

ความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีบริเวณอีลาสโต-พลาสติก
รอบจุดเชิงกลาริตีบริเวณรอยต่อของวัสดุที่ต่างกันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Intensity of Stress Singularity around Elasto – Plastic
Dissimilar Material Joint using FEM

วรชัย เสียงสนั่น และ อรรถพร วิเศษสินธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ติดต่อ: fengapw@ku.ac.th, 02-797-0999 ต่อ 1861

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีรอบจุดเชิงกลา บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุแข็งซึ่งยากต่อการเกิดบริเวณพลาสติก และวัสดุอ่อนซึ่งง่ายต่อการเกิดบริเวณพลาสติกเมื่อเกิดความเค้นที่มากพอ ดังนั้นความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่เกิดขึ้นนี้ เป็นค่าที่เกิดจากผลกระทบของความต่างของคุณสมบัติทางกลมากกว่า 2 ชนิด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะต่างจากการวิเคราะห์แบบอีลาสติกเพียงอย่างเดียว โดยการวิเคราะห์จะทำการสร้างแบบจำลองแบบแซนวิชซึ่งมีวัสดุอ่อนอยู่ตรงกลาง นำไปทดสอบรับแรงดัด 4 จุด (Four Point Bending Load) จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเค้นและบริเวณพลาสติกที่เกิดขึ้น นำไปประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบอีลาสติกเพียงอย่างเดียว เพื่อหาผลกระทบของบริเวณพลาสติกที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเกิดรอยร้าว

คำหลัก: ความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี; บริเวณพลาสติก; วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; การแตกร้าว

Abstract

In this paper, the intensity of stress singularity was investigated around the singular point at the interface between different materials by Finite Elements Method (FEM). The model consists of a rigid material which is difficult to achieve in plastic deformation zone and soft material which is easy to achieve in plastic deformation zone cause enough stress. Therefore, the intensity of stress singularity occurs as the effects of difference in the mechanical properties more than two types. The results are different from only elastic analysis. The considered problem is sandwiches model which a soft material is the interlayer with four point bending load. Then analyzed the stress and the plastic zone occurred and estimated the intensity of stress singularity by the least square method and then compared with the values obtained from only elastic analysis. In order to found out the effect of the plastic zone and analyzed the risk of fracture.

Keywords: Intensity of Stress Singularity; Plastic Zone; Finite Element Method; Fracture

AMM-236

1. บทนำ

ในวัสดุทั่วไป การเกิดรอยร้าวภายในเนื้อของวัสดุมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้วัสดุเกิดการเสียหาย การศึกษาวิจัยงานทางด้านวัสดุในปัจจุบันมีมากมาย แต่เป็นการศึกษาวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นซึ่งกูลาริตีในช่วงอีลาสติกเท่านั้น แต่สำหรับในช่วงอีลาสติก-พลาสติกยังมีไม่มาก ซึ่งในปัจจุบัน วัสดุแบบอีลาสติก-พลาสติกนี้สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวเชื่อมระหว่างวัสดุต่างชนิดกันก็ได้ เช่น การเชื่อมติดกันของแผงวงจรกับชิปประมวลผลที่เป็นวัสดุแข็งด้วยเรซินที่เป็นวัสดุอ่อนซึ่งเสียรูปแบบพลาสติกได้ง่าย เป็นต้น

จากงานวิจัย Groth, H.L. and Brottare [1] ได้วิเคราะห์วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นอีลาสโต-พลาสติก โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นซึ่งกูลาริตีอยู่ที่บริเวณจุดมูรอยต่อของวัสดุสองชนิด เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติวัสดุที่แตกต่างกันของวัสดุแข็ง (Steel) และวัสดุอ่อน (Adhesive) ซึ่งวัสดุอ่อนมีการเสียรูปที่ชัดเจนกว่าวัสดุแข็งในช่วงของพลาสติก สาเหตุมาจากความเค้นที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงค่าค่าหนึ่ง และอาจจะหายไปด้วยเหตุผลต่าง ๆ ในรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่ติดกัน ดังนั้นจึงสามารถสมมุติฐานได้ว่าวัสดุที่แข็งจะมีพฤติกรรมตอบสนองต่อความยืดหยุ่น ส่วนวัสดุที่อ่อนเท่านั้นจะมีพฤติกรรมเหมือนวัสดุแบบอีลาสโต-พลาสติก เพราะว่าในวัสดุที่อ่อนเกิดบริเวณพลาสติกที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับวัสดุแข็ง มีหลายแบบจำลองของวัสดุอีลาสโต-พลาสติก ถูกใช้ในหลายงานวิจัย ซึ่งในการศึกษาวัสดุพลาสติกนั้น สมบัติของวัสดุจะถูกสมมุติว่าเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบยกกำลัง (Power Law Strain Hardening Material) [2] จากงานวิจัยของ Liton Kumar S., ARAI Y. และ Tsuchida E. [3] ได้ทำการทดลองและวิเคราะห์หาค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซึ่งกูลาริตี (The order of stress singularity, λ) โดยวิธี Moiré Interferometry Technique ซึ่งหาจากค่าไอเกนที่ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมระหว่าง ค่าการ

เปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (u_y) กับระยะในแนวแกน y จากจุดซึ่งกูลาไปในวัสดุที่เป็นอีลาสติก (กราฟ $\log u_y - \log y$) ซึ่งค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซึ่งกูลาริตีที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดลองมีค่าเท่ากัน แต่ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซึ่งกูลาริตีแปรผกผันกับแรงที่กระทำ ซึ่งตรงกับการวิเคราะห์ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซึ่งกูลาริตี ของ Hideo Koguchi และ Wisessint Attaporn [4] โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในการศึกษาของ Jirapat Malai และ Attaporn Wisessint [5] ได้หาค่าความเข้มของความเค้นซึ่งกูลาริตีรอบจุดซึ่งกูลา บริเวณรอยต่อของวัสดุแข็งที่เป็นวัสดุอีลาสติก และวัสดุอ่อนที่เป็นวัสดุอีลาสโต-พลาสติก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวัสดุทั้งสองเป็นวัสดุสมมติ และมีแรงดึงบริเวณด้านบนของชิ้นงาน พบว่าค่าความเข้มของความเค้นซึ่งกูลาริตีรอบจุดซึ่งกูลา มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติก (n -exponent, n) เพิ่มขึ้น และเมื่อค่าอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus) มากขึ้นเช่นกัน

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติก ที่ทำให้คุณสมบัติในช่วงการเสียรูปพลาสติก (Plastic deformation zone) แตกต่างกัน และได้รับภาระแรงดัด 4 จุด (Four Point Bending Load) มากระทำ โดยนำค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซึ่งกูลาริตี (λ) และค่าความเค้นมาหาค่าความเข้มของความเค้นซึ่งกูลาริตีที่เกิดขึ้นรอบจุดซึ่งกูลาบริเวณ อีลาสโต-พลาสติก (K_{el-pl}) โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งคุณสมบัติในช่วงการเสียรูปพลาสติกมีค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติก เปลี่ยนไปจาก $n=1$ (Linear Elastic) ลดลงถึง $n=0$ (Perfect Plastic) เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวหรือการเปิดของแนวรอยร้าว (Crack Initiation or Crack Opening)

AMM-236

2. วัตถุประสงค์และขอบเขต

ศึกษาและวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นซึ่งก่อกำเนิดขึ้นรอบจุดซิงกูลาบริเวณรอยต่อของวัสดุที่ยากต่อการเสียรูปในช่วงพลาสติก (วัสดุแข็ง) และวัสดุที่ง่ายต่อการเสียรูปในช่วงพลาสติก (วัสดุอ่อน) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเสี่ยงของการแตกร้าว

