

การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายพื้นฐานในโลหะเหนียว

และการทดสอบสองแกนรูปแบบใหม่

A study of fundamental damage mechanic approaches in ductile metals and new biaxial test

ร้อยเอก เพรียวพันธ์ อุดุลยศักดิ์

Captain Preawpan Adulyasak

*Instructor, Department of Civil Engineering, Education Section, Chulachomklao Royal Military
Academy, Nakhonnayok, 26001*

Corresponding Author: preawpan.ad@crma.ac.th

(Received: May 13, 2020, Accepted: July 31, 2020)

บทคัดย่อ : บทความนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายและกลไกการเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิจัยในปัจจุบัน อีกทั้งศึกษาตัวอย่างการทดสอบที่เหมาะสมแก่การวิจัยพฤติกรรมความเสียหายและระบบการทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไป โลหะเหนียวเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการนำไปประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ในโครงสร้างหรืออุตสาหกรรมยานยนต์หรือยานบิน ซึ่งวัสดุนี้จะได้รับสภาวะแรงที่กระทำจากภายนอกในรูปแบบที่หลากหลาย การทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าวภายใต้สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้น มีความจำเป็นสำหรับการออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพฤติกรรมความเสียหาย การศึกษาพบว่า 1) ความเสียหายของวัตถุโลหะเหนียวจะสัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลด 2) ทฤษฎีความเสียหายที่นิยมใช้ในการวิจัยกลศาสตร์ความเสียหายมาจากความเสียหาย GLD และความเสียหาย CDM และ 3) ตัวอย่างการทดสอบสองแกนภายใต้ระบบการทดสอบสองแกนซึ่งใช้การวัดความเครียดผ่านระบบ DIC มีความเหมาะสมสำหรับการวิจัยพฤติกรรมความเสียหายในบริเวณเล็กๆ

คำสำคัญ : กลศาสตร์ความเสียหาย โลหะเหนียว ความเค้นสามแกน ค่าโหลด การทดสอบสองแกน

Abstract : This paper deals with the studies of damage behaviours and damage mechanics in ductile metals in recent research areas, including appropriate specimens and suitable experiment systems for the damage mechanics studying. The ductile metals are commonly used in structural components, automobile industries and aerospace industries. Hence, these materials experience some stress-states from external factors in various forms. Therefore, understanding of the material behaviour under the occurred stress-state is very important for designing, particularly for the damage behaviours. This study presents following conclusions: 1) the ductile damage depends mainly on a stress triaxiality and a Lode-parameter 2) the frequently used damage approaches for research in the ductile damage are GLD damage model and CDM damage model and 3) the biaxial specimens under the biaxial test system with the DIC-strain-measurement is suitable for studying in a very small damage region.

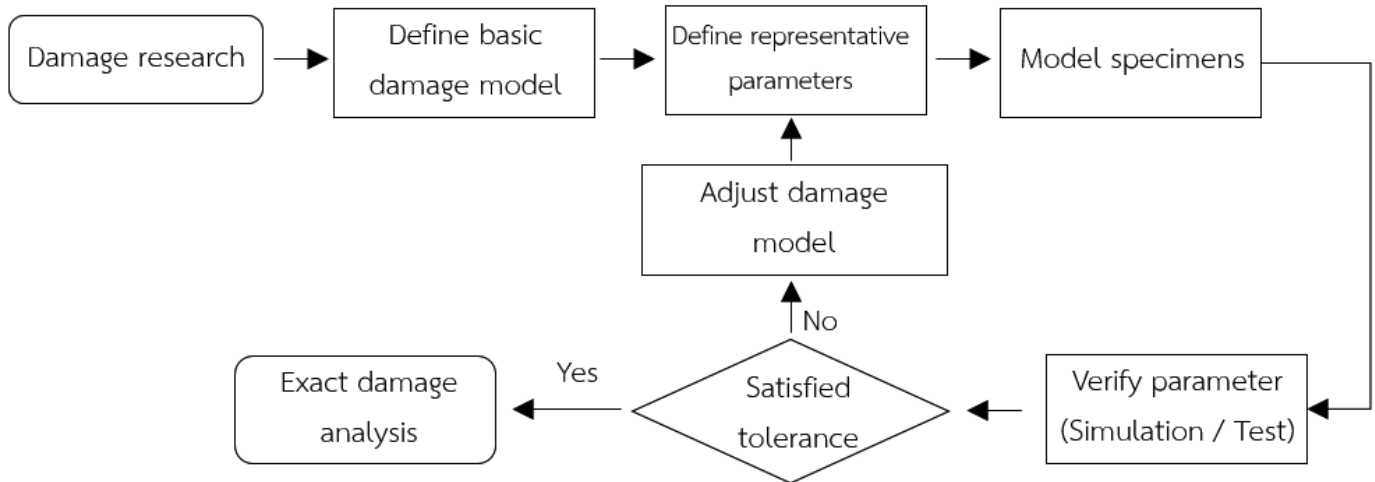
Keywords : Damage mechanic, Ductile metal, Stress triaxiality, Lode parameter, Biaxial test

1. บทนำ

โลหะเป็นวัสดุที่มีค่าทางการก่อสร้างและการออกแบบเครื่องยนตต่างๆ ปัจจุบันความต้องการโลหะและโลหะผสมมีมากโดยปริมาณโลหะที่มีอยู่ในตลาดมีค่อนข้างจำกัด ผลิตภัณฑ์ไม่ควรจะมีคุณภาพที่ดีเท่านั้น แต่ต้องมีราคาต้นทุนต่ำเพื่อสร้างความได้เปรียบทางการตลาด หนึ่งในมาตรการที่สามารถปฏิบัติได้คือการลดปริมาณความต้องการของวัสดุในการผลิต ซึ่งจะต้องทราบพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุนั้นๆ อย่างแน่ชัด ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงที่มากระทำในรูปแบบต่างๆ ย่อมเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบและการใช้งานโลหะเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่งานวิจัยของ พันโท วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ และ พันตรี ผศ.ดร. ญัฐพร นุตยะสกุล [1], ร้อยโท พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ และ คณะ [2] และ Hiranmarn และคณะ [3] แสดงให้เห็นในงานวิจัยต่างๆ ระดับนานาชาติ Barsoum และคณะ [4] Gerke และคณะ [5] Brünig และคณะ [6] และ Danas และ Ponte [7] มีการตรวจสอบพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโลหะเหนียวอย่างกว้างขวางเพื่อหาความเชื่อมโยงของค่าต่างๆ ซึ่งกันและกัน โดยมีการออกแบบตัวอย่างการทดสอบแกนเดียวและสองแกนเพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมของโลหะเหนียว

พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะเหนียวสามารถแบ่งออกได้เป็นสามบริเวณ ได้แก่ บริเวณยืดหยุ่น (Elastic area), บริเวณยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-plastic area) และบริเวณเสียหาย (Damage area) ซึ่งในสองบริเวณแรกมีงานวิจัยและการทดสอบเป็นจำนวนมากที่ใช้ในการพิสูจน์พฤติกรรมดังกล่าวและสามารถใช้โปรแกรมเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ ในส่วนของบริเวณเสียหาย ปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีที่แน่ชัดในการรองรับอย่างสมบูรณ์ ทำให้การคำนวณโดยใช้โปรแกรมในบริเวณดังกล่าวไม่มีความแม่นยำ การใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการพัฒนาทฤษฎีกลไกความเสียหายให้เกิดประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ

การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายในโลหะเหนียวจะเริ่มจากการนิยามโมเดลการเสียหาย ซึ่งโมเดลดังกล่าวจะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นผ่านสมมุติฐานที่กำหนดขึ้น ทั้งนี้จะต้องใช้ตัวแปรที่หลากหลายในการแสดงพฤติกรรมดังกล่าวออกมาเป็นตัวเลข หลังจากนั้นจึงสร้างตัวอย่างการทดสอบขึ้นมาสำหรับการยืนยันตัวแปรที่ถูกกำหนดขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันตัวแปรผ่านการทดลองแกนเดียวหรือสองแกน หรือผ่านการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ ขั้นตอนต่อไปคือการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ซึ่งหากความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะสามารถนำโมเดลการเสียหายและตัวแปรที่เกี่ยวข้องไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ หากความคลาดเคลื่อนมีค่าที่สูงเกินไป จะต้องปรับรูปแบบโมเดลการเสียหายและเริ่มออกแบบตัวอย่างการทดสอบใหม่อีกครั้ง โดยภาพรวมของกระบวนการศึกษากลศาสตร์ความเสียหายถูกแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผังงานแสดงภาพรวมของกระบวนการศึกษากลศาสตร์ความเสียหายสำหรับโลหะเหนียว

