การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติเพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน

Development of a Web-Based 3D Model Visualization Application to Support Community-Based Product Design Processes

ดวงทิพย์ รับพรดี[1] และ ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชยกุล[1*]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีมัลติมีเดีย, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Duangthip Rubporndee[1] and Yanapat Lappanitchyakul[1*]

[1]Department of Multimedia Technology, Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajabhat University

Corresponding Author Email : yanapat.l@lawasri.tru.ac.th

Received 13 February 2026

Revised 24 March 2026

Accepted 31 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ เพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน โดยมีพื้นฐานจากปัญหาการนำเสนอแบบสองมิติที่ไม่สามารถสื่อสารรูปทรง สัดส่วน และรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครบถ้วน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำความเข้าใจและการตัดสินใจเชิงออกแบบ ระบบถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js เพื่อให้สามารถแสดงผลโมเดลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมการพัฒนาโมเดลบรรจุภัณฑ์และฉลากผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบในรูปแบบไฟล์ .glb และ .obj พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการลดจำนวน polygon และการบีบอัดไฟล์ ผลการทดลองเชิงเทคนิคพบว่าการลดจำนวน polygon ประมาณ 30% ทำให้ขนาดไฟล์ลดลงจาก 120–150 MB เหลือ 40–60 MB และลดเวลาโหลดจาก 8–10 วินาที เหลือ 5–8 วินาที โดยคงอัตราเฟรมเฉลี่ย 18–20 FPS และสามารถทำงานได้บนคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และแท็บเล็ตโดยไม่พบข้อผิดพลาด นอกจากนี้ได้ทดลองใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน ผลการประเมินมีค่าเฉลี่ยรวม 4.74 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.51 และประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน สะท้อนถึงความเหมาะสมในระดับสูง ผู้ใช้ระบุว่าระบบช่วยให้เข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารเชิงออกแบบ และสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจร่วมกันในระดับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุป ระบบสามารถเป็นเครื่องมือดิจิทัลที่ช่วยยกระดับกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน และมีศักยภาพต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ด้านการเรียนการสอนและงานวิจัยในอนาคต

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, โมเดลสามมิติ, เว็บจีแอล, ทรีดอทเจเอส, การออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชน

Abstract

This research and development study aims to develop a web-based interactive 3D visualization application to support participatory product design in community contexts. The study is grounded in the limitations of conventional two-dimensional presentations, which are unable to fully communicate product shape, proportions, and details, resulting in misunderstandings and inefficiencies in design-related decision-making. The system was developed using WebGL technology and the Three.js library to enable real-time 3D rendering through web browsers without requiring additional software installation. The scope of the study included the development of eight packaging and product label models in .glb and .obj formats. Model optimization techniques, including polygon reduction and file compression, were applied to enhance system performance. Technical testing results indicated that reducing the polygon count by approximately 30% decreased file sizes from 120–150 MB to 40–60 MB and reduced loading time from 8–10 seconds to 5–8 seconds, while maintaining an average frame rate of 18–20 FPS. The system functioned reliably across desktop computers, smartphones, and tablets without errors. In addition, the system was tested with 51 participants and evaluated by five experts. The overall mean score was 4.74 with a standard deviation of 0.51, indicating a high level of suitability. Users reported improved clarity in understanding product forms, reduced design communication errors, and enhanced collaborative decision-making at the community level. In conclusion, the developed system serves as a digital tool that enhances the product design and community-based product development process, with strong potential for application in educational settings and future research.

Keywords: Web-based Application, 3D Model Visualization, WebGL, Three.js, Community-based Product Design

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับแสดงผลโมเดลสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ (Interactive 3D Web Application) เพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารระหว่างนักออกแบบและกลุ่มเป้าหมายในพื้นที่ห่างไกล โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js ในการเรนเดอร์พื้นผิวและรูปทรงแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ [1], [2] การวิจัยนี้จะช่วยให้เกิดเครื่องมือดิจิทัลที่เข้าถึงง่าย ลดต้นทุนการผลิตต้นแบบที่ผิดพลาด และยกระดับขีดความสามารถทางการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ชุมชน มุ่งเน้นการสร้างระบบที่สามารถแสดงผลได้บนหลากหลายแพลตฟอร์ม (Cross-platform) โดยไม่ต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอน

การนำเข้าโมเดล การปรับแต่งคุณลักษณะของวัสดุ ไปจนถึงการแสดงผลบรรจุภัณฑ์ในสภาพแวดล้อมจำลอง เพื่อการตัดสินใจเชิงออกแบบ

การพัฒนาระบบดังกล่าวจะช่วยยกระดับมาตรฐานการสื่อสารในกระบวนการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม โดยเปลี่ยนจากการพึ่งพาภาพร่างสองมิติหรือแบบจำลองกระดาษที่ไม่สามารถถ่ายทอดสัดส่วนจริงได้อย่างครบถ้วน ไปสู่การใช้ระบบ Digital Twin ขนาดเล็กที่ช่วยให้เข้าใจมิติและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แม่นยำขึ้น [3], [4] ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารระหว่างนักออกแบบและผู้ผลิตในท้องถิ่น [5], [6] แต่ยังสามารถต่อยอดไปสู่เครื่องมือการเรียนรู้เชิงกายวิภาคหรือธรณีวิทยาที่ต้องการการโต้ตอบกับโมเดลที่มีความซับซ้อนสูงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อีกด้วย [7], [8]

