การเปรียบเทียบต้นทุนก่อสร้างบ้านพักอาศัยขนาดเล็กระหว่างระบบคอนกรีตพิมพ์สามมิติกับระบบก่อสร้างทั่วไปในประเทศไทย

ภณ วชิระนิเวศ[1] สุวิชชา เบญจพร[1*] บุญชัย โรจน์พานิช[2]

[1] ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[2] บริษัท ควอลิตี้ ลิฟวิ่ง แมเนจเม้นท์ จำกัด

E-mail: suwichab@nu.ac.th*

รับเมื่อ: 19 มิถุนายน 2569
แก้ไขเมื่อ: 30 มิถุนายน 2569
ตอบรับเมื่อ: 30 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้เชิงต้นทุนของการประยุกต์ใช้ระบบคอนกรีตพิมพ์สามมิติ หรือ 3D Concrete Printing (3DCP) สำหรับบ้านพักอาศัยขนาดเล็กในประเทศไทย โดยเลือกกรณีศึกษาจากแบบบ้านมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 2 แบบ ได้แก่ 1) บ้านผู้ประสบภัย 1 พื้นที่ใช้สอย 36 ตารางเมตร และ 2) บ้านแบบประหยัด 2 พื้นที่ใช้สอย 77 ตารางเมตร ราคาค่าก่อสร้างโดยสังเขปของระบบก่อสร้างทั่วไปอ้างอิงจากข้อมูลของกรมโยธาธิการและผังเมือง ส่วนการประเมินต้นทุนระบบ 3DCP ใช้กรอบแนวคิดการคำนวณต้นทุนของการก่อสร้างด้วย 3D Printing โดยพิจารณาระบบ 3DCP แบบผนังรับน้ำหนัก ซึ่งสามารถทดแทนกลุ่มงานผนัง งานฉาบ เสา–คานบางส่วน และแบบหล่อบางส่วน แต่ยังคงต้องมีฐานรากหรือเสาเข็ม งานพื้น หลังคา งานระบบ และงานตกแต่ง

ผลการศึกษาพบว่า กรณีผลิตเพียง 1 หลัง ระบบ 3DCP มีต้นทุนสูงกว่าระบบก่อสร้างทั่วไปมาก โดยบ้านขนาด 36 ตารางเมตรมีต้นทุนสูงกว่าประมาณร้อยละ 15.54 – 17.54 และบ้านขนาด 77 ตารางเมตรสูงกว่าประมาณร้อยละ 10.70 – 11.68 ทั้งนี้เป็นผลจากต้นทุนคงที่ของระบบ 3DCP อย่างไรก็ตาม เมื่อจำลองกรณีผลิตซ้ำ 10 หลัง พบว่าต้นทุนต่อหน่วยของระบบ 3DCP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยบ้านขนาด 36 ตารางเมตรมีต้นทุนสูงกว่าระบบทั่วไปร้อยละ 1.54 – 1.63 ส่วนบ้านขนาด 77 ตารางเมตรมีต้นทุนสูงกว่าระบบทั่วไปประมาณร้อยละ 0.86 – 0.94 และยังมีสัดส่วนลดลงหากผลิตซ้ำ 20 หลัง ทั้งนี้ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า 3DCP ยังไม่เหมาะสมเชิงต้นทุนสำหรับบ้านเดี่ยวขนาดเล็กเพียง 1 หลัง แต่มีศักยภาพสำหรับโครงการที่ใช้แบบซ้ำหลายหน่วย เช่น บ้านผู้ประสบภัย บ้านราคาประหยัด หรือที่อยู่อาศัยชุมชน ทั้งนี้อาจมีความแตกต่างตามรูปแบบอาคารและวัสดุที่ 3DCP สามารถทดแทนได้

คำสำคัญ: คอนกรีตพิมพ์สามมิติ ต้นทุนก่อสร้าง ระยะเวลาก่อสร้าง บ้านพักอาศัยขนาดเล็ก ประเทศไทย

A comparison of the cost and construction time of small residential houses using 3D-printed concrete systems versus conventional construction methods in Thailand

Pon Vajiranivesa[1], Suwicha Benjaporn[1*] and Boonchai Rojpanich[2]

[1] Department of Architecture, Faculty of Architecture, Art and Design, Naresuan University

[2] Quality Living Management Company Limited

E-mail: suwichab@nu.ac.th*

Received: 19 June 2026
Revised: 30 June 2026
Accepted: 30 June 2026

Abstract

This study aims to evaluate the cost feasibility of applying three-dimensional concrete printing (3D Concrete Printing: 3DCP) to small residential houses in Thailand. Two standard house designs developed by the Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT) were selected as case studies: 1) Disaster Relief House Type 1, with a usable area of 36 m², and 2) Low-Cost House Type 2, with a usable area of 77 m². The estimated construction costs of the conventional construction system were based on cost data provided by the DPT. The cost assessment of the 3DCP system was conducted using a cost calculation framework for three-dimensional construction printing. The analysis focused on a load-bearing-wall 3DCP system, which can potentially replace wall construction, plastering, some columns and beams, and part of the formwork. However, foundations or piles, floor systems, roof systems, building services, and finishing works remain necessary.

The findings indicate that, in the case of producing only one house, the 3DCP system incurs substantially higher costs than the conventional construction system. For the 36 m² house, the cost is approximately 15.54–17.54% higher, while for the 77 m² house, it is approximately 10.70–11.68% higher. This is mainly attributable to the fixed costs associated with the 3DCP system. However, when a repeated-production scenario of ten houses was simulated, the unit cost of the 3DCP system decreased significantly. Under this scenario, the cost of the 36 m² house was only approximately 1.54–1.63% higher than that of the conventional system, while the cost of the 77 m² house was approximately 0.86–0.94% higher. The cost difference would further decrease if production were repeated for twenty houses. Overall, the findings suggest that 3DCP is not yet cost-effective for the construction of a single small detached house. Nevertheless, it demonstrates potential for projects involving repeated standardized designs, such as disaster relief housing, low-cost housing, or community housing. However, the cost feasibility may vary depending on building typology and the extent to which 3DCP can replace conventional construction materials and processes.

Keywords: 3D concrete printing, Construction cost, Construction time, Small house, Thailand

1. บทนำ

แนวคิดการพิมพ์อาคารด้วยคอนกรีตสามมิติเป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนผ่านอุตสาหกรรมก่อสร้างไปสู่ระบบดิจิทัลและระบบอัตโนมัติ เครื่องพิมพ์ 3DCP (Three-dimensional concrete printing) ทำงานโดยใช้หัวฉีดหรือหัวพิมพ์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อปล่อยวัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตชนิดพิเศษออกมาเป็นเส้นต่อเนื่องแล้ววางซ้อนกันทีละชั้นตามแบบจำลองดิจิทัล กระบวนการนี้แตกต่างจากงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไปที่ต้องใช้แบบหล่อเหล็กเสริม งานช่างฝีมือ และขั้นตอนหน้างานจำนวนมาก งานทบทวนของ Lyu และคณะ [1] อธิบายว่า 3D Concrete Printing ได้รับความสนใจมากขึ้นเพราะสอดคล้องกับแนวโน้ม การก่อสร้างอัจฉริยะ (Smart construction) ที่ต้องการความเป็นดิจิทัล ระบบอัตโนมัติ และการควบคุมคุณภาพที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ประวัติของ 3DCP ไม่ได้เริ่มจากการพิมพ์บ้านสำเร็จรูปทันที แต่เริ่มจากคำถามพื้นฐานว่า “จะสร้างวัตถุขนาดใหญ่โดยการเพิ่มวัสดุทีละชั้นได้หรือไม่” ก่อนจะพัฒนาสู่ระบบหุ่นยนต์ขนาดใหญ่ที่สามารถพิมพ์ผนังอาคาร หรือชิ้นส่วนสถาปัตยกรรมจริงได้