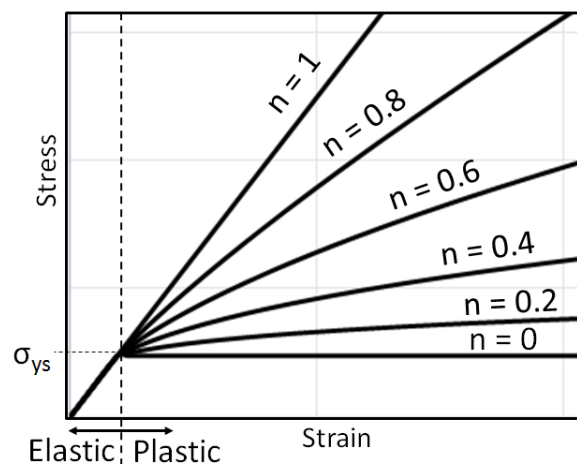
ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc/Mentat 2005 ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เป็นแบบจำลองแบบแซนด์วิชสองมิติซึ่งมีวัสดุอ่อนอยู่ตรงกลาง (Interlayer) และวัสดุแข็งประกบอยู่ ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติต่างกันและเป็นวัสดุแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Material) มาเชื่อมติดกันแบบอุดมคติ ซึ่งแสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 1, [5] และรับภาระแรงดัด 4 จุด โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นซึ่งก่อกำเนิดขึ้นในช่วงของพลาสติกแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับเลขชี้กำลังในช่วงพลาสติก โดยเปลี่ยนจากแบบเส้นตรง (Linear Elastic Deformation) ไปจนถึงแบบพลาสติกสมบูรณ์ (Perfect Plastic Deformation) มีผลทำให้ความเค้นในช่วงพลาสติกเปลี่ยนแปลงตามสมการดังนี้

$$\sigma_f = \sigma_{ys} \left(1 + \frac{\epsilon^{-p}}{\epsilon_{ys}} \right)^n \quad (1)$$

โดย σ_f คือ ความเค้นช่วงพลาสติก (Plastic Flow Stress), σ_{ys} คือ ความเค้นคราก (Yield Stress), ϵ^{-p} คือ ความเครียดช่วงพลาสติก (Equivalent Plastic Strain), ϵ_{ys} คือความเครียดคราก (Yield Strain), n คือ เลขชี้กำลังในช่วงพลาสติก (n-exponent) โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกจากแบบเส้นตรง ไปจนถึงแบบพลาสติกสมบูรณ์ โดยการให้ค่า “เลขชี้กำลังช่วงพลาสติก” ที่แตกต่างกันตั้งแต่ $n=0$ (Perfect Plastic Deformation), $n=0.2$, $n=0.4$, $n=0.6$, $n=0.8$, และ $n=1$ (Linear Elastic Deformation) แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

Material	Hard	Soft
Young's Modulus (MPa)	250	25
Poisson Ratio	0.3	0.3
Yield Strength (MPa)	-	3
Material Response	Elastic	Elasto-Plastic



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดในช่วงอีลาสติกและพลาสติก

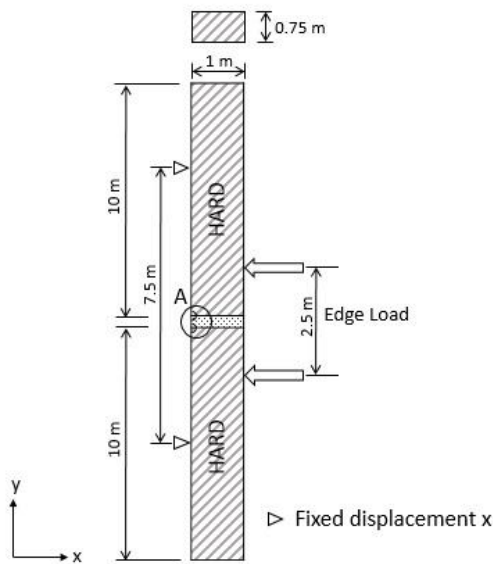
3. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

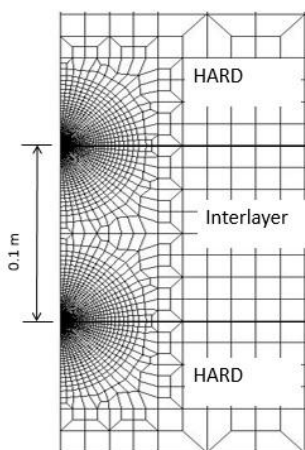
แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองแบบแซนด์วิชสองมิติที่มีวัสดุ 2 ชนิดมาเชื่อมติดกันแบบอุดมคติ โดยมีวัสดุอ่อนอยู่ตรงกลาง เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นซึ่งก่อกำเนิดขึ้นรอบจุดซิงกูลา โดยกำหนดให้การวิเคราะห์เป็นสองมิติแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) และกำหนดให้มีแรงดัด 4 จุดที่บริเวณขอบด้านข้างของแบบจำลอง โดยแรงดัดมีค่า 2 เมกะปาสคาล ซึ่งแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยบริเวณจุดซิง

AMM-236

กุลา (บริเวณ A) ที่เกิดในบริเวณรอยต่อของวัสดุมีความเค้นเกิดขึ้นสูง ทำให้บริเวณนั้นจำเป็นต้องมีเอลิเมนต์ที่ละเอียด โดยแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดมีขนาด 0.005 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 ค่าขอบเขตและภาระแรงดัดที่กระทำต่อแบบจำลอง

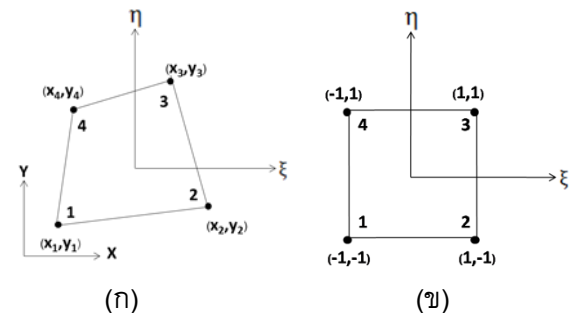


รูปที่ 3 เอลิเมนต์บริเวณรอยต่อรอบจุดซิงกูลา (บริเวณ A)

3.2 วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม โดยบริเวณรอบจุด

ซิงกูลาจะสร้างเอลิเมนต์ตามแนวรัศมีจากจุดซิงกูลาเนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถแสดงพฤติกรรมของความเค้นบริเวณจุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุได้ดี และเพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้น จึงสร้างขนาดของเอลิเมนต์บริเวณรอบจุดซิงกูลาให้มีความละเอียดและมีจำนวนเอลิเมนต์สูงกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งการคำนวณหาเอลิเมนต์เมตริกซ์นั้น ต้องใช้วิธีการอินทิเกรตบนพื้นที่เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ซึ่งหาได้ค่อนข้างยาก จึงต้องแปลงรูปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าที่อยู่ในพิกัด X-Y ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในพิกัดธรรมชาติ $\xi-\eta$ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 4 รูปร่างของเอลิเมนต์ (ก) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าในพิกัด X-Y และ (ข) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในพิกัดธรรมชาติ $\xi-\eta$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นในรูปของค่าการเคลื่อนตัวหรือการกระจัด (Displacement) ตามชนิดของเอลิเมนต์ ซึ่งค่าการเคลื่อนตัว ในทิศทาง X-Y สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเป็นไปตามสมการดังนี้

$$u_i = \sum_{n=1}^4 N_n \bar{u}_{in} \quad (2)$$

โดยที่ u_i คือการกระจัดในทิศทาง i , $\bar{u}_{in}$ เป็นการกระจัดที่จุดต่อ n ซึ่งมีทิศทางเดียวกับ i และ N_n คือ ฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Function) ที่ จุดต่อ n จากนั้นเมื่อทราบค่าการกระจัด

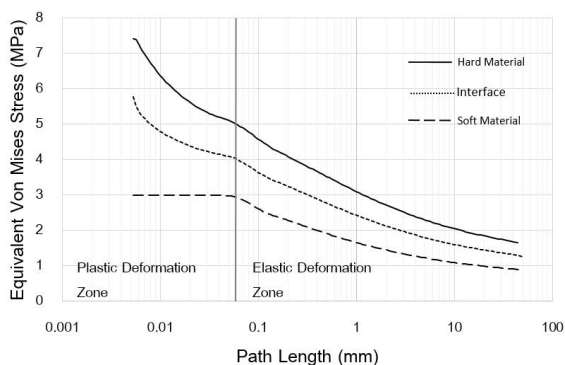
AMM-236

แล้วก็จะนำไปหาค่าความเครียดและความเค้นในทิศทางต่างๆ ต่อไป

4. ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 ความเค้น (Equivalent Von Mises stress, σ_v)

