มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)

ประจำปีงบประมาณ 2564

เรื่อง การพัฒนาการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Devlopment of molding the sensitive reaction of ceramic materials using 3D printing

คณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายรุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ หัวหน้าโครงการ

สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี)

เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาการการพัฒนาการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบการทำงาน รวมถึงการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ คือประเภท Delta เนื่องจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการก่อตัวประมาณ 3-5 นาที คำสั่งที่ใช้ในการพิมพ์ ใช้เป็นคำสั่ง G-Code ระบบการผสมใช้การผสมภายนอกเครื่องและลำเลียงเข้าสู่ท่อดันตัวอย่าง ปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้งานขนาดของ Extrusion Nozzle ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher ขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งต้องมีความสัมพันธ์กันจึงจะสามารถขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ได้ โดย Extrusion Nozzle ทุกขนาด จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.42-0.44 และทำการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอก และรูปทรลลูกบาศก์จะมีลักษณะ และขนาดใกล้เคียงกันแบบ ส่วนความละเอียดของวัสดุที่ผสมต้องร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 0.15 มิลลิเมตร

Abstract

This research studies the development 3D printer for molded sensitive ceramic material including designing a 3D printer, system, molding for geopolymer materials and cement material. The results can be summarized as follows: suitable 3D printer for molding of geopolymer and cementitious materials is Delta type. Because of geopolymer and cementitious materials must use about 3-5 minutes for set. The code program for conmand 3D printer is G-Code. The Mixing system is external mixing and dumps in pipe with puncher. Important factors for print is size of extrusion nozzle, speed of extrusion pusher, particle size of material, ratio of water to binder. They must be related to each other in order to be able to molding geopolymer and cementitious materials. All size extrusion nozzles can ued water-to-binder ratio in the range of 0.42-0.44 and mold cylindrical and cube shape, similar with computer model. In addition, the materials were sieved through sieve No. 100 that have particle size not exceeding 0.15 mm.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยจากสำนักวิจัยงานวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2562 และขอขอบคุณศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี) และห้องปฏิบัติการนวัตกรรมสิ่งแวดล้อม และวัสดุก่อสร้างอัจฉริยะที่สนับสนุนเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดสอบ และอำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
บทนำ	
- ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
- วัตถุประสงค์	2
- ขอบเขตของการวิจัย	2
- วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป	2 – 3
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย	4 – 9
วิธีการดำเนินการวิจัย	10
อภิปรายผล	11 – 23
สรุปและข้อเสนอแนะ	24 – 25
เอกสารอ้างอิง	26

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชนิดของจีโอพอลิเมอร์	5
4.1	ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher	19
4.2	เงื่อนไขในการทดสอบการขึ้นรูปแบบทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม	21
4.3	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ	23

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
4.1	โครงการสร้างเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Delta	13
4.2	แผงวงจร PCB ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	13
4.3	แผงวงจร Cerambot ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	14
4.4	แผงวงจร ควบคุมอัตราการไหลของวัสดุพิมพ์	15
4.5	โปรแกรม Ulitimaker CURA เวอร์ชั่น 4.1.0	15
4.6	หัวฉีด Extrusion Nozzle	16
4.7	ชิ้นงานทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสม	16
4.8	กระบอกฉีด Extrusion Pusher	17
4.9	Extrusion Nozzle	18
4.10	ทดสอบ Extrusion Nozzle แต่ละขนาด	18
4.11	ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก	20
4.12	ชิ้นงานทดสอบทรงลูกบาศก์	20

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการของประชาชนในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากการเลือกที่ความทนทาน หรือวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ต้องมีการออกแบบที่สวยงามและมีรายละเอียดมากขึ้น ทำให้ในกระบวนผลิตจึงต้องมีการทำต้นแบบของงานออกมาก่อนเพื่อให้ลูกค้าได้พิจารณาความถูกต้องก่อนการทำการผลิตจริง ซึ่งในบางกระบวนการจะต้องมีการสร้างแบบหล่อจริง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงมากพอสมควร ซึ่งอาจจะไม่เหมาสมกับงานที่มีปริมาณจำนวนการสั่งไม่มากนัก ปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่เรียกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะสามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีรายละเอียดใกล้เคียง หรือเทียบเท่ากับชิ้นงานจริง ให้ลูกค้าได้มีการตรวจสอบก่อนลงทุนในการผลิตจริง ซึ่งทำให้ลดเรื่องของเวลาในการทำงาน ค่าใช้จ่ายในการผลิตต้นแบบ ความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดของรูปแบบได้ นอกจากนั้นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ยังสามารถใช้วัสดุในการขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เช่น พลาสติก เรซิ่น ดินเซรามิก อาหาร เป็นต้น

วิวัฒนาการในการการผลิตกระดูกเทียมในปัจจุบันสามารถใช้วัสดุได้หลายรูปแบบ เช่น โลหะ พลาสติด เซรามิก หรือวัสดุผสม เป็นต้น โดยวัสดุทางเซรามิกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ในการผลิตกระดูกเทียม ซึ่งสามารถทำได้จากการสังเคราะห์สารที่มีชื่อทางเคมีว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์(Hydroxyapatite) ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทแคลเซียมฟอสเฟต โดยสามารถสกัดได้จากกระดูกสัตว์ หรือเปลือกของสัตว์ ด้วยกรด ซึ่งกระบวนการในการสกัดมีหลายวิธี แต่ข้อจำกัดของการใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ นั้นคือเรื่องของปริมาณในการสกัด และการขึ้นรูป การขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นจะต้องทำการอัดขึ้นรูป และนำไปทำการเผา ซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการทำหรือผลิตกระดูกเพื่อทดแทนกระดูกจริงในมนุษย์แต่ละคน เนื่องจากแต่ละคนมีสรีระที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการสร้างแบบในการอัดขึ้นรูปเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการรักษาทางการแพทย์ที่ต้องเพิ่มขึ้นไปด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้สามารถที่จะขึ้นรูปกระดูกให้ได้เหมาะสมใกล้เคียงกับผู้ป่วยมากที่สุด ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปนี้จะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกที่มีวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุหลัก และเนื่องจากทั้งวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการผสมกับน้ำหรือสารละลายด่างก็จะต้องมีการพิจารณาออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่ระบบในการกวนผสม ระบบในการลำเลียงวัตถุดิบ ระบบหัวฉีดขึ้นรูป และระบบการกระตุ้นให้วัสดุเกิดการแข็งตัว ซึ่งความสำเร็จจากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถที่จะสร้างกระดูกเทียมที่มีขนาดและรูปร่างเหมาะกับแต่ละบุคคลได้

วัตถุประสงค์

1. พัฒนา ออกแบบ และสร้างโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์
2. พัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
3. พัฒนา ออกแบบ และสร้างชุดขึ้นรูปของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
4. พัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการออกแบบ และสร้างโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์ โดยการทำการออกแบบโครงสร้างพร้อมระบบควบคุมเครื่องพิมพ์ 3 มิติให้สามารถรองรับชิ้นงานที่มีขนาดไม่ต่ำกว่า 40 x 40 x 50 cm โดยทำการออกแบบโครงสร้าง ระบบในการเคลื่อนที่ และระบบควบคุม
2. ทำการออกแบบ และสร้างระบบผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการออกแบบอุปกรณ์เก็บวัสดุ และระบบกวนผสมวัสดุซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยเวลาตั้งแต่การผสมจนถึงการขึ้นรูป วัสดุจะต้องไม่แข็งหรือหยุดการเกิดปฏิกิริยาก่อน
3. ทำการออกแบบ และสร้างชุดขึ้นรูปของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการพัฒนารูปแบบของหัวฉีดวัสดุสำหรับขึ้นรูป โดยอาจจะพิจารณาเรื่องรูปแบบ และระบบกระตุ้นการแข็งตัวเบื้องต้น
4. ทำการพัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยเน้นการสร้างสิ่งแวดล้อมในการกระตุ้นการทำปฏิกิริยาของวัสดุที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับวัสดุ

วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป

1. ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบต่างๆ ก่อนนำไปออกแบบตัวเครื่องพิมพ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์
2. ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติ รวมถึงสร้างระบบสำหรับการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์
3. ทดสอบระบบเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์โดยการขึ้นรูปชิ้นงานเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเหมาะสมจากระบบการผสม และรายงานผลการทดสอบ
4. ทำการปรับปรุงระบบผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงาน
5. ออกแบบและสร้างชุดขึ้นรูปของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ด้วยวิธีการพัฒนารูปแบบของหัวฉีดวัสดุสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน
6. ทดสอบชุดขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ที่ได้สร้างและรายงานผลการทดสอบ

7. ออกแบบ และสร้างระบบเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติ แล้วทดสอบการขึ้นรูปและรายงานผลการทดสอบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูวัสดุซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ในรูปแบบต่าง ๆ
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้
3. ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างต้นแบบของชิ้นงาน
4. สามารถขึ้นรูปวัสดุที่มีความเฉพาะเจาะจง ในเรื่องรูปร่าง ขนาด ของชิ้นงาน หรือชิ้นส่วนได้

