

## การผลิตชิ้นงานด้วยวิธีสเตอริโอลิโทกราฟี

ณัฐพล จันทร์พาณิชย์\*

### บทคัดย่อ

การลดระยะเวลาออกแบบผลิตภัณฑ์ ถือเป็นเรื่องสำคัญยิ่งภายใต้สภาวะการณ์ทางธุรกิจที่ความต้องการของตลาดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วดังในปัจจุบัน การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ทันต่อสภาพการณ์จึงถือเป็นเรื่องท้าทายของผู้ผลิต วิธีสเตอริโอลิโทกราฟีนับเป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้สั้นลง โดยเทคโนโลยีดังกล่าวมีบทบาทในภาคการผลิตมากขึ้น ดังนั้น เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ผลิตนำเทคโนโลยีสเตอริโอลิโทกราฟีไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ บทความนี้จึงนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีสเตอริโอลิโทกราฟี ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการขึ้นรูป ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ข้อควรระวังบางประการในการขึ้นรูป และตัวอย่างการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวกับงานวิศวกรรมด้านต่างๆ

**คำสำคัญ :** วิธีสเตอริโอลิโทกราฟี, วิธีการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อ, ปัจจัยการขึ้นรูป, การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

## Part Fabrication with Stereolithography Process

**Nattapon Chantarapanich\***

### Abstract

Shortening product design and development time is particularly necessary for current competitive market environment. It is a challenge for developing and launching the product to fulfill the customer's demand in time. One of various manufacturing technology which could potentially reduce the product development time is Stereolithography (SL) process. In order to provide the beneficial details regarding to the SL process for product manufacturers, the main contexts of the paper presents the procedure of manufacturing of part using SL process, influencing factor of the process to part strength and part quality, some awareness of using SL parts for engineering applications, operation safety, and examples of its applications in various fields.

**Keywords :** Stereolithography process, additive manufacturing, manufacturing parameters, product design and development

---

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University

\* Corresponding author, E-mail: sfengnpc@src.ku.ac.th Received 2 December 2014, Accepted 19 March 2015

## 1. บทนำ

การแข่งขันทางธุรกิจที่รุนแรงในปัจจุบัน มีสภาพเป็นพลวัตและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ถูกป้อนเข้าสู่ตลาดอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Product Life Cycle) ที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันจึงสั้นลงกว่าในอดีต ความเสี่ยงด้านยอดขายจึงเป็นเรื่องที่ไม่แน่นอน

การที่ผู้ผลิตจะประกอบธุรกิจให้อยู่รอดในสภาวะการณ์ดังกล่าวนี้ นอกจากการเลือกใช้กลยุทธ์ด้านการตลาดที่เหมาะสม และการพยากรณ์สภาพตลาดในอนาคตที่แม่นยำแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญและขาดเสียมิได้คือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ และทันต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงของตลาด ด้วยเหตุนี้เวลาที่ใช้สำหรับค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้องพยายามลดลงให้กระชับที่สุด เพื่อให้ความสามารถในการแข่งขันเมื่อเทียบกับผู้ผลิตรายอื่นเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ รูปทรงของผลิตภัณฑ์ยังมีแนวโน้มซับซ้อนขึ้น การใช้วิธีผลิตแบบปรกติที่อาศัยหลักการตัดเฉือนวัสดุ ด้วยเครื่องกัดและเครื่องกลึงอัตโนมัติ จำเป็นต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญ และประสบการณ์ อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นค่อนข้างนาน นอกจากนั้น หากพ้นช่วงของการพัฒนาไปแล้ว และต้องการผลิตในปริมาณมาก (Mass Production) ความซับซ้อนของระบบแม่พิมพ์ (Mold) ที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เทคโนโลยีการออกแบบและผลิตรูปแบบใหม่ๆ จึงถูกนำมาใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผลิตภัณฑ์ หนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจคือ “การพิมพ์แบบสามมิติ” (3D Printing)

หลักการของเทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติ คือ การขึ้นรูปแบบชั้น (Layer Manufacturing) วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานจะถูกนำมาเติมเข้าทีละชั้น ตามรูปทรงของชิ้นงาน โดยวางซ้อนทับกันไปเรื่อยๆ (Additive) จนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ตามแบบจำลองสามมิติ (3D CAD Model) ข้อดีของการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวคือ มีวัสดุสูญเสียไประหว่างการขึ้นรูปค่อนข้างน้อย และไม่ต้องใช้เครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool) ด้วยเหตุนี้ จึงไม่มีข้อจำกัดด้านเงื่อนไขสภาพเข้าถึง (Accessibility) ของเครื่องมือ [1-2] ซึ่งกลายเป็นข้อได้เปรียบสำคัญ ที่ทำให้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนสูง หรือมีส่วนประกอบเป็นร่องขนาดเล็ก หรือร่องหลบ (Undercut) ได้

หากเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง ด้วยวิธีการพิมพ์แบบสามมิติ และการตัดเฉือนปรกตินั้น เวลาในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบสามมิติใช้น้อยกว่า จึงมีผู้นิยมนำมาใช้สร้างต้นแบบ บางครั้ง “การพิมพ์แบบสามมิติ” จึงถูกเรียกว่า “เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว” (Rapid Prototyping, RP)

หากแบ่งตามคุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แบบที่ใช้วัสดุแบบผง (Powder-based) วัสดุแบบเหลว (Liquid-based) และวัสดุแบบของแข็ง (Solid-based) [3]

การประยุกต์ใช้งานของแต่ละเทคโนโลยีขึ้นกับลักษณะของงาน และวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป สำหรับในบทความฉบับนี้ ให้ความสนใจกับเทคโนโลยีที่ใช้เรซิน

