

การประยุกต์เทคนิค Parametric Design เพื่อออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดสอบด้วย เทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar

ฐิตะพล หุຍะนันท์ และ นิรุต์ดี พรประสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 083 430 0404, โทรสาร: 02 988 3666 ต่อ 3103

E-mail: thitaphol.huayanant@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิค Parametric Design ในการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลวัตของทองแดง 99.98% ผ่านการวิเคราะห์ Elastic Strain Wave ซึ่งวัดได้จากกราฟทดสอบที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain Rate, $\dot{\epsilon}$) ต่อเวลาสูง ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งข้อจำกัดของการออกแบบมีดังนี้ 1) แรงดันลมสูงสุด 15 bar 2) ความยาวของเครื่องทดสอบไม่เกิน 7.5 m โดยมุ่งหวังให้สามารถทดสอบทองแดง 99.98% ที่ $\dot{\epsilon}$ ได้ตั้งแต่ 10^2 - 10^4 s⁻¹ โดยค่ามิติขนาดตั้งต้นสำหรับการออกแบบ Bar System (AISI 4340) และ Specimen สามารถคำนวณหาจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแล้วนำค่าที่คำนวณได้มาสร้าง Parametric Model เพื่อหาผลเฉลยทาง Finite Element ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ณ $\dot{\epsilon}$ เป้าหมายที่ 10^3 s⁻¹, 2×10^3 s⁻¹, 3×10^3 s⁻¹, 4×10^3 s⁻¹, 6×10^3 s⁻¹, 8×10^3 s⁻¹ และ 10^4 s⁻¹ ด้วยอัตราความเร็วเข้ากระทกของ Striker Bar เท่ากับ 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, 16 m/s, 24 m/s, 32 m/s และ 40 m/s ตามลำดับ ในบทความนี้เลือก Bar System ที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 mm, 19 mm, 16 mm, 12 mm และ 9.5 mm ขณะที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ Pressure Bar และ Specimen เท่ากับ 100 และ 0.5 ตามลำดับ และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด Specimen ต่อ Pressure Bar เท่ากับ 0.66 ซึ่งผลการวิเคราะห์ Incident Wave (ϵ_i) และ Reflected Wave (ϵ_r) จากการจำลองการทดสอบ ณ $\dot{\epsilon}$ เป้าหมายต่างๆ ตามความสอดคล้องกับทฤษฎีของคุณลักษณะจำเพาะของคลื่นทั้งสองและพิจารณาร่วมกับขนาดของ Bar System และ Specimen ที่สามารถสร้างได้จริง ซึ่งผลจากการจำลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ Incident Wave (ϵ_i และ ϵ_r) แต่ละกรณีใกล้เคียงกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5% และ 5.3% ตามลำดับ ดังนั้นมิติขนาดซึ่งเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปจัดสร้างอุปกรณ์ซึ่งให้การทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นนั้น คือ Striker Bar ยาว 0.48 m และ Pressure Bar คู่ ยาว 1.9 m ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm เท่ากัน ขณะที่ Specimen มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm ยาว 6.3 mm โดยจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของแอมพลิจูดเริ่มต้นของ ϵ_r (ϵ_{r_i}) เท่ากับ 26.4% และค่า Linearity of Deformation (R^2) มีค่าประมาณ 0.936

คำหลัก: Parametric Design, Compressive Split Hopkinson Pressure Bar, Finite Element Simulation

Abstract

This paper presents an application of a parametric design technique on developing of the compressive Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) apparatus for determining of dynamic properties of a 99.98% Copper via an analysis of an elastic strain wave measured from the compression tests at room temperature with high strain rates $\dot{\epsilon}$. The design criteria using here are 1) maximum launching pressure is 15 bar 2) total length of the apparatus must not exceed 7.5m and it is expected to test Cu 99.98% in a $\dot{\epsilon}$ range of $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$. A parametric model was constructed on an initial dimension of AISI4340 bar system and Cu 99.98% specimen obtained from a theoretical calculation. Commercial software was employed to simulate a series of compression test at targeted $\dot{\epsilon}$ of 10^3 s^{-1} , $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ and 10^4 s^{-1} with impact speeds of a striker bar of 4m/s, 8m/s, 12m/s, 16m/s, 24m/s, 32m/s and 40m/s respectively. Selected diameters of the bar system in this work are 25mm, 19mm, 16mm, 12mm and 9.5mm while a length-to-diameter ratio of the pressure bars and the specimen is 0.66 constantly. It was found that analysis results of Incident Wave (ϵ_i) and Reflected Wave (ϵ_r) from simulations at each targeted $\dot{\epsilon}$ agree with theoretical characteristics of both waves in conjunction with possible dimension of the bar system and the specimen. The simulation results illustrate that the errors from the theoretical calculation of the incident wave ($\epsilon_{\Delta t}$ and ϵ_{ϵ_i}) in each case close to the means of 1.5% and 5.3% respectively. Therefore, optimal dimensions of the apparatus are the bar system of 19mm diameter including the 0.48m striker bar and the 1.9m pressure bars while the 12.5mm diameter specimen has a length of 6.3mm. It gives 26.4% on the initial amplitude error of ϵ_r (ϵ_{ϵ_r}) and the linearity of deformation (R^2) of 0.936 approximately.