ปัญหาสำคัญของการแสดงผลสามมิติบนเว็บในปัจจุบันคือ ข้อจำกัดด้านทรัพยากรของอุปกรณ์ปลายทาง (Hardware Constraints) โดยเฉพาะเมื่อต้องประมวลผลโมเดลที่มีความละเอียดสูงบนอุปกรณ์พกพาในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งมักประสบปัญหาอัตราเฟรมเรตต่ำ (Low Frame Rate) และการใช้หน่วยความจำที่สูงเกินจำเป็น [9], [10] แม้จะมีมาตรฐาน WebGL แต่กระบวนการจัดการข้อมูลขนาดใหญ่แบบเรียลไทม์ยังคงเผชิญกับความท้าทายในเรื่อง Latency และความซับซ้อนของโครงสร้างข้อมูลแบบจำลองสามมิติ (3D Mesh Data) และคุณลักษณะของพื้นผิว (Texture Maps) ที่มีรายละเอียดสูง [10], [11] ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสบการณ์ผู้ใช้งาน (User Experience) และความราบรื่นในการโต้ตอบกับโมเดลในขณะปรึกษาหารือร่วมกับชุมชน

จากการสังเคราะห์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยด้าน Web-based 3D Visualization [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]ได้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคโนโลยี WebGL และ Three.js ในการพัฒนาเครื่องมือแสดงผลสามมิติบนเว็บที่สามารถโต้ตอบได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งถือเป็น จุดแข็งสำคัญของงานวิจัยสายเทคโนโลยี เนื่องจากสามารถรองรับการแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาเชิงเทคนิคของระบบแสดงผล เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการเรนเดอร์หรือการจัดการข้อมูลกราฟิก โดย ยังมีข้อจำกัดในการนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนอย่างเป็นระบบขณะเดียวกัน งานวิจัยด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน [12], [13], [14] แม้จะมี จุดแข็งด้านกระบวนการมีส่วนร่วมและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับอัตลักษณ์ท้องถิ่น แต่ยังคงพึ่งพาการนำเสนอแนวคิดผลิตภัณฑ์ผ่านภาพสองมิติเป็นหลัก ซึ่งไม่สามารถถ่ายทอดมิติ รูปทรง และสัดส่วนจริงของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครบถ้วน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารเชิงออกแบบ งานวิจัยนี้จึงสร้างความแตกต่างโดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเทคนิค (Technical Optimization) สำหรับบริบทชุมชนโดยเฉพาะ ผ่านเทคนิคการลดจำนวน polygon และการจัดการ texture เพื่อให้ได้ค่าความหน่วงต่ำ (Low Latency) และอัตราเฟรมที่คงที่บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Heterogeneous Devices) ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีทรัพยากรจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างดังกล่าว (Research Gap) ด้วยการบูรณาการการเพิ่มประสิทธิภาพกราฟิก (3D Optimization) เข้ากับแนวคิดการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (Participatory Design) เพื่อสร้างเครื่องมือดิจิทัลที่ลดอุปสรรคการสื่อสาร และสนับสนุนการตัดสินใจร่วมกันของชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

1. พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ โดยใช้ WebGL และ Three.js
2. พัฒนาโมเดลผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์และฉลากจำนวน 8 แบบ ในรูปแบบไฟล์ .glb และ .obj
3. ปรับเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลด้วยเทคนิค Mesh Decimation (ลด polygon ประมาณ 30%) และปรับ texture เป็น 1024×1024 พิกเซล

4. ทดสอบประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ได้แก่ ขนาดไฟล์ เวลาโหลด และค่า FPS
5. ทดลองใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน
6. ประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน
7. ประเมินผลทั้งเชิงเทคนิคและเชิงการใช้งาน

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเรนเดอร์กราฟิกสามมิติแบบเรียลไทม์บนเว็บ

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติบนเว็บอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีด้านการเรนเดอร์กราฟิกแบบเรียลไทม์ (Real-Time Rendering) ซึ่งเป็นกระบวนการประมวลผลข้อมูลเชิงเรขาคณิตและพื้นผิวให้แสดงผลบนหน้าจออย่างต่อเนื่องผ่านหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) [1] เทคโนโลยี WebGL ทำหน้าที่เป็นมาตรฐานที่ช่วยให้เว็บเบราว์เซอร์สามารถเข้าถึงความสามารถของ GPU ได้โดยตรง ส่งผลให้สามารถแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บได้โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม [1], [2] แนวคิดดังกล่าวเป็นรากฐานสำคัญของการสร้างระบบแสดงผลสามมิติแบบโต้ตอบได้บนแพลตฟอร์มเว็บ [3]

3.2 แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ

ในการพัฒนาโมเดลสำหรับระบบเว็บ จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากรของอุปกรณ์ผู้ใช้ เช่น หน่วยความจำ ความเร็วในการประมวลผล และแบนด์วิดท์เครือข่าย [7] แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ (3D Optimization) มีบทบาทสำคัญในการลดภาระการประมวลผลและเวลาโหลด โดยประกอบด้วยเทคนิคสำคัญ ได้แก่ (1) การลดจำนวน polygon (Mesh Decimation) (2) การปรับลดความละเอียดของ texture และ(3) การเลือกใช้รูปแบบไฟล์ที่เหมาะสม เช่น .glb หลักการสำคัญคือการรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพของโมเดลและประสิทธิภาพการแสดงผล เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียรในสภาพแวดล้อมทรัพยากรจำกัด [7], [8]

3.3 แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้และการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม

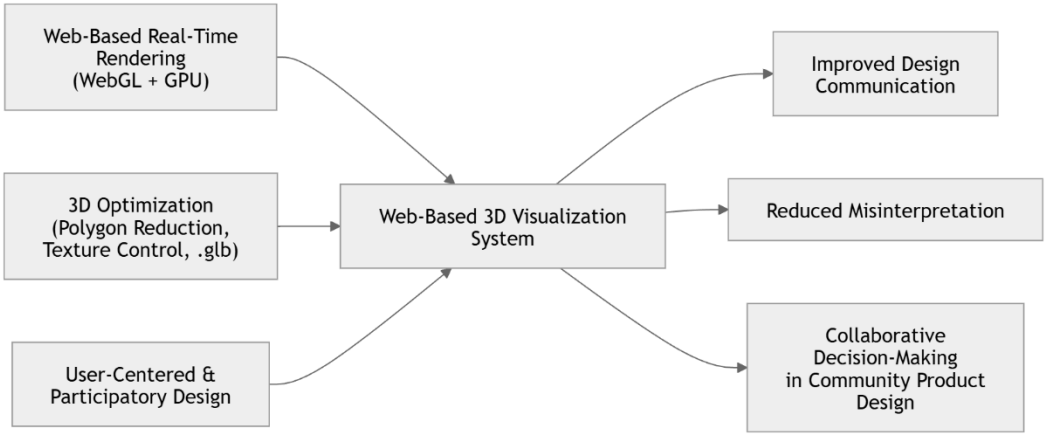
แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้ (User-Centered Design) มุ่งเน้นการพัฒนาระบบโดยคำนึงถึงความต้องการและพฤติกรรมของผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง [12] ขณะที่แนวคิดการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (Participatory Design) เน้นการเปิดโอกาสให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเข้ามามีบทบาทในการตัดสินใจและพัฒนาผลิตภัณฑ์ร่วมกัน [4], [14] ในบริบทของงานวิจัยนี้ แนวคิดทั้งสองถูกบูรณาการเข้ากับเทคโนโลยีการแสดงผลสามมิติบนเว็บ เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมดิจิทัลที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถรับรู้รูปทรงและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง ลดข้อจำกัดของการนำเสนอแบบสองมิติ และสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจเชิงออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14]

3.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการบูรณาการแนวคิดดังกล่าว สามารถสรุปกรอบแนวคิดของงานวิจัยได้ว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์บนเว็บ ร่วมกับแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ และหลักการออกแบบเชิงผู้ใช้จะนำไปสู่การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (1) เทคโนโลยีการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์บนเว็บ (Web-Based Real-Time Rendering) (2) แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ (3D Optimization) และ (3) แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้และการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (User-Centered & Participatory Design) ซึ่งทั้งสามองค์ประกอบทำงานร่วมกันเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารเชิงออกแบบ ลดความคลาดเคลื่อนจากการตีความรูปแบบผลิตภัณฑ์ และ

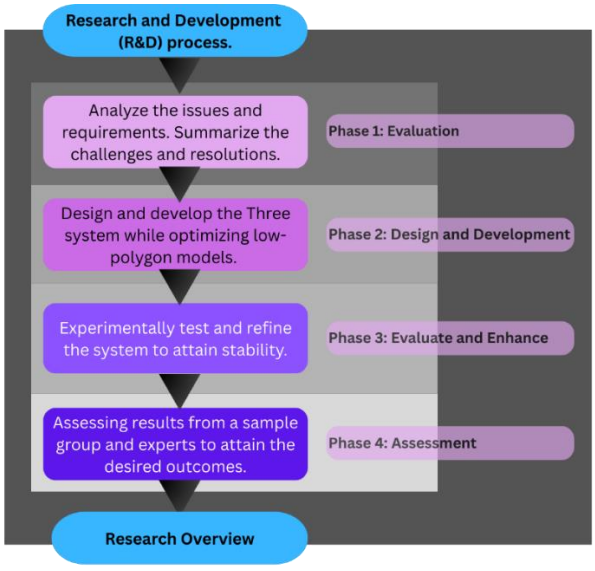
สนับสนุนการตัดสินใจร่วมกันในระดับชุมชน กรอบแนวคิดดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบและกำหนดตัวแปรในการประเมินผล ทั้งด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและการใช้งานจริงของผู้ใช้และผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติเพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน

4. การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ในลักษณะของการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติบนแพลตฟอร์มเว็บ โดยดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ผลด้วยกระบวนการวิจัยเชิงทดลองพร้อมทั้งปรับแต่งประสิทธิภาพของระบบให้เหมาะสมต่อการใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ในสภาพแวดล้อมจริง ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพทางเทคนิค และการประเมินผลเชิงปริมาณ ในส่วนของการใช้งานจริงในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ การพัฒนาโมเดล การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิต การทดสอบการทำงานข้ามแพลตฟอร์ม และการประเมินผลจากกลุ่มผู้ใช้งานและผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้กระบวนการสามารถทำซ้ำและตรวจสอบได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 2

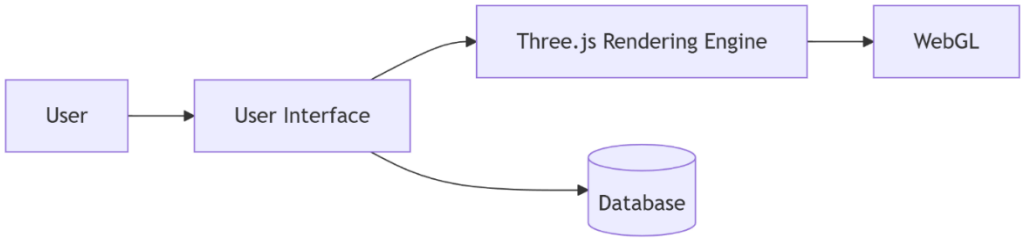


รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแบบชุมชนมีส่วนร่วม

จากรูปที่ 2 เป็นกระบวนการดำเนินงานได้ประยุกต์ใช้กรอบวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) แบ่งเป็น 4 ระยะหลัก คือ (1) การวิเคราะห์ปัญหาและสรุปความต้องการพร้อมวิธีแก้ปัญหา (2) ออกแบบพัฒนาระบบและเพิ่มประสิทธิภาพโมเดล (3) ทดสอบเชิงทดลอง (Experimental Testing) และ (4) การประเมินผลโดยกลุ่มตัวอย่าง 51 คน และผู้เชี่ยวชาญ 5 คน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตอบโจทย์ทั้งในมิติประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและการนำไปใช้สนับสนุนชุมชนจริง

