

การวิเคราะห์เลือกเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เทคนิคลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัชซี และเทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ : กรณีศึกษาชิ้นงานการแพทย์

พีระพัฒน์ คำหงษ์¹ และ กลิน รั้งสิกรรพุม^{2*}

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

* Corresponding Author: kasinphd@gmail.com

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 8 เมษายน 2563

แก้ไข : 12 ตุลาคม 2563

ตอบรับ : 21 มกราคม 2564

คำสำคัญ :

การเลือกเครื่องพิมพ์สามมิติ /

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัชซี /

เทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ /

โมเดลชิ้นงานการแพทย์

เทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มขึ้น หรือการผลิตแบบพิมพ์สามมิติ (3DP) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีตัวเลือกของเครื่อง 3DP เป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเลือกเครื่องพิมพ์แบบสามมิติภายใต้หลายปัจจัยด้วยเทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัชซีร่วมกับเทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ โดยมีปัจจัยหลักที่พิจารณา ได้แก่ ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ด้านวัตถุดิบ และด้านเครื่องพิมพ์ ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยย่อยรวม 11 ปัจจัย ได้แก่ ความแม่นยำ ความเรียบผิว ต้นทุนชิ้นงาน เวลาในการผลิต ความสวยงาม ราคาวัสดุ ค่าแรงตั้ง ค่าความยืดหยุ่น ราคาเครื่องพิมพ์ ขนาดที่พิมพ์ได้สูงสุด และความน่าใช้ของเครื่อง โดยทำการวิเคราะห์กลุ่มผู้ตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้เครื่อง ผลการวิจัย พบว่า ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดตามด้วยปัจจัยวัตถุดิบและด้านเครื่องพิมพ์ โดยมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.528 0.298 และ 0.173 ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า ทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดที่ได้ในกรณีศึกษาจะขึ้นกับประเภทชิ้นงานทางการแพทย์ที่ใช้ในการผลิตแล้ว ยังขึ้นกับปัจจัยที่นำมาพิจารณา โดยทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดในด้านปัจจัยผลิตภัณฑ์ คือ เครื่อง SLA Ultra 3SP ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความแม่นยำ และความน่าใช้ ส่วนทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดในด้านปัจจัยวัตถุดิบและด้านปัจจัยเครื่องพิมพ์ คือ เครื่อง FDM XYZ 3DP daVinci1.0A และเครื่อง FDM Flashforge Guider2s ตามลำดับ

Selection of 3-Dimensional Printer via the Use of Integrated Fuzzy AHP and TOPSIS: Case study in Medical Applications

Peerapat Khamhong¹ and Kasin Ransikarbum^{2*}

Ubonratchathani University, Muangsrikai, Warin Chamrap, Ubonratchathani 34190

* Corresponding Author: kasinphd@gmail.com

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: April 8, 2020

Revised: October 12, 2020

Accepted: January 21, 2021

Keywords:

3D Printer Selection /
Fuzzy Analytic Hierarchy Process /
Technique for Order Preference
by Similarity to Ideal Solution /
Medical Model

Abstract

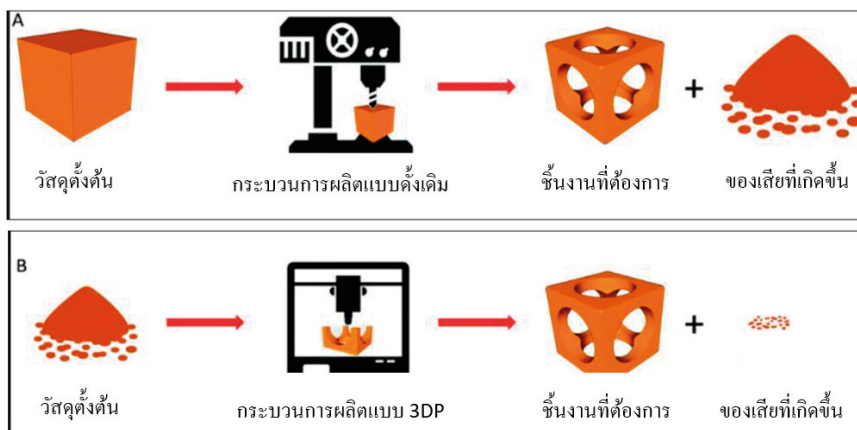
Additive manufacturing or three-dimensional printing (3DP) has recently received increased attention, resulting in a larger pool of available 3D printers to choose from. In this research, we analyzed the problem related to the selection of 3D printers using integrated fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) and technique for order preference and similarity to ideal solution (TOPSIS). Three key criteria/factors were considered, namely, product, materials and printer characteristics; 11 sub-criteria indeed arose from the above-mentioned 3 criteria viz. accuracy, part smoothness, part cost, build time, attractiveness, materials cost, tensile strength, elongation, printer cost, maximum build size and user preference. In addition, group decision making was analyzed based on two groups of decision makers, which are 3DP experts and 3DP users. Analyzed results revealed that the product factor was the most important; this was followed by the material factor and printer factor, with associated weights of 0.528, 0.298, and 0.173, respectively. Furthermore, the best alternative of 3D printers in this case study depended not only on the types of medical model, but also on the analyzed factors of interest. In particular, the best printer in terms of the product factor was noted to be SLA Ultra 3SP, with advantages of accuracy and user preference. The best printer with regard to the material factor was found to be FDM XYZ 3DP daVinci1.0A. FDM Flashforge Guider2s printer was found to be the most preferred 3D printer when considering the printer factor.

1. บทนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3-Dimensional Printing - 3DP) หรือที่ถูกรู้จักด้วยชื่ออื่น ๆ เช่น การผลิตแบบเพิ่มเติม (Additive Manufacturing - AM) การผลิตชิ้นงานอย่างรวดเร็ว (Rapid Manufacturing - RM) และการสร้างชิ้นงานอิสระ (Solid Freeform Fabrication - SFF) กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานอุตสาหกรรม การบริการ การศึกษา และการวิจัย [1-2] เครื่อง 3DP เป็นเครื่องที่ใช้ในการสร้างต้นแบบหรือชิ้นงานที่มีสมบัติเด่นทางด้านเวลาที่ผลิตชิ้นงานได้เร็ว การสูญเสียวัสดุระหว่างกระบวนการผลิตที่น้อย และความสะดวกในการควบคุมเครื่อง โดยในปัจจุบันได้เริ่มมีการขยายการใช้งานจากแค่เพื่อสร้างต้นแบบมาเป็นการผลิตชิ้นงานสำเร็จรูปเพื่อการใช้งานจริง โดย 3DP เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจจากหลาย ๆ ภาคส่วนทั้งทางด้านอุตสาหกรรม (Industry) ด้านการบินอวกาศ (Aerospace) และด้านการแพทย์และสาธารณสุข (Healthcare) [3-6] โดยรายงานจาก Wohlers [1] ในปี 2018 ระบุว่า ปริมาณจำนวนเครื่อง 3DP ประเภทแบบตั้งโต๊ะ (Desktop 3DP ที่ราคาขายน้อยกว่า \$5,000) ที่มีการขายทั่วโลก มีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีการประมาณจำนวนเครื่องทั้งหมดมากกว่า 500,000 เครื่องที่ขายในปี 2017 โดยมีการเพิ่มขึ้น 49.4% จากปี 2016 และเพิ่มขึ้น 75% จากปี 2015 ตามลำดับ นอกจากนี้หากพิจารณาเครื่อง 3DP ในระดับอุตสาหกรรม (Industrial 3DP ที่ราคาขายมากกว่า \$5,000) พบว่ามีจำนวนมากกว่า 14,000 เครื่องในปี

2017 ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าจากจำนวนเครื่องที่ขายในปี 2007 ทั้งนี้รายงานจาก 3D Hubs [2] ได้คาดการณ์การเติบโตของตลาด 3DP ทั่วโลกในอัตราที่เพิ่มขึ้นประมาณปีละ 24% ในช่วงปี 2020 – 2025 ซึ่งแสดงการเติบโตอย่างต่อเนื่อง

ทั้งนี้ 3DP เป็นเทคโนโลยีการสร้างชิ้นงานต้นแบบในรูปแบบเพิ่มขึ้น โดยจะเป็นการสร้างชิ้นงานทีละชั้น (Layer) จนได้เป็นรูปร่างชิ้นงานที่สมบูรณ์ ซึ่งเริ่มจากไฟล์แบบจำลอง 3 มิติ โดยจะมีความแตกต่างจากการผลิตแบบดั้งเดิม ที่เป็นการใช้กรรมวิธีการลดเนื้อวัสดุออก (Subtractive Manufacturing) โดยรูปที่ 1 แสดงความแตกต่างของกรรมวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม และแบบ 3DP อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความหลากหลายของเครื่อง 3DP ในปัจจุบัน ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุ เทคโนโลยี รูปแบบพลังงาน และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ส่งผลให้กระบวนการวางแผนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง 3DP มีความสลับซับซ้อน โดยงานวิจัยในปัจจุบันที่มีการศึกษาการวางแผนการผลิตสำหรับ 3DP ยังมีจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตอื่น ๆ ด้านกระบวนการผลิตแบบตัดออก (Subtractive manufacturing) [7-9] นอกจากนี้งานวิจัยที่มีอยู่ยังไม่ได้ครอบคลุมกระบวนการวางแผนการผลิตอย่างบูรณาการ เช่นการวิเคราะห์ทิศทางการผลิตชิ้นงาน การเลือกเครื่องพิมพ์ 3DP และการมอบหมายชิ้นงานกับเครื่อง 3DP [10-11] โดยเฉพาะกับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ที่ยังคงมีส่วนน้อย [12-13]



