

การศึกษาสมบัติความคืบของเหล็กชนิด ASTM A514 T1 หลังจากปรับปรุง
ชิ้นงานทางด้านโครงสร้างจุลภาค

Creep properties of ASTM A514 T1 after Microstructural change
due to regenerative heat treatment.



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติความคืบของเหล็กชนิด ASTM A514 T1 หลังจากปรับปรุง
ชิ้นงานทางด้านโครงสร้างจุลภาค

Creep properties of ASTM A514 T1 after Microstructural change due to
regenerative heat treatment.



สพ.
๗5637
2558

๒๐๐๒๖๖๔๒๕

สาขา.....
เลขทะเบียน..... 143869
วัน,เดือน,ปี..... 04 ต.ค. 2559

b. ๑๒๕๐๑๑๕๖
i.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

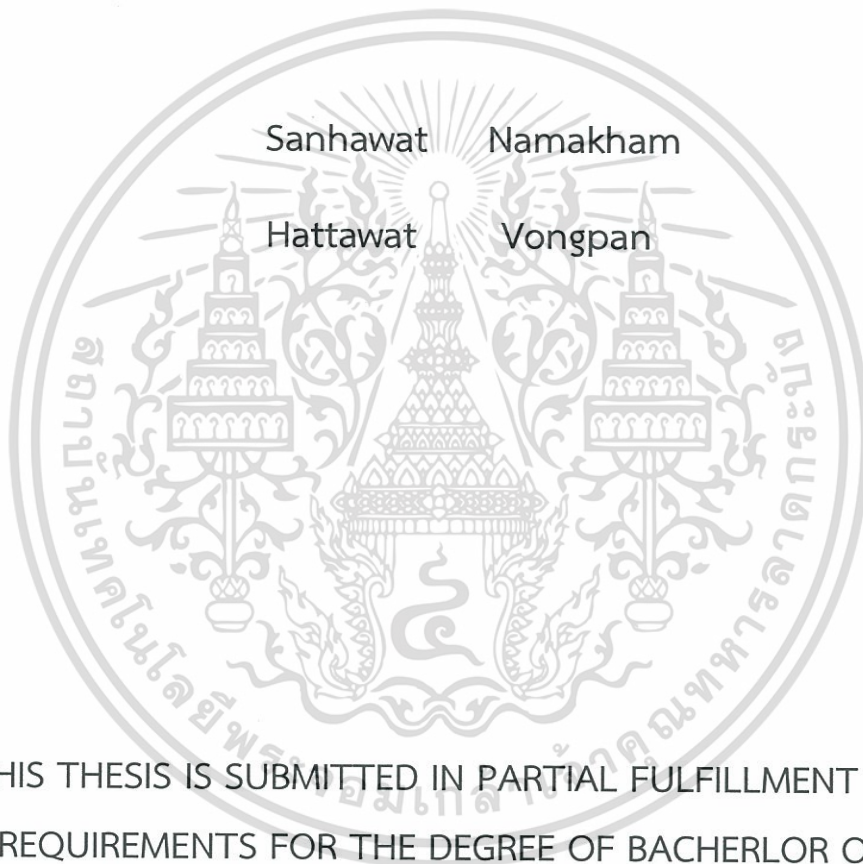
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Creep properties of ASTM A514 T1 after Microstructural change
due to regenerative heat treatment.



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHERLOR OF
ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENHINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ความคืบของเหล็ก ASTM A514 T1 หลังจากการปรับ

-ปรับปรุงงานทางด้านโครงสร้างจุลภาค

Creep property of ASTM A514 T1 after Microstructural change
due to regenerative heat treatment.

จัดทำโดย

นายสัมพันธ์ นามะคำ 55011286

นายหัตถวัฒน์ วงศ์แป้น 55011384





อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ปัญญา ชันสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติความคืบของเหล็กชนิด ASTM A514 T1 หลังจากปรับปรุงชิ้นงาน
ทางด้านโครงสร้างจุลภาค

นายสัมพันธ์	นามะคำ	55011286
นายหัตถวัฒน์	วงศ์แป้น	55011384
ดร.ปัญญา	จันทร์สุวรรณ	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การคืบ (Creep) คือการเสียรูปที่ไม่พึงประสงค์จากการที่วัสดุได้รับความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงแต่ไม่ถึงระดับที่มากพอที่ทำให้วัสดุหลอมเหลวได้ และได้รับการกระทำในระยะเวลาหนึ่ง ในทางปฏิบัติจริงนั้นจะเห็นได้จาก ไล้ของหลอดให้แสงสว่างชนิดไส้ กังหันไอน้ำของเทอร์ไบน์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า เครื่องยนต์เจ็ท จรวด หรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาทดลองเพื่อหาคุณสมบัติการคืบหรือการเสียรูปที่ไม่พึงประสงค์นี้สามารถป้องกันความเสียหายและสามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะต่างๆได้อย่างเหมาะสม เหล็ก A514 เกรด T1 เป็นชนิดที่นิยมในอุตสาหกรรมที่ใช้ท่อลำเลียงและใช้ความร้อนสูงเช่น โรงผลิตไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติการคืบของวัสดุหลังจากปรับปรุงชิ้นงานทางด้านโครงสร้างจุลภาคแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Creep properties of ASTM A514 T1 after Microstructural change
due to regenerative heat treatment.

Sanhawat	Namakham	55011286
Hattawat	Vongpan	55011384
Dr.Panya	Kansuwan,ASST.PROF.	Advisor

Year 2015

ABSTRACT

A future deformation that occurs gradually with time is called Creep. Creep is often important in engineering design, as in applications involving high temperature, such as light bulb filaments steam-turbines in power plant, jet, rocket engines and nuclear reactors. ASTM A514 T1 Steel has used widely in power plant, or high temperature application. So the objective of this research is finding and comparing creep properties of ASTM A514 T1 after Microstructural change due to regenerative heat treatment.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาสมบัติความคืบของเหล็กชนิด ASTM A514 T1 หลังจากปรับปรุงชิ้นงานทางด้านโครงสร้างจุลภาคนี้ จะสำเร็จไม่ได้หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ปัญญา ชั้นสุวรรณ ที่เห็นชอบในการจัดการทำการศึกษาความคืบของโลหะชนิดนี้ได้และให้คำแนะนำในเรื่องของการทำงานและขั้นตอนการทำงาน รวมถึงคำแนะนำที่นอกเหนือจากตำราเรียน และขอขอบคุณดร.เอกธนกิจวนิจกุล ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงชิ้นงานและชิ้นงานในการทดลอง และขอขอบคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการต่างๆในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ทำให้งานสำเร็จลุล่วงผ่านอุปสรรคต่างๆมากมาย

ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใจมากในความกรุณาและความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สารบัญกราฟ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีดำเนินของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การคืบ (Creep)	3
2.2 การทดสอบการคืบ (Creep Testing)	3
2.3 ผลกระทบจากความเค้นและอุณหภูมิ (Stress and Temperature Effects)	5
2.4 กลไกการเกิดการคืบทางกายภาพ	5
2.4.1 การคืบในวัสดุที่เป็นผลึก (Creep in Crystalline Materials)	6
2.5 การปรับปรุงชิ้นงานด้วยขบวนการทางความร้อน (Heat treatment)	8
บทที่ 3 ขั้นตอนและผลการทดลอง	9
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง	10
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน	10
3.2.2 ปรับปรุงเครื่องทดสอบคุณสมบัติความคืบ SATEC model M3	11
3.2.3 วิธีการทดสอบความคืบ	13
3.3 เงื่อนไขในการทดลอง	17
3.4 ผลการทดลอง	17
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	18
4.1 การวิเคราะห์หา Minimum creep rate ในแต่ละชิ้นงาน	18
4.2 อิทธิพลของการคืบเนื่องจากอุณหภูมิ	30
4.2.1 วัสดุแบบ AS-Receive	30
4.2.2 วัสดุแบบ Heat-Treated	31
4.3 Activation Energy	35
4.4 สรุปผลการทดลอง	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก	39
ภาคผนวก ข	42

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของ Creep mechanism	7
ตารางที่ 3.1 แสดงมาตรฐาน ASTM , JIS	14
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดลองชิ้นงาน	17
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดลอง	17
ตารางที่ 4.1 แสดงค่า activation energy ของชิ้นงานแต่ละชนิด	36
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่า minimum creep rate (1/s) และ rupture time	36



สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ 1.1 แสดงท่อที่เสียหายจากการคืบ	1
รูปภาพ 1.2 แสดงท่อที่เสียหายจากการคืบ	1
รูปภาพ 2.1 แสดงภายในของเตาอบ	3
รูปภาพ 2.2 แสดงกลไกของคาน	4
รูปภาพ 2.3 แสดงความแตกต่างของเกรนเมื่อผ่านการทำ Heat treatment	8
รูปภาพ 3.1 ส่วนหนึ่งจากท่อที่จะนำมาทดลอง	9
รูปภาพ 3.2 แสดงเครื่องทดสอบความคืบ	9
รูปภาพ 3.3 แสดงชิ้นงานที่ตัดจากท่อเหล็กตัวอย่าง	10
รูปภาพ 3.4 แสดงชิ้นงานที่กลึงเสร็จแล้ว	10
รูปภาพ 3.5 แสดงแบบของแผงหน้าเครื่องที่ออกแบบ	11
รูปภาพ 3.6 การเปลี่ยนลิมิตสวิทช์	11
รูปภาพ 3.7 แสดงแผงหน้าเครื่อง	12
รูปภาพ 3.8 แสดงภาพเครื่องเสร็จสมบูรณ์	13
รูปภาพ ก1 แสดงชิ้นงานหลังได้รับจากโรงกลึง	39
รูปภาพ ก2 แสดงชิ้นงานหลังการตัดแปะเกลียว	39
รูปภาพ ก3 แสดงดอกตัดแปะ	40
รูปภาพ ก4 แสดงชิ้นงานระหว่างการตัดแปะเกลียว	41
รูปภาพ ข1 แสดงชิ้นงานที่ขาดในช่วง	42
รูปภาพ ข2 แสดงชิ้นงานที่ขาดนอกช่วง	43

สารบัญกราฟ

กราฟที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมเกิดการเกิดความคืบในแต่ละชั้น	4
กราฟที่ 2.2 แสดงผลจากอุณหภูมิและความเค้นต่อความคืบ	5
กราฟที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Stress และ Homologous Temperature	7
กราฟที่ 3.1 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM	15
กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT	18
กราฟที่ 4.2 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT	19
กราฟที่ 4.3 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT	19
กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C HT	20
กราฟที่ 4.5 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C HT	21
กราฟที่ 4.6 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C HT	21
กราฟที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C HT	22
กราฟที่ 4.8 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C HT	23
กราฟที่ 4.9 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C HT	23
กราฟที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C AS	24
กราฟที่ 4.11 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C AS	25
กราฟที่ 4.12 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C AS	25
กราฟที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C AS	26
กราฟที่ 4.14 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C AS	27
กราฟที่ 4.15 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C AS	27
กราฟที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C AS	28
กราฟที่ 4.17 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C AS	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญกราฟ(ต่อ)

กราฟที่4.18 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่างdisplacement กับ time @525'C AS	29
กราฟที่4.19 แสดงความสัมพันธ์ strain กับ t/t _r ของชิ้นงานแบบ AS-Receive	30
กราฟที่4.20 แสดงความสัมพันธ์ strain กับ t/t _r ของชิ้นงานแบบ Heat treatment	31
กราฟที่4.21 525 องศาเซลเซียส 250 MPa	32
กราฟที่4.22 550 องศาเซลเซียส 250 MPa	33
กราฟที่4.23 575 องศาเซลเซียส 250 MPa	34
กราฟที่4.24 แสดงความสัมพันธ์ minimum creep rate กับ reciprocal temperature	35



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

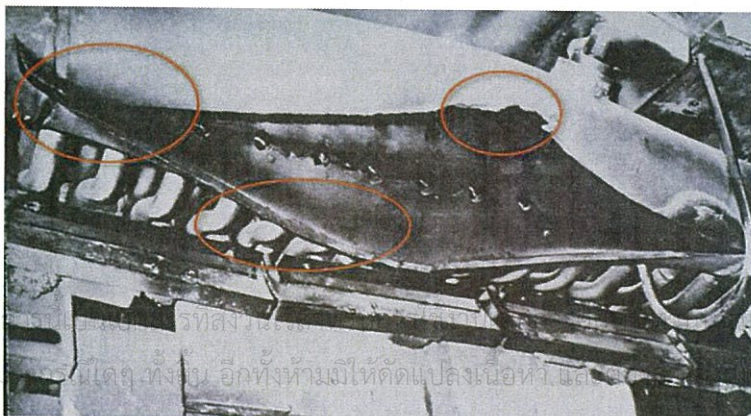
โลหะ ASTM A514 T1 นั้นใช้งานอย่างแพร่หลายใน อุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้ความร้อนสูงเช่น โรงไฟฟ้า ดังนั้นในการทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูง การคืบจึงเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญ เพื่อป้องกันการเสียหายที่เกิดจากการคืบ จึงสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานในสภาวะต่างๆ โดยโครงการนี้จะศึกษาคุณสมบัติการคืบของวัสดุทั้งในแบบที่รับมา (As-recvie) และแบบที่ผ่านการปรับปรุงชิ้นงานทางด้านโครงสร้างจุลภาค โดยชิ้นงานจะถูกอบร้อน (Heat treatment) และปล่อยให้เย็น (Air cooling) โดยในปริญญานิพนธ์นี้ จะกล่าวแทนชิ้นงานที่ถูกปรับปรุงว่า Heat treated

ดังนั้นการศึกษาวิถัยการคืบนั้นทำให้ทราบระยะเวลาที่จะแตกหัก (rupture-time) หรือ ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}$) หรือ ค่า Steady State Creep Rate โดยค่าต่างๆที่ได้จากการศึกษาทดลองนั้นจะสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความรุนแรงของการคืบในโลหะชนิดต่างๆ หรือ ในสภาวะต่างอุณหภูมิและต่างความเค้นได้ ดังนั้นเมื่อทราบคุณสมบัติการคืบที่ดีพอ จะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุให้เกิดการใช้งานที่เหมาะสม รวมไปถึงการป้องกันอันตรายที่จะเกิดจากความเสียหายและความสามารถในการประหยัดทรัพยากรได้

จากรูปภาพ 1.1 และ 1.2 นั้น เป็นตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากการคืบโดยรูปภาพที่ 1.2 การคืบจะเกิดในวงกลมที่สาม เมื่อนับจากซ้ายมาขวา



รูปภาพ 1.1 แสดงท่อที่เสียหายจากการคืบ



รูปภาพ 1.2 แสดงท่อที่เสียหายจากการคืบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อปรับปรุงเครื่องทดสอบคุณสมบัติการคืบให้สามารถทำงานได้ดีตลอดจนถูกต้องและแม่นยำ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการคืบของวัสดุ ASTM A514 T1 ทั้งในแบบที่ได้รับมา (As-receive) และแบบปรับปรุงชิ้นงานแล้ว (Heat treated)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติการคืบ ของวัสดุ ASTM A514 T1 ทั้ง as-receive และ heat - treated ที่สภาวะต่างๆ โดยให้ความเค้น (Stress) และ อุณหภูมิ (Temperature) คงที่ ตลอดการทดลอง