เป็นวัสดุสำหรับขึ้นรูปที่เรียกว่า “สเตอริโอลิโทกราฟี” (Stereolithography) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติที่ได้รับความนิยมในวิศวกรรมหลายแขนง เช่น การสร้างอะไหล่ทดแทนในอากาศยาน [4] การวิจัยเพื่อพัฒนาชิ้นส่วนยานยนต์ [3] และการขึ้นรูปวัสดุการแพทย์ [5-6] เป็นต้น จึงถือได้ว่า “สเตอริโอลิโทกราฟี” มีบทบาทสำคัญยิ่ง ดังนั้น ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องในสายงานออกแบบและผลิตต้องทราบข้อมูล เพื่อเป็นแนวทางประยุกต์ใช้เทคโนโลยี “สเตอริโอลิโทกราฟี” ให้เกิดประสิทธิผล

**2. กระบวนการสเตอริโอลิโทกราฟี**

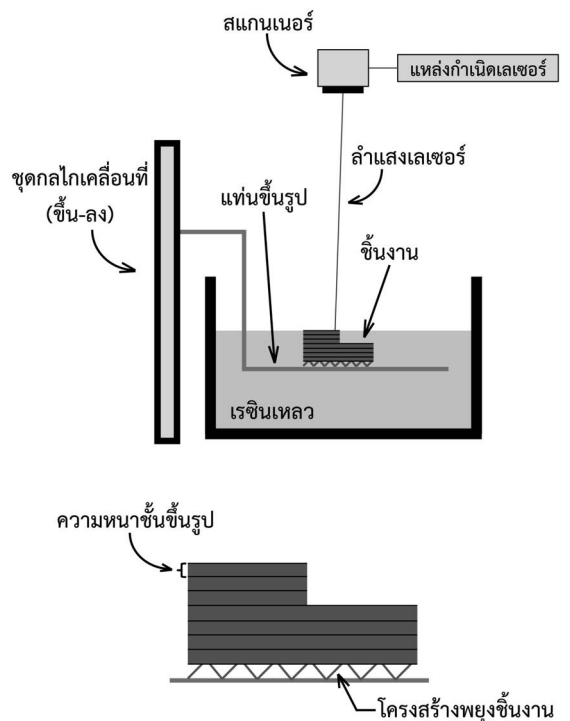
กระบวนการสเตอริโอลิโทกราฟีใช้เครื่องมือดังรูปที่ 1 โดยหลักการขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเหนือม่วงหรือยูวี (Ultraviolet, UV) ฉายมายังวัสดุประเภทเรซินเหลวที่ไวต่อแสง (Photopolymer resin) เมื่อเรซินเหลวได้รับแสง ตัวสารกระตุ้น (Photoinitiator) จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีพอลิเมอไรเซชันที่ทำให้มอนอเมอร์ (Monomer) ของเรซินที่อยู่ในสถานะของเหลวต่อกันเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้นกลายเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) เมื่อเรซินอยู่ในสภาพของพอลิเมอร์จะมีสถานะที่เป็นของแข็ง

ผังไหลการขึ้นรูปชิ้นงานสเตอริโอลิโทกราฟีแสดงในรูปที่ 2 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

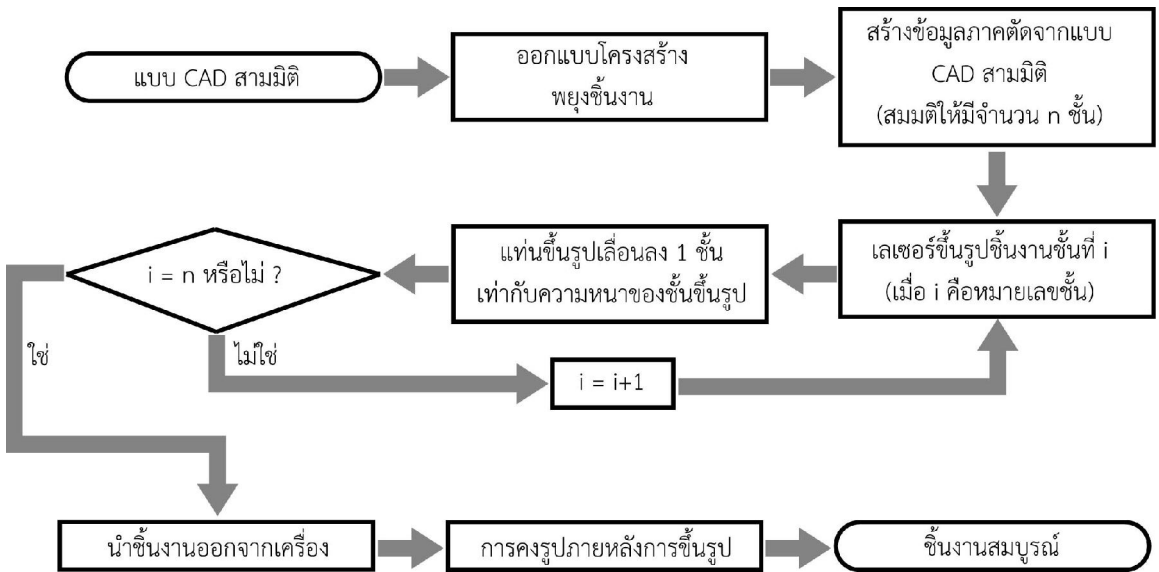
**2.1 การเตรียมข้อมูลแบบจำลองสามมิติ**

การเตรียมแบบจำลองสามมิติเพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการสเตอริโอลิโทกราฟีเริ่มจากการนำแบบจำลองสามมิติที่ออกแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) มาตรวจสอบว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่ แบบจำลองสามมิติควรเป็นผิวปิดสมบูรณ์ กล่าวคือสามารถคำนวณหาปริมาตรของรูปทรงสามมิตินั้นได้ หากพบว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นให้ดำเนินการแก้ไขโดยใช้เครื่องมือต่างๆ ภายในซอฟต์แวร์โปรแกรม CAD ก่อนที่จะแปลงข้อมูลรูปทรงสามมิตินั้นเป็นแบบจำลองโพลีกอน (Polygon Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองสามมิติที่รูปทรงประกอบขึ้นจากสามเหลี่ยมเล็กๆ มาเรียงต่อกัน ข้อมูลประเภทโพลีกอนนี้โดยทั่วไป จะเรียกว่า ไฟล์สเตอริโอลิโทกราฟี หรือ ไฟล์เอสทีแอล (STL file)



