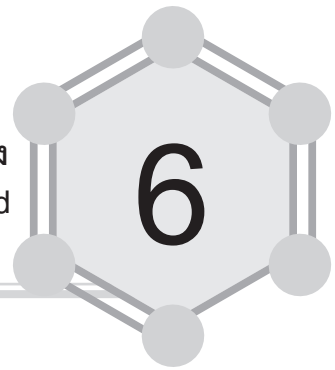


การวิเคราะห์ความเสียหายในเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่เสียรูป
ที่อัตราความเครียดที่แตกต่างโดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง
Analysis of damage in steel bar for reinforced concrete deformed
at varied strain rates by continuum damage mechanism



วีระชัย ลามอ^{1*}
Werachai Lamo^{1*}

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบการพัฒนาค่าความเสียหายของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่องจากตัวแปรความเสียหาย $D_s = 1 - \bar{E}/E$ และ $D_e = 1 - \sqrt{\bar{E}/E}$ ตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่าง 0.001 s^{-1} , 0.005 s^{-1} , 0.01 s^{-1} , 0.02 s^{-1} จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรก อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และต่อมากการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลังอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำกว่า เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น

Abstract

This research study aimed to examine damage evolution in steel bar for reinforced concrete by continuum damage mechanism from $D_s = 1 - \bar{E}/E$ and $D_e = 1 - \sqrt{\bar{E}/E}$ throughout deforming process at varied strain rates from 0.001 s^{-1} , 0.005 s^{-1} , 0.01 s^{-1} to 0.02 s^{-1} . From the research study, the increase of the strain rates in the beginning (0.001 s^{-1} to 0.01 s^{-1}) had a significant effect on the development of the damage, approximately 0.33 and 0.18. In other words, the damage rate greatly increased in the initial stage when the strain rate increased. In the later stage, the rising of the strain rates from 0.01 s^{-1} to 0.02 s^{-1} had a slighter effect on the development of the damage, approximately 0.17 and 0.11. In other words, the damage rate increased lower when the strain rate rose additionally.

คำสำคัญ : การเปลี่ยนแปลงความเสียหาย มอดุลัสยืดหยุ่น อัตราความเครียด

Keywords : Damage evolution, Elastic modulus, Strain rate

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม

*Corresponding author e-mail address: werachai@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