ในปี 1997 Joseph Pegna [2] ได้นำเสนอแนวคิด Solid freeform construction โดยการสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ด้วยกระบวนการเพิ่มวัสดุทีละชั้น แทนการประกอบชิ้นส่วนขนาดใหญ่จำนวนมาก แนวคิดดังกล่าวมีความสำคัญเพราะเปลี่ยนมุมมองของงานก่อสร้างจาก “การประกอบ” ไปสู่ “การผลิตโดยตรงจากข้อมูลดิจิทัล” Pegna เสนอว่ากระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: AM) สามารถลดความซับซ้อนของงานประกอบในงานก่อสร้าง โดยใช้หน่วยปฏิบัติการเล็ก ๆ ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่า แนวคิดนี้ยังไม่ใช่ 3DCP ในรูปแบบเครื่องพิมพ์คอนกรีตเชิงพาณิชย์ แต่เป็นรากฐานทางทฤษฎีที่ทำให้เกิดคำถามใหม่ว่า ถ้าเครื่องจักรสามารถพิมพ์ชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ เหตุใดจึงไม่สามารถพิมพ์อาคารหรือผนังได้

หลังจากแนวคิด Solid freeform construction ในช่วงปลายทศวรรษ 1990 เทคโนโลยีที่ถือว่าเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของการพิมพ์อาคารคือ Contour crafting ซึ่งพัฒนาโดย Behrokh Khoshnevis [3] แห่ง University of Southern California ได้เสนอแนวคิด Contour crafting ในปลายทศวรรษที่ 1990 และได้รับการพัฒนาอย่างเป็นระบบในช่วงต้นทศวรรษ 2000 งานวิจัยปี 2004 ของ Khoshnevis อธิบายว่า Contour crafting เป็นเทคโนโลยี Layered fabrication ที่มีศักยภาพในการก่อสร้างโครงสร้างทั้งหลังหรือชิ้นส่วนอาคารโดยอัตโนมัติ จุดเด่นของ Contour crafting คือการใช้หัวฉีดร่วมกับเครื่องมือปาดผิวหรือ Trowel เพื่อควบคุมรูปทรงและคุณภาพผิวของวัสดุที่ถูกอัดออกมาเป็นชั้น ๆ ระบบนี้ใช้การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างพื้นผิวเรียบและรูปทรงอิสระ โดยมีข้อได้เปรียบด้านคุณภาพผิว ความเร็ว และความหลากหลายของวัสดุเมื่อเทียบกับกระบวนการ Layered fabrication บางประเภท [4]

Contour crafting ได้เสนอภาพอนาคตของ “การก่อสร้างอัตโนมัติทั้งระบบ” เช่น การฝังระบบไฟฟ้า ประปา หรือองค์ประกอบอาคารระหว่างกระบวนการพิมพ์ ทำให้โลกวิชาการและอุตสาหกรรมเริ่มเห็นว่า 3D Printing ไม่ได้จำกัดอยู่ในห้องแล็บหรือโรงงานผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กอีกต่อไป

งานวิจัยด้านการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุในระดับงานก่อสร้าง (Construction-scale additive manufacturing) เริ่มขยายตัวมากขึ้น โดยเฉพาะในยุโรป งานของ Lim, Buswell และคณะ [5] อธิบายว่าการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุในงานก่อสร้างเริ่มเปลี่ยนจากเครื่องมือสร้างแบบจำลองสถาปัตยกรรมไปสู่การผลิตชิ้นส่วนอาคารจริง เช่น ผนัง Façade และองค์ประกอบอาคารขนาดใหญ่ โดยงานดังกล่าวให้ความสำคัญกับกระบวนการ Concrete Printing ซึ่งเป็นระบบอัดรีดวัสดุแบบอัตโนมัติ ในระยะนี้ คำว่า 3DCP เริ่มมีความหมายเฉพาะมากขึ้น ไม่ใช่เพียงการพิมพ์รูปทรงด้วยวัสดุใดก็ได้ แต่หมายถึงกระบวนการที่ต้องควบคุมวัสดุซีเมนต์ให้มีคุณสมบัติพิเศษพร้อมกันหลายด้าน ได้แก่ ต้องปั๊มได้ ต้องอัดรีดได้ ต้องตั้ง

รูปได้ ต้องรับน้ำหนักชั้นถัดไปได้ และต้องมีเวลาทำงานเพียงพอก่อนแข็งตัว งานทบทวนสมัยใหม่จึงมักอธิบายว่า 3DCP เป็นเทคโนโลยีที่อยู่กึ่งกลางระหว่างวัสดุศาสตร์ วิศวกรรมโครงสร้าง หุ่นยนต์ และสถาปัตยกรรมดิจิทัล [1]

ช่วงทศวรรษ 2010 เป็นช่วงที่ 3DCP เริ่มออกจากแล็บสู่พื้นที่ข่าวสาธารณะและการใช้งานเชิงพาณิชย์ โดยในปี 2014 บริษัท WinSun decoration design engineering Co.,Ltd พิมพ์บ้านด้วยวัสดุผสมคอนกรีต "ที่ผลิตขึ้นบางส่วนจากเศษวัสดุก่อสร้าง เศษวัสดุอุตสาหกรรม และกากแร่ที่นำกลับมาใช้ใหม่" โดยบ้านแต่ละหลังมีราคาไม่ถึง 5000 เหรียญ หรือประมาณ 163,750 บาท (คิดที่ค่าเฉลี่ย 1 ดอลล่าสหรัฐ = 32.75 บาท ในปี 2014) [6] กรณี WinSun ทำให้สังคมโลกเริ่มสนใจ 3D Printed Building อย่างกว้างขวาง แต่อาคารของ WinSun ใช้วิธีพิมพ์ชิ้นส่วนหรือผนังแยก แล้วนำมาประกอบหน้างาน ยังไม่ใช่การพิมพ์บ้านทั้งหลังในที่ตั้งโดยตรง [7]

ในปี 2017 บริษัท Apis Cor ได้รับความสนใจอย่างมากจากโครงการบ้านพิมพ์สามมิติในรัสเซีย โดยมีรายงานว่าใช้เครื่องพิมพ์แบบ Mobile printer พิมพ์ผนังและ Envelope ของบ้านขนาดประมาณ 400 ตารางฟุต (37.16 ตารางเมตร) ภายในเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ขณะที่งานหลังคา ฉนวน งานระบบ และงานตกแต่งยังต้องใช้แรงงานมนุษย์ดำเนินการภายหลัง [8] ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนภาพจำของ 3DCP จากการพิมพ์ชิ้นส่วนในโรงงานแล้วนำไปประกอบ แต่เป็นการใช้เครื่องพิมพ์เคลื่อนที่พิมพ์โครงสร้างบางส่วน ณ สถานที่ก่อสร้างจริง โดยใช้วัสดุคอนกรีตสูตรพิเศษ

ในปีเดียวกัน โครงการ The BOD ในเดนมาร์ก ซึ่งบริษัท COBOD ผู้ให้บริการ 3DCP ระบุว่าเป็นอาคาร 3D printed แห่งแรกของยุโรป โดยใช้เวลาพิมพ์ 2 เดือน ต่อมาในปี 2019 บริษัท COBOD พิมพ์อาคารเดิมซ้ำด้วยเครื่องรุ่นใหม่ และสามารถลดเวลาการพิมพ์เหลือ 28 ชั่วโมงในช่วง 3 วัน สะท้อนโค้งการเรียนรู้ (Learning curve) และการพัฒนาเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว

นอกจากความเร็วแล้ว The BOD ยังเข้าสู่ระบบอาคารจริงในยุโรป ซึ่งมีกรอบควบคุมคุณภาพและข้อกำหนดอาคารค่อนข้างเข้มงวด เครื่องพิมพ์ของบริษัท COBOD ยังถูกใช้ในโครงการหลากหลายประเทศ เช่น อาคาร 3D printed ที่ใหญ่ที่สุดในยุโรปที่ตั้งอยู่ที่รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา รวมถึงอาคารสองและสามชั้นในยุโรปและอเมริกาเหนือ อาคารในดูไบ แอฟริกา และฐานกังหันลม [9] แสดงให้เห็นว่า 3DCP เริ่มเคลื่อนจาก "สาธิตว่าทำได้" ไปสู่ "ทำซ้ำได้ ปรับปรุงประสิทธิภาพได้ และขยายตลาดได้" ซึ่งเป็นจุดต่างสำคัญระหว่างเทคโนโลยีโชว์กับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ในสหรัฐอเมริกา บริษัท ICON และองค์กรไม่แสวงกำไร New story เป็นกรณีสำคัญในเชิงที่อยู่อาศัยราคาย่อมเยา โดยมีรายงานการเปิดตัวบ้านต้นแบบ 3D printed ในเมืองออสติน รัฐเท็กซัส ช่วงปี 2018 เพื่อทดลองแนวทางการสร้างบ้านสำหรับชุมชนรายได้น้อยและพื้นที่ขาดแคลนที่อยู่อาศัย [10] กรณีนี้มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนภาพลักษณ์ 3DCP จาก "เทคโนโลยีแปลกใหม่" ไปสู่ "เครื่องมือแก้ปัญหาที่อยู่อาศัย" เพราะโครงการมุ่งเน้นประเด็นต้นทุน ความเร็ว การลดของเสีย และความสามารถในการก่อสร้างในพื้นที่ที่ทรัพยากรจำกัด

ปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยเผชิญปัญหาต้นทุนแรงงาน ความผันผวนของราคาวัสดุ ระยะเวลาก่อสร้างที่ยืดเยื้อ คุณภาพงานที่ขึ้นกับฝีมือแรงงาน และของเสียจากงานแบบหล่อและงานฉาบ การนำเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ หรือ 3DCP มาใช้จึงได้รับความสนใจในฐานะทางเลือกที่อาจลดเวลา ลดแรงงาน และสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนได้โดยไม่ต้องพึ่งแบบหล่อจำนวนมาก [11, 12]

ในระดับสากล มีงานวิจัยเปรียบเทียบ 3DCP กับระบบก่อสร้างทั่วไปหลายมิติ เช่น ต้นทุนวัสดุ ต้นทุนรวม ระยะเวลา โลจิสติกส์ห่วงโซ่อุปทาน (Logistics supply chain) และผลกระทบสิ่งแวดล้อม งานของ Khajavi et al. [12] พบว่า 3DCP มีความสามารถในการแข่งขันด้านต้นทุนและเวลา โดยเฉพาะใน

กรณีรูปทรงโค้งหรือซับซ้อน ส่วน Yang et al. [13] เสนอวิธีคำนวณต้นทุน 3D printing construction โดยแยกระบบในสถานที่และนอกสถานที่ (On-site & off-site) ซึ่งแตกต่างจากการคิดต้นทุนก่อสร้างเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การนำผลการศึกษาเหล่านี้มาใช้กับประเทศไทยโดยตรงอาจคลาดเคลื่อน เพราะตลาดก่อสร้างไทยมีค่าแรง โครงสร้างราคา วัสดุท้องถิ่น ระบบผู้รับเหมา และวิธีขออนุญาตก่อสร้างต่างจากประเทศต้นทาง การศึกษานี้จึงมุ่งเสนอกรอบเปรียบเทียบที่เหมาะกับบ้านพักอาศัยขนาดเล็กในไทย โดยเน้นการวิเคราะห์ต้นทุนและเวลาที่เกิดขึ้นจริงตลอดกระบวนการ ไม่ใช่เปรียบเทียบเฉพาะราคาคอนกรีตหรือเวลาพิมพ์ผนังเท่านั้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อสังเคราะห์องค์ประกอบต้นทุนและระยะเวลาของระบบ 3DCP และระบบก่อสร้างทั่วไปสำหรับบ้านพักอาศัยขนาดเล็ก

2.2 เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ทำให้ 3DCP ได้เปรียบหรือเสียเปรียบในบริบทประเทศไทย

2.3 เพื่อเสนอกรอบการวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับโครงการนำร่องบ้าน 3DCP ขนาด 36 - 77 ตารางเมตรในประเทศไทย

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงเอกสารร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ โดยรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับต้นทุนและระยะเวลาของ 3DCP และระบบก่อสร้างทั่วไป จากนั้นสังเคราะห์ตัวแปรที่เหมาะกับประเทศไทย การวิเคราะห์ใช้กรอบการคิดต้นทุนตามกิจกรรม (Activity-based Costing) และ การจัดทำแผนผังกระบวนการก่อสร้าง (Construction Process Mapping) แบ่งต้นทุนออกเป็น 8 กลุ่ม ได้แก่ 1) งานออกแบบและแบบจำลองดิจิทัล 2) วัสดุ 3) แรงงาน 4) เครื่องจักรและเครื่องมือ 5) การขนส่งและ Mobilization 6) งานเตรียมหน้างานและ Temporary works 7) ของเสียและการจัดการเศษวัสดุ และ 8) ความเสี่ยง/ค่าเผื่อจากเทคโนโลยีใหม่

4. ทบทวนวรรณกรรม

4.1 ลักษณะต้นทุนของ 3D Concrete Printing

Yang et al. [13] เสนอว่าวิธีคิดต้นทุนค่าก่อสร้างของ 3D printing ไม่สามารถใช้สูตรเดียวกับก่อสร้างทั่วไปทั้งหมด เพราะ 3DCP มีลักษณะเป็นทั้งกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมและกระบวนการก่อสร้าง ต้นทุนจึงรวมทั้งค่าเครื่องพิมพ์ ค่าซอฟต์แวร์ ค่าเตรียมไฟล์พิมพ์ ค่าวัสดุเฉพาะทาง และค่าขนส่ง หากเป็นการผลิตแบบนอกสถานที่ (Off-site) ต้องแยกต้นทุน (On-site/off-site) และคิดต้นทุนเครื่องจักร วัสดุและกระบวนการผลิตเฉพาะทาง Khajavi et al. [12] เปรียบเทียบ 3DCP กับการก่อสร้างแบบดั้งเดิมในหลายสถานการณ์ พบว่า 3DCP มีความสามารถในการแข่งขันด้านต้นทุนและเวลา เมื่อการออกแบบใช้ศักยภาพของ AM โดยเฉพาะรูปทรงโค้งหรือรูปทรงซับซ้อนที่ระบบเดิมต้องใช้แบบหล่อมาก ส่วนแบบอาคารสี่เหลี่ยมธรรมดาทำให้ข้อได้เปรียบของ 3DCP ลดลง Allouzi et al. [14] เปรียบเทียบต้นทุนวัสดุของระบบก่อสร้างทั่วไปกับ 3D printing ในกรณีศึกษาประเทศจอร์แดน และเสนอว่าการลดปริมาณวัสดุและแบบหล่อสามารถทำให้ต้นทุนบางรายการลดลงได้ ขณะที่งานของ Besklubova et al. [15] ชี้ให้เห็นว่าต้นทุน 3D printing ต้องมองตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ถึงการกำจัดของเสีย หรือมองตลอด Lifecycle เพราะต้นทุนบางช่วง เช่น R&D และ Design อาจสูงกว่าระบบเดิมมาก แม้ช่วงก่อสร้างอาจถูกลง

