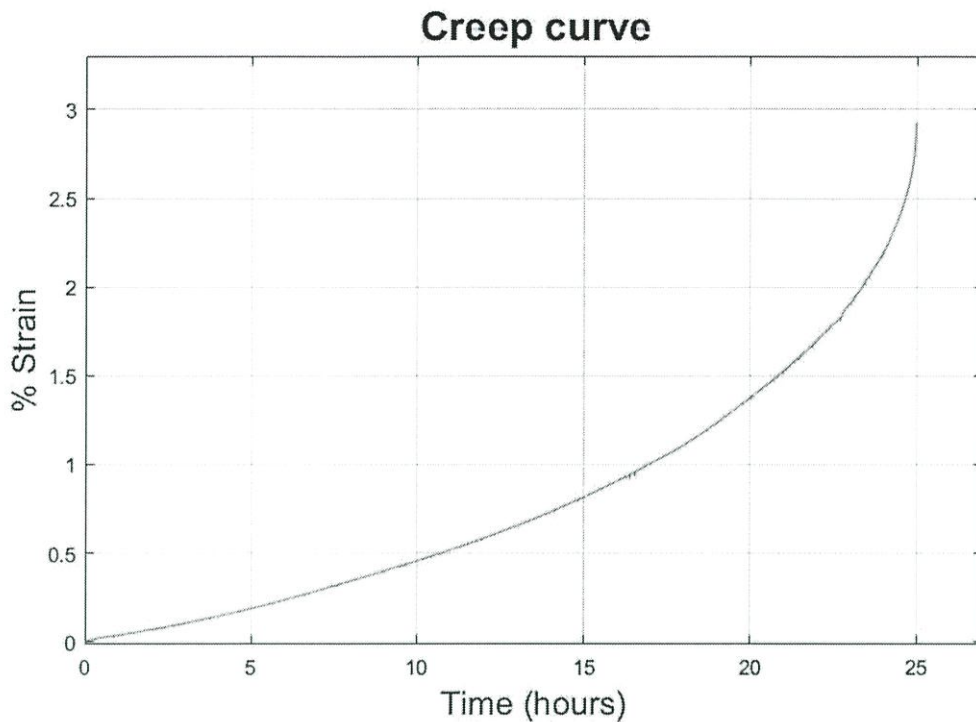


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 570 °C , ความเค้น = 180 MPa

- ❖ Temperature = 570 °C
- ❖ Stress = 180 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.07 mm
- ❖ Gauge length = 28.28 mm
- ❖ Rupture time = 110.95 hours

Sample number: VG06

Material: 12Cr1MoVG



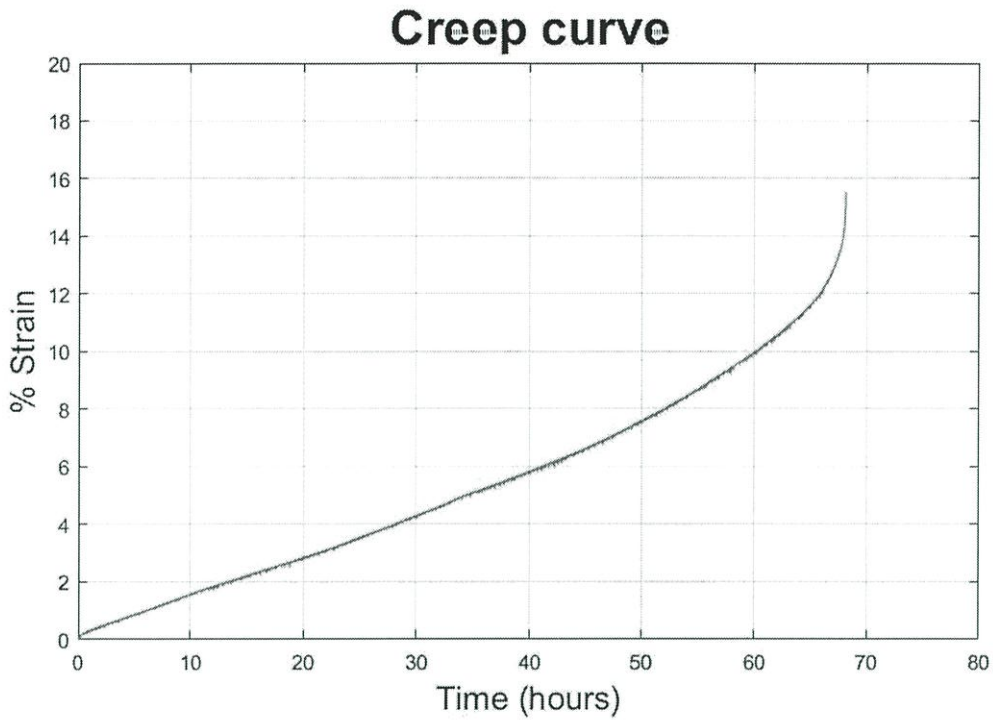
กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 590 °C , ความเค้น = 180 MPa