Keywords: Parametric Design, Compressive Split Hopkinson Pressure Bar, Finite Element Simulation

1. บทนำ

คุณสมบัติเชิงพลวัตของวัสดุ มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดต่อเวลา (Strain rate, $\dot{\epsilon}$) มากกว่า 10 s^{-1} โดยสามารถวิเคราะห์หาคุณสมบัติดังกล่าวได้จากอุปกรณ์ทดสอบด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) เช่น งานวิจัยของ Lee และ Lin [1] ทดสอบหาคุณสมบัติเชิงพลวัตของ Ti-6Al-4V ที่อัตราความเครียดสูงและปรับอุณหภูมิในการทดสอบจนถึง 1100°C หรือ Deshpande และ Fleck [2] ศึกษาพฤติกรรมของ Aluminium Alloy Foams โดยทดสอบที่อัตราความเครียดสูง เป็นต้น อุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SPHB ที่สร้างขึ้นเป็นเครื่อง

แรกในประเทศไทย (ดังรูปที่ 1) โดย ฐิตะพลและคณะ สามารถทดสอบหาคุณสมบัติของทองแดง 99.98% ได้ $\dot{\epsilon}$ สูงสุดเพียง 900 s^{-1} [3] ดังนั้นจึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาสร้างอุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB ซึ่งสามารถหาคุณสมบัติของทองแดงที่ $\dot{\epsilon}$ ได้ถึง 10^4 s^{-1}

เนื่องจากปัจจุบันไม่มีมาตรฐานการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SPHB แม้แต่การกำหนดขนาดมิติของ Bar System และ Specimen ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการกำหนดขนาดมิติที่เหมาะสมของ Bar System และ Specimen ภายใต้อัตราเร็วเข้ากระแทกไม่เกิน 40 m/s โดยการประยุกต์เทคนิค Parametric Design ควบคู่กับแนวทางงานวิจัยที่ผ่านมาของ ฐิตะพลและคณะ [3-5] ผ่านการจำลองทาง Finite Element ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

เพื่อเป็นแนวทางจัดสร้างอุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB ในช่วงการทดสอบที่ต้องการต่อไป



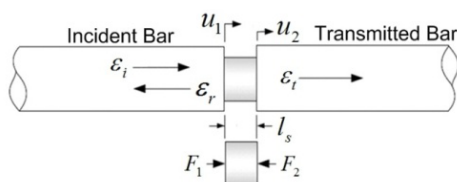
รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SPHB

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีของ SHPB

Klosky พัฒนาเทคนิคนี้ขึ้นมาในปี 1949 บนหลักการแผ่ของคลื่นตามยาวใน 1 มิติ โดยวิเคราะห์ผ่าน Elastic Strain Wave ที่เกิดขึ้นบน Pressure Bar โดยเทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อาทิ ในปี 2003 Lee และ Kim [6] ดำเนินการทดสอบวัสดุ Aluminium Alloy และ PMMA ณ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาสูงโดยใช้เทคนิค SHPB และ ในปี 2004 Ramirez และ Gonzalez [7] จำลองการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB โดยใช้เทคนิค Finite Element เพื่อหาขนาด Deformation Pad ที่เหมาะสม เป็นต้น

2.1 ทฤษฎีของ SHPB

องค์ประกอบหลักสำหรับการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB คือ Specimen และ Bar System ซึ่งประกอบด้วย Striker Bar, Incident Bar และ Transmitted Bar โดย Bar ทั้งสามทำจากวัสดุเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และ Bar System กับ Specimen ต้องอยู่ในตำแหน่งที่รวมศูนย์กัน [3]



รูปที่ 2 การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่น [3]