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์

2.1.1 ความหมาย

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุที่มีสารประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเรียกว่าวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว ดินขาวเผา เป็นต้น โดยเมื่อผสมกับสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา พอลิคอนเด็นเซชัน (Polycondensation) ได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีสมบัติในการยึดประสานและมีสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งสามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงอัด โดยปฏิกิริยาจีโอพอลิเมไรเซชันเกิดขึ้นจากการนำสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมากระตุ้นวัสดุที่มีซิลิเกต (SiO_2) และอลูมิเนต (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ โดยใช้สารละลายด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain) ซึ่งอาจใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย แต่การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องผ่านอุณหภูมิสูงได้เหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.2 ปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในรูปสายโซ่พอลิเมอร์โครงสร้าง 3 มิติ ของ Si–O-Al–O โดยโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะจัดเรียงอยู่ในรูปแบบ 3 รูปแบบ คือ poly(sialate) (-Si-O-Al-O), Poly(sialate-siloxo) (Si-O-Al-O-Si-O) และ poly(sialate-disiloxo) (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) โดยความแข็งแรงภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของซิลิเกตและอลูมิเนต ซึ่งกลไกการเกิดมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ

1) ขั้นตอนการชะละลาย เป็นขั้นตอนที่สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์จะเข้าไปชะละลายแหล่งอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate source) ทำให้ซิลิเกตและอลูมิเนตหลุดออกจากผิววัตถุตั้งต้น
2) ขั้นตอนสภาวะสมดุลจำเพาะ เกิดหลังจากขั้นตอนการชะละลาย โดยซิลิเกตและอลูมิเนตถูกปลดปล่อยอยู่ในรูปมอนอเมอร์อย่างอิสระในสารละลายที่มีสภาวะสมดุล
3) ขั้นตอนการกลายเป็นเจล การละลายของสัณฐาณอลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง และเกิดเป็นสารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิ่มตัว (Supersaturated aluminosilicate solution) อยู่ในรูปของเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำโครงข่ายใหญ่ โดยการควบแน่นโครงสร้างของเจลมี 2 เฟส คืออลูมิโนซิลิเกตและน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่เหลือในโพรงเจลออกมา
4) ขั้นตอนการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ และมีการปลดปล่อยน้ำ
5) ขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยผ่านกระบวนการเกิดพอลิคอนเดนเซชัน เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงของอลูมิโนซิลิเกตหนาแน่นมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง

2.2 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ [1]

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิเกต (SiO_2) และอลูมิเนต (Al_2O_3) โดยเกิดการเชื่อมโยงของอลูมิโนซิลิเกตในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ $[AlO_4]^{5-}$ และ $[SiO_4^{4-}]$ โดยโมเลกุลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า sialate (Si-O-Al) โดยมีโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม (Na^+) หรือ โพแทสเซียม (K^+) ในการทำให้ประจุสมดุลที่ตำแหน่งของ $[AlO_4]^{5-}$ นอกจากนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ในสารตั้งต้น โดยหน่วยโครงสร้างพื้นฐานโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้

$$nM_2O \bullet Al_2O_3 \bullet xSiO_2 \bullet yH_2O$$

โดย M คือ โลหะอัลคาไล (เช่น โซเดียม, โพแทสเซียม, แคลเซียม)

n คือ จำนวนของโมเลกุลลูกโซ่ (polycondensaation)

x คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

y คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะมีการเรียกชื่อสายโซ่โมเลกุลตามโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอะตอม Si : Al ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของจีโอพอลิเมอร์

Si : Al	หน่วยโมเลกุล	ชื่อเรียกโมเลกุล	ชื่อเรียกพอลิเมอร์
0	-Si-O-Si-O-	siloxo	poly (siloxo)
1	-Si-O-Al-O-	sialate	poly (sialate)
2	-Si-O-Al-O-Si-O-	sialate-siloxo	poly (sialate-siloxo)
3	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	sialate-diiloxo	poly (sialate-disiloxo)
	-P-O-P-O-	phosphate	poly (phosphate)
	-P-O-Si-O-P-O-	Phospho-siloxo	poly (phospho-siloxo)
	-P-O-Si-O-Al-O-P-O-	Phospho-sialate	poly (phosphor-sialate)
	-(R)-Si-O-Si-O-(R)	Organo-siloxo	poly - silicone
	-Al-O-P-O-	Alumino-phospho	poly (alumino-phospho)
	-Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O-	Ferro-sialate	poly (ferro-sialate)

2.3 วัสดุปอสโซลาน (Pozzolanic Material)[2,3]

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91[19] ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า “ปอสโซลาน” คือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือมีทั้งซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งโดยตัวมันเองแล้วไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (Cementious properties) แต่เมื่อกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วผสมรวมกับน้ำจะทำให้แข็งตัวและสามารถพัฒนากำลังอัดได้ วัสดุปอสโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือวัสดุปอสโซลานคือ สารหรือวัสดุใดๆ ที่สามารถแข็งตัวได้เมื่อผสมกับปูนขาวที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ วัสดุปอสโซลานจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ด้วยตัวของมันเอง แต่จะเกิดปฏิกิริยาได้ถ้าเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายหรือการเติมปูนขาวในกระบวนการไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอสโซลานคือความสามารถในการรวมตัวกับปูนขาวเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรตชนิดใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติในการเกาะยึดประสานหรือแข็งตัวได้

การนำวัสดุปอสโซลานมาใช้เป็นวัสดุซีเมนต์มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบแล้วสามารถปรับปรุงคุณภาพมอร์ต้า (ปูนซีเมนต์ผสมทราย) ให้ดีขึ้น โดยทำให้มอร์ต้าตกตะกอนทับถมกันซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับดินในตำบลใกล้เคียงกับเมืองปอซซูโอลี (Pozzouli) และนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมอร์ต้าได้ ดังนั้นในยุคต่อๆ มาจึงเรียกวัสดุที่นำมาปรับปรุงคุณภาพนี้ว่าปอสโซลานา ประเภทของสารปอสโซลานแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

(1) สารปอสโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือวัสดุที่เกิดจากการระเบิดภูเขาไฟ และหินพรุน (Pumicite) เป็นต้น

(2) สารปอสโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 91 จำแนกสารประกอบปอซโซลานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

(1) Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ(Natural pozzolans) คือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพรุน (Pumicite)

(2) Class F ได้แก่สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artifical pozzolan) คือ วัสดุที่ได้จาการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว , หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ขี้เถ้าหิน ขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น

(3) Class C เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบเช่นเดียวกับข้อ (2) แต่มีข้อกำหนดสมบัติบางประการที่ต่างกัน

2.4 การทำปฏิกิริยาของปอสโซลาน [2-4]

ปูนขาวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐาน ปฏิกิริยาปอสโซลานเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอสโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮกรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์

สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอสโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอสโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40

วัสดุปอสโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เพื่อทำให้เกิดสารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังปฏิกิริยาที่เกิดตามสมการข้างล่างนี้

<u>ขั้นตอนที่1</u>

$$2(3Ca.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$2(2Ca.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

<u>ขั้นตอนที่2</u>

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

จากสมการจะเห็นว่าปฏิกิริยาเกิดในขั้นตอนที่ 2 เพราะในขั้นตอนแรกปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้า ดังนั้นจึงคาดการณ์ไว้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอสโซลานจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในวัสดุปอสโซลานแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารซีเมนต์ ไม่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์– ปอสโซลาน ปูนขาว – ปอสโซลาน และ สารประกอบซีเมนต์ – ปอสโซลาน ภายหลังการผสมวัสดุปอสโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาวกับน้ำ) ของเหลวจะอิ่มตัวอย่างรวดเร็วด้วยปูนขาว ค่า pH มากกว่า 12.7 อนุภาคปอสโซลานจะสัมผัสกับน้ำในสภาพที่เป็นด่างสูง จึงทำให้ SiOH (Siliga Hydroxyl group) ไปเคลือบอยู่บนอนุภาคปอสโซลานในรูปของ SiO_4^{4-} และH^+ ในขณะที่ Ca^{2+} ทำให้ชั้นผิวหนามากขึ้น เพราะฉะนั้นสาเหตุหลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อมาเกิดจากการแพร่กระจายของกลุ่มอะตอมผ่านชั้นที่หนาแน่นด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรตที่เกิดกับวัสดุปอสโซลานกับ $Ca(OH)_2$

2.5 การทำงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เครื่องพิมพ์ 3 มิติเป็นเครื่องจักรที่ใช้กระบวนการเติมเนื้อวัสดุ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างที่สามารถจับต้องได้ตามที่ต้องการ โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งการเติมเนื้อหรือพิมพ์วัสดุลงไปนั้นเรียกว่า Additive Process ซึ่งการพิมพ์นั้นจะค่อยเป็นไปทีละ Layer หรือทีละชั้น ข้อมูลในรูปแบบของดิจิทัลสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำพวก CAD (Computer Aided Design) ทำการออกแบบ หรือเครื่องสแกนเนอร์ 3 มิติที่เปลี่ยนวัตถุให้ไปเป็นข้อมูลไฟล์ดิจิทัล แล้วนำไฟล์ที่ได้ไปทำการ Slice หรือตัดเลเยอร์งานออกมาให้เป็นแผ่นบางๆ เพื่อที่ให้เครื่องพิมพ์ 3 มิติพิมพ์แผ่นหรือชั้นบางๆ นั้นทับต่อกัน จนเกิดเป็นวัตถุ 3 มิติขึ้น

2.5.1 เทคนิคการขึ้นรูปเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติมีความแตกต่างกันในด้านของวัสดุที่ใช้พิมพ์ และกระบวนการในการพิมพ์ โดยสามารถแบ่งออกมาได้เป็นเทคโนโลยีแบบ Vat Photo polymerization แบบ Material Jetting แบบ Binder