4.1 สถาปัตยกรรมระบบ

ระบบถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ไลบรารี Three.js สำหรับการแสดงผลกราฟิกสามมิติผ่าน WebGL การเรนเดอร์ดำเนินการแบบ Client-Side Rendering โดยใช้ GPU ของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน ระบบรองรับไฟล์โมเดล .glb และ .obj จำนวน 8 โมเดล และเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บเส้นทางไฟล์โมเดล โครงสร้างการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 3

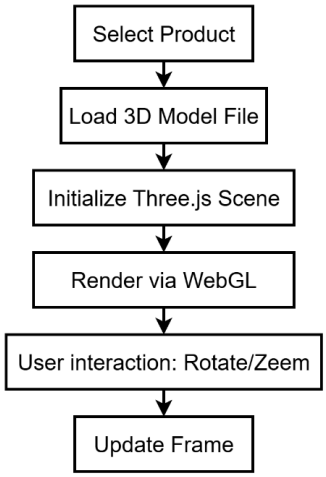


รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมระบบเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบหลักของระบบ ได้แก่ ส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI), โมดูลเรนเดอร์ 3D และส่วนจัดการข้อมูล

4.2 การออกแบบและพัฒนาโมเดลสามมิติ

โมเดลผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงขนาดจริงของผลิตภัณฑ์ เช่น ขวดยาดมขนาดประมาณ 5.5 × 3.5 เซนติเมตร เพื่อให้สัดส่วนของโมเดลมีความถูกต้องเชิงกายภาพ จากนั้นส่งออกไฟล์ในรูปแบบ .glb และ .obj เพื่อรองรับการแสดงผลผ่านเว็บ ลำดับการทำงานของระบบตั้งแต่การเลือกผลิตภัณฑ์จนถึงการแสดงผลโมเดล แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลำดับการทำงานของระบบแสดงผลโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนตั้งแต่ผู้ใช้เลือกผลิตภัณฑ์ ระบบโหลดไฟล์โมเดล สร้างฉากใน Three.js และเปิดใช้งานการโต้ตอบแบบเรียลไทม์

4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการแสดงผล

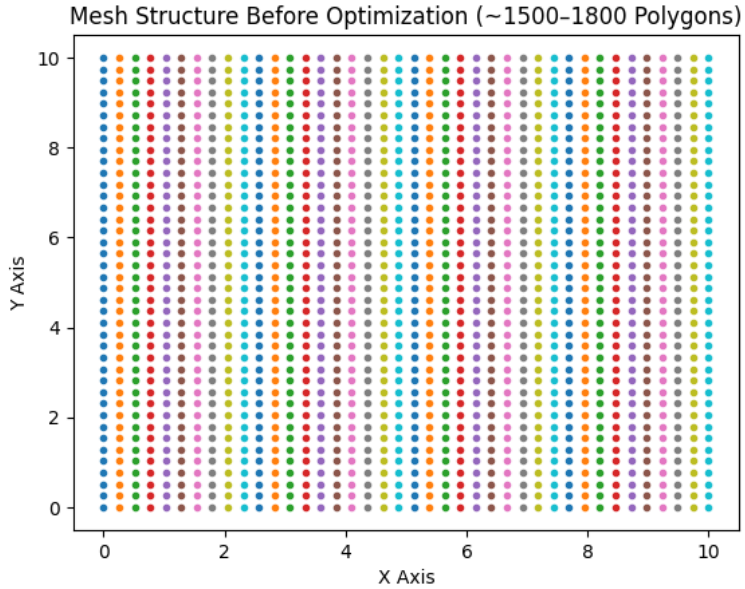
เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ได้ดำเนินการปรับแต่งโมเดลสามมิติทั้งในด้านโครงสร้างเรขาคณิตและขนาดไฟล์ โดยใช้เทคนิค Mesh Decimation เพื่อลดจำนวน polygon ประมาณ 30% จากช่วง 1500–1800 polygon เหลือประมาณ 1000–1200 polygon ต่อโมเดล พร้อมทั้งปรับลดความละเอียดของ texture ให้อยู่ที่ 1024×1024 พิกเซล และบีบอัดไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบ .glb เพื่อเหมาะสมกับการใช้งานบนเว็บ

ก่อนการปรับแต่ง ขนาดไฟล์โมเดลอยู่ในช่วง 120–150 MB ต่อโมเดล และหลังการปรับแต่งลดลงเหลือ 40–60 MB ส่งผลให้ภาระการถ่ายโอนข้อมูลผ่านเครือข่ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการเปรียบเทียบค่าทางเทคนิคก่อนและหลังการปรับแต่งแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับแต่งโมเดล

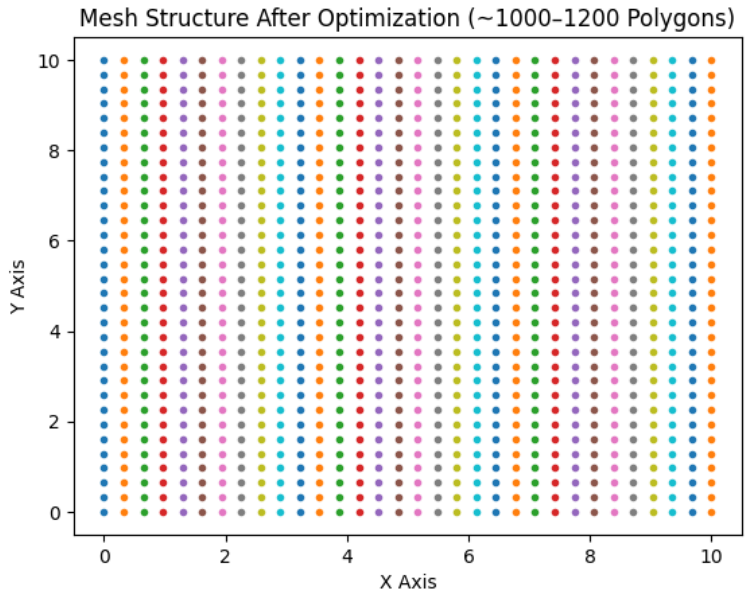
ตัวชี้วัด	ก่อนปรับแต่ง	หลังปรับแต่ง
จำนวน Polygon	1500–1800	1000–1200
ขนาดไฟล์ (.glb)	120–150 MB	40–60 MB
FPS (เฉลี่ย)	24–30	18–20
เวลาโหลด	8–10 วินาที	5–8 วินาที