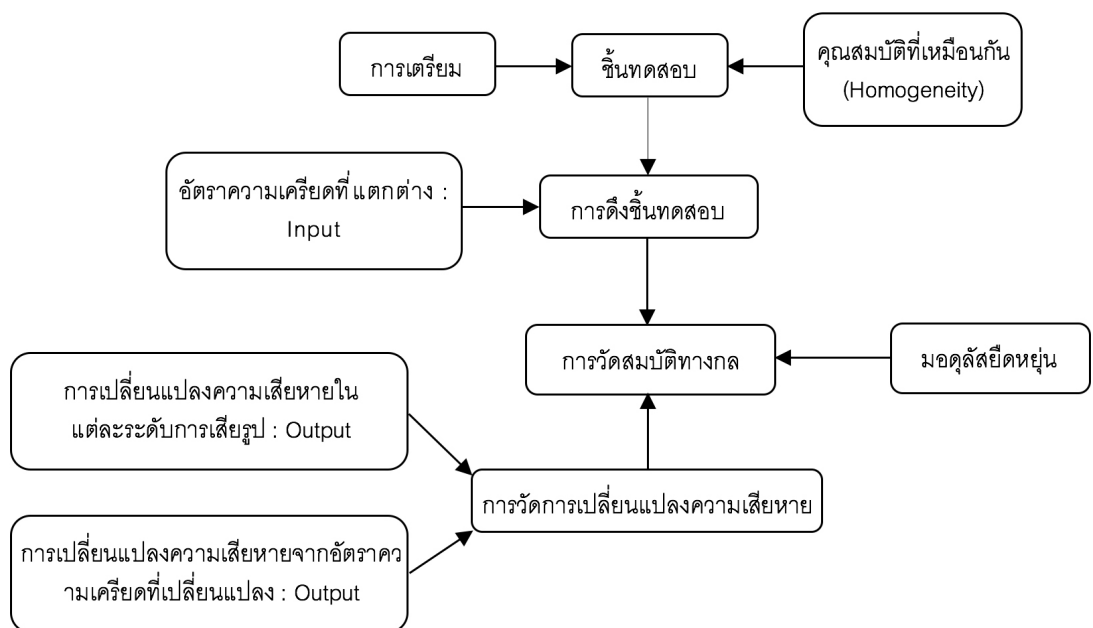
ในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม วัสดุอะลูมิเนียมถูกใช้งานภายใต้แรงกระทำรูปแบบต่าง ๆ ที่ซึ่งนำสู่การเสื่อมสภาพ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดความเสียหาย จากการศึกษาวิจัยพบว่าในการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของโลหะผสมอะลูมิเนียม 5083 ที่เสียรูปจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด 0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} , และ 0.1 s^{-1} โดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) เห็นได้ว่ากลไกความเสียหายต่อเนื่องสามารถแสดงให้เห็นการลดลงของความสามารถในการรับแรงและการเกิดขึ้นของจุดบกพร่องซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราความเครียด [1] ความเค้นก่อนให้เกิดจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และทำให้จุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าที่มีอยู่ขยายใหญ่ ปริมาณความเค้นที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อคุณลักษณะโลหะในรูปของการเกิดขึ้น การขยายใหญ่ และการรวมตัวของจุดบกพร่อง ในระดับที่แตกต่างกัน ความเข้าใจการพัฒนาความเสียหายจากอิทธิพลของอัตราความเครียดเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อที่สามารถใช้งานวัสดุได้อย่างเหมาะสมและดีขึ้น [2]

นอกจากนั้นจากการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของเหล็กที่มีรูพรุนโดยใช้รูปแบบความเสียหายที่อยู่บนตัวแปร D ที่คำนวณจากมอดูลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่นพบว่าการพัฒนาความเสียหายเกิดขึ้นสองระดับระหว่างกระบวนการเสียรูป เนื่องจากอิทธิพลของรูพรุนที่มีต่อพฤติกรรมในการเกิดความเสียหาย [3] มีการใช้รูปแบบความเสียหาย GTN และรูปแบบความเสียหายต่อเนื่อง อธิบายพฤติกรรมความเสียหายของแท่งเหล็กจากการทดสอบแรงดึง ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่ารูปแบบความเสียหายทั้งสองสามารถแสดงให้เห็นการพัฒนาความเสียหาย อย่างไรก็ตาม

รูปแบบความเสียหายทั้งสองมีความไวในการแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่แตกต่าง ๆ กัน ดังนั้น การเลือกใช้รูปแบบความเสียหายที่เหมาะสมจะสามารถให้ข้อมูลการพัฒนาความเสียหายที่แม่นยำได้ [4]

จากหลักการกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) ที่สมมุติการเปลี่ยนแปลงความเสียหายบนการขยายใหญ่ของจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งขึ้นอยู่กับผลการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอะตอมที่เกิดจากกระบวนการเสียรูปที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ และผลลัพธ์ดังกล่าวส่งผลต่อการตอบสนองของโลหะ [5] รูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Damage Variable (D)) มีความสามารถในการวัดการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย [6] การใช้รูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องร่วมกับ การวัดความเสียหาย สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความเสียหายและการเสื่อมสภาพได้อย่างต่อเนื่อง กล่าวได้ว่าแนวคิดกลไกความเสียหายควบคู่กับรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่อง จะสามารถทำให้บรรลุผลความต้องการของการควบคุมการแตกหักและความเสียหายที่คาดไม่ถึงได้

เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในงานก่อสร้าง ถูกออกแบบการทำงานภายใต้ความเค้นต่าง ๆ ที่ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือคุณสมบัติอื่น ๆ การเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลจากการสูญเสียความสามารถในการรับแรงเกี่ยวข้องกับความเสียหาย เชื่อมโยงกับกระบวนการกำเนิดการขยายใหญ่ และการรวมตัวของจุดบกพร่อง และความเสียหายอื่น ๆ เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตอาจเกิดความเสียหายขึ้นภายในเมื่อถูกให้ภาระ เริ่มต้นในระดับจุลภาค ก่อนพัฒนาเป็นสาเหตุความเสียหายในระดับมหภาค เป็นที่น่าสนใจเมื่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตอยู่



รูปที่ 1 กระบวนการทดลองสำหรับการวัดผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย

ภายใต้การให้ภาระอัตราที่แตกต่าง อาจประสบการณ์เปลี่ยนแปลงความเสียหายที่แตกต่าง ดังนั้น การทราบการเปลี่ยนแปลงความเสียหายโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่องตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่างเป็นสิ่งสำคัญเพื่อการออกแบบการทำงานที่เหมาะสม ทำให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย และสามารถควบคุมการแตกหักและความเสียหายที่คาดไม่ถึงได้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การวัดทางกลทดลองต่อไปนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเสียหายของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) ตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่าง

2.1 ขึ้นทดสอบ เตรียมขึ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 มม. ความยาวพิทัก 70 มม. และความยาว 150 มม. มีส่วนประกอบทางเคมีตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คาร์บอน (C) สูงสุด 0.28% กำมะถัน (S) สูงสุด 0.060% และฟอสฟอรัส (P) สูงสุด 0.060% นอกจากนี้ ขึ้นทดสอบทั้งหมดถูกเตรียมเหมือน ๆ กันจากเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

2.2 การวัดสมบัติทางกล (มอดุลัสยืดหยุ่น) ดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine : SHIMADZU รุ่น UH-F500KNI ที่อุณหภูมิห้อง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ได้รับการยอมรับ ISO 6892-1 : 2009 ทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อความมั่นใจในการทำซ้ำ

2.3 ในการทดสอบแรงดึง ทำการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง 0.001 s^{-1} , 0.005 s^{-1} , 0.01 s^{-1} , และ 0.02 s^{-1} โดยแต่ละอัตราความเครียดทำการทดสอบที่ระดับการเสียรูปต่าง ๆ ได้แก่ 5, 15, 25 และ 35 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้เส้นแนวโน้มที่เหมาะสมของการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้น

2.4 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเสียหายภายใต้การเสียรูปจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียดที่แตกต่างที่แต่ละระดับการเสียรูป ทำโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) มีกระบวนการดำเนินงานดังนี้ เตรียมขึ้นทดสอบโดยตัดขึ้นทดสอบบริเวณตรงกลางของขึ้นทดสอบที่ถูกดึงในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงภายในบริเวณที่ความเสียหายเกิดขึ้นหรือคาดว่าจะเกิด นำขึ้นทดสอบขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P120, P240, P600 และ P1200 และทำให้ผิวเรียบด้วยการขัดละเอียดด้วยผ้าขัดขนาด $3 \mu\text{m}$ และ $1 \mu\text{m}$ ทำการกัดด้วยสารละลายเอทานอล-กรดไนตริก 2% ประมาณ 2-30 วินาที และล้างน้ำและแอลกอฮอล์ทันที ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถ่ายภาพความเสียหายของโครงสร้างของขึ้นทดสอบ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ในการทดสอบแรงดึง มาตรฐานทดสอบส่วนมากจะบ่งชี้อัตราความเครียดทดสอบที่ควรปฏิบัติ เมื่อทดสอบที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง (ช้าหรือเร็ว) คุณสมบัติความแข็งแรงที่วัสดุแสดงอาจขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด กล่าวอีกอย่างหนึ่ง อัตราความเครียดอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย ความเสียหายอธิบายได้จากผลลัพธ์ของโครงสร้างจะต่อมที่เสื่อมสภาพบนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของขึ้นส่วนที่เสียหาย บนแนวคิดนี้ ตัวแปรความเสียหายเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความเสียหายแสดงได้ดังนี้ $D_e = 1 - \tilde{E}/E$ [7-8] นอกจากนี้ บนแนวคิดความเท่ากันของพลังงานยืดหยุ่น (Elastic energy equivalence) [9] ที่สมมุติว่าพลังงานยืดหยุ่นวัสดุที่เสียหายเท่ากันในรูปของพลังงานยืดหยุ่นวัสดุที่ไม่เสียหาย สามารถแสดงสมการตัวแปรความเสียหายได้ดังนี้ $D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$ โดยที่ E คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของโลหะที่ไม่เสียหาย และ $\tilde{E}$ คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของโลหะที่เสียหาย