Jetting แบบ Material Extrusion แบบ Powder Bed Fusion แบบ Sheet Lamination และแบบ Directed Energy Deposition เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเทคนิคใหม่ๆ ที่ซับซ้อนเพื่อให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปมากขึ้น เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเช่น

เทคนิคขึ้นรูปแบบ Stereo lithography (SLA) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการยิงแสงเลเซอร์ไปบนของเหลว เพื่อให้ของเหลวในแต่ละชั้นแข็งตัว โดยวัสดุของเหลวเป็นแบบ liquid photopolymer (resin) ชิ้นงานที่ได้จะมีความละเอียดและเที่ยงตรงสูง แต่ราคาเครื่องจักรและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษามีราคาที่สูง

เทคนิคขึ้นรูปแบบ 3D jet printer systems เทคนิคนี้ใช้หลักการของ Ink Jet Printer แต่ทำการพิมพ์ในแบบ 3 มิติ โดยการพ่นวัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติกเช่น โพลีเอสเทอร์ ผ่านหัวพ่นให้เป็นรูปแบบตามที่ต้องการ ใช้งานง่ายและสร้างแบบจำลองได้อย่างรวดเร็วและสามารถเลือกสีต่างๆ ได้

เทคนิคขึ้นรูปแบบ Selective Laser Sintering (SLS) เป็นเทคนิคที่เผาผนึกวัตถุดิบที่ใช้ด้วยแสงเลเซอร์แบบเดียวกับเทคนิค SLA แต่ใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า เช่น Thermoplastic, Nylon, Polyamide และ Polystyrene โดยวัตถุดิบที่ใช้จะอยู่ในรูปผง เช่น โลหะ พลาสติก เซรามิก และแก้ว เครื่องจะใช้แสงเลเซอร์วาดรูปแบบขึ้นทีละชั้นและพ่นผงเหล่านี้ลงไปหลอมละลายกระทั่งกลายเป็นชิ้นงาน เทคนิคนี้เหมาะใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

เทคนิคขึ้นรูปแบบ Digital Light Processing (DLP) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการเดียวกันกับเทคนิค SLS แต่ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีขาวจากไฟแอลอีดีเพื่อให้ความร้อนแทนเลเซอร์ วัสดุที่ใช้เป็นยาง และเรซิ่น

เทคนิคขึ้นรูปแบบ Laminated Object Manufacturing (LOM) เป็นเทคนิคที่ใช้วัสดุที่เป็นแผ่นบาง ๆ คล้ายกระดาษ และมีสารยึดติดที่หน้าหนึ่งของแผ่น แล้ว feed เข้าสู่เครื่องตัดด้วยเลเซอร์ เป็นชั้นต่อชั้นขึ้นไป วัสดุที่จะขึ้นรูปจะอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก (พีวีซี) โลหะที่เป็นเหล็ก และไม่ใช่เหล็ก

เทคนิคขึ้นรูปแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเทคนิคที่ใช้อย่างแพร่หลาย โดยใช้วัสดุหลักเป็นแท่งพลาสติกหรือโลหะที่พันเป็นม้วน ส่งผ่านไปยังหัวจ่ายหรือหัวฉีดที่มีรูขนาดเล็ก และตรงปลายหัวฉีดจะมีฮีทเตอร์สำหรับให้ความร้อนเพื่อจะหลอมให้พลาสติกละลายก่อนนำมาพ่นลงบนแท่นวาง ซึ่งหัวฉีดจะเคลื่อนที่ตามโปรแกรมที่ผ่านการ Slice มาแล้ว ในขณะที่หัวฉีดเคลื่อนที่ ก็จะฉีดพลาสติกออกมาและเริ่มพิมพ์ทับกันไปเป็นชั้นจนก่อให้เกิดรูปชิ้นงาน 3 มิติซึ่งพลาสติกที่ถูกฉีดพ่นออกมาจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ระบบ FDM นี้ได้ถูกไปพัฒนาสำหรับการพิมพ์เนื้อเยื่อ หรือโครงสร้างของอวัยวะเทียม

2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่ผ่านมา

ปัจจุบันเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีหรือเทียบเท่ากับชิ้นงานจริง เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการสาธิตชิ้นงานก่อนนำไปผลิตในปริมาณที่มีจำนวนมากได้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องแบ่งเป็น 2 ด้านได้แก่ ด้านกระบวนการในการพิมพ์ [5-6] และด้านของวัสดุที่ใช้พิมพ์ [6-10] ด้านกระบวนการในการพิมพ์ มีเทคนิคต่างๆ สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน Ben Utela [6] ได้นำเสนอกระบวนการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่ระบบในการกวนผสม ระบบในการลำเลียงวัตถุดิบ ระบบหัวฉีดขึ้นรูปและการทดสอบ

ด้านของวัสดุที่ใช้พิมพ์ ได้ประยุกต์วัสดุต่างๆ สำหรับให้เครื่องพิมพ์ 3 มิติสร้างชิ้นงาน เช่น พลาสติก เรซิ่น ดินเซรามิก [8] วัสดุองค์ประกอบทางอาหาร อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีทางด้านวัสดุแบบผสมได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญให้กับเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติเนื่องจากต้นทุนที่สูงของวัสดุ วัสดุจีโอพอลิเมอร์คือวัสดุแบบหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติเพื่อสร้างชิ้นงานที่ประหยัด ปัจจุบันทางด้านการแพทย์ [9-10] ได้มีการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติเพื่อสร้างผลิตกระดูกเทียมให้ได้เหมาะสมใกล้เคียงกับผู้ป่วยมากที่สุด แต่เนื่องจากแต่ละคนมีสรีระที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการสร้างแบบในการอัดขึ้นรูปเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการรักษาทางการแพทย์ที่ต้องเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้สามารถที่จะขึ้นรูปกระดูกให้ได้เหมาะสมใกล้เคียงกับผู้ป่วยมากที่สุด ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปนี้จะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกที่มีวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุหลัก และเนื่องจากทั้งวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการผสมกับน้ำหรือสารละลายด่างก็จะต้องมีการพิจารณาออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่ระบบในการกวนผสม ระบบในการลำเลียงวัตถุดิบ ระบบหัวฉีดขึ้นรูป และระบบการกระตุ้นให้วัสดุเกิดการแข็งตัว ซึ่งความสำเร็จจากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถที่จะสร้างกระดูกเทียมที่มีขนาดและรูปร่างเหมาะกับแต่ละบุคคลได้

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ โดยสร้างชุดขึ้นรูปของวัสดุและสร้างระบบเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ ในบทนี้จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาระบบการทำงาน และออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และระบบสำหรับการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์
2. การทดสอบชุดขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ที่ได้

3.1 การศึกษาระบบการทำงาน การออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และระบบสำหรับการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์

ในการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำเป็นต้องศึกษาประเภทของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้งนี้ความสามารถในการใช้งานของเครื่องพิมพ์ชนิดต่างๆ จำเป็นต้องเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ เพื่อให้การพิมพ์มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการศึกษา

- รูปแบบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
- ระบบการทำงาน และรูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
- การออกแบบและสร้างเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติ
- การออกแบบหัวจ่ายวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยระบบ Extrusion Nozzle และ Extrusion Pusher

3.2 การทดสอบระบบขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์

โดยทำการศึกษาขนาดของ Extrusion Nozzle ที่ขนาด 1.40 - 2.00 มิลลิเมตร ความเร็วของ Extrusion Pusher ที่เหมาะสมกับขนาดของ Extrusion Nozzle, ปริมาณน้ำต่อวัสดุยึดประสานของวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป โดยทำการทดลองพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติต้นแบบ ในรูปแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 50 มิลลิเมตร มีความสูง เท่ากับ 50 มิลลิเมตร และทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเก็บข้อมูลในการทำงานของเครื่อง และลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน

อภิปรายผล

4.1 การศึกษาระบบการทำงาน การออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และระบบสำหรับการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์

ในการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำเป็นต้องศึกษาประเภทของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้งนี้ความสามารถในการใช้งานของเครื่องพิมพ์ชนิดต่างๆ จำเป็นต้องเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ เพื่อให้การพิมพ์มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการศึกษารูปแบบ ระบบการทำงาน และรูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ, การออกแบบและสร้างเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติ และการออกแบบหัวจ่ายวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยระบบ Extrusion Nozzle และ Extrusion Pusher

4.1.1 รูปแบบ ระบบการทำงาน และรูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

โดยทั่วไปการสร้างชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะรับคำสั่งทั้งหมดเป็น G-Code ซึ่งเป็นคำสั่งเดียวกับกการสั่งงานเครื่อง CNC หรือ Milling โดยโปรแกรมที่ทำการสร้าง G-Code มีหลากหลายเช่น Cura, Simplify3D, MakerWare, Sli3r, Repetier เป็นต้น โดยสามารถเปิดโมเดลขึ้นมาและกำหนดค่าที่ต้องการพิมพ์ โปรแกรมจะทำการสไลด์วัตถุออกเป็นชั้น โดยที่เครื่องจะพิมพ์ทีละชั้น โดยประเภทของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มี 2 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. **Cartesian** เป็นเครื่องพิมพ์ที่พบเห็นทั่วไป เครื่องจะพิมพ์จากยึดแกนในแกนหนึ่งในการเคลื่อนที่ของหัวฉีด โดยมีการยึดการเคลื่อนที่ของหัวฉีดในแกน X, Y เท่านั้น คือมีการเคลื่อที่ได้ซ้าย-ขวา/หน้า-หลัง เมื่อพิมพ์เสร็จในชั้นหนึ่งๆแล้วเครื่องจะยกหัวฉีดทั้งชุดขึ้นในแนวแกน Z เพื่อพิมพ์ในชั้นต่อไป โดยมีข้อดีข้อเสียดังนี้

