กฎหมายและมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตพิมพ์สามมิติ: ข้อจำกัดและแนวทางการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

ดิษฐา นนทิวรวงษ์[1] และ บุญชัย โรจน์พานิช[2*]

[1] บริษัท อาร์ช จี เทค จำกัด

[2] บริษัท ควอลิตี้ ลิฟวิ่ง แมเนจเม้นท์ จำกัด

E-mail: boon1312@hotmail.com*

รับเมื่อ: 24 มิถุนายน 2569
แก้ไขเมื่อ: 30 มิถุนายน 2569
ตอบรับเมื่อ: 30 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการก่อสร้างด้วยคอนกรีตพิมพ์สามมิติ หรือ 3D Concrete Printing: 3DCP เป็นนวัตกรรมที่มีศักยภาพในการลดระยะเวลาก่อสร้าง ลดการใช้แบบหล่อ ลดแรงงานบางส่วน และเพิ่มเสรีภาพทางรูปทรงทางสถาปัตยกรรม อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในงานอาคารจริงยังมีข้อจำกัดสำคัญด้านกฎหมาย มาตรฐานการออกแบบ โครงสร้าง วัสดุ ความปลอดภัย และกระบวนการควบคุมคุณภาพ โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งยังไม่มีกฎหมายหรือมาตรฐานเฉพาะสำหรับอาคารที่ก่อสร้างด้วยระบบ 3DCP โดยตรง บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สถานะของกฎหมายควบคุมอาคารไทยเมื่อเทียบกับมาตรฐานต่างประเทศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ICC-ES AC509, UL 3401, ISO/ASTM 52939:2023 และแนวทางของ ACI Committee 564 ตลอดจนเสนอกรอบการประยุกต์ใช้กฎหมายเดิมร่วมกับมาตรฐานเฉพาะทาง เพื่อรองรับการใช้ 3DCP ในประเทศไทยอย่างปลอดภัยและเป็นระบบ ผลการศึกษาพบว่า 3DCP ไม่ควรถูกพิจารณาเพียงในฐานะ “วิธีการก่อสร้างใหม่” แต่ควรถูกกำกับในฐานะระบบการผลิตอาคารที่เชื่อมโยงระหว่างวัสดุ เครื่องจักร กระบวนการพิมพ์ แบบจำลองดิจิทัล การเสริมกำลัง การทดสอบ และการรับรองคุณภาพ ดังนั้น ประเทศไทยควรพัฒนาแนวทางกำกับดูแลแบบ performance-based regulation ควบคู่กับการอ้างอิงมาตรฐานสากล เพื่อเปิดพื้นที่ให้นวัตกรรมสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ลดทอนความมั่นคงแข็งแรงและความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร

คำสำคัญ: กฎหมายอาคาร, คอนกรีตพิมพ์สามมิติ, 3D Concrete Printing, 3DCP, มาตรฐานอาคาร, การควบคุมคุณภาพ

Laws and Standards for Three-Dimensional Printed Concrete Buildings: Limitations and Guidelines for Application in Thailand

Dittha Nonthiworawong[1] and Boonchai Rojpanich[2*]

[1] Arch G Tech Company Limited

[2] Quality Living Management Company Limited

E-mail: boon1312@hotmail.com*

Received: 24 June 2026
Revised: 30 June 2026
Accepted: 30 June 2026

Abstract

Three-Dimensional Concrete Printing, or 3D Concrete Printing (3DCP), is a construction innovation with the potential to reduce construction time, decrease the use of formwork, reduce certain types of labor, and enhance architectural freedom in terms of form. However, the application of this technology in actual building construction remains subject to significant limitations in terms of law, design standards, structural systems, materials, safety, and quality control processes. This is particularly evident in Thailand, where there are currently no specific laws or standards that directly regulate buildings constructed using 3DCP systems.