เอกสารฉบับนี้จะเริ่มอธิบายแนวความคิดพื้นฐานของกลศาสตร์ความเสียหายเพื่อให้ทราบถึงความจำเป็นในการพัฒนาทฤษฎีดังกล่าวในหัวข้อแรก หลังจากนั้นแนวความคิดของความเสียหายที่ได้รับความนิยมสำหรับงานวิจัยโดยทั่วไปจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป ระบบการทดสอบและตัวอย่างการทดสอบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายในโลหะเหนียวจะถูกกล่าวถึงในลำดับสุดท้าย

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวและทฤษฎีความเสียหายที่มีความเหมาะสมในการนำไปคำนวณ รวมไปถึงระบบทดสอบสองแกนที่ใช้ในการระบุค่าพารามเตอร์ของเกณฑ์การครากหรือเงื่อนไขความเสียหายของรูปแบบความเสียหายต่างๆ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

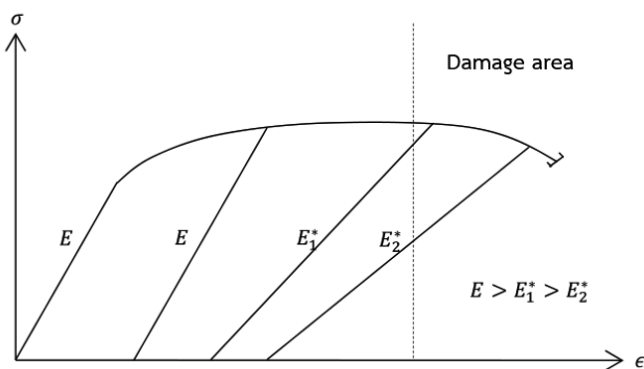
3. ทฤษฎีความเสียหายดั้งเดิม

ทฤษฎีทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มักใช้สมมุติฐานว่าวัตถุจะไม่เกิดการเสียหายในระหว่างที่ได้รับแรงจากภายนอก ซึ่งในทางปฏิบัติ วัตถุมักจะไม่สมบูรณ์ในระดับโครงสร้างขนาดเล็กภายในเนื่องจาก

ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปัจจัยจากกระบวนการผลิต รวมไปถึงโพรงหรือช่องว่างขนาดเล็ก รอยร้าว หรือวัตถุแปลกปลอมอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงและส่งผลต่อโครงสร้างขนาดใหญ่ของวัตถุ

ภาพที่ 2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในโลหะเหนียว ซึ่งถูกให้ความเค้นจนเกิดการแตกหัก จากกราฟจะสามารถพิจารณาบริเวณยืดหยุ่น (Elastic area) ได้โดยเป็นบริเวณที่โมดูลัสยืดหยุ่นยังคงมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น E และไม่เกิดความเครียดคงเหลือเมื่อคลายความเค้นออก หลังจากวัตถุได้รับแรงจนถึงความเค้นคราก (Yield stress) จะทำให้ความเครียดของวัตถุเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และยังคงเหลือความเครียดอยู่หลังจากการคลายความเค้นออก โดยบริเวณดังกล่าวจะถูกเรียกว่าเป็นบริเวณพลาสติก (Plastic area) หากวัตถุถูกให้แรงต่อไปจนถึงความเค้น ณ จุดๆ หนึ่ง จะทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุมีค่าลดลง ซึ่งจะเรียกบริเวณดังกล่าวว่าบริเวณเสียหาย (Damage area) ภายใต้บริเวณนี้จะเกิดการเสียหายในวัตถุและทำให้ค่าคงที่ E ลดลงไปสู่ค่า E^* ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่าใหม่ที่ได้รับจะยังคงอยู่จนกว่าวัตถุจะเกิดความเสียหายเพิ่มเติมจากความเค้นและการเปลี่ยนรูป ซึ่งจะทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุมีค่าลดลงอีกครั้ง สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความ

เสียหายในวัสดุคือความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุตั้งแต่กระบวนการผลิต ช่องว่าง (Void) หรือโพรงที่อยู่ในวัสดุจะเกิดการขยายออกภายใต้ความเค้นที่เพิ่มมากขึ้น และเกิดการควบรวมช่องว่าง (Void coalescence) เมื่อช่องว่างเกิดการขยายออกจนถึงค่าวิกฤต อีกทั้งความเค้นที่เพิ่มขึ้นยังสามารถสร้างช่องว่างหรือโพรงอันใหม่ให้เกิดขึ้นเพิ่มเติมได้อีก การขยายขนาดของช่องว่างและการควบรวมช่องว่างทำให้พื้นที่หน้าตัดสำหรับรองรับความเค้นมีค่าลดลงและส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นกัน



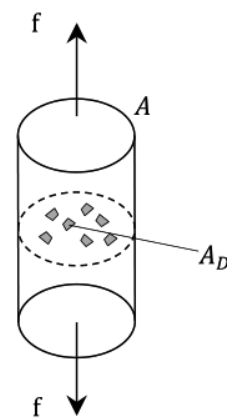
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดซึ่งแสดงการเสียหายของวัสดุภายใต้การให้ความเค้นและคลายความเค้น

3.1 ความเสียหายของคาซาโนฟ (Kachanov's damage model)

แนวความคิดพื้นฐานในการออกแบบโมเดลและสมการแสดงพฤติกรรม (Constitutive equation) ของวัสดุที่เกิดความเสียหายมาจากโมเดลของคาซาโนฟ ซึ่งถูกอธิบายใน Gross และ Seelig [8] และ Katta และ Voyiadjis [9] โดยใช้วัสดุพื้นที่หน้าตัด A ซึ่งประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและรอยร้าวต่างๆ ภายใน และใช้ A_D ในการอธิบายพื้นที่ของช่องว่างภายในระนาบของ A และสามารถนิยามอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องว่างและพื้นที่หน้าตัดวัสดุผ่าน

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (1)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพความเสียหายในวัสดุ ตามที่แสดงในภาพที่ 3 D เท่ากับศูนย์ หมายถึงวัสดุไม่มีความเสียหาย และ D เท่ากับหนึ่ง หมายถึงวัสดุเสียหายอย่างสิ้นเชิง ซึ่งเป็นไปได้ในเชิงปฏิบัติเนื่องจากวัสดุจะเกิดการแตกหักก่อนหน้าค่าดังกล่าว



ภาพที่ 3 พื้นที่ของช่องว่าง A_D ในระนาบ A ภายใต้แรงแนวฉาก f

ความเค้น σ ที่เกิดขึ้นในวัสดุคืออัตราส่วนระหว่างแรงแนวฉากที่กระทำต่อวัตถุ f และพื้นที่หน้าตัด A ทั้งนี้พื้นที่รับความเค้นจะถูกลดทอนลงเนื่องจากความเสียหายที่อยู่ในวัสดุซึ่งสามารถใช้ความเค้นประสิทธิผล σ^* ในการแสดงค่าดังกล่าวผ่านสมการ

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัตถุได้ใหม่โดยใช้

$$\epsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (3)$$

และได้รับโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล

$$E^* = (1 - D)E \quad (4)$$

3.2 ความเสียหายของเกลซอน (Gurson's damage model)

โมเดลความเสียหายของคาซานอฟเป็นแนวความคิดพื้นฐานที่นำไปพัฒนาพฤติกรรมความเสียหายในวัตถุโลหะเหนียว ซึ่งต่อมา Gurson [10] ได้นำแนวความคิดดังกล่าวมาพัฒนาร่วมกับเกณฑ์การครากของวอนมีสส์ (Von Mises yield criterion) การเพิ่มความแข็งแรง (Hardening) และกฎการไหลตัวของทฤษฎีพลาสติก (Plastic flow rules) ซึ่งนำความเสียหายในวัตถุเข้ามาพิจารณาร่วมกับเมตริกของวัตถุ ทั้งนี้โมเดลดังกล่าวมีสมมุติฐานคือวัตถุจะไม่สามารถถูกบีบอัดได้ (Incompressibility) ความเค้นไฮโดรสแตติก (Hydrostatic stress) จะมีผลต่อการขยายช่องว่างซึ่งต้องนำความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นไปพิจารณาในเกณฑ์การครากของวัตถุเช่นกัน ทั้งนี้ Gurson [10] ได้แนะนำรูปทรงของช่องว่างแบบต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดเกณฑ์การครากที่แตกต่างกันออกไป หากทำการพิจารณาเอลิเมนต์ปริมาตร dv (Volume element) ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาตรช่องว่าง dv_p (Void volume) จะได้รับความพรุน (Porosity)

$$f = \frac{dv_p}{dv} \quad (5)$$

โดยสามารถนำค่าดังกล่าวไปอธิบายเกณฑ์การครากของเกลซอนภายใต้ช่องว่างทรงกลมโดยใช้ค่าคงที่ของเทนเซอร์ความเค้นที่หนึ่ง I_1 (First invariant of stress tensor) ดังนี้

$$\psi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{I_1}{\sigma_y}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (6)$$