รูปที่ 1 เครื่องมือสเตอริโอลิโทกราฟี



รูปที่ 2 ผังไหลกระบวนการสเตอริโอลิโทกราฟี

ในกรณีที่พบว่าแบบจำลองสามมิติไม่สมบูรณ์ หากเป็นแบบจำลองสามมิติประเภทพารามेटริก (Parametric) ควรดำเนินการแก้ไขในโปรแกรม CAD ที่ใช้ออกแบบ ก่อนแปลงข้อมูลเป็นไฟล์เอสทีแอล ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีโปรแกรม CAD ที่มีความสามารถในการตกแต่ง และซ่อมพื้นผิวโพลิกอนได้ก็ตาม แต่ข้อสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงเสมอ คือ การซ่อมพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติโพลิกอนจะมีการประมาณค่าของพื้นผิว ซึ่งอาจส่งผลให้พื้นผิวที่ได้ไม่ตรงตามรูปทรงที่ออกแบบไว้

นอกเหนือจากไฟล์เอสทีแอลที่ได้จากการแปลงไฟล์ด้วยโปรแกรม CAD แล้ว ไฟล์เอสทีแอลยังอาจได้จากระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ซึ่งใช้อุปกรณ์เก็บพิกัดประเภทสามมิติเพื่อบันทึกรายละเอียดชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ (Existing Object) ข้อมูลพื้นผิวที่ได้จากระบวนการวิศวกรรม

ย้อนรอยมักถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของโพลิกอน [7] แต่พื้นผิวที่ได้มักมีปัญหาความไม่สมบูรณ์ ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรตรวจสอบ และปรับแต่งให้เรียบร้อยก่อนนำไปใช้งาน

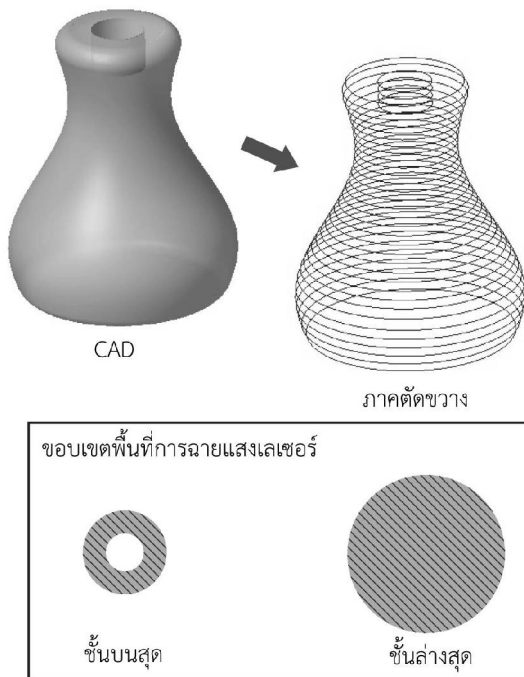
### 2.2 การสร้างโครงพylum ชิ้นงาน

จากที่กล่าวไปข้างต้น ชิ้นงานที่ใช้กระบวนการสเตอริโอลิโทกราฟีในการขึ้นรูปมักเป็นทรงอิสระ จึงอาจมีส่วนยื่น (Overhang) ออกจากทรงของชิ้นงานหลัก ส่วนยื่นลักษณะนี้เมื่อคงรูปในสถานะของแข็งอาจไม่สามารถลอยตัวอยู่ในเรซินเหลวได้ ส่งผลให้รูปทรงชิ้นงานเกิดการเสียรูป (Distortion) ทำให้ต้องมีโครงสร้างชั่วคราวพylum ชิ้นงาน (Support) เพื่อสร้างความมั่นคง (Stability) แก่ชิ้นงานระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้น โครงพylum ชิ้นงานควรถูกสร้างขึ้นในตำแหน่งที่ทรงชิ้นงานมีความเสี่ยงต่อการเสียรูป [8]

นอกจากนี้ โครงสร้างพวงชั้นงานควรต้องสร้างระหว่างชั้นงาน กับแท่นขึ้นรูป (Platform) ภายในเครื่องสเตอริโอลิโทกราฟี เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนของชั้นงานสัมผัสกับแท่นขึ้นรูปชั้นงานโดยตรง เพราะการสัมผัสโดยตรงทำให้เรซินที่ต้งรูปแล้วติดแน่นกับแท่นขึ้นรูปจนยากที่จะนำชั้นงานสำเร็จออกมาได้ ชั้นงานจึงมักเสียหายหรือเสียรูป จนไม่สามารถใช้งานได้

**2.3 การสร้างข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูป**

แบบจำลองสามมิติของชั้นงานที่มีโครงพวงชั้นงานแล้ว จะถูกซอยแบ่งเป็นชั้นระนาบตามทิศทางการขึ้นรูป เพื่อให้ได้มาซึ่งลักษณะภาคตัด (Cross-section) ชั้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาคตัด (Cross-section) ชั้นงาน

**2.4 การขึ้นรูป**

การขึ้นรูปชั้นงานเริ่มจากการปรับพื้นผิวของเรซินเหลวให้ได้ระดับ จากนั้นเลเซอร์ยูวีจึงฉายลงบนเรซินเหลว เฉพาะในขอบเขตที่เป็นภาคตัดของรูปทรงแต่ละชั้น เพื่อให้เกิดรูปทรงของชั้นงาน เมื่อการฉายแสงเลเซอร์เสร็จสิ้น ชุดกลไกจึงเลื่อนแท่นขึ้นรูปลงด้านล่างหนึ่งชั้น โดยแต่ละชั้น มีระยะเท่ากับความห่างของชั้นข้อมูล

หลังจากแท่นขึ้นรูปเลื่อนลง ชั้นงานที่คงรูปจะอยู่ที่พื้นผิวเรซินเหลวด้านบน จากนั้นจึงมีการปรับระดับพื้นผิวเรซินอีกครั้งเพื่อเตรียมการฉายแสงเลเซอร์สำหรับการขึ้นรูปในชั้นถัดไป การขึ้นรูปในแต่ละชั้นจะเป็นเช่นนี้ตั้งแต่ชั้นแรกถึงชั้นสุดท้าย เพื่อสร้างเป็นชั้นงานที่สมบูรณ์