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาและวิเคราะห์ค่าความเค้น (σ_v) ที่รอยต่อของวัสดุแข็งและวัสดุอ่อน และในเนื้อของวัสดุทั้งสองบริเวณรอยต่อ ซึ่งวัสดุแข็งเป็นวัสดุอีลาสติก และวัสดุอ่อนเป็นวัสดุพลาสติกสมบูรณ์ ($n=0$) พบว่า วัสดุอ่อนเมื่อได้รับความเค้นที่มากพอจนถึงความเค้นคราก (Yield Stress, σ_{ys}) ความเค้นในช่วงนี้จะมีค่าคงที่ซึ่งเท่ากับค่าความเค้นคราก ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงค่าความเค้นที่อยู่ในช่วงการเสียรูปพลาสติก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความเค้น (σ_y) ที่เกิดขึ้นรอบจุดซิงกูลาในวัสดุแข็ง วัสดุอ่อน และรอยต่อของวัสดุ

นอกจากนี้ ความเค้นที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของวัสดุมีค่าสูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุอ่อนใกล้เคียงใกล้เคียงแต่ยังน้อยกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุแข็งใกล้เคียง แสดงว่าการที่มีวัสดุอ่อนอยู่ตรงกลางและเป็นตัวเชื่อมวัสดุแข็งให้ติดกันนั้นวัสดุอ่อนจะทำให้ค่าความเค้นบริเวณรอยต่อลดลงเป็นผลทำให้ความเสี่ยงที่จะเกิดแนวรอยร้าวลดลงด้วย และแสดงให้เห็นว่าวัสดุแข็งที่ยากต่อการเสียรูปพลาสติกหรือเป็นวัสดุอีลาสติก เมื่อนำมาเชื่อมต่อกับวัสดุอ่อนที่ง่ายต่อการเสียรูปพลาสติก จะทำให้สมบัติทางกลในวัสดุแข็ง

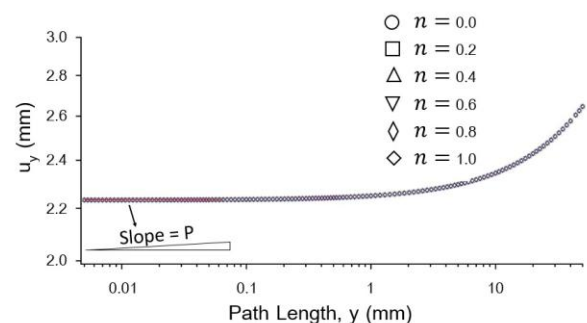
เปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเข้าสู่ช่วงการเสียรูปพลาสติกของวัสดุอ่อน พฤติกรรมความเค้นในเนื้อวัสดุแข็งจะไม่เป็นไปตามสมบัติทางกลเป็นอีลาสติก แต่อัตราการเพิ่มของความเค้นจะลดลงโดยเป็นไปตามสมการที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลแบบพลาสติกของวัสดุวัสดุอ่อน

4.2 ความเค้นในแนวแกน y (Stress, σ_{yy})

จากงานวิจัยของ [3,4] ได้หาค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี (λ) ตามสมการที่ 2

$$\lambda = p - 1 \quad (2)$$

โดย p คือค่าไอเกน (Eigen Value, p) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (u_y) กับระยะในแนวแกน y จากจุดซิงกูลาไปในเนื้อวัสดุแข็ง (กราฟ $\log u_y - \log y$) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของระยะการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (u_y) กับระยะในแนวแกน y จากจุดซิงกูลาไปในเนื้อวัสดุแข็ง

ค่าไอเกนเป็นค่าเจาะจง ซึ่งในวัสดุอีลาสติกจะมีค่าคงที่ 1 ค่า แต่ถ้าเป็นวัสดุอีลาสติก-พลาสติกจะมีค่าไม่เท่ากันกับวัสดุอีลาสติก โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษา ค่าไอเกนที่แปรผันกับค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติก ซึ่งผลการหาค่าไอเกนและค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีแสดงในตารางที่ 2 และนำไปหาค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (K_{el-pl}) ในสมการที่ 3

AMM-236

$$\frac{\sigma_{yy}}{\sigma_0} = K_{yy0} + K_{yy1} \left(\frac{r}{W} \right)^{-\lambda} + K_{yy2} \ln \left(\frac{r}{W} \right) + K_{yy3} \ln \left(\frac{r}{W} \right)^2 \quad (3)$$

โดย r คือระยะจากจุดซิงกูลาในแนวแกน x , W คือความกว้างของชิ้นงาน 0.75 เมตร, และ K_{yy1} คือค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (K_{el-pl})