โดย σ_e คือความเค้นวอนมีสส์ (Von Mises stress) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ความเค้นเบี่ยงเบนที่สองตามสมการ

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (7)$$

σ_y คือความเค้นคราก (Yield stress) ของเมตริกวัตถุ และ $I_1 = T_{ii} = \text{tr} \mathbf{T} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{1}$ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมการที่ (6) ไม่ได้นำการควรรวมของช่องว่างและการเกิดใหม่ของช่องว่างมาใช้ในการพิจารณาในเกณฑ์การครากดังกล่าว

3.3 ความเสียหาย GTN (Gurson–Tvergaard–Needleman damage model)

Needleman และ Tvergaard [11] นำโมเดลการเสียหายวัตถุของเกลซอนมาทำการพัฒนาต่อไป โดยการเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควรรวมช่องว่างและการเกิดใหม่ของช่องว่าง ซึ่งได้รับเกณฑ์การคราก ดังนี้

$$\psi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2f^* q_1 \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{I_1}{\sigma_y}\right) - 1 - (f^* q_1)^2 = 0 \quad (8)$$

ทั้งนี้ตัวแปร q_1 สามารถทำการระบุได้จากการวิเคราะห์แรงปฏิริยาระหว่างช่องว่าง อิทธิพลของการควรรวมระหว่างช่องว่างจะถูกอธิบายด้วยค่า f^* โดยวัตถุจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงเมื่อความพรุน f^* สูงถึงค่าวิกฤตและเป็นผลทำให้เกิดการควรรวมช่องว่าง ค่าวิกฤตจะใช้ความพรุนวิกฤต f_c ในการแทนค่าดังกล่าว นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความพรุนแตกหัก f_F ซึ่งหมายถึง

ความพรุนเมื่อวัตถุเกิดการแตกหัก ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การเสียหายที่เกิดขึ้น

Needleman และ Tvergaard [11] ได้ใช้การเพิ่มความพรุน f ในการศึกษาทิศทางและแนวโน้มของความพรุนที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลรวมจากการเพิ่มความพรุนภายใต้การขยายช่องว่าง (Void growth porosity increment) และการเพิ่มความพรุนจากช่องว่างใหม่ (Void nucleation porosity increment) โดยค่าทั้งสองเป็นค่าที่ใช้แสดงปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดการเสียหายในวัตถุ

4. ทฤษฎีความเสียหายภายใต้อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

งานวิจัยต่างๆ (Barsoum และคณะ [4], Danas และ Ponte Castaneda [7], Bao และ Wierzbicki [12], Gao และ Kim [13] และ Zhang และคณะ [14]) พบว่าความเสียหายในวัตถุเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าสถานะความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุ เพื่อให้การตีความความเค้นภายในวัตถุสามมิติเกิดความชัดเจน จึงได้มีการนิยามค่าความเค้นสามแกน (Stress triaxiality) ภายใต้ค่าคงที่ของเทนเซอร์ความเค้น I_i และค่าคงที่ความเค้นเบี่ยงเบน J_i (Invariant of stress deviator) โดย

$$\eta = \frac{I_1}{3\sqrt{J_2}} \quad (9)$$

และค่าโหลด (Lode-parameter) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการนิยามทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของช่องว่างที่อยู่ภายในวัตถุดังนี้

$$\omega = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{สำหรับ } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (10)$$

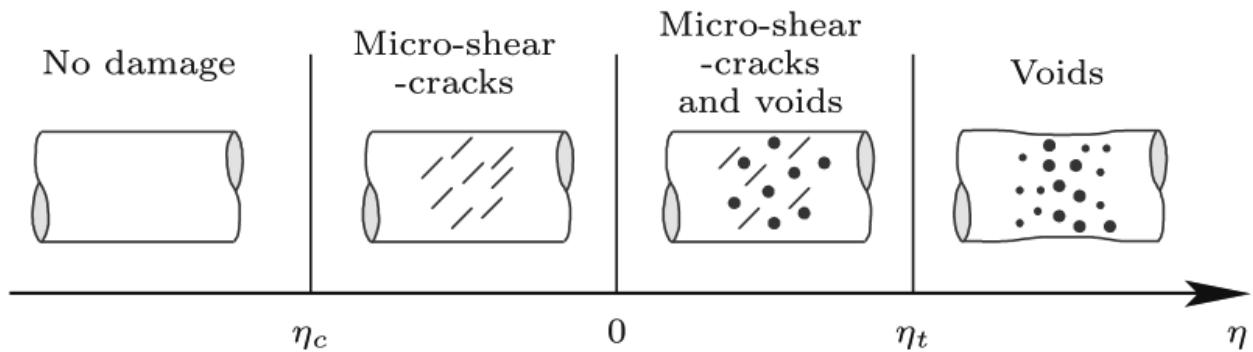
โดยจะมีช่วงของค่าระหว่าง $-\infty < \eta < \infty$ และ $-1 \leq \omega \leq 1$ ซึ่งในสมการแสดงพฤติกรรมความเสียหายของวัตถุควรนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการอธิบายเกณฑ์ความ

เสียหาย (Damage criterion) เพื่อสร้างความเชื่อมโยงระหว่างค่าทั้งสองและความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุ

4.1 อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

4.1.1 อิทธิพลของความเค้นสามแกน

แนวความคิดในการใช้ค่าทั้งสองในการอธิบายสถานะความเค้นที่เกิดภายในวัตถุมีมาอย่างยาวนานแล้ว Needleman และ Tvergaard [11] ทำการจำลองการทดสอบแกนเดียวและค้นพบว่าความเค้นสามแกนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของการทดสอบ Brünig และคณะ [15] แบ่งกลไกการเสียหายของวัตถุออกเป็นสี่ส่วนตามค่าความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในวัตถุดังที่แสดงในภาพที่ 4 เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าที่สูงมากจะทำให้ความเสียหายเกิดจากการขยายช่องว่าง (Void growth) หรือการเกิดช่องว่างใหม่ (Void nucleation) และจะเกิดการควมรวมช่องว่าง เมื่อความพรุนสูงถึงค่าวิกฤต ซึ่งเป็นส่วนที่สมการและเกณฑ์ความเสียหายของ GTN สามารถแสดงค่าในช่วงนี้ได้ค่อนข้างแม่นยำ อีกทั้งยังมีการทดสอบมากมายที่เกิดขึ้นในช่วงความเค้นสามแกนดังกล่าว (Driemeier และคณะ) [16] เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าเข้าสู่ศูนย์จะทำให้เกิดสถานะความเสียหายจากการขยายช่องว่างและการเกิดรอยร้าวเฉือน (Shear crack) ทั้งนี้หากความเค้นสามแกนมีค่าต่ำกว่าศูนย์จะทำให้เกิดความเสียหายจากรอยร้าวเฉือนเท่านั้น ซึ่งจะไม่สามารถนำเกณฑ์ความเสียหายของ GTN มาอธิบายได้ แต่จำเป็นต้องนำความเค้นสามแกนและค่าโหลดไปใช้ในการพิจารณาและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น Bao และ Wierzbicki [12] ทำการตรวจสอบความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว Al2024-T351 และทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เกิดการแตกหักและความเสียหายภายใต้ความเครียดหลักนั้นๆ โดยพบว่า เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าต่ำกว่าค่า Cut-off จะทำให้วัตถุไม่เกิดการแตกหักและการเสียหาย ทั้งนี้การวิเคราะห์และคำนวณดังกล่าวแนะนำค่า Cut-off ไว้ที่ $-1/3$ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่นำอิทธิพลของค่าโหลดมาใช้ในการ