4.2 ระยะเวลาก่อสร้างและ productivity

3DCP มักถูกนำเสนอว่าสามารถลดระยะเวลางานผนังได้เพราะพิมพ์วัสดุทีละชั้นต่อเนื่อง ลดงานแบบหล่อ ลดการรอช่างหลายชุด และลดขั้นตอนฉาบบางส่วน แต่ระยะเวลารวมของโครงการยังขึ้นกับงานอื่นที่เครื่องพิมพ์ไม่ได้ทำ เช่น ฐานราก หลังคา งานระบบไฟฟ้า-สุขาภิบาล งานประตูหน้าต่าง งานกันซึม งานพื้น และการตรวจรับ ดังนั้น การเปรียบเทียบเวลาที่เป็นธรรมต้องแยกระหว่าง “เวลาพิมพ์ผนัง”

กับ “ระยะเวลาก่อสร้างรวม” หากนับเฉพาะงานผนัง 3DCP อาจดูเร็วกว่ามาก แต่หากรวม การเตรียมการออกแบบ (Design preparation) การเตรียมเครื่องพิมพ์ (Printer mobilization) การทดลองผสม (Trial mix) การพิมพ์ทดสอบ (Test print) การบ่มคอนกรีต (Curing) และงานระบบภายหลัง ข้อได้เปรียบอาจลดลง โดยเฉพาะโครงการบ้านหลังเดียวที่ไม่ใช่ขนาดปกติทั่วไป [15]

5. กรอบการเปรียบเทียบสำหรับประเทศไทย

เนื่องจากระบบ 3DCP ยังไม่เหมาะกับอาคารขนาดใหญ่หรือสูงมาก ด้วยเหตุผลด้านความแข็งแรง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบกับบ้านพักอาศัยขนาดเล็กในประเทศไทย โดยอ้างอิงข้อมูลขนาดจากเว็บไซต์ “แบบแปลนเพื่อประชาชน” ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย [16] โดยบ้านขนาดเล็กมีพื้นที่ใช้สอยอยู่ระหว่าง 36 - 77 ตารางเมตร โครงสร้างหลักเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ผนังก่ออิฐมวลเบาหรืออิฐมอญฉาบปูน หลังคาโครงเหล็ก งานระบบแยกติดตั้งภายหลัง ระบบนี้มี Supply chain พร้อม ผู้รับเหมาที่คุ้นเคยการก่อสร้าง วัสดุหาได้ง่าย และต้นทุนแรงงานยังต่ำกว่าประเทศพัฒนาแล้วบางประเทศ ซึ่งการเลือกบ้านขนาดเล็ก จะทำให้เห็นจุดเริ่มต้นของขนาดที่คุ้มทุนสำหรับ 3DCP ดังนั้นเราจะมอง 3DCP เพียงแค่การก่อสร้างที่รวดเร็วตอนขึ้นรูป และความได้เปรียบด้านรูปทรงอาคารไม่ได้

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบองค์ประกอบต้นทุนระหว่างระบบก่อสร้างทั่วไปกับ 3DCP สำหรับบ้านขนาดเล็กในไทย

หมวด	ระบบก่อสร้างทั่วไป	ระบบ 3DCP	ข้อสังเกต
งานออกแบบ	แบบ 2D/3D ทั่วไป และรายการคำนวณปกติ	ต้องมี BIM/3D model, Slicing, Toolpath และ Simulation	ต้นทุนด้านงานออกแบบ 3DCP สูงกว่าระบบก่อสร้างทั่วไป
วัสดุผนัง	อิฐมวลเบา/อิฐมอญ ปูนฉาบ เหล็กเสริม	Printable mortar/concrete และ Admixture สูตรเฉพาะ	วัสดุพิมพ์อาจแพงกว่าและต้องควบคุมคุณภาพมากกว่า
แรงงาน	ใช้ช่างก่อ ฉาบ ผูกเหล็ก คนควบคุมงาน	ลดช่างก่อผนัง แต่เพิ่ม Operator และ Technician	ประหยัดแรงงานได้เมื่อมีปริมาณมาก
เครื่องจักร	เครื่องมือทั่วไป นั่งร้าน แบบหล่อคอนกรีตโครงสร้าง	เครื่องพิมพ์ ปั๊ม ระบบผสม เซนเซอร์ และไฟฟ้า	ค่า Mobilization สูงสำหรับบ้าน 1 หลัง
เวลา	มีการทำงานหลายขั้นตอน ความเร็วขึ้นกับฝีมือแรงงานและการวางแผนของช่าง	งานผนังเร็ว แต่ต้องเตรียมระบบพิมพ์และทดสอบ	เวลารวมอาจไม่ลดมาก หากงานระบบยังตามหลัง
ของเสีย	เศษอิฐ ปูนฉาบ แบบหล่อ และงานแก้ไข	ลดเศษวัสดุผนังและแบบหล่อ	ระบบ 3DCP ต้องรวมของเสียจาก Trial print และ Cleaning ด้วย
ความเสี่ยง	ความเสี่ยงทั่วไป ควบคุมด้วยประสบการณ์ผู้รับเหมา	ความเสี่ยงจากเทคโนโลยีใหม่ มาตรฐาน และการซ่อมบำรุง	ระบบ 3DCP ควรมีค่าเผื่อเหตุฉุกเฉิน (Contingency) เพิ่มเติมในระยะเริ่มต้น

6. แบบจำลองการประเมินต้นทุน

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า แบบจำลองต้นทุนของ Yang et. al [13] มีความครบถ้วนเหมาะจะนำมาใช้คำนวณมากที่สุด จากแนวคิดที่ว่า 3DCP มีลักษณะเป็นทั้ง ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Industrial product) และ ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง (Construction product) ดังนั้นจึงไม่ควรคำนวณเหมือนงานก่อสร้างทั่วไป

โดย Yang เสนอสมการดังนี้

ต้นทุนผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

Cost of industrial product = material cost + labor cost + manufacturing cost

ต้นทุนผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง

Cost of construction product = equipment cost + construction installation cost + construction cost (other cost) + reserve + interest

ต้นทุนติดตั้งก่อสร้าง แบบแยกตามองค์ประกอบต้นทุน

Construction installation cost = labor cost + material cost + equipment cost + management cost + interest + charges + taxes

ดังนั้นหากเรานำสมการมาแยกตามการวิเคราะห์ข้างต้นก่อนหน้า โดยแยกระหว่างการก่อสร้างทั่วไป กับ 3DCP จะได้ว่า

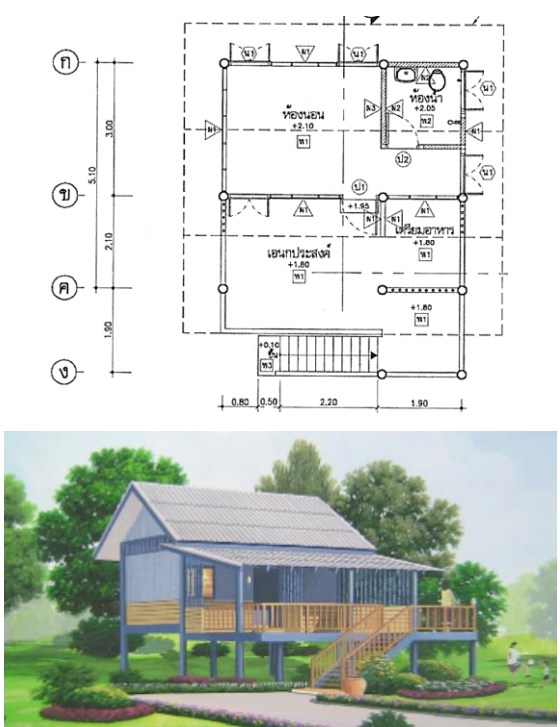
ระบบทั่วไป

$$C_{CONV} = C_{design} + (\boldsymbol{C_{foundation}+C_{column}+C_{beam}+C_{floor}+C_{wall}+C_{roof}+C_{MEP}+C_{finish}}) + C_{labor} + \boldsymbol{C_{equipment}} + \boldsymbol{C_{formwork}} + C_{waste} + C_{risk}$$