จากตารางที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่า แม้ค่า FPS เฉลี่ยลดลงเล็กน้อยหลังการปรับแต่ง แต่ค่า FPS มีความคงที่มากขึ้นและไม่พบอาการกระตุก (Frame Drop) ระหว่างการหมุนหรือซูมโมเดล ขณะที่เวลาโหลดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าปัจจัยด้านขนาดไฟล์และการถ่ายโอนข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานมากกว่าความซับซ้อนของเรขาคณิตเพียงอย่างเดียว เพื่อแสดงผลกระทบเชิงโครงสร้างของการลดจำนวน polygon จึงทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh ก่อนและหลังการปรับแต่ง ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



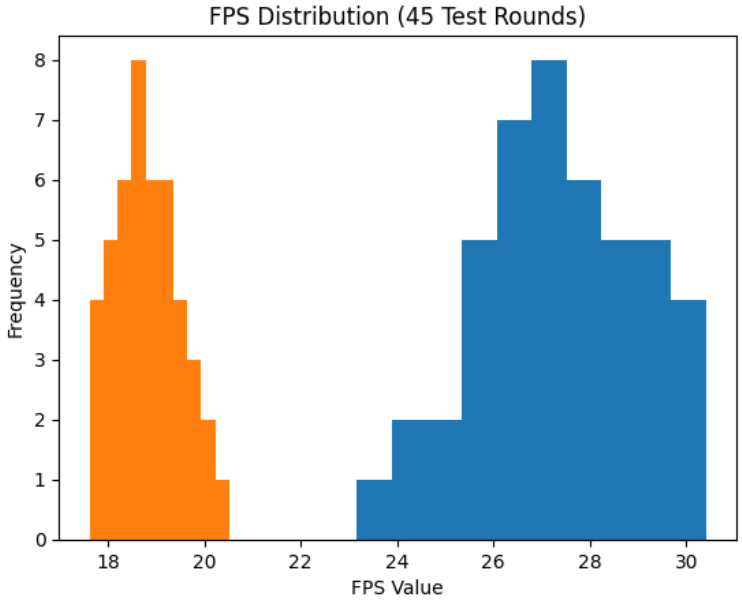
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh ก่อนการลด Polygon (~1500–1800 Polygons)

จากรูปที่ 5 แสดงความหนาแน่นขององค์ประกอบเชิงเรขาคณิตก่อนการปรับลด ซึ่งมีจำนวนจุดและพื้นผิวสูง ส่งผลต่อภาระการประมวลผลของ GPU



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh หลังการลด Polygon (~1000–1200 Polygons)

จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างหลังการลด polygon ประมาณ 30% ทำให้ความหนาแน่นขององค์ประกอบลดลงและลดภาระการประมวลผล เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ ได้ทำการวัดค่า FPS โดยใช้ Google Chrome DevTools และทดสอบซ้ำประมาณ 45 รอบต่อโมเดล ภายใต้เครือข่าย Wi-Fi ความเร็วเฉลี่ย 50 Mbps ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า FPS แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การกระจายตัวของค่า FPS จากการทดสอบประมาณ 45 รอบ

จากรูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่า FPS ก่อนและหลังการปรับแต่ง พบว่าหลังการปรับแต่งค่าการกระจายตัวแคบลง สะท้อนถึงเสถียรภาพของระบบที่เพิ่มขึ้น แม้ค่าเฉลี่ย FPS ลดลงเล็กน้อย

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพระบบ

ระบบถูกทดสอบบนอุปกรณ์ 3 ประเภท ได้แก่ (1) เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows (Intel Core i5, RAM 8GB, Google Chrome) (2) โทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการ Android (3) แท็บเล็ต การทดสอบดำเนินการภายใต้เครือข่าย Wi-Fi ความเร็วเฉลี่ย 50 Mbps โดยวัดค่า FPS และเวลาโหลดโมเดลจำนวน 8 แบบในแต่ละอุปกรณ์ ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถแสดงผลโมเดลได้ครบถ้วนทุกอุปกรณ์โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดด้านการเรนเดอร์หรือการแสดงผลพื้นผิว

ค่า FPS เฉลี่ยบนเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่ในช่วง 18–20 FPS ซึ่งแม้ต่ำกว่ามาตรฐาน 30 FPS สำหรับงานกราฟิกแบบเกม แต่ยังอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับงานด้าน Visualization และการนำเสนอผลิตภัณฑ์ ซึ่งไม่ต้องการการเคลื่อนไหวต่อเนื่องความเร็วสูง นอกจากนี้ ระบบสามารถรองรับการโต้ตอบ เช่น การหมุนและการซูมได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดอาการค้างของระบบ

ผลการทดสอบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การปรับลด polygon และบีบอัดไฟล์มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพการทำงานและเวลาโหลด โดยเฉพาะในบริบทการใช้งานจริงระดับชุมชนที่ใช้อุปกรณ์ทั่วไป

4.5 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน คัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มแบบเฉพาะเจาะจง จากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน และผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน คัดเลือกด้วยวิธี Expert Judgement Sampling ตามคุณสมบัติด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือเทคโนโลยีสามมิติ

4.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลประกอบด้วย

(1) แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในรูปแบบมาตรประมาณค่า 5 ระดับ

(2) แบบประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

(3) แบบบันทึกค่าประสิทธิภาพเชิงเทคนิค

เครื่องมือผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (IOC) และวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่น (Cronbach’s Alpha)