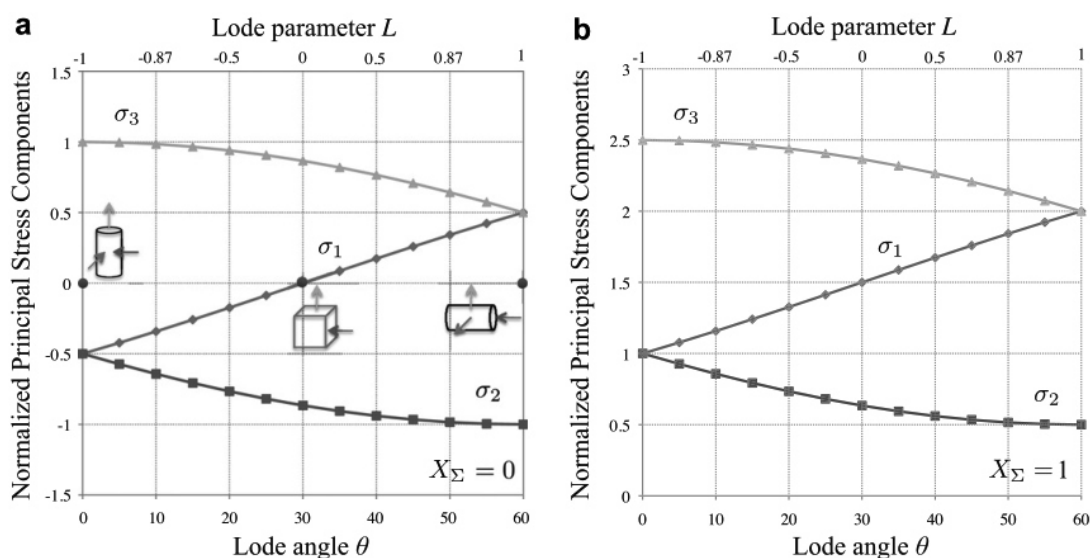
ภาพที่ 4 กลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้ความเค้นสามแกนรูปแบบต่างๆ จาก Brünig และคณะ [15]

พิจารณา โดย Brünig และคณะ [17] ทำการทดสอบสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงได้และแนะนำค่า Cut-off ภายใต้ฟังก์ชันของค่าโหลดซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Cut-off ไม่ได้เป็นค่าคงที่แต่เป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าโหลดที่เกิดขึ้นในวัตถุ

4.1.2 อิทธิพลของค่าโหลด

การศึกษาอิทธิพลของค่าโหลดภายใต้ค่าความเค้นสามแกนต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของค่าดังกล่าวต่อพฤติกรรมความเสียหายได้อย่างชัดเจนถูกอธิบายใน Danas และ Ponte [7] โดยใช้การวิเคราะห์เชิงคำนวณผ่าน Second order homogenization

model สำหรับการแตกหักของวัตถุยืดหยุ่นพลาสติกพรุน (Porous elasto-plastic solids) ภายใต้ความเค้นสามแกนต่างๆ ซึ่งพบว่าความเหนียวของวัตถุจะสัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้น โดยค่าโหลดส่งอิทธิพลเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเค้นสามแกนมีค่าต่ำจนถึงติดลบ ซึ่งตรงกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลในปริมาตรตัวแทนช่องว่าง (Void unit cell) ของ Brünig และคณะ [15] ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวได้พัฒนาเงื่อนไขการเสียหายที่สอดคล้องกับพฤติกรรมแอนไอโซโทรปิกของตำหนิขนาดเล็กภายในวัตถุ และกล่าวถึงการระบุค่าพารามเตอร์ที่เป็นเงื่อนไขการเสียหายที่ถูกนิยามขึ้นใน Brünig และ



ภาพที่ 5 ความเค้นหลักมาตรฐาน (Normalized principal stress) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโหลดภายใต้ค่าความเค้นสามแกนเท่ากับศูนย์ (ซ้าย) และความเค้นสามแกนเท่ากับหนึ่ง (ขวา) จาก Danas และ Ponte [7]

คณะ [18] ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเงื่อนไขการเสียหาย จะถูกตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำผ่านการทดสอบตัวอย่างสองแกนภายใต้ความเค้นสองแกนของ Brünig และคณะ [19] โดยตัวอย่างการทดสอบดังกล่าวได้รับการแนะนำสำหรับใช้ในการตรวจสอบโมเดลความเสียหาย ซึ่งสามารถปรับอัตราความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่าง การทดสอบได้เพื่อควบคุมสถานะความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักที่เกิดขึ้นในวัตถุ และค่าโหลดที่เกิดขึ้นถูกอธิบายอย่างชัดเจนผ่านกราฟในภาพที่ 5 และสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อค่าโหลดเท่ากับหนึ่ง จะหมายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นจะสมมาตรในแนวแกนของวัตถุภายใต้ความเค้นบวกสองค่าและความเค้นลบหนึ่งค่า ซึ่งเทียบได้กับการทดสอบโดยใช้แรงอัดในแกนเดียว สำหรับตัวอย่างแบบแท่ง หากค่าโหลดเป็นศูนย์หมายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นความเค้นในระนาบหรือเป็นปัญหาความเค้นระนาบซึ่งมีค่าความเค้นหลักหนึ่งค่าเท่ากับศูนย์ และหากค่าโหลดเท่ากับลบหนึ่งจะหมายถึงการเกิดความเค้นอย่างสมมาตรในแนวแกนซึ่งเกิดความเค้นบวกหนึ่งค่าและความเค้นลบสองค่าและเทียบได้กับการทดสอบดึง

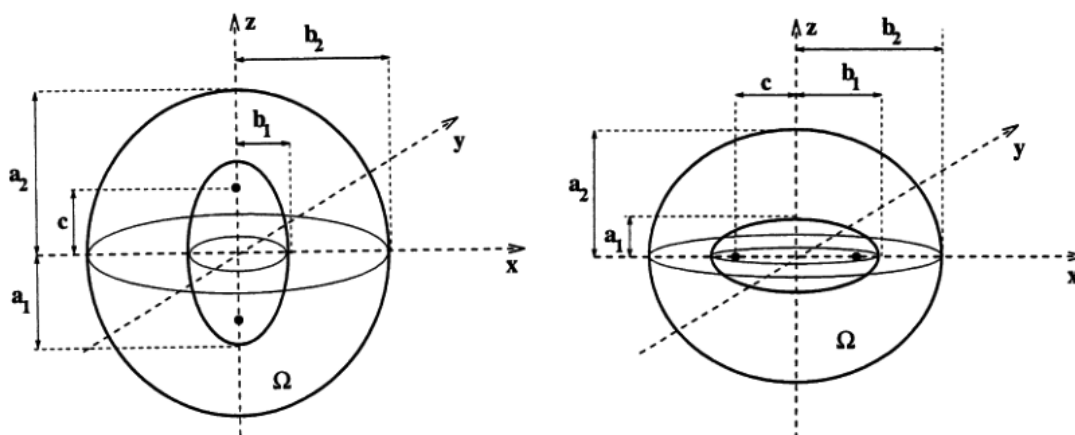
นอกจากนั้น Driemeier และคณะ [16] ได้ตรวจสอบอิทธิพลร่วมของความเค้นสามแกนและค่าโหลดต่อวัตถุ

ที่ทำการทดสอบ การวิจัยใช้ตัวอย่างอะลูมิเนียมอัลลอยรูปทรงไม้กางเขนและตัวอย่างแรงเฉือนลักษณะเดียวที่ใช้ใน Brünig และคณะ [18] โดยทำการทดสอบตัวอย่างซึ่งทำร่องทรงเว้าภายใต้ความหนาของตัวอย่างที่แตกต่างกันและพบว่า ความเค้นสามแกนและค่าโหลดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแตกหักและความเหนียวของวัสดุ รวมไปถึงการวิจัยของ Barsoum และคณะ [4] ซึ่งทำการทดสอบตัวอย่างทรงแท่งที่มีร่องทรงเว้า ซึ่งพบว่าอิทธิพลของค่าโหลดจะมีความแตกต่างตามความแข็งแรงและลักษณะการเพิ่มความแข็งแรง (Hardening) ของวัตถุ

4.2 ความเสียหายกुरुแกน-เลอบลิ่ง-ดิวู (GLD damage model)

4.2.1 แนวความคิด

แนวความคิดความเสียหายของ Gurson [10] และ Needleman และ Tvergaard [11] ถูกนำไปพัฒนาโดยใช้สมการการคราก (8) เป็นสมการพื้นฐาน โดย Gologanu และคณะ [20] ได้ใช้โมเดลวัตถุปริมาตรตัวแทน (Representative volume element, RVE) ในลักษณะทรงกระบอก ซึ่งประกอบไปด้วยช่องว่างซึ่งมีลักษณะคล้ายทรงกลม (Spheroidal void) และเมตริกของวัตถุที่ล้อมรอบในลักษณะคอนโฟคอลล์ (Confocal) ซึ่งมีนิยามตามภาพที่ 6 ในการศึกษาพฤติกรรมความ



ภาพที่ 6 โมเดล RVE ของความเสียหายกुरुแกน-เลอบลิ่ง-ดิวู (GLD model) รูปทรงช่องว่างแบบทรงรีแนวตั้ง Prolate (ซ้าย) และแบบทรงรีแนวนอน Oblate (ขวา) [21]

เสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว ทั้งนี้แนวความคิดดังกล่าวได้นำอิทธิพลของรูปทรงช่องว่าง การขยายช่องว่าง การพัฒนาของรูปทรงช่องว่าง และเงื่อนไขในการควบรวมช่องว่างมาพิจารณา Gologanu และคณะ [20] ได้นำ RVE ประกอบเข้ากับเมกตริกของวัตถุที่ไม่มีช่องว่างเพื่อจำลองแนวความคิดในการเกิดการควบรวมของช่องว่าง โดยการเปลี่ยนรูปสามารถแบ่งออกได้เป็นช่วงก่อนเกิดการควบรวม (Pre-coalescence) และระหว่างการควบรวม (Coalescence) ซึ่งก่อนเกิดการควบรวม วัตถุจะเปลี่ยนรูปในลักษณะพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเกิดการควบรวมช่องว่าง วัตถุรอบ RVE จะเกิดการแข็งและไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปเฉพาะบริเวณ RVE เท่านั้น

4.2.2 เกณฑ์การคราก (Yield criterion)

นิยามการครากจากความเสียหาย GLD มีนิยามดังนี้

$$\psi = \frac{C}{\sigma_y^2} (T' + xT_h X)^2 + 2q(g+1)(g+f) \cosh\left(\kappa \frac{T_h}{\sigma_y}\right) - (g+1)^2 - q^2(g+f) = 0 \quad (11)$$

โดยมี T' เป็นเทนเซอร์ความเค้นเบี่ยงเบน S เป็นพารามิเตอร์รูปทรงช่องว่าง (Void shape parameter) T_h เป็นความเค้นไฮโดรสเตติกทั่วไป ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$T_h = \alpha_2(T_{11} + T_{33}) + (1 - \alpha_2)T_{22} \quad (12)$$

และ

$$X = \frac{2}{3}e_2 \otimes e_2 - \frac{1}{3}e_1 \otimes e_1 - \frac{1}{3}e_3 \otimes e_3 \quad (13)$$

ซึ่งมี e_i เป็นฐานที่อยู่ปริภูมิแนวฉาก (Orthogonal space) โดยแกนของช่องว่างคล้ายทรงกลมจะอยู่ในทิศทางกับ e_2 และมี $\otimes$ คือผลคูณของเทนเซอร์

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (11) จะพบว่าตัวแปร C, χ, g, κ และ α_2 จะเป็นฟังก์ชันของความพรุนและ

รูปทรงของช่องว่าง ซึ่งพารามิเตอร์ q จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความพรุนเริ่มต้น การเพิ่มความแข็งจากความเครียดของวัตถุ รูปทรงของช่องว่าง และความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้น นิยามของตัวแปรที่กล่าวมาและกฎการไหลตัวสำหรับเกณฑ์การคราก GLD อยู่ในเอกสารของ Gologanu และคณะ [20] และ Gologanu และคณะ [21] ซึ่งมีลักษณะสมการที่ยาวและซับซ้อนจึงไม่นำมากล่าวถึงในบทความนี้

4.2.3 อภิปราย

เกณฑ์การคราก GLD เป็นการดัดแปลงแนวความคิดพื้นฐานของ Gurson [10] และ Needleman และ Tvergaard [11] ซึ่งจะนิยามเอลิเมนต์ที่อาจจะเกิดความเสียหายให้อยู่ภายใต้เกณฑ์การครากดังกล่าวได้โดยไม่ต้องทำการนิยามเงื่อนไขหรือเกณฑ์การเสียหายเพิ่มเติม การใช้สมการเพียงสมการเดียวในการอธิบายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัตถุทำให้เกิดความง่ายในการนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์

การนำสมการดังกล่าวไปคำนวณและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดต่างๆ (Pardoen และ Hutchinson) [22] ซึ่งเป็นที่มาของการนำเกณฑ์การคราก GLD ไปพัฒนาต่อในงานวิจัยต่างๆ (Gologanu และคณะ [21], Gologanu และคณะ [23], Gao และคณะ [24], Gao และคณะ [25] และ Kerala-varma และ Benzerga [26])

ความนิยมในการนำเกณฑ์การคราก GLD ไปเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเกณฑ์การครากสำหรับโลหะเหนียวพรุน แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวสามารถตีความและนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายเพียงทำการปรับนิยามของตัวแปรหรือเพิ่มเติมตัวแปรเข้าไปเท่านั้น

4.3 ความเสียหายคอนติเนียม (Continuum damage model, CDM)

4.3.1 แนวความคิด

แนวความคิดในการพัฒนากลศาสตร์ความเสียหายของ Brünig และคณะ [18] ตั้งอยู่บนพื้นฐานการพิจารณาความเสียหายให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ความ

เสียหาย (Damage tensor) (Brünig และคณะ [6] และ Bonora และคณะ [27]) โดย Brünig และคณะ [18] ให้ข้อเสนอแนะว่า CDM ที่เคยใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมามีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้กับสภาวะความเค้นสามแกนในช่วงที่มีค่าต่ำและค่าเป็นลบ ทั้งนี้ข้อผิดพลาดของความเค้นสามแกนและค่าโหลดต่อการเปลี่ยนรูปและความเสียหายสะสมได้รับการตีพิมพ์ในงานวิจัยต่างๆ อย่างกว้างขวาง ([12], [4], [7], [16] และ [15])

ทฤษฎีความเสียหาย CDM สำหรับโลหะเหนียว นิยามความเค้นและความเครียดผ่านคอนตินูมัมภายใต้การครากพลาสติกแบบดริคเกอร์-เพรเกอร์ (Drucker-Prager yield criterion) ซึ่งจะได้รับเงื่อนไขการเสียหายที่เป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกน η และค่าโหลด ω ทั้งนี้การออกแบบเงื่อนไขการเสียหายดังกล่าวใช้ข้อมูลพื้นฐานจากตัวอย่างการทดสอบแบบเฉือนและตัวอย่างการทดสอบดึงแกนเดียวซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนในช่วงกว้างได้ การอธิบายความเสียหายในคอนตินูมัมจะแบ่งความเครียดและการเพิ่มความเครียดออกเป็นสองส่วน ยืดหยุ่น ส่วนพลาสติกและส่วนการเสียหาย

4.3.2 เงื่อนไขการเสียหาย (Damage condition)

วัตถุในคอนตินูมัมจะเกิดการเสียหายขึ้นเมื่อ

$$\psi^{da} = \alpha I_1 + \beta \sqrt{J_2} - \sigma_{da} = 0 \quad (14)$$

โดยมี α และ β เป็นพารามิเตอร์ความเสียหาย σ_{da} คือความเค้นเริ่มการเสียหาย (Damage threshold) ซึ่งจะเห็นได้จากสมการดังกล่าวอย่างชัดเจนว่า พจน์แรกของสมการคือผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นในวัตถุและพจน์ที่สองคือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเค้นเบี่ยงเบน ซึ่งสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ทั้งสองได้จากการศึกษาผ่านการคำนวณเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์จากตัวอย่างการทดสอบโลหะเหนียว ทั้งนี้ Brünig และคณะ [15] ได้คำนวณค่าพารามิเตอร์ α และ β โดย

ใช้หน่วยวัตถุซึ่งมีช่องว่างอยู่ที่กึ่งกลางและแนะนำค่าดังกล่าวให้เป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกน η และค่าโหลด ω ดังนี้

$$\alpha(\eta) = \begin{cases} 0, & -\frac{1}{3} \leq \eta \leq 0 \\ \frac{1}{3}, & \eta > 0 \end{cases} \quad (15)$$

และ

$$\beta(\eta, \omega) = \beta_0(\eta, \omega = 0) + \beta_\omega(\omega) \geq 0 \quad (16)$$

โดย

$$\beta_0(\eta) = \begin{cases} -0.45\eta + 0.85, & -\frac{1}{3} \leq \eta \leq 0 \\ -1.28\eta + 0.85\eta, & \eta > 0 \end{cases} \quad (17)$$

และ

$$\beta_\omega(\omega) = -0.017\omega^3 - 0.065\omega^2 - 0.078\omega \quad (18)$$

ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการแบ่งช่วงสมการตามความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ

4.3.3 การเพิ่มความเครียดเสียหาย (Damage strain rate)

เมื่อเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นตามเงื่อนไขการเสียหายจำเป็นต้องทำการตรวจสอบทิศทางในการพัฒนาความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วย โดยเทนเซอร์การเพิ่มความเครียดเสียหายตามกฎการเสียหาย (Damage rule) มีนิยามตาม [18] ดังนี้

$$\dot{\mathbf{H}}^{da} = \dot{\mu} \left(\bar{\alpha} \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{1} + \bar{\beta} \mathbf{N} - \bar{\delta} \mathbf{M} \right) \quad (19)$$