- ❖ Temperature = 590 °C
- ❖ Stress = 180 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.0967 mm
- ❖ Gauge length = 29.39 mm
- ❖ Rupture time = 24.97222 hours

4.3 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความเค้น 220 MPa

Sample number: VG07

Material: 12Cr1MoVG

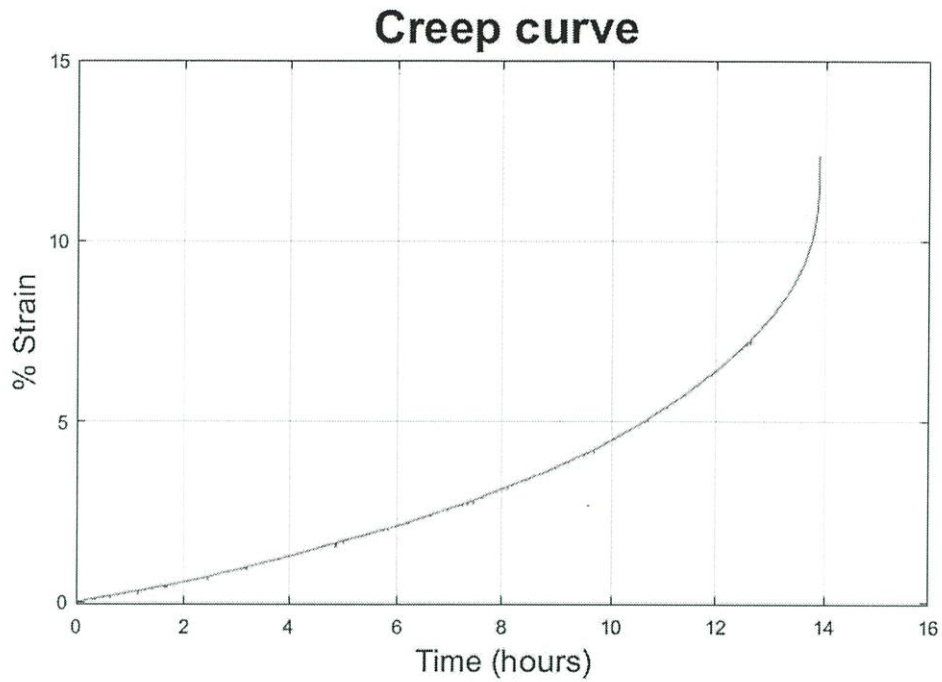


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 550 °C , ความเค้น = 220 MPa

- ❖ Temperature = 550 °C
- ❖ Stress = 220 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.167 mm
- ❖ Gauge length = 31.64 mm
- ❖ Rupture time = 68.1333 hours