รูปที่ 1 กรรมวิธีการลดเนื้อวัสดุออกและเนื้อวัสดุเข้า [14]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีสองวัตถุประสงค์หลักคือ 1) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัย/เกณฑ์สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผู้ตัดสินใจ (Decision Maker) ที่หลากหลายโดยเน้นที่กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคของเครื่อง 3DP (Manufacturer หรือ Technician) และกลุ่มผู้ใช้เครื่อง 3DP (User) เพื่อทำการเลือกเครื่อง 3DP ที่เหมาะสม และ 2) เพื่อทำการศึกษาวเคราะห์ทางเลือกเครื่อง 3DP ที่เหมาะสมภายใต้ปัจจัยที่หลากหลาย โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA) โดยใช้เทคนิคลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัซซี (Fuzzy Analytic Hierarchy Process – FAHP) ร่วมกับเทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS) ในกรวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้เป็นการเน้นที่การประยุกต์การใช้งานในการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ ซึ่งทำการผลิตขึ้นส่วนทางการแพทย์จำนวน 2 ชิ้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกันคือในส่วนของหัวใจและกระดูกสัน โดยใช้กรณีศึกษาเทคโนโลยีของเครื่อง 3DP แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ที่รองรับวัสดุที่แตกต่างกันคือ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) วัสดุ Polylactic acid (PLA) และวัสดุ Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG) นอกจากนี้ ได้ทำการผลิตโดยใช้เครื่อง 3DP จากเทคโนโลยีแบบ Stereolithography (SLA) โดยใช้วัสดุ Acrylic resin ซึ่งทั้ง FDM และ SLA เป็น 2 ใน 7 เทคโนโลยีในการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติซึ่งได้มีการแบ่งประเภทโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) [15]

นอกจากนี้ ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์เกี่ยวข้องกับสามด้านหลักคือ 1) ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Product characteristic) 2) การใช้วัตถุดิบ (Material characteristic) และ 3) คุณลักษณะของเครื่องพิมพ์ (Printer characteristic) ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยย่อยรวม 11 ปัจจัย คือความแม่นยำ (Accuracy) ความเรียบผิว (Part Smoothness) ต้นทุนชิ้นงาน (Part Cost) เวลาในการผลิต (Build Time) ความสวยงาม (Finished Surface) ราคาวัสดุ (Material Cost) ค่าแรงดึง (Tensile Strength) ค่าความยืดหยุ่น (Elongation) ราคาเครื่องพิมพ์ (Printer Cost) ขนาดที่พิมพ์ได้สูงสุด (Max Build size) และความน่าใช้ของเครื่อง (User Preference) สำหรับการวิเคราะห์เลือกเครื่อง 3DP ในการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัย 3DP ทางกายภาพ

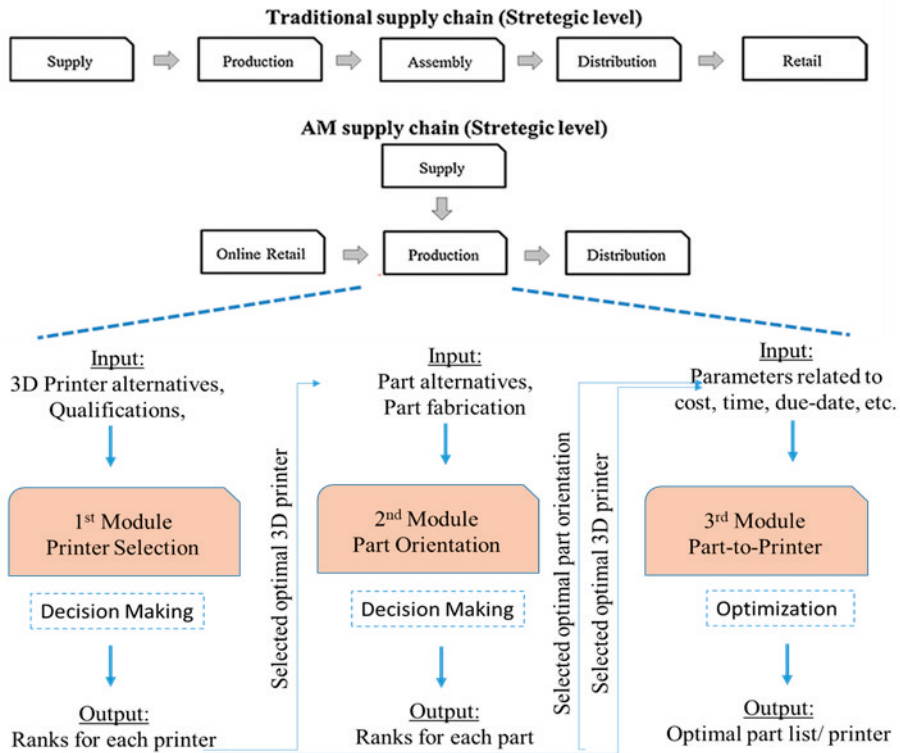
เทคโนโลยี 3DP ได้ถูกนำมาใช้ในหลากหลายด้านทั้งงานด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม การแพทย์ รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งการพิมพ์แบบ 3 มิติ ในปัจจุบันมีหลากหลายเทคโนโลยี เช่น การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM) การพิมพ์จากของเหลวไวแสง (SLA) และ เทคโนโลยีการพิมพ์โดยใช้เลเซอร์ในการหลอมเหลวผงวัสดุ (Selective Laser Sintering/Melting - SLS/SLM) เป็นต้น [16-17] โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี 3DP เพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบทางการแพทย์ [18-23] เช่น Prateepsawangvong [18] ศึกษาการใช้วิศวกรรมของเครื่องคอมพิวเตอร์นิวเมอริคัลคอนโทรล (Computer Numerical Control - CNC) และเทคโนโลยี 3DP ในทางทันตกรรมบูรณะ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้กับวัสดุใหม่ ๆ ที่ไม่สามารถผลิตด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมได้ นอกจากนี้ Gatto และคณะ [22] ศึกษาการพิมพ์ 3 มิติของกะโหลกศีรษะของทารกแรกเกิดสำหรับอัลตราซาวด์ เพื่อให้สามารถประเมินการระบายความร้อนได้เพิ่มขึ้นในเนื้อเยื่อ โดยผู้วิจัยเริ่มจากไฟล์สแกนจากเครื่อง CT/MRI จากนั้นทำการสร้างต้นแบบโดยใช้ 3DP จากวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ อีพ็อกซีเรซิน โพลีเอสเตอร์เรซิน และซีพิงพาราฟิน ซึ่งผู้วิจัยสรุปผลว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี 3DP เป็นวิธีการที่สามารถนำมาช่วยในการผลิตได้อย่างเหมาะสม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มงานวิจัยที่มีการใช้ 3DP ทางด้านการแพทย์สูงมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้โมเดล 3DP ทางด้านการแพทย์ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นโมเดลที่นำมาใช้จากฐานข้อมูล 3DP ทางด้านชีวการแพทย์ที่พัฒนาขึ้นโดยนักรังสีวิทยาของประเทศสหรัฐอเมริกา [24]

2.2 งานวิจัยการวางแผนการผลิตใน 3DP

ในปัจจุบันมีจำนวนเครื่อง 3DP ในตลาดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีสมบัติและหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์แต่ละประเภทแตกต่างกัน และเหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย ส่งผลให้ปัญหาการเลือกใช้งานเครื่อง 3DP แต่ละประเภท มีความสลับซับซ้อน และจำเป็นต้องพิจารณาตามความเหมาะสมของวัตถุประสงค์และความต้องการใช้งานเป็นหลัก โดยพบว่านักวิจัยที่ทำการศึกษาปัญหาการวางแผนการผลิตทางด้าน 3DP จำกัดเมื่อเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิม และปัญหาที่สนใจทางด้าน

วิเคราะห์ทางเลือกเครื่อง 3DP สำหรับชิ้นงานเฉพาะอย่าง เช่น ชิ้นงานทางการแพทย์ ยังไม่แพร่หลาย เช่น Ransikarbun และคณะ [3] อธิบายการวางแผนเชิงกลยุทธ์ของห่วงโซ่อุปทานของ 3DP ในระดับมหภาคและระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยนำเสนอปัญหาแบ่งเป็นสามโมดูลเพื่อจัดการกับปัญหาการวางแผนกระบวนการผลิตของเครื่องพิมพ์ 3DP ซึ่งรวมถึง 1)

ปัญหาการเลือกเครื่องพิมพ์ 3DP 2) ปัญหาการหาทิศทางและการวางชิ้นงานบนเครื่องพิมพ์ 3DP และ 3) ปัญหาการมอบหมายชิ้นงานสำหรับเครื่องพิมพ์ 3DP (รูปที่ 2) โดยในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องของทางทีมผู้วิจัย ซึ่งได้ทำการศึกษาในส่วนของโมดูลของปัญหาแรก คือปัญหาการเลือกเครื่อง 3DP และเป็นการนำผลที่ได้ไปใช้ในการบูรณาการกับปัญหาอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 2 โครงสร้างของซัพพลายเชนของ 3DP [3]