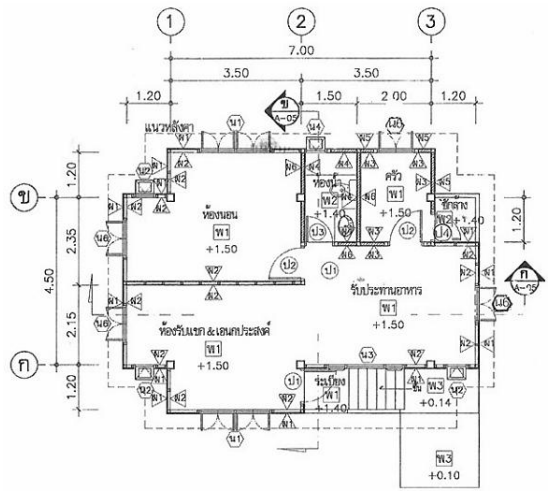
ระบบ 3DCP แบบผนังรับน้ำหนัก

$$C_{3DCP} = C_{design} + (\boldsymbol{C_{foundation} + C_{printed_wall} + C_{rebar/grout} + C_{ring_beam/lintel} + C_{floor} + C_{roof} + C_{MEP} + C_{finish}}) + C_{labor} + \boldsymbol{C_{machine}} + \boldsymbol{C_{mobilization}} + \boldsymbol{C_{QC}} + C_{waste} + C_{risk}$$

จะเห็นได้ว่าในวงเล็บ คือตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคาร ซึ่งจะแตกต่างกันที่การก่อสร้างปกติ จะเป็นระบบเสา-คาน แต่ระบบ 3DCP จะไม่มีเสาคาน เป็นระบบผนังรับน้ำหนัก อาจมีการเสริมเหล็กเป็นช่วง ๆ ได้ นอกจากนี้ ในสมการยังมีตัวแปรที่แตกต่างกันอีก งานก่อสร้างทั่วไปจะมีค่า อุปกรณ์ (Equipment) และค่าไม้แบบ (Formwork) ส่วนงาน 3DCP จะมีค่า เครื่องจักร (Machine) ค่าขนย้าย (Mobilization) และค่าการตรวจควบคุมคุณภาพ (QC) ในงานวิจัยนี้ใช้ ต้นแบบ “บ้านผู้ประสบภัย 1” พื้นที่ใช้สอย 36 ตร.ม. และ “บ้านแบบประหยัด 2 พื้นที่ใช้สอย 77 ตร.ม ของกรมโยธาธิการ โดยในแบบบ้านของกรมโยธาธิการระบุว่า ค่าก่อสร้างแบบมีไม่มีเสาเข็ม ของแบบบ้านขนาด 36 ตร.ม. และ 77 ตร.ม. เป็น 262,000 บาท และ 717,000 บาท ตามลำดับ (ดูรูปแบบบ้านได้จากรูปที่ 1 และ 2) ซึ่งในการคำนวณจะคำนวณแบบไม่ยกพื้น เพื่อเปรียบเทียบกับระบบผนังรับน้ำหนักของ 3DCP



รูปที่ 1 แบบบ้านผู้ประสบภัย 1 (36 ตารางเมตร)





รูปที่ 2 แบบบ้านประหยัด 2 (77 ตารางเมตร)

ดังนั้นเราจะได้สูตรการคำนวณงานก่อสร้าง ไม่รวมงานระบบ จะเป็นดังนี้

<u>ระบบก่อสร้างทั่วไป</u>

$$C_{CONV} = C_{DPT}$$

<u>ระบบ 3DCP แบบผนังรับน้ำหนัก</u>

$$C_{3DCP} = C_{remain} + C_p + C_m + C_{QC} + C_r$$

<u>โดย</u>

$$C_{remain} = C_{DPT} - C_{replaceable}$$

$$C_{replaceable} = r \times C_{DPT}$$

$$C_p = k \times C_{replaceable}$$

<u>เมื่อ</u>

C_{DPT} = ต้นทุนค่าก่อสร้างจากกรมโยธาธิการและผังเมือง

C_{remain} = ต้นทุนส่วนที่ยังต้องก่อสร้างด้วยระบบทั่วไป และคิดราคาเท่ากัน เช่น งานหลังคา ประตู-หน้าต่าง ฝ้า เป็นต้น

C_p = ต้นทุนใหม่ของงานส่วนที่เปลี่ยนไปใช้ระบบ 3DCP

C_m = ต้นทุนงานขนย้ายเครื่องจักรและอุปกรณ์

C_{QC} = ต้นทุนการตรวจควบคุมคุณภาพ

C_r = ต้นทุนค่าความเสี่ยง

$C_{replacement}$ = ต้นทุนของหมวดงานที่สามารถถูกแทนที่ด้วยระบบ 3DCP ได้

r = สัดส่วนของต้นทุนบ้านเดิมที่ระบบ 3DCP สามารถเข้าไปแทนได้

k = ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนของระบบ 3DCP เมื่อเทียบกับต้นทุนงานเดิมที่ถูกแทน

ทั้งนี้สมมติฐานที่ใช้เป็นไปดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	เหตุผล
r	25% ของราคาก่อสร้าง	แทนกลุ่มงานผนัง + เสา/คาน บางส่วน + แบบหล่อ + ฉาบ บางส่วน
k	80% ของต้นทุนกลุ่มที่ถูกแทน	3DCP ลดแบบหล่อ/แรงงาน/ฉาบ แต่เพิ่มวัสดุพิเศษ เหล็กเสียบ grout และเครื่องจักร
$C_m + C_{QC}$ บ้าน 36 ตร.ม.	70,000 บาท/หลัง	ค่าขนส่ง ติดตั้ง Calibrate trial print, toolpath และ QC
$C_m + C_{QC}$ บ้าน 77 ตร.ม.	90,000 บาท/หลัง	บ้านใหญ่ขึ้น ใช้เวลาตั้งระบบและ QC มากขึ้น
C_r	5% ของ Subtotal 3DCP	เทคโนโลยีใหม่ ยังไม่มีราคากลางไทยชัดเจน

ค่า r และ k หากอ้างอิงตามบทความของ Yang et. al [17] ค่า r จะเป็น 35% ของ ราคาค่าก่อสร้างและค่า ทั้งนี้ เมื่อลองถอดแบบและประมาณราคาด้วยราคากลางของบ้านตัวอย่างทั้ง 2 แบบ พบว่า ราคาประเมินของกรมโยธาธิการค่อนข้างจะต่ำไปมาก เนื่องจากเป็นราคาเก่า เมื่อผู้วิจัยได้ทดลองถอดแบบตามราคากลาง จะได้ค่าก่อสร้างแยกตามหมวดงาน ของบ้านทั้ง 2 แบบ ตามตารางที่ 3 – 4

ตารางที่ 3 ราคาประเมินของแบบบ้านผู้ประสบภัย 1 (ไม่รวมเข็ม)

หมวดงาน	ค่าวัสดุ+ค่าแรง	ร้อยละ
หมวดงานวิศวกรรมโครงสร้างที่ 3DCP แทนไม่ได้	136,451	34.89
หมวดงานวิศวกรรมโครงสร้างที่ 3DCP แทนได้	23,820.55	6.09
หมวดงานสถาปัตยกรรม	95,275	24.36
หมวดงานผนัง	73,158	18.71
หมวดงานหลังคา	24,211	6.19
หมวดงานระบบสุขาภิบาล	19,673	5.03
หมวดงานระบบไฟฟ้าและสื่อสาร	12,514	3.20
หมวดงานอื่นๆ	6,000	1.53
รวมราคา	391,103	100.00