**2.5 การคงรูปภายหลังการขึ้นรูป (Postcure)**

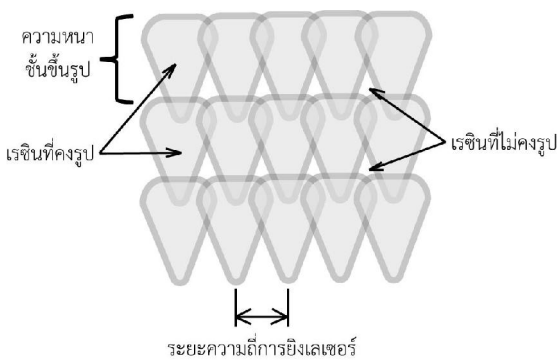
แม้ว่าชั้นงานที่สำเร็จจากการคงรูป จะมีรูปทรงเหมือนกับแบบจำลองสามมิติที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น แต่การคงรูปภายในเครื่องสเตอริโอลิโทกราฟีนั้น เป็นการคงรูปประเภทบางส่วนเท่านั้น กล่าวคือปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายในชั้นงานไม่ได้เกิดสมบูรณ์โดยทั่ว [8-9] ดังแสดงในรูปที่ 4 ชั้นงานจึงอยู่ในสภาพของ “Green Part” ที่ยังมีความแข็งแรงน้อย ทำให้ต้องนำชั้นงานไปสัมผัสแสงยูวีอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ [1]

**3. ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติชั้นงาน**

ชั้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีได้นำมาใช้งานวิศวกรรมหลายแขนง สมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของชั้นงานที่ควรคำนึง คือ สมบัติเชิงกล ซึ่ง

โดยทั่วไปนั้น สมบัติเชิงกลของชิ้นงานสเตอริโอลิโทกราฟีจะเปราะ และแข็งแรงไม่เพียงพอสำหรับใช้งานภายใต้สภาวะที่แรงกระทำสูง รวมถึงมีการหดตัวภายหลังการขึ้นรูป [8, 10]

การปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานสเตอริโอลิโทกราฟีให้ดีขึ้นจึงจำเป็น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การปรับปรุงวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป การควบคุมตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป และการเลือกวิธีคงรูปภายหลังการขึ้นรูป ซึ่งวิธีการดังกล่าวข้างต้น มีรายละเอียดสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 4 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันที่เกิดไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน

### 3.1 ปัจจัยด้านวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป

งานวิจัยหลายชิ้นได้นำสารตัวเติม (Reinforce Material) ยกตัวอย่างเช่น โพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) [11-12] นาโนคริสตัลเซลลูโลส (Cellulose Nanocrystals) [13] ไฟเบอร์แก้ว (Glass Fiber) [14] และท่อคาร์บอนนาโน (CNT) [13] ผสมลงในเรซินเหลวเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น

นอกจากนี้ วิธีสเตอริโอลิโทกราฟีในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาให้สามารถผสมผงโลหะหรือเซรามิก (Ceramics) [15-18] กับเรซินเหลวเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโลหะและเซรามิก การขึ้นรูปชิ้นงานลักษณะนี้ เรซินจะสร้างพันธะกับผงของโลหะหรือเซรามิกเพื่อดึงให้อนุภาคผงเหล่านี้ที่อยู่ใกล้กันเพียงพอที่จะสร้างเป็นทรงของชิ้นงานส่วนของเรซินที่แข็งตัวจะถูกเผาออกให้คงเหลือไว้เพียงส่วนที่เป็นโลหะหรือเซรามิก โดยความร้อนที่ใช้ในกระบวนการนี้ควรสูงพอที่ทำให้อนุภาคของผงโลหะหรือเซรามิกเกิดการซินเทอ (Sintering) เป็นชิ้นงานสำเร็จมีโครงสร้างแข็งแรง [17]

ความหนาแน่นของผงโลหะที่ผสมอยู่ในเรซินนับเป็นอุปสรรคสำคัญของการขึ้นรูป การผสมผงโลหะด้วยอัตราส่วนที่มากเกินไป หรือขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไป ส่งผลให้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเหนือม่วงไม่สามารถทะลุลงในเรซินได้ลึกเพียงพอที่จะทำให้เรซินแข็งตัว [15, 20]

สำหรับอุปสรรคในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกนั้นส่วนหนึ่งจะคล้ายกับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ แต่อุปสรรคนอกเหนือจากนี้ คือ การกระเจิงของแสงเลเซอร์ยูวีอันเนื่องมาจากการกระเจิงของอนุภาค ซึ่งทำให้ตำแหน่งที่เรซินแข็งตัว ไม่ใช่ตำแหน่งที่ต้องการ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคผงเซรามิกใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง และดัชนีการสะท้อน (Refractive index) สัมพัทธ์ระหว่างเรซินและอนุภาคนั้นมีค่าสูง [16]

ตัวอย่างของโลหะและเซรามิกที่ใช้ผสมในเรซินเพื่อขึ้นรูปด้วยวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ตัวอย่างโลหะและเซรามิกที่สามารถผสมกับเรซินเพื่อขึ้นรูปด้วยวิธีสเตอร์โอลิโทกราฟี

วัสดุ	ตัวอย่าง
โลหะ	- ทังสเตนคาร์ไบด์ - ทองแดง - โคบอลต์
เซรามิก	- อลูมิน่า - ซิลิกา - ไฮดรอกซีอะพาไทต์

**3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป**

ในการฉายแสงเลเซอร์ยูวีเพื่อคงรูปเรซินในแต่ละชั้น เรซินเหลวที่อยู่พื้นผิวจะสามารถดูดซับแสงไว้ได้มากกว่าเรซินเหลวที่อยู่ลึกลงไป เรซินเหลวด้านล่างพื้นผิวจึงไม่สามารถคงรูปได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีเรซินเหลวถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเรซินที่คงรูปแล้วดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้น หากชั้นในการขึ้นรูป (Slice Thickness) หนาขึ้น ปริมาณของเรซินเหลวที่ไม่คงรูปก็มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานขณะขึ้นรูปลดลง และการหดตัวของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ ชิ้นงานสำเร็จจึงเสียรูป