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาและวิเคราะห์ค่าความเค้นในแนวแกน y (σ_{yy}) บริเวณจุดซิงกูลาที่รอยต่อของวัสดุ ซึ่งเป็นความเค้นที่จะทำให้เกิดแนวรอยร้าว แสดงดังรูปที่ 7 โดยความสัมพันธ์ของความเค้น (σ_{yy}) กับระยะจากจุดซิงกูลาต่อความหนา (path Length/ W) และสมการที่ 3 นำไปใช้ในการทำนายค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (K_{el-pl}) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

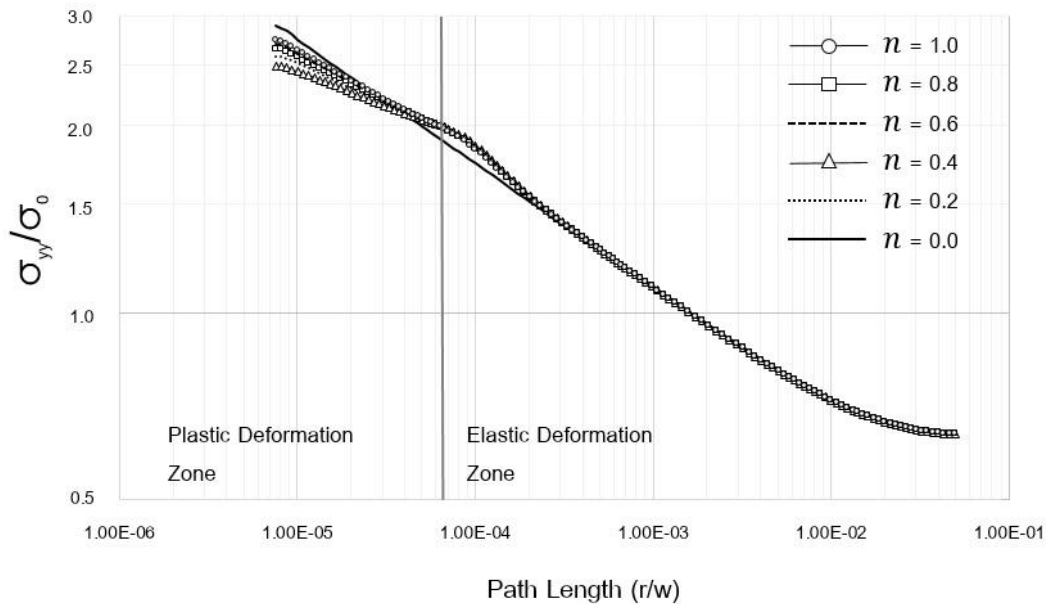
ตารางที่ 2 ค่าไอเกนและค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีรอบจุดซิงกูลา

n-exponent	p	λ
0.0	0.023160	-0.976840
0.2	0.024261	-0.975739
0.4	0.029762	-0.970238
0.6	0.025114	-0.974886
0.8	0.025356	-0.974644
1.0	0.025539	-0.974461

จากรูปที่ 6 พบว่าวัสดุพลาสติกสมบูรณ์ (Perfect Plastic, $n=0$) ค่าความเค้นบริเวณจุดซิงกูลาที่รอยต่อของวัสดุเมื่ออยู่ในช่วงการเสียรูปแบบพลาสติกที่ได้จะเพิ่มขึ้นไปในแนวโน้มเดียวกันกับความเค้นที่อยู่ในช่วงการเสียรูปแบบอีลาสติก เนื่องจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นงานมีทิศทางเดียวกับแนวรอยแตก แต่ความเค้นที่ทำให้ชิ้นงานเกิดแนวรอยแตกนั้นคือความเค้นในแนวแกน y (σ_{yy}) ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงการเสียรูปแบบพลาสติกมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอ่อนที่เป็นอีลาสติก-พลาสติกอื่นๆ และวัสดุอ่อนที่เป็นอีลาสติก ($n=1$)

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงการเสียรูปแบบพลาสติกของวัสดุอ่อนที่มีค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติกที่ต่างกัน ($n=0.2, 0.4, 0.8$ และ 1) จากรูปที่ 7 พบว่าช่วงการเสียรูปแบบพลาสติก ความเค้นจะมีค่าลดลง เมื่อค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติกลดลงจาก $n=1$ ถึง $n=0.2$ เนื่องจากสมบัติทางกลของวัสดุอ่อนมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุแข็งที่บริเวณรอยต่อใกล้จุดซิงกูลา แสดงว่าวัสดุที่มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับแบบพลาสติกสมบูรณ์ บริเวณจุดซิงกูลาจะเกิดความเค้นน้อยกว่าวัสดุที่มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับวัสดุอีลาสติก

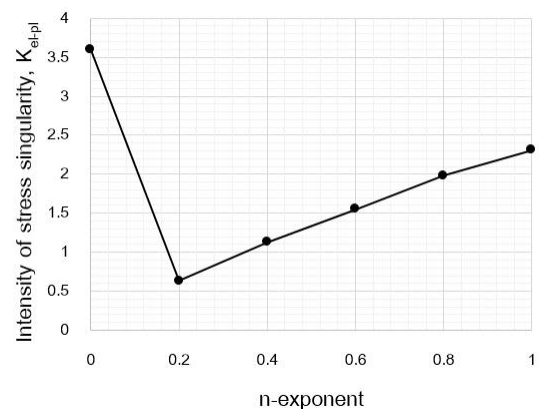
AMM-236



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อช่วงพลาสติกมีค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติกตั้งแต่ $n=0$ ถึง $n=1$

4.3 ความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี

จากการประมาณค่าค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี (K_{el-pl}) บริเวณรอบจุดเชิงกลาที่รอยต่อของวัสดุ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดตามสมการที่ 3 พบว่าค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีแปรผันตามกับความเค้นที่เกิดขึ้น โดยวัสดุพลาสติกสมบูรณ์ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีสูงสุด เมื่อเทียบกับวัสดุอ่อนที่เป็นอีลาสติก-พลาสติกอื่นๆ และวัสดุอ่อนที่เป็นอีลาสติกเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบวัสดุอ่อนที่มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับวัสดุพลาสติกสมบูรณ์จนเข้าสู่วัสดุอ่อนที่เป็นอีลาสติก ($n=0.2$ ถึง $n=1$) จะพบว่าเมื่อค่าเลขชี้กำลังช่วงพลาสติก เพิ่มขึ้นค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นหมายถึงความเสี่ยงของการแตกร้าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 8 ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี (K_{el-pl}) กับ n -exponent

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่เกิดขึ้นนั้น สรุปได้ดังนี้

5.1 สมบัติทางกลวัสดุอ่อนที่มีช่วงการเสียรูปแบบพลาสติกทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุแข็งแบบอีลาสติกใกล้เคียงบริเวณรอยต่อไม่เป็นไปตามช่วงอีลาสติก แต่จะมีค่าลดลงเมื่อวัสดุอ่อนเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก

AMM-236

5.2 ความเสี่ยงของการแตกร้าวที่จุดซึ่งกลุ่มีค่ามี
ค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าเลขชี้กำลังช่วง
พลาสติกจนถึงวัสดุแบบอีลาสติคสมบูรณ์
อย่างไรก็ตามจะมีความเสี่ยงของการแตกร้าว
สูงที่สุดเมื่อวัสดุเป็นแบบพลาสติกสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Groth, H.L. and Brottare, (1988). Evaluation of Singular Intensity Factors in Elastic-Plastic Materials, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 16, No. 3, May 1988, pp. 291-297.
- [2] Jin-Quan XU, Lie-Dong Fu and Yoshiharu Mutoh (2002). A Method for Determining Elastic-Plastic Stress Singularity at the Interface Edge of Bonded Power Law Hardening Materials, *JSME International Journal*, Series A, Vol. 45, No. 2, 2002, pp. 177-183.
- [3] Liton Kumar S., ARAI Y. and Tsuchida E., An Analysis on Singular Fields around an Interface Edge of Ceramic/Metal Joints using Moiré Interferometry Technique, *JSME Int. Journal*, Series A, Vol. 48, No. 4, 2005, pp.240-245.
- [4] Hideo Koguchi and Wisessint Attaporn, Analysis of Elasto-Plastic Stress Singularity around Interface Free Edge in Joints using FEM, *the 55th annual meeting of JSMS*, Nagaoka, Niigata, Japan, May, 2006.
- [5] Jirapat Malai and Attaporn Wisessint, Elasto-Plastic stress singularity field near the vertex of bi-material joint, *The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.