ตารางที่ 4 ราคาประเมินของแบบบ้านประหยัด 2 (ไม่รวมเข็ม)

หมวดงาน	ค่าวัสดุ+ค่าแรง	ร้อยละ
หมวดงานวิศวกรรมโครงสร้างที่ 3DCP แทนไม่ได้	23,031	2.91
หมวดงานวิศวกรรมโครงสร้างที่ 3DCP แทนได้	147,336.50	18.60
หมวดงานสถาปัตยกรรม	497,131	62.75
หมวดงานผนัง	46,099	5.82
หมวดงานหลังคา	33,827	4.27
หมวดงานระบบสุขาภิบาล	18,255	2.30
หมวดงานระบบไฟฟ้าและสื่อสาร	19,615	2.48
หมวดงานอื่นๆ	7,000	0.88
รวมราคา	792,294	100.00

ทั้งนี้แบบบ้านทั้งสองมีวัสดุที่แตกต่างกันเล็กน้อย คือ โครงสร้างของหลังคาของ แบบบ้านผู้ประสบภัย 1 เป็นโครงสร้างไม้ แต่ของแบบบ้านประหยัด 2 เป็นโครง C-line และรูปแบบบ้านมีส่วนที่เป็นผนังไม้และผนังคอนกรีตที่แตกต่างกัน แต่วัสดุโดยรวม โครงสร้างเป็นระบบเสา-คาน คสล. ผนังก่ออิฐมอญฉาบปูน มีผนังบางส่วนเป็นไม้ตีเกล็ด หลังคากระเบื้องลอนคู่ลอนเล็ก ห้องน้ำปูกระเบื้อง 8” x 8” พื้นปูกระเบื้อง 12” x 12” ซึ่งในบ้านแบบผู้ประสบภัย 1 เดิมปูพื้นไม้ แต่ผู้วิจัยได้ปรับให้เป็นวัสดุเดียวกันเพื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนได้ง่ายขึ้น

จากการประเมินราคา จะเห็นได้ว่าสัดส่วนของงานก่อสร้างที่ 3DCP แทนได้ (ส่วนที่เป็นแถบสีในตาราง) ของแบบบ้านผู้ประสบภัย 1 (ไม่รวมเข็ม) และแบบบ้านประหยัด 2 (ไม่รวมเข็ม) เป็นร้อยละ 24.80 และ 24.41 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สัดส่วนอาจแปรเปลี่ยนไปตามรูปแบบบ้านได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่า r = 25% ตามรูปแบบบ้านในงานวิจัย ส่วนค่า k ยังคงเป็น 80% ของต้นทุนกลุ่มที่ถูกแทน เนื่องจากคำนวณแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ต้นทุนประมาณการตามตารางแทนราคาประเมินของกรมโยธาธิการ เพื่อให้เป็นปัจจุบันมากขึ้น โดยแบบบ้านแบบบ้านผู้ประสบภัย 1 (ไม่รวมเข็ม) ใช้ต้นทุนที่ 391,103 บาท และแบบบ้านประหยัด 2 (ไม่รวมเข็ม) ใช้ต้นทุนที่ 792,294 บาท ในการคำนวณ แทนราคาต้นทุนที่ 262,000 บาท และ 717,000 บาท ตามลำดับ ทั้งนี้ หากคำนวณแบบรวมเข็มจะเพิ่มต้นทุนอยู่ที่ 22,347 บาท สำหรับแบบบ้านแบบบ้านผู้ประสบภัย 1 และ 72,285 บาท สำหรับแบบบ้านประหยัด 2 ตามลำดับ

7. ผลการคำนวณ

7.1 บ้านผู้ประสบภัย 1 ขนาด 36 ตร.ม. (แบบไม่มีเสาเข็ม)

ระบบทั่วไป

$$C_{CONV} = 391{,}103$$

ราคาต่อพื้นที่:

$$391{,}103/36 = 10{,}863.97 \text{ บาท/ตร.ม.}$$

ระบบ 3DCP

$C_{replaceable} = 25\% \times 391{,}103 = 97{,}776$ บาท

$C_{remain} = 391{,}103 - 97{,}776 = 293{,}327$ บาท

$C_p = 80\% \times 97{,}776 = 78{,}220$ บาท

$Subtotal = 293{,}327 + 78{,}220 + 70{,}000$

$= 441{,}547$ บาท

$C_r = 5\% \times 441{,}547 = 22{,}077$ บาท

$C_{3DCP} = 441{,}547 + 22{,}077 = 463{,}624$ บาท

ราคาต่อพื้นที่:

$$463{,}624/36 = 12{,}878.44 \text{ บาท/ตร.ม.}$$

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า ระบบ 3DCP มีต้นทุนค่าก่อสร้างอยู่ที่ 12,878.44 บาท/ตร.ม. ในขณะที่ระบบปกติมีต้นทุน 10,863.97 บาท/ตร.ม. และส่งผลให้ราคารวมของ 3DCP แพงกว่าระบบปกติอยู่ 72,521 บาท คิดเป็น 18.5% ของราคารวม

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบค่าก่อสร้างบ้านขนาด 36 ตร.ม. ของระบบการก่อสร้างทั่วไป และระบบ 3DCP (ไม่มีเสาเข็ม)

รายการ	ราคา
ระบบทั่วไป	391,103 บาท
ระบบ 3DCP	463,624 บาท
ราคาต่อ ตร.ม. ระบบทั่วไป	10,863.97/ตร.ม.
ราคาต่อ ตร.ม. 3DCP	12,878.44 บาท/ตร.ม.
ผลต่าง	3DCP แพงกว่า 72,521 บาท
ร้อยละผลต่าง	18.5%

7.2 บ้านแบบประหยัด 2 ขนาด 77 ตร.ม. (แบบไม่มีเสาเข็ม)

ระบบทั่วไป

$$C_{CONV} = 792{,}294$$

ราคาต่อพื้นที่:

$$792{,}294/77 = 10{,}289.53 \text{ บาท/ตร.ม}$$

ระบบ 3DCP

$C_{replaceable} = 25\% \times 792{,}294 = 198{,}074$ บาท

$C_{remain} = 792{,}294 - 198{,}074 = 594{,}220$ บาท

$C_p = 80\% \times 198{,}074 = 158{,}459$ บาท

$Subtotal = 594{,}220 + 158{,}459 + 90{,}000$

$= 842{,}679$ บาท

$C_r = 5\% \times 842{,}679 = 42{,}134$ บาท

$C_{3DCP} = 842{,}679 + 42{,}134 = 884{,}813$ บาท

ราคาต่อพื้นที่:

$$884{,}813/77 = 11{,}491.08 \text{ บาท/ตร.ม}$$

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่า ระบบ 3DCP มีต้นทุนค่าก่อสร้างอยู่ที่ 10,289.53 บาท/ตร.ม. ในขณะที่ระบบปกติมีต้นทุน 11,491.08 บาท/ตร.ม. และส่งผลให้ราคารวมของ 3DCP แพงกว่าระบบปกติอยู่ 92,519 บาท คิดเป็น 11.68% ของราคารวม

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบค่าก่อสร้างบ้านขนาด 77 ตร.ม. ของระบบการก่อสร้างทั่วไป และระบบ 3DCP (ไม่มีเสาเข็ม)

รายการ	ราคา
ระบบทั่วไป	792,294 บาท
ระบบ 3DCP	884,813 บาท
ราคาต่อ ตร.ม. ระบบทั่วไป	10,289.53 บาท/ตร.ม.
ราคาต่อ ตร.ม. 3DCP	11,491.08 บาท/ตร.ม.
ผลต่าง	3DCP แพงกว่า 92,519 บาท
ร้อยละผลต่าง	11.68%

ทั้งนี้ หากลองคำนวณในวิธีเดียวกัน กับบ้านทั้ง 2 แบบ แบบมีเสาเข็ม จะได้ผลดังตารางที่ 7 - 8