สำหรับงานวิจัยทางการเลือกเครื่อง 3DP เอง พบว่ามีการศึกษาในงานวิจัยในต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ไม่พบการศึกษาในประเทศไทยที่ชัดเจน เช่น Shende และ Kulkarni [25] ศึกษาการตัดสินใจสำหรับการเลือกกระบวนการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว โดยใช้วิธีการพร้อมกับวิธี TOPSIS สำหรับเทคโนโลยีแบบ FDM SLA และ SLS โดยใช้ชิ้นงานเกี่ยวกับรถยนต์ นอกจากนี้ Jadhav และ Agrawal [26] วิเคราะห์การใช้วิศวกรรมย้อนกลับร่วมกับเทคนิค AHP และ TOPSIS ในการวิเคราะห์เทคโนโลยี FDM SLA และ SLS โดยใช้สามปัจจัยหลัก

ทางด้านต้นทุน เวลาการผลิต และผิวสำเร็จของชิ้นงานในการวิเคราะห์ผล อย่างไรก็ตาม งานวิจัยข้างต้น นอกจากไม่ได้เน้นที่การประยุกต์กับชิ้นงานทางการแพทย์ที่มีความต้องการเฉพาะด้านแล้ว [12-13] ยังไม่ได้พิจารณาความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของข้อมูลของผู้ทำการตัดสินใจมาเกี่ยวข้อง [27-28] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของผู้ทำการตัดสินใจเพิ่มขึ้นในรูปแบบของการประยุกต์ใช้ตรรกะฟัซซีของ AHP (Fuzzy AHP) ซึ่งมีจุดเด่นในการนำความคิดเห็นของผู้ตัดสินใจที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) ซึ่ง

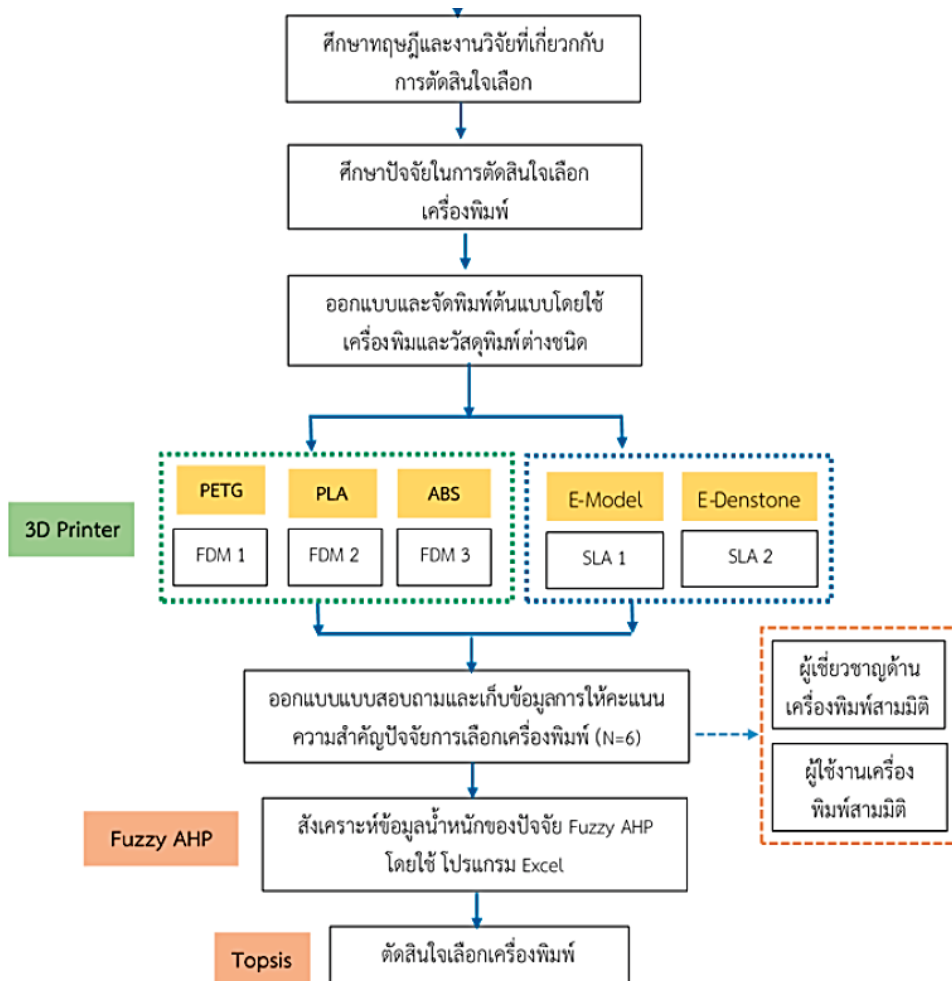
มีความคลุมเครือในกระบวนการตัดสินใจของมนุษย์มาวิเคราะห์ ปัจจัย ร่วมกับวิธีการเรียงลำดับตามอุดมคติ หรือ TOPSIS ซึ่งมีจุดเด่นในการวิเคราะห์ข้อมูลของทางเลือก ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) ที่สามารถประเมินผลเป็นตัวเลขได้ [29] ในการวิเคราะห์เครื่อง 3DP ในกรณีศึกษา

3. เครื่องมือในงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องมือการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (MCDA) ซึ่งเป็นการใช้ความรู้ด้านการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) และวิทยาศาสตร์การ

ตัดสินใจ (Decision Science) โดย MCDA เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การตัดสินใจสำหรับปัญหาที่มีความสลับซับซ้อน และเกี่ยวข้องกับหลากหลายปัจจัย (Criteria หรือ Attribute) ที่มักมีความขัดแย้งกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือเทคนิคลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) ร่วมกับเทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ (TOPSIS) ซึ่งแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยได้ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งใช้เทคนิค FAHP ในการสังเคราะห์ข้อมูลของน้ำหนักของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเลือกเครื่อง 3DP รวมถึงใช้เทคนิค TOPSIS ในการตัดสินใจเลือกทางเลือกเครื่อง 3DP ที่เหมาะสมที่สุด



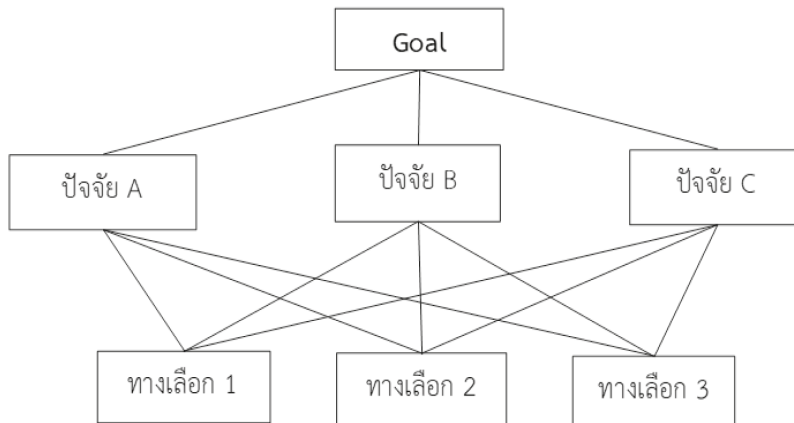
รูปที่ 3 ขั้นตอนและขอบเขตของกรวิจัย

3.2 วิธีการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP)

วิธีการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือ AHP ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy) โดยเป็นเครื่องมือหนึ่งในการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (MCDA) ซึ่งได้รับความนิยมในหลากหลายงานวิจัย ซึ่งตรงกับหลักการสังเคราะห์การตัดสินใจของผู้ตัดสินใจ (Decision Maker) [29]

AHP ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีผู้ทำการตัดสินใจแบบกลุ่ม (Group Decision Making) และถือเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการแปลงการวิเคราะห์ปัญหาที่ข้อมูล

มีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพ (Qualitative Data) เช่น ข้อมูลจากความคิดเห็นหรือประสบการณ์ มาเป็นข้อมูลในรูปเชิงปริมาณ (Quantitative Data) โดยกระบวนการแบ่งลำดับชั้น สามารถแบ่งตามรูปแบบโครงสร้างที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างเรียกว่า วัตถุประสงค์ (Objective) หรือเป้าหมาย (Goal) ชั้นถัดมาคือ ปัจจัย หรือเกณฑ์ประเมิน (Evaluation Criteria) ที่ใช้สำหรับพิจารณาทางเลือกที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์ โดยอาจประกอบด้วยเกณฑ์ย่อย (Sub Criterion) ที่อยู่ในลำดับชั้นถัดลงมา และชั้นสุดท้ายเป็นทางเลือก (Alternatives) ที่สนใจ [30] ซึ่งมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างทั่วไปของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตัดสินใจภายใต้ความไม่ชัดเจนของข้อมูล โดยใช้ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เพื่อแสดงค่าความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นเซตที่กำหนดช่วงค่าความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ภายในเซตระหว่าง 0 ถึง 1 ทั้งนี้ การกำหนดระดับความเป็นสมาชิกภายในเซตของตัวแปรที่ต้องการ จะอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญต่อการดำเนินการภายในระบบฟัซซี [31] โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด โดยในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นในรูปแบบสามเหลี่ยม