4.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงเทคนิควิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการปรับแต่ง ข้อมูลจากแบบสอบถามวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และใช้การทดสอบเชิงสถิติที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

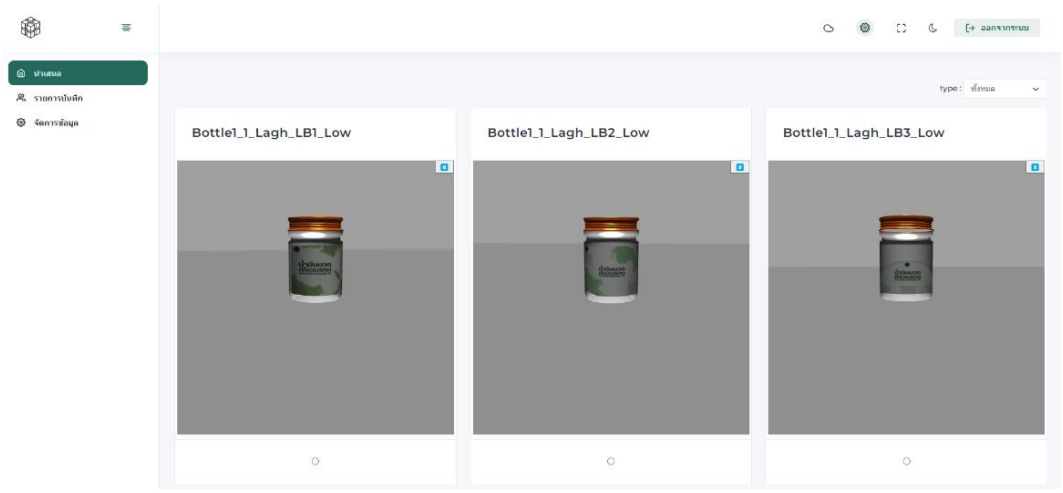
การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างดำเนินการโดยไม่ระบุตัวตน ไม่มีการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลหรือข้อมูลอ่อนไหว ผู้เข้าร่วมตอบแบบสอบถามโดยสมัครใจและสามารถยุติการตอบได้ทุกเมื่อ

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนำเสนอผลลัพธ์จากการพัฒนาระบบและการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของเว็บแอปพลิเคชัน โดยแบ่งออกเป็นผลการพัฒนาระบบและผลการแสดงผลโมเดล ดังนี้

5.1 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

ผลการวิจัยพบว่าสามารถพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติด้วยไลบรารี Three.js บนแพลตฟอร์ม WebGL ได้สำเร็จ ระบบรองรับไฟล์ .glb และ .obj และสามารถแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบในรูปแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเสริมเพิ่มเติม ผู้ใช้งานสามารถหมุน ซูม และปรับมุมมองของโมเดลได้แบบเรียลไทม์ แสดงดังรูปที่ 8

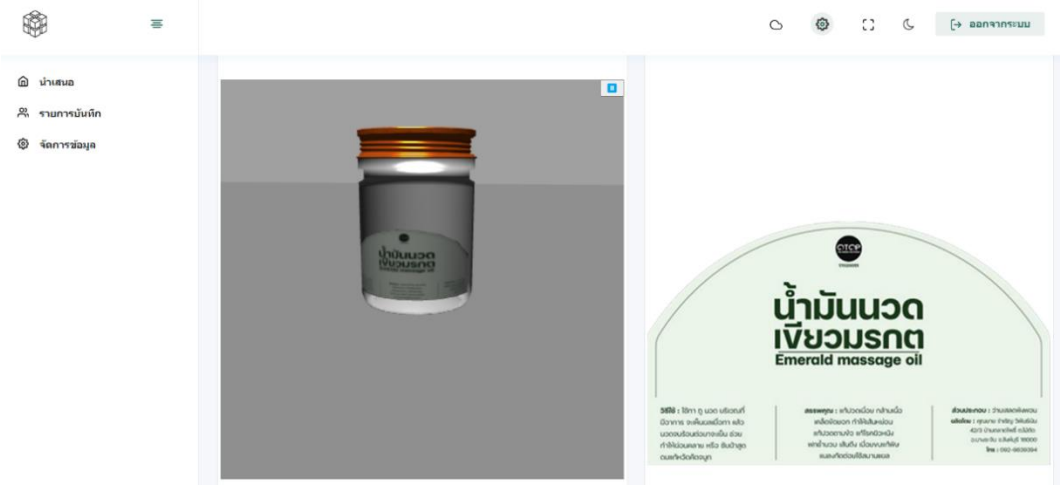


รูปที่ 8 หน้าจอระบบเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 8 แสดงหน้าจอระบบที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกผลิตภัณฑ์และแสดงผลโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์

5.2 ผลการแสดงผลโมเดลสามมิติ

ระบบสามารถแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์ทั้ง 8 แบบได้ครบถ้วน โดยยังคงสัดส่วนตามขนาดจริงของผลิตภัณฑ์ เช่น ขวดยาดมขนาดประมาณ 5.5 × 3.5 เซนติเมตร ผู้ใช้งานสามารถหมุนและซูมโมเดลได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดข้อผิดพลาดด้านการแสดงผลพื้นผิวหรือโครงสร้างเรขาคณิต แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างการแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์ในรูปแบบสามมิติ

จากรูปที่ 9 แสดงตัวอย่างโมเดลผลิตภัณฑ์ที่สามารถโต้ตอบได้แบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

5.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ

จากการปรับลดจำนวน polygon ประมาณ 30% พบว่าเวลาโหลดโมเดลลดลงจากช่วง 8–10 วินาที เหลือ 5–8 วินาที ขณะที่ค่า FPS เฉลี่ยบนเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่ที่ 18–20 FPS และระบบมีความเสถียรในการโต้ตอบมากขึ้น ระบบสามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และแท็บเล็ต โดยไม่พบข้อผิดพลาดใน