   ข้อดี

   - เครื่องพิมพ์ค่อนข้างมีความเสถียร เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของหัวฉีดจะเคลื่อนที่อยู่ใน 1 หรือ 2 แกนในรางสไลด์
   - พื้นที่พิมพ์งานเป็นทรงกล่องสี่เหลี่ยม

   ข้อเสีย

   - หากมีขนาดใหญ่ขึ้น จะผลิตค่อนข้างยาก
   - น้ำหนักมาก (หนักโครงสร้าง รางสไลต์)
   - ชิ้นงานมีการเคลื่อที่ตลอดเวลา

2. **Delta** เป็นเครื่องพิมพ์ที่มีแกนเสาอยู่ 3 เสา เครื่อง Delta มีฐานพิมพ์อยู่กับที่ หัวฉีดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระทั้งสามแกน X, Y และ Z โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวฉีดด้วยการทำงานสัมผัสกันของมอเตอร์ขับเคลื่อนทั้งสามตัว เครื่องระบบนี้สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่มากๆได้โดยมีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- สามารถสร้างเครื่องให้พิมพ์ชิ้นงานได้ง่าย
- มีน้ำหนักน้อยกว่า
- มีต้นทุนในการผลิตน้อยกว่า
- มีพื้นที่พิมพ์งานทรงกระบอกสูง
- ชิ้นงานอยู่กับที่

ข้อเสีย

- Setting หรือ จูนเครื่องให้พิมพ์ได้ดีค่อนข้างยาก
- คุณภาพงานลดลงเมื่ออยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง

จากการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องพิมพ์ทั้งสองแบบพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้งานคือ ลักษณะของชิ้นงาน ลักษณะของวัสดุพิมพ์ ดังนั้น ในการพิมพ์โดยใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ ควรใช้ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประเภท Delta จะมีความเหมาะสมมากกว่าเครื่อมพิมพ์ 3 มิติ ประเภท Cartesian กล่าวคือ การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์เป็นวัสดุในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะต้องใช้ระยะเวลาในการก่อตัว ซึ่งถ้าส่วนฐานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการเคลื่อนที่อาจจะทำให้ชิ้นงานจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ที่ยังไม่ก่อตัวเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในการพิมพ์วัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์จึงออกแบบให้ส่วนหัวของเครื่องพิมพ์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว ในทางกลับกัน หากใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภท Cartesian ชิ้นงานจะมีการเคลื่อที่ไปมา ตามคำสั่งของโปรแกรมที่ใช้ในการพิมพ์ ชิ้นงานจะเกิดการเสียหายขณะที่มีการเคลื่อนที่ในขั้นตอนของการพิมพ์

4.1.2 การออกแบบและสร้างเครื่องพิมพ์ต้นแบบ 3 มิติ

จากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้งสองชนิดพบว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประเภท Delta มีความเหมาะสมสำหรับใช้นำมาใช้เป็นเครื่องพิมพ์ต้นแบบ โดยองค์ประกอบสำคัญของการออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Delta มีด้วยกัน 3 องค์ประกอบหลักคือ

1) โครงสร้าง

โครงสร้างเสาใช้ Aluminum Profile ชนิด ต่อมุม 60 องศา (60 Corner prism) ยาว 700 มิลลิเมตร ต่อกับ Aluminum Profile ชนิด Double Flat ที่ความกว้าง 40 มิลลิเมตร สำหรับด้านที่เป็นฐานของเสาโครงสร้าง และ 50 มิลลิเมตร สำหรับด้านหัวของเสาโครงสร้างที่เริ่มจากจุดสิ้นสุดของ Linear Guide โดยขนาดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 400 มิลลิเมตร มีความสูงที่ 750 มิลลิเมตร มีน้ำหนักประมาณ 22 กิโลกรัม (ตัวเครื่อง) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

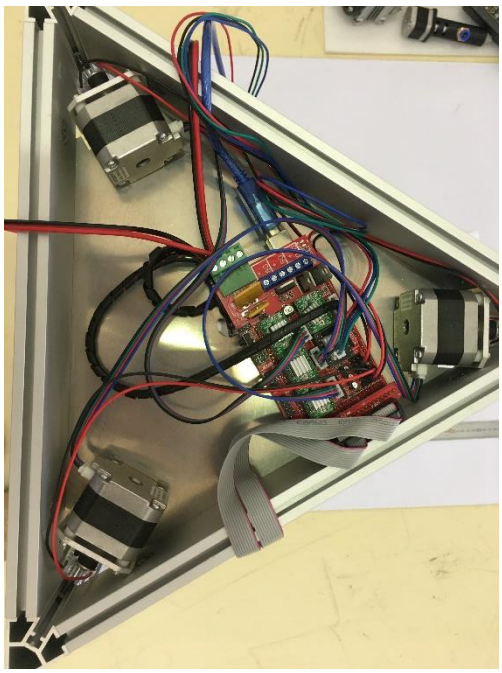
รูปที่ 4.1 โครงสร้างเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Delta

2) ระบบการทำงาน

ระบบการทำงานที่ใช้ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่สร้างขึ้น ถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบการที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และระบบที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของวัสดุพิมพ์ ซึ่งแต่ละระบบมีรายละเอียด ดังนี้

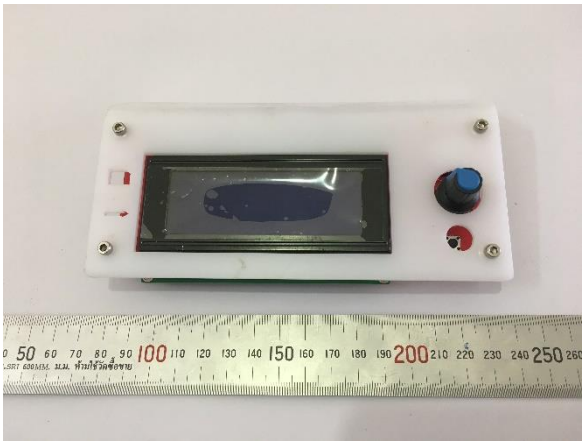
2.1) ระบบการที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดของเครื่อพิมพ์ 3 มิติ

ระบบในการเคลื่อนที่และการฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ผลิตขึ้นจะถูกควบคุมโดยแผงวงจร PCB (PCB Board) ซึ่งเป็นแผงวงจรสำหรับควบคุมมอร์เตอร์สเตป (42 Step Motor) ทั้งสามตัว และรวมไปถึง มอเตอร์สำหรับใช้ในการฉีดวัสดุพิมพ์ ซึ่งครอบคลุมระบบการเคลื่อนที่ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผงวงจร PCB ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

คำสั่งสำหรับการเคลื่อนที่และการฉีดจะถูกป้อนเข้ามาในชุดวงจร Cerambot (Cerambot Kit) ซึ่งจะต่อเข้ากับจอแสดงผล และแผงวงจร PCB ดังแสดงในรูปที่ 4.3



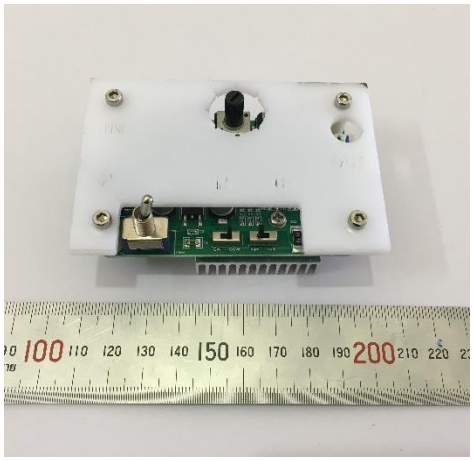
รูปที่ 4.3 แผงวงจร Cerambot ควบคุมการเคลื่อนที่และการฉีดวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะมีการออกแบบคล้ายคลึงกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบปกติ โดยใช้หลักกการเคลื่อนที่การออกแบบ โดยใช้พิกัด x และ y ใรการเคลื่อนที่ และถอดรหัสจากแบบที่เขียนสั่งในแบบ นอกจากนั้นยังต้องมีการเขียนโปรแกรมควบคุมการดันวัสดุที่หัวฉีด ให้มีการดันในปริมาณที่เหมาะสม และต้องมีการเคลื่อนที่สอดคล้องกับชุดดันตัวอย่าง