1.4 วิธีดำเนินการของโครงการ

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ปรับปรุงและพัฒนาเครื่องทดสอบคุณสมบัติการคืบ
3. ออกแบบและทำชิ้นงานให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM
4. ทดสอบชิ้นงาน
5. วิเคราะห์ผลและสรุปโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องทดสอบการคืบใช้งานได้ดีและแม่นยำเชื่อถือได้
2. เข้าใจและอธิบายลักษณะการคืบของ ASTM A514 T1 ทั้งในแบบ As-receive และ Heat-treated
3. เปรียบเทียบคุณสมบัติการคืบระหว่าง As-receive กับ Heat-treated ได้ ทำให้มีประโยชน์ในการเลือกนำไปใช้ในอนาคต
4. เป็นแหล่งข้อมูล Creep Data ของผู้ที่สนใจในวัสดุชนิดนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคืบ (Creep)

การที่วัสดุเสียรูปร่างอย่างถาวรเมื่อวัสดุได้รับความเค้น(stress) และอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง การเสียรูปร่างชนิดนี้เรียกว่า “การคืบ (creep)” อุณหภูมิที่จะเกิดการคืบนั้นส่วนใหญ่จะเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ของจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ ในทางปฏิบัติจริงนั้นการคืบจะเกิดในวัสดุที่ทำงานในอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อนสูง เช่น กังหันเทอร์ไบน์หรือท่อในโรงพลังงานไฟฟ้า เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องยนต์ในจรวด เป็นต้น การศึกษาการคืบของวัสดุต่างๆ จะทำให้สามารถประเมินอายุการใช้งานเพื่อป้องกันความเสียหายต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ และสามารถนำความรู้ที่ได้เลือกใช้วัสดุและทรัพยากรอย่างเหมาะสม

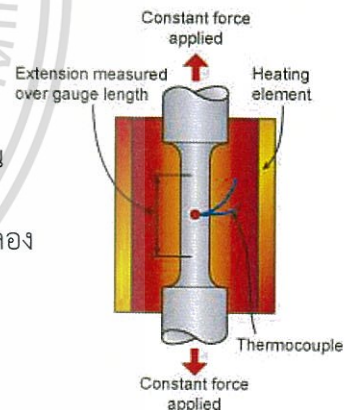
2.2 การทดสอบการคืบ (Creep Testing)

การทดสอบการคืบนั้นจะใช้การดึงด้วยแรงที่คงที่ (Constant Force) ชิ้นงานจะถูกอบและทำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง โดยในขณะที่ทดลองนั้นต้องวัดระยะที่เปลี่ยนไปในขณะนั้นพร้อมกับจับเวลาไปด้วย โดยระยะเวลาการทดลองสามารถเป็นไปได้ตั้งแต่ไม่กี่นาทีถึงหลายปีก็ได้

การทดลองการคืบนั้นจะมีตัวแปรที่สำคัญในการทดลองอยู่ 6 ตัวแปรหลัก

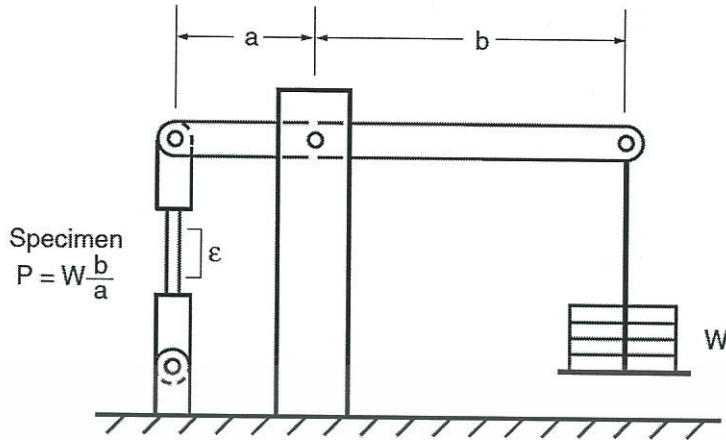
- คือ 1. ความเค้น (Stress, σ)
2. อุณหภูมิ (Temperature , T)
3. ความเครียด (Creep strain, ϵ)
4. อัตราการเกิดการคืบ (Creep rate, $\dot{\epsilon}$)
5. เวลาที่ใช้ในการแตกหักของวัสดุ (Time to rupture, t_r)

6. อัตราการเกิดการคืบต่ำสุด (Minimum Creep Rate $\dot{\epsilon}_m$)



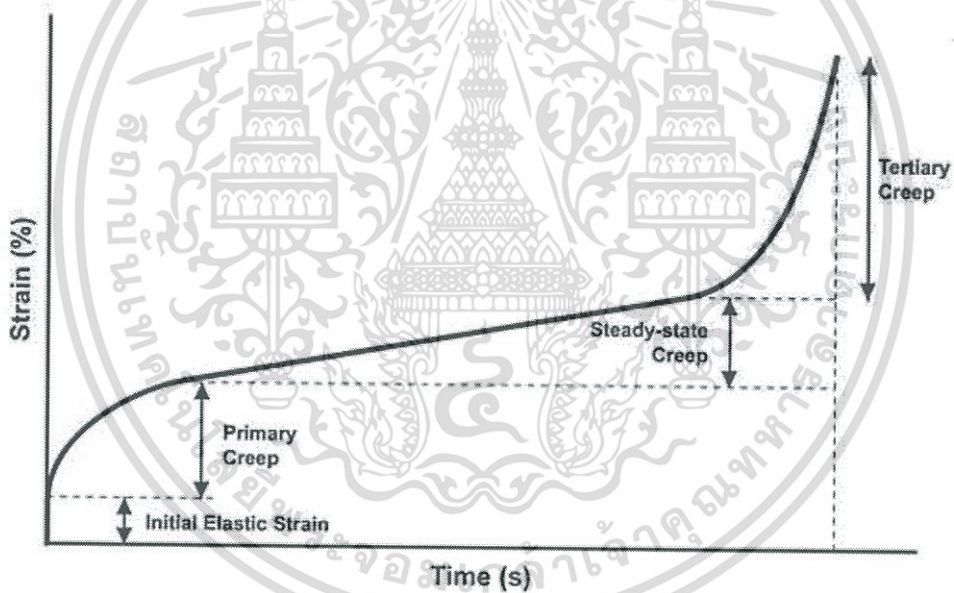
รูปภาพ 2.1

แสดงภายในของ
องเตาอบ



รูปที่ 2.2 แสดงกลไกของคาน

กราฟที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมของการเกิดความเค้นในแต่ละชั้น



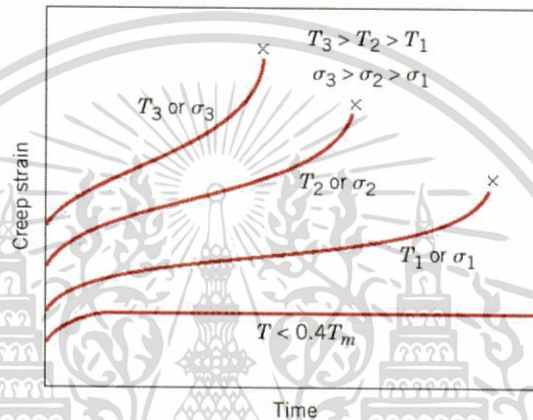
จากกราฟ 2.1 นั้นเป็นกราฟที่สำคัญของการทดลองการคืบโดยมีแกนนอนเป็นแกนเวลา (time, t) ส่วน แกนตั้งเป็นแกนความเครียด (strain, E) ในระยะแรกนั้นอัตราการยืดตัวจะสูงมากซึ่งทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อนจะค่อยเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ในระยะนี้เรียกว่า ระยะปฐมภูมิ (primary-state) หรือจะเรียกว่าระยะ Transient state ก็ได้เช่นกัน ต่อมาเป็นระยะทุติยภูมิ (secondary-state) หรือ ระยะ (steady-state) ในระยะนี้ อัตราการยืดตัวจะคงที่ โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามเวลาและในระยะสุดท้ายนั้นเรียกว่า ระยะตติยภูมิ (tertiary-state) หรือระยะ (unstable-state) ระยะนี้ความเค้นจะไม่คงที่เนื่องจากการ necking หรือ voids เกิดขึ้นซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัด (surface area) ลดลงเป็นผลทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้นอีกครั้งก่อนที่วัสดุจะเสียหายและแตกหัก (rupture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลกระทบจากความเค้นและอุณหภูมิ (Stress and Temperature Effects)

จากกราฟ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึงการคืบหรือความเครียดที่แตกต่างซึ่งเป็นผลมาจาก อุณหภูมิ และความเค้นที่สภาวะต่างๆ เมื่อวัสดุได้รับความเค้นที่สูงและอุณหภูมิที่สูงนั้นจะทำให้วัสดุเสียรูปร่างเร็วที่สุด แต่เมื่อวัสดุได้รับอุณหภูมิที่ต่ำและความเค้นที่ต่ำจะทำให้วัสดุเสียรูปร่างด้วยอัตราที่น้อยลงมาและเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดความเครียด วัสดุจะไม่เสียรูปร่างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงนี้วัสดุจะไม่เกิดการคืบ

กราฟ 2.2 แสดงผลจากอุณหภูมิและความเค้นต่อความคืบ



2.4 กลไกการเกิดการคืบทางกายภาพ

การทำความเข้าใจถึงกลไกทางกายภาพของวัสดุนั้นจะทำให้อธิบายการเกิดการคืบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งกลไกนี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของวัสดุและสภาวะที่วัสดุได้รับ (อุณหภูมิหรือความเค้นต่างๆ) โดยการเคลื่อนที่ของอะตอม, ช่องว่าง (dislocations), โมเลกุล ในวัสดุเมื่อเวลาผ่านไป และจะเคลื่อนที่เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเคลื่อนที่เหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญในการอธิบายลักษณะของการเกิดการคืบ และสามารถเรียกการเคลื่อนที่นี้โดยรวมว่า การแพร่ (diffusion)

2.4.1 การคืบในวัสดุที่เป็นผลึก (Creep in Crystalline Materials)

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2 \sigma^m}{d^q T} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

2.1

สมการ 2.1 เป็นสมการที่ใช้ในวัสดุที่เป็นผลึก โดยอัตราการคืบ $\dot{\epsilon}$ จะแปรผันกับความเค้น σ , เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกรน (d) และ อุณหภูมิ (T) สัมประสิทธิ์ A_2 , m , q และ Q (activation energy) นั้นขึ้นกับชนิดของวัสดุและกลไกการเกิดการคืบ ณ ขณะนั้น

โดยกลไกการเกิดการคืบทางกายภาพนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Diffusion Creep การคืบชนิดนี้จะเกิดที่ความเค้นต่ำๆ โดย สามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีก 2 ชนิดตามลักษณะการเคลื่อนที่ของ Vacancies (ช่องว่าง)

1.1 Navarro-Herring creep การคืบชนิดนี้มักเกิดที่อุณหภูมิสูง โดย Vacancies จะเคลื่อนที่ผ่านของแลตทิซของผลึก

1.2 Coble creep การคืบชนิดนี้มักเกิดที่อุณหภูมิสูงไม่มาก โดย Vacancies จะเคลื่อนตามขอบเกรน

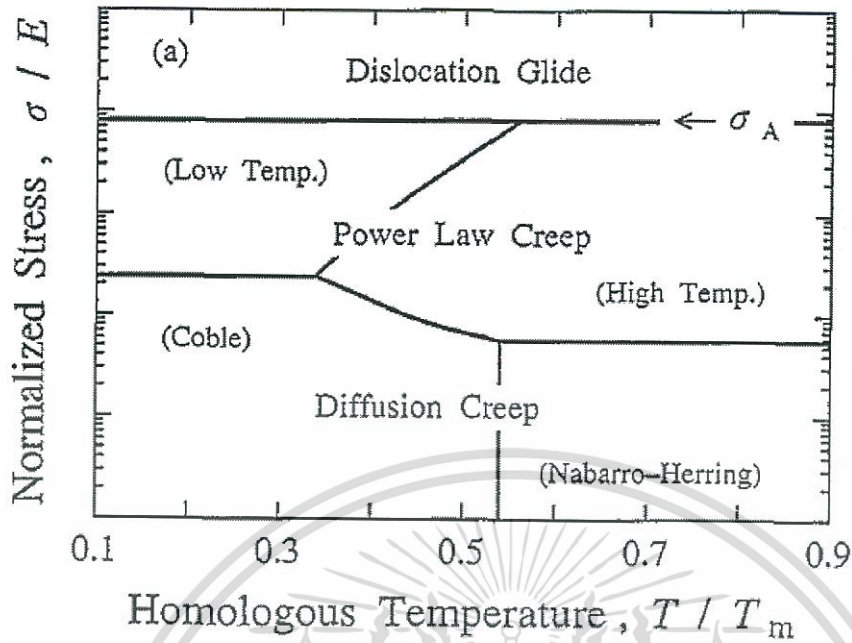
2. Dislocation Creep หรือ Power law Creep การคืบชนิดนี้จะรุนแรงกว่าและเกิดที่ความเค้นสูงๆ (High-Stress) โดยจะแบ่งออกเป็นอีก 2 ชนิดตามลักษณะทางกายภาพ

2.1 Lattice diffusion การคืบชนิดนี้มักเกิดที่อุณหภูมิสูง

2.2 Dislocation core diffusion การคืบชนิดนี้จะเกิดที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก

ดังนั้นการทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการนั้นจะสามารถทำนายถึงกลไกการเกิดการคืบรวมทั้งความรุนแรงของการเกิดการคืบในสภาวะต่างๆได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์ m และ q ของ Crystalline Materials นั้นสรุปได้ดังตาราง 2.1 (อ้างอิงจาก : Mechanical Behaviour of materials ,Norman E. Dowling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Stress และ Homologous Temperature

จากกราฟ 2.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Stress และ Homologous Temperature ซึ่งจะบอกกลไกการเกิดการคืบที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆของโลหะตั้งนั้นเมื่อเราหา

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของ Creep mechanism

Name of Mechanism	m	q	Description
Diffusional flow (Nabarro-Herring creep)	1	2	Vacancy diffusion through the crystal lattice
Diffusional flow (Coble creep)	1	3	Vacancy diffusion along grain boundaries
Grain boundary sliding	2	2 or 3	Sliding accommodated by vacancy diffusion through the crystal lattice ($q = 2$) or along grain boundaries ($q = 3$)
Dislocation creep (Power law creep)	3 to 8	0	Dislocation motion, with climb over microstructural obstacles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การปรับปรุงชิ้นงานด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