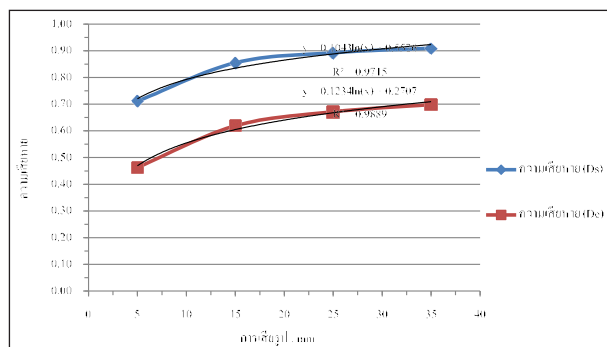
3.1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 1 และรูปที่ 2, 3, 4 และ 5) มอดุลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มอดุลัสยืดหยุ่นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างระหว่างการเพิ่ม

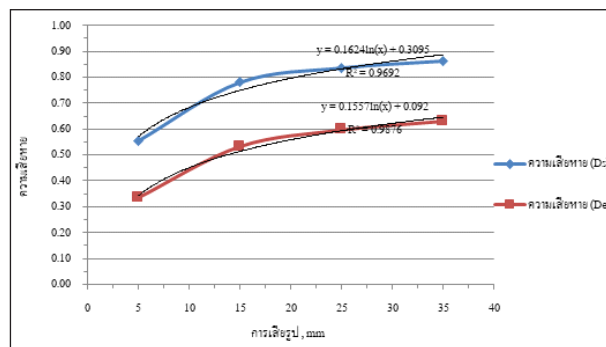
ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียดต่าง ๆ

การเสียรูป, mm	มอดุลัสยืดหยุ่น, MPa				ความเสียหาย ($D_e = 1 - \tilde{E}/E$)				ความเสียหาย ($D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$)			
	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}
0	19,872	17,488	13,397	9,934	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5,739	5,938	5,950	6,176	0.71	0.66	0.56	0.38	0.46	0.42	0.33	0.21
15	2,886	2,908	2,925	2,955	0.85	0.83	0.78	0.70	0.62	0.59	0.53	0.45
25	2,145	2,162	2,175	2,193	0.89	0.88	0.84	0.78	0.67	0.65	0.60	0.53
35	1,805	1,801	1,819	1,803	0.91	0.90	0.86	0.82	0.70	0.68	0.63	0.57

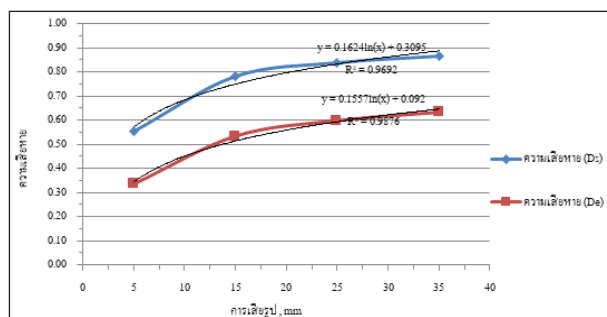
ชั้นของการเสียรูป กล่าวอีกนัยหนึ่ง ความเสียหายมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่แตกต่างระหว่างการเสียรูป อัตราความเสียหายเกิดขึ้นอย่างมากในตอนแรกและลดน้อยลงเมื่อการเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้นใกล้จุดแตกหัก ผลจากการทดลองดังกล่าวอธิบายได้จากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง



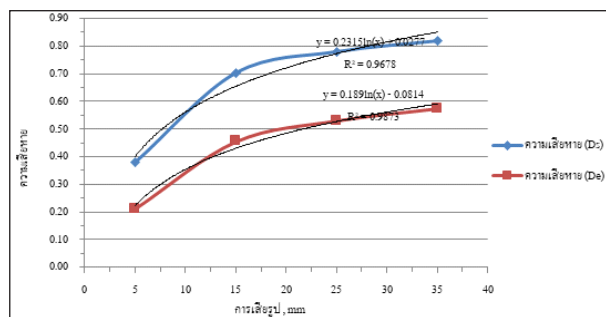
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.001 s^{-1}



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.005 s^{-1}



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.01 s^{-1}



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.02 s^{-1}

การเสียหายของโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากการกำเนิด การขยายใหญ่ และการรวมตัว ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปแบบถาวร การเสียหายของโครงสร้างจุลภาคกระทบต่อการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่น โลหะที่ซึ่งโครงสร้างจุลภาคได้รับความเสียหาย มีคามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าโลหะที่ซึ่งโครงสร้างจุลภาคไม่ได้รับความเสียหาย การเพิ่มขึ้นของการเสียหายนำไปสู่การลดลงในมอดุลัสยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้น การเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค ระหว่างการเสียรูปที่เพิ่มขึ้นความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาคพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมอดุลัสยืดหยุ่นลดลงเป็นสัดส่วนกับการพัฒนาความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค มอดุลัสยืดหยุ่นแสดงการลดลงในปริมาณสูงในตอนแรกของการเสียรูปที่ปริมาณเล็กน้อย และมอดุลัสยืดหยุ่นแสดงการลดลงในปริมาณต่ำในตอนหลังของการเสียรูปที่ปริมาณสูง

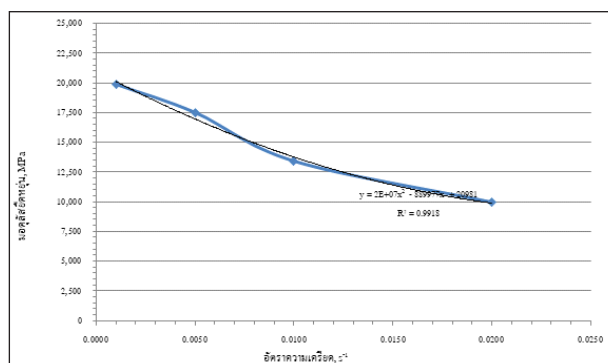
นอกจากนั้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายในลักษณะของจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พัฒนาการอย่างชัดเจนและแตกต่างระหว่างการเสียรูปแบบถาวร พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายมีผลอย่างมากต่อการตอบสนองของโลหะ [10] ในการเสียรูปแบบถาวรเริ่มต้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายพัฒนาอย่างชัดเจนในการเกิดขึ้นและการขยายใหญ่ของรอยแตกและช่องว่าง ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของโครงสร้างจุลภาค สามารถเชื่อมโยงได้กับการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลในตอนแรกของการเสียรูป การเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่สัมพันธ์กับการพัฒนาความเสียหายในการเสียรูปแบบถาวรที่ปริมาณสูง พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายพัฒนาอย่างชัดเจนในการขยายใหญ่และการรวมตัวและการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงในโครงสร้างจุลภาค [11] การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของจุดบกพร่องร่วมกับปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกันของจุดบกพร่อง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความเป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติทางกายภาพตามแกนที่เหมือนกันในตอนแรกสู่ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติทางกายภาพตามแกนที่ต่างกัน [12] สามารถเชื่อมโยงได้กับการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลในตอนหลังของการเสียรูปจนถึงจุดแตกหัก

3.2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายจากอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลง

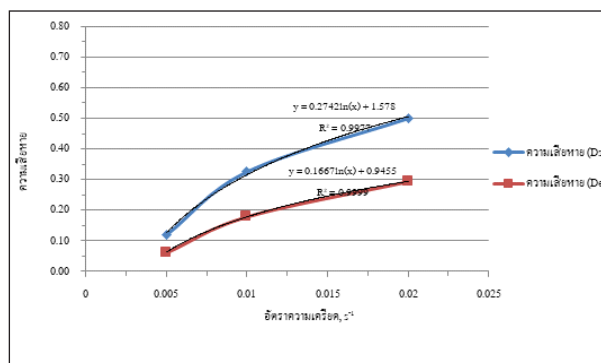
มอดูลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นจาก 0.001 s^{-1} , 0.005 s^{-1} , 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 6 มอดูลัสยืดหยุ่นที่มีค่าสูงกว่าแสดงถึงความแข็งแรงที่สูงกว่าของโลหะ การพัฒนาความเสียหายสามารถเฝ้าดูได้จากการเปลี่ยนแปลงมอดูลัสยืดหยุ่น การลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่นที่สังเกตได้ที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความเสียหายที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 2 และรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น หากพิจารณาในรายละเอียด การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรก อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลัง อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

อัตราความเครียด, s^{-1}	มอดูลัสยืดหยุ่น, MPa	ความเสียหาย ($D_s = 1 - \bar{E}/E$)	ความเสียหาย ($D_e = 1 - \sqrt{\bar{E}/E}$)
0.001	19,872	0.00	0.00
0.005	17,488	0.12	0.06
0.01	13,397	0.33	0.18
0.02	9,934	0.50	0.29



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงมอดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

กลไกความเสียหายของโลหะสามารถเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด ความเสียหายที่เพิ่มขึ้นจากอัตราความเครียดที่เพิ่มสูงสามารถเชื่อมโยงได้กับกลไกความเสียหายที่เปลี่ยนแปลงอย่างแตกต่าง ในตอนแรก ความเสียหายของโลหะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของจุดบกพร่อง ต่อมาการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวร ความแข็งแรงของโลหะจะค่อย ๆ ลดลง [5] นอกจากนั้น การแตกร้าวยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรง การยึดเกาะของโมเลกุล และแรงยึดตัวของรอยแตกของโลหะ การแตกร้าวยจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤติ [13-14]

ดังนั้น สามารถสันนิษฐานการเพิ่มขึ้นของความเสียหายเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นได้ว่า ที่อัตราความเครียดสูง การแตกร้าวยและการแยกตัวของระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาค และการแตกของอนุภาค ทำให้เกิดช่องว่างและ รอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่างและรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าเกิดขึ้นสูง สอดคล้องการลดลงของ มอดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลงมากขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง ที่อัตราความเครียดสูง เกรนจะถูกทำลายมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวของขอบเกรนผ่านอุปสรรคที่น้อยลง สอดคล้องกับการลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ยิ่งกว่านั้น การกำเนิดจุดบกพร่องถูกเร่งให้เกิดระหว่างการเสียรูปโดยการปรากฏขึ้นของโครงสร้างย่อยการเคลื่อนที่ (Dislocation) และการเติบโตของอนุภาคมีขนาดใหญ่มากขึ้นกว่าในสภาพอยู่นิ่ง เนื่องจาก

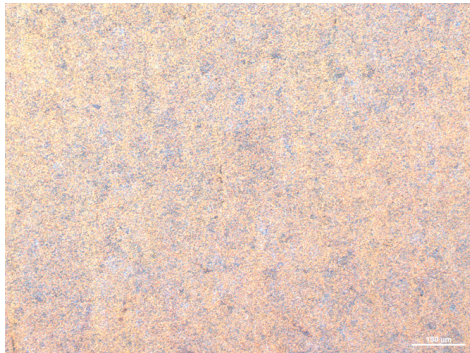
สัมประสิทธิ์การกระจายที่เพิ่มโดยกลไกการกระจายของแกนกลาง ในการปรากฏขึ้นของความพัวพันการเคลื่อนที่ (Dislocation) อย่างไร ก็ตาม การเสียรูปที่เกิดอาจลดจำนวนนิวเคลียสและอนุภาคยึดเกาะ เนื่องจากการตัดผ่านจากการเคลื่อนที่มีจำนวนมากและการละลายของนิวเคลียสขนาดวิกฤตย่อยอนุภาคใหญ่ที่กำเนิดในขั้นตอนทดสอบอาจขยายใหญ่เร็วขึ้นเนื่องจากผลของการอิมพัลส์ที่มากเกินไปของเมทริกซ์ (Metrix) กลไกดังกล่าวข้างต้นของการขยายใหญ่ของอนุภาคที่ถูกชักนำจากความเครียดอาจทำงานเป็นพิเศษระหว่างการเสียรูปแบบไม่สม่ำเสมอ ระหว่างปริมาณวัสดุที่ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่ทำงานและพื้นที่ที่ไม่ทำงาน สลับสับเปลี่ยนกันระหว่างการเสียรูป [15] การเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่อัตราความเครียดสูงยังอาจได้รับอิทธิพลจากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นที่เกิดขึ้น