(Triangular Membership Function/Distribution) จากพารามิเตอร์ของค่าน้อยที่สุดซึ่งแสดงมุมมองกรณีที่ย่ำที่สุด (minimum/lower) ค่าเฉลี่ยหรือมุมมองกรณีกลาง ๆ (mean) และค่ามากที่สุดซึ่งแสดงมุมมองกรณีที่ดีที่สุด (maximum/upper) แทนด้วย (L, M, U) ทั้งนี้ ขั้นตอนวิเคราะห์ในระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ ประกอบด้วยขั้นตอน 4 ส่วน คือขั้นตอนการทำฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) ขั้นตอนการสร้างฐานความรู้ (Knowledge Base) ขั้นตอนการตีความ (Fuzzy Inference) และขั้นตอนการทำดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) ตามลำดับ [29]

ขั้นตอนสำหรับกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟuzzy (FAHP) เริ่มจากการใช้ข้อมูลทางคุณภาพซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลเชิงคุณภาพสำหรับการตัดสินใจคือ ‘ไม่สำคัญมาก’ ‘สำคัญน้อยกว่า’ ‘สำคัญเท่ากัน’ ‘สำคัญกว่า’ และ ‘สำคัญมาก’ [31] ในการพัฒนาเมตริกซ์การเปรียบเทียบแบบฟuzzy (Fuzzy comparison matrix) แทนด้วย \tilde{A} ดังแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งการเปรียบเทียบแบบฟuzzy จะเป็นการเปรียบเทียบสำหรับคู่ใด ๆ ที่สนใจ โดยในการเปรียบเทียบในทางตรงกันข้ามจะใช้เป็นส่วน

กลับของเลขฟuzzy [32] ขั้นตอนต่อมาเป็นการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม โดยแสดงค่าตัวเลขฟuzzyที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1 ในการเปลี่ยนข้อมูลเชิงคุณภาพหรือความคิดเห็น เรียกว่า Linguistic judgement (\tilde{r}) เป็นข้อมูลเลขฟuzzy (x) ซึ่งสามารถปรับใช้ได้ตามความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ โดยจะได้ออกมาดังแสดงในสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 ความสำคัญฟuzzyจากการกระจายสามเหลี่ยม

ความหมายของข้อมูลเชิงคุณภาพ	เลขฟuzzy
สำคัญเท่ากัน (Equally preferred)	(1, 1, 1)
สำคัญเท่ากันถึงปานกลาง (Equally to moderately preferred)	(1, 2, 3)
สำคัญปานกลาง (Moderately preferred)	(2, 3, 4)
สำคัญปานกลางถึงค่อนข้างมาก (Moderately to strongly preferred)	(3, 4, 5)
สำคัญค่อนข้างมาก (Strongly preferred)	(4, 5, 6)
สำคัญค่อนข้างมากถึงมากกว่า (Strongly to very strongly preferred)	(5, 6, 7)
สำคัญมากกว่า (Very strongly preferred)	(6, 7, 8)
สำคัญมากกว่าถึงมากที่สุด (Very to extremely strongly preferred)	(7, 8, 9)
สำคัญมากที่สุด (Extremely preferred)	(9, 9, 9)

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & 1 & \dots & \tilde{r}_{2n} \\ \dots & \tilde{r}_{ji} = \tilde{r}_{ij}^{-1} & 1 & \dots \\ \tilde{r}_{n1} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & (x_{12,L}, x_{12,M}, x_{12,U}) & \dots & (x_{1n,L}, x_{1n,M}, x_{1n,U}) \\ (x_{21,L}, x_{21,M}, x_{21,U}) & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ (x_{n1,L}, x_{n1,M}, x_{n1,U}) & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ขั้นตอนต่อมา เป็นการปรับค่าของข้อมูล (Normalization) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) และค่าน้ำหนักแบบฟuzzy (\tilde{W}) ได้ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\tilde{r}_i = \left[\left(\prod_{j=1}^n x_{ij,L} \right)^{1/n}, \left(\prod_{j=1}^n x_{ij,M} \right)^{1/n}, \left(\prod_{j=1}^n x_{ij,U} \right)^{1/n} \right] \quad (3)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (4)$$

ทั้งนี้ สัญลักษณ์ \oplus และ \otimes แสดงกระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการบวกและคูณสำหรับฟังก์ชันแบบฟัซซีตามลำดับ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักแบบฟัซซี ดังแสดงในสมการที่ (5) และ (6)

$$\begin{aligned} \tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 &= (r_{1,L}, r_{1,M}, r_{1,U}) \oplus (r_{2,L}, r_{2,M}, r_{2,U}) \\ &= (r_{1,L} + r_{2,L}, r_{1,M} + r_{2,M}, r_{1,U} + r_{2,U}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_1 \otimes \tilde{r}_2 &= (r_{1,L}, r_{1,M}, r_{1,U}) \otimes (r_{2,L}, r_{2,M}, r_{2,U}) \\ &= (r_{1,L} * r_{2,L}, r_{1,M} * r_{2,M}, r_{1,U} * r_{2,U}) \end{aligned} \quad (6)$$

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเปลี่ยนค่าน้ำหนักของปัจจัยเป็นตัวเลขวจากการสังเคราะห์เดี่ยว (Crisp value) ซึ่งเรียกว่าขั้นตอนการทำดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) ซึ่งแสดงในสมการที่ (7)

$$w_i = \left(\frac{w_{i,L} + w_{i,M} + w_{i,U}}{3} \right) \quad (7)$$

3.3 เทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ (TOPSIS)

เทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ หรือ TOPSIS เป็นเทคนิคที่ใช้แนวคิดอุดมคติ (Ideal Point Method) ในการวิเคราะห์ โดยจะทำการกำหนดเป้าหมายในอุดมคติไว้ และวิเคราะห์ทางเลือก ซึ่งใช้การคำนวณระยะทางของยูคลิด (Euclidian Distance) ว่าทางเลือกที่ดีที่สุดควรมีระยะทางที่สั้นที่สุดเมื่อพิจารณาเทียบกับคำตอบในอุดมคติทางบวกซึ่งหมายถึงคำตอบที่ดีที่สุดแนวทางอุดมคติ (Positive Ideal Solution – PIS) และควรมีระยะทางที่ไกลที่สุดเมื่อพิจารณาเทียบกับคำตอบในอุดมคติทางลบซึ่งหมายถึงคำตอบที่แย่งที่สุดในทางอุดมคติ

(Negative Ideal Solution - NIS) หรือ Anti-Ideal Solution นั้นเอง [33] ซึ่งแสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างตารางเมตริกซ์การทำการตัดสินใจ โดยทำการปรับสเกล (r_{ij}) เพื่อเปลี่ยนข้อมูลให้เป็นแบบไม่มีหน่วย (Unitless) เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างปัจจัยที่แตกต่างกันได้โดยตรง ดังแสดงในสมการที่ (8) จากนั้น นำข้อมูลน้ำหนักของปัจจัยที่ได้จากวิธีการ FAHP และข้อมูลการทำการตัดสินใจที่ได้ทำการปรับสเกลแล้ว มาสร้างเมตริกซ์การทำการตัดสินใจแบบปรับสเกลที่ถ่วงน้ำหนักแล้ว ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (8)$$

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (9)$$

จากนั้นให้ทำการคำนวณค่าคำตอบในอุดมคติทางบวกซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (PIS) แทนด้วย A^* และคำนวณคำตอบในอุดมคติทางลบซึ่งเป็นคำตอบที่แย่งที่สุด (NIS) แทนด้วย A' ดังแสดงในสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ โดย J คือเซตของปัจจัยที่มีลักษณะยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้น ส่วน J' คือเซตของปัจจัยแบบที่ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\} ; v_j^* = \begin{cases} \max(v_{ij}) & \text{if } j \in J \\ \min(v_{ij}) & \text{if } j \in J' \end{cases} \quad (10)$$

$$A' = \{v_1', \dots, v_n'\} ; v_j' = \begin{cases} \min(v_{ij}) & \text{if } j \in J \\ \max(v_{ij}) & \text{if } j \in J' \end{cases} \quad (11)$$

ขั้นตอนต่อมาเป็นการคำนวณตัววัดการแยก (Separation measure) สำหรับแต่ละทางเลือก โดยคำนวณตัววัดการแยกจากคำตอบในอุดมคติทางบวก (S_i^*) และค่าตัววัดการแยกจากคำตอบในอุดมคติทางลบ (S_i') ดังแสดงในสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (12)$$

$$S_i' = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j')^2} \quad (13)$$

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณค่าความใกล้เคียงสัมพัทธ์ (Relative closeness) ที่เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละทางเลือก แทนด้วย C_i^* ดังแสดงในสมการที่ (14) และ (15) โดยค่าที่ได้จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ทั้งนี้ 0 แสดงถึงทางเลือกที่แย่สุด โดยความหมายคือเป็นทางเลือกที่ไกลจาก PIS และใกล้ NIS ที่สุดโดยภาพรวม ในขณะที่ 1 แสดงถึงทางเลือกที่ดีที่สุด โดยความหมายคือเป็นทางเลือกที่ใกล้ PIS และไกล NIS มากที่สุด โดยสามารถทำการจัดอันดับ (Ranking) ของทางเลือกได้ในที่สุด

$$C_i^* = \frac{S_i'}{S_i^* + S_i'} \quad (14)$$

$$C_i^* = \begin{cases} 1 & \text{if } A_i = A^* \\ 0 & \text{if } A_i = A' \end{cases} \quad (15)$$

4. กรณีศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 กรณีศึกษาเครื่อง 3DP และชิ้นงาน

ทางการแพทย์

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้กรณีศึกษาของเครื่อง 3DP จากเทคโนโลยีสองประเภท ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคโนโลยีประเภท FDM จำนวน 3 เครื่อง และ SLA จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งใช้วัสดุพิมพ์ต่างชนิดกัน โดยมีรายละเอียดของทางเลือกเครื่องพิมพ์ทั้ง 5 เครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้ ด้วยข้อจำกัดทางด้านประเภทของเครื่อง 3DP ที่มีอยู่มีมหา-

วิทยาลัยของผู้วิจัย ซึ่งเป็นทางเลือกเครื่องพิมพ์ประเภท FDM1 FDM2 และ FDM3 ผู้ทำวิจัยได้ประสานงานเพิ่มเติม โดยติดต่อกับบริษัทหาญ เอ็นจิเนียริ่ง โซลูชันส์ กทม. ซึ่งเป็นบริษัทเอกชน ที่ได้ทำวิจัยร่วมกัน โดยได้เพิ่มทางเลือกของเครื่องพิมพ์ประเภท SLA1 และ SLA2 เพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม ทางเลือกของเครื่องพิมพ์ในงานวิจัยนี้เป็นไปในลักษณะของกรณีศึกษา ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานวิจัยที่มีประเภทเครื่องพิมพ์ที่หลากหลายมากขึ้นได้เช่นกัน

ตารางที่ 2 ทางเลือกเครื่อง 3DP ในกรณีศึกษา

3DP	รุ่น/Spec	สถานที่	ผู้ผลิต
FDM1	XYZ Da Vinci 1.0A	วิทยาลัยเทคนิคสุวรรณภูมิ ร้อยเอ็ด	ไต้หวัน
FDM2	Flash forge Guider2s	อุทยานวิทยาศาสตร์ ม. อุบลราชธานี	จีน
FDM3	SINDOH 3DWOX1	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม. อุบลราชธานี	เกาหลีใต้
SLA1	Ultra 3SP	บริษัทหาญ เอ็นจิเนียริ่ง โซลูชั่นส์ กทม.	เยอรมนี
SLA2	Desktop XL	บริษัทหาญ เอ็นจิเนียริ่ง โซลูชั่นส์ กทม.	เยอรมนี

ทั้งนี้ชิ้นงานทางการแพทย์ในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นชิ้นงานหัวใจ และกรามฟัน จำนวน 2 ชิ้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานหัวใจมีขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างในแนวตั้ง ในขณะที่ชิ้นงานกรามฟันมีขนาดเล็กและมีโครงสร้างในแนวนอน โดยแสดงชิ้นงานที่ทำการผลิตจากทางเลือกเครื่องพิมพ์ทั้งหมดในตารางที่ 3 ซึ่งทำการผลิตด้วยวัสดุที่มีความแตกต่างกันสำหรับเครื่อง 3DP แต่ละประเภท โดยได้ทำการผลิตชิ้นงานจากเครื่อง

3DP โดยทีมผู้วิจัย รวมถึงการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จากนั้นจึงนำผลการเก็บข้อมูลการผลิตชิ้นงานที่ได้ในการชี้แจงกับทางผู้ตัดสินใจ โดยใช้ในการสัมภาษณ์ร่วมกับการสนทนาแบบกลุ่ม (Focus Group) ซึ่งเป็นการสอบถามบุคคลในกลุ่มเพื่อให้ได้มาถึงความความคิดเห็น สำหรับข้อมูลความสำคัญทางด้านปัจจัยและการวิเคราะห์ผลต่อไป

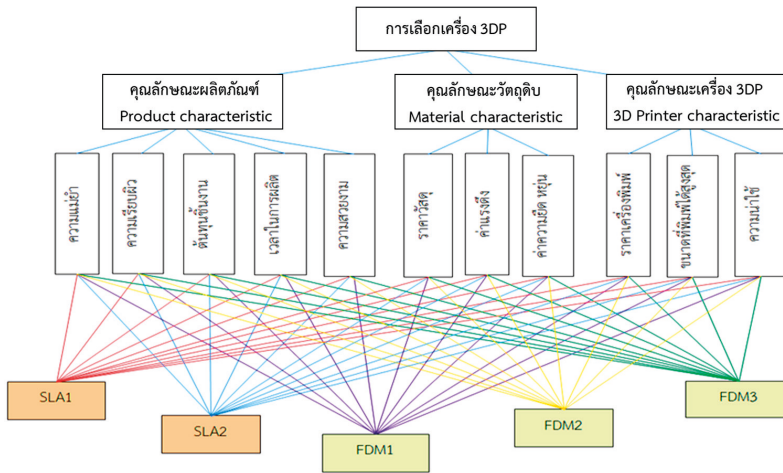
ตารางที่ 3 ชิ้นงานทางการแพทย์ที่ผลิตจากเครื่อง 3DP

ทางเลือก	วัสดุที่ใช้	ชิ้นงานหัวใจ และกรามฟัน
FDM1	PETG	
FDM2	PLA	
FDM3	ABS	
SLA1	E-Model	
SLA2	E-Denstone	

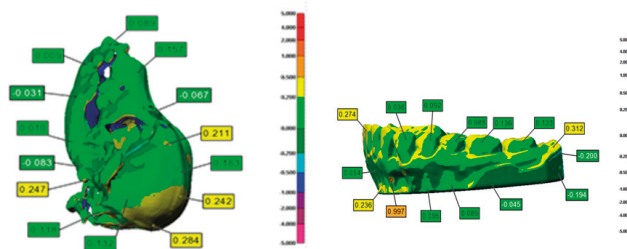
4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยโดยวิธีการ FAHP

ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแสดงโครงสร้างเชิงลำดับชั้นได้ดังแสดงในรูปที่ 5 ประกอบไปด้วยปัจจัยหลักสามด้าน คือ A ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Product characteristic) B การใช้วัสดุดิบ (Material characteristic) และ C คุณลักษณะของเครื่องพิมพ์ (Printer characteristic) โดยประกอบไปด้วยปัจจัยย่อยรวม 11 ปัจจัย คือ A1: ความแม่นยำ ซึ่งทำการวัดผลจากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองต้นแบบกับชิ้นงานที่ผลิตจริง (% error มม.) A2: ความเรียบผิว (ไมครอน) A3: ต้นทุนชิ้นงาน (บาท) A4: เวลา

ในการผลิต (นาที) A5: ความสวยงามของชิ้นงานที่ผลิต (คะแนน 1 น้อยสุด – 5 มากสุด) B1: ราคาวัสดุ (บาท) B2: ค่าแรงดึงของวัสดุ (Mpa) B3: ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (%) C1: ราคาเครื่องพิมพ์ (บาท) C2: ขนาดที่พิมพ์ได้สูงสุดของเครื่องพิมพ์ (cm³) และ C3: ความนำใช้ของเครื่องพิมพ์ (คะแนน 1 น้อยสุด – 5 มากสุด) โดยทำการรวบรวมปัจจัย จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [34-35] และการประชุมร่วมกับบริษัทเอกชนที่ทำการจำหน่ายเครื่อง 3DP ทั้งนี้ แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการวิเคราะห์ความแม่นยำและความเรียบผิวของชิ้นงาน ได้ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 โครงสร้างเชิงลำดับชั้นของปัญหาการเลือกเครื่อง 3DP



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัย (บน) ด้านความแม่นยำและ (ล่าง) ด้านความเรียบผิว

จากการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์ปัจจัยจากผู้ทำการตัดสินใจ รวมทั้งหมด 6 คน โดยเป็นกลุ่มผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคที่มีประสบการณ์การทำงานไม่ต่ำกว่า 3 ปี ในด้านการให้บริการทางเทคนิคและการขายเครื่องพิมพ์ 3DP ที่เน้นการประยุกต์ใช้ทางด้านการแพทย์โดยเฉพาะ จำนวน 3 คน และกลุ่มผู้ใช้งานเครื่องพิมพ์ 3DP ที่มีประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับการใช้เครื่องพิมพ์ 3DP มากกว่า 1 ปี จำนวน 3 คน ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ที่ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยดังแสดงในรูปที่ 7 โดยผลการวิเคราะห์ที่ค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio) พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.08 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [30] ผลการวิเคราะห์พบว่า ‘ปัจจัยทางด้านผลิตภัณฑ์’ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดตามด้วย ‘ปัจจัยทางด้านวัตถุดิบ’ และ ‘ปัจจัยทางด้านคุณลักษณะของเครื่องพิมพ์’ ตามลำดับ โดยมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.528 (52.8%), 0.298 (29.8%) และ 0.173

(17.3%) ตามลำดับ โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณสำหรับปัจจัยหลักของผู้ทำการตัดสินใจ 1 คน ดังแสดงในสมการที่ (16) – (17) เช่น (2.08, 2.52, 2.92) ในสมการที่ (17) คำนวณได้จาก $((1*3*3)^{1/3}, ((1*4*4)^{1/3}, (1*5*5)^{1/3})$ นอกจากนี้ (0.45, 0.66, 0.95) ในสมการที่ (18) คำนวณได้จาก $2.08/(2.92+0.69+1.00), 2.52/(2.52+0.50+0.79), 2.92/(2.08+0.41+0.58)$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถแปลงค่าน้ำหนักแบบฟuzzy ให้เป็นค่าน้ำหนักของปัจจัยได้ในที่สุด และในขั้นตอนสุดท้าย เป็นการสังเคราะห์เป็นค่าน้ำหนักของปัจจัยแบบกลุ่ม (Group Decision) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการใช้ระบบฉันทมติ (Consensus) และการใช้วิธีการคณิตศาสตร์ (ผู้สนใจในเรื่อง Group Decision สามารถศึกษาเพิ่มเติมจากเอกสารอ้างอิง [36]) โดยในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยคำนวณค่าเฉลี่ยของระดับเวกเตอร์ ลำดับความสำคัญของผู้ตัดสินใจทั้งหมด