จากการปรับปรุงชิ้นงานด้วยกระบวนการอบร้อน (Heat treatment) ได้นำวัสดุ ASTM A514 ไปอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียสต่อนาทีผลที่ได้คือ จากรูปภาพ 2.3 (ก) คือภาพถ่าย cross-section ของ ASTM A514 และภาพ (ข) คือ ภาพถ่ายของ ASTM A514 หลังจากอบความร้อน (Heat-treated) จะเห็นได้ว่าเฟสเพิร์ลไลต์ได้ลดลงจากเดิม ซึ่งสามารถทำนายได้ว่าการต่อต้านการคืบมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของเพิร์ลไลต์นั้น เมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้น เฟสเพิร์ลไลต์จะเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสเฟอไรต์ ซึ่งเฟอไรต์มีความแข็งที่น้อยกว่าทำให้วัสดุเสียรูปได้ง่ายกว่า

ดังนั้นการที่มีเพิร์ลไลต์ (pearlite) น้อยลงตามทฤษฎีนั้นจะทำให้วัสดุมีการต่อต้านต่อการเสียรูปหรือการต่อต้านการคืบนั้นมีค่าสูงขึ้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 แสดงความแตกต่างของเกรนเมื่อผ่านการทำ Heat treatment

อ้างอิงจากงานวิจัย : (Microstructural changes due to regenerative heat-treatment of ASTM A 514 superheat tubes in boiler application , Ake Thanakitwanitkul1 Panya Kansuwan)

บทที่ 3

ขั้นตอนและผลการทดลอง

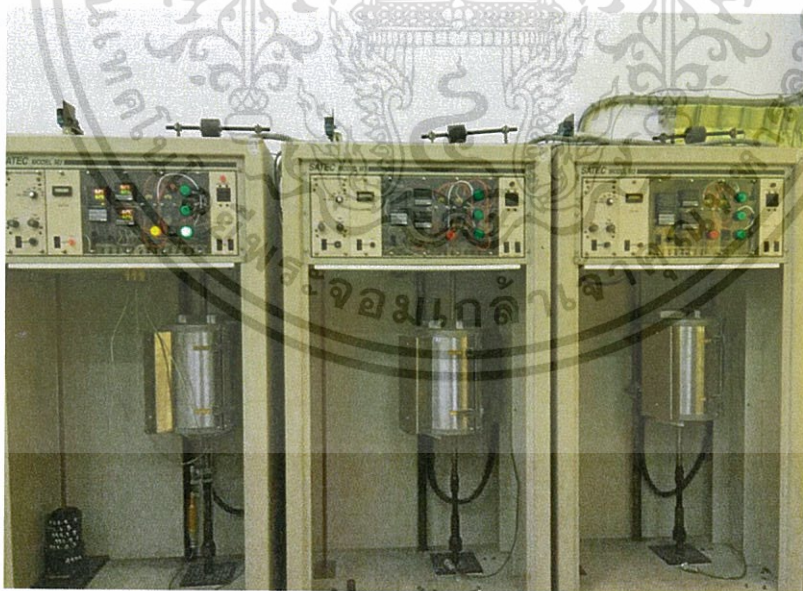
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 วัสดุชิ้นงานที่จะนำมาทำการศึกษาเหล็ก A514 T1



รูปที่ 3.1 ส่วนหนึ่งจากท่อที่จะนำมาทดลอง

3.1.2 เครื่องทดสอบคุณสมบัติความเค้น SATEC model M3



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องทดสอบความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

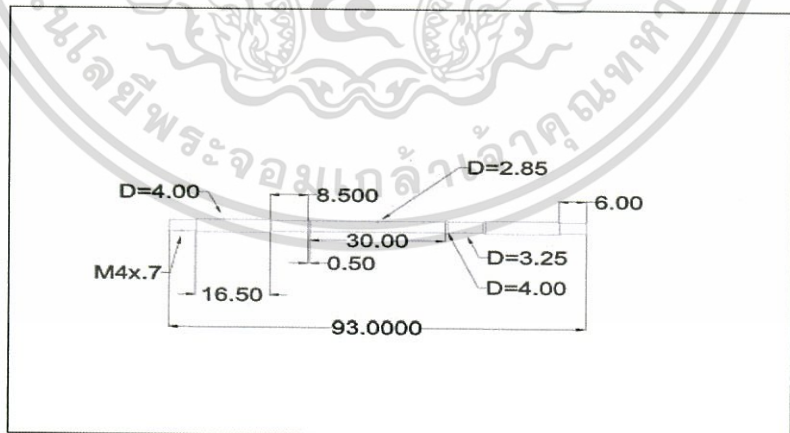
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน

1. ตัดเหล็กจากท่อตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 แสดงชิ้นงานที่ตัดจากท่อเหล็กตัวอย่าง

2. ร่างแบบเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM
3. กลึงจนได้ตามแบบที่วาดไว้



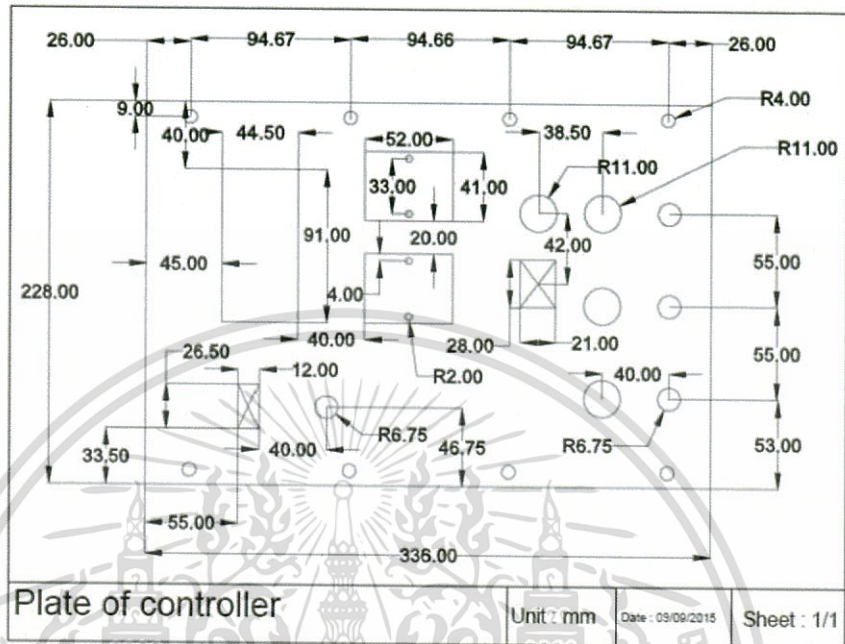
รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานที่กลึงเสร็จแล้ว

4. ขัดผิวชิ้นงานโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ไมโครเมตร
5. ทาผิวโลหะด้วยน้ำมันเพื่อป้องกันการเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ปรับปรุงเครื่องทดสอบคุณสมบัติความคืบ SATEC model M3

1. ออกแบบแผงควบคุมหน้าตู้ใหม่



รูปที่ 3.5 แสดงแบบของแผงหน้าเครื่องที่ออกแบบ

2. เปลี่ยน Limit switch

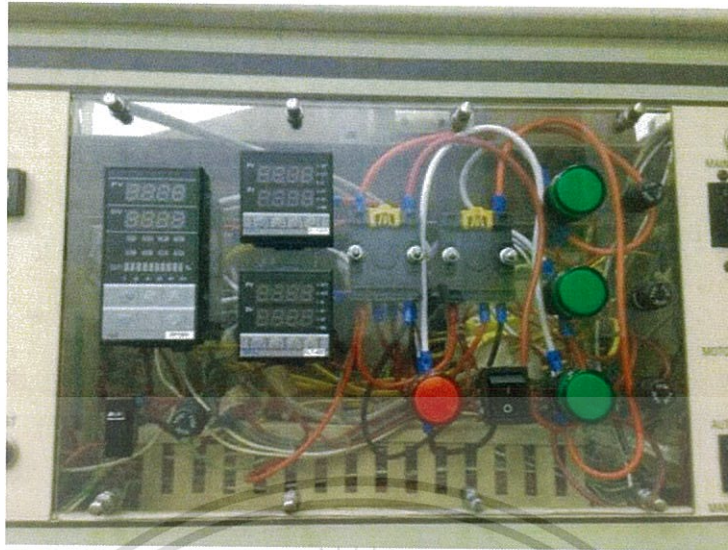


รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนลิมิตสวิทช์

3. ตัดแผงควบคุมใหม่จากการออกแบบ

4. เปลี่ยน Controller เป็น Linking PLT-800, PLT-400

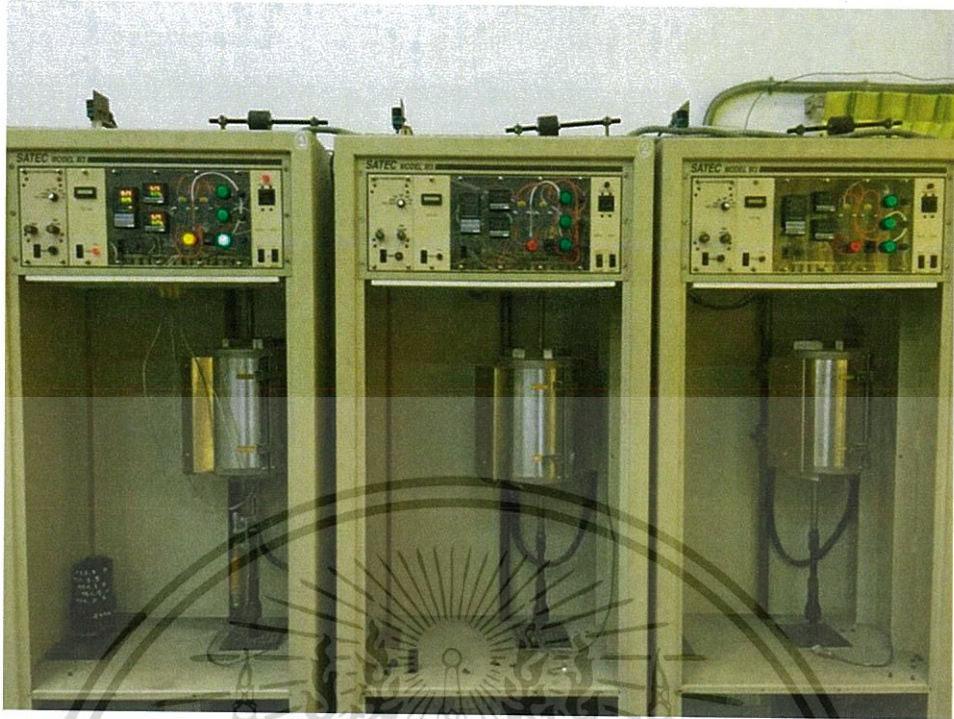
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงแผงหน้าเครื่อง

5. เปลี่ยน Solid State Relay Fotek SSR-50DA เครื่องละ3ตัว
6. เพิ่มไฟ LED เพื่อการทำงานของ heating coil
7. เปลี่ยน Relay Omron MK2P-I เครื่องละ2ตัว
8. เปลี่ยนสวิตซ์ไฟฟ้า
9. เดินสายไฟ
10. เปลี่ยน Thermocouple Type K 9 เส้น
11. สอบเทียบ (Calibrate)
12. ตั้งโปรแกรมเพื่อให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงภาพเครื่องเสริมสมบูรณ์

3.2.3 วิธีการทดสอบความคืบ

การทดสอบความคืบ เป็นการหาความสัมพันธ์แบบ time dependent ระหว่าง strain ของชิ้นงานที่อุณหภูมิหนึ่ง กับเวลา ซึ่งใช้ในแรงดึงในแนวแกนแบบ Constant load หรือแบบ Constant stress

1. หาพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 จุด ได้แก่ ปลาย 2 ข้างและตรงกลางของ gauge length ด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่งในหน่วย mm (รูปภาพ 3.6)

2. การควบคุมอุณหภูมิ

(a) อุณหภูมิที่วัดได้ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของผิวชิ้นงานที่ปลายทั้ง 2 ของ gauge length น้อยกว่า 50 mm ถ้า gauge length > 50 mm ให้เพิ่มจุดวัดอุณหภูมิอีกหนึ่งจุด ตรงกลางชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) การควบคุมอุณหภูมิขึ้นงาน สามารถทำได้ 2 วิธี โดยมีควบคุมสัดส่วนพลังงานที่เหมาะสมให้กับเตาแบบแยก

-Thermocouple ตรงกลางขึ้นงานจะใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ขณะที่ thermocouple ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของ gauge length ใช้เพื่อ monitor

-Thermocouple ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของ gauge length จะใช้ในการควบคุมอุณหภูมิขึ้นงาน ซึ่งระบบการควบคุมมักแยกออกจากกัน ขณะที่ thermocouple ตรงกลางขึ้นงาน ใช้เพื่อ monitor

(c) ควรใช้เวลาในการ heating ขึ้นงานมากกว่า 1 ชม. จนกระทั่งได้ อุณหภูมิ set point และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด overshooting ในช่วง heating time ควรตั้งอุณหภูมิต่ำกว่า set point 5 – 20 °C ก่อนเพิ่ม อุณหภูมิ set point เป็นอุณหภูมิทดสอบขึ้นงาน

(d) Overshooting temperature ควรอยู่ในช่วงตารางอุณหภูมิข้างล่าง

(e) ควรอบขึ้นงานที่อุณหภูมิทดสอบไม่น้อยกว่า 1 ชม. (ASTM139-11) หรือ 16 – 24 ชม. (JIS Z2271) เพื่อให้ความร้อน กระจายตัวทั่วขึ้นงาน ได้อย่างสม่ำเสมอ

(f) ระหว่างทดสอบต้องควบคุมอุณหภูมิของขึ้นงาน

ตารางที่ 3.1 แสดงมาตรฐาน ASTM , JIS

Standard	Temperature range	Uncertainty
ASTM E139	≤1000°C	±2°C
	>1000°C	±3°C
JIS Z2271	≤900°C	±3°C
	>900°C and ≤1000°C	±4°C

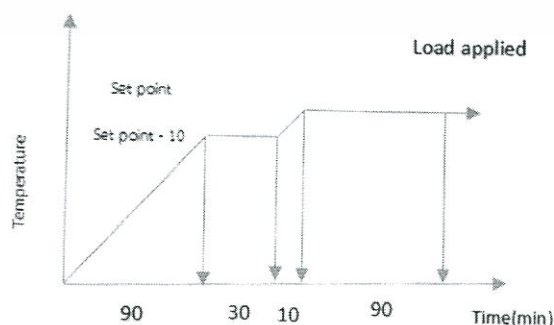
3. ใส่ภาระแรงน้อยกว่า 10% ของแรงที่ใช้ทดสอบ

(a) JIS แนะนำให้ใส่แรงนี้หลังจาก soaking time เป็นเวลาหลายนาที (4-5 นาที) ก่อนนำภาระแรงออก ตามด้วยเพิ่มภาระแรงทั้งหมดให้เร็วที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด shock load และไม่ให้เกิด creep strain ในช่วงแรกของการทดสอบ ซึ่งเรียก Strain ช่วงนี้ว่า Instantaneous strain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) ASTM แนะนำให้ใส่แรงนี้ ก่อนหรือระหว่างให้ความร้อนขึ้นงาน แล้วจึงค่อยๆใส่แรงทีละชั้นให้เร็วที่สุดเท่าที่ทำได้โดยไม่ให้เกิด shock load และสามารถวัด Instantaneous strain ได้