2.2) ระบบที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของวัสดุพิมพ์

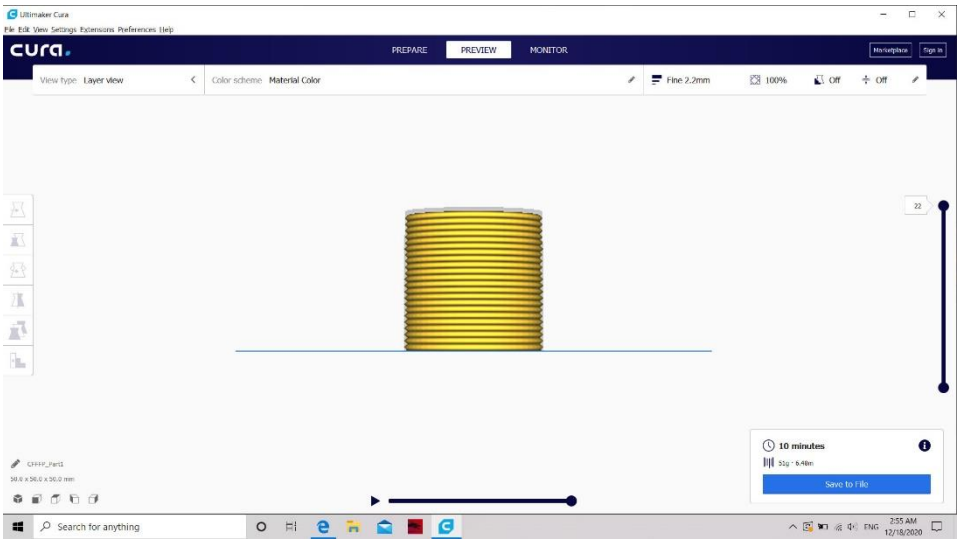
ระบบควบคุมอัตราการไหลของวัสดุพิมพ์ ประกอบไปด้วยระบบควบคุมแผงวงจร และชุดดันตัวอย่างซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1) ระบบควบคุมแผงวงจร เป็นแผงวงจรสำหรับควบคุมการใช้ควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ในการไหลของวัสดุที่ต้องการพิมพ์ โดยมีการเชื่อมต่อวงจร มีสวิชต์เป็นตัวควบคุม และใช้แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ส่วนหน้าสัมผัสของบอร์ดควบคุมจะมีปุ่มกด 1 และ 2 ซึ่งเป็นปุ่มฟังก์ชั่นโดยตั้งค่าให้ปุ่มกดที่ 1 เป็นการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา ส่วนปุ่มกดที่ 2 เป็นปุ่มที่ใช้ในการสับเปลี่ยนโดยการใช้งานของซอฟต์แวร์โหมด และฮาร์ดแวร์โหมด สวิชต์หมุมตรงกลางของบอร์ด เป็นการควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยแผงวงจรควบคุมแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผงวงจร ควบคุมอัตราการไหลของวัสดุพิมพ์

คำสั่งที่ใช้ในการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะสามารถใช้ SD การ์ด และ USB ในการส่งถ่ายคำสั่งจากโปรกรม Solid work ในรูปแบบไฟล์เพื่อใช้ในการพิมพ์ รูปแบบในการรับคำสั่งจะอ่านเฉพาะคำสั่งที่เป็น G-Code เท่านั้น ในการบันทึกไฟล์รูป 3 มิติ จะบันทึกเป็นนามสกุล .stl และนำไฟล์ที่ได้ มาสร้างคำสั่งให้เป็น G-Code โดยการใช้โปรแกรมสร้างคำสั่งด้วยโปรแกรม Ultimaker CURA เวอร์ชัน 4.1.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 บันทึกไฟล์ที่ได้ลงใน SD การ์ด หรือสามารถต่อเข้ากับ USB ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และดำเนินการพิมพ์ได้

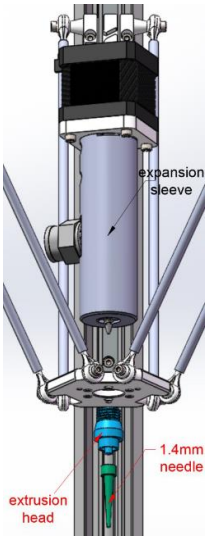


รูปที่ 4.5 โปรแกรม Ultimaker CURA เวอร์ชัน 4.1.0

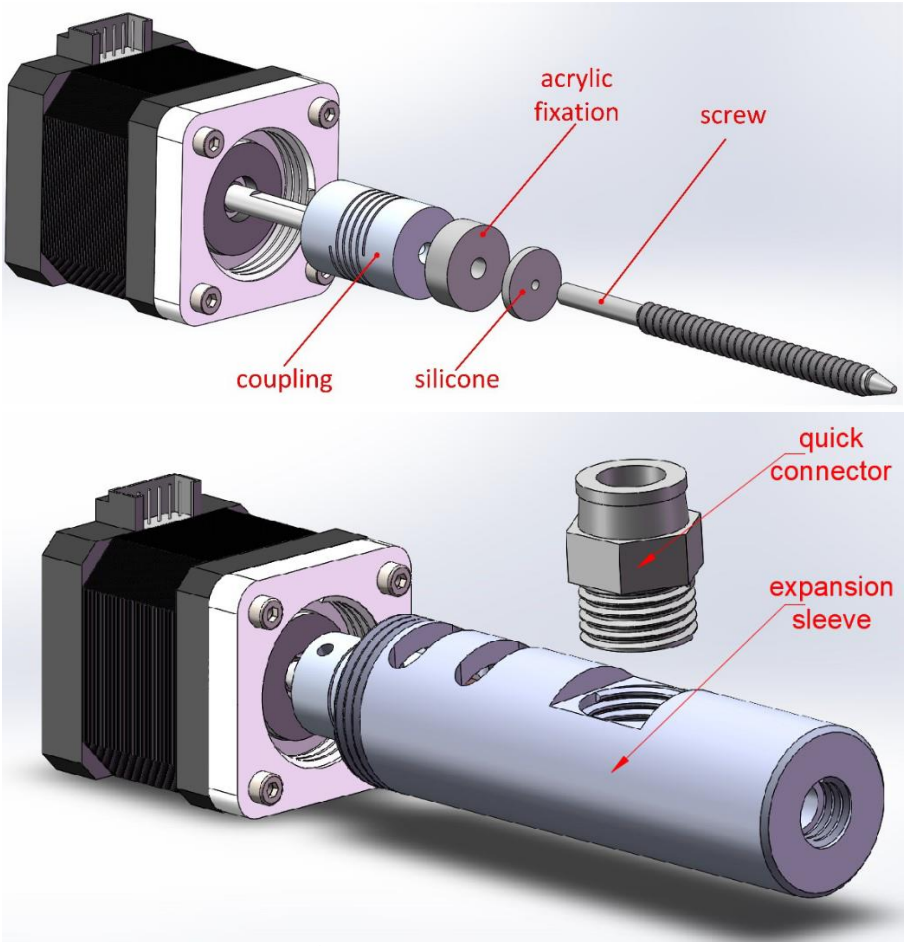
2.2.2) การออกแบบหัวจ่ายวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

การออกแบบหัวจ่ายวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะต้องประกอบไปด้วย หัวฉีด Extrusion Nozzle, กระบอกฉีด Extrusion Pusher ซึ่งรายละเอียดดังนี้

1) การออกแบบหัวฉีด Extrusion Nozzle เป็นหัวฉีดที่ใช้สำหรับในการฉีดตัวอย่างวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ โดยใช้มอเตอร์สเตปและ สกรูเป็นตัวขับเคลื่อน วัสดุพิมพ์จะถูกทำให้เข้ามาอยู่ในท่ออัดขยาย (Expansion Sleeve) โดยผ่านท่อ Quick Connector ดังรูปที่ 4.6-4.7

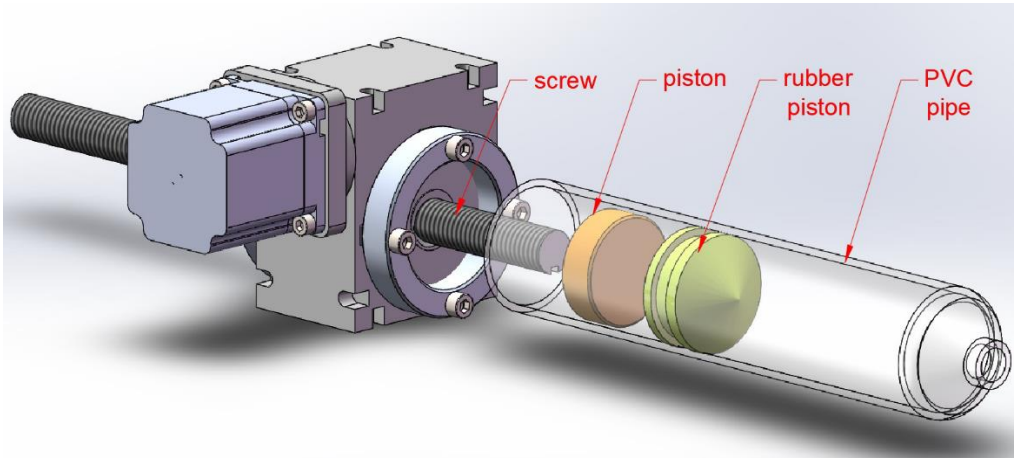


รูปที่ 4.6 หัวฉีด Extrusion Nozzle



รูปที่ 4.7 ชิ้นงานทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสม

2) การออกแบบกระบอกฉีด Extrusion Pusher กระบอกฉีด สำหรับลำเลียงตัวอย่างวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ โดยใช้มอเตอร์สเตปเป็นตัวดันวัสดุพิมพ์ โดยขั้นตอนในการใส่วัสดุสำหรับการฉีด ให้ใส่วัสดุที่ใช้สำหรับฉีดลงในกระบอก PVC จากนั้นตามด้วย Rubber piston และทำการล๊อคกระบอกฉีดเข้ากับหน้าแปลน PVC เมื่อเปิดเครื่องมอเตอร์สเตปทำงานและดันวัสดุพิมพ์ลำเลียงไปยังสายางลำเลียงซึ่งต่อเข้ากับปลายของท่อ PVC และ Quick Connector ของหัวฉีด ดังรูปที่ 4.8