โดยมีค่า $\dot{\mu}$ เป็นค่าสเกลาร์ที่เป็นบวกซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการขยายช่องว่างสำหรับความเค้นสามแกนสูงและเป็นค่าที่แสดงถึงการเพิ่มความเครียดเสียหายสำหรับความเค้นสามแกนต่ำ พจน์แรกของสมการแสดงถึงอิทธิพลของการเพิ่มความเครียดไฮโดรสแตติกและสองพจน์สุดท้ายเป็นค่าซึ่งแสดงอิทธิพลของความเครียดเบี่ยงเบนต่อการเพิ่มความเครียดการเสียหาย $\mathbf{N}$ และ $\mathbf{M}$ เป็นฟังก์ชัน

ของเทนเซอร์ความเค้นเบี่ยงเบนในฐานความเสียหาย (Damage configuration) ทั้งนี้พารามิเตอร์ $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta})$ จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหนดในช่วงต่างๆ สมการที่ (19) จะพิจารณาถึงอิทธิพลของการขยายช่องว่างในลักษณะไอโซโทปิกและการเกิดรอยร้าวในลักษณะแอนไอโซโทปิก การใช้ $\mathbf{H}^{da}$ แทนความเครียดเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ในการนิยามเทนเซอร์การเปลี่ยนรูปตาม Brünig และคณะ [18] ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ (19) ถูกแนะนำในเอกสารของ Brünig และคณะ [15] ทั้งนี้พารามิเตอร์ α ที่ถูกนิยามในความเสียหาย CDM ไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกับค่าที่อยู่ในความเสียหาย GLD

4.3.4 อภิปราย

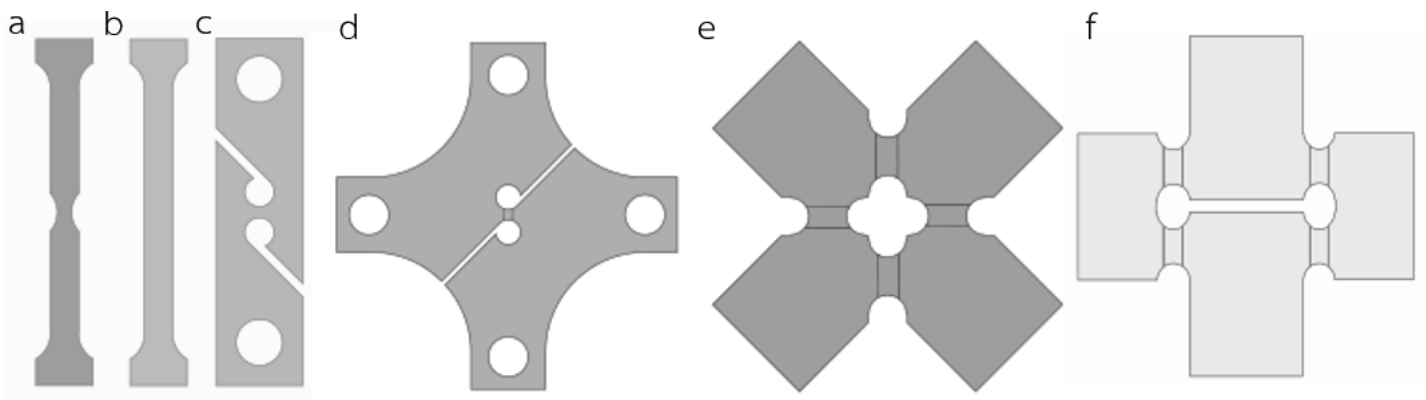
การพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัตถุผ่านคอนตินันต์เป็นวิธีการที่ต้องทำการนิยามและแบ่งส่วนของคอนตินันต์ออกเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งทำให้ต้องนิยามเทนเซอร์ความเค้นและเทนเซอร์ความเครียดในรูปแบบทั่วไปซึ่งมีความซับซ้อนสูง ทั้งนี้จะพบว่าเงื่อนไขการเสียหายในสมการที่ (14) เป็นสมการที่ง่ายและสามารถตีความได้อย่างชัดเจนในแต่ละพจน์ การแสดงอิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหนดด้วยพารามิเตอร์สเกลาร์เพียงค่าเดียวเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้สมการเชิงเรขาคณิตเช่นเดียวกับความเสียหาย GLD เพื่ออธิบายรูปทรงและการขยายช่องว่างคล้ายทรงกลมที่มีความซับซ้อน

นอกจากนั้น ความเสียหาย CDM ยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของโลหะในช่วงความเค้นสามแกนที่ต่ำไปจนถึงค่าเป็นลบได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบค่า Cut-off ของความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในวัตถุภายใต้ค่าโหนดใดๆ ได้ โดยในงานวิจัยหลายชิ้น ([5], [19], [28] และ [29]) มีจุดประสงค์ในการนำความเสียหาย CDM ของ Brünig และคณะ [18] มาทำการพิสูจน์ค่าพารามิเตอร์ $(\alpha, \beta, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta})$ ภายใต้การทดสอบแกนเดียวหรือสองแกน ทั้งนี้ในงานวิจัยของ Brünig และคณะ [17] สามารถทำการทดสอบตัวอย่างสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนที่มีค่าเป็นลบสูงได้ภายใต้ความเสียหาย CDM ซึ่งมีค่าความเค้นสามแกนประมาณ -0.66

5. ระบบการทดสอบและตัวอย่างการทดสอบ

5.1 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดเครื่องมือในการทดสอบและสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณวิกฤต การควบคุมความเสียหายให้ถูกจำกัดอยู่ภายในบริเวณใดบริเวณหนึ่งมักใช้การทำการ่องลักษณะเว้าซึ่งก่อให้เกิดความเค้นสูงในบริเวณนั้น หรือใช้การสร้างแรงบิดในตัวอย่างการทดสอบ (Yin และคณะ) [30]



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับโลหะเหนียวแบบแผ่น a) และ b) ตัวอย่าง Dog bone c) ตัวอย่างแรงฉีก d) ตัวอย่างสองแกน Arcan e) ตัวอย่างสองแกน X02 และ f) ตัวอย่างสองแกน H

Driemeier และคณะ [16] ทำการทดสอบตัวอย่างแรงดึงแกนเดียว ตัวอย่างแรงเฉือนและตัวอย่างสองแกน Arcan (Arcan และคณะ) [31] ตามที่แสดงในภาพที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีของร่องเว้าในตัวอย่างแรงดึงแกนเดียวจะมีผลต่อความเครียดแตกหักของวัสดุ หรือหมายความว่า ความเค้นสามแกนและค่าโหลตในวัสดุจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวถึงแม้จะใช้ตัวอย่างสองแกนก็ตาม แต่สามารถสร้างแรงตามแนวแกนได้เพียงครั้งละหนึ่งแกนเท่านั้นเนื่องจากใช้เครื่องทดสอบแกนเดียว

Brünig และคณะ [28] ทำการทดสอบตัวอย่างสองแกน Arcan ดัดแปลง (ภาพที่ 7 d) กับระบบทดสอบสองแกน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างการทดสอบ Arcan สามารถสร้างความเค้นสามแกนภายใต้การทดสอบสองแกนได้ในช่วงระหว่าง -0.4 และ 0.85 โดยความเค้นสามแกนจะแปรผันตามอัตราส่วนของแรงทั้งสองแกนที่กระทำต่อตัวอย่างการทดสอบ

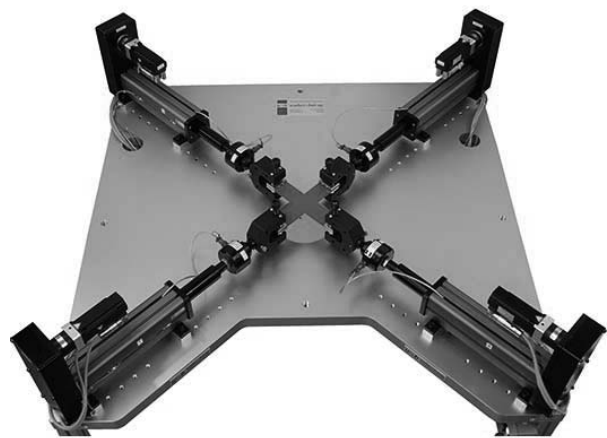
การทดสอบของ Gerke และคณะ [5], [29] และ Brünig และคณะ [32] เป็นการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่าการใช้การทดสอบสองแกนสามารถสร้างความเค้นสามแกนในช่วงที่กว้างได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของแรงและรูปร่างทางเรขาคณิตของตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งค่าความเค้นสามแกนและค่าโหลตในช่วงต่างๆ จะสามารถนำไปพิสูจน์ค่าพารามิเตอร์ของเงื่อนไขความเสียหายได้