4. ระหว่างทดสอบ ระวังไม่ให้มี Shock load หรือ load ที่เยื้องแนวแกน
5. ผูกเทอร์โมคัปเปิ้ลติดชิ้นงาน3ส่วน บน กลาง และล่าง โดยใช้ลวดสแตนเลสในการมัด
6. นำชิ้นงานที่ผูกเทอร์โมคัปเปิ้ลแล้วไปประกอบเข้ากับชุดข้อต่อร้อน (Hot Coupling) โดยขันน็อตให้แน่นโดยให้ระยะของข้อต่อ(Hot Coupling)ตัวบนและตัวล่างมีระยะห่างเท่ากับความยาว Gauge length ของชิ้นงาน (รูปภาพ 3.7)
7. ติดตั้งชุดข้อต่อ(Hot Coupling)เข้ากับเครื่องทดสอบความเค้น
8. เสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับเครื่องทดสอบความเค้น (รูปภาพ 3.8)
9. เปิดเตา
10. หมุนไมโครมิเตอร์เข้ากับชุดข้อต่อเพื่อใช้วัดระยะยึดของชิ้นงานขณะทดสอบ
11. Calibrateไมโครมิเตอร์โดยใช้มิลติมิเตอร์วัดความต่างศักย์ที่ไมโครมิเตอร์ปล่อยออกมาในแต่ละระยะ
12. ตั้งค่าโปรแกรม ให้บันทึกความต่างศักย์อันเนื่องมาจากการยึดตัวของชิ้นงานกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบทุกๆ15วินาที
13. ปรับตั้งค่าคอนโทรลเลอร์ให้ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่เงื่อนไขที่เราต้องการ โดยใช้มาตรฐานแบบ ASTM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **ภาพที่ 3.1** แสดงการเพิ่มอุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM ที่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เมื่อถึงเวลาapply load เราก็กดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ลงเพื่อตั้งโหลดขึ้นแล้วกด Auto
15. เมื่อชิ้นงานขาดแล้ว ก็Export ข้อมูลออกจากโปรแกรม โดยตัวโปรแกรมจะบันทึกมาในไฟล์ Microsoft Office Excel



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เงื่อนไขในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดลองชิ้นงาน

Condition	Stress (Mpa)	Normalized stress (10^{-3})	Temperature	T/Tm
1	250	1.422	525	0.477
2	250	1.441	550	0.492
3	250	1.462	575	0.507

3.4 ผลการทดลอง

ตาราง 3.3 แสดงผลการทดลอง

	Gauge-length (mm)	Diameter (mm)	Temp (C)	Stress (MPa)	Rupture-Time (hr)	Minimum Creep rate(1/s)
1(HT1)	30.15	2.85	550	250	115.2708	1.84732×10^{-7}
2(HT2)	29.75	2.85	575	250	14.48194	3.16614×10^{-6}
3(HT3)	28.4	2.85	525	250	595.5708	1.50833×10^{-8}
4(AS1)	29.4	2.85	575	250	0.75	8.32640×10^{-5}
5(AS2)	29.35	2.85	550	250	10.475	4.77689×10^{-6}
6(AS3)	29.35	2.85	525	250	237.50	3.74355×10^{-7}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์หา Minimum creep rate ในแต่ละชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ 1 (HT)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 30.15 mm

Stress = 250 MPa

Temp = 550 degree Celsius

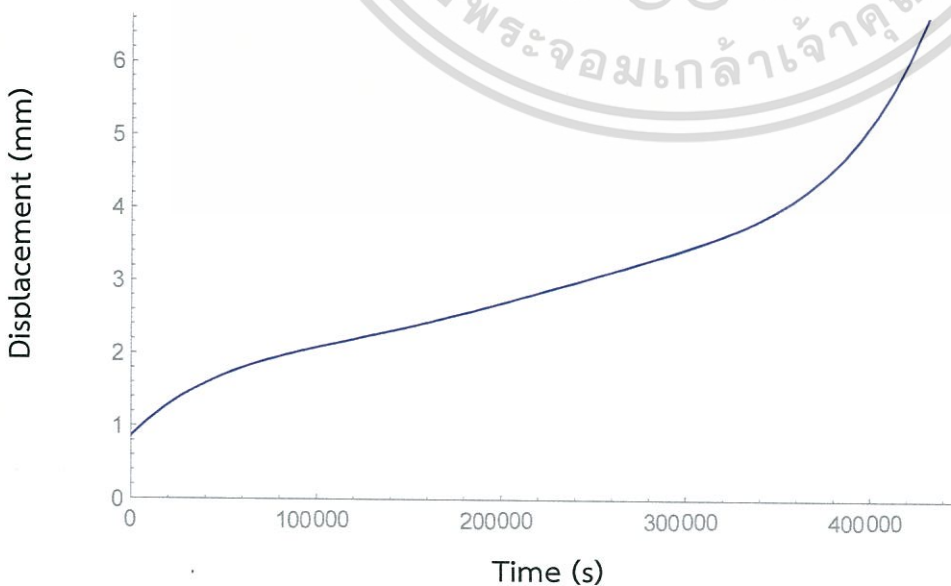
Result:

Rupture time = 414975s (115.2708 hr) (4.803 days)

Displacement = 6.205677 mm

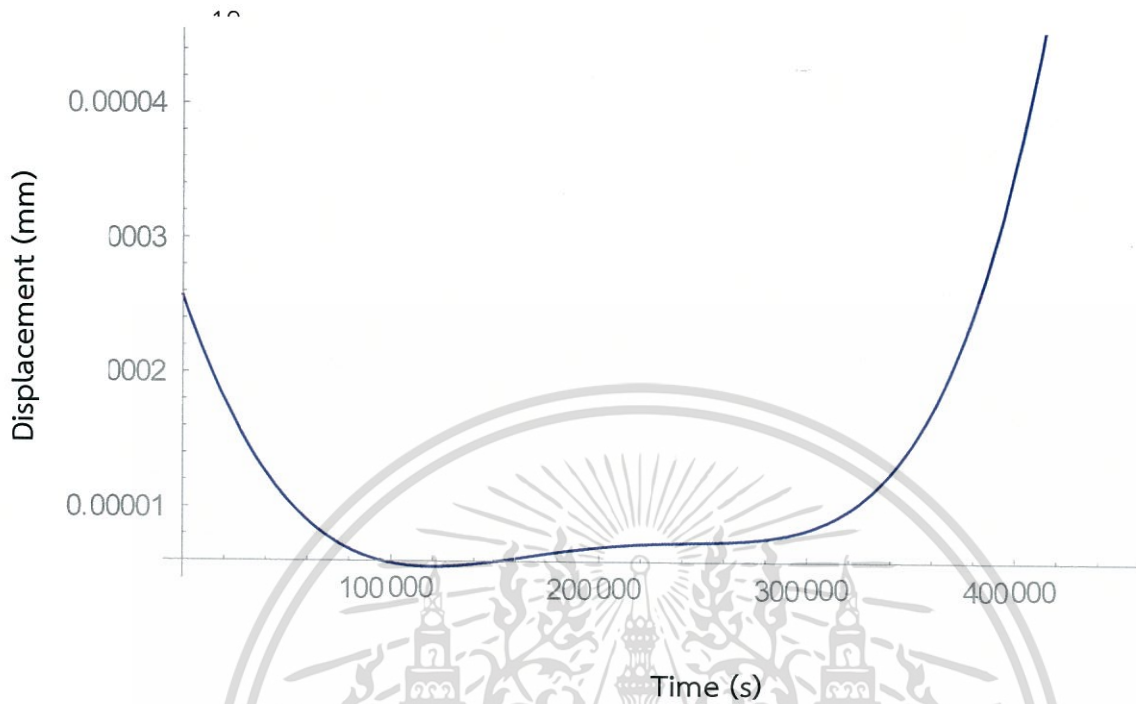
Minimum creep rate = 1.84789×10^{-7} mm/s

กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT

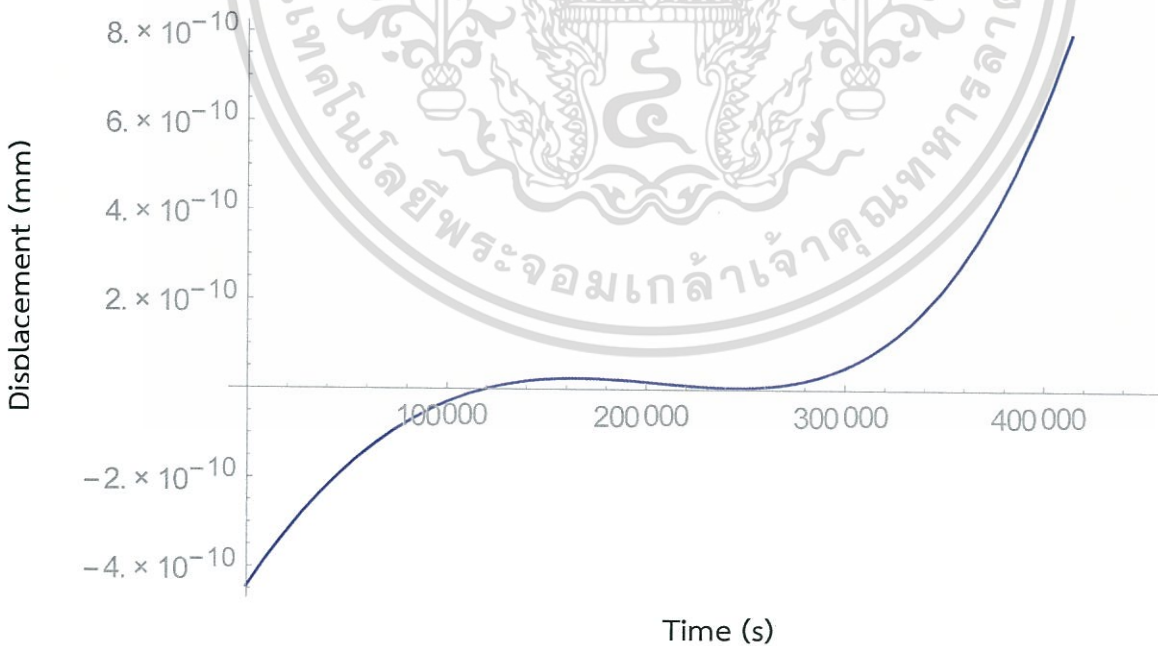


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.2 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT



กราฟที่ 4.3 แสดงกราฟดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C HT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ 2 (HT2)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 29.25 mm

Stress = 250 MPa

Temp = 575 degree Celsius

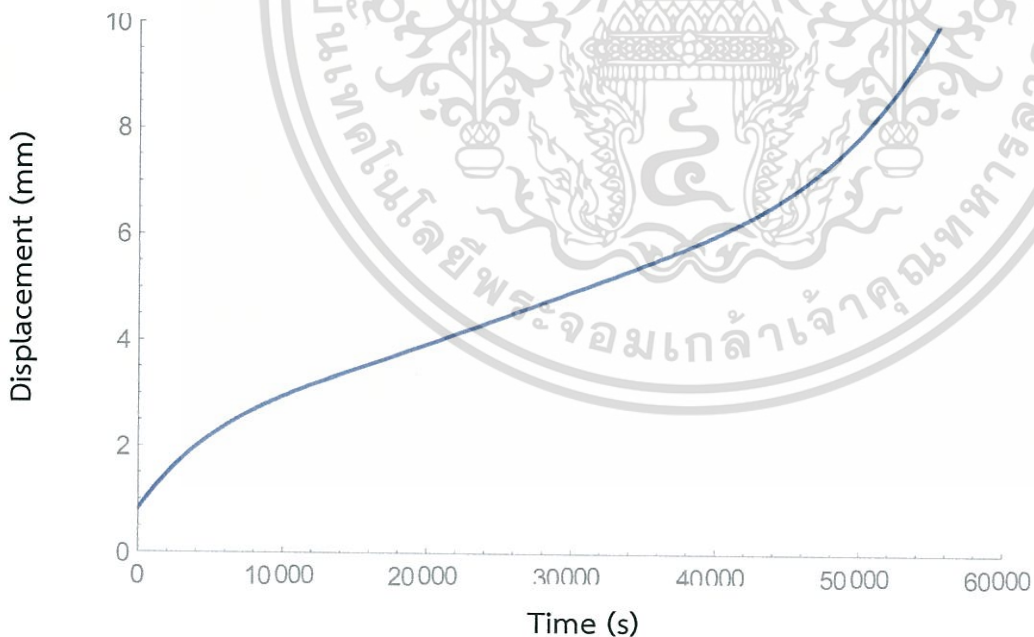
Result:

Rupture time = 52135s (14.48194 hr) (0.603414 days)

Displacement = 4.887519 mm

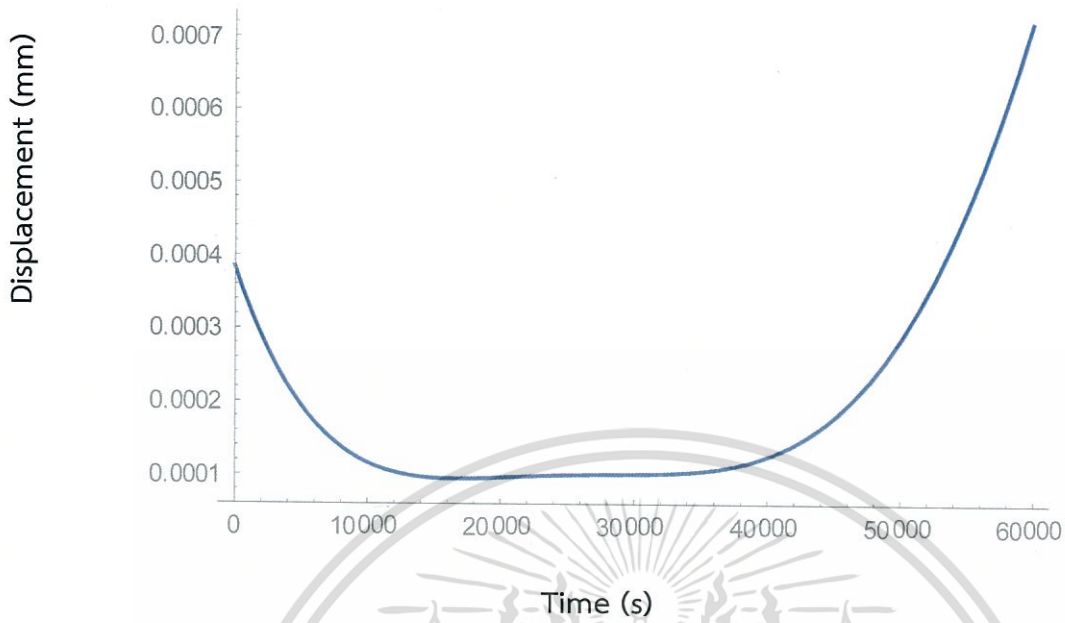
Minimum creep rate = 3.16614×10^{-6} (1/s)

กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time

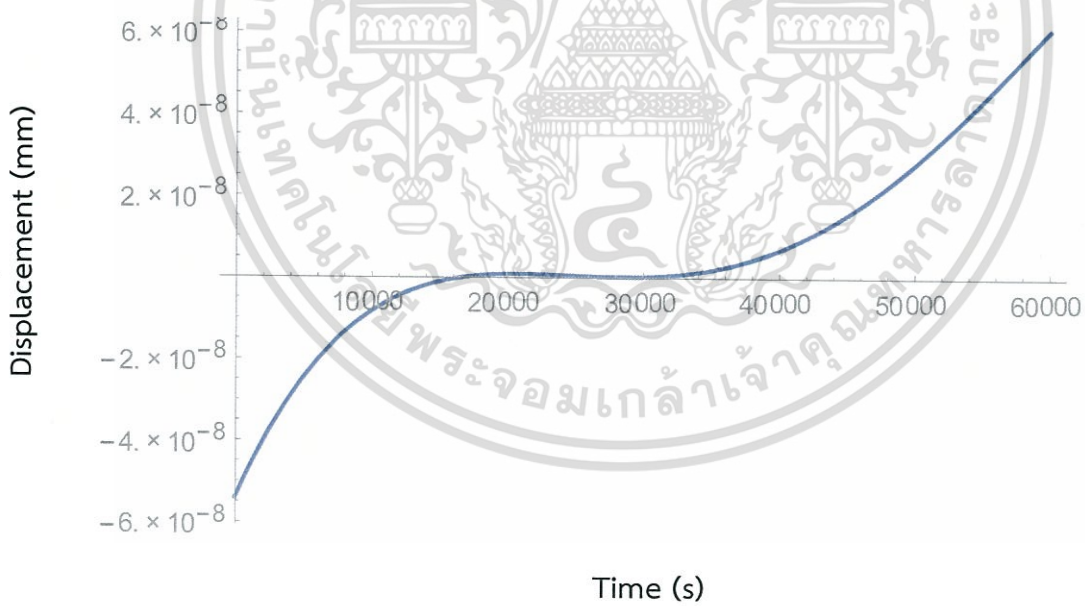


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.5 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C HT



กราฟที่ 4.6 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C HT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ 3 (HT3)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 28.4 mm

Stress = 250 MPa

Temp = 525 degree Celsius

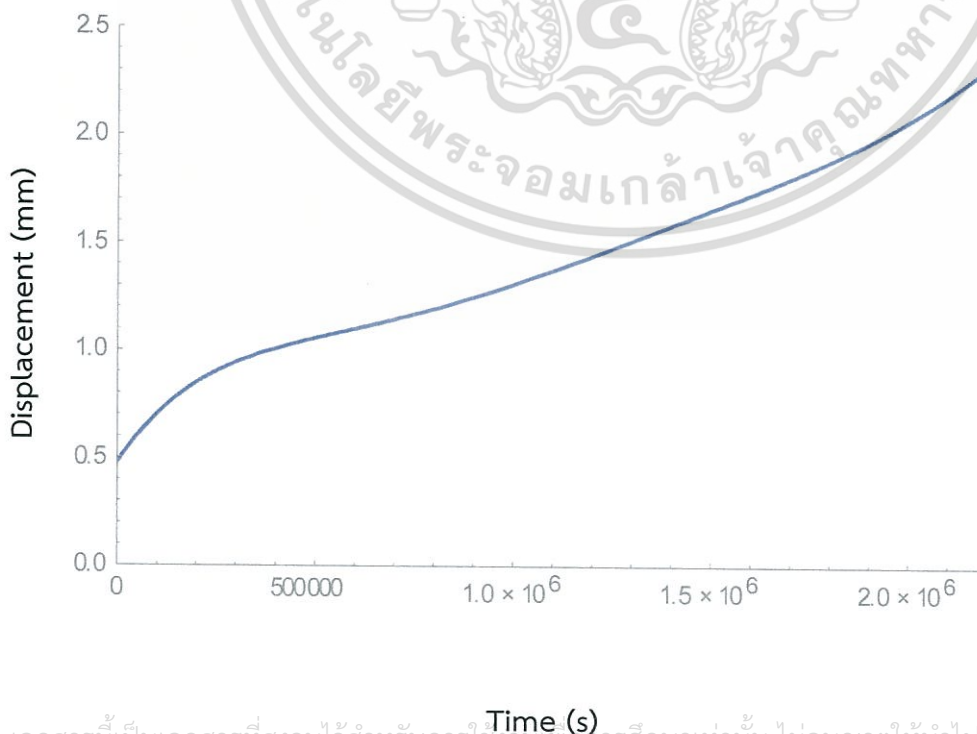
Result:

Rupture time = 595.5708 hr. 24.81 days

Displacement = 2.248027 mm

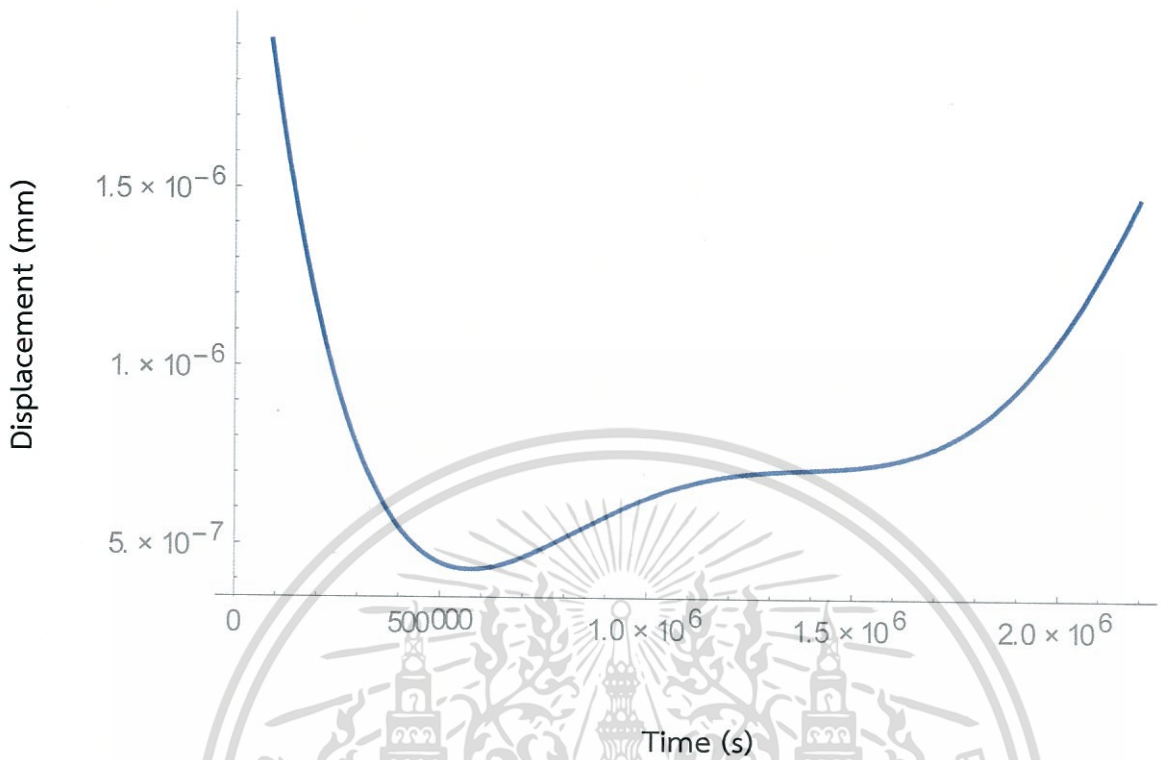
Minimum creep rate = 1.50833×10^{-8} mm/s

กราฟที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time

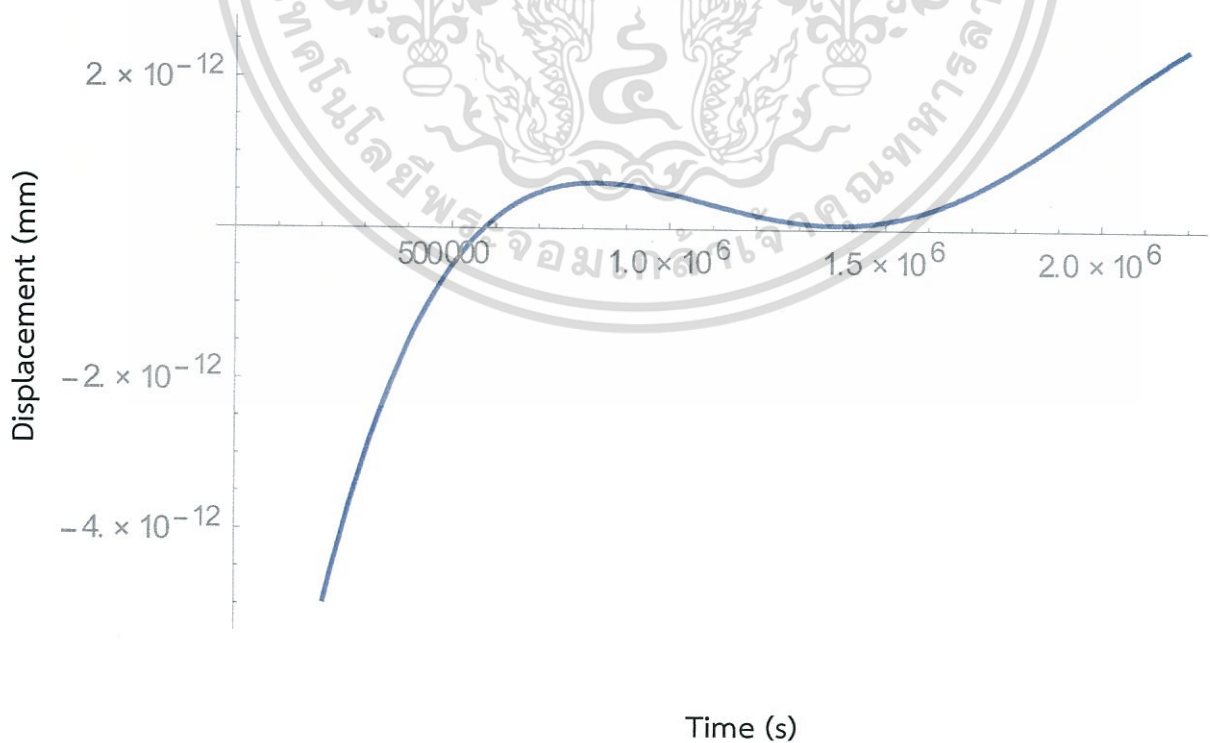


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.8 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C HT



กราฟที่ 4.9 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C HT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ 4 (AS)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 28.4 mm

Stress = 250 MPa

Temp = 575 degree Celsius

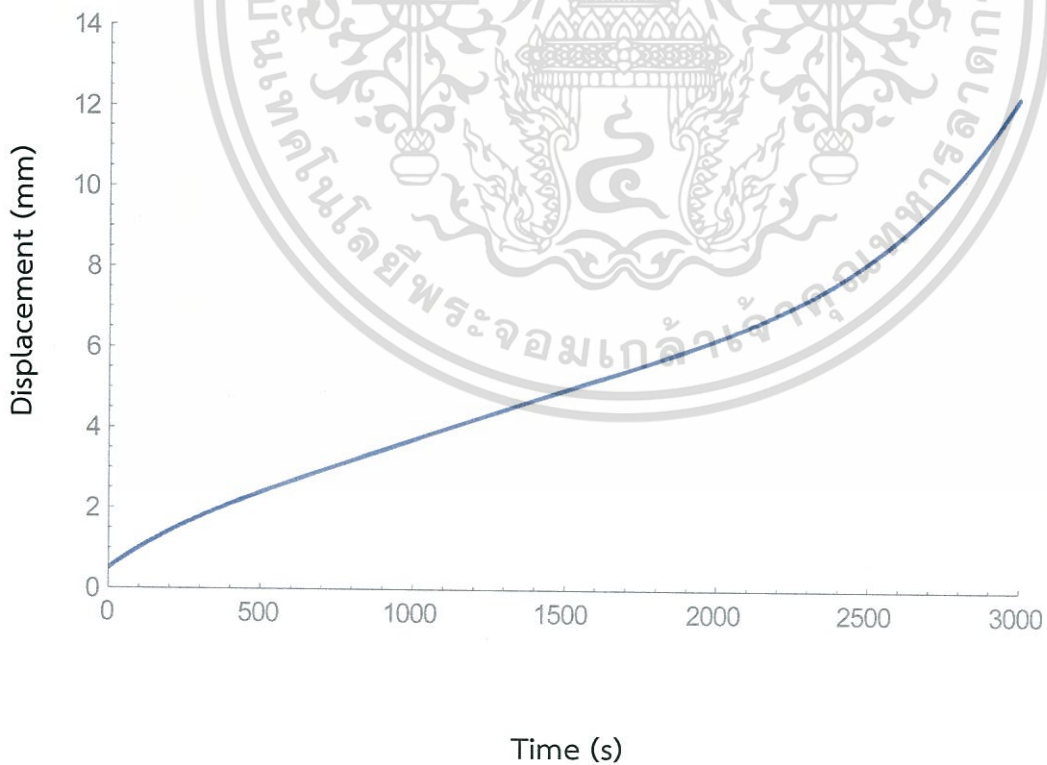
Result:

Rupture time = 0.75hr

Displacement = 10.5289 mm

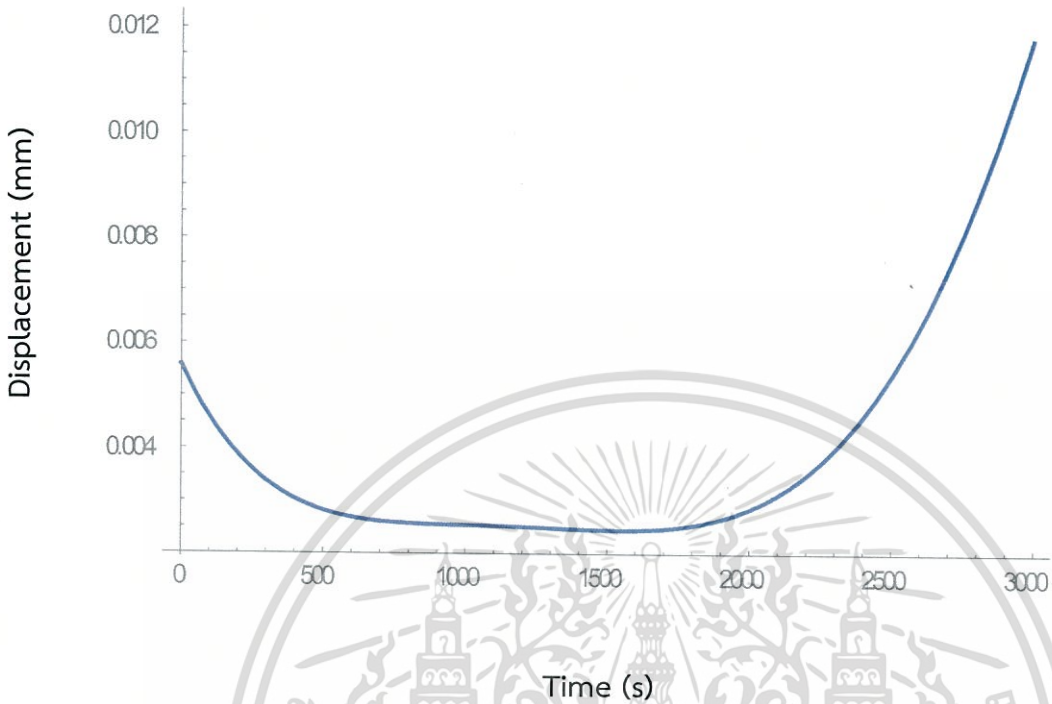
Minimum creep rate = 8.3264×10^{-8} mm/s