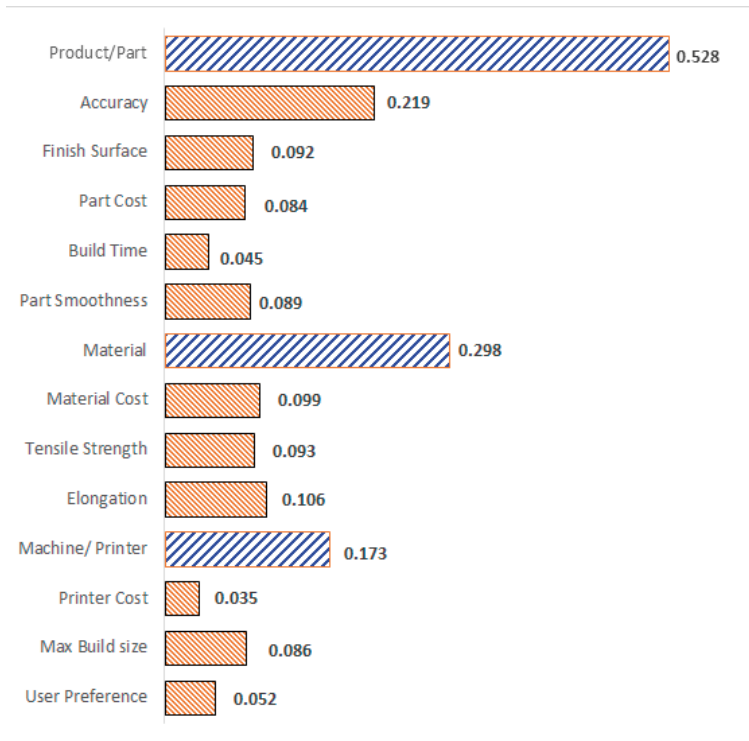
$$\tilde{A} = \begin{matrix} \text{product} \\ \text{material} \\ \text{printer} \end{matrix} \begin{bmatrix} (1,1,1) & (3,4,5) & (3,4,5) \\ (\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}) & (1,1,1) & (\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1) \\ (\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}) & (1,2,3) & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\tilde{r} = \begin{matrix} \text{product} \\ \text{material} \\ \text{printer} \end{matrix} \begin{bmatrix} 2.08 & 2.52 & 2.92 \\ 0.41 & 0.50 & 0.69 \\ 0.58 & 0.79 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (17)$$

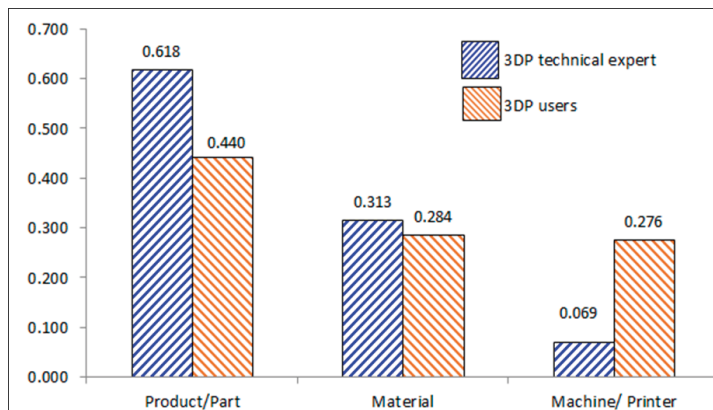
$$\tilde{w} = \begin{matrix} \text{product} \\ \text{material} \\ \text{printer} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.45 & 0.66 & 0.95 \\ 0.08 & 0.13 & 0.22 \\ 0.13 & 0.21 & 0.33 \end{bmatrix} \quad (18)$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเกณฑ์ย่อยของเกณฑ์ ‘คุณลักษณะผลิตภัณฑ์’ พบว่าปัจจัยย่อย ‘ความแม่นยำ’ สำคัญมากที่สุด มีค่าน้ำหนัก 0.219 (21.9%) ตามด้วย ‘ความเรียบผิว’ ‘ความสวยงาม’ ‘ต้นทุนชิ้นงาน’ และ ‘เวลาในการผลิต’ สำหรับปัจจัย ‘คุณลักษณะของวัตถุดิบ’ พบว่าปัจจัยย่อยที่สำคัญที่สุดคือ ‘ค่าความยืด’ มีค่าน้ำหนัก 0.106 (10.6%) ตามด้วย ‘ราคาวัสดุ’ และ ‘ค่าแรงตั้ง’ และปัจจัย ‘คุณลักษณะเครื่องพิมพ์’

พบว่าปัจจัยย่อยที่สำคัญที่สุดคือ ‘ขนาดที่พิมพ์ได้สูงสุด’ มีค่าน้ำหนัก 0.086 (8.6%) ตามด้วย ‘ความน่าใช้’ และ ‘ต้นทุนเครื่องพิมพ์’ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาน้ำหนักของปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งตามประเภทของผู้ตัดสินใจ 2 กลุ่ม คือกลุ่มผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคเครื่อง 3DP และผู้ใช้เครื่อง 3DP พบว่า สามารถวิเคราะห์ได้ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย



รูปที่ 8 ค่าน้ำหนักปัจจัยแยกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ

ทั้งนี้พบว่าทั้งสองกลุ่มวิเคราะห์ปัจจัย ‘คุณลักษณะผลิตภัณฑ์’ สำคัญมากที่สุดรองลงมาคือ ‘การใช้วัสดุดีบ’ และ ‘คุณลักษณะเครื่องพิมพ์’ ในลักษณะเดียวกัน โดยมีค่าน้ำหนักปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งผู้ใช้ 3DP ให้ความสำคัญกับลักษณะของ ‘คุณลักษณะเครื่องพิมพ์’ มากกว่าผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิค

เครื่องพิมพ์ 3DP นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ในระดัปัจจัยย่อยของแต่ละกลุ่มผู้ทำการตัดสินใจ พบว่าผู้ใช้เครื่องพิมพ์ 3DP ให้ความสำคัญกับ ‘ขนาดที่พิมพ์ได้สูงสุด’ และ ‘ค่าความยืด’ มากกว่าผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคเครื่องพิมพ์ 3DP

4.3 การวิเคราะห์ทางเลือกเครื่อง 3DP โดยวิธี TOPSIS

ผลการวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของเครื่องพิมพ์โดยใช้เทคนิค TOPSIS เริ่มจากการเก็บข้อมูลสำหรับปัจจัยต่าง ๆ ในการผลิตชิ้นงานสำหรับแต่ละทางเลือกเครื่อง 3DP ได้ดังแสดงในตารางที่ 4 ยกตัวอย่างเช่น สำหรับปัจจัยย่อย A1 ด้านความแม่นยำ เมื่อทำการผลิตชิ้นงานหัวใจจากเครื่องพิมพ์ทั้ง 5 เครื่องและทำการวัดค่า % error พบว่าชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์ SLA2 มี % error น้อยที่สุด ซึ่งแสดงว่ามีความแม่นยำสูงที่สุดในทางตรงกันข้าม หากพิจารณาปัจจัย B1 ด้านราคาวัสดุ พบว่าเครื่องพิมพ์ FDM2 ดีที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกที่สุด ส่วนปัจจัย C1 ด้านราคาเครื่องพิมพ์ พบว่าเครื่องพิมพ์ FDM1 เป็นเครื่องที่ดีที่สุดเนื่องจากราคาถูกที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่นำมาวิเคราะห์ มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยที่นำมาพิจารณา ซึ่งสามารถตีความสำหรับปัจจัยอื่น ๆ ได้ในลักษณะเดียวกัน

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธี TOPSIS ร่วมกับค่าน้ำหนักของปัจจัยจากวิธี FAHP ข้างต้น สามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณสำหรับกรณีของผู้เชี่ยวชาญสำหรับชิ้นงานหัวใจได้

ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยเริ่มจากทำการคำนวณค่าของข้อมูลที่ได้ทำการปรับสเกลแล้ว (r_{ij}) โดยใช้สมการที่ (8) เช่นค่า $r_{FDM1,A1}$ (0.921) สำหรับทางเลือก FDM1 และปัจจัย A1 คำนวณได้จาก $0.138/(0.138^2 + 0.032^2 + 0.038^2 + 0.013^2 + 0.028^2)^{1/2}$ จากตารางที่ 4 จากนั้นสามารถคำนวณค่า v_{ij} ตามสมการที่ (9) โดยใช้ค่าน้ำหนักของปัจจัยสำหรับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ (w_j) ที่ได้ก่อนหน้านี้จากวิธี FAHP ในสมการที่ (7) รวมถึงค่า S_i^* และ S_i' ตามสมการที่ (12) – (13) ซึ่งจะสามารถคำนวณค่า C_i^* โดยใช้สมการที่ (14) ได้ในที่สุด เช่น สำหรับทางเลือก FDM1 พบว่าค่า 0.303 ในตารางที่ 6 สามารถคำนวณได้จาก $0.105/(0.242+0.105)$ จากตารางที่ 5 เป็นต้น โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 6 รวมถึงการคำนวณในกรณีของชิ้นงานกรามฟัน ซึ่งมีค่าน้ำหนักของปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยพบว่าอันดับทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดสำหรับชิ้นงานหัวใจไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มผู้ทำการตัดสินใจโดยเครื่อง FDM3 เป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ในขณะที่เครื่อง 3DP ที่ดีที่สุดสำหรับชิ้นงานกรามฟันของผู้เชี่ยวชาญคือ SLA2 และสำหรับผู้ใช้งานคือ FDM2 ซึ่งแตกต่างกันตามลำดับความสำคัญของปัจจัย