ยิ่งกว่านั้น คำอธิบายการลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นอาจอ้างถึงแนวคิดกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ที่อัตราความเครียดต่ำ อะตอมที่ละลายจะมีปฏิสัมพันธ์กับอุปสรรคที่ขวาง ยับยั้งการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อย (Dislocation) ส่งผลให้ความเค้นไหลสูงขึ้น แต่ที่อัตราความเครียดสูงขึ้น ผลการบรรเทาของตัวละลายต่อการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยจะลดลง ส่งผลให้ความเค้นไหลลดลง เมื่ออัตราความเครียดสูงมากพอ ปฏิสัมพันธ์กันและกันของอะตอมที่ละลายกระจายอย่างรวดเร็ว

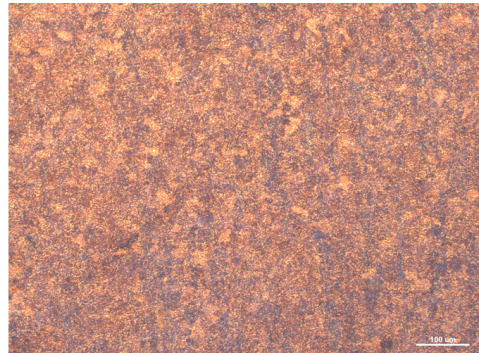
เนื่องด้วยการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยไม่ปรากฏ เนื่องจากเวลาของเสียรูปที่น้อยมากสำหรับการกระจายที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นที่อัตราความเครียดต่ำ การรวมตัวของความเค้นเฉพาะที่ถูกยับยั้งโดยการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อย แต่เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยที่มากขึ้นถูกจำกัดการเคลื่อนที่และความเค้นเฉพาะที่อาจเกิดขึ้นก่อนการกำเนิดจุดบกพร่อง ดังนั้นความเสียหายถูกทำให้เกิดขึ้นจากจุดที่อ่อนแอ เช่น ขอบเกรนและ/หรือ อนุภาคสองเฟส การเติบโตและการรวมตัวของช่องว่างที่เกิดขึ้นนำไปสู่ความเสียหายในที่สุด [16] กล่าวอีกนัยหนึ่ง เมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น ความเสียหายจะถูกเร่งให้ปรากฏเร็วขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จากที่กล่าวข้างต้น เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนความเสียหายเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราความเครียดสูงขึ้น

4. สรุป (Conclusion)

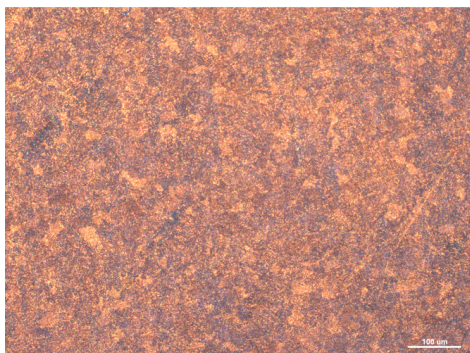
4.1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปสามารถติดตามได้จากรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงมอดูลัสยืดหยุ่น ภายใต้การเสียรูปที่เพิ่มขึ้น มอดูลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น มอดูลัสยืดหยุ่นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตรา



(ก) อัตราความเครียดที่ 0.001 s^{-1}



(ข) อัตราความเครียดที่ 0.005 s^{-1}



(ค) อัตราความเครียดที่ 0.01 s^{-1}



(ง) อัตราความเครียดที่ 0.02 s^{-1}

รูปที่ 8 โครงสร้างของโลหะที่เชื่อมสภาพภายใต้อัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่าง อัตราความเสียหายเกิดขึ้นอย่างมากในตอนแรก และอัตราความเสียหายเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อการเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้นใกล้จุดแตกหัก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเสียหายและความแตกต่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง

4.2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายจากอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเฝ้าดูได้จากรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงมอดูลัสยืดหยุ่น การลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่นที่สังเกตได้ที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความเสียหายที่เพิ่มขึ้น เห็นได้ว่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรกอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลังอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเสียหายและความแตกต่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง เนื่องจากการกำเนิด การขยายใหญ่ และการรวมตัว ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปแบบถาวร การเสียหายของโครงสร้างจุลภาคนี้นี้มีผลต่อการลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่น นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงมอดูลัสยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกลุ่มวัสดุก่อสร้าง กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] DARRAS, B. M., F. ABED, S. PERVAIZ and A. ABDUL-LATIF. Analysis of damage in 5083 aluminum alloy deformed at different strain rates. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, **568**(7), 143-149.
- [2] KRAJGINOVIC, D. and S. MASTILOVIC. Some fundamental issues of damage mechanics. *Mechanics of Materials*. 1995, **21**(3), 217-230.
- [3] STRAFFELINI, G. and A. MOLINARI. Evolution of tensile damage in porous iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **334**(1-2), 96-103.

- [4] LIAO, I., Y. SUN, J. LIU and W. ZHANG. Applicability of damage models for failure analysis of threaded bolts. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011, **8**(3), 514-524.
- [5] BONORA, N., D. GENTILE, A. PIRONDI and G. NEWAZ. Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments. *International Journal of Plasticity*. 2005, **21**(5), 981-1007.
- [6] DIAO, X. A statistical equation of damage evolution. *Engineering Fracture Mechanics*. 1995, **52**(1), 33-42.
- [7] ALVES, M., J. YU and N. JONES. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. *Computers & Structures*. 2000, **76**(6), 703-712.
- [8] BONORA, N. and G. M. NEWAZ. Low cycle fatigue life estimation for ductile metals using a nonlinear continuum damage mechanics model. *International Journal of Solids and Structures*. 1998, **35**(6), 1881-1894.
- [9] VOYIADJIS, G. Z. and P. I. KATTAN. How a singularity forms in continuum damage mechanics. *Mechanics Research Communications*. January, 2014, **55**, 86-88.
- [10] ZHOU, F., J. N. WANG and J. S. LIAN. An investigation of the plastic failure of spheroidized steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **332**(1-2), 117-122.
- [11] LIU, J. H., X. Y. HAO, G. L. LI and G. S. LIU. Microvoid evaluation of ferrite ductile iron under strain. *Materials Letters*. 2002, **56**(5), 748-755.
- [12] ORSINI, V. C. and M. A. ZIKRY. Void growth and interaction in crystalline materials. *International Journal of Plasticity*. 2001, **17**(10), 1393-1417.
- [13] THOMSON, R. D. and J. W. HANCOCK. Ductile failure by void nucleation, growth and coalescence. *International Journal of Fracture*. 1984, **26**(2), 99-112.
- [14] IBIJOLA, E. A. On some fundamental concepts of continuum damage mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002, **191**(13-14), 1505-1520.
- [15] BLAZ, L. and E. EVANGELISTA. Strain rate sensitivity of hot deformed Al and AlMgSi alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, **207**(2), 195-201.
- [16] HADIANFARD, M. J., R. SMERD, S. WINKLER and M. WORSWICK. Effects of strain rate on mechanical properties and failure mechanism of structural Al-Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, **492**(1-2), 283-292.