กราฟที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time

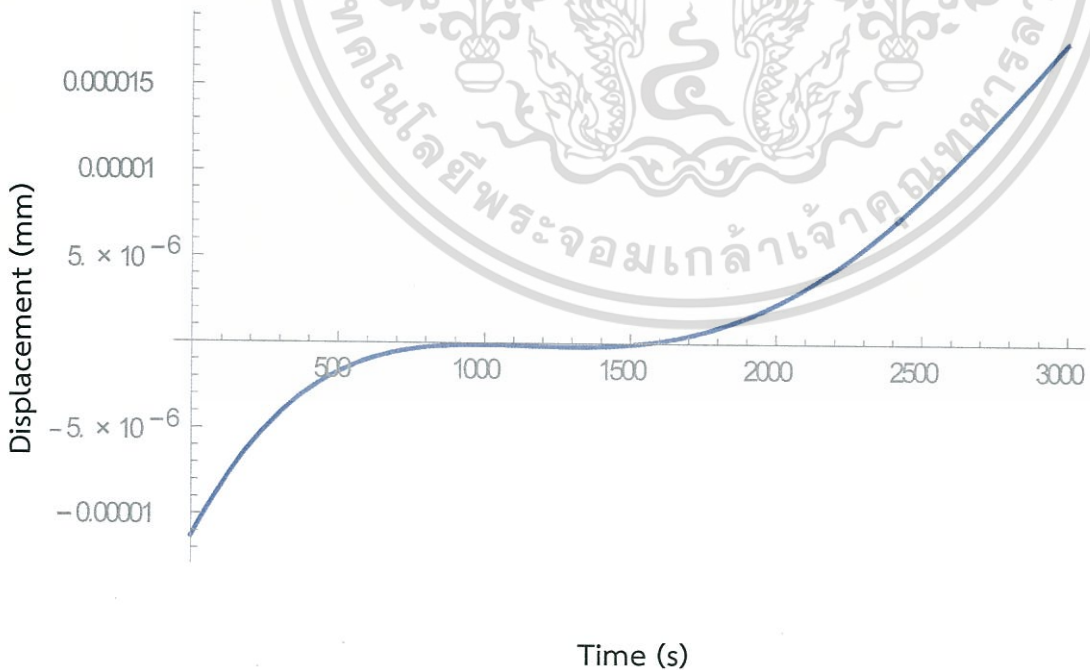


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.11 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C AS



กราฟที่ 4.12 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @575°C AS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ 5 (AS)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 29.35 mm

Stress = 250 Mpa

Temp = 550 degree Celsius

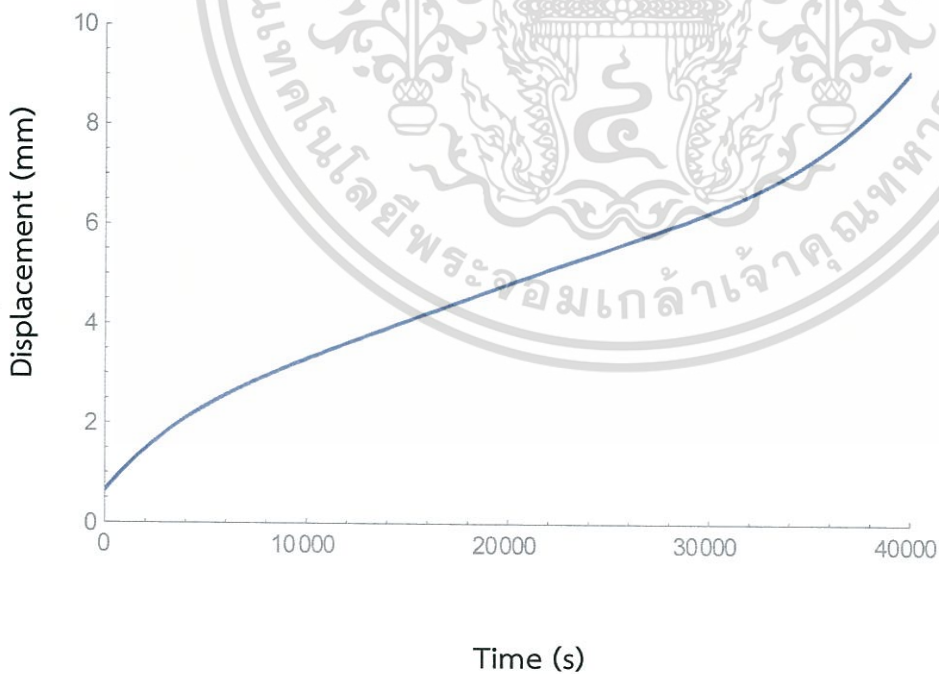
Result:

Rupture time = 10.475 hr

Displacement = 8.471 mm

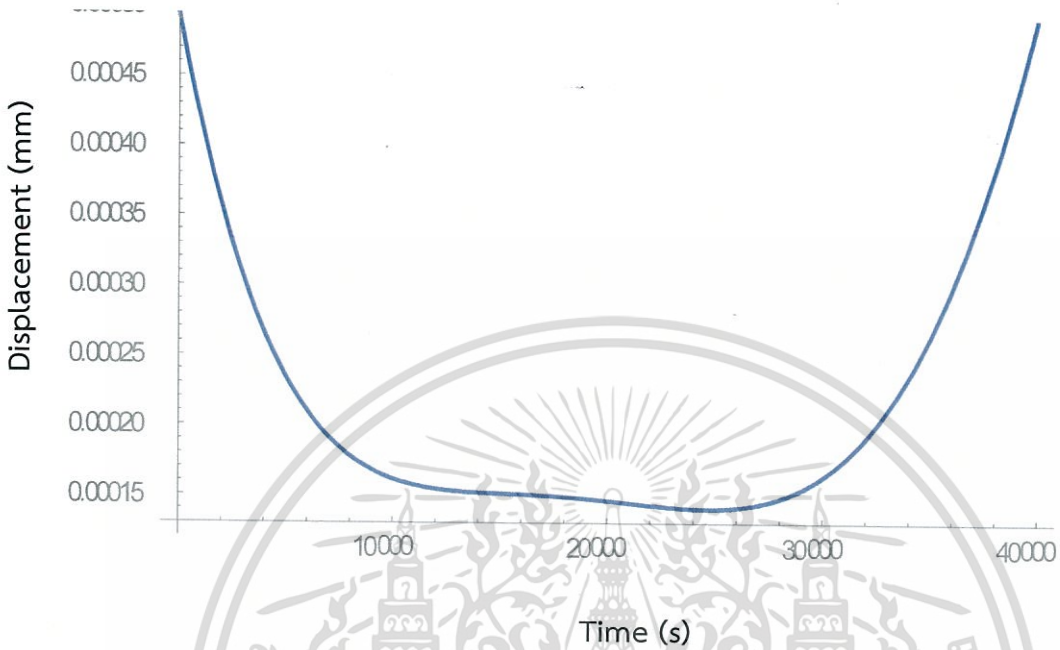
Minimum creep rate = 4.7769×10^{-6} (1/s)

กราฟที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time

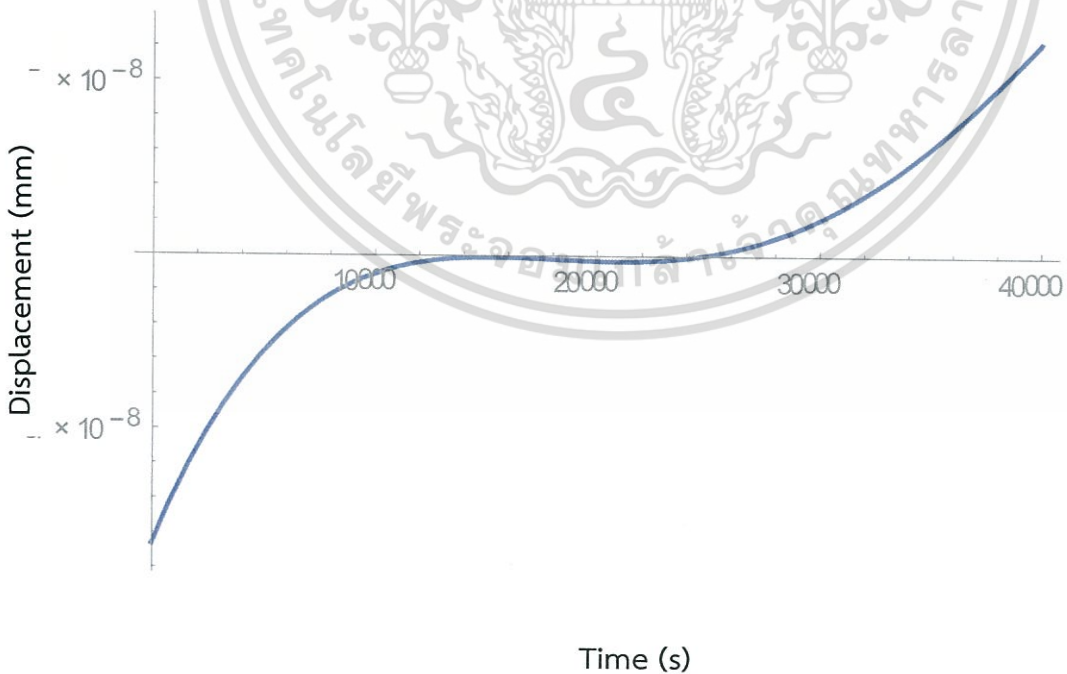


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.14 แสดงกราฟดิฟความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C AS



กราฟที่ 4.15 แสดงดิฟกำลังสองความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @550°C AS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ 6 (AS)

D= 2.85 mm

A= 6.3794 mm²

Gauge length = 29.35 mm

Stress = 250 Mpa

Temp = 525 degree Celsius

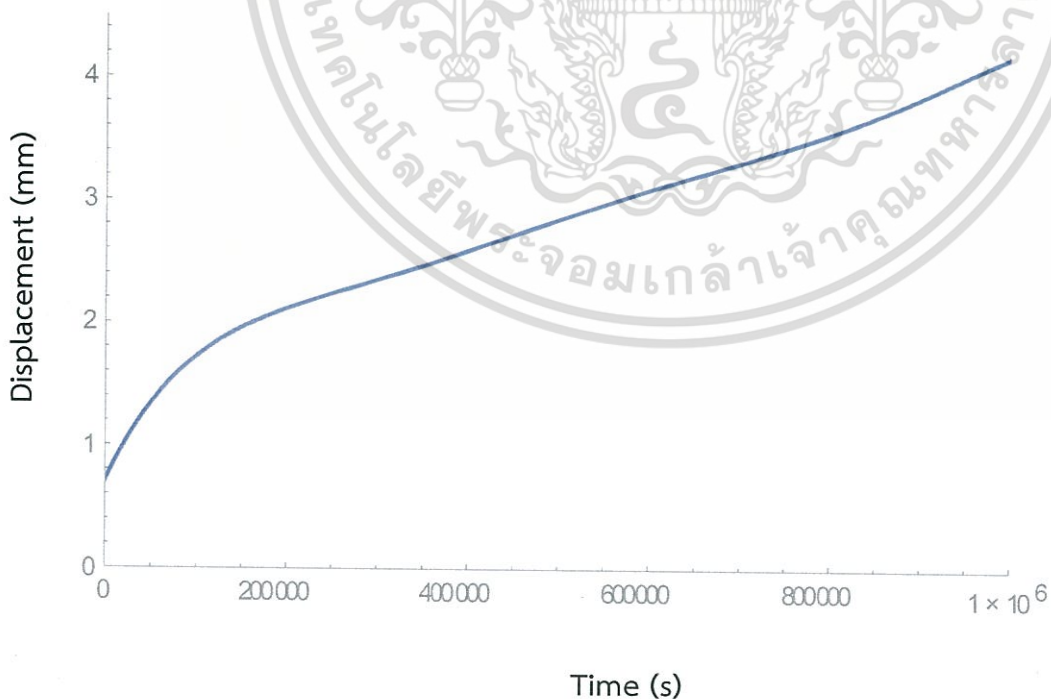
Result:

Rupture time = 237.506hr

Displacement = 4.532 mm

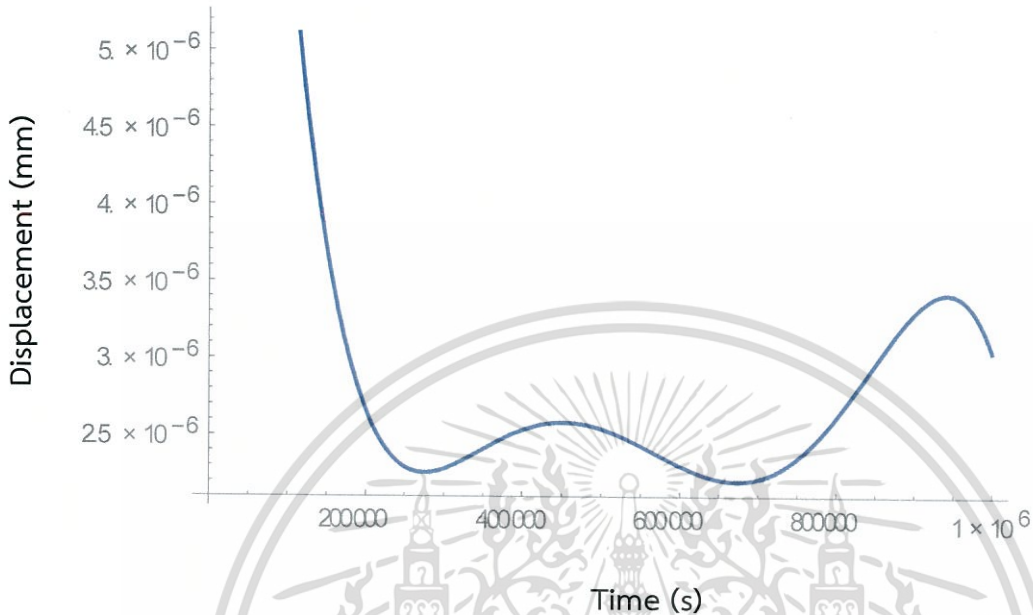
Minimum creep rate = 1.50833×10^{-8} (1/s)