ตารางที่ 4 ข้อมูลการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์แยกตามปัจจัยต่างๆ โดยใช้ทางเลือกเครื่อง 3DP

ทางเลือก 3DP	ปัจจัย A					ปัจจัย B			ปัจจัย C		
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	C1	C2	C3
	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max	Max
ชิ้นงานหัวใจ											
FDM1	0.138	8.669	369.38	245	3.00	800	45	24	16,990	5,359	3.00
FDM2	0.032	8.788	339.73	194	2.83	650	56	8	77,900	21,000	4.17
FDM3	0.038	9.425	588.01	428	3.67	850	41	10	55,000	8,190	3.83
SLA1	0.013	3.374	3,254.68	360	4.67	8,920	49	3.5	2,800,000	8,984	4.33
SLA2	0.028	2.978	2,913.06	269	4.83	8,920	56	18.9	3,300,000	750	4.17
ชิ้นงานกรามฟัน											
FDM1	0.298	9.700	171.65	69	2.50	800	45	24	16,990	5,359	3.00
FDM2	0.154	6.584	177.29	67	2.80	650	56	8	77,900	21,000	4.17
FDM3	0.154	9.100	231.73	119	3.00	850	41	10	55,000	8,190	3.83
SLA1	0.060	3.151	1,165.45	113	4.50	8,920	49	3.5	2,800,000	8,984	4.33
SLA2	0.077	3.488	1,283.16	113	4.83	8,920	56	18.9	3,300,000	750	4.17

ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างการคำนวณในกรณีของชิ้นงานหัวใจและค่าน้ำหนักปัจจัยโดยผู้เชี่ยวชาญ

ทางเลือก	ปัจจัย A					ปัจจัย B			ปัจจัย C			S_i^*	S_i'
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	C1	C2	C3		
	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max	Max		
w_j	0.283	0.109	0.083	0.018	0.124	0.104	0.113	0.095	0.017	0.033	0.019		
r_{ij}													
FDM1	0.921	0.536	0.083	0.353	0.345	0.063	0.404	0.721	0.004	0.216	0.341		
FDM2	0.213	0.543	0.077	0.279	0.325	0.051	0.503	0.240	0.018	0.845	0.475		
FDM3	0.254	0.583	0.133	0.616	0.422	0.067	0.368	0.300	0.013	0.329	0.436		
SLA1	0.087	0.209	0.734	0.518	0.537	0.703	0.441	0.105	0.647	0.361	0.493		
SLA2	0.187	0.184	0.657	0.387	0.555	0.703	0.503	0.567	0.762	0.030	0.475		
$v_{ij} = w_j r_{ij}$													
FDM1	0.261	0.059	0.007	0.006	0.043	0.007	0.046	0.069	0.000	0.007	0.007	0.242	0.105
FDM2	0.060	0.059	0.006	0.005	0.040	0.005	0.057	0.023	0.000	0.028	0.009	0.076	0.221
FDM3	0.072	0.064	0.011	0.011	0.052	0.007	0.042	0.029	0.000	0.011	0.008	0.081	0.208
SLA1	0.025	0.023	0.061	0.009	0.067	0.073	0.050	0.010	0.011	0.012	0.010	0.107	0.241
SLA2	0.053	0.020	0.055	0.007	0.069	0.073	0.057	0.054	0.013	0.001	0.009	0.094	0.219

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ TOPSIS ร่วมกับ FAHP

ทางเลือก	ผู้เชี่ยวชาญ		ผู้ใช้งาน		ภาพรวม	
	คะแนน	Rank	คะแนน	Rank	คะแนน	Rank
ชิ้นงานหัวใจ						
FDM1	0.303	5	0.413	5	0.364	5
FDM2	0.744	1	0.738	1	0.734	1
FDM3	0.719	2	0.593	2	0.670	2
SLA1	0.692	4	0.528	3	0.616	3
SLA2	0.700	3	0.484	4	0.604	4
ชิ้นงานกรมพื้น						
FDM1	0.357	5	0.451	4	0.417	5
FDM2	0.609	3	0.689	1	0.640	1
FDM3	0.584	4	0.527	2	0.568	2
SLA1	0.641	2	0.478	3	0.562	3
SLA2	0.659	1	0.439	5	0.557	4

5. สรุปผลและงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัญหาการเลือกเครื่อง 3DP ในการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ ร่วมกับกรณีวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาการเลือกเครื่องพิมพ์ 3DP โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายปัจจัย ด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นแบบฟัชซี (FAHP) ร่วมกับเทคนิคเรียงลำดับตามอุดมคติ (TOPSIS) โดยมีกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคและผู้ใช้งานเครื่องพิมพ์ 3DP ซึ่งชิ้นงานทางการแพทย์ที่ทำการผลิตเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะใหญ่แนวตั้ง (ชิ้นงานหัวใจ) และชิ้นงานที่มีลักษณะเล็กแนวนอน (ชิ้นงานกรามฟัน) ซึ่งทางเลือกเครื่อง 3DP เป็นเครื่องพิมพ์ประเภท FDM จำนวน 3 เครื่อง และเครื่องพิมพ์ประเภท SLA จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งมีลักษณะสเปคของเครื่องและวัสดุพิมพ์ที่แตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์พบว่าเครื่อง FDM1 (XYZ 3DP daVinci1.0A) มีจุดเด่น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านราคาเครื่องพิมพ์ต่ำ ด้านต้นทุนชิ้นงานต่ำ และค่าความยืดหยุ่นสูง เครื่อง FDM2 (Flashforge Guider2s) มีจุดเด่น 4 ด้าน ได้แก่ ด้านเวลาในการผลิตต่ำ ด้านราคาวัสดุต่ำ ค่าแรงดึงสูง และด้านมีขนาดพื้นที่สูงสุดมากที่สุด ในขณะที่เครื่อง FDM 3 (SINDOH 3DWOX1) ไม่พบจุดเด่นในปัจจัยต่างๆ นอกจากนี้ในส่วนของเครื่อง SLA1 (Ultra 3SP) มีจุดเด่น 2 ด้าน ได้แก่ มีค่าความแม่นยำดี และ คะแนนความน่าใช้มากที่สุด ส่วนเครื่อง SLA2 (Desktop XL) มีจุดเด่น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความเรียบผิวเครื่องพิมพ์ คะแนนความสวยงามมากที่สุด และค่าแรงดึงสูง

โดยผลการจัดเรียงลำดับทางเลือกที่ดีที่สุดโดยวิธี TOPSIS ของเครื่องพิมพ์ทั้ง 5 ทางเลือก พบว่าเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดสำหรับชิ้นงานหัวใจในรูปแบบแนวตั้งโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งาน คือเครื่อง FDM2 (Flashforge Guider2s) ซึ่งมีจุดเด่นในด้านเวลาในการผลิตต่ำ ด้านราคาวัสดุต่ำ ค่าแรงดึงสูง และขนาดพื้นที่สูงสุดมากที่สุด ส่วนทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดของชิ้นงานกรามฟันแนวนอนโดยผู้เชี่ยวชาญ เป็นเครื่อง SLA2 (Desktop XL) ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความเรียบผิวเครื่องพิมพ์ คะแนนความสวยงามมากที่สุด และค่าแรงดึงสูง โดยเครื่อง FDM2 (Flashforge Guider2s) เป็นเครื่องที่ดีที่สุดสำหรับผู้ใช้งาน นอกจากนี้ในส่วนทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดสำหรับปัจจัยหลักด้านใดด้านหนึ่ง พบว่าทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดในด้านปัจจัยผลิตภัณฑ์ คือเครื่อง SLA1 (Ultra 3SP) ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความแม่นยำดี และ ความน่าใช้มากที่สุด ส่วนทางเลือกเครื่อง-

พิมพ์ที่ดีที่สุดในด้านปัจจัยวัตถุดิบ คือ เครื่อง FDM1 (XYZ 3DP daVinci1.0A) และทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดในด้านปัจจัยเครื่องพิมพ์ คือเครื่อง FDM2 (Flashforge Guider2s) ตามลำดับ

สำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต มีได้หลายทิศทาง เช่น

- 1) เป็นที่น่าสนใจในการทำการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น รวมถึงอาจพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานชิ้นงานที่ทำการผลิตโดยเฉพาะ
- 2) จากข้อจำกัดทางด้านทางเลือกเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการผลิตในงานวิจัยนี้ที่เป็นเครื่องประเภท FDM และ SLA แนวทางหนึ่งในงานวิจัยในอนาคตคือการเพิ่มทางเลือกเครื่อง 3DP จากเทคโนโลยีประเภทอื่นๆ เช่น SLS หรือ SLM เป็นต้น
- 3) เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวัสดุที่มีสำหรับเครื่อง 3DP ผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวแทนของวัสดุเฉพาะอย่าง สำหรับเครื่องพิมพ์แต่ละประเภท อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจในการทำการออกแบบการทดลองโดยพิจารณาเครื่องพิมพ์ที่แตกต่างกัน โดยใช้วัสดุประเภทเดียวกันทั้งหมด หรืออาจพิจารณาเครื่องพิมพ์เฉพาะอย่าง ที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกัน เป็นต้น
- 4) ในส่วนของกลุ่มผู้ทำการตัดสินใจที่ใช้ในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นที่น่าสนใจที่อาจมีการเพิ่มกลุ่มผู้ทำการตัดสินใจเฉพาะด้าน เช่น กลุ่มบุคลากรทางด้านทางการแพทย์ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ทุนวิจัยพัฒนาอาจารย์รุ่นใหม่ MRG6180181 ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

7. เอกสารอ้างอิง

1. Wohlers, T., 2018, Wohlers Report 2018, Wohlers Associates, Inc.: Fort Collins, USA, 343 p.
2. 3D Hubs., 2020, "3D Printing Trends 2020 Industry Highlights and Market Trends [Online], Available: <http://www.3dhubs.com/>. [15 November 2020]

3. Ransikarbum, K., Ha, S., Ma, J. and Kim, N., 2017, "Multi-Objective Optimization Analysis for Part-to-Printer Assignment in a Network of 3D Fused Deposition Modeling," *Journal of Manufacturing Systems*, 43 (1), pp. 35-46.
4. Ransikarbum, K. and Kim, N., 2017, "Data Envelopment Analysis-based Multi-Criteria Decision Making for Part Orientation Selection in Fused Deposition Modeling," *4th IEEE International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, April, pp. 81-85.
5. Ha, S., Ransikarbum, K., Han, H., Kwon, D., Kim, H. and Kim, N., 2018, "A Dimensional Compensation Algorithm for Vertical Bending Deformation of 3D Printed Parts in Selective Laser Sintering," *Rapid Prototyping Journal*, 24 (6), pp. 955-963.
6. Ransikarbum, K., Pitakaso, R. and Kim, N., 2019, "Evaluation of Assembly Part Build Orientation in Additive Manufacturing Environment using Data Envelopment Analysis," *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, December, Tokyo, Japan, p. 293.
7. Zhao, Y., Dong, X. and Zhao, X., 2016, "3D Printing Technology and its Development Trend," *2016 International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development*, Atlantis Press. pp. 684-688.
8. Petersen, E.E. and Pearce, J., 2017, "Emergence of Home Manufacturing in the Developed World: Return on Investment for Open-source 3-D Printers," *Technologies*, 5 (1), p. 7.
9. Yuan, Y., 2020, "Research Status and Development Trend of 3D Printing Technology," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 711 (1), pp. 012014.
10. Ransikarbum, K., Pitakaso, R. and Kim, N., 2020, "A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization," *Applied Sciences*, 10 (1), p. 5159.
11. Wisetla, K. and Ransikarbum, K., 2020, "Process Planning in FDM 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Using Integrative DEA and TOPSIS," *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 22 (1), pp. 22-32. (In Thai).
12. Ramola, M., Yadav, V. and Jain, R., 2019, "On the Adoption of Additive Manufacturing in Healthcare: A Literature Review," *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30 (1), pp. 48-69.
13. Trenfield, S.J., Awad, A., Madla, C.M., Hatton, G.B., Firth, J., Goyanes, A. and Basit, A.W., 2019, "Shaping the Future: Recent Advances of 3D Printing in Drug Delivery and Healthcare," *Expert Opinion on Drug Delivery*, 16 (10), pp. 1081-1094.
14. Ransikarbum, K., 2020, "Multi-Criteria Decision Analysis-based Orientation Selection Problem for Integrated 3D Printing and Subtractive Manufacturing," *The Journal of Industrial Technology*, 16 (1), pp. 15-30. (In Thai).
15. Ransikarbum, K. and Kim, N., 2017, "Multi-Criteria Selection Problem of Part Orientation in 3D Fused Deposition Modeling based on Analytic Hierarchy Process Model: A Case Study," *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, December, Singapore, pp. 1455 – 1459.
16. Ransikarbum, K., Yingviwatanapong, C., Leksomboon, R., Wajanavisit, T. and Bijaphala, N., 2019, "Additive Manufacturing-based Healthcare 3D Model for Education: Literature Review and A Feasibility Study," *IEEE Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, December, Bangkok, Thailand, pp. 1-6.
17. Duangkam, P. and Jeamjirong, K., 2019, "The Effect of Speed and Energy Density on Temperature Distribution for Nylon Powder 618-s in Powder Stereoscopic Printer," *Journal of Engineering Ubon Rat-*

chathani University, 11 (2), pp. 89-99. (In Thai).

18. Prateepsawangvong, B., 2018, "Using Reverse Engineering in Computer Numerical Control and Rapid Prototyping Technology in Restorative Dentistry," *Chiang Mai Dental Clinic Journal*, 39 (2), pp. 13-29. (In Thai).

19. Jamróz, W., Szafraniec, J., Kurek, M. and Jachowicz, R., 2018, "3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications—recent Achievements and Challenge," *Pharmaceutical Research*, 35 (1), p. 176.

20. AlAli, A.B., Griffin, M.F. and Butler, P.E., 2015, "Three-dimensional Printing Surgical Applications," *Eplasty*, p. 15.

21. Kornsoapa, S., Wudi, N. and Mahasaranon, S., 2017, "Development of a Cylindrical Head and Neck Model with a 3D Printer for Radiographic Inspection in Radiotherapy," *Songkhla Nakarin Vejsarn Journal*, 35 (4), pp. 351-360. (In Thai).

22. Gatto, M., Memoli, G. Shaw, A., Sathoo, N., Gelat, P. and Harris, R. A., 2012, "Three-Dimensional Printing (3DP) of Neonatal Head Phantom for Ultrasound: Thermocouple Embedding and Simulation of Bone," *Medical Engineering and Physics*, 34 (7), pp. 929-937.

23. Di Prima, M., Coburn, J., Hwang, D., Kelly, J., Khairuzzaman, A. and Ricles, L., 2016, "Additively Manufactured Medical Products—the FDA Perspective," *3D printing in Medicine*, 2 (1), pp. 1-6.

24. The Biomedical 3D Printing Community [Online], Available: <https://www.embodi3d.com/about-us/> [May 15, 2020]

25. Shende, V. and Kulkarni, P., 2014, "Decision Support System for Rapid Prototyping Process Selection," *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4 (1), pp. 1-6.

26. Jadhav, M.D. and Agrawal, R. K., 2016, "Application of Reverse Engineering (RE) for Different Rapid Prototyping Techniques (RP) and its Comparative Analysis,"

International Journal of Engineering Trends and Technology, 39 (1), pp. 94-98.

27. Sureeyatanapas, P., Waleekhajornlert, N., Arunyanart, S. and Niyamosoth, T., 2020, "Resilient Supplier Selection in Electronic Components Procurement: An Integration of Evidence Theory and Rule-Based Transformation into TOPSIS to Tackle Uncertain and Incomplete Information," *Symmetry*, 12 (7), p.1109.

28. Sriwattananusart, K. and Sureeyatanapas, P., 2017, "Supplier Selection Using TOPSIS and ROC Methods : A Case Study of Restaurant Industry," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (3), pp. 385-403. (In Thai)

29. Luenam, P., 2013, "Prioritized Factors Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Understanding Concepts And Its Application," *Modern Management Journal*, 11 (1), pp. 1-12. (In Thai)

30. Leunam, P., 2013, "Criteria Prioritization with Fuzzy Analytical Hierarchy Process: Concepts and Applications," *Journal of Modern Management*, 11 (1), pp. 1-12. (In Thai).

31. Metaxiotis, K., Psarras, J. and Samouilidis, E., 2003, "Integrating Fuzzy Logic into Decision Support Systems: Current Research and Future Prospects," *Information Management and Computer Security*, 11 (2), pp. 53-59.

32. Khamhong, P., Yingviwatanapong, C. and Ransikarbum, K., 2019, "Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)-based Criteria Analysis for 3D Printer Selection in Additive Manufacturing," *2019 IEEE Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, December, Bangkok, Thailand, pp. 1-5.

33. Sonvisut, A., 2016, "Multiple Criteria Decision Making: Comparison of Concepts and Methods between SAW, AHP, and TOPSIS," *Journal of Narathiwat Rajanagarindra University*, 8 (2), pp. 180-192. (In Thai).

34. Roberson, D.A., Espalin, D. and Wicker, R.B.,

- 2013, "3D Printer Selection: A Decision-making Evaluation and Ranking Model," *Virtual and Physical Prototyping*, 8 (3), pp. 201-212.
35. Prabhu, S.R. and Ilankumaran, M., 2019, "Selection of 3D Printer Based on FAHP Integrated with GRA-TOPSIS," *International Journal of Materials and Product Technology*, 58 (2-3), pp. 155-177.
36. Ishizaka, A. and Labib, A., 2011, "Review of the Main Developments in the Analytic Hierarchy Process," *Expert systems with applications*, 38 (11), pp. 14336-14345.