Sample number: VG08

Material: 12Cr1MoVG

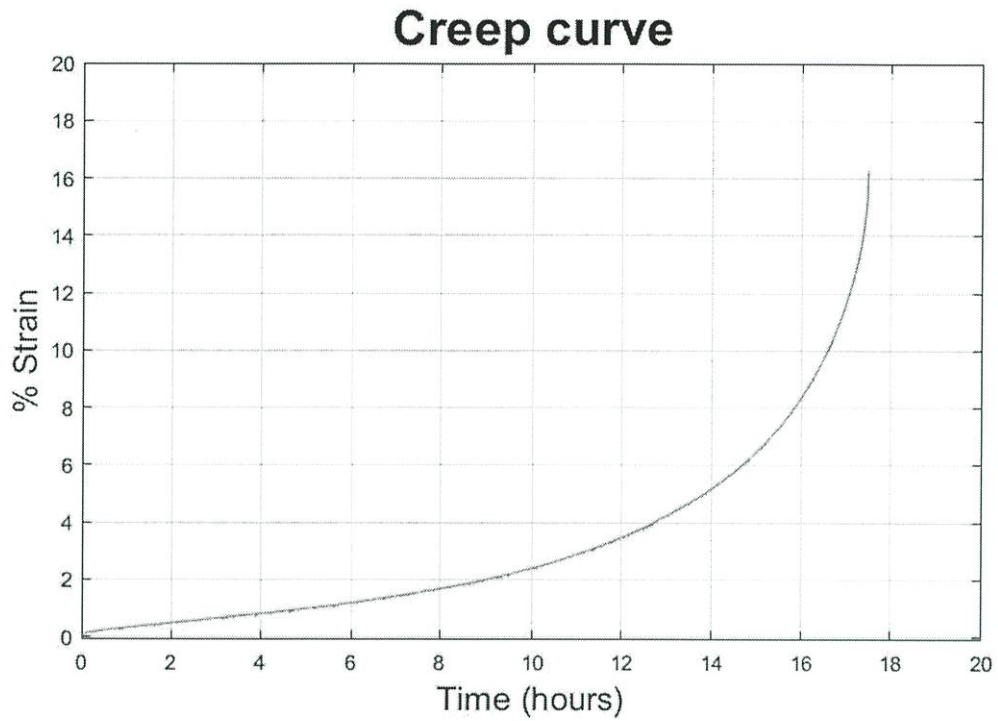


กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 570 °C , ความเค้น = 220 MPa

- ❖ Temperature = 570 °C
- ❖ Stress = 220 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.193 mm
- ❖ Gauge length = 29.96 mm
- ❖ Rupture time = 13.88333 hours