Striker Bar จะถูกยิงไปกระทบกับ Incident Bar ที่อัตราความเร็วต่างๆ และ Bar ทั้งสองต้องไม่เสียรูปเกินกว่าช่วง Proportional Limit และเมื่อ Bar ทั้งสองกระทบกันทำให้เกิด Strain Wave แผ่ไปตลอดความยาวของ Incident Bar และเกิดการส่งผ่านและสะท้อนกลับของ Strain Wave ที่รอยต่อของแต่ละช่วง ดังรูปที่ 2 [3, 5] โดย Strain Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Incident Bar ใช้บันทึก Incident Wave (ϵ_i) และ Reflected Wave (ϵ_r) ขณะที่ใช้ Strain Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Transmitted Bar เพื่อบันทึก Transmitted wave (ϵ_t) ดังรูปที่ 3

การทดสอบด้วยเทคนิค SHPB อยู่บนสมมติฐานที่ว่า Specimen เกิดการเสียรูปแบบ Uniform Deformation ภายใต้สภาวะสมดุลแรง ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาค่า $\dot{\epsilon}_s$, ความเครียด (ϵ_s) และความเค้น (σ_s) ของ Specimen เป็นดังสมการต่อไปนี้ [1-5]

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{2c_0}{l_s} \epsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \epsilon_t(t) \quad (3)$$

เมื่อ c_0 , A_0 , และ E_0 แทน ความเร็วของคลื่นเสียง, พื้นที่หน้าตัด, และ Young's modulus ของ Pressure Bar ขณะที่ l_s และ A_s แทน ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของ Specimen

2.2 Parametric Design

Parametric Design คือกระบวนการสำหรับการออกแบบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ถูกกำหนดขึ้น โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่า Variable ต่างๆของ Parametric Model ขณะที่คงค่า Constrain ส่วนใหญ่ที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นเทคนิคจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับงานที่ยังมีความไม่แน่นอนสำหรับการออกแบบหรืองานที่ยัง ต้องการแก้ไข เช่น การปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการใช้งานนานขึ้น ขณะเดียวกันโปรแกรมทางด้าน CAD หรือ

CAD/CAM สมัยใหม่ นิยมนำเทคนิคนี้มากขึ้นเพราะ เล็งเห็นถึงประโยชน์ที่สามารถนำประยุกต์ใช้ได้ หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่แนะนำการ ประยุกต์เทคนิค Parametric Design ในด้านต่าง ๆ เช่น ในปี 2001 Myung และ Han [8] นำเสนอแนว ความคิดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรด้วย เทคนิคนี้ ขณะในปี 2006 Hernandez [9] นำเสนอ การประยุกต์เทคนิค Parametric Design ในการ ออกแบบเสาโบสถ์

2.3 Design Parameter สำหรับอุปกรณ์ทดสอบ ด้วยเทคนิค SPHB

Parameter ที่มีผลต่อการเกิด Strain Wave ในการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB คือขนาดมิติ Bar System, Specimen และอัตราเร็วเข้ากระแทก โดยเมื่อพิจารณาการกระแทกกันของเหล็กสองแท่ง [3-5] พบว่าขนาดมิติของ Bar System และ Specimen ณ อัตราเร็วเข้ากระแทกที่เท่ากัน จะไม่มี ผลต่อแอมพลิจูดของ ε_i ที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจาก ความเค้นที่เกิดขึ้นใน Bar จากการกระแทก

$$\sigma = \frac{\rho_0 V c_0}{2}$$

เมื่อ ρ_0 แทนความหนาแน่นของ Bar System และ V แทนอัตราเร็วเข้ากระแทก ถ้า Pressure Bar เสีย รูปไม่เกินกว่า Proportional Limit แล้ว ε_i สามารถ คำนวณหาได้จาก

$$\varepsilon_i = \frac{\rho_0 V c_0}{2E_0} \quad (4)$$

ขณะที่ความกว้างของคลื่น ε_i สามารถหาได้จาก สมการต่อไปนี้ [10]

$$\Delta t = \frac{2l_{str}}{c_0} \quad (5)$$

เมื่อ Δt แทนความกว้างของ Strain Wave และ l_{str} แทนความยาวของ Striker Bar แต่ทว่า Strain Wave ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่า $\dot{\varepsilon}_s$ และ ε_s ใน Specimen คือคลื่น ε_r แต่การหา σ_s ใน Specimen จะใช้คลื่น ε_i ดังที่แสดงในสมการที่ (3) แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 และสมมติฐานที่ว่า Specimen อยู่ในสภาวะสมดุลย์ แรงเป็นผลให้

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_s$$

ดังนั้นเมื่อนำความสัมพันธ์นี้แทนกลับไปยังสมการที่ (3) จะได้สมการการหา σ_s ในเทอมของ ε_i และ ε_r ดังนี้