7.3 บ้านผู้ประสบภัย 1 ขนาด 36 ตร.ม. (แบบมีเสาเข็ม)

ส่วนต่างค่าเสาเข็ม 22,347 บาท ดังนั้นราคาบ้านเป็น

$$391{,}103 + 22{,}347 = 413{,}450 \text{ บาท}$$

ตารางที่ 7 ตารางเปรียบเทียบค่าก่อสร้างบ้านขนาด 36 ตร.ม. ของระบบการก่อสร้างทั่วไป และระบบ 3DCP (มีเสาเข็ม)

รายการ	ราคา
ระบบทั่วไป ตอกเสาเข็ม	413,450 บาท
ระบบ 3DCP ตอกเสาเข็ม	463,624 + 22,347 = 485,971 บาท
ราคาต่อ ตร.ม. ระบบทั่วไป	11,484.72 บาท/ตร.ม.
ราคาต่อ ตร.ม. 3DCP	13,499.20 บาท/ตร.ม.
ผลต่าง	3DCP แพงกว่า 72,521 บาท
ร้อยละผลต่าง	17.54%

7.4 บ้านผู้ประสบภัย 1 ขนาด 77 ตร.ม. (แบบมีเสาเข็ม)

ส่วนต่างค่าเสาเข็ม 72,285 บาท ดังนั้นราคาบ้านเป็น

$$792{,}294 - 72{,}285 = 864{,}579 \text{ บาท}$$

ตารางที่ 8 ตารางเปรียบเทียบค่าก่อสร้างบ้านขนาด 77 ตร.ม. ของระบบการก่อสร้างทั่วไป และระบบ 3DCP (มีเสาเข็ม)

รายการ	ราคา
ระบบทั่วไป ตอกเสาเข็ม	864,579 บาท
ระบบ 3DCP ตอกเสาเข็ม	884,813 + 72,285 = 957,098 บาท
ราคาต่อ ตร.ม. ระบบทั่วไป	11,228.30 บาท/ตร.ม.
ราคาต่อ ตร.ม. 3DCP	12,429.84 บาท/ตร.ม.
ผลต่าง	3DCP แพงกว่า 92,519 บาท
ร้อยละผลต่าง	10.70%

จากตารางที่ 5 – 8 จะเห็นได้ว่าหากขนาดบ้านใหญ่ขึ้น และมีการตอกเข็มเพิ่มขึ้น ร้อยละของผลต่างระหว่างระบบ 3DCP กับระบบทั่วไปยิ่งลดลง ทางผู้วิจัยจึงทำการคำนวณเพิ่มเติมในกรณีที่ผลิตซ้ำหลายหลังในรูปแบบเดิม ซึ่งเป็นจุดแข็งของ 3DCP จะคำนวณได้ดังนี้

7.5 กรณีผลิตซ้ำหลายหลัง

สมมติว่าใช้แบบเดียวกันและผลิตซ้ำ 10 หลัง ค่า Mobilization + QC จะลดลงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่า Mobilization + QC ของบ้าน 1 หลัง และ 10 หลังของระบบ 3DCP

แบบบ้าน	ค่า Mobilization+QC หลังเดียว	ค่า Mobilization+QC เฉลี่ย 10 หลัง
บ้าน 36 ตร.ม.	70,000 บาท	7,000 บาท/หลัง
บ้าน 77 ตร.ม.	90,000 บาท	9,000 บาท/หลัง

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

7.5.1 บ้าน 36 ตร.ม. (ไม่รวมเข็ม) ผลิตซ้ำ 10 หลัง

$$Subtotal = 293{,}327 + 78{,}220 + 7{,}000 = 378{,}547 \text{ บาท}$$

$$Risk = 5\% \times 378{,}547 = 18{,}927.35 \text{ บาท}$$

$$C_{3DCP} = 397{,}474.35 \text{ บาท / หลัง}$$

7.5.2 บ้าน 36 ตร.ม. (รวมเข็ม) ผลิตซ้ำ 10 หลัง

$$C_{3DCP} = 397{,}474.35 + 22{,}347 \text{ บาท / หลัง}$$

$$= 419{,}821.35 \text{ บาท / หลัง}$$

ตารางที่ 10 ราคาต้นทุนค่าก่อสร้างต่อหลังเปรียบเทียบระหว่างระบบทั่วไปกับ 3DCP ของบ้าน 36 ตร.ม. เมื่อผลิต 10 หลัง

รายการ	ไม่ตอกเข็ม	ตอกเข็ม
ระบบทั่วไป	391,103.00	413,450
3DCP ผลิตซ้ำ	397,474.35	419,821.35
ผลต่าง	+6,371.35	+6,371.35
ร้อยละ	+1.63%	+1.54%

7.5.3 บ้าน 77 ตร.ม. (ไม่รวมเข็ม) ผลิตซ้ำ 10 หลัง

$Subtotal = 594{,}220 + 158{,}459 + 9{,}000 = 761{,}679$ บาท

$Risk = 5\% \times 761{,}679 = 38{,}084$ บาท

$C_{3DCP} = 799{,}763$ บาท / หลัง

7.5.4 บ้าน 77 ตร.ม. (รวมเข็ม) ผลิตซ้ำ 10 หลัง

$C_{3DCP} = 799{,}763 + 72{,}285$ บาท / หลัง

$= 872{,}048$ บาท / หลัง

จากตารางที่ 10 จะสังเกตได้ว่า การผลิตบ้านขนาด 36 ตร.ม. ซ้ำ 10 หลัง ระบบ 3DCP ยังมีราคาสูงกว่าระบบทั่วไปเล็กน้อย ระหว่าง 1.54 – 1.63% และในตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ถ้าผลิต บ้าน 77 ตร.ม. ซ้ำ 10 หลัง ระบบ 3DCP จะมีช่องว่างราคาลดต่ำลงเหลือ 0.86 – 0.94% หรือไม่ถึง 1% ซึ่งแตกต่างจากการสร้างบ้านหลังเดียวที่มีส่วนต่างค่าใช้จ่ายระหว่าง 10.70 – 18.50% แสดงให้เห็นว่า ระบบ 3DCP เหมาะกับงานทำซ้ำ และงานที่มีปริมาณมาก หากมีการผลิตมากขึ้น ราคาต้นทุนของบ้านก็ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 11 ราคาต้นทุนค่าก่อสร้างต่อหลังเปรียบเทียบระหว่างระบบทั่วไปกับ 3DCP ของบ้าน 77 ตร.ม. เมื่อผลิต 10 หลัง

รายการ	ไม่ตอกเข็ม	ตอกเข็ม
ระบบทั่วไป	792,294	864,579
3DCP ผลิตซ้ำ	799,763	872,048
ผลต่าง	+7,469	+7,469
ร้อยละ	+0.94%	+0.86%

สามารถดูสรุปเปรียบเทียบได้ในตารางที่ 12 และจากตารางจะเห็นได้ว่า หากเพิ่มการผลิตเป็นจำนวน 20 หลัง ราคาต้นทุนจะลดลงไปอีกตามสัดส่วน ถึงแม้อัตราการลดลงจะน้อยกว่า 10 หลังแรก ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองคำนวณ หากใช้ ค่า r = 35% ตามบทความของ Yang ทางผู้วิจัยพบว่าบ้านขนาด 77 ตารางเมตร จะมีราคาต่ำกว่าการก่อสร้างปกติตั้งแต่ 10 หลังแรก ทั้งนี้คงต้องพิจารณารูปแบบบ้านเป็นสำคัญ บ้านในต่างประเทศอาจใช้ระบบหลังคาคอนกรีต ซึ่งในส่วนนี้อาจสามารถใช้ 3DCP ทดแทนได้ เมื่อสัดส่วนของ ค่า r มากขึ้น ต้นทุนต่อหลังก็จะลดลงได้มากขึ้น