Sample number: VG09

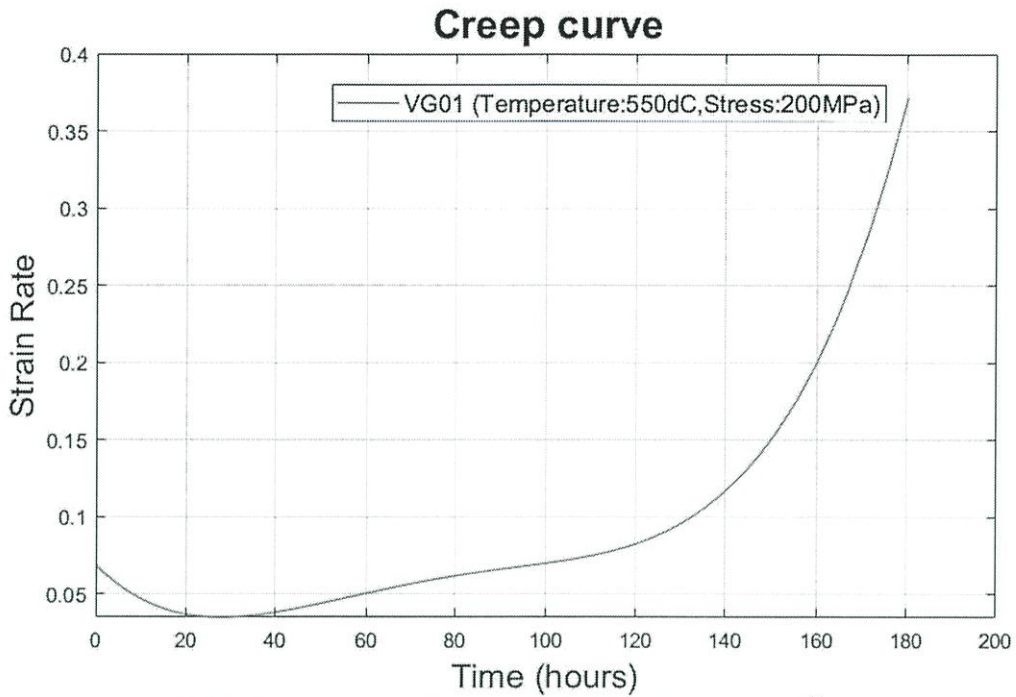
Material: 12Cr1MoVG



กราฟพฤติกรรมการคืบจากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ = 590 °C , ความเค้น = 220 MPa

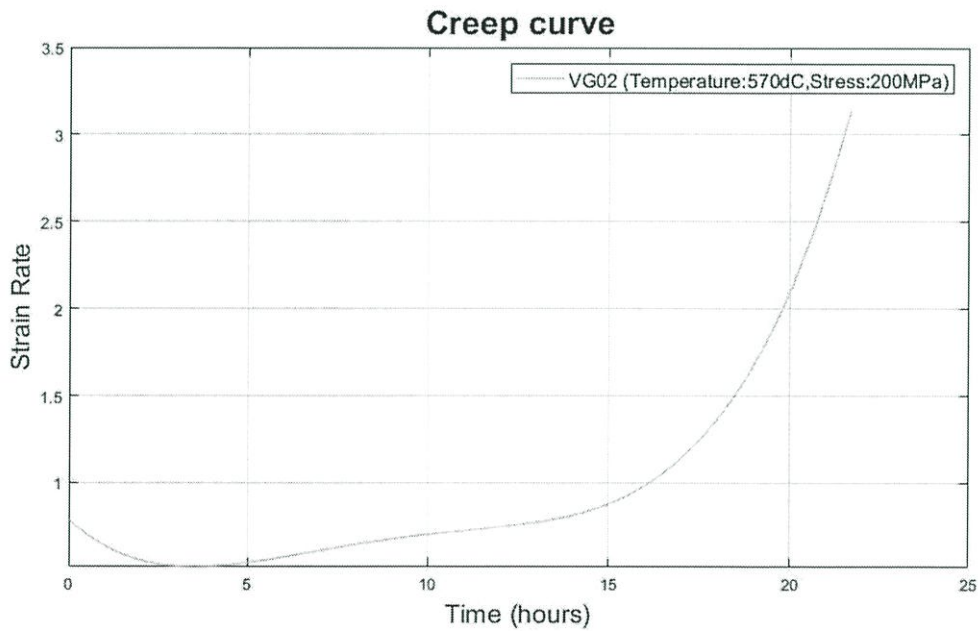
- ❖ Temperature = 590 °C
- ❖ Stress = 220 MPa
- ❖ Starting diameter = 3.19667 mm
- ❖ Gauge length = 30.95 mm
- ❖ Rupture time = 17.486 hours

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของความคืบเทียบกับเวลา



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG01

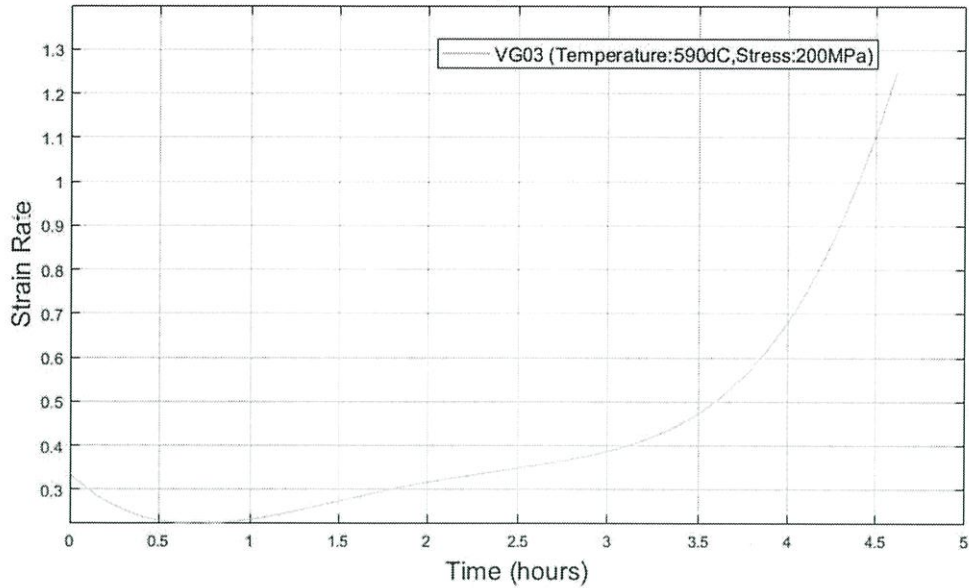
Sample number	VG01	Min. creep rate	$3.34161 \times 10^{-7} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG02