กราฟที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C AS

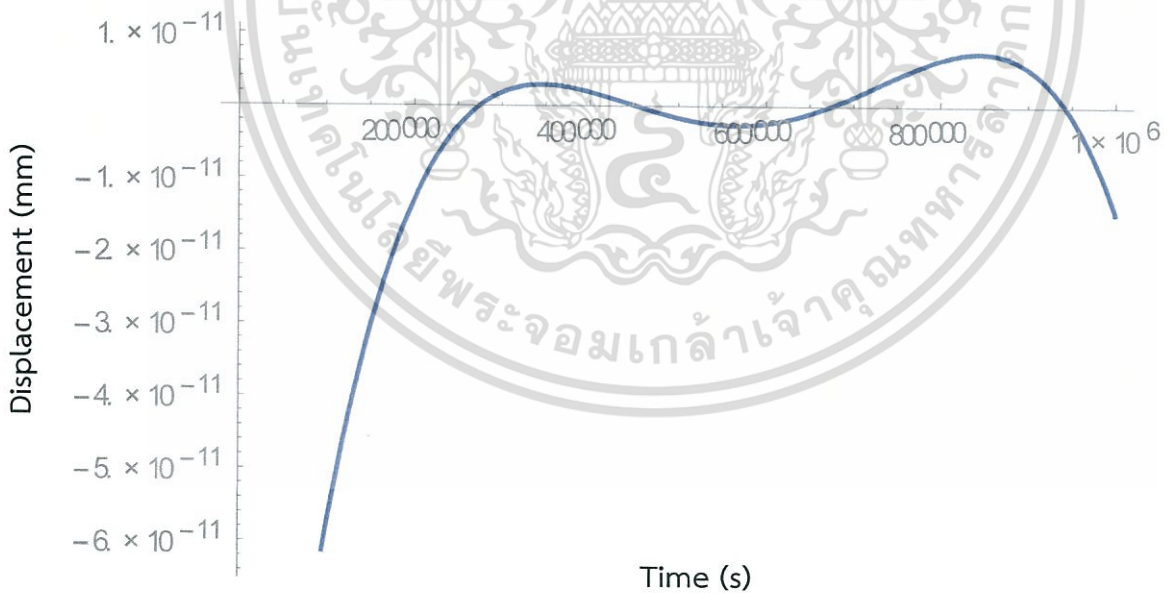


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.17 แสดงกราฟดิฟเฟอเรนเชียลความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C AS



กราฟที่ 4.18 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับ time @525°C AS



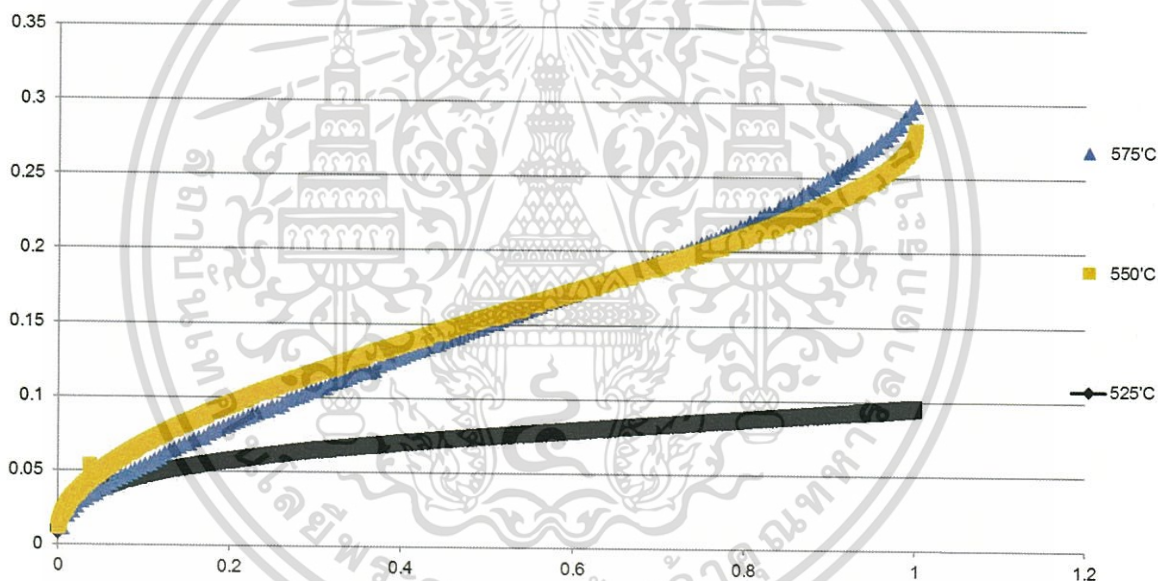
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของการคืบเนื่องจากอุณหภูมิ

4.2.1 วัสดุแบบ AS-Receive

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟและเปรียบเทียบจะได้ดังนี้จากกราฟ 4.19 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลา (time/rupture-time) และความเครียด (strain) โดยวัสดุเป็นวัสดุแบบ as-receive ในอุณหภูมิที่ 525 550 575 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดการคืบจะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าและระยะยืดก่อนที่จะขาด(rupture) จะมากกว่าเช่นกัน

กราฟที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ strain กับ t/t_r ของชิ้นงานแบบ AS-Receive

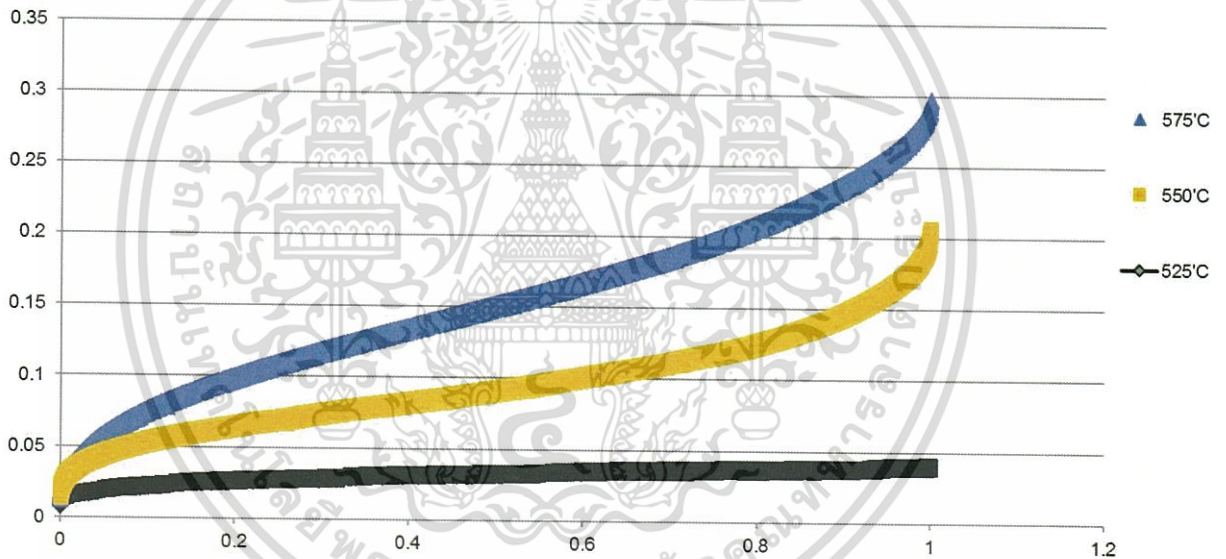


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 วัสดุแบบ Heat-Treated

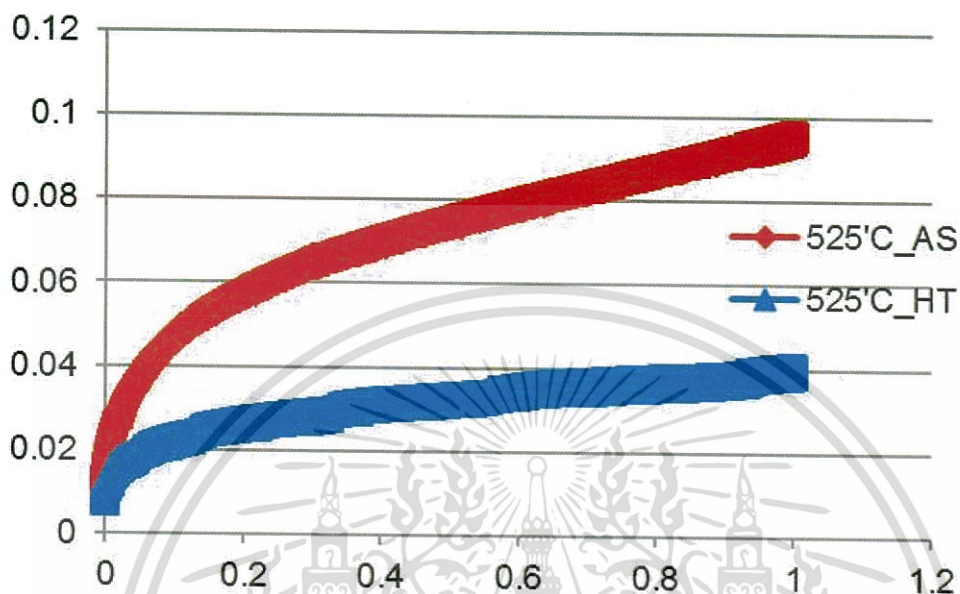
จากกราฟ 4.20 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลา (time/rupture-time) และความเครียด (strain) โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเป็นวัสดุแบบHeat treated ในอุณหภูมิที่ 525 550 575 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดการคืบจะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าและระยะยืดก่อนที่จะขาด(rupture) จะมากกว่าเช่นกัน เช่นเดียวกับวัสดุแบบ As-receive

กราฟที่4.20 แสดงความสัมพันธ์ strain กับ t/t_r ของชิ้นงานแบบ Heat treatment



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

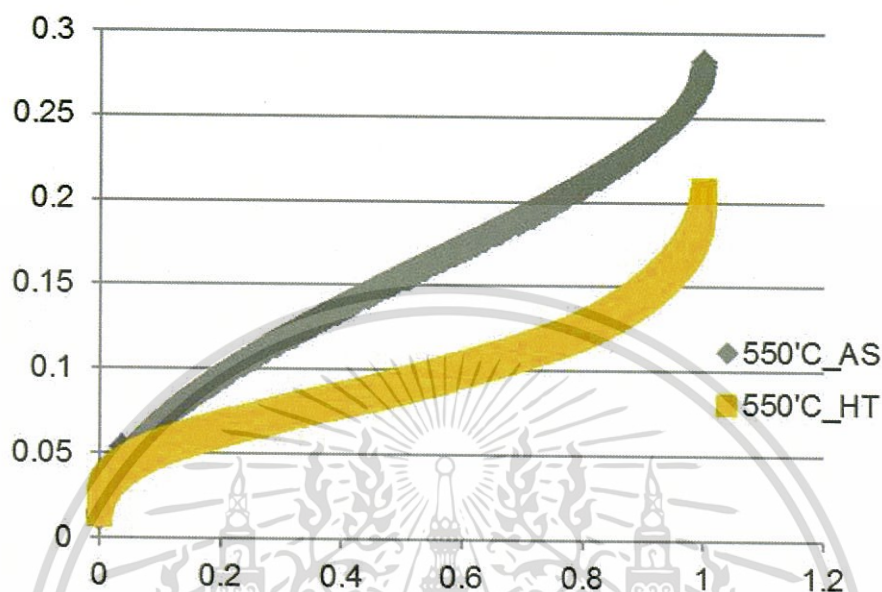
กราฟที่ 4.21 525 องศาเซลเซียส 250 MPa



จากกราฟ 4.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลา (time/rupture-time) และความเครียด (strain) โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุแบบ As receive และ แบบ Heat treated โดยจะเห็นได้ว่าวัสดุแบบ as receive มีอัตราการเกิดการคืบที่รุนแรงกว่าแบบ Heat treated ที่สภาวะ 525 องศาเซลเซียส 250 MPa โดย ค่า minimum creep rate ของ Heat treated และ As receive เท่ากับ 1.50833×10^{-8} และ 3.74355×10^{-7} (1/s) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

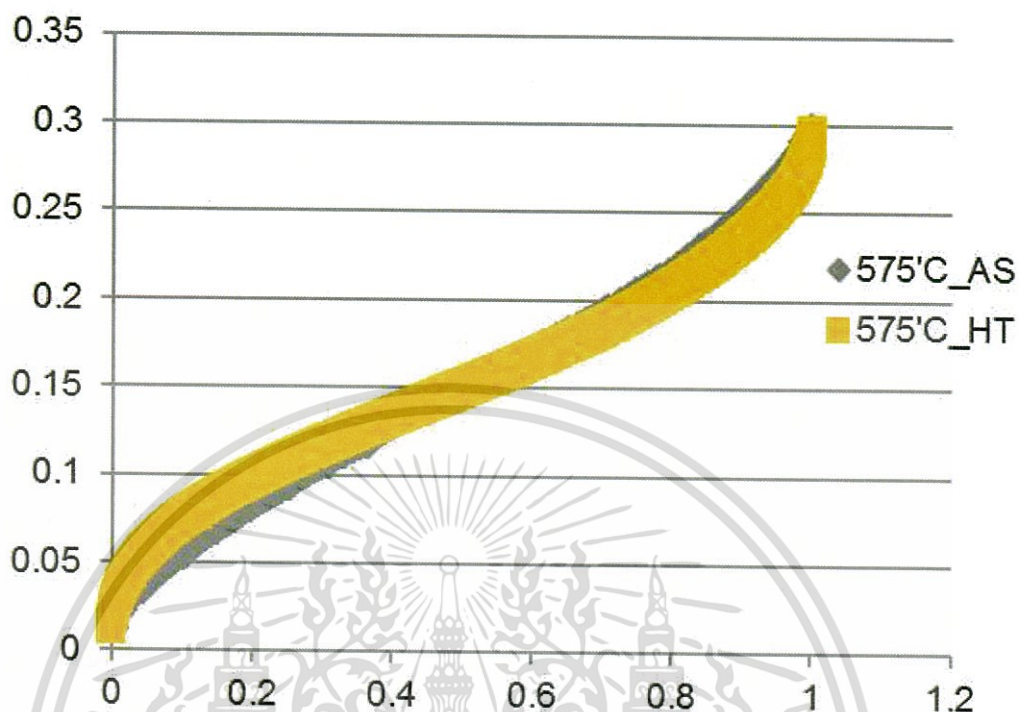
กราฟที่ 4.22 550 องศาเซลเซียส 250 MPa



จากกราฟ 4.22 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลา (time/rupture-time) และความเครียด (strain) โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุแบบ As receive และ แบบ Heat treated โดยจะเห็นได้ว่าวัสดุแบบ as receive มีอัตราการเกิดการคืบที่รุนแรงกว่าแบบ Heat treated ที่สภาวะ 550 องศาเซลเซียส 250 MPa โดยค่า minimum creep rate ของ Heat treated และ As receive เท่ากับ 3.16614×10^{-6} และ 8.32640×10^{-5} (1/s) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.23 575 องศาเซลเซียส 250 MPa