ตารางที่ 12 สรุปต้นทุนค่าก่อสร้างบ้านขนาด 36 ตารางเมตร และ 77 ตารางเมตรในเงื่อนไขต่าง ๆ

แบบบ้าน	ฐานราก	ระบบทั่วไป	3DCP หลังเดียว	ต่างจากทั่วไป	3DCP ผลิตซ้ำ 10 หลัง	ต่างจากทั่วไป	3DCP ผลิตซ้ำ 20 หลัง	ต่างจากทั่วไป
36 ตร.ม.	ไม่ตอกเข็ม	391,103	463,624	+18.54%	397,474	+1.63%	393,799.35	+0.69%
36 ตร.ม.	ตอกเข็ม	413,450	485,971	+17.54%	419,821	+1.54%	416,146.35	+0.65%
77 ตร.ม.	ไม่ตอกเข็ม	792,294	884,813	+11.68%	799,763	+0.94%	795,037.95	+0.35%
77 ตร.ม.	ตอกเข็ม	864,579	957,098	+10.70%	872,048	+0.86%	867,322.95	+0.32%

8. สรุปผล

การศึกษานี้พบว่า ระบบ 3DCP ยังไม่เหมาะสมเชิงต้นทุนสำหรับการก่อสร้างบ้านพักอาศัยขนาดเล็กเพียง 1 หลังในประเทศไทย เนื่องจากมีต้นทุนคงที่ด้านเครื่องพิมพ์ การเคลื่อนย้าย การติดตั้ง และการควบคุมคุณภาพสูง โดยเฉพาะในบ้านขนาด 36 ตารางเมตร ซึ่งมีพื้นที่น้อยเกินกว่าจะเฉลี่ยต้นทุนดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ระบบ 3DCP มีศักยภาพมากขึ้นเมื่อใช้กับการผลิตซ้ำหลายหน่วย โดยเฉพาะบ้านขนาด 77 ตารางเมตร ซึ่งเริ่มแสดงแนวโน้มต้นทุนต่ำกว่าระบบก่อสร้างทั่วไปในกรณีผลิตซ้ำ 10 หลัง จึงอาจกล่าวได้ว่า 3DCP เหมาะกับโครงการที่มีลักษณะเป็นแบบมาตรฐานซ้ำ เช่น บ้านผู้ประสบภัย บ้านราคาประหยัด หรือที่อยู่อาศัยชุมชน มากกว่าบ้านเดี่ยวเฉพาะราย

สำหรับบริบทของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 3 ประเด็น คือ รูปแบบอาคาร การก่อสร้าง และกฎหมาย ในเรื่องรูปแบบอาคาร ประเทศไทยยังนิยมหลังคาจั่ว หรือปั้นหยา เนื่องจากมีความสวยงาม เหมาะกับสภาพภูมิอากาศ ซึ่งในส่วนนี้จะไม่สามารถทดแทนด้วย 3DCP ได้ ซึ่งแตกต่างจากในประเทศที่ใช้หลังคาคอนกรีตสแลป ซึ่งจะทำให้ระบบ 3DCP ทำงานได้ง่ายและทดแทนได้ในปริมาณที่มากกว่า และสามารถลดต้นทุนต่อหลังได้มากกว่า ส่วนเรื่องการก่อสร้าง ค่าแรงในประเทศไทยยังคงไม่สูงนักเมื่อเทียบกับหลายประเทศ และช่างไทยยังคงมีความชำนาญกับระบบเดิม รวมถึงวัสดุก่อสร้างที่ผลิตได้ในประเทศและมีราคาไม่แพง ทำให้ระบบการก่อสร้างเดิมยังมีราคาไม่แพง เมื่อเป็นการก่อสร้างขนาดเล็ก ส่วนประเด็นทางด้านกฎหมาย ประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายตรวจสอบ หรือกำกับความแข็งแรงของอาคารที่สร้างจาก 3DCP ดังนั้น การใช้ 3DCP ในประเทศไทย จึงยังไม่แพร่หลายและยังเติบโตช้า

โดยสรุป 3DCP ไม่ควรถูกมองว่าเป็นระบบที่ถูกกว่าการก่อสร้างทั่วไปเสมอไป แต่ควรมองว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการลดแรงงาน ลดแบบหล่อ ลดระยะเวลาก่อสร้าง ลดของเสีย และเพิ่มความแม่นยำของงานก่อสร้าง หากถูกนำไปใช้ในบริบทที่เหมาะสม

9. ข้อเสนอแนะ

ในการทำงานจริงให้ลองประเมินปริมาณที่สามารถทดแทนด้วย 3DCP และใช้ราคาตลาดจริงในเวลานั้นกำหนด เพื่อดูว่าปริมาณเท่าใดที่ทำแล้วสามารถลดต้นทุนได้จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] Lyu, F., Zhao, D., Hou, X., Sun, L., & Zhang, Q. (2021). Overview of the development of 3D-printing concrete: A review. Applied Sciences, 11(21), Article 9822. https://doi.org/10.3390/app11219822

[2] Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. Automation in Construction, 5(5), 427–437. https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5

[3] Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. Automation in Construction, 13(1), 5–19.

[4] Khoshnevis, B., & Bekey, G. (2002). Automated construction using contour crafting: Applications on Earth and beyond. In Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2002) (pp. 489–495).

[5] Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction, 21(1), 262–268. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010

[6] Campbell-Dollaghan, K. (2014, April 3). How a Chinese company 3D-printed ten houses in a single day. Gizmodo. https://gizmodo.com/how-a-chinese-company-3d-printed-ten-houses-in-a-single-1557613229

[7] EIT – South Africa. (2016, June 17). 3D printed 400-square-meter villa erected in 45 days. EIT – South Africa. https://www.eit-za.com/3d-printed-400-square-meter-villa-erected-in-45-days/

[8] Corboy, P. (2017, February 28). Apis Cor realizes Russia's first on-site 3D printed house in just 24 hours. Designboom. https://www.designboom.com/architecture/apis-cor-pik-3d-printed-house-24-hours-02-28-2017/

[9] COBOD International. (2023, May 4). Europe's largest 3D printed building is being constructed in Germany. COBOD International. https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/

[10] Olson, C. (2018, March 12). New Story unveils first 3-D-printed home. Architectural Digest. https://www.architecturaldigest.com/story/new-story-unveils-first-3-d-printed-home

[11] Buswell, R. A., De Silva, W. R. L., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2020). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research, 112, 37-49. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006

[12] Khajavi, S. H., Tetik, M., Mohite, A., Peltokorpi, A., Li, M., Weng, Y., Holmstrom, J., & Limbachiya, M. (2021). Additive manufacturing in the construction industry: The comparative competitiveness of 3D concrete printing. Applied Sciences, 11(9), 3865. https://doi.org/10.3390/app11093865

[13] Yang, H., Zhang, Y., Chung, J. K. H., Chen, Y., & Li, Y. (2018). The cost calculation method of construction 3D printing aligned with internet of things. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 147. https://doi.org/10.1186/s13638-018-1163-9

[14] Allouzi, R., Al-Azhari, W., & Allouzi, R. (2020). Conventional construction and 3D printing: A comparison study on material cost in Jordan. Journal of Engineering, 2020, 1424682. https://doi.org/10.1155/2020/1424682

[15] Besklubova, S., Raza, M. H., Zhong, R. Y., & Skibniewski, M. J. (2024). 3D printing vs. traditional construction: Cost comparisons from design to waste disposal stages. In Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2024) (pp. 1247–1254). https://doi.org/10.22260/ISARC2024/0161

[16] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (n.d.). รายละเอียดแบบแปลนและราคาโดยสังเขป. Townsquare. https://townsquare.dpt.go.th/arch/plan-summary