Sample number	VG02	Min. creep rate	$5.20581 \times 10^{-6} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

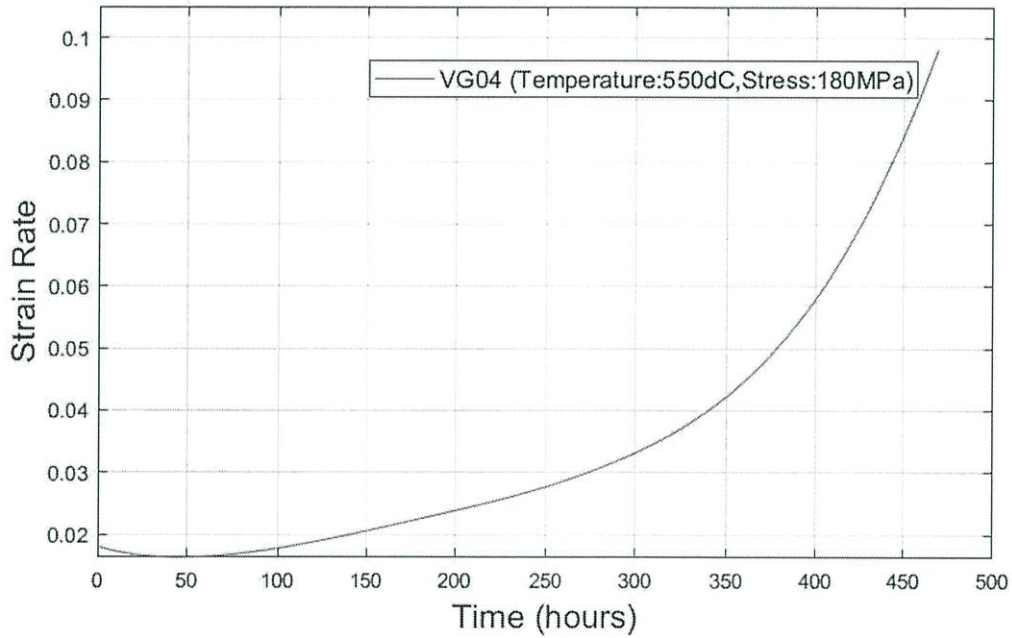
Creep curve



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG03

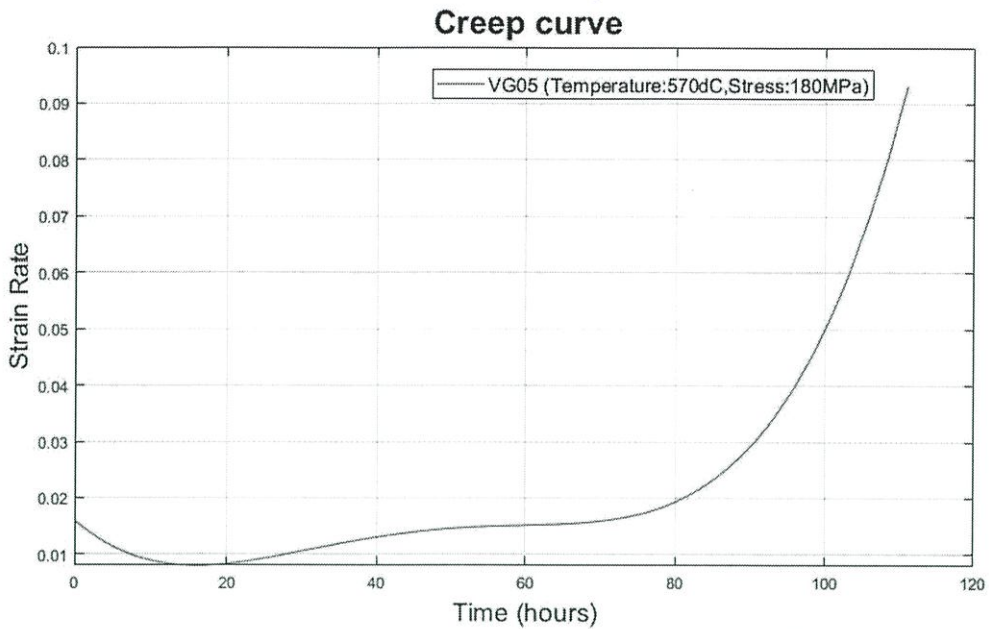