วิธีที่สามารถลดปริมาณเรซินเหลวที่ไม่คงรูปทำได้โดยลดความหนาชั้นการขึ้นรูปให้น้อยลง ยิ่งชั้นการขึ้นรูปบางเท่าไร ความแข็งแรงของชิ้นงานก็สูงขึ้นเท่านั้น [20-23] แต่ความหนาของชั้นน้อยสุดที่เป็นไปได้จะขึ้นกับความละเอียดกลไกของเครื่องมือเลื่อนแทนขึ้นรูปชิ้นงาน นอกจากวิธีการข้างต้น การใช้พลังงานเลเซอร์ที่สูงขึ้น และการลดระยะความถี่การยิงเลเซอร์ (Scan Pitch) สามารถทำให้ความลึกของชั้นเรซินที่คงรูปหนา

ขึ้นและกว้างขึ้นตามลำดับ ปริมาณเรซินเหลวที่เหลืออยู่จึงลดลงเช่นกัน [24]

อนึ่ง ชิ้นงานควรถูกจัดวางในระนาบที่ขนานกับแท่นขึ้นรูป เนื่องจากการคงรูปของเรซินในชั้นเดียวกันจะแข็งแรงมากกว่าระหว่างชั้น จำนวนชั้นของการขึ้นรูปมากส่งผลให้ความแข็งแรงชิ้นงานลดลง [2, 23, 24]

**3.3 การคงรูปภายหลังการขึ้นรูป**

การนำชิ้นงานไปสัมผัสแสงยูวี มักเป็นวิธีที่ใช้คงรูปชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป ระยะเวลาในการสัมผัสแสงยูวีสัมพันธ์กับความแข็งแรงของชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น [2, 21, 25] แต่หากชิ้นงานสัมผัสแสงยูวีมากกว่า 4 ชั่วโมง ชิ้นงานจะแข็งแรงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [2]

บางครั้ง การฉายแสงเลเซอร์ยูวีอาจทำร่วมกับการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (Thermal Post Curing) เพื่อให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น แต่ชิ้นงานจะเปราะและแตกหักง่ายขึ้น [26] นอกจากนี้ การใช้คลื่นไมโครเวฟยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานได้เช่นกัน [25]

**4. ข้อควรระวังบางประเด็น**

แม้ว่าวิธีสเตอร์โอลิโทกราฟีจะมีข้อดีในการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน ได้สะดวก และใช้เวลาสั้น แต่การขึ้นรูปและใช้งานชิ้นงานสเตอร์โอลิโทกราฟีควรระวัง ดังนี้

**4.1 การใช้งานในสถานะอุณหภูมิสูง**

การใช้ชิ้นงานสเตอร์โอลิโทกราฟีในสถานะที่มีความร้อนสูง เช่น ในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติก ควรระวังเกี่ยวกับขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป



โดยภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงชิ้นงานจะขยายตัว และดูดซับความชื้นภายในอากาศได้ดี จึงเป็นผลให้น้ำหนักของชิ้นงานมากขึ้น นอกจากนั้น สภาวะอุณหภูมิสูงยังทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเสื่อมสภาพได้อีกด้วย [27]

#### 4.2 คุณสมบัติวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอ

วิธีสเตอริโอไลโทกราฟีเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานแบบขึ้น ความแข็งแรงชิ้นงานในแนวระนาบจะมากกว่าในแนวการขึ้นรูปชิ้นงาน (แนวตั้ง) แม้ว่ากระบวนการคงรูปภายหลังการขึ้นรูปจะช่วยให้เรซินเหลวที่คงเหลือภายใน “Green Part” คงรูป แต่ถ้าความหนาของชิ้นงานหนาเกินไป เรซินเหลวที่อยู่ชั้นในก็ไม่อาจคงรูปได้ทั้งหมด คุณสมบัติของชิ้นงานจึงเป็นลักษณะที่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางกลตามแกนในแนวระนาบจะเท่ากัน แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแนวการขึ้นรูปชิ้นงาน [2, 23-24] จึงถือได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานสเตอริโอไลโทกราฟีจึงเป็นแบบสมมาตรแนวขวาง (Transverse Isotropic)

ในการศึกษาด้านกลศาสตร์บางประเภท นิยมใช้ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากวิธีสเตอริโอไลโทกราฟีเพื่อตรวจสอบความสมเหตุสมผล (Validation) ของผลคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขอย่างเช่นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เนื่องจากสะดวกในการสร้างชิ้นงานทดสอบ และประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ข้อควรระวังในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer Model) ของวิธีเชิงตัวเลขก็คือ สมบัติวัสดุที่ป้อนให้กับแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณนั้น ควรเป็นสมบัติแบบ

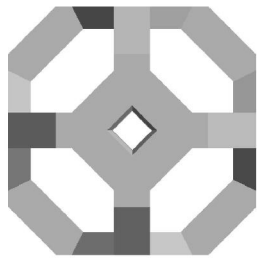
สมมาตรแนวขวาง และหลีกเลี่ยงการใช้สมบัติแบบสมมาตรทุกทิศทาง เพื่อลดความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (Physical Experiment) กับผลของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบความสมเหตุสมผลน่าเชื่อถือมากขึ้น

#### 4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก

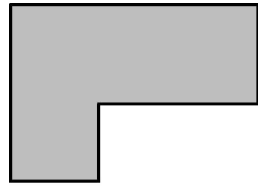
การนำเทคโนโลยีสเตอริโอไลโทกราฟีมาขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กมีมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขึ้นรูปโครงสร้างรองรับเซลล์สำหรับใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering Scaffold) [6, 12] ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบให้มีรูพรุนขนาดเล็กตั้งแต่ 20-700 ไมโครเมตร (ขึ้นกับประเภทเนื้อเยื่อ) [29-30] เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเซลล์

ความละเอียดของชิ้นงานมักถูกจำกัดโดย ขนาดลำเลเซอร์ และระบบกลไกของเครื่องมือเลื่อนแทนขึ้นรูป ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความหนาชั้นเล็กสุดที่เครื่องสามารถขึ้นรูปได้ ดังนั้น การขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กควรต้องเลือกเครื่องสเตอริโอไลโทกราฟีที่มีความละเอียดลำเลเซอร์ และความละเอียดของกลไกเพียงพอที่สามารถสร้างส่วนประกอบที่เล็กที่สุดภายในชิ้นงานได้

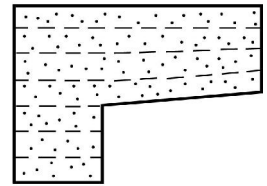
รูปที่ 5 เป็นตัวอย่างเมื่อความสูงของชิ้นการขึ้นรูปหนากว่าส่วนประกอบที่เล็กที่สุดภายในชิ้นงาน จึงทำให้ส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมตรงกลางชิ้นงานไม่ปรากฏในชิ้นงานสำเร็จ



CAD

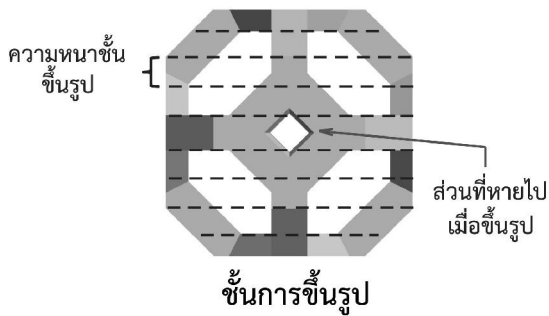


CAD



ชิ้นงาน

รูปที่ 6 ลักษณะการบดของชิ้นงาน



รูปที่ 5 ข้อจำกัดของวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีในการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก

#### 4.4 การบดตัวของชิ้นงาน

เมื่อเรซินเหลวเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็ง จะมีการบิดตัวเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 วิธีลดการบิดตัวอาจทำได้หลายวิธี ดังนี้ [8]

- การใช้เลเซอร์ที่มีความเข้มสูงขึ้น
- การใช้ความเร็วการเดินเลเซอร์ให้ช้าลง
- การใช้เรซินเหลวที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีพอลิเมอร์เรซินเร็วขึ้น
- การใช้เรซินเหลวที่มีคุณสมบัติการหดตัวต่ำ
- การเพิ่มความหนาในการขึ้นรูป

#### 4.5 การเสื่อมสภาพของชิ้นงาน

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานสเตอริโอลิโทกราฟีภายหลังจากขึ้นรูป เช่น โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าหน่วยแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดตัวก่อนแตกหัก (Elongation at Break) ลดลง ดังนั้นสมบัติชิ้นงานจึงแข็งแรงขึ้น แต่เปราะมากขึ้น [1] นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานจะลดลงหากอยู่ในสภาวะความชื้นสูง [28]

#### 4.6 อันตรายจากเรซินเหลวที่มีต่อผู้ปฏิบัติงาน

ในการนำชิ้นงานที่สมบูรณ์ออกจากเครื่องสเตอริโอลิโทกราฟี ผู้ปฏิบัติงานไม่ควรสัมผัสกับเรซินโดยตรงเนื่องจากอาจทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนัง ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรใส่ถุงมือป้องกันขณะทำงานเสมอ [8]

#### 4.7 อันตรายจากแสงเลเซอร์ยูวี

เลเซอร์ยูวีเป็นอันตรายต่อกระจกตา ผู้ปฏิบัติงานจึงไม่ควรจ้องไปที่เลเซอร์ นอกจากนี้ ระหว่างที่เครื่องสเตอริโอลิโทกราฟีทำงาน ควรใส่แว่นตาที่สามารถลดความเข้มของแสงเลเซอร์ยูวีให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่ออวัยวะตา

## 5. การประยุกต์ใช้งาน

วิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีได้นำไปใช้เพื่อการออกแบบและขึ้นรูปงานทางวิศวกรรมด้านต่างๆ โดยตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

### 5.1 งานการแพทย์

ด้วยความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีทรงอิสระ วิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีจึงได้รับความนิยมประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขึ้นรูปชิ้นส่วนอุปกรณ์ฝังในร่างกาย (Implant) ที่เป็นทรงอวัยวะมนุษย์เพื่อใช้รักษาความผิดปกติต่างๆ ของร่างกาย การสร้างชิ้นส่วนทางการแพทย์ด้วยวิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีมักทำร่วมกับการใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอย ที่ใช้คอมพิวเตอร์เอกซเรย์ (Computed Tomography, CT) เก็บข้อมูลอวัยวะของผู้ป่วย โดยการได้มาซึ่งแบบจำลองสามมิติสำหรับใช้ขึ้นรูปด้วยวิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีมีรายละเอียดในบทความเรื่องก่อนหน้าของผู้เขียน [7]

นอกจากนี้ เทคโนโลยีดังกล่าวยังได้นำมาใช้เพื่อสร้างโครงร่างรองรับเซลล์ที่ใช้เพิ่มอัตราการสร้างจำนวนเซลล์มาทดแทนในส่วนที่สึกหรอ โครงสร้างรองรับเซลล์มักมีรูปทรงที่ซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 5 และต้องมีรูพรุนขนาดเล็ก (Micro-pore) ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเซลล์ ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีการผลิตอื่นที่ไม่ใช่การขึ้นรูปแบบขึ้นเหมือนกับวิธีสเตอร์โพลิโทกราฟี อาจควบคุมขนาดของชิ้นงานค่อนข้างยาก

### 5.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์

จุดเด่นอย่างหนึ่งของวิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีคือความสามารถในการสร้างชิ้นงานที่ไม่ต้องการปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว จึงมักนำมาใช้ในวงจรการออกแบบ

และพัฒนาผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้องมีการออกแบบซ้ำไปมาหลายครั้ง การสร้างต้นแบบเพื่อแสดงผลของการออกแบบนับเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ผู้ออกแบบได้ตรวจสอบกรอบแนวคิด และทดสอบความเหมาะสมขณะการใช้งานเพื่อประกอบการตัดสินใจพัฒนา รูปทรงจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์

### 5.3 แม่พิมพ์ลีดขึ้นรูป

วิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีถูกนำมาใช้สร้างอินเสิร์ตของเบ้าและคอร์ (Insert Core & Cavity) [31-32] แม่พิมพ์ เพื่อใช้ในการลดระยะเวลาและราคาจากวิธีสร้างอินเสิร์ตด้วยวิธีการตัดเนื้อปกติ แต่เนื่องจากสมบัติวัสดุอินเสิร์ตของเบ้าและคอร์ที่เป็นชิ้นงานสเตอร์โพลิโทกราฟีแตกต่างกับอินเสิร์ตของเบ้าและคอร์ที่เป็นโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการนำความร้อนของวัสดุ จึงจำเป็นต้องปรับปัจจัยการฉีด (Injection Parameters) ให้เหมาะสม

### 5.4 กรรมวิธีอินเวสเมนต์

สิ่งที่ต้องใช้ในกรรมวิธีอินเวสเมนต์ (Investment Casting) คือ แม่แบบ (Wax Pattern) โดยทั่วไปแม่แบบจะขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะซึ่งเหมาะกับการผลิตชิ้นงานปริมาณมาก แต่ในกรณีที่ผลิตชิ้นงานปริมาณน้อย การใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะอาจไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

เพื่อลดต้นทุนในการผลิต วิธีสเตอร์โพลิโทกราฟีจึงนำมาใช้ขึ้นรูปรูปทรงผลิตภัณฑ์สำหรับสร้างเป็นแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุประเภทยางหรือซิลิโคนเพื่อใช้ขึ้นรูปแม่แบบ [33]

## 6. สรุปผล

วิธีสเตอริโอลิโทกราฟีเป็นการขึ้นรูปแบบเดิมเนื้อของวัสดุเข้าไปทีละชั้น เหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่มีทรงอิสระ ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นอาจมีความยุ่งยากและมีขั้นตอนซับซ้อน การประยุกต์ใช้งานวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีที่มักพบ ได้แก่ การขึ้นรูปชิ้นส่วนทางแพทย์เพื่อใช้รักษาความผิดปกติของร่างกาย นอกจากนี้วิธีสเตอริโอลิโทกราฟียังเหมาะกับการขึ้นรูปที่ผลิตในปริมาณน้อย เช่น การใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบในวงจรการพัฒนาผลิตภัณฑ์ อินเทอร์เน็ตของเบ้าและคอร์สำหรับใช้ในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติก และแม่แบบสำหรับกรรมวิธีอินเวสเมนต์ เป็นต้น

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีใช้เลเซอร์ยูวี เพื่อทำให้เรซินเหลวเกิดการแข็งตัวด้วยปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชัน ตามแบบ CAD ซึ่งเป็นไฟล์ประเภทโพลิกอน ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนนี้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการคงรูปด้วยแสงยูวีอีกครั้งหนึ่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงกับชิ้นงาน โดยปัจจัยการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความแข็งแรงชิ้นงาน เช่น ชนิดของสารตัวเติมที่ผสมเข้าไปในเรซิน ความหนาของชั้นขึ้นรูป ความเข้มของแสงเลเซอร์ ความถี่การยิงเลเซอร์ วิธีการและระยะเวลาคงรูปภายหลังการขึ้นรูป รวมถึงลักษณะการวางตัวของชิ้นงานขณะขึ้นรูป

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีสเตอริโอลิโทกราฟีเป็นแบบสมมาตรแนวขวาง (Transverse Isotropic) ดังนั้น ในการขึ้นรูปจึงควรให้ชิ้นงานวางตัวอยู่ในแนวที่จะให้ผลของชิ้นงานสำเร็จแข็งแรงมากที่สุด ระดับอุณหภูมิมีผลต่อขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานสเตอริโอลิโทกราฟี จึงควรระวังการใช้งานในสภาวะ

อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ชิ้นงานที่ถูกใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้สมบัติเชิงกลเสื่อมสภาพลงด้วย

ความละเอียดของแกนการเคลื่อนที่ในแนวขึ้นรูปและขนาดของลำเลเซอร์ เป็นตัวกำหนดรายละเอียดขนาดของชิ้นงานเล็กสุดที่เครื่องสเตอริโอลิโทกราฟีสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนปัญหาเกี่ยวกับการบิดตัวของชิ้นงานที่มักพบ สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระดับการคงรูปของเรซินให้มากขึ้น หนึ่งในวิธีที่สามารถทำได้คือ การใช้เลเซอร์ที่มีความเข้มสูงขึ้นและการใช้ความเร็วเคลื่อนเลเซอร์ให้ช้าลง

ข้อควรระวังสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ใช้เครื่องสเตอริโอลิโทกราฟี คือ อาการระคายเคืองที่ผิวหนังเนื่องจากการสัมผัสเรซินเหลว รวมถึงอันตรายจากเลเซอร์ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานควรใส่อุปกรณ์ป้องกันระหว่างทำงานทุกครั้ง

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mansour, M. Gilbert, and R. Hague, "A study of the impact of short-term ageing on the mechanical properties of a stereolithography resin", *Materials Science and Engineering A* 447, 2007, pp. 277–284
- [2] N. Chantarapanich, P. Puttawibul, K. Sitthiseripratip, S. Sucharitpwatskul, and S. Chantawerod, "Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process", *Songklanakarini Journal of Science and Technology* 35, 2013, pp. 91–98.

- [3] C.K. Chua, K.F. Leong, and C.S. Lim, “Rapid Prototyping: Principles and Applications (3rd ed.)”, World Scientific Publishing, 2010.
- [4] D.K. Pal, B. Ravi, L.S. Bhargava, and U. Chandrasekhar, “Computer-Aided Reverse Engineering for Rapid Replacement Parts: A Case Study”, *Defense Science Journal* 56, 2006 pp. 225-238.
- [5] G. Wurm, B. Tomancok, K. Holl, and J. Trenkler, “Prospective study on cranioplasty with individual carbon fiber reinforced polymere (CFRP) implants produced by means of stereolithography”, *Surgical Neurology* 62, 2004, pp. 510–521.
- [6] L. Elomaa, S. Teixeira, R. Hakala, H. Korhonen, D.W. Grijpma, and J.V. Seppälä, “Preparation of poly( $\epsilon$ -caprolactone)-based tissue engineering scaffolds by stereolithography”, *Acta Biomaterialia* 7, 2011, pp. 3850–3856.
- [7] N. Chantarapanich, “Reverse Engineering Technologies for Design and Manufacturing”, *Journal of Industrial Technology* 10, 2014, pp. 122–136. (in-Thai)
- [8] P.F. Jacobs, “Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography (1st edition)”, McGraw-Hill, 1992.
- [9] S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico, and E.L.J. Bohez, “Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy”, *CAD Computer Aided Design* 39, 2007, pp. 80–86.
- [10] X. Yan, and P. Gu, “A review of rapid prototyping technologies and systems”, *CAD Computer Aided Design* 28, 1996, pp. 307–331.
- [11] S. Channasanon, P. Kaewkong, P. Uppanan, S. Chantawerod, K. Sitthiseripratip, S. Tanodekaew, and N. Chantarapanich, “Acrylic-based Stereolithographic Resins: Effect of Scaffold Architectures on Biological Response”, *Journal of Life Sciences and Technologies* 1, 2013, pp. 158–162.
- [12] H.J. Assumption, and L.J. Mathias, “Photopolymerization of urethane dimethacrylates synthesized via a non-isocyanate route”, *Polymer* 44, 2003, pp. 5131–5136.
- [13] S. Kumar, M. Hofmann, B. Steinmann, E.J. Foster, and C. Weder, “Reinforcement of Stereolithographic Resins for Rapid Prototyping with Cellulose Nanocrystals”, *Applied Materials and Interfaces* 4, 2012, pp. 5399–5407.
- [14] G. Zak, M.N. Sela, C.B. Park, and B. Benhabib, “A Layered-Manufacturing Process for the Fabrication of Glass Fiber-Reinforced Composites”, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium*, Austin, USA, 1997, pp. 17–24.

- [15] P.J. Bártolo, “Stereolithographic Processes”, In: P.J. Bártolo (Ed.) “Stereolithography: Materials, Processes and Applications”, Springer, New York, 2011.
- [16] J.W. Lee, I.H. Lee, and D.-W. Cho, “Development of micro-stereolithography technology using metal powder”, *Microelectronic Engineering* 83 (4-9 SPEC. ISS.), 2006, pp. 1253–1256.
- [17] P.J. Bartolo, and J. Gaspar, “Metal filled resin for stereolithography metal part”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57, 2014, pp. 235–238.
- [18] S. Tanodekaew, S. Channasanon, P. Kaewkong, and P. Uppanan, “PLA-HA Scaffolds: Preparation and Bioactivity”, *Procedia Engineering* 59, 2013, pp. 144–149.
- [19] T. Chartier, A. Badev, Y. Abouliatim, P. Lebaudy, and L. Lecamp, “Stereolithography process: Influence of the rheology of silica suspensions and of the medium on polymerization kinetics—Cured depth and width”, *Journal of the European Ceramic Society* 32, 2012, pp. 1625–1634.
- [20] K. Chockalingam, N. Jawahar, and U. Chandrasekhar, “Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography”, *Rapid Prototyping Journal* 12, 2006, pp. 106–113.
- [21] B.S. Raju, U.-C. Shekar, K. Venkateswarlu, and D. N. Drakashayani, “Establishment of Process model for rapid prototyping technique (Stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method”, *Procedia Technology* 14, 2014, pp. 380–389.
- [22] C.M. Cheah, A.Y.C. Nee, J.Y.H. Fuh, L. Lu, Y.S. Choo, and T. Miyazawa, “Characteristics of photopolymeric material used in rapid prototypes: Part I. Mechanical properties in the green state”, *Journal of Materials Processing Technology* 67, 1997, pp. 41–45.
- [23] K. Chockalingam, N. Jawahar, U. Chandrasekar, and K.N. Ramanathan, “Establishment of process model for part strength in stereolithography”, *Journal of Materials Processing Technology* 208, 2008, pp. 348–365.
- [24] R. Quintana, J.-W. Choi, K. Puebla, and R. Wicker, “Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography manufactured ASTM D-638 type I specimens”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46, 2010, pp. 201–215.
- [25] G.V. Salmoria, C.H. Ahrens, M. Fredel, V. Soldi, and A.T.N. Pires, “Stereolithography somos 7110 resin: mechanical behavior and fractography of parts post-cured by different methods”, *Polymer Testing* 24, 2005, pp. 157–162.
- [26] R. Hague, S. Mansour, N. Saleh, and R. Harris, “Materials analysis of stereolithography resins for use in Rapid Manufacturing”, *Journal of Materials Science* 39, 2004, pp. 2457–2464

- [27] X.Y. Liu, and J. Jiang, “Environmental effects on the dimensions of SL5195 resin”, *Rapid Prototyping Journal* 9, 2003, pp. 88–94.
- [28] K. Puebla, K. Arcaute, R. Quintana, and R.B. Wicker, “Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography”, *Rapid Prototyping Journal* 18, 2012, pp. 374–388.
- [29] K.F. Leong, C.K. Chua, N. Sudarmadji, and W.Y. Yeong, “Engineering functionally graded tissue engineering scaffolds”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 1, 2008, pp. 140–152.
- [30] L. Mullen, R.C. Stamp, W.K. Brooks, E. Jones, and C.J. Sutcliffe, “Selective laser melting: a regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications,” *Journal of Biomedical Materials Research B* 89, 2009, pp. 325–334.
- [31] S. Rahmati, and P. Dickens, “Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 2007, pp. 740–747.
- [32] V.E. Beal, C.H. Ahrens, and P.A. Wendhausen, “The Use of Stereolithography Rapid Tools in the Manufacturing of Metal Powder Injection Molding Parts”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 26, 2004, pp. 40–46.
- [33] J.C. Ferreira, and A. Mateus, “Numerical and Experimental Study of Fracture in RP Stereolithography Pattern and Ceramic Shells for Investment, *Journal of Material Processing Technology* 134, 2003, pp. 135–144.