5.2 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงแกนเดียวเป็นเครื่องมือที่เป็นที่รู้จักและทราบกันโดยทั่วไป การทดสอบแกนเดียว ([4], [16], [25] และ [33]) สามารถใช้ตัวอย่างแบบแท่งและตัวอย่างแรงแกนเดียวจากโลหะแบบแผ่นได้ หรืออาจจะใช้ตัวอย่างสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นได้ภายในแกนเดียวเท่านั้น เช่นเดียวกับการทดสอบของ Driemeier และคณะ [16]

ระบบทดสอบสองแกนที่สามารถสร้างอัตราส่วนของความเค้นให้เกิดขึ้นภายในตัวอย่างการทดสอบสองแกน

ได้จะกระทำโดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนที่ควบคุมโดยระบบแม่เหล็กไฟฟ้า Brünig และคณะ [28] ได้แสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวสามารถให้ผลการทดสอบที่มีความแม่นยำได้โดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนรุ่น LFM – BIAx 20 kN จากบริษัท Walter and Bai ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (ภาพที่ 8) ซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกแรงสี่ชิ้นที่สร้างแรงได้อย่างอิสระ การยึดตรึงตัวอย่างการทดสอบสามารถกระทำได้ผ่านการจับยึด (Clamping) หรือการใช้สลักแนวทางการทดสอบโดยใช้รูปแบบดังกล่าวถูกนำไปใช้ในงานวิจัยของ Gerke และคณะ [29] ต่อไป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบทดสอบสองแกนมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการทดสอบตัวอย่างสองแกนสำหรับโลหะเหนียวได้ ซึ่งสามารถสร้างสภาวะความเค้นที่ต้องการผ่านการปรับอัตราส่วนของแรงที่กระทำในแต่ละกระบอกแรงที่ใช้ในระบบทดสอบ

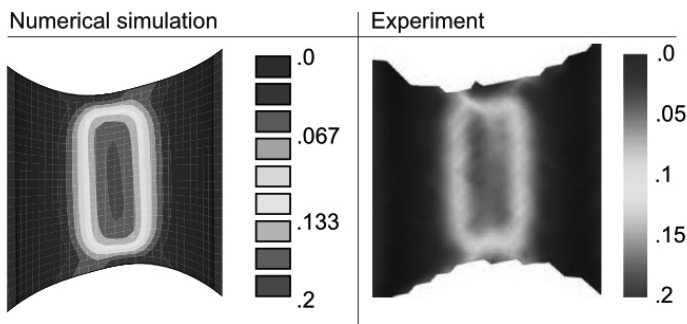


ภาพที่ 8 เครื่องทดสอบสองแกน รุ่น LFM-BIAx 20 kN จากบริษัท Walter and Bai ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

5.3 การวัดความเครียดในบริเวณวิกฤต

การทดสอบแกนเดียวมักใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) ในการวัดความเครียดที่เกิดขึ้น (Driemeier และคณะ) [16] ซึ่งทำให้ได้รับข้อมูลความเครียดและความเค้นโดยทั่วไปของตัวอย่างการทดสอบเท่านั้น ในการทดสอบของ Brünig และคณะ [28] แสดงให้เห็นว่า

แม้การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนจะสามารถสร้างสถานะความเค้นในรูปแบบต่างๆ ได้โดยการปรับอัตราส่วนของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างการทดสอบ แต่การวัดความเครียดยังสามารถกระทำได้ผ่านการใช้สเตรนเกจเท่านั้น



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบความเครียดเนื่องระหว่างผลการคำนวณจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการวัดความเครียดผ่าน DIC ระหว่างการทดสอบจาก Gerke และคณะ [29]

การวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณเล็กๆ (ประมาณ 20 ตร.มม.) เป็นหนึ่งในความท้าทายสำหรับการทดสอบโลหะด้านทฤษฎีความเสียหายซึ่งต้องใช้ค่าในการทดสอบที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยของ Gerke และคณะ [29] ได้ใช้ระบบการวัดสนามความเครียดที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่พื้นผิวของวัสดุ โดยใช้ระบบดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน หรือเรียกสั้นๆ ว่า DIC (Digital Image Correlation) โดยใช้หลักการในการสร้างสนามความเครียดจากการเปรียบเทียบความสว่างที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิวของตัวอย่างการทดสอบที่ได้รับการสร้างลวดลายแบบสุ่มและถูกนำไปสร้างโครงข่ายในการคำนวณสนามความเครียดจากภาพที่ถูกบันทึกในระบบ งานวิจัยดังกล่าวใช้ระบบ DIC ของบริษัท Dantec/Limess แบบ Q-400 ซึ่งประกอบไปด้วยกล้องขนาด 2 Mpx และใช้การประมวลผลผ่านโปรแกรม Istra4D ซึ่งมากระบบ การใช้ระบบตรวจวัดสนามความเครียดผ่าน DIC จำเป็นต้องทำการเชื่อมโยงระบบดังกล่าวเข้ากับเครื่องทดสอบสอง

แกนเพื่อให้ข้อมูลที่บันทึกตรงกับแรงที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ ของเครื่องทดสอบสองแกน

การวัดสนามความเครียดที่เกิดขึ้นผ่านระบบดังกล่าวสามารถสร้างข้อมูลซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบได้อย่างแม่นยำตามที่แสดงในภาพที่ 9 ซึ่งคุณภาพของข้อมูลสนามความเครียดจะได้รับอิทธิพลจากกระบวนการสร้างลวดลายแบบสุ่มบนพื้นผิวและรูปร่างของร่องของตัวอย่างการทดสอบ รูปแบบการทดสอบโดยใช้การวัดสนามความเครียดผ่านระบบ DIC ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยของ Zistl และคณะ [34] Gerke และคณะ [35] และ Brünig และคณะ [36] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของระบบดังกล่าวที่สามารถใช้วัดสนามความเครียดในบริเวณเล็กๆ สำหรับนำไปตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวได้

6. สรุปและอภิปราย

พฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวมีพื้นฐานและแนวความคิดมาจากความเสียหายของคาซาโนฟและเกลซอน ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวจะมีพฤติกรรมที่สัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ปัจจัยทั้งสองส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการควมรวมช่องว่าง การเกิดช่องว่างใหม่ และการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กในเมตริกโลหะ การนำปัจจัยดังกล่าวมาพัฒนาความรู้ด้านกลศาสตร์ความเสียหายมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณที่มีความแม่นยำ

เกณฑ์ความเสียหายที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจสอบพฤติกรรมและกลไกความเสียหายของวัสดุโลหะมาจากเกณฑ์การคราก GLD ซึ่งถูกพัฒนามาจากเกณฑ์การคราก GTN โดยจะอธิบายความเสียหายของวัสดุจากช่องว่างคล้ายทรงกลมที่เรียงตัวอยู่ในวัสดุและใช้ค่าพารามิเตอร์หลายค่าในการอธิบายอิทธิพลของรูปร่างและการเปลี่ยนรูปของช่องว่างดังกล่าว การดัดแปลงเกณฑ์การคราก GLD สามารถแสดงพฤติกรรม

การเสียหายของวัตถุภายใต้ช่วงความเค้นสามแกนต่างๆ ได้โดยไม่ต้องทำการนิยามหรือสร้างเงื่อนไขความเสียหายเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเสียหาย โมเดลความเสียหายที่ได้รับความนิยมต่อไปได้แก่ความเสียหาย CDM ซึ่งอธิบายความเสียหายของวัตถุภายใต้กลศาสตร์คอนตินันต์และใช้สมการเงื่อนไขการเสียหายในการบ่งชี้การเริ่มการเสียหายในวัตถุพร้อมทั้งอธิบายทิศทางความเสียหายผ่านเทนเซอร์การเพิ่มความเครียดการเสียหาย ทั้งนี้รูปแบบความเสียหาย CDM สามารถอธิบายพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะได้โดยใช้สเกลาร์พารามิเตอร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกนและค่าโหลดเพียงสองค่าเท่านั้น ความเสียหายทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกันในทฤษฎีพื้นฐานซึ่งการเลือกใช้รูปแบบความเสียหายในการวิเคราะห์พฤติกรรมความเสียหายจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของรูปแบบความเสียหายดังกล่าวก่อน

กระบวนการทดสอบ ตัวอย่างการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ และระบบวัดสนามความเครียดมีผลต่อการประเมินพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเป็นอย่างมาก การใช้การคำนวณที่แม่นยำต้องควบคู่กับระบบตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความน่าเชื่อถือ การใช้เครื่องทดสอบสองแกนที่สามารถสร้างแรงดึงและแรงอัดในแกนต่างๆ ได้อย่างอิสระภายใต้ระบบตรวจวัดสนามความเครียดแบบดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน DIC ซึ่งสามารถวัดสนามความเครียดผ่านการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย แสดงให้เห็นว่า การตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายของตัวอย่างการทดสอบสองแกนในบริเวณเล็กๆ สามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระบบดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าของการวิจัยในด้านความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว ทั้งนี้การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายของโลหะเหนียวมีแนวโน้มที่ดีสำหรับใช้ในการพัฒนาการวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆ ที่จำเป็นต้องนำพฤติกรรมความเสียหายของวัตถุไปร่วมพิจารณาด้วย