This article aims to analyze the status of Thai building control laws in comparison with relevant international standards, namely ICC-ES AC509, UL 3401, ISO/ASTM 52939:2023, and the guidelines of ACI Committee 564. It also proposes a framework for applying existing laws in conjunction with specialized standards in order to support the safe and systematic implementation of 3DCP in Thailand.

The study found that 3DCP should not be considered merely as a “new construction method,” but should instead be regulated as a building production system that integrates materials, machinery, printing processes, digital models, reinforcement, testing, and quality certification. Therefore, Thailand should develop a performance-based regulatory approach in parallel with the adoption of international standards. This would create a regulatory space in which innovation can be implemented without compromising the structural stability and safety of building users.

Keywords: Building law, Three-dimensional printed concrete, 3D Concrete printing, 3DCP, Building standards, Quality control

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลกกำลังเผชิญความท้าทายจากต้นทุนวัสดุที่สูงขึ้น การขาดแคลนแรงงานฝีมือ ความต้องการลดของเสียจากการก่อสร้าง และแรงกดดันด้านความยั่งยืน เทคโนโลยีการก่อสร้างด้วยคอนกรีตพิมพ์สามมิติ หรือ 3D Concrete Printing: 3DCP จึงได้รับความสนใจในฐานะกระบวนการก่อสร้างแบบดิจิทัลที่สามารถผลิตองค์ประกอบอาคารด้วยการพิมพ์วัสดุซีเมนต์เป็นชั้นต่อชั้นตามแบบจำลองคอมพิวเตอร์ [1] เทคโนโลยีดังกล่าวมีข้อได้เปรียบด้านความเร็ว การลดแบบหล่อ การลดแรงงานบางประเภท และความสามารถในการสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนกว่าวิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม [2]

ถึงแม้ว่า 3DCP จะมีข้อได้เปรียบทางเทคโนโลยี แต่ในการนำมาใช้งานจริงยังมีข้อจำกัดทางกฎหมาย ยิ่งเทคโนโลยีมีความใหม่มากเท่าใด ความจำเป็นในการพิสูจน์ความมั่นคงแข็งแรง ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของกระบวนการก่อสร้างก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบที่พิมพ์ขึ้นทำหน้าที่เป็นผนังรับน้ำหนัก โครงสร้างหลัก หรือส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร

ในบริบทของประเทศไทย การควบคุมอาคารยังตั้งอยู่บนฐานของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมุ่งกำกับการก่อสร้าง ดัดแปลง รื้อถอน เคลื่อนย้าย และการใช้อาคาร เพื่อประโยชน์ด้านความมั่นคงแข็งแรง ความปลอดภัย การป้องกันอัคคีภัย การสาธารณสุข และการผังเมือง [3] แม้กฎหมายดังกล่าวจะสามารถใช้ควบคุมอาคารที่สร้างด้วย 3DCP ได้ในเชิงหลักการ แต่ยังไม่มีบทบัญญัติเฉพาะที่ระบุวิธีการประเมินวัสดุพิมพ์ เครื่องพิมพ์ เส้นทางการพิมพ์ การยึดเกาะระหว่างชั้น การเสริมกำลัง และการควบคุมคุณภาพระหว่างการพิมพ์อย่างชัดเจน

ดังนั้น บทความนี้จึงวิเคราะห์ช่องว่างระหว่างกฎหมายอาคารไทยกับลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี 3DCP และเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้มาตรฐานต่างประเทศเพื่อเป็นฐานในการพัฒนาแนวปฏิบัติในประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 วิเคราะห์ช่องว่างระหว่างกฎหมายอาคารไทยกับลักษณะเฉพาะของระบบ 3DCP

2.2 เปรียบเทียบบทบาทและขอบเขตของกฎหมาย แนวทางอนุมัติ และมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นระบบ

2.3 ศึกษากรณีอาคารและโครงการ 3DCP ในต่างประเทศและประเทศไทย เพื่อจำแนกสถานะตั้งแต่การทดลอง วัสดุ/องค์ประกอบ จนถึงอาคารที่ได้รับอนุญาตใช้งาน