Sample number	VG03	Min. creep rate	$2.12083 \times 10^{-6} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

Creep curve



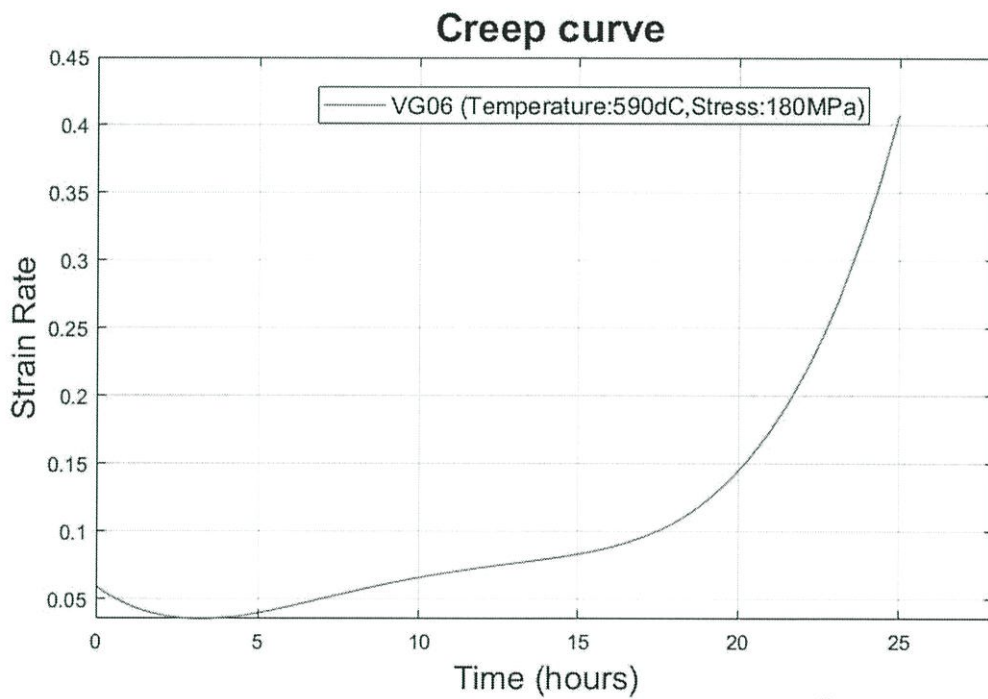
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG04

Sample number	VG04	Min. creep rate	$1.49781 \times 10^{-7} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG05