การประยุกต์ใช้ความรู้ด้านกลศาสตร์ความเสียหายส่วนใหญ่ให้ความสนใจต่อพฤติกรรมความเสียหายของโลหะเหนียวในช่วงความเค้นสามแกนเป็นศูนย์และเป็นบวกสูง ทั้งนี้การพัฒนาการวิจัยและตัวอย่างการทดสอบที่เหมาะสมต่อการพิสูจน์แนวความคิดด้านกลศาสตร์ความเสียหาย จำเป็นต้องออกแบบตัวอย่างและวิธีการทดสอบที่สามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงได้ ซึ่งการศึกษาและงานวิจัยในอนาคตจะเน้นสำหรับการสร้างตัวอย่างการทดสอบที่สามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงเพื่อใช้สำหรับการยืนยันพารามิเตอร์ของทฤษฎี CDM ได้ โดยการพิสูจน์แนวความคิดดังกล่าวมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสมการพื้นฐานสำหรับกลศาสตร์ความเสียหายในอนาคต

7. บรรณานุกรม

- (1) พันโท วสันต์ พัฒนวิชัยโชติ, พันตรี ผศ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล, "การทดสอบแปะเหล็กขึ้นรูปเย็นลักษณะรูปหมวกในโครงสร้างหลังคาเพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนัก," วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.จปร., ปีที่ 10, เล่มที่ 10, หน้า 106-112, 2555.
- (2) ร้อยโท พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ, พันตรี ผศ.ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล, พันโท วสันต์ พัฒนวิชัยโชติ, "การทดสอบบะเสของหลังคาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ใช้เหล็กชุบตัวเชื่อมสองตัวประกอบกันเพื่อใช้ในอาคารที่สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วในภารกิจทางทหาร," วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.จปร., ปีที่ 9, เล่มที่ 9, หน้า 23-31, 2554.
- (3) W. Hiranmarn, P. Chomcheun, N. Nuttayasakul, "Experiments on Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns with End-Track in Compression," CRMA Journal, vol. 12, pp. 11-19, 2014.
- (4) I. Barsoum, J. Faleskog, S. Pingle, "The Influence of the Lode Parameter on Ductile Failure Strain in Steel," Procedia Engineering, pp. 69-75, 2011.
- (5) S. Gerke, M. Zistl, M. Schmidt, M. Brünig, "Damage and fracture of ductile sheet metal: New biaxially loaded specimens for material parameter identification," Procedia Structural Integrity, vol. 13, pp. 39-44, 2018.
- (6) M. Brünig, D. Albrecht, S. Gerke, "Numerical analyses of stress-triaxiality-dependent inelastic deformation behavior of aluminum alloys," International Journal of Damage Mechanic, pp. 299-317, 2003.

- (7) K. Danas, P. Ponte Castaneda, "Influence of the lode parameter and the stress triaxiality on the failure of elasto-plastic porous materials," *International Journal of Solids and Structures*, pp. 1325-1342, 2012.
- (8) D. Gross, T. Seelig, "Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik, Berlin Heidelberg," Springer-Verlag, 2007.
- (9) P. Kattan and G. Voyiadjis, "Damage Mechanics with Finite Elements, Berlin Heidelberg," Springer-Verlag, 2002.
- (10) A. Gurson, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part i - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, no. 99, pp. 2-15, 1977.
- (11) A. Needleman, V. Tvergaard, "An analysis of ductile rupture in notched bars," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, pp. 461-490, 1984.
- (12) Y. Bao, T. Wierzbicki, "On the cut-off value of the negative triaxiality for fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 1049-1069, 2004.
- (13) X. Gao, J. Kim, "Modeling of ductile fracture: Significance of void coalescence," *International Journal of Solids and Structures*, no. 43, pp. 6277-6293, 2006.
- (14) K. Zhang, J. Bai, D. Francois, "Numerical analysis of the influence of the Lode parameter on void growth," *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 5847-5856, 2001.
- (15) M. Brünig, S. Gerke, V. Hagenbrock, "Micro-mechanical studies on the effect of the stress triaxiality and the Lode parameter on ductile damage," *International Journal of Plasticity*, no. 50, pp. 49-65, 2013.
- (16) L. Driemeier, M. Brünig, G. Micheli, M. Alves, "Experiments on stress-triaxiality dependence of material behaviour of aluminum alloys," *Mechanics of Materials*, no. 42, pp. 207-217, 2010.
- (17) M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, "Damage and failure at negative stress triaxialities: Experiments, modeling and numerical simulations," *International Journal of Plasticity*, pp. 70-82, 2018.
- (18) M. Brünig, O. Chyra, D. Albrecht, L. Driemeier, M. Alves, "A ductile damage criterion at various stress triaxialities," *International Journal of Plasticity*, pp. 1731-1755, 2008.
- (19) M. Brünig, S. Gerke, D. Brenner, "New 2D-Experiments and Numerical Simulations on Stress-State-Dependence of Ductile Damage and Failure," *Procedia Materials Science*, pp. 177-182, 2014.
- (20) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perrin, J. Devaux, "Recent extensions of Gurson's model for porous ductile metals," in *Continuum Micromechanics, CISM Courses and Lectures*, New York, Springer, no. 377, pp. 61-130, 1997.
- (21) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perri, J. Devaux, "Theoretical models for void coalescence in porous ductile solid. I. Coalescence "in layers"," *International Journal of Solids and Structures*, pp. 5581-5594, 2001.
- (22) T. Pardoen, J. Hutchinson, "An extent model for void growth and coalescence," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, no. 48, pp. 2467-2512, 2000.
- (23) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perrin, J. Devaux, "Theoretical models for void coalescence in porous ductile solids. II. Coalescence "in columns"," *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 5595-5604, 2001.
- (24) X. Gao, T. Zhang, M. Hayden, C. Roe, "Effect of the stress state on the plasticity and ductile failure of an aluminum 5083 alloy," *International Journal of Plasticity*, no. 25, pp. 2366-2382, 2009.
- (25) X. Gao, G. Zhang, C. Roe, "A Study on the Effect of the Stress State on Ductile Fracture," *International Journal of Damage Mechanics*, no. 19, pp. 75-94, 2010.
- (26) S. Keralavarma, A. A. Benzerga, "A constitutive model for plastically anisotropic solids with non-spherical voids," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, no. 58, pp. 874-901, 2010.
- (27) N. Bonora, D. Gentile, A. N. G. Pirondi, "Ductile damage evolution under triaxial state of stress theory and experiments," *International Journal of Plasticity*, pp. 981-1007, 2005.
- (28) M. Brünig, D. Brenner, S. Gerke, "Stress state dependence of ductile damage and fracture behavior: Experiment and numerical simulation," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 152-169, 2015.
- (29) S. Gerke, P. Adulyasak, M. Brünig, "New biaxially loaded specimens for the analysis of damage and fracture in sheet metals," *International journal of Solids and Structures*, pp. 209-218, 2017.
- (30) Q. Yin, C. Soyarslan, K. Isik, A. Tekkaya, "A grooved in-plane torsion test for the investigation of shear

- fracture in sheet materials," *International Journal of Solids and Structures*, no. 66, pp. 121-132, 2015.
- (31) M. Arcan, Z. Hashin and A. Voloshin, "A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials," *Experimental Mechanics*, no. 18, pp. 141-146, 1978.
- (32) M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, "Biaxial Experiments and Numerical Simulations on Damage and Fracture Mechanisms in Ductile Metals at Different Loading Conditions," *Procedia Structural Integrity*, no. 2, pp. 3109-3116, 2016.
- (33) A. Kao, H. Kuhn, O. Richmond, W. Spitzig, "Tensile fracture and fractographic analysis of 1045 spheroidized steel under," *J Mater Res*, no. 5, pp. 83-91, 1990.
- (34) M. Zisl, S. Gerke, M. Brünig, "Biaxial experiments on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture behavior of ductile metals," *Procedia Structural Integrity*, no. 13, pp. 57-62, 2018.
- (35) S. Gerke, M. Zisl, A. Bhardwaj, M. Brünig, "Experiments with the X0-specimen on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture mechanisms in aluminum alloys," *International Journal of Solids and Structures*, no. 163, pp. 157-169, 2019.
- (36) M. Brünig, S. Gerke, M. Zisl, "Experiments and numerical simulations with the H-specimen on damage and fracture of ductile metals under non proportional loading paths," *Engineering Fracture Mechanics*, no. 217, pp. 106531, 2019.