

ยางซิลิโคนเหลวสำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ (Liquid Silicone Rubber for 3D Printing)

ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีมีความรวดเร็วทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมามากมายรวมถึงเทคโนโลยีหรือการพิมพ์แบบ 3 มิติ (3D printing) เป็นการสร้างโมเดลเสมือนจริงหรือการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและชิ้นงานต้นแบบ

เครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 โดย Charles W. (Chuck) Hull เป็นผู้ออกแบบเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติให้กับบริษัท 3D Systems Corporation ซึ่งเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติที่ Charles Hull เป็นผู้ประดิษฐ์ถือเป็นเครื่องพิมพ์ 3D ที่ทันสมัยและเป็นผู้ริเริ่มเทคโนโลยีมาตรฐาน De Facto¹ ถูกตั้งชื่อว่า “Stereolithographic 3D printer” โดยหลักการของ Chuck Hull ใน 3D Systems คือ ใช้พอลิเมอร์เหลวที่สามารถแข็งตัวได้ เมื่อผ่านการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet, UV) จาก UV เลเซอร์ โดยมีระบบใส่เรซินเหลวและมีระบบควบคุมให้ยกขึ้นและเคลื่อนที่ในแนวตั้ง เพื่อสร้างชิ้นงานทีละชั้นจากล่างขึ้นบนแล้วสแกนยิงแสง UV เลเซอร์ในแนวราบ เพื่อเปลี่ยนให้พอลิเมอร์เหลวชนิดไวต่อแสงเป็นของแข็งตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยชิ้นงานที่มีส่วนโค้งงอ หรือมีรูปทรงที่แปลกๆ หรือมีความละเอียดซับซ้อนมาก จึงต้องสร้างส่วนที่ใช้ค้ำยันและรองรับเรียกว่า ซัพพอร์ต (support) ขึ้นมาพร้อมๆ กับชิ้นงาน เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จจึงทำการตัดส่วนซัพพอร์ตนี้ออก ความแข็งแรงของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้มีความแข็งแรงพอๆ กับพลาสติกทั่วไป ตัวชิ้นงานที่ได้มีความละเอียด เรียบในระดับหนึ่ง ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรมวาดแบบ 3 มิติ และยังสามารถสร้างชิ้นส่วนกลไกต่างๆ เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบได้ หรือใช้เป็นวัสดุชิ้นส่วนจริงในเครื่องมือต่างๆ ได้

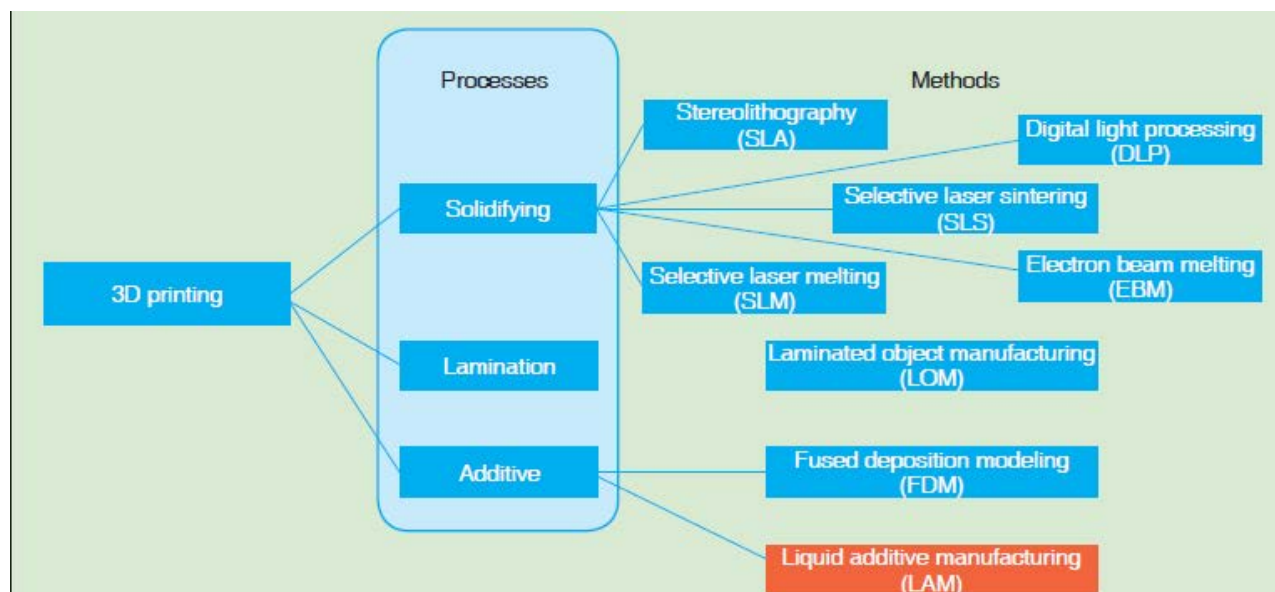
นอกจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Stereolithographic 3D printer แล้ว ยังมีเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติ อีกหลายแบบ ซึ่งสามารถจำแนกเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติ ตามรูปแบบกระบวนการพิมพ์ได้ 3 รูปแบบ คือ ของแข็งลามิเนต และ การเพิ่มเนื้อวัสดุ (ดังรูปที่ 1)