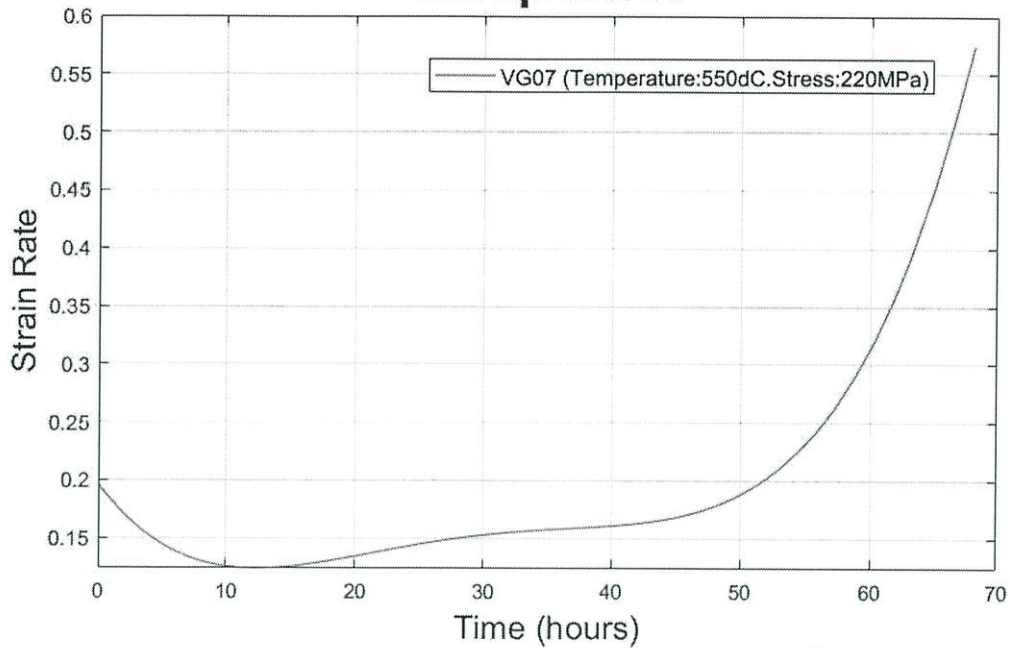
Sample number	VG05	Min. creep rate	$7.89858 \times 10^{-8} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG06

Sample number	VG06	Min. creep rate	$3.34692 \times 10^{-7} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

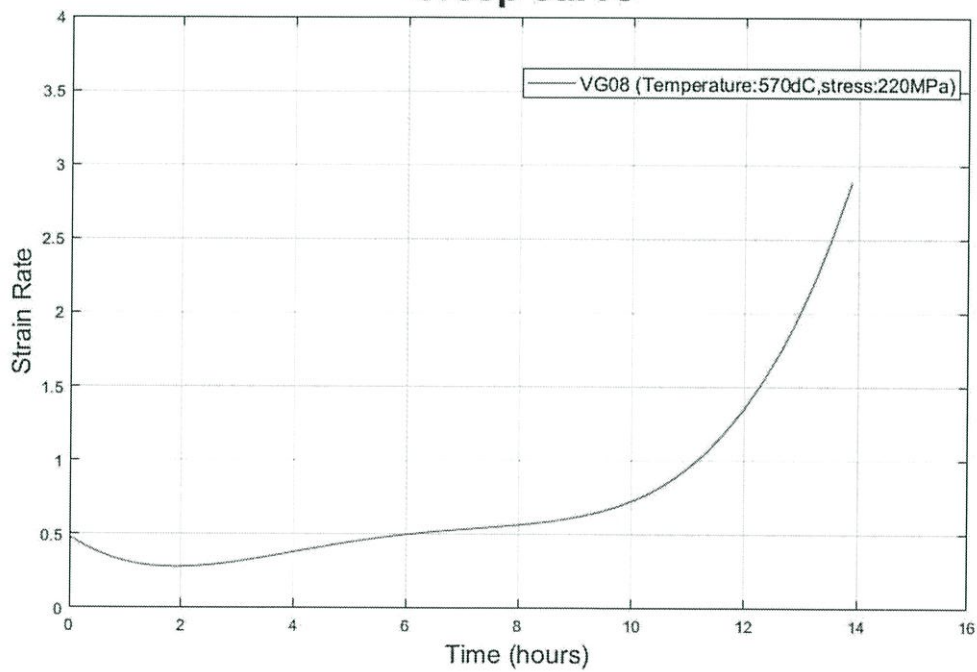
Creep curve



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG07

Sample number	VG07	Min. creep rate	$1.08965 \times 10^{-6} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