การเรนเดอร์หรือการแสดงผลพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับการใช้งานจริงในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.4 ผลการประเมินจากผู้ใช้งาน

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในบริบทการใช้งานจริง ได้ดำเนินการทดลองใช้ระบบกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน และประเมินผลด้วยแบบสอบถามมาตรประมาณค่า 5 ระดับ โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ (1) ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ (2) ความสะดวกในการใช้งาน และ (3) การสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจเชิงออกแบบ เกณฑ์การแปลผลค่าเฉลี่ยกำหนดตามช่วงคะแนนมาตรประมาณค่า 5 ระดับ โดยค่าเฉลี่ย 4.51–5.00 หมายถึงระดับมากที่สุด 3.51–4.50 หมายถึงระดับมาก และลดหลั่นตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (n = 51)

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ
ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์	4.73	0.57	มากที่สุด
ความสะดวกในการใช้งาน	4.84	0.37	มากที่สุด
การสนับสนุนการตัดสินใจ	4.65	0.59	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	**4.74**	**0.51**	**มากที่สุด**

จากตารางที่ 2 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.74, SD = 0.51) โดยด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ และการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงออกแบบ สะท้อนว่าระบบสามารถสนับสนุนการสื่อสารเชิงออกแบบ และช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทำความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (n = 5)

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ
ความเหมาะสมของการออกแบบระบบ	4.40	0.55	มาก
ประสิทธิภาพการแสดงผล	4.60	0.55	มากที่สุด
ความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชน	4.80	0.45	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	**4.60**	**0.51**	**มากที่สุด**

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพระบบโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.60, SD = 0.51) โดยด้านความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชนมีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือประสิทธิภาพการแสดงผล ขณะที่ด้านความเหมาะสมของการออกแบบระบบอยู่ในระดับมาก ผลการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชน

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js สามารถพัฒนาระบบแสดงผลโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์อย่างมีเสถียรภาพ สอดคล้องกับแนวคิดการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์

บนเว็บที่เน้นการใช้ศักยภาพของหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ในการประมวลผลข้อมูลเชิงเรขาคณิตและพื้นผิว [1–3] ทั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติด้วยการลดจำนวน polygon และปรับความละเอียดของ texture มีส่วนช่วยลดเวลาโหลดและเพิ่มเสถียรภาพของอัตราเฟรม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดล (3D Optimization) และยืนยันว่าการปรับแต่งเชิงเทคนิคดังกล่าวมีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ในเชิงวิพากษ์ การลดทอนรายละเอียดโมเดลคือการเลือกสมดุลระหว่างความสวยงามและสมรรถนะ ซึ่งผู้วิจัยวิเคราะห์ว่าในบริบทชุมชนความลื่นไหลในการโต้ตอบ สำคัญกว่าความสมจริงขั้นสูงสุด เพื่อรักษาความต่อเนื่องในการสื่อสารบนอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

เมื่อพิจารณาผลการประเมินจากผู้ใช้งานจำนวน 51 คน และผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน พบว่าระบบได้รับการประเมินอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด โดยเฉพาะด้านความสะดวกในการใช้งาน ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ และความเหมาะสมต่อการใช้งานในบริบทชุมชน ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนว่าระบบสามารถสนับสนุนการสื่อสารเชิงออกแบบ ลดความคลาดเคลื่อนจากการตีความรูปแบบผลิตภัณฑ์ และส่งเสริมการตัดสินใจร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด User-Centered Design และ Participatory Design ที่มุ่งเน้นการออกแบบโดยคำนึงถึงประสบการณ์และการมีส่วนร่วมของผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง ระบบนี้เปลี่ยนบทบาทคนในชุมชนจาก 'ผู้รับชม' มาเป็นผู้ร่วมตัดสินใจ (Active Co-designer) โดยการหมุนสำรวจมิติได้ด้วยตนเองช่วยลดกำแพงด้านการอ่านแบบและสร้างความรู้สึกเป็นเจ้าของ (Sense of Ownership) ในผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาร่วมกัน

เมื่ออภิปรายผลเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า พบว่างานด้าน Web-based 3D Visualization [1–10] ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาเชิงเทคนิคของระบบแสดงผล ขณะที่งานด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน [12], [13], [14] มุ่งเน้นกระบวนการมีส่วนร่วมและการออกแบบผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งผลการวิจัยนี้ช่วยยืนยันว่าการรักษาสมดุลของค่า FPS และเวลาโหลด เป็นปัจจัยวิกฤตที่สอดคล้องกับแนวคิดของ Gurvich และ Geller [10] ในการสร้างประสบการณ์ผู้ใช้บนเว็บ งานวิจัยนี้จึงมีคุณูปการในเชิงการบูรณาการทั้งสองแนวทางเข้าด้วยกัน โดยนำเทคโนโลยีการแสดงผลสามมิติบนเว็บมาปรับใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนอย่างเป็นระบบ

โดยเฉพาะในด้านการกำหนดแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมทรัพยากรจำกัด การรักษาเสถียรภาพของอัตราเฟรม และการประเมินผลทั้งเชิงเทคนิคและเชิงการใช้งานอย่างเป็นระบบ ซึ่งช่วยยืนยันศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการสนับสนุนกระบวนการออกแบบเชิงมีส่วนร่วมในระดับชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) ที่ยอมรับข้อจำกัดด้านเครือข่ายในพื้นที่ห่างไกล เพื่อลดความเหลื่อมล้ำทางดิจิทัลและสร้างมาตรฐานการสื่อสารที่เท่าเทียมระหว่างนักออกแบบและชุมชน

7. ข้อจำกัดของการวิจัย

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ประการแรก ประสิทธิภาพของระบบอาจได้รับผลกระทบจากความเร็วของเครือข่ายและสมรรถนะของอุปกรณ์ผู้ใช้ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้งานผ่านเครือข่ายไร้สายหรืออุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

ประการที่สอง การทดลองใช้งานดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างในบริบทชุมชนเฉพาะพื้นที่ ซึ่งอาจมีลักษณะทางสังคมและเทคโนโลยีแตกต่างจากบริบทอื่น จึงอาจจำกัดการสรุปผลทั่วไปไปยังบริบทที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางดิจิทัลแตกต่างกัน

ประการสุดท้าย การประเมินผลในงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์เชิงพรรณนาโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งสะท้อนแนวโน้มโดยรวมของความคิดเห็นผู้ใช้และผู้เชี่ยวชาญ แต่ยังไม่ได้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบหรือเชิงอนุมานทางสถิติในระดับลึก

8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่าการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติสามารถสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ควรศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับระดับรายละเอียดของโมเดล (Level of Detail: LOD) หรือแนวทาง Adaptive Rendering เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแสดงผลในอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะต่างระดับกัน

นอกจากนี้ ควรขยายการทดลองใช้งานไปยังบริบทชุมชนที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีแตกต่างกัน รวมทั้งพิจารณาการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมานทางสถิติเพื่อยืนยันความแตกต่างหรือความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในเชิงการพัฒนาเชิงระบบ อาจพิจารณาการบูรณาการเทคโนโลยีเพิ่มเติม เช่น ระบบแสดงความคิดเห็นแบบเรียลไทม์ การบันทึกประวัติการปรับแก้โมเดล หรือการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์ชุมชน เพื่อสร้างแพลตฟอร์มสนับสนุนการออกแบบร่วมที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

9. เอกสารอ้างอิง

[1] F. N. Kocer Ozgun, "Web browsers as a 3D visualization environment," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 15, no. 3, pp. 251–259, Jul. 2022, doi: 10.17671/gazibtd.1072993.

[2] A. Smelov, "Integration of interactive 3D models into React-based application," B.Eng. thesis, Automation Engineering, Seinäjoki University of Applied Sciences, Seinäjoki, Finland, 2024. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/handle/10024/850556

[3] M. La Guardia and M. Koeva, "Towards digital twinning on the web: Heterogeneous 3D data fusion based on open-source structure," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 3, Jan. 2023, Art. no. 721, doi: 10.3390/rs15030721.

[4] อรรคพล ล่าม่วง, "การพัฒนากรอบแนวคิดการออกแบบตราสัญลักษณ์ชุมชนเชิงมีส่วนร่วม," *วารสารสาระศาสตร์*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 1016–1027, พ.ย.–ธ.ค., 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://so05.tci-thaijo.org/index.php/sarasatr/article/view/283765

[5] ประภาพร ยางประยงค์, "การออกแบบฉลากและบรรจุภัณฑ์สำหรับวิสาหกิจชุมชน: กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสมุนไพร ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา," ใน *รายงานการประชุมวิชาการการพัฒนาชุมชน ท้องถิ่นและสังคมระดับชาติ (CSD สัมพันธ์) ครั้งที่ 21*, มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, 1–4 ก.พ. 2566, หน้า 53–63. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://ird.skru.ac.th/RMS/file/40015.pdf

[6] กษมา สุรเดชา, อนุ ธัชยะพงษ์ และ กันยา มั่นคง, "การออกแบบตราสินค้าและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์กล้วยอบเนย ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนหมู่สวรรค์หมู่ไทยศรีโยธิน," *วารสารพิกุล*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 219–237, ม.ค.–มิ.ย. 2563. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://research.kpru.ac.th/research2/pages/filere/1600498880.pdf

[7] E. Ülker, A. Turanboy, İ. Uysal, and G. R. Arık, "Development of a web-based 3D visualization tool that can be used in geoscience studies," *Revista Minelor - Mining Revue,* vol. 31, no. 2, pp. 44–55, Jun. 2025, doi: 10.2478/minrv-2025-0017.

[8] M. de J. Gutierrez-Sanchez, J.-C. Gonzalez-Islas, A. Franco-Arcega, A. Suarez-Navarrete, J. G. Robles-Guzman, and G. A. Torres-Samperio, "Web-based interactive 3D modeling and visualization of the human brain towards anatomy education," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 45, no. 3, pp. 80–98, Nov. 2024, doi: 10.17488/RMIB.45.3.5.

[9] J. Wang, Z. Xu, and Y. Li, "A webGL-based interactive visualization framework for large-scale urban seismic simulations with a dual multi-LOD strategy," *Buildings*, vol. 15, no. 16, Aug. 2025, Art. no. 2916, doi: 10.3390/buildings15162916.

[10] A. B. Gurvich and A. M. Geller, "Firefly: A browser-based interactive 3D data visualization tool for millions of data points," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 265, no. 2, Mar. 2023, Art. no. 38, doi: 10.3847/1538-4365/acb59f.

[11] L. M. Anghelută, A. I. Popovici, and L. C. Ratoiu, "A web-based platform for 3D visualization of multimodal imaging data in cultural heritage asset documentation," *Heritage*, vol. 6, no. 12, pp. 7381–7399, Dec. 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/heritage6120387

[12] ณัฐอร มหาทำนุโชค และ โสภาพร กล่ำสกุล, "การออกแบบบรรจุภัณฑ์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจากผ้าทอมือพื้นเมืองบ้านท่าโล้ อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี," *วารสาร มจร การพัฒนาสังคม*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, หน้า 169–178, ก.ย.-ธ.ค. 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://so06.tci-thaijo.org/index.php/JMSD/article/view/272337

[13] ชลิดา ชาญวิจิตร และ โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์, "ปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ," *วารสารข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการไทย*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 60–66, ม.ค.–มิ.ย. 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ienj/article/view/249982/170845

[14] J. R. Onyimbi, M. Koeva, and J. Flacke, "Public participation using 3D web-based city models: Opportunities for e-participation in Kisumu, Kenya," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, no. 12, Nov. 2018, Art. no. 454, doi: 10.3390/ijgi7120454.