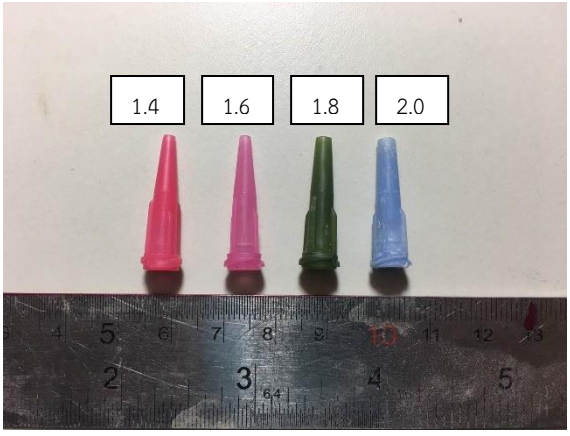
รูปที่ 4.8 กระบอกฉีด Extrusion Pusher

4.2 การทดสอบระบบขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์

ในการทดสอบการระบบขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ ที่ผลิตขึ้นจะทำการทดสอบความเหมาะสมของการขึ้นรูปโดยพิจารณาจากปัจจัย 3 ส่วนคือ ขนาดของ Extrusion Nozzle, ความเร็วในการดันตัวอย่าง และปริมาณน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ ซึ่งในการทดลองจะมีรายละเอียดดังนี้

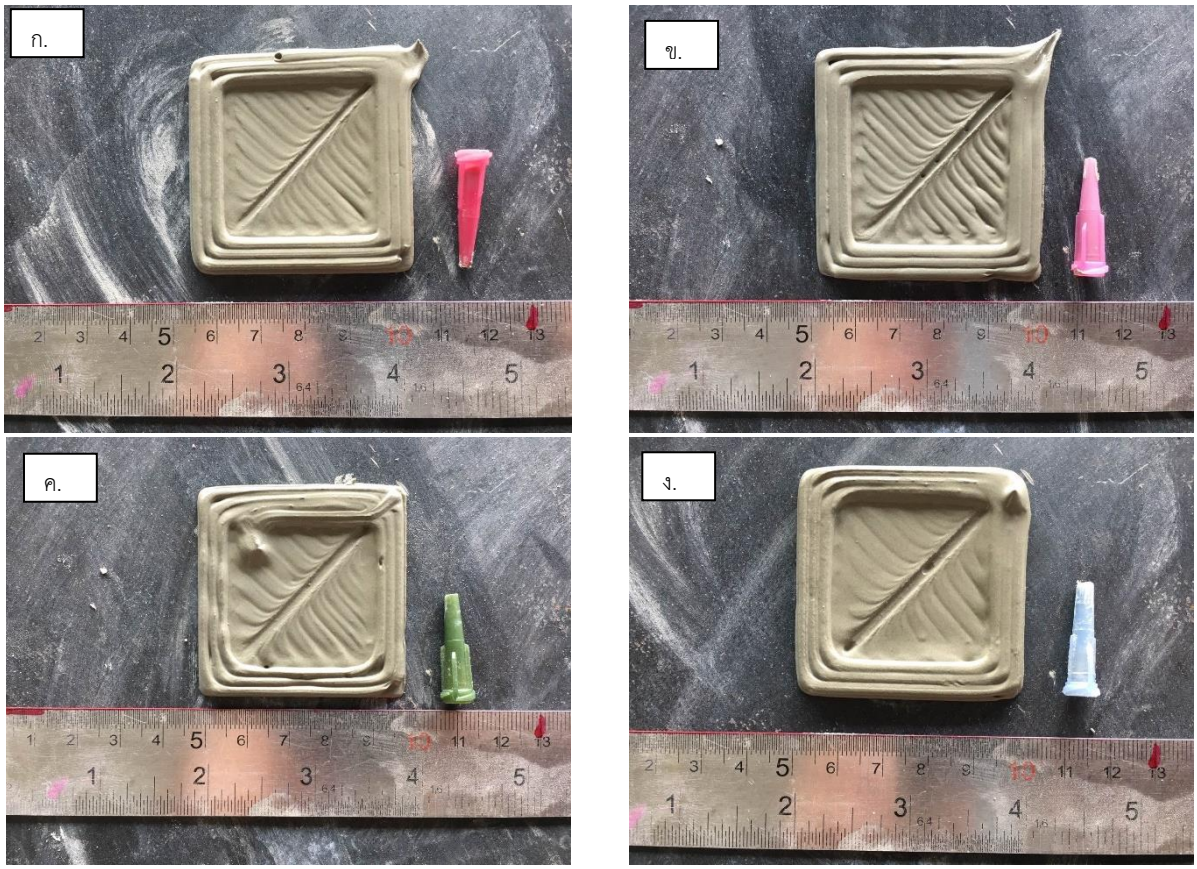
4.2.1 การศึกษาผลของขนาด Extrusion Nozzle ต่อการขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์

จากการทดสอบเพื่อศึกษาขนาดของ Extrusion Nozzle ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.4มิลลิเมตร ถึง 2.0 มิลลิเมตร โดยประยุกต์อุปกรณ์มาจากหัวฉีกหมึกที่ร่วมกับเครื่องพิมพ์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 Extrusion Nozzle แต่ละขนาด

จากการทดสอบสามารถใช้งานได้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ของหัวทดลอง Extrusion Nozzle ในแต่ละขนาด ทดสอบโดยใช้วัสดุซีเมนต์ที่ผสมน้ำในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำเท่ากับ 0.42 และใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ในสายยางลำเลียงวัสดุที่ใชในการพิมพ์เท่ากับ 80 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองมีรายละเอียดดังรูที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ทดสอบ Extrusion Nozzle แต่ละขนาด

จากรูปที่ 4.10 ก. การขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์ด้วย Extrusion Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร แต่เมื่อวัสดุซีเมนต์ถูกดันออกมาจะมีขนาดที่วัดได้จริงเท่ากับ 2.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าหัวฉีดประมาณร้อยละ 50 ส่วนหัว Extrusion Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร มีขนาดที่วัดได้จริงหลังจากการทดลองพิมพ์อยู่ที่ 2.4 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าหัวฉีดประมาณร้อยละ 50 โดยแสดงในรูปที่ 4.10 – ข. และเมื่อเพิ่มขนาด ของหัว Extrusion Nozzle เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร มีขนาดที่วัดได้จริงหลังจากการทดลองพิมพ์อยู่ที่ 2.9 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าหัวฉีดประมาณร้อยละ 61 แสดงในรูปที่ 4.10 – ค. ส่วนหัว Extrusion Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร มีขนาดที่วัดได้จริงหลังจากการทดลองพิมพ์อยู่ที่ 3.5 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าหัวฉีดประมาณร้อยละ 75 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 4.10 – ง.

ถ้าลดขนาดของหัว Extrusion Nozzle ให้มีขนากเล็กกว่า 1.4 มิลลิเมตร ไม่สามารถพิมพ์วัสดุซีเมนต์ได้ เนื่องจากวัสดุซีเมนต์ที่พิมพ์ออกมาต้องมีความละเอียดมากกว่านี้ ซึ่งปัจจุบันปูนซีเมนต์มีร้อยละคงค้างที่ตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 15 หรืออาจจะต้องลทำการทดมอเตอร์เพื่อให้ความเร็วในการดันตัวอย่างลดลง ประกอบกับอาจจะต้องมีการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดอีกด้วย ดังนั้นนาดของ Extrusion Nozzle ทั้งหมด สามารถ

ใช้งานได้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ในการพิมพ์วัสดุซีเมนต์และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้งานคือ ขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ ต้องมีความละเอียดมากพอเมื่อผสมน้ำในอัตราส่วนต่างๆ ต้องไม่จับตัวเป็นก้อน หรือมีเศษมาอุดตันที่ Extrusion Nozzle และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher ที่ใช้ดันวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ จะต้องเหมาะสมกับขนาดของ Extrusion Nozzle

4.2.2 การศึกษาความเร็วของ Extrusion Pusher

ในการขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยทำการศึกษาความเร็วของ Extrusion Pusher โดยใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ในสายยางลำเลียงวัสดุที่ใชในการพิมพ์ วัดเป็นระยะทางในการเคลื่อนที่ต่อเวลา 1 นาที โดยผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 โดยทำการควบคุมความละเอียดของวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ และทำการแปรเปลี่ยนความเร็วต่างๆ โดยทำการพิจารณาความเร็วของแต่ละ Extrusion Nozzle กับความเร็วที่ใช้จนกว่าวัสดุวัสดุซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะติดหัว Extrusion Nozzle (ไม่สามารถดันตัวอย่างออกได้) โดยทำการแปรเปลี่ยนความเร็วตั้งแต่ 60 จนถึง 90 มิลลิเมตรต่อนาที

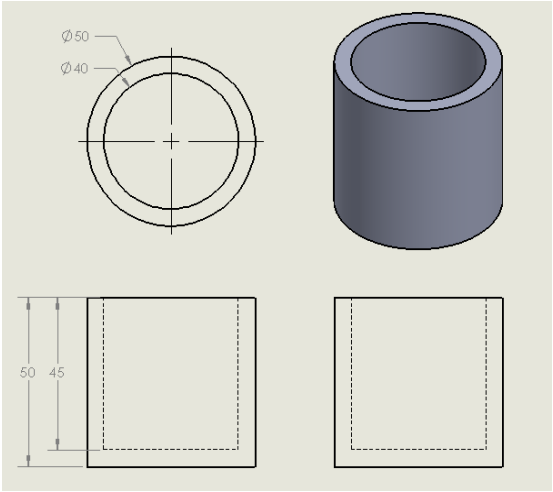
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Extrusion Nozzle (มิลลิเมตร)	ความเร็วของ Extrusion Pusher เมื่อเคลื่อนที่ (มิลลิเมตรต่อนาที)
1.00	64
1.40	70
1.80	78
2.20	85