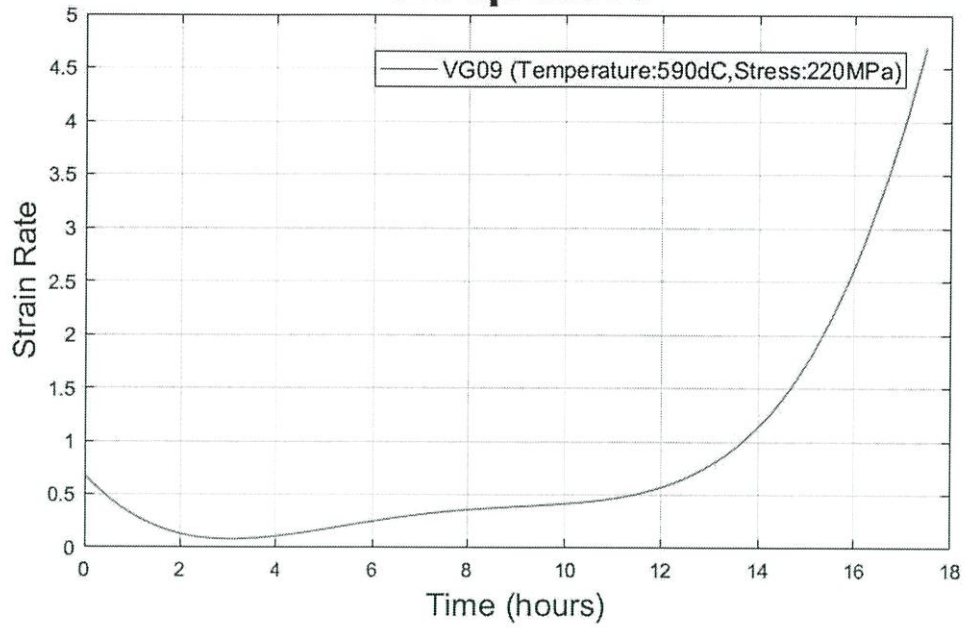
Creep curve



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG08

Sample number	VG08	Min. creep rate	$1.66929 \times 10^{-6} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

Creep curve



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการคืบเทียบกับเวลา ของชิ้นงาน VG09

Sample number	VG09	Min. creep rate	$7.08081 \times 10^{-7} s^{-1}$
---------------	------	-----------------	---------------------------------

บรรณานุกรม

- 1) Application of Manson–Haferd and Larson–Miller Methods in Creep Rupture Property Evaluation of Heat-Resistant Steels, Jie Zhao
- 2) Springer International Publishing AG 2017 , J. Pelleg, Creep in Ceramics, Solid Mechanics and Its Applications 241
- 3) Pearlite Spheroidization Mechanism and Lifetime Prediction of 12Cr1MoV Steel used in Power Plant, Qiu-Hong ZHAO , Bin JIANG , Jia-Mei WANG, Tianjin University School of Material Science and Engineering.
- 4) Examination of deformation mechanism maps in 2.25Cr—1Mo steel by creep tests at strain rates of 10^{-11} to 10^{-6} s⁻¹,
Analysis of the creep strength of a low-carbon AISI 304 steel with low- Σ grain boundaries
- 5) Analysis of the creep strength of a low-carbon AISI 304 steel with low- Σ grain boundaries, SSpigarelli^aMCabibbo^aEEvangelista^aGPalumbo^b ,
^aINFM/Department of Mechanics, University of Ancona, Via Brecce Bianche, I-60131 Ancona, Italy ,
^bIntegran Technologies, Inc., 1 Meridian Road, Toronto, Ont., Canada M9W 4Z6
- 6) Power plant Engineering , PK Nag
- 7) Material Science and Engineering, William D.Callister