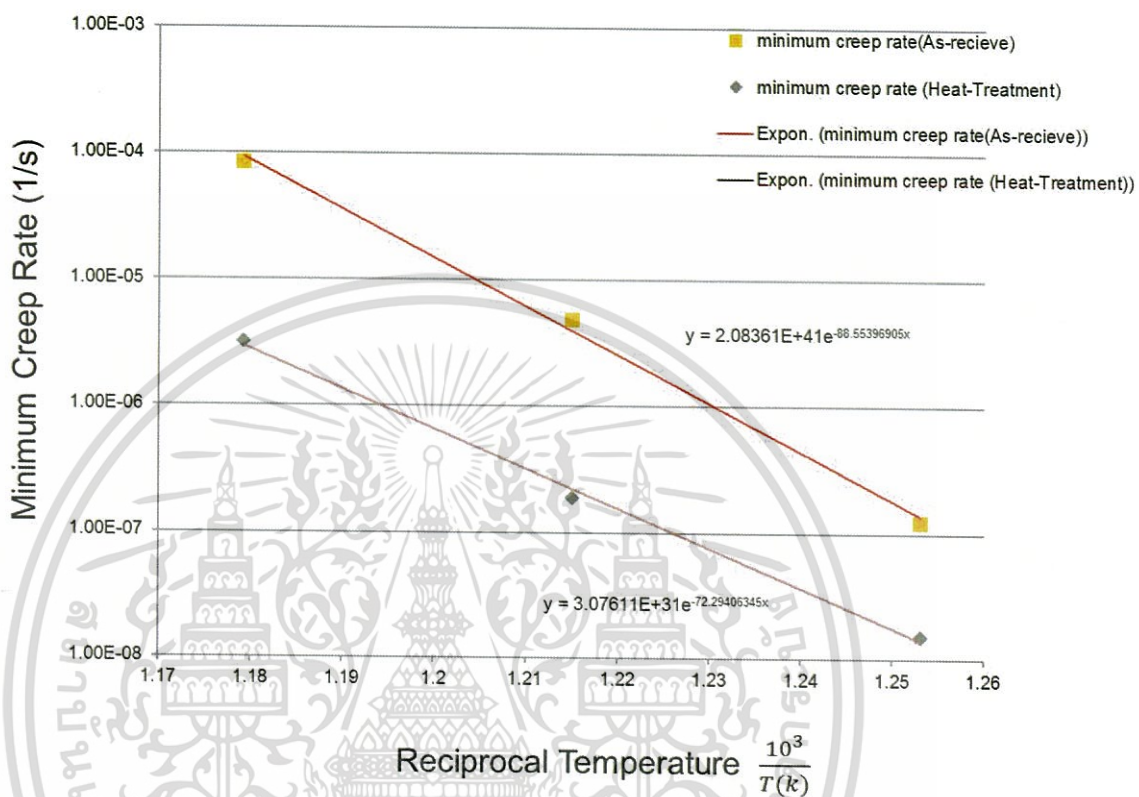


จากกราฟ 4.23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลา (time/rupture-time) และความเครียด (strain) โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุแบบ As receive และ แบบ Heat treated โดยจะเห็นได้ว่าวัสดุแบบ as receive มีอัตราการเกิดการคืบที่รุนแรงกว่าแบบ Heat treated ที่สภาวะ 575 องศาเซลเซียส 250 MPa โดย ค่า minimum creep rate ของ Heat treated และ As receive เท่ากับ 3.16614×10^{-6} และ 8.32640×10^{-5} (1/s) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 Activation Energy

กราฟที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ minimum creep rate กับ reciprocal temperature



เมื่อนำค่า Minimum Creep Rate (1/s) ใน Log-scale มาพล็อตเทียบกับค่า Reciprocal Temperature $\frac{10^3}{T(k)}$ ซึ่งจะได้เส้นตรงออกมา และเมื่อนำความชันมาหาค่า Activation Energy ซึ่งมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า activation energy ของชิ้นงานแต่ละชนิด

Type	Activation energy (Q) (KJ/mol)
As-receive	797.48
Heat-treated	604.96

4.4 สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวัสดุเมื่อได้ผ่านการ Heat treatment มีแนวโน้มที่จะต้านทานต่อการเกิดการคืบมากกว่าแบบ As receive และมีระยะเวลาก่อนจะแตกหักที่นานกว่า ดังที่แสดงไว้ในตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่า minimum creep rate (1/s) และ rupture time ระหว่างวัสดุที่ผ่านและ ไม่ได้ผ่านการ Heat-treatment

	Minimum creep rate (1/s)		Rupture time(hr)	
	Heat treated	As-receive	Heat treated	As-receive
525	1.50833×10^{-8}	3.74355×10^{-7}	595.5708	237.506
550	1.84732×10^{-7}	4.77689×10^{-6}	115.2708	10.475
575	3.16614×10^{-6}	8.32640×10^{-5}	14.48194	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] P.MARSHALL (1984). Austenitic Stainless Steels, ISBN0-85334-277-6, ELSEVIER APPIED SCIENCE PUBLISHERS LTD 1984
- [2] Microstructural changes due to regenerative heat treatment of ASTM A514 T1 superheat tube in boiler application.
- [3] Examination of deformation mechanism maps 2.25Cr-1Mo steel by creep tests, K. Maruyama, K. Sawada, J. Koike
- [4] Materials Science and Engineering, Willian D. Callister, Jr, Wiley

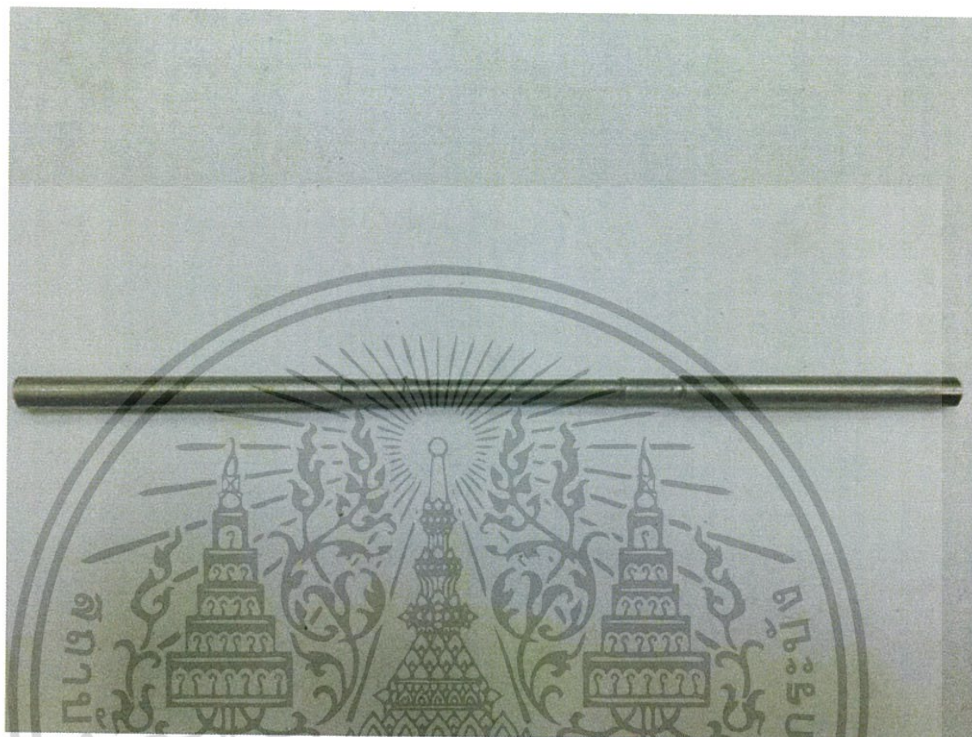




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน



รูปภาพ ก1 แสดงชิ้นงานหลังได้รับจากโรงกลึง



รูปภาพ ก2 แสดงชิ้นงานหลังการตัดแปดเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพ ก3 แสดงดอกต๊าป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

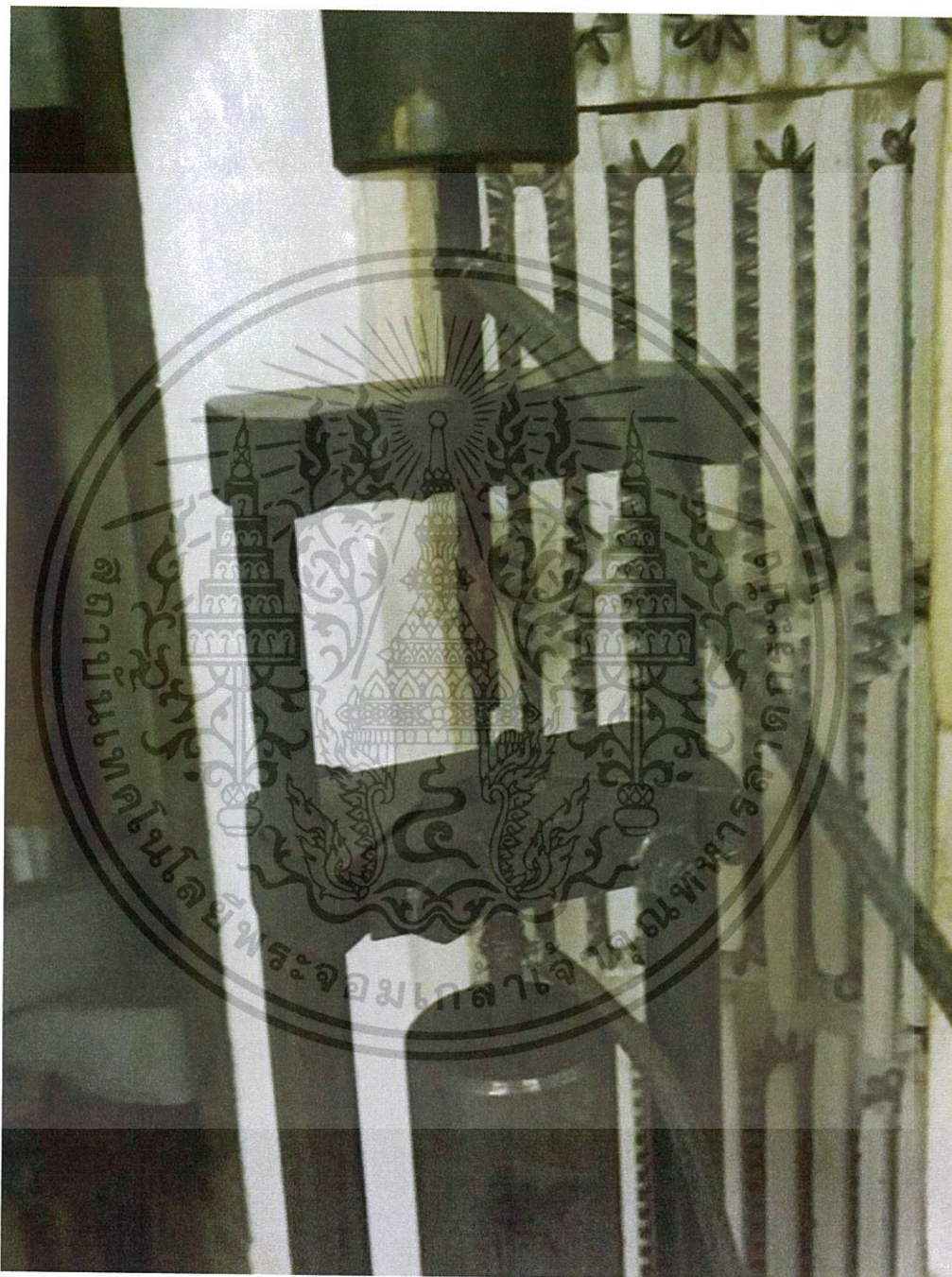


รูปภาพ ก4 แสดงชิ้นงานระหว่างการตัดเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

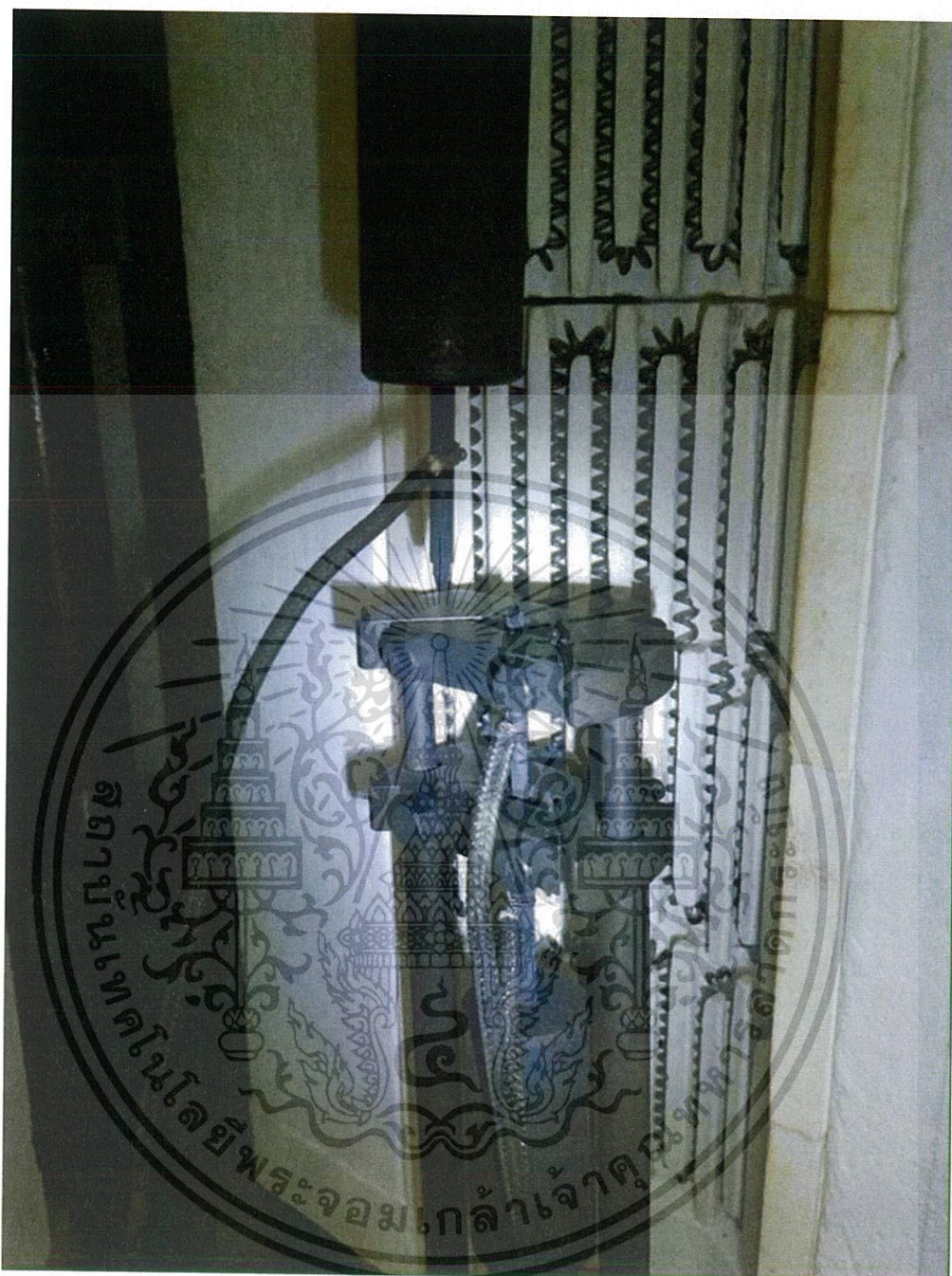
ภาคผนวก ข.

การขาดของชิ้นงาน



รูปภาพ ข1 แสดงชิ้นงานที่ขาดในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพ ข2 แสดงชิ้นงานที่ขาดนอกช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้