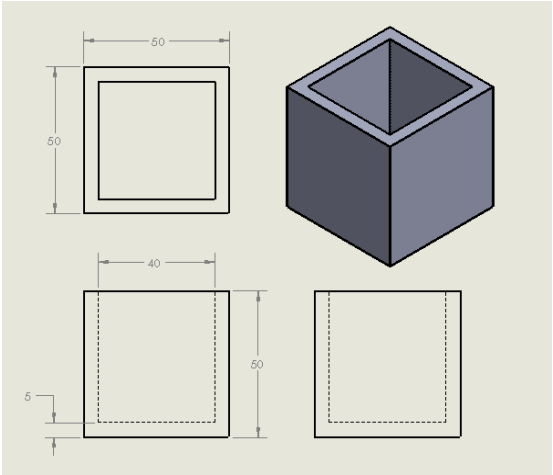
จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher พบว่า ในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ ขึ้นอยู่กับขนาดของ Extrusion Nozzle โดยที่ขนาด Extrusion Nozzle เท่ากับ 1.40 มิลลิเมตร ความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัสดุพิมพ์อยู่ที่ 64 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ขนาด Extrusion Nozzle เท่ากับ 1.60 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัสดุพิมพ์อยู่ที่ 70 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ขนาด Extrusion Nozzle เท่ากับ 1.80 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัสดุพิมพ์อยู่ที่ 78 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่ขนาด Extrusion Nozzle เท่ากับ 2.00 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัสดุพิมพ์อยู่ที่ 85 มิลลิเมตรต่อวินาที ทั้งนี้ในการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher ที่เหมาะสม แปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Extrusion Nozzle โดยพบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น วัสดุพิมพ์ออกมาไม่สมดุลกับการดันของ Extrusion Pusher ส่งผลให้ กระบอก PVC ที่ใส่วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ถูกดันหลุดออกจากเกลียว เกิดการเสียหายต่อเกลียวที่กระบอก PVC และไม่สามารถพิมพ์ต่อได้ และเมื่อความเร็วของ Extrusion Pusher มีความเร็วที่ช้าลง ทำให้วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ที่ออกจากปลายของ Extrusion Nozzle ขาดและไม่เป็นเส้นแบบต่อเนื่อง ทำให้การพิมพ์เกิดการสะดุดและไม่เป็นไปตามแบบที่กำหนด

4.2.3 ปริมาณน้ำต่อวัสดุยึดประสานของวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป

โดยทำการทดลองพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติต้นแบบ ในรูปแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และมีความสูง เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.11 และทรงลูกบากศ์ที่ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร และมีความสูง เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.12 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลในการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน โดยมีแนวคิดในการขึ้นรูปเนื่องจากการขึ้นรูปวงกลมจะมีการกระจายแรงของแต่ละส่วนของวงกลมเท่ากันหมด ส่วนการขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจะมีช่วงยาวของแต่ละด้านกว้าง ซึ่งน่าจะเห็นการแอ่นตัวของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูป ในการทำการศึกษาจะทำการศึกษาโดยใช้โดยใช้ความเร็วของ Extrusion Pusher เท่ากับ 85 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ Extrusion Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 มิลลิเมตร พิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ทั้ง 2 รูปแบบ โดยทำการศึกษาตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานทดสอบทรงลูกบาศก์

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขในทดสอบการขึ้นรูปแบบทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม

เงื่อนไขการทดลอง	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
1	100	40
2	100	42
3	100	44
4	100	46
5	100	48

จากการทดลองเพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุซีเมนต์ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.2 โดยใช้ความเร็วของ Extrusion Pusher เท่ากับ 85 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ Extrusion Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 มิลลิเมตร พิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ในลักษณะทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ พบว่า

ในการทดลองเงื่อนไขที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่ 40/100 ที่ชิ้นงานตามแบบทรงกระบอก โดยหลังจากการขึ้รูปเสร็จตามแบบ ความสูงที่วัดจากชิ้นงานจริงเท่ากับ 46.3 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 8.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงเท่ากับ 51.5 มิลลิเมตร ลักษณะผิวชิ้นงานขรุขระ เนื่องจากการไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle มีการสะดุดและขาด ไม่ต่อกันเป็นเส้นเดียว เนื่องจากปริมาณน้ำในวัสดุซีเมนต์มีค่าน้อยเกินไป จึงทำให้ลักษณะของชิ้นงานทรงกระบอกมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานตามแบบทรงลูกบาศก์ ชิ้นงานมีลักษณะไม่ตรงตามแบบ โดยสามารถวัดความกว้าง ยาว สูงตามขนาดที่วัดได้จริงเท่ากับ 31.0 56.0 และ 55.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตร ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ เนื่องจากการไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle มีการสะดุดและขาด ไม่ต่อกันเป็นเส้นเดียว ทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัวในบางส่วนของชิ้นงาน ทให้ลักษณะของชิ้นงานโดยรวมไม่ใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน แสดงในตรางที่ 4.3

ในการทดลองเงื่อนไขที่ 2 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่ 42/100 ที่ชิ้นงานตามแบบทรงกระบอก โดยความสูงที่วัดจากชิ้นงานจริงเท่ากับ 48.1 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 8.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงเท่ากับ 51.5 มิลลิเมตร ลักษณะผิวชิ้นงานเรียบเนียน มีการไหลของวัสดุซีเมนต์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle เป็นเส้นแบบต่อเนื่อง ลักษณะของชิ้นงานโดยทรงกระบอกใกล้เคียงกับแบบของของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานตามแบบทรงลูกบาศก์ สามารถวัดความกว้าง ยาว สูงตามขนาดที่วัดได้จริงเท่ากับ 46 52.5 และ 55.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร ผิวชิ้นงานเรียบเนียน การไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle ไม่มีการสะดุดและขาด ด้านข้างของชิ้นงานมีความตรงไม่ล้มเอียง แสดงในตรางที่ 4.3

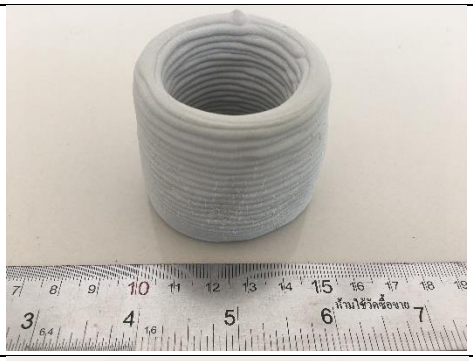
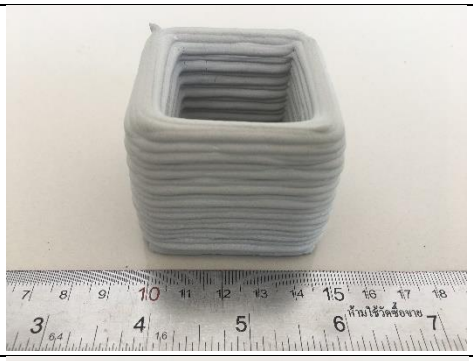
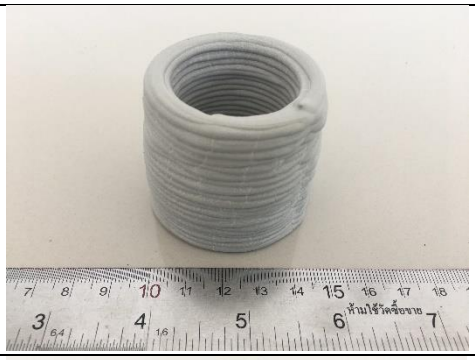
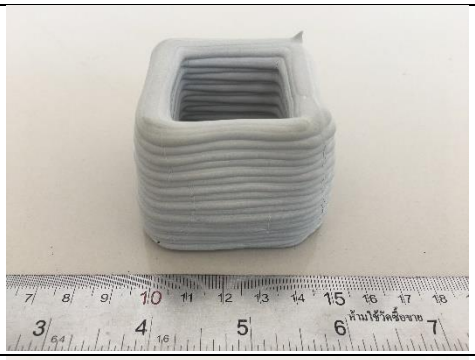
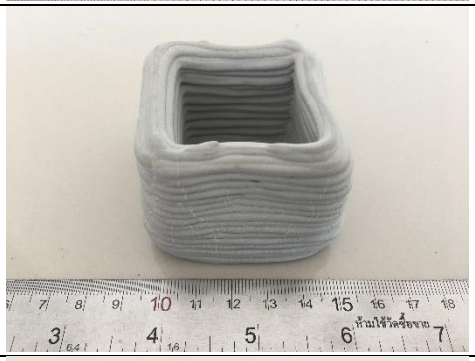
ในการทดลองเงื่อนไขที่ 3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่ 44/100 ที่ชิ้นงานตามแบบทรงกระบอก โดยความสูงที่วัดจากชิ้นงานจริงเท่ากับ 47.0 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 11.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงเท่ากับ 53.0 มิลลิเมตร ลักษณะผิวชิ้นงานเรียบเนียน มีการไหลของวัสดุพิมพ์ที่