2.4 เสนอเส้นทางอนุมัติโครงการ หน่วยงาน เอกสาร และกลไกกำกับดูแลที่สามารถประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเอกสารเชิงเปรียบเทียบ (Comparative documentary research) ผสมผสานการทบทวนเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์เนื้อหาแบบกำหนดประเด็นล่วงหน้า มิได้มุ่งวัดผลเชิงสถิติ แต่เน้นการตรวจสอบความสอดคล้อง ช่องว่าง และความสามารถในการประยุกต์ใช้ข้ามระบบกฎหมาย

3.2 การวิเคราะห์และสังเคราะห์

จัดการเปรียบเทียบ 8 ประเด็น ได้แก่ สถานะทางกฎหมาย หน่วยงานอนุมัติ ขอบเขตระบบ วัสดุ เครื่องจักร และข้อมูลดิจิทัล โครงสร้างและอัคคีภัย การประกันคุณภาพ และเอกสารอนุมัติ จากนั้นวิเคราะห์ช่องว่างโดยเทียบสิ่งที่กฎหมายไทยกำหนดกับหลักฐานที่มาตรฐานสากลเรียกร้อง

3.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

มาตรฐานบางฉบับเป็นเอกสารที่มีลิขสิทธิ์และเข้าถึงได้เฉพาะบทสรุปสาธารณะ การวิเคราะห์จึงเน้นขอบเขตและหลักการกำกับ มิได้ถอดข้อกำหนดทุกข้อ อีกทั้งสถานะโครงการในไทยยังมีข้อมูลสาธารณะจำกัด จึงไม่สรุปว่าโครงการทดลองหรือสิ่งปลูกสร้างสาธิตได้รับใบอนุญาตเป็นอาคาร เว้นแต่มีหลักฐานจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

4. กรอบแนวคิดในการวิจัย

กรอบแนวคิดประกอบด้วย 3 เรื่องที่ควรพิจารณาร่วมกัน ได้แก่ 1) กฎหมายไทยที่กำหนดผลลัพธ์ขั้นพื้นฐานและอำนาจอนุญาต 2) มาตรฐานสากลที่แสดงวิธีสร้างหลักฐานสมรรถนะ และ 3) เส้นทางอนุมัติโครงการซึ่งแปลงหลักฐานเป็นการตัดสินใจของเจ้าพนักงาน ดังรูปที่ 1

กรอบนี้ตั้งอยู่บนหลักการที่ว่า การผ่านมาตรฐานต่างประเทศไม่เท่ากับการได้รับอนุญาตตามกฎหมายไทยโดยอัตโนมัติ แต่รายงานทดสอบและระบบคุณภาพจากมาตรฐานดังกล่าวสามารถเป็นหลักฐานประกอบการพิสูจน์ว่าอาคารมีสมรรถนะไม่น้อยกว่าระบบที่กฎหมายยอมรับ



รูปที่ 1 กรอบวิเคราะห์เชิงระบบสำหรับการกำกับอาคารคอนกรีตพิมพ์สามมิติในประเทศไทย
(Thai Building Law + International Performance Standards + Project Approval Pathway)

5. ลักษณะเฉพาะของการก่อสร้างด้วยคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

3DCP เป็นกระบวนการก่อสร้างที่ใช้เครื่องจักรควบคุมด้วยระบบดิจิทัลในการอัดรีดวัสดุซีเมนต์ผ่านหัวพิมพ์แล้ววางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ตามเส้นทางการพิมพ์ที่กำหนดจากแบบจำลองสามมิติ ความแตกต่างสำคัญระหว่าง 3DCP กับคอนกรีตหล่อในที่ คือ 3DCP ไม่ได้พึ่งพาแบบหล่อเป็นหลัก แต่พึ่งพาคุณสมบัติของวัสดุสด ความสามารถในการคงรูประยะเวลาเซตตัว ความแม่นยำของเครื่องจักร และความต่อเนื่องของกระบวนการพิมพ์ [4]