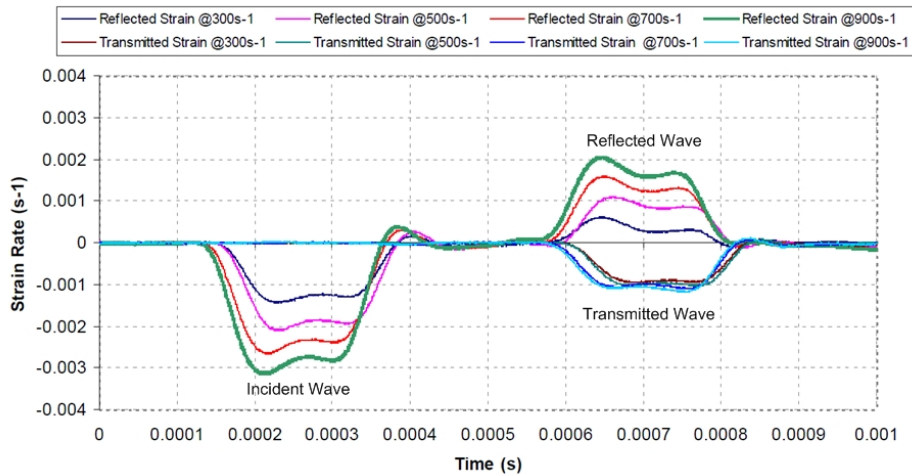
$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (6)$$

โดยคลื่น ε_r คือคลื่น ε_i ที่สะท้อนกลับมาจากช่วง รอยต่อระหว่าง Pressure Bar และ Specimen ดังนั้น จึงต้องพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Coefficient of Reflection, R_{coef}) ด้วย ซึ่งความเค้นที่ เกิดจากการสะท้อนกลับ (σ_r) ของ Strain Wave สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\sigma_r = R_{coef} \sigma_i$$

เมื่อ σ_i แทนความเค้นที่เกิดจากการแผ่ Strain Wave จากการกระแทก แต่เนื่องจากการเสียรูปของ Pressure Bar อยู่ภายใต้ Proportional limit ดังนั้น

$$E_0 \varepsilon_r = R_{coef} E_0 \varepsilon_i \quad (7)$$



รูปที่ 3 คลื่นที่บันทึกจากการทดสอบด้วยเทคนิค SHPB [3]

ซึ่ง Coefficient of Reflection สามารถหาได้จาก

$$R_{coef} = \frac{1 - n_G}{1 + n_G} \quad (8)$$

เมื่อ n_G แทน Wave Impedance Ratio ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$n_G = \frac{Z_{G1}}{Z_{G2}} \quad (9)$$

เมื่อ Z_G แทน Wave Impedance ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$Z_G = A\rho c \quad (10)$$

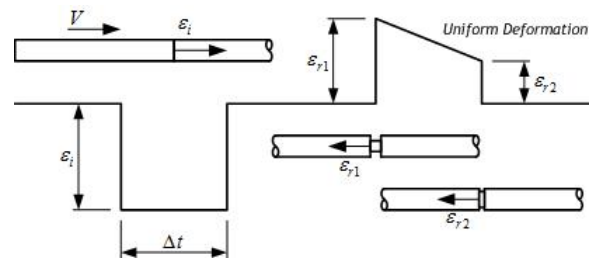
ดังนั้นนำสมการที่ (8) - (10) แทนในสมการที่ (7) ได้สมการหาคลื่น ε_r ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_r(t) = R_{coef} \cdot \frac{\rho_0 V c_0}{2E_0} \quad (11)$$

3. การประยุกต์เทคนิค Parametric Design

การทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB จะเกิดการแผ่คลื่น Strain Wave ใน Pressure Bar ซึ่งคลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับและส่งผ่านดังรูปที่ 3 และจากสมการที่ (1), (2) และ (6) ซึ่งใช้หาคุณสมบัติของ Specimen พบว่าใช้เพียงคลื่น ε_r เพียงคลื่นเดียว และสำหรับบทความนี้จะแบ่งคลื่น ε_r เป็น 2 ช่วงคือ ด้านหน้า (ε_{r1}) และ ด้านหลัง (ε_{r2}) โดยแอมพลิจูดของคลื่น ε_r จะมีน้อยกว่าแอมพลิจูดของคลื่น ε_i เพราะ Strain Wave บางส่วนถูกส่งผ่านไปและจากสมมติฐานว่า Specimen เสียรูปแบบ Uniform ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Specimen จึงใหญ่ขึ้น

มีผลให้ส่งผ่านคลื่นได้มากขึ้น ขณะที่แอมพลิจูดของคลื่น ε_r จะลดลงอย่างคงที่ และเมื่อ Specimen หยุดการเสียรูปค่าแอมพลิจูดของคลื่น ε_{r1} จะลดลง



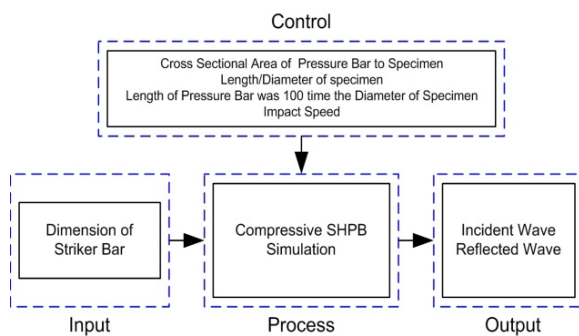
รูปที่ 4 Strain Wave ทางทฤษฎีจาก Incident Bar

เท่ากับ ε_{r2} (ดังรูปที่ 4) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (10) โดยความชันที่ลดลงเป็นแบบเชิงเส้น และ Δt ขึ้นกับความยาว Striker Bar ดังสมการที่ (5)

3.1 ขนาดมิติตั้งต้นของ Bar System และ Specimen

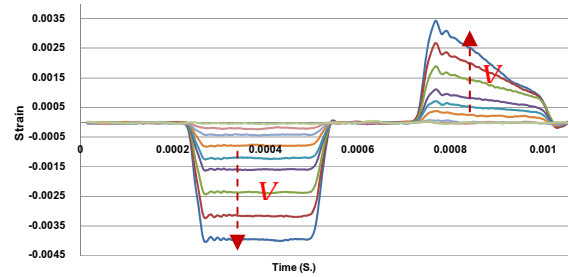
อุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค SHPB ที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องแรกนั้น สามารถทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของทองแดง 99.98% ที่ $\dot{\varepsilon}$ ได้เพียง 900 s^{-1} [3] ดังนั้นจึงต้องการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ที่สามารถทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของทองแดง 99.98% ที่ $\dot{\varepsilon}$ ได้สูงขึ้นซึ่งอัตราเร็วเข้ากระทงสูงสุดเมื่อใช้ AISI4340 เป็นวัสดุทำ Bar System และพิจารณาตามสมการที่ (4) ได้อัตราเร็วสูงสุดที่ 40 m/s จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ลักษณะจำเพาะของ Strain Wave จาก

การกวดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB นั้นถูกกำหนดด้วย Parameter ต่างๆ มากมาย สำหรับบทความนี้ Parameter ที่ต้องควบคุม (Constrain) ประกอบด้วย อัตราเร็วเข้ากระทก $\dot{\epsilon}$ ที่ต้องการกวดทดสอบ, สัดส่วน A_0/A_s เท่ากับ 2.3, สัดส่วน l/d ของ Specimen และ Pressure Bar เท่ากับ 0.5 และ 100 ตามลำดับ โดย Parameter ที่ปรับเปลี่ยน (Variable) ได้แก่ ขนาดมิติของ Striker Bar ที่มีผลต่อคลื่น ϵ_i และ ϵ_r (ดังรูปที่ 5) ภายใต้ข้อจำกัดการออกแบบคือ ความยาวของอุปกรณ์กวดทดสอบต้องไม่เกิน 7.5 m และ แรงดันลมสูงสุดที่ 15 bar โดยผลการจำลองของอุปกรณ์กวดทดสอบที่ยังไม่ปรับปรุงนั้นยึดตามงานวิจัยก่อนหน้า [3] (ดังรูปที่ 3) ขณะที่รูปที่ 6 เป็นผลการจำลองที่ปรับเปลี่ยนความยาวของ Striker Bar



รูปที่ 5 Design Parameter

จาก 0.25 m เป็น 0.69 m และเข้ากระทกที่อัตราเร็วเท่ากับ 40 m/s, 32 m/s, 24 m/s, 16 m/s, 12 m/s, 8 m/s, 4 m/s, 2 m/s และ 0.4 m/s โดยเมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดของการออกแบบพบว่า ที่แรงดันลม 15 bar ใช้ระยะทาง 0.5 m เพื่อทำความเร็วของ Striker Bar ให้ได้ความเร็วที่ 40 m/s เป็นผลให้ความยาวของอุปกรณ์กวดทดสอบเท่ากับ 8.5 m และ $\dot{\epsilon}$ ที่ได้ นั้นยังไม่ถึงเป้าหมายที่ 10^4 s^{-1} ดังนั้นจึงต้องลดขนาด Bar System และ Specimen ลงเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบอุปกรณ์กวดทดสอบนี้



รูปที่ 6 ผลจำลองที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m และยาว 0.69 m

3.2 การประยุกต์เทคนิค Parametric Design สำหรับการจำลอง

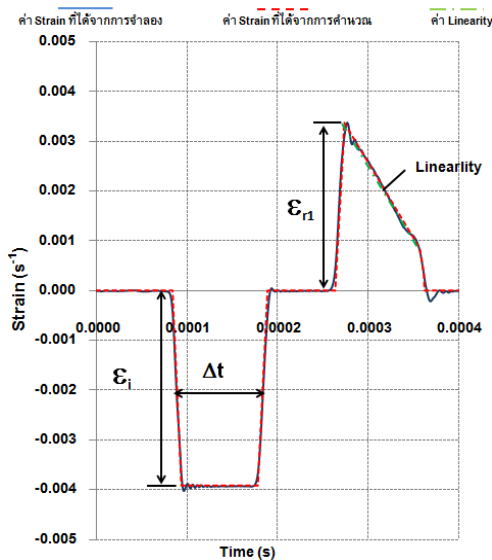
การจำลองการกวดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB นี้ เริ่มจากการสร้าง Parametric Model เฉพาะ Bar System และ Specimen แล้วจึงประยุกต์เทคนิค Parametric Design เพื่อแก้ไขขนาดมิติของ Parametric Model โดยการจำลองนี้ค่า Parameter ที่แก้ไข 4 ค่าคือ 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Bar System และ Specimen 2) ความยาว Pressure Bar และ Striker Bar 3) อัตราเร็วเข้ากระทก $\dot{\epsilon}$ ที่ทดสอบ 4) ระยะตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge

4. การจำลองและการประมวลผล Strain Wave

การจำลองการกวดทดสอบในบทความนี้ เพื่อศึกษาขนาดมิติที่เหมาะสมของ Bar System และ Specimen โดยค่ามิติขนาดตามตารางที่ 1 และอัตราเร็วเข้ากระทกเท่ากับ 40 m/s, 32m/s, 24 m/s, 16 m/s, 12 m/s, 8 m/s, 4 m/s, 2 m/s และ 0.4 m/s โดยคุณสมบัติของ AISI 4340 และ ทองแดง 99.98% ใช้ตาม Johnson-Cook Model

ตารางที่ 1 ขนาดมิติ Bar System และ Specimen

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Bar System (m)	ความยาว Striker Bar (m)	ความยาว Pressure Bar (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Specimen (m)	ความยาว Specimen (m)
0.0190	0.48	1.90	0.0125	0.0063
0.0160	0.44	1.60	0.0106	0.0053
0.0120	0.33	1.20	0.0079	0.0040
0.0095	0.26	0.95	0.0063	0.0032



รูปที่ 7 การวิเคราะห์คลื่นจาก Incident Bar

สำหรับการวิเคราะห์ Strain Wave ที่ได้จากการจำลอง ในบทความนี้จะสนใจเฉพาะคลื่นที่บันทึกได้จาก Incident Bar เท่านั้น โดยนำมาวิเคราะห์หาค่า ϵ_i , ϵ_{r1} , Δt และ Linearity of Deformation ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 ขณะที่ค่า Δt นั้นจะเลือกใช้ข้อมูลที่ 50% ของแอมพลิจูดคลื่น ϵ_i และคลื่น ϵ_r นั้นเลือกใช้ข้อมูลที่ระดับ 90% ของแอมพลิจูดแล้วนำมาเทียบกับค่าจากคำนวณทางทฤษฎีซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4), (5) และ (11) แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี (ϵ) แต่ละค่าจากสมการ

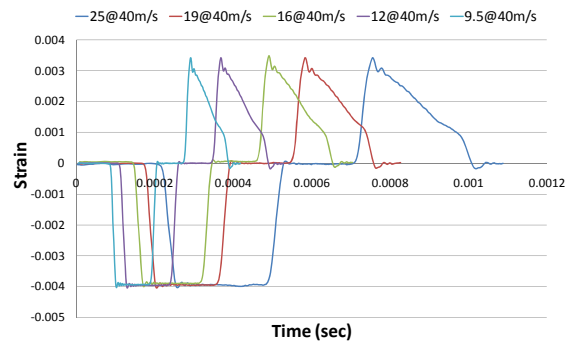
$$\epsilon = \frac{Value_{simulation} - Value_{theory}}{Value_{theory}} \times 100\% \quad (11)$$

โดยค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีเฉลี่ยของค่า ϵ_i , ϵ_{r1} , และ Δt แสดงด้วยตัวแปร ϵ_{ϵ_i} , $\epsilon_{\Delta t}$, และ ϵ_{ϵ_r} ตามลำดับ ขณะที่พิจารณา Linearity of Deformation ผ่านค่า R^2 จาก Linear Regression ของ $\epsilon_r(t)$ ตลอดช่วงการเสี้ยวรูป

5. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

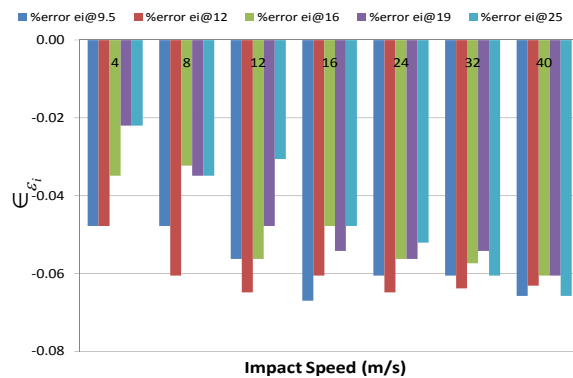
สัญญาณดิบของ Incident Wave ที่ได้จากการจำลองการทดสอบจะถูกนำไปทำการปรับปรุงสัญญาณ (Signal Conditioning) ด้วยเทคนิค Moving Average ก่อน (ดังรูปที่ 8) แล้วจึงจะนำไปวิเคราะห์

หาค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีเฉลี่ยของค่า ϵ_i , ϵ_{r1} , และ Δt รวมทั้ง Linearity of Deformation ต่อไป



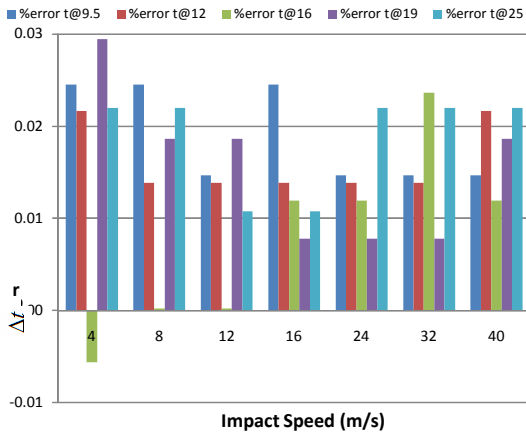
รูปที่ 8 ตัวอย่าง Incident Wave จากการจำลอง ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 40 m/s ของทุก Bar System

จากรูปที่ 9 พบว่า ค่า ϵ_{ϵ_i} สูงสุดเท่ากับ 6.7% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 40 m/s และน้อยที่สุดเท่ากับ 2.2% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 4 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 25$ mm และสังเกตได้ว่า ค่า ϵ_{ϵ_i} ของ Bar System แต่ละขนาดจะใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่ออัตราเร็วเข้ากระทกเพิ่มสูงขึ้น



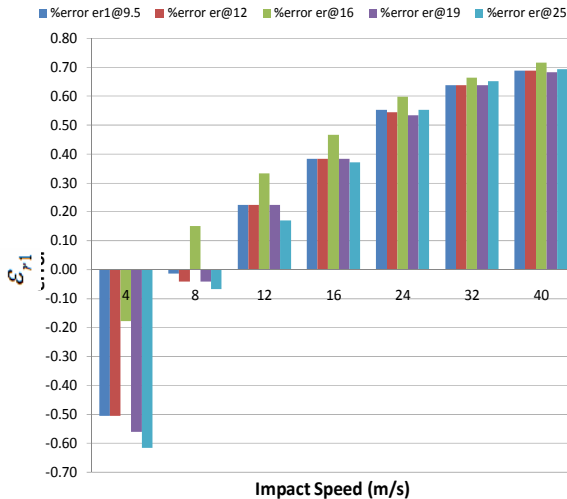
รูปที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของ ϵ_i

จากรูปที่ 10 พบว่า ค่า $\epsilon_{\Delta t}$ สูงสุดเท่ากับ 2.9% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 4 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 19$ mm และน้อยที่สุดเท่ากับ 0.09% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 12 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 16$ mm

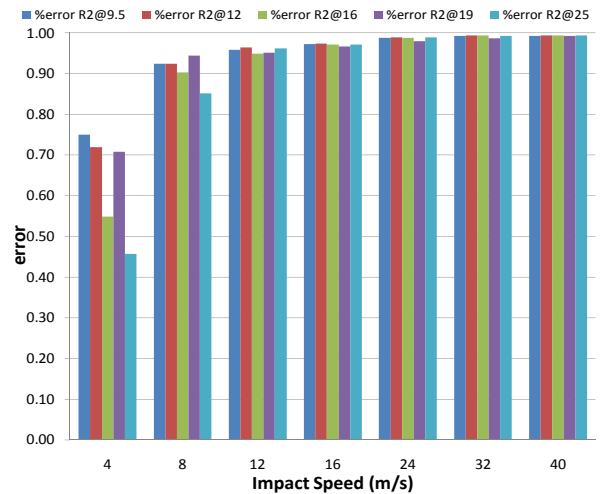


รูปที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของ Δt

จากรูปที่ 11 พบว่า ค่า ϵ_{r1} สูงสุดเท่ากับ 72% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 40 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 16$ mm และน้อยที่สุดเท่ากับ 2% ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 8 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 9.5$ mm และสังเกตได้ว่า ค่า ϵ_{r1} ของ Bar System แต่ละขนาดจะใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่ออัตราเร็วเข้ากระทกเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของ ϵ_{r1}



รูปที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของ R^2

จากรูปที่ 12 พบว่า ค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.989 ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 40 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 12$ mm และน้อยที่สุดเท่ากับ 0.46 ณ อัตราเร็วเข้ากระทก 4 m/s บน Bar System ขนาด $\varnothing 25$ mm

6. สรุปและวิจารณ์

การประยุกต์เทคนิค Parametric Design ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดสอบด้วยเทคนิค SHPB นี้สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพด้วยแผนงานแก้ไข Parametric Model ที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดและเวลาในการออกแบบได้

ค่าความคลาดเคลื่อนจากลักษณะจำเพาะทางทฤษฎีของ Incident Wave ($\epsilon_{\Delta t}$ และ ϵ_{r1}) ในแต่ละกรณีใกล้เคียงกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5% และ 5.3% ตามลำดับ ดังนั้นมิติขนาดซึ่งเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปจัดสร้างอุปกรณ์ซึ่งให้การทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นนั้น โดยจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของแอมพลิจูดเริ่มต้นของ ϵ_r (ϵ_{r1}) เท่ากับ 26.4% และค่า Linearity of Deformation (R^2) ประมาณ 0.936 ได้แก่ Striker Bar ยาว 0.48 m และ Pressure Bar คู่ ยาว 1.9 m ที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 19 mm เท่ากัน ขณะที่ Specimen มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm ยาว 6.3 mm

เอกสารอ้างอิง

- [1] Woei-Shyan Lee, Chi-Feng Lin, "Plastic deformation and fracture behavior of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperature", Material Science and Engineering, A241, 1998, pp 48-59.
- [2] V.S. Deshpande, N.A. Fleck, "High Strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams", International Journal of Impact Engineering 24, 2000, pp 277-298
- [3] วิฑิตะพล หุยะนันท์ และ เอกวัฒน์ นิลวิจิตร, "อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติเชิงพลวัตของวัสดุด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 4-7 พฤศจิกายน 2009
- [4] เอกวัฒน์ นิลวิจิตร และ วิฑิตะพล หุยะนันท์, "ระบบยิง Striker Bar ด้วยลมอัดสำหรับ Split Hopkinson Pressure Bar", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 15-17 ตุลาคม 2008
- [5] กฤษฎา บุญศิริ และ วิฑิตะพล หุยะนันท์, "การจำลองการทดสอบคุณสมบัติเชิงจลน์ของวัสดุด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 15-17 ตุลาคม 2008
- [6] O.S. Lee, M.S. Kim, "Dynamic Material Property Characterization by using split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique", Nuclear Engineering and Design 226, 2003, pp 119-125
- [7] Horacio Ramirez, Carlos Rubio-Gonzalez, "Finite-element simulation of wave propagation and dispersion in Hopkinson bar test", Material and Design, 2004
- [8] Sehyun Myung, Soonhung Han, "Knowledge-base parametric design of mechanical product base on configuration design method", Expert System and Application 21, 2001, pp 99-107
- [9] Carlos Roberto Barrios Hernandez, "Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi", Design Study 27, 2006, pp 309-324
- [10] Karl F. Graff, "Wave Motion in Elastic Solid", Reprint, Dover Publication, Inc, 1991