ผ่าน Extrusion Nozzle เป็นเส้นแบบต่อเนื่อง ลักษณะโดยรวมเป็นทรงกระบอกใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน แต่ผนังชิ้นงานมีการเอียงไม่ตรงกันบางส่วน ซึ่งอาจจะเป็ฯเนื่องมากจากความเหลวของวัสดุซีเมนต์ ส่วนชิ้นงานตามแบบทรงลูกบากศ์ ชิ้นงานมีลักษณะไม่ตรงตามแบบ สามารถวัดความกว้าง ยาว สูงตามขนาดที่วัดได้จริงเท่ากับ 31.0 56 และ 55.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความหนาชิ้นงานที่วัดได้จริงเท่ากับ 10.6 มิลลิเมตร ผิวชิ้นงานเรียบเนียน การไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle ไม่มีการสะดุดและขาดต่อกันเป็นเส้นเดียว ลักษณะโดยรวมไม่ใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน เนื่องจากผนังส่วนกลางของแต่ละด้านของชิ้นงานทรงลูกบาศก์มีการยุบตัวหรือคตตัวลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3

ในการทดลองเงื่อนไขที่ 4 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่ 46/100 ที่ชิ้นงานตามแบบทรงกระบอก โดยความสูงที่วัดจากชิ้นงานจริงเท่ากับ 45.3 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 11.3 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงเท่ากับ 54.3 มิลลิเมตร ลักษณะผิวชิ้นงานเรียบเนียน มีการไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle เป็นเส้นแบบต่อเนื่องแต่มีลักษณะเส้นที่เล็กกว่าและขาดได้ง่าย แต่ลักษณะของชิ้นงานโดยรวมใกล้เคียงกับแบบ แต่มีลักษณะบวมออกด้านข้างไม่เป็นทรงกระบอกเนื่องจากอัตราส่วนของน้ำมากเกินไป ส่วนชิ้นงานตามแบบทรงลูกบากศ์ ชิ้นงานมีลักษณะไม่ตรงตามแบบ สามารถวัดความกว้าง ยาว สูงตามขนาดที่วัดได้จริงเท่ากับ 31.0 56 และ 55.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตรผิวชิ้นงานเรียบเนียน แต่การไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle มีการสะดุดและขาด ไม่ต่อกันเป็นเส้นเดียว มีลักษณะเหลวเกินไป มีการยุบตัว และบิดเบี้ยวเล็กน้อย ลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.3

ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่ 48/100 ที่ชิ้นงานตามแบบทรงกระบอก โดยความสูงที่วัดจากชิ้นงานจริงเท่ากับ 44.2 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานทีวัดได้จริงเท่ากับ 13.4 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงเท่ากับ 56.2 มิลลิเมตร ลักษณะผิวชิ้นงานเรียบเนียน มีการไหลของวัสดุพิมพ์ที่ผ่าน Extrusion Nozzle ลักษณะเส้นที่เล็กและเหลวมากเกินไป ทำให้ขาดได้ง่าย ลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกับแบบของของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานตามแบบทรงลูกบากศ์ ชิ้นงานมีลักษณะไม่ตรงตามแบบ ไม่สามารถวัดความกว้าง ยาว สูง และความหนาชิ้นงานได้ เมื่อทำการพิมพ์เป็นระยะเวลาหนึ่ง วัสดุเกิดการยุบตัวลง และไม่สามารถพิมพ์ต่อได้ ลักษณะบวมออกด้านข้างไม่เป็นรูปทรงตามเบบ เนื่องจากอัตราส่วนของน้ำมากเกินไป ลักษณะโดยรวมไม่ใกล้เคียงกับแบบของชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน	ลักษณะการขึ้นรูปตัวอย่างแบบทรงกระบอก	ลักษณะการขึ้นรูปตัวอย่างแบบลูกบาศก์
40/100		
42/100		
44/100		
46/100		
48/100		

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในทางด้านการแพทย์ วิวัฒนาการในการการผลิตกระดูกเทียมในปัจจุบันสามารถใช้วัสดุได้หลายรูปแบบ เช่น โลหะ พลาสติด เซรามิก หรือวัสดุผสม เป็นต้น โดยวัสดุทางเซรามิกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ในการผลิตกระดูกเทียม โดยปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่เรียกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะสามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีรายละเอียดใกล้เคียง หรือเทียบเท่ากับชิ้นงานจริง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการและการนำไปใช้งานได้ ในการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้สามารถที่จะขึ้นรูปกระดูกให้ได้เหมาะสมใกล้เคียงกับผู้ป่วยมากที่สุด ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปนี้จะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกที่มีวัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุหลัก และเนื่องจากทั้งวัสดุซีเมนต์และจีโอพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการผสมกับน้ำหรือสารละลายด่างก็จะต้องมีการพิจารณาออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่วิธีการกวนผสม ระบบในการลำเลียงวัตถุดิบ ระบบหัวฉีดขึ้นรูป และระบบการกระตุ้นให้วัสดุเกิดการแข็งตัว โดยเป้าหมายของโครงการนี้คือ สร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่สามารถพิมพ์วัสดุซีเมนต์ และจีโอพอลิเมอร์ได้

1. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการการพัฒนาการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในโครงการนี้มุ่งเน้นเรื่องการออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบการทำงาน รวมถึงการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประเภท Delta มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน เนื่องจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเซตตัว ลักษณะของการพิมพ์ ชิ้นงานจะถูกให้ตั้งอยู่กับที่ การรับคำสั่งที่ใช้ในการพิมพ์ รูปแบบในการรับคำสั่งจะอ่านเฉพาะคำสั่งที่เป็น G-Code เท่านั้น ในขั้นตอนของการพิมพ์ 3 มิติ ขนาดของ Extrusion Nozzle ที่ขนาดต่างกัน ปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้งานคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Extrusion Pusher ที่ใช้ดันวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ ขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดย Extrusion Nozzle ทุกขนาด จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 42 – 44 กรัม ต่อสดุยึดประสาน 100 กรัม และวัสดุซีเมนต์ที่นำมาใช้จะต้องร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 0.15 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ชิ้นงานรูปทรงกระบอก และรูปทรลลูกบาศก์มีลักษณะ และขนาดใกล้เคียงกันแบบในโปรแกรม

2. ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

1. มีการอุดตันนที่ Extrusion Nozzle ทำให้กระบอกสำหรับรองรับวัสดุพิพม์ 3 มิติ เกิดแรงอัดจนกระทั่งเกิดการเสียหายที่เกลียวของกระบอก PVC จำเป็นต้องร่อนด้วยตะแกรงเมชเบอร์ 50 ก่อนนำมาผสม
2. ขนาดของวัสดุยึดประสานมีความละเอียดไม่มากพอ มีก้อนกรวด หรือส่วนที่เป็นก้อนจำนวนมาก จำเป็นต้องร่อนด้วยตะแกรงเมชเบอร์ 50 ก่อนนำมาผสม

3. ข้อเสนอแนะ

1. มีการพัฒนา และขยายขนาดเครื่องพิมพ์ และสร้างระบบในการเร่งการก่อตัว เพื่อให้ชิ้นงานไม่ไหล หรือบิดเบี้ยวลงมา
2. วัสดุที่ใช้งานสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ในงานพิมพ์วัสดุประเภทซีเมนต์ ควรเป็นวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ และมีความแข็งแรงสูง
3. อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุยึดประสานขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป ควรทดสอบก่อนนำไปขึ้นรูป เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุยึดประสานชนิดนั้นๆ
4. ควรหาค่าความหนืดของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เหมาะต่อการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เอกสารอ้างอิง

[1] ธนันพร ญาวิลาศ, 2558, “สมบัติของก้อนของเสียหล่อแข็งจากจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยบิทูมินัส”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[2] Cook,D. J. ,1986,Natural pozzolan in “ Concrete technology and design volume 3 : Cement replacement material,” London,Surrey University Press,pp.2,13-18,171-195.

[3] Metha,P.K.,1986, Concrete:Structure,properties and material, New Jersy,Printice Hall,pp.269-273.

[4] Lee,A. R. ,1974, Blastfurnace and steel slag, London, The British Quarrying & Slag Federation Ltd.,Edward Arnold Ltd.,pp.1-38,88-90.

[5] R. Duballet, O. Baverela, and J. Dirrenberger, 2017, “ Classification of building systems for concrete 3D printing”, Automation in Construction, pp.247-258.

[6] Ben Utela, Duane Storti, Rhonda Andersonb, and Mark Ganter, 2008, “ A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)”, Journal of Manufacturing Processes, pp.96-104.

[7] Jian-Yuan Lee, Jia An, and Chee Kai Chua, 2017, “ Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials”, Applied Materials Today, pp.120-133.

[8] Lim Chin Hwa, Srithar Rajoo, Alias Mohd Noor, Norhayati Ahmad, and M. B. Uday, 2017, “ Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review” , Current Opinion in Solid State and Materials Science.

[9] A. Butscher, M. Bohner, S. Hofmann, L. Gauckler, and R. Müller, 2011, “ Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder- based three- dimensional printing”, Acta Biomaterialia, pp.907-920.

[10] Sahar Sultana, Gilberto Siqueirab, Tanja Zimmermannb and Aji P. Mathew, 2017, “3D printing of nano- cellulosic biomaterials for medical applications” , Current Opinion in Biomedical Engineering, pp.29-34.