ในทางกฎหมายและวิศวกรรม สิ่งที่ต้องพิจารณาไม่ใช่เพียง “คอนกรีตมีกำลังอัดเท่าใด” แต่รวมถึงคำถามที่ละเอียดกว่านั้น เช่น วัสดุแต่ละชั้นยึดเกาะกันดีเพียงใด การพิมพ์ต่อเนื่องหรือหยุดพิมพ์ระหว่างชั้นส่งผลต่อกำลังรับแรงอย่างไร การเสริมเหล็กทำในขั้นตอนใด ช่องว่างภายในผนังมีผลต่อไฟความชื้น และเสียงหรือไม่ และใครเป็นผู้รับผิดชอบหากความคลาดเคลื่อนเกิดจากซอฟต์แวร์ เครื่องจักร หรือผู้ควบคุมงาน

ประเด็นเหล่านี้ทำให้ 3DCP เป็นเทคโนโลยีที่มีสถานะกึ่งกลางระหว่าง “วัสดุก่อสร้าง” “ระบบโครงสร้าง” “เครื่องจักรผลิตอาคาร” และ “กระบวนการก่อสร้างดิจิทัล” จึงไม่สามารถใช้กรอบคิดแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปได้ทั้งหมด การกำกับดูแลจึงควรพิจารณาทั้งผลิตภัณฑ์ กระบวนการ และผลลัพธ์ของอาคารร่วมกัน

6. สถานะของกฎหมายอาคารไทยต่อเทคโนโลยี 3DCP

6.1 สถานะตามกฎหมายควบคุมอาคาร

อาคารที่สร้างด้วย 3DCP ยังคงเป็น “อาคาร” ตามกฎหมายควบคุมอาคาร การเปลี่ยนวิธีผลิตผนังมิได้ยกเว้นการขออนุญาต ระยะร่น ผังเมือง ระบบโครงสร้าง อัคคีภัย สุขาภิบาล และความรับผิดชอบของผู้ประกอบวิชาชีพ [3] เจ้าพนักงานท้องถิ่นจึงมีอำนาจตรวจแบบและกำหนดให้จัดส่งหลักฐานเพิ่มเติมเมื่อระบบไม่อยู่ในวิธีมาตรฐานทั่วไป

ช่องว่างสำคัญคือกฎหมายลำดับรองยังมิได้กำหนดวิธีรับรองสูตรวัสดุพิมพ์ การยึดเกาะระหว่างชั้น เครื่องพิมพ์ ความถูกต้องของข้อมูลดิจิทัล คุณสมบัติผู้ควบคุมเครื่อง และเกณฑ์ยอมรับความคลาดเคลื่อนของงานพิมพ์ ดังนั้น ภาระพิสูจน์ย่อมสูงกว่างานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

6.2 หน่วยงานและสถานะการพัฒนาในไทย

ประเทศไทยมีฐานการวิจัยและต้นแบบที่ต่อเนื่อง แต่จากเอกสารสาธารณะที่ตรวจสอบได้ ยังไม่พบระบบกฎหมายหรือมาตรฐานเฉพาะระดับประเทศ และยังไม่ควรเหมารวมว่างานสาธิตทุกชิ้นมีสถานะเป็นอาคารที่ได้รับอนุญาตให้เข้าอยู่อาศัย

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาอาคาร 3DCP ในประเทศไทย

หน่วยงาน	ลักษณะผลงาน	สถานะที่ควรตีความ
SCG/Siam Research and Innovation: Helix, Y-Box และ Triple S	อาคารต้นแบบและองค์ประกอบสถาปัตยกรรม ได้แก่ Ember Cafe & Wine พระราม 9 ซอย 43, Medical Center แก่งคอย สระบุรี, Noomrongmee Café โคราช, S-Curve Specialty Coffee Cafe โคราช, Amazon บางซ่อน, Amazon ปั้มปตท.สาย 3 [5]	เป็นหลักฐานความสามารถด้านวัสดุและการผลิต ไม่เพียงพอที่จะสรุปสถานะใบอนุญาตอาคาร
Mahidol University SCMI	วิจัยวัสดุคอนกรีตสำหรับการพิมพ์ ความคงทน และการใช้เป็นแบบหล่อถาวร [6]	ความรู้วัสดุและองค์ประกอบ ยังต้องเชื่อมสู่เกณฑ์อนุมัติอาคาร

ปัญหาสำคัญคือกฎหมายอาคารไทยยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเฉพาะสำหรับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เช่น มาตรฐานวัสดุพิมพ์ เกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงของชั้นพิมพ์ การควบคุมคุณภาพระหว่างพิมพ์ การรับรองเครื่องพิมพ์ การตรวจสอบแบบจำลองดิจิทัล และการรับรองผู้ควบคุมระบบพิมพ์ ด้วยเหตุนี้ การพิจารณาอนุญาตจึงอาจต้องใช้กรอบกฎหมายเดิม ได้แก่ การตรวจแบบสถาปัตยกรรม แบบโครงสร้าง รายการคำนวณ ระบบป้องกันอัคคีภัย สุขาภิบาล ระยะร่น และข้อกำหนดผังเมือง ร่วมกับเอกสารทดสอบหรือมาตรฐานอ้างอิงจากต่างประเทศ

กล่าวให้ตรงคือ กฎหมายไทยไม่ได้ห้าม 3DCP โดยตรง แต่ก็ยังไม่ได้อนุญาตให้ใช้กันได้อย่างเสรีและมั่นใจ สถานะปัจจุบันจึงเป็นพื้นที่สีเทาเชิงเทคนิคมากกว่าสีเทาเชิงกฎหมาย กล่าวคือ สามารถเสนอขออนุญาตได้ แต่ภาระการพิสูจน์จะตกอยู่กับผู้ออกแบบ วิศวกร ผู้ผลิต และเจ้าของโครงการมากกว่างานก่อสร้างทั่วไป

ภาพรวมจึงอยู่ในระยะ research-prototype-pilot มากกว่าระยะ code-normalized deployment การพัฒนาแนวทางไทยควรเชื่อมสามฐานพร้อมกัน คือ ห้องปฏิบัติการที่ทดสอบได้ ผู้ผลิตที่ควบคุมกระบวนการได้ และหน่วยงานอนุญาตที่มีแบบรายการหลักฐานมาตรฐาน

7. ประเทศที่มีกฎหมายหรือข้อกำหนดเฉพาะเพื่อรองรับ 3D Printing Construction

ประเทศที่มีกฎหมายหรือข้อกำหนดเฉพาะรองรับ 3D Printing Construction ชัดที่สุดตอนนี้ คือ Dubai, UAE เพราะมี Decree No. 24 of 2021 ว่าด้วยการใช้เทคโนโลยี 3D Printing ในงานก่อสร้างโดยตรง ครอบคลุมการอนุญาต ผู้รับเหมา วิศวกร เครื่องพิมพ์ วัสดุ และการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีเป้าหมายให้ 25% ของอาคารใหม่ในดูไบใช้เทคโนโลยีนี้ภายในปี 2030 [7] ส่วนประเทศอื่น ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมนี เนเธอร์แลนด์ สิงคโปร์ ซาอุดีอาระเบีย มีการสร้างจริง อนุญาตจริง หรือมีมาตรฐาน/แนวทางรองรับบางส่วน แต่ส่วนใหญ่ยังไม่ได้มีกฎหมายเฉพาะระดับประเทศแบบ “กฎหมาย 3DCP” โดยตรง สถานะของแต่ละประเทศในการรองรับ 3DCP แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สถานะการรองรับ 3DCP ในประเทศที่เกี่ยวข้อง

ประเทศ/เขตอำนาจ	สถานะการรองรับ 3DCP	ระดับความชัดเจน
Dubai, UAE	มีกฎหมายเฉพาะโดยตรง คือ Decree No. 24 of 2021 Regulating the Use of Three-dimensional Printing in Construction Works	ชัดเจนที่สุด เนื่องจากมีกฎหมายเฉพาะ
สหรัฐอเมริกา	ใช้ระบบ Building Code เดิมร่วมกับมาตรฐานประเมิน เช่น ICC-ES AC509, Appendix AW และ UL 3401 ซึ่งขึ้นอยู่กับการยอมรับของแต่ละรัฐ หรือแต่ละเมืองด้วย	มี Code pathway แต่ไม่ใช่กฎหมายกลางเฉพาะทั้งประเทศ
เยอรมนี	มีการอนุญาตก่อสร้างจริงผ่าน “Approval for individual case” โดยอิงมาตรฐานคอนกรีตและการก่ออิฐเดิม และการทดสอบเพิ่มเติม	อนุญาตได้เป็นรายโครงการ
เนเธอร์แลนด์	Project Milestone ได้รับการรับรองให้เข้าอยู่อาศัยจริง และระบุว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดอาคารดัตช์	อนุญาตได้ภายใต้กฎหมายอาคารเดิม
สิงคโปร์	มีงานวิจัยและการทดลองภาคสนามที่สนับสนุนโดย BCA/NAMIC แต่ยังไม่พบว่ามีกฎหมายเฉพาะ 3DCP สำหรับอาคารทั่วไป	กำลังพัฒนา/สนับสนุนเชิงนวัตกรรม
ซาอุดีอาระเบีย	มีอาคาร 3D printed จริง เช่น มัสยิด 3D printed ในเจดดาห์ แต่ไม่พบหลักฐานชัดว่ามีกฎหมาย 3DCP เฉพาะ	มีโครงการจริง แต่กฎหมายเฉพาะยังไม่ชัด

7.1 Dubai, UAE

ดูไบมีกฎหมายเฉพาะชัดเจนที่สุด เพราะออก Decree No. 24 of 2021 เพื่อกำกับการใช้ 3D Printing Technology ในงานก่อสร้างโดยตรง กฎหมายนี้ใช้กับงานก่อสร้างที่ใช้เทคโนโลยี 3D Printing ทั้งในเขตดูไบ รวมถึงเขตพัฒนาเฉพาะและ free zones ต่าง ๆ ด้วย [8]

สาระสำคัญของกฎหมายดูไบ ได้แก่ การกำหนดให้ผู้ดำเนินงานต้องได้รับอนุญาตจากเทศบาลนครดูไบ (Dubai Municipality) วิศวกรและผู้รับเหมาต้องได้รับการขึ้นทะเบียนและจัดประเภท เครื่องพิมพ์ต้องมีใบรับรอง (Conformity Certificate) วัสดุและส่วนผสมต้องผ่านการทดสอบ และผู้รับเหมาต้องมีประกันภัยรองรับความเสียหายจากการใช้เทคโนโลยีนี้ ที่สำคัญคือกฎหมายระบุเป้าหมายเชิงนโยบายให้เพิ่มสัดส่วนอาคารที่สร้างด้วย 3D Printing Technology จนถึงอย่างน้อย 25% ภายในต้นปี 2030 ซึ่งทำให้ดูไบไม่ใช่แค่ “อนุญาตให้ทดลอง” แต่เป็นการวางระบบรัฐเพื่อผลักดันเทคโนโลยีนี้โดยตรง [9]

7.2 สหรัฐอเมริกา

สหรัฐฯ ยังไม่ได้มีกฎหมายกลางระดับประเทศที่บอกว่าเป็นกฎหมายสำหรับ 3DCP เพราะระบบกฎหมายอาคารของสหรัฐฯ อยู่ที่การรับไปใช้ของรัฐและท้องถิ่น แต่มี Code pathway ค่อนข้างชัดผ่าน ประมวลข้อกำหนดอาคารสากล (International Building Code: IBC) ประมวลข้อกำหนดที่อยู่อาศัยสากล (International Residential Code: IRC) และกลไกการประเมินผลิตภัณฑ์/ระบบใหม่ เช่น ICC-ES AC509 [10]

ICC-ES ระบุว่า AC509 ใช้ประเมิน 3D automated construction technology สำหรับ 3D concrete walls โดยพิจารณาคุณสมบัติวัสดุ ความทนทาน สมรรถนะโครงสร้าง และการทนไฟของผนัง นอกจากนี้ยังมี Appendix AW: 3D Printed Building Construction ในชุดข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ IRC/Tiny House Provisions ซึ่งให้ข้อกำหนดด้านการออกแบบ ก่อสร้าง และตรวจสอบงานก่อสร้างด้วยเทคนิค 3D printing [11]

สรุปคือ สหรัฐฯ ไม่ได้มีกฎหมาย 3DCP กลางของประเทศ แต่เป็นประเทศที่มีระบบรองรับผ่าน Building code, Local approval, Evaluation report และมาตรฐานทดสอบ ซึ่งใช้ได้จริงถ้าเขตอำนาจท้องถิ่นยอมรับ

7.3 เยอรมนี

เยอรมนีมีบ้านพักอาศัย 3D printed ที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างจริง เช่น บ้านที่เมือง Beckum ซึ่งเป็นบ้าน 3D printed หลังแรกของประเทศ โดยกระบวนการอนุญาตใช้แนวทาง Approval for individual case ร่วมกับมาตรฐานเดิมด้านคอนกรีตและงานก่ออิฐ และต้องมีการทดสอบชิ้นส่วนขนาดใหญ่เพิ่มเติม เพราะมาตรฐานเดิมยังไม่ครอบคลุมลักษณะเฉพาะของ 3DCP ทั้งหมด [12] ซึ่งหมายความว่า เยอรมนีไม่ได้ให้อาคาร 3DCP ผ่านอัตโนมัติ แต่ถ้าจะสร้าง ต้องพิสูจน์เป็นรายกรณีให้ครบ" โดยเฉพาะเรื่องวัสดุ กำลังรับแรง ทิศทางการพิมพ์ รอยต่อเย็น และความทนทาน เป็นการอนุญาตรายโครงการ

7.4 เนเธอร์แลนด์

เนเธอร์แลนด์มี Project Milestone ที่ Eindhoven ซึ่งเป็นบ้าน 3D printed ที่มีการเข้าอยู่อาศัยจริง และแหล่งข้อมูลของโครงการระบุว่าบ้านดังกล่าวสอดคล้องกับข้อกำหนดอาคารที่เข้มงวดของเนเธอร์แลนด์ [13] อย่างไรก็ตาม กรณีนี้เป็นการอนุญาตภายใต้ระบบกฎหมายอาคารเดิมร่วมกับการพิสูจน์ทางเทคนิค มากกว่าจะเป็นกฎหมายเฉพาะชื่อ 3DCP ระดับประเทศ

7.5 สิงคโปร์

สิงคโปร์ มีการผลักดัน 3D Concrete Printing ผ่านงานวิจัยและโครงการนำร่อง โดยมีความร่วมมือระหว่าง NUS, Woh Hup และได้รับการสนับสนุนจาก BCA และ NAMIC เพื่อพัฒนา 3DCP สำหรับงานก่อสร้างในบริบทเมืองที่หนาแน่น [14] ปัจจุบัน ยังไม่สามารถสรุปว่าสิงคโปร์มีกฎหมายเฉพาะสำหรับ 3DCP แต่เรียกว่า มี Ecosystem ภาครัฐสนับสนุน มีงานวิจัยรองรับ และมีการทดลองