วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30, ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2563
The Journal of KMUTNB., Vol. 30, No. 1, Jan.–Mar. 2020

บทความวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ

อนิรุทร์ กำแน่น และ ธนสาร อินทรกำธรชัย*
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รามิล เกศวรกุล
ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สุธี โอฬารฤทธินันท์
ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมน้ำหนักเบา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ยิ่งยศ เอื้ออุฬาร
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัญฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1646 5626 อีเมล: intara99@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.12.009
รับเมื่อ 28 พฤษภาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 5 กรกฎาคม 2562 ตอบรับเมื่อ 23 กรกฎาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 20 ธันวาคม 2562
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีต้นทุนแพงและคุณภาพสูง การผลิตเพียงไม่กี่ชิ้นส่งผลต่อต้นทุนที่สูงเกินความจำเป็น ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุที่ทำจากพีแอลเอเข้ามาช่วยในการทำแม่พิมพ์ในลักษณะของไส้แบบ และใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงรุ่น Bosch AQT 33-11 สร้างแรงดันในการขึ้นรูป โดยได้ออกแบบการทดลองไว้เป็น 2 กรณี ได้แก่ 1) การขึ้นรูปโดมอย่างง่ายที่ใช้วัสดุ SUS304 หนา 0.6 มิลลิเมตร และ 2) การขึ้นรูปลายนูนต่ำที่ใช้วัสดุ SUS304 หนา 0.4 มิลลิเมตร โดยใช้แรงดันที่ 80 บาร์ และแรงบีบยึดที่ 30 ตัน ในการทดลองการขึ้นรูป ผลการทดสอบพบว่าการขึ้นรูปโดมอย่างง่ายและการขึ้นรูปลายนูนต่ำสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดรอยฉีกขาดและยับย่น ในขณะที่แม่พิมพ์ในลักษณะไส้แบบก็ไม่เกิดความเสียหายด้วยเช่นกัน หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมที่ 3 ปัจจัย ได้แก่ เวลา คุณภาพ และต้นทุน ซึ่งผลปรากฏว่าในด้านของเวลาการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำภายใต้ต้นทุนต่ำนั้นใช้เวลามากกว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม ในด้านคุณภาพของชิ้นงานที่ได้การขึ้นรูปพบว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำมีการกระจายตัวของความหนาชิ้นงานที่ดีกว่า และในด้านของต้นทุน การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นถ้าผลิตชิ้นงานไม่เกิน 3,651 ชิ้น จะมีต้นทุนที่ถูกกว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงสรุปว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิตินั้น สามารถเป็นไปได้ และคุ้มค่ากว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม ถ้าต้องการชิ้นงานที่เน้นคุณภาพและผลิตเพียงไม่เกิน 3,651 ชิ้น ในกรณีที่ใช้วัสดุและเครื่องจักรเดียวกัน

คำสำคัญ: การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ ต้นทุนต่ำ

การอ้างอิงบทความ: อนิรุทร์ กำแน่น ธนสาร อินทรกำธรชัย รามิล เกศวรกุล สุธี โอฬารฤทธินันท์ และ ยิ่งยศ เอื้ออุฬาร, "การศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 26–35, ม.ค.–มี.ค. 2563.

Research Article

Investigation of Low Cost in High Pressure Sheet Hydroforming with 3D Printing Technology

Aniruth Kamnean and Thanasan Intarakumthornchai*
Department of Industrial Engineering, Faulty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand
Ramil Kesvarakul
Department of Production Engineering, Faulty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand
Sutee Olarnrithinun
Lightweight Engineering Laboratory (LWE), National Metal and Materials Technology Center (MTEC), NSTDA, Pathum Thani, Thailand
Yingyot Aue-u-lan
Department of Mechanical and Process Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1646 5626, E–mail: intara99@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.12.009
Received 28 May 2019; Revised 5 July 2019; Accepted 23 July 2019; Published online: 20 December 2019
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Sheet hydroforming process is required expensive and high-quality dies and equipment to produce parts. It makes a high mixed low-volume production become very costly. Therefore, this research is aimed to propose and investigate the possibility to produce a low-cost hydroforming by using a 3D printing technology with PLA filament to manufacture the die insert and a household water pressure pump modeled Bosch AQT 33-11 to generate the forming pressure. This investigation was divided into forming of 2 types of the hydroformed parts, namely 1) a simple dome configuration and 2) an embossing part by using SUS 304 sheet with the thickness of 0.6 and 0.4 mm, respectively. The experiments were performed with a constant pressure of 80 bars (the max pressure of the pump) and the clamping force of 30 tons. The simple dome and embossing parts were successfully formed without any crack and wrinkle. The die inserts after used are still in the working conditions without any damage. This technique was compared with the traditional stamping process in 3 criteria; production time, product quality and cost. The results show the 3D-printing technology takes more production time than that of the stamping process. However, for the part quality in term of a surface quality and thickness distributions, the 3D-printing could provide much better quality. The overall cost to produce the low volume product, in this study is lower than 3,651 parts, the 3D-printing is cheaper. Therefore, the proposed concept of employing 3D-printing and a commercial water pressure pump would be alternative to replace the conventional stamping process in the future.

Keywords: Sheet Hydroforming, 3D Printing Technology, Low Cost

Please cite this article as: A. Kamnean, T. Intarakumthornchai, R. Kesvarakul, S. Olarnrithinun, and Y. Aue-u-lan, "Investigation of low cost in high pressure sheet hydroforming with 3D printing technology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 1, pp. 26–35, Jan.–Mar. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นถูกพัฒนามาจากการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบปกติ ที่อาศัยแรงกระทำของเครื่องส่งผ่านมายังแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กเพื่อทำการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในขณะที่การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นจะอาศัยแรงดันน้ำกระทำกับโลหะแผ่นโดยตรงเพื่อให้เข้ารูปกับแม่พิมพ์ โดยการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทด้วยกัน [1], [2] แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูง [3] โดยข้อดีหลักๆ ของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงนั้น คือความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีขึ้น เนื่องจากมีการกระจายตัวของความเค้นได้ดีกว่า ผิวชิ้นงานมีความสวยงาม สามารถลดจำนวนแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ [4] และใช้ระบบควบคุมแรงดันน้ำที่ไม่ซับซ้อนมาก เป็นต้น

ปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นมีต้นทุนที่สูง และการผลิตด้วยวิธีการนี้นั้นไม่เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก ดังนั้นการที่ผลิตชิ้นงานเพียงไม่กี่ชิ้นนั้นส่งผลให้ต้นทุนต่อชิ้นมีต้นทุนที่สูง ซึ่งงานวิจัยนี้มีความพยายามในการทดสอบความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในการขึ้นรูปลงโดยใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปที่ผลิตจากเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติประเภทเอฟดีเอ็ม (Fused Deposition Modeling; FDM) ซึ่งเป็นการผลิตชิ้นงานที่ใช้เส้นพลาสติก (Filament) แบบพีแอลเอ (Polylactic Acid; PLA) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการพิมพ์ 3 มิติมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติมีความแข็งแรง ราคาถูก การหดตัวของพลาสติกนั้นน้อยกว่าแบบอื่นๆ ส่งผลให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานสำเร็จได้ง่ายโดยไม่เกิดการยกตัวจากฐานความร้อน (Heat Bed) นอกจากนั้นยังสามารถซื้อหาได้ง่าย [5] การทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้น พีแอลเอจะถูกให้ความร้อนและถูกป้อนผ่านหัวฉีดทีละชั้นจนครบรูปร่างชิ้นงาน [6] ส่วนการสร้างแรงดันน้ำได้ใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงรุ่น Bosch AQT 33-11 เป็นเครื่องสร้างแรงดันน้ำ ซึ่งเป็นประเภทปั๊มแทนที่เชิงบวก (Positive Displacement Pump) โดยจะมีกลไกความปลอดภัยในกรณีถ้าอัดแรงดันน้ำให้ถึงขีดจำกัดของตัวเครื่องแล้วนั้น ทางออกของน้ำถูกปิดตัวเครื่องจะไม่สามารถทำงานต่อได้จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีการไหลเวียนของน้ำขาออก [7] ซึ่งผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์ดังกล่าวมาทำการทดสอบความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำโดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ

รูปที่ 1 ความเสียหายบริเวณพื้นผิวของแม่พิมพ์

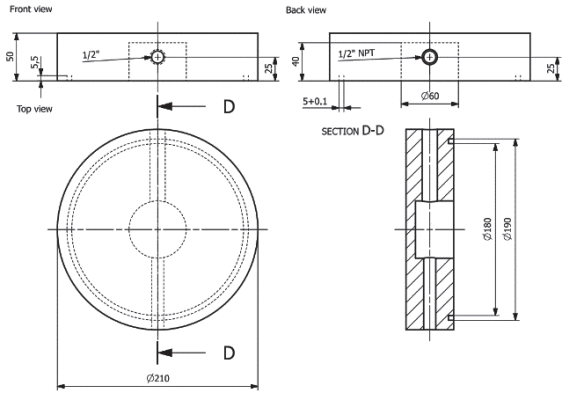
2. วิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แบ่งเนื้อหาสำคัญเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 1) การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้ 2) การออกแบบชุดแม่พิมพ์ 3) การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 4) การเตรียมการทดลอง

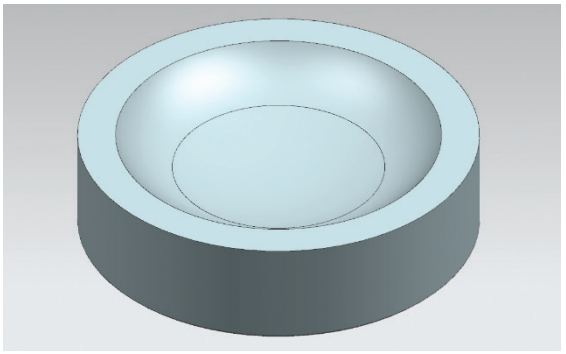
2.1 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้

ก่อนที่งานวิจัยนี้จะเริ่มขึ้น ได้ทำการทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง Bosch AQT 33-11 ที่จะนำไปใช้ในการทดลองขึ้นรูปโลหะ พบว่าเป็นประเภทปั๊มแบบแทนที่เชิงบวก และสามารถสร้างแรงดันจริงๆ วัดได้อยู่ที่ 80 บาร์ ซึ่งส่งผลให้การออกแบบชุดแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องออกแบบภายใต้เงื่อนไขที่แรงดัน 80 บาร์ ให้สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มแรงดันในการขึ้นรูปได้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง

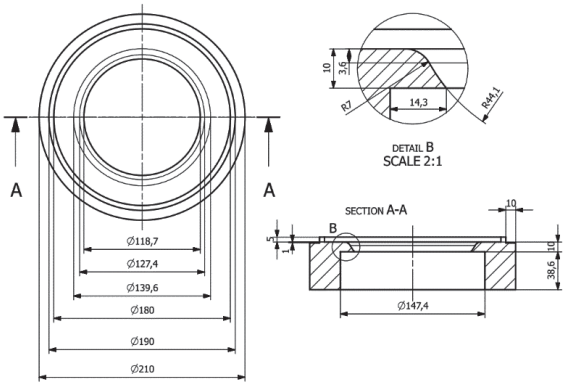
เริ่มจากการทดสอบการขึ้นรูปเบื้องต้นโดยใช้แม่พิมพ์ที่ผลิตจากเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติทั้งหมด ซึ่งผลปรากฏว่าเกิดความเสียหายที่บริเวณพื้นผิวของแม่พิมพ์ เนื่องจากเกิดการไหลและยับย่นของโลหะดังแสดงในรูปที่ 1



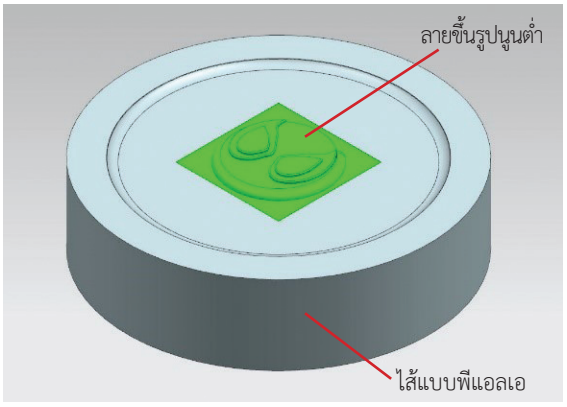
รูปที่ 2 Counter Pot



รูปที่ 4 แบบโดมอย่างง่าย



รูปที่ 3 Steel Ring



รูปที่ 5 แบบนูนต่ำ

2.2 การออกแบบชุดแม่พิมพ์

1) Counter Pot ที่ทำหน้าที่เป็นบ่อเก็บแรงดันน้ำที่จะนำไปใช้ในการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2

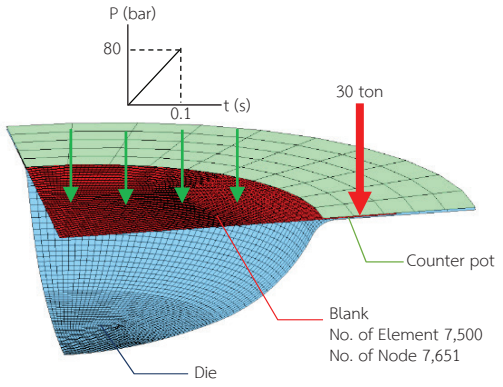
2) Steel Ring ที่ทำหน้าที่ป้องกันพื้นผิวของแม่พิมพ์ไม่ให้เกิดความเสียหายจากการยับย่นของเหล็กโดยออกแบบให้สามารถใส่ไส้แบบพีแอลเอ (PLA Insert Die) และสามารถเปลี่ยนรูปร่างไส้แบบ (Insert) ได้หลากหลายดังแสดงในรูปที่ 3

3) ไส้แบบพีแอลเอ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบโดมอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 4 และแบบนูนต่ำที่สามารถเปลี่ยนลายในการขึ้นรูปได้ โดยจะเว้นช่องว่างไว้ใส่ไส้แบบลวดลายต่างๆ ได้ ซึ่งลายที่เลือกใช้นั้นเป็นลายที่มีการไล่ระดับความสูงที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5

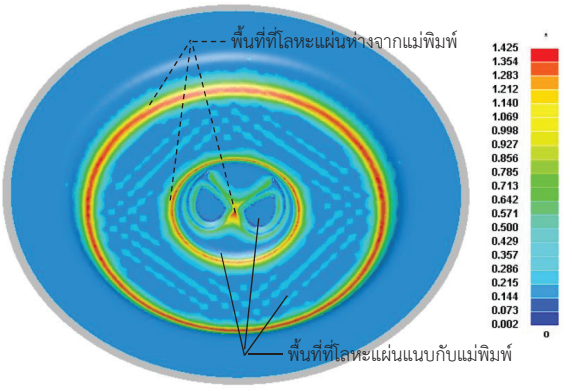
2.3 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นโลหะหลังจากที่ใส่แรงกระทำต่างๆ [8] ซึ่งในแม่พิมพ์ทั้ง 2 แบบนั้น ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่เหมือนกัน ได้แก่ แรงดันกระทำกับผิวของโลหะแผ่นเป็นเส้นตรง โดยกำหนดแรงดันสูงสุดที่เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงสามารถทำได้คือ 80 บาร์ ใช้เวลาในการขึ้นรูป 0.1 วินาที และแรงจับยึดแม่พิมพ์ที่ 30 ตัน

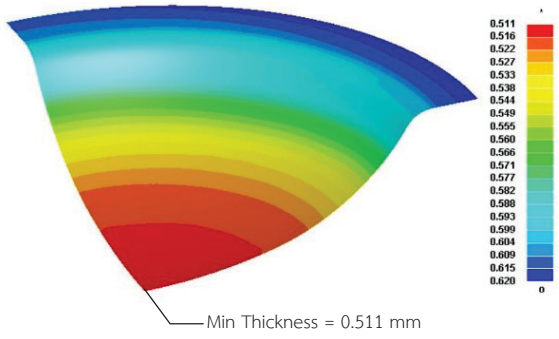
การจำลองการขึ้นรูปใช้วิธีการพลวัติแบบชัดแจ้ง (Dynamic Explicit) โดยจำนวนเอลิเมนต์ของโลหะแผ่นเท่ากับ 7,500 เอลิเมนต์ และมี 7,651 จุดต่อ (Node) กำหนดคุณสมบัติวัสดุแบบ Barlat-Lain's Three-parameter โดย



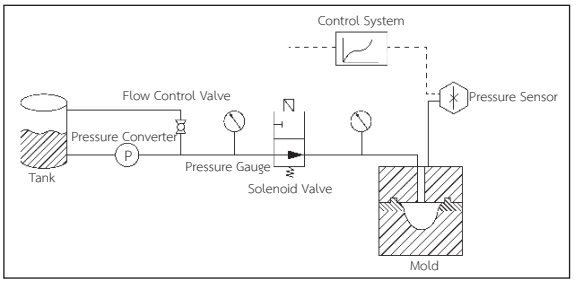
รูปที่ 6 เงื่อนไขในการจำลองการขึ้นรูป



รูปที่ 8 ผลการจำลองระยะห่างระหว่างโลหะแผ่นกับแม่พิมพ์



รูปที่ 7 ผลการกระจายความหนาของโดมอย่างง่าย



รูปที่ 9 ระบบในการทดลอง

มีค่า k = 1,211.7, n = 0.36, r_0 = 0.346, r_{45} = 0.432 และ r_{90} = 0.256 ดังแสดงในรูปที่ 6

โดยผลการจำลองของแบบโดมอย่างง่ายที่ใช้วัสดุ SUS304 หนา 0.6 มิลลิเมตร บ่งบอกว่าพารามิเตอร์ที่ใช้นั้นสามารถขึ้นรูปโลหะแผ่นได้ และมีการกระจายตัวของความหนาชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าที่จุดยอดโดมมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.511 มิลลิเมตร

ผลการจำลองแบบนูนต่ำที่ใช้วัสดุ SUS304 หนา 0.4 มิลลิเมตร ที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างโลหะแผ่นกับแม่พิมพ์ พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่แนบกับแม่พิมพ์โลหะบ่งบอกว่าสามารถขึ้นรูปได้ มีบางส่วนได้แก่บริเวณตามขอบของชิ้นงานที่ระยะห่างของโลหะแผ่นกับแม่พิมพ์อยู่ที่ 1.425 มิลลิเมตร ซึ่งหมายความว่าแรงดันที่สร้างจากเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงนั้นไม่เพียงพอที่จะขึ้นรูปชิ้นงานในบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 8

2.4 การเตรียมการทดลอง

1) การสร้างระบบแรงดันและจับยึดชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบของการทดลอง เพื่อต้องการให้ปั๊มน้ำสามารถสร้างแรงดันให้พร้อมสำหรับการขึ้นรูปตลอดเวลา โดยมีถังน้ำไว้สำหรับรองรับน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อเข้ากับเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง และไหลเวียนเข้าถังน้ำโดยมีวาล์วควบคุมการไหลที่สามารถเปิด-ปิดทำให้ควบคุมแรงดันที่ออกมาจากเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงได้ตามความต้องการ โดยชุดควบคุมอย่างง่ายที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก (Micro Controller) คอยสั่งการโซลีนอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) ซึ่งชุดควบคุมนี้ถ้าพัฒนาอย่างเต็มประสิทธิภาพจะทำให้สามารถควบคุมแรงดันตามกราฟแรงดันที่ได้กำหนดไว้ และในระหว่างทางน้ำในระบบจะมีเกจวัดแรงดันน้ำ (Pressure Gauge) ไว้ตรวจสอบแรงดันน้ำที่ออกจากเครื่อง และมีเครื่องวัดแรงดันน้ำ (Pressure Sensor) ไว้ตรวจสอบแรงดันในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 10 Bosch AQT 33-11

รูปที่ 11 ไส้แบบโดมอย่างง่ายที่ผลิตจากเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ

โดยมีเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงที่สร้างแรงดันได้สูงสุด 80 บาร์ เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันน้ำของ Bosch AQT 33-11 ดังแสดงในรูปที่ 10 และใช้เครื่องกด (Press Machine) แบบไฮดรอลิกเพื่อจับยึดชุดแม่พิมพ์

2) การสร้างไส้แบบพีแอลเอ (PLA Insert Die) ได้ทำการผลิตแม่พิมพ์พีแอลเอทั้ง 2 ลักษณะที่ออกแบบไว้โดยเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งได้ใช้เงื่อนไขในการพิมพ์ ได้แก่ Infill 50% ในรูปแบบของรังผึ้ง (Full Honeycomb) ความหนาของเลเยอร์ด้านบน (Top) 5 ชั้น ด้านล่าง (Bottom) 3 ชั้น ชั้นละ 0.2 มิลลิเมตร และความหนาผนังชิ้นงาน (Shell) 3 ชั้น ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 0.4 มิลลิเมตร เพื่อเสริมความแข็งแรงให้ไส้แบบพีแอลเอ ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12

3) การสร้างชุดแม่พิมพ์ หลังจากที่ทำการออกแบบ Counter Pot และ Steel Ring ในข้างต้น ได้ทำการผลิตชิ้นงานตามแบบที่กำหนดไว้ดังแสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 12 ไส้แบบนูนต่ำและลายขึ้นรูปนูนต่ำที่ผลิตจากเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ

รูปที่ 13 Counter Pot และ Steel Ring

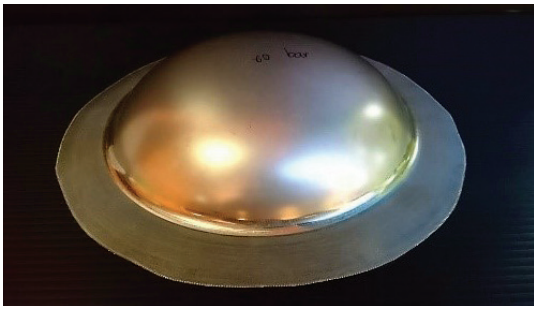
3. การทดลองการขึ้นรูป

หลังจากได้เตรียมการทดลองในหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้น ได้นำระบบและชุดแม่พิมพ์มาทำการทดลองการขึ้นรูป โดยแบบโดมอย่างง่ายนั้นได้ออกแบบการทดลองให้ขึ้นรูปโลหะด้วยน้ำแบบแรงดันสูงที่ระดับแรงดันน้ำ 80 บาร์ และแรงจับยึดที่ 30 ตัน เพื่อดูพฤติกรรมในการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งผลการทดลองนั้น วัสดุ SUS304 หนา 0.6 มิลลิเมตร สามารถขึ้นรูปได้โดยที่ไม่มีการแตกและยับย่นดังแสดงในรูปที่ 14

ในส่วนของแบบนูนต่ำนั้นสามารถขึ้นรูปโดยที่ไม่มีการแตก และยับย่นของโลหะเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 15 โดยสภาพของแม่พิมพ์ไส้แบบพีแอลเอยังคงสภาพปกติและสามารถนำไปใช้งานขึ้นรูปในชิ้นต่อๆ ไปได้ ทั้ง 2 ลักษณะของการขึ้นรูป

4. การเปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับผลจำลอง

ชิ้นงานแบบโดมอย่างง่ายที่ได้ทำการขึ้นรูปสำเร็จได้ถูกนำ

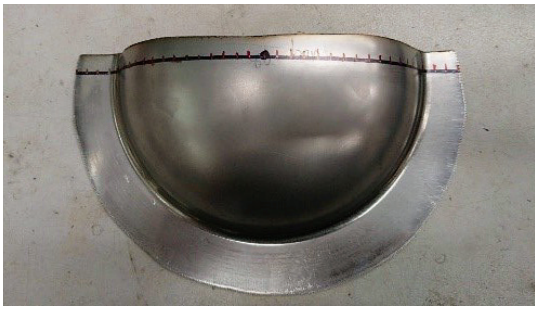


รูปที่ 14 ผลการทดลองแบบโดมอย่างง่าย

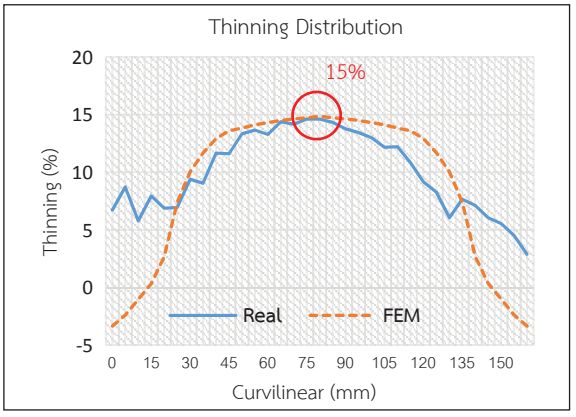
รูปที่ 15 ผลการทดลองแบบนูนต่ำ

มาทำการผ่าชิ้นงาน เพื่อวัดค่าความหนาตลอดแนวความยาวเส้นโค้งของโดม (Curvilinear) โดยวัดจากจุดยอดของโดมและห่างออกช่วงละ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 16 หลังจากนั้นได้ใช้ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ในการวัดความหนาตลอดแนวความยาวเส้นโค้งของโดม จุดละ 3 ครั้ง ได้นำชุดข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับผลจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าการกระจายตัวของความบาง (Thinning) ตามแนวความยาวของเส้นโค้ง มีค่าใกล้เคียงกันและค่าความบางมากสุดที่บริเวณยอดโดมที่เท่ากันอยู่ที่ 15% ดังแสดงในรูปที่ 17

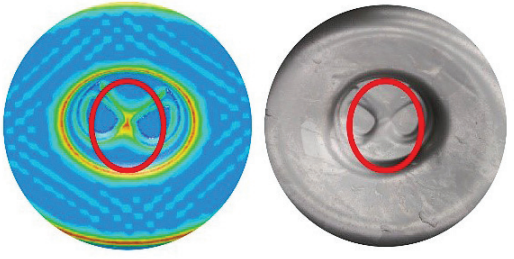
ในส่วนของการขึ้นรูปชิ้นงานแบบนูนต่ำนั้นผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบรูปร่างระหว่างชิ้นงานจริงและผลจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีบางส่วนที่แรงดันสูงสุดของเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงนั้นไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปอย่างที่เปรียบเทียบในผลจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อ



รูปที่ 16 ชิ้นงานที่ถูกผ่าเพื่อวัดการกระจายของความหนา



รูปที่ 17 เปรียบเทียบการกระจายตัวค่าความบางของชิ้นงานจริงกับผลจำลอง

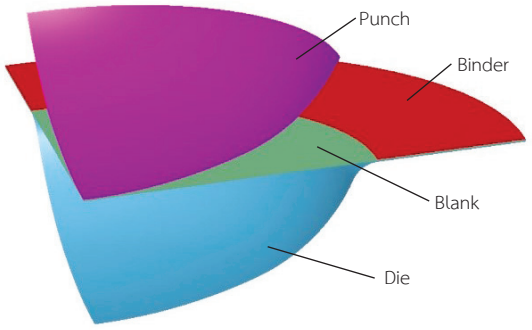


รูปที่ 18 เปรียบเทียบรูปร่างชิ้นงานจริงกับผลจำลอง

ขั้นต้นดังแสดงในรูปที่ 18

5. การเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำภายใต้ต้นทุนต่ำกับแบบดั้งเดิม

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความคุ้มใน 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1) เวลา 2) คุณภาพ และ 3) ต้นทุน



รูปที่ 19 ชุดแม่พิมพ์ของการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม

5.1 การเปรียบเทียบด้านเวลา

จากการที่ทำการจับเวลาในการทดลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำภายใต้ต้นทุนต่ำนั้น พบว่าสามารถผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 8 ชิ้น/ชั่วโมง ซึ่งการขึ้นรูปโลหะแบบดั้งเดิมที่ชุดแม่พิมพ์ประกอบด้วย พันช์ (Punch) ดาย (Die) และแผ่นจับยึด (Binder) ทำจากโลหะนั้นประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญแล้วว่าในลักษณะชิ้นงานแบบเดียวกัน สามารถผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 100 ชิ้น/ชั่วโมง

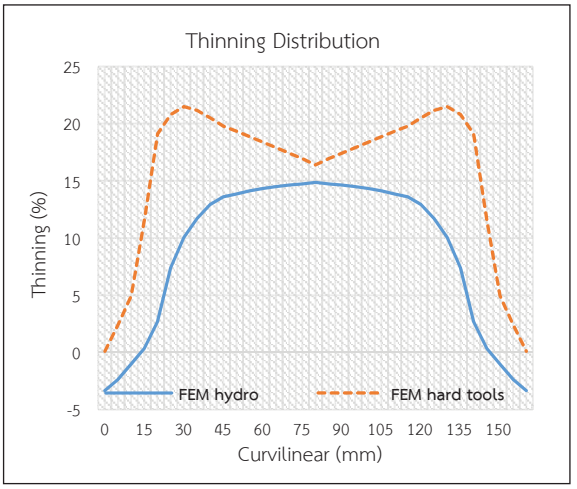
5.2 การเปรียบเทียบด้านคุณภาพ

ผู้วิจัยได้นำทั้ง 2 กระบวนการมาจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้ลักษณะชิ้นงานเดียวกัน โดยชุดแม่พิมพ์ของการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมที่ทำจากโลหะนั้นประกอบไปด้วยพันช์ ดาย และแผ่นจับยึด ดังแสดงในรูปที่ 19

จากนั้นนำผลจำลองที่ได้ของทั้ง 2 กระบวนการมาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความบางพบว่าการกระจายตัวของความหนาตามแนวความยาวของเส้นโค้งของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำนั้นมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 20

5.3 การเปรียบเทียบในด้านต้นทุน

ต้นทุนที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปนั้นแบ่งออกเป็น ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ค่าแม่พิมพ์ ค่าเครื่องจักร ค่าวัสดุ และต้นทุนผันแปร



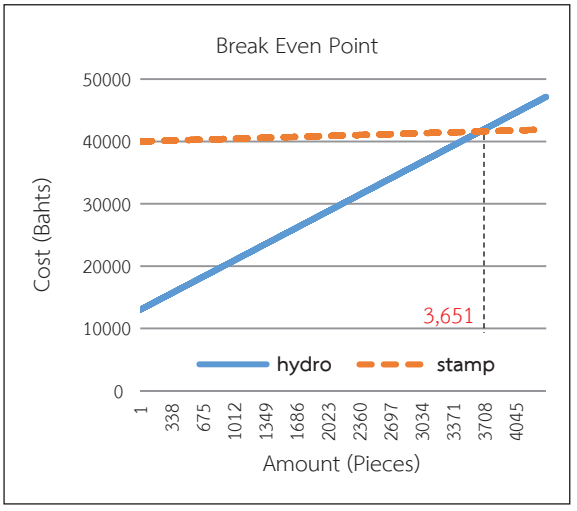
รูปที่ 20 เปรียบเทียบการกระจายตัวค่าความบางของชิ้นงานทั้ง 2 กระบวนการ

ได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าการผลิต ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการที่ผู้วิจัยนำมาเปรียบเทียบนั้น มีค่าเครื่องจักร และค่าวัสดุที่เหมือนกันจึงไม่ได้นำมาคิดในการประเมินต้นทุนด้วย

ในส่วนของต้นทุนคงที่ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำประกอบไปด้วย Counter Pot ต้นทุน 5,000 บาท Steel Ring ต้นทุน 7,000 บาท ไส้แบบพีแอลเอ ต้นทุน 1,000 บาท และในส่วนของต้นทุนคงที่ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมได้แก่ ชุดแม่พิมพ์ต้นทุน 40,000 บาท

ในส่วนของต้นทุนแปรผันของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำ ได้แก่ ค่าแรง 1 คน (ผู้ชำนาญการ) ต้นทุนวันละ 500 บาท หรือคิดเป็น 62.5 บาทต่อชั่วโมง จากข้อมูลข้างต้นมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 8 ชิ้นต่อชั่วโมง ทำให้ค่าแรงต่อชิ้นนั้นเท่ากับ 7.8125 บาท และในส่วนของต้นทุนแปรผันของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมได้แก่ค่าแรง 1 คน ต้นทุนวันละ 350 บาท หรือคิดเป็น 43.75 บาทต่อชั่วโมง มีอัตราการผลิตอยู่ที่ 100 ชิ้นต่อชั่วโมง ทำให้ค่าแรงต่อชิ้นนั้นเท่ากับ 0.4375 บาท ดังสมการที่ (1)

$$\text{ต้นทุนแรงงาน (บาท/ชิ้น)} = \frac{\text{ต้นทุนแรงงาน (บาท/ชม.)}}{\text{อัตราการผลิต (ชิ้น/ชม.)}} \quad (1)$$



รูปที่ 21 กราฟเปรียบเทียบต้นทุนทั้ง 2 กระบวนการ

ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการสรุปต้นทุนดังแสดงในตารางที่ 1 และได้นำต้นทุนต่างๆ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบดังสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 สรุปต้นทุนของ 2 กระบวนการ

ประเภทต้นทุน	ขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำ	ขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม
อัตราการผลิต (ชิ้น/ชม.)	8	100
ต้นทุนคงที่ (บาท)	13,000	40,000
ต้นทุนแปรผัน (บาท/ชม.)	62.5	43.75
ต้นทุนแปรผัน (บาท/ชิ้น)	7.8125	0.4375

$$\text{ต้นทุนรวม} = \text{ต้นทุนคงที่} + (\text{จำนวนชิ้นงาน} \times \text{ต้นทุนแปรผัน}) \quad (2)$$

พบว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำนั้น มีต้นทุนที่ถูกกว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมที่ชุดแม่พิมพ์ประกอบไปด้วย พันช์ ดาย และแผ่นจับยึดที่ทำจากโลหะ ภายใต้การผลิตชิ้นงานที่ต่ำกว่า 3,651 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 21

6. สรุป

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแรงดันสูงภายใต้ต้นทุนต่ำ โดยใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ ที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้นั้น สามารถขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ทำจากวัสดุ SUS304 ได้ ทั้งแบบโดมอย่างง่าย (ทรงสูง) และแบบนูนต่ำที่ความหนา 0.6 และ 0.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ได้ค่อนข้างสมบูรณ์ด้วยแรงดันสูงสุดของเครื่องฉีดน้ำที่ 80 บาร์ และแรงบีบที่ 30 ตัน ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างใดๆ ได้ แต่ต้องอยู่ภายใต้ขนาดของ Steel Ring และแรงดันสูงสุดที่กำหนด รวมถึงคุณสมบัติของโลหะแผ่นที่จะนำมาใช้ด้วย โดยในเบื้องต้นก่อนที่จะทำการสร้างไส้แบบพีแอลเอ เพื่อผลิตชิ้นงานจริง ควรจะทำการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อน เพื่อศึกษาว่าค่าขีดจำกัดของระบบสามารถขึ้นรูปชิ้นงานดังกล่าวได้หรือไม่ ซึ่งข้อดีของระบบดังกล่าวนั้นคือสามารถขึ้นรูปชิ้นงานใดๆ ได้ง่าย เพียงเปลี่ยนไส้แบบพีแอลเอ แต่ข้อเสียของระบบนี้คือไม่สามารถรองรับการผลิตชิ้นงานที่มีความต้องการจำนวนมากๆ ได้ ดังนั้นระบบดังกล่าวจึงเหมาะสมกับการผลิตที่มีความหลากหลายแต่ปริมาณไม่มาก (Low Volume Production) และยังได้ชิ้นงานที่การกระจายตัวของค่าความบางอย่างสม่ำเสมออีกด้วย ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิมที่ 3 ปัจจัยได้แก่ เวลา คุณภาพ และต้นทุน ซึ่งผลปรากฏว่าในด้านของเวลาการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำภายใต้ต้นทุนต่ำนั้นใช้เวลามากกว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม 6.9 นาที ในด้านคุณภาพของชิ้นงานที่ได้การขึ้นรูปพบว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำมีการกระจายตัวของความหนาชิ้นงานที่ดีกว่า และในด้านของต้นทุน การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นถ้าผลิตชิ้นงานไม่เกิน 3,651 ชิ้น จะมีต้นทุนที่ถูกกว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบดั้งเดิม

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องจักรและการทดสอบจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และได้รับการสนับสนุนด้านการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Altan, H. palaniswamy, and Y. Aue-u-lan, "Advanced in hydroforming for manufacturing automotive parts,"*Journal of Testing and Evaluation*, pp. 361–372, 2002.

[2] D. Schmoeckel, C. Hielscher, R. Huber, and M. Geiger, "Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 2, pp. 497–513, 1999.

[3] M. Koc, *Hydroforming for Advanced Manufacturing*, England, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.

[4] S. H. Zhang, L. H. Lang, D. C. Kang, J. Danckert, and K. B. Nielsen, "Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation," *International journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 10, pp. 1479–1492, 2000.

[5] Simplify3D. (2018). Filament Properties Table. Simplify3D, USA. [Online]. Available: http://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/

[6] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. LI, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 393–402, 2019.

[7] A. Josifovic, J. Corney, and B. Davies, "Modeling variable speed drive for positive displacement pump," presented at the 2014 IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronic, Besacon, France, July 8–11, 2014.

[8] *LS-DYNA Theoretical Manual*, Livermore Software Technology Corporation, California, 2006.