1. ของแข็ง (Solidifying) ประกอบด้วย เครื่องพิมพ์แบบ Stereolithographic (SLA), Digital light processing (DLP), Selective laser sintering (SLS), Selective laser melting (SLM) และ Electron beam melting (EBM) การพิมพ์แบบ Stereolithography (SLA) ทำงานโดยใช้แสงเลเซอร์ฉายบนน้ำยาเรซินที่ไวแสง โดยเรซินส่วนที่โดนฉายแสงจะแข็งตัว แสงเลเซอร์จะทำการวาดไปบนพื้นผิวของน้ำยาเรซินตามรูปทรงของวัตถุ เมื่อฉายแสงบนชั้น (layer) หนึ่งเสร็จ ฐานพิมพ์ก็จะขยับขึ้นเพื่อวาดชั้นต่อไป ข้อดีของการพิมพ์แบบ SLA คือมีความละเอียดสูง ชิ้นงานที่ออกมาจะเรียบเนียน ไม่เหมือน FDM ที่มักเห็นเส้นเป็นชั้นๆ ส่วนข้อเสียคือตัวเครื่องพิมพ์และวัสดุเรซินมีราคาแพงกว่า FDM และหลังพิมพ์ชิ้นงานมีขั้นตอน Post-processing เพิ่มเติม เช่น การล้างแอลกอฮอล์ และการอบแสง UV วิธีเหมาะสำหรับทำชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น เครื่องประดับงานทันตกรรม งานพระเครื่อง งานออกแบบผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

¹ De Facto Standard มาตรฐานแบบเดอ ฟักโตหรือมาตรฐานโดยพฤตินัย เป็นมาตรฐานที่เกิดขึ้นโดยไม่มีคณะกรรมการ ไม่มีการวางแผนการล่วงหน้า ไม่มีการประกาศมาตรฐานให้ปฏิบัติแต่เกิดจากผู้ที่มีความนิยมในผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์โอเพ่นเอ็มพีซีได้กลายเป็นมาตรฐานของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์หรือระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่เกิดจากโครงการ ARPANET ของกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันได้แพร่หลายไปทั่วโลก กลายเป็นมาตรฐานของเครือข่ายคอมพิวเตอร์ชนิดหนึ่ง

2. ลามิเนต (Lamination) เป็นเครื่องพิมพ์ Laminated Object Manufacturing (LOM) ที่ใช้วัสดุเป็นแผ่นบางๆ คล้ายกระดาษ และมีสารยึดติดที่หน้าหนึ่งของแผ่น โดยวัสดุจะถูกดึงเข้าสู่เครื่องตัดด้วยเลเซอร์เป็นชั้นต่อชั้นขึ้นไป วัสดุที่จะขึ้นรูปจะอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก (พีวีซี) กระดาษ และโลหะ

3. การเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive) ได้แก่ เครื่องพิมพ์แบบ Fused deposition modeling (FDM) และ Liquid additive manufacturing (LAM) ซึ่งเครื่องพิมพ์แบบ FDM หรือการพิมพ์แบบใช้หัวฉีดที่ทำงานโดยการทำความร้อนละลายเส้นพลาสติก (Filament) แล้วฉีดพลาสติกออกมาตามรูปทรงหน้าตัดของชิ้นงานทีละชั้นซ้อนกันเรื่อยๆ จนได้เป็นชิ้นงาน เหมาะสำหรับทำชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็ว ซึ่งข้อดีของเครื่องพิมพ์ FDM คือราคาถูก ใช้งานง่าย และมีวัสดุให้เลือกใช้หลายชนิด (ABS, PLA, Flexible, Nylon, พลาสติกผสมเนื้อไม้หรือโลหะ, กระดาษ คอนกรีต ยาง) ส่วนข้อเสียคือคุณภาพงานพิมพ์ยังสู้เครื่องพิมพ์แบบอื่นไม่ได้ ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง เครื่องพิมพ์ FDM เป็นการพิมพ์ 3 มิติ ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน

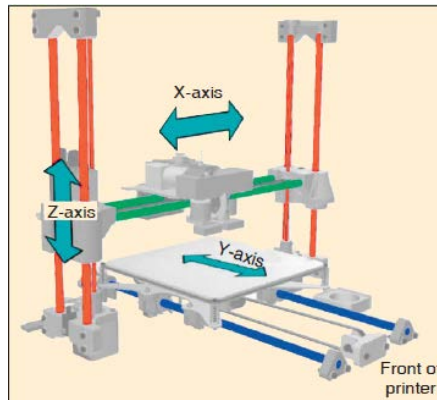


รูปที่ 1 ประเภทของกระบวนการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

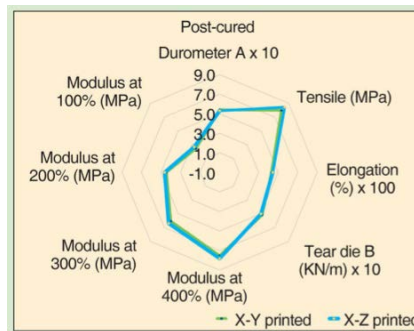
เมื่อปี พ.ศ.2559 ได้มีการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติของกลุ่มการเพิ่มเนื้อวัสดุ (additive) ขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติ Liquid additive manufacturing (LAM) โดยบริษัท German RepRap GmbH ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ LAM สามารถใช้ร่วมกับพอลิยูรีเทนเหลว (liquid polyurethane) และซิลิโคนเหลว (liquid silicone rubber, LSR) ได้ โดยเครื่องพิมพ์สามารถขึ้นรูปซิลิโคนเหลวจากการนำส่วนผสม A และ B มาผ่านหัวผสมและให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการ cure ด้วยแท่นความร้อน (heat platform) และหลอดไฟติดเพดาน (overhead heat lamp) ตามสิทธิบัตร WO2018087293

ในการวิจัยของ Rick Ziebell และ Felipe Escamilla, R.D. Abbot ระบุว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้พอลิเมอร์ เช่น TPU และ TPE มีข้อจำกัดในเรื่องอุณหภูมิ เนื่องจากหลอมเหลวได้ง่าย เมื่อขึ้นรูปแล้วเกิดการเปลี่ยนรูป (re-shaped) ในระหว่างกระบวนการพิมพ์ ซึ่ง TPU และ TPE เหมาะกับการใช้งานในการพิมพ์แบบลามิเนตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C ในขณะที่ยางมีความไวต่อความร้อน เมื่อทำการพิมพ์สามารถขึ้นรูปได้ง่าย

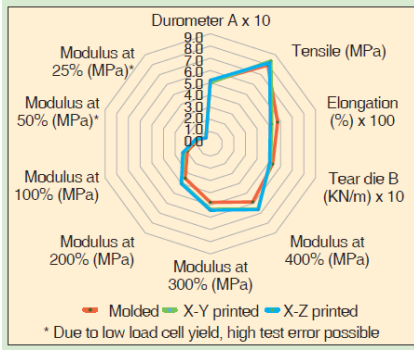
และไม่เกิดการหลอมเปลี่ยนรูป ดังนั้นทางทีมีวิจัยจึงได้นำยางซิลิโคนเหลวของ DowPerformance มาศึกษา ร่วมกับเครื่อง LC-3335's ของบริษัท German RepRap GmbH พบว่า การพิมพ์แบบ 3 มิติ ด้วยยางซิลิโคนเหลว ด้วยกระบวนการ LAM (liquid additive manufacturing) ทั้งในแนว x-y (bead-to-bead) และ x-z (layer-to-layer) ดังรูปที่ 2 พบว่า สมบัติเชิงกลของยางซิลิโคนเหลวที่ได้จากการพิมพ์เทียบกันในแต่ละแนวแกนพิมพ์ คือ แกน XY และแกน XZ (ดังรูปที่ 3) ซึ่งสมบัติของยางที่ได้ในแต่ละแนวแกนเป็นไปในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นว่า เราสามารถเลือกการวางแผนในการพิมพ์ชิ้นส่วนที่ความเร็วการพิมพ์ที่ดีที่สุดโดยไม่ต้องกังวลว่าจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของชิ้นส่วนที่พิมพ์ออกมา เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์และเครื่องพิมพ์ (ดังรูปที่ 4 (ก)) พบว่า สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์จากแม่พิมพ์และเครื่องพิมพ์ ในกรณีที่ไม่ได้ทำการ post-cure ผลิตภัณฑ์จากแม่พิมพ์มีค่าความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสต่ำกว่า ขณะที่ค่าการยืดตัว (Elongation) สูงกว่า แสดงให้เห็นว่า การพิมพ์ผลิตภัณฑ์ดีกว่าการใช้แม่พิมพ์หรืออาจเป็นผลเนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปิด (open-air curing) ของการพิมพ์ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกมาในระหว่างการให้ความร้อนยางซิลิโคนเหลว



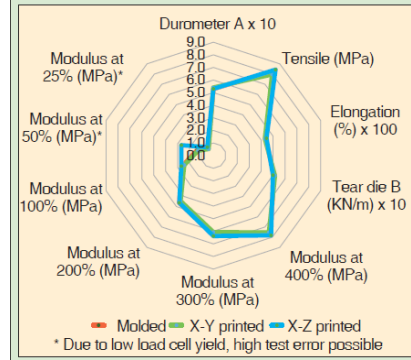
รูปที่ 2 ระบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



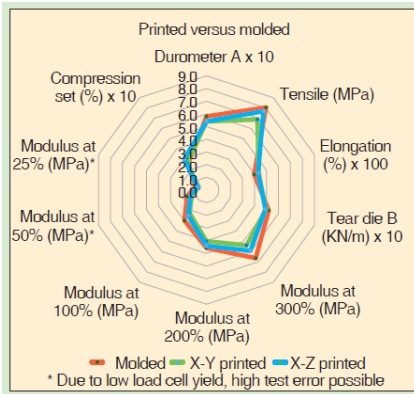
รูปที่ 3 สมบัติเชิงกลของยางในแต่ละแนวแกน



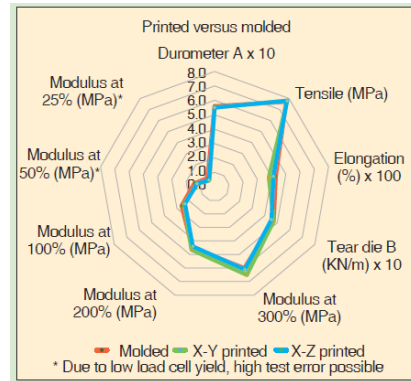
4(ก)



4(ข)



4(ค)



4(ง)

รูปที่ 4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางจากเครื่องพิมพ์เทียบกับแม่พิมพ์ที่ผ่านการ post-cure เป็นเวลา (ก) แบบ no post-cure (ข) 4 ชั่วโมง 200 °C (ค) 70 ชั่วโมง 150 °C และ (ง) 70 ชั่วโมง 200 °C

จากรูปที่ 4 (ข-ง) มีการให้ความร้อนหลังการวัลคาไนซ์ (post-cure) ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน พบว่าเมื่อทำการ post-cure ที่เวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 200 °C (รูปที่ 4 (ข)) สมบัติเชิงกลของยางที่ได้จากการพิมพ์และแม่พิมพ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางที่ไม่ทำ post-cure (รูปที่ 4 (ก)) ซึ่งการบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่ได้เป็นเรื่องสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์จากแม่พิมพ์ แต่เนื่องจากวัสดุพิมพ์ที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เช่น TPU และ TPE เป็นวัสดุพิมพ์ที่หลอมเหลวได้ง่าย เมื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ความร้อนสูง 100 °C ระหว่างทำการพิมพ์ 3 มิติในแต่ละชั้น วัสดุจะเกิดสะสมความร้อนและทำให้ผลิตภัณฑ์บางส่วนเกิดการหลอมเหลวหรือผิดรูป ซึ่งการใช้ยางซิลิโคนเหลว (LSR) ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เมื่อยางวัลคาไนซ์แล้วจะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 200 °C ทำให้สามารถใช้งานได้มากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบการบ่มเร่งยางที่อุณหภูมิสูงจึงได้มีการทดสอบเทียบกับมาตรฐานดังรูปที่ 4 (ค) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิบ่มเร่ง 150 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ค่าความทนต่อแรงกด (compression set) ที่ได้ขึ้นงานจากการพิมพ์และขึ้นงานจากแม่พิมพ์มีความใกล้เคียงกัน โดยค่าความทนต่อแรงกด (compression set) ของขึ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์จะสูงกว่าขึ้นงานที่ได้จากการพิมพ์เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สมบัติอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์จากการพิมพ์และแม่พิมพ์มีความใกล้เคียงกัน เมื่อรับเพิ่มเวลาและอุณหภูมิการบ่มเร่งมากขึ้นดังรูปที่ 6 ที่อบด้วยความร้อน 200 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของการทนความร้อนของยางซิลิโคน สมบัติเชิงกลของขึ้นงานที่ได้จากการพิมพ์และจากแม่พิมพ์ยังคงใกล้เคียงกันและเป็นไปในทางเดียวกัน



รูปที่ 5 ชิ้นตัวอย่างโฟโต้พอลิเมอร์จากความร่วมมือของบริษัท DSM และบริษัท Adaptive3D



รูปที่ 6 วาล์วหัวใจจากความร่วมมือของมหาวิทยาลัย ETH Zurich กับบริษัท SAT

ปัจจุบัน นอกจากงานวิจัยที่มุ่งเน้นนำยามาใช้ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ LAM (Liquid additive manufacturing) ยังมีการนำยามซิลิโคนมาใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused deposition modeling (FDM) โดยเมื่อต้นปี พ.ศ. 2562 ทางบริษัท Royal DSM ได้ร่วมกับบริษัท Adaptive3D นำผลิตภัณฑ์ Soft ToughRubber มาร่วมจัดแสดงนิทรรศการที่งานประชุมวิชาการ RAPID+TCT ที่เมืองดีทรอยต์ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยบริษัททั้งสองได้นำยามซิลิโคนเหลว Soft ToughRubber มาใช้ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ FDM (ดังรูปที่ 5) ซึ่งซิลิโคนนี้สามารถทำโมเดลงานทางการแพทย์ หูฟัง (audio earbuds) และรองเท้าได้ โดยซิลิโคนตัวนี้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยแสงได้ จึงเป็นการลดการใช้พลังงาน ลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ และยังลดของเสียจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตลงได้ นอกจากนี้ยังมีบริษัทอื่นๆ ที่พยายามสร้างความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยต่างๆ เช่น ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัย ETH Zurich กับบริษัท Strait Access Technologies (SAT) ที่ได้ร่วมกันพัฒนายามซิลิโคนเหลวเพื่อใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติให้สามารถผลิตชิ้นงานวาล์วหัวใจสำหรับหัวใจผู้ป่วยในแต่ละรายให้มีขนาดพอดีกับห้องหัวใจ (ดังรูปที่ 6) ซึ่งถือเป็นการพัฒนาด้านยาทางการแพทย์ที่สำคัญในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Rick Z. and Felipe E., “Three-dimensional printing of liquid silicone rubber using liquid additive manufacturing”, Rubber World, 06, p28, (2019)
2. [http://www.geocities.ws/banban/7.1\(Categories%20of%20Standards\).html](http://www.geocities.ws/banban/7.1(Categories%20of%20Standards).html)
3. <https://www.blognone.com/node/55911>
4. http://www.bangkokgis.com/bangkokgis_2008//system_file/-t1430102446.pdf

5. https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/303_29.pdf
6. <https://www.youtube.com/watch?v=WlrCoQe4Gpk>
7. <https://www.3dnatives.com/en/softest-tough-photopolymer-030620195/>
8. <https://www.3dnatives.com/en/swift-technique-human-organs-160920194/>
9. <https://www.rubbernews.com/news/dsm-adaptive3d-partner-new-printable-photopolymer>
10. <https://www.european-rubber-journal.com/2019/07/28/scientists-develop-customised-silicone-heart-valves/> (28/07/2019)
11. <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/07/herzklappen-aus-silikon.html>
12. <https://3dprintingindustry.com/news/wacker-to-release-new-silicone-3d-printer-and-materials-at-k-2019-158197/>
13. <https://www.sync-innovation.com/3d-printing-technology/3d-print-silicone-and-pu/>
14. <https://www.blockdit.com/articles/5cb729b7a0b38e570af0ff4f>
15. <https://www.rabbitprototype.com/>
16. <https://www.voathai.com/a/three-d-heart-ss/1713457.html>
17. <https://sites.google.com/a/bumail.net/3dprintingdimension/thekhnoyoi-khxng-kheruxngphimph-sam-miti>
18. https://www.kmutt.ac.th/jif/public_html/article_detail.php?ArticleID=175182
19. <https://www.icst3dprinter-group.com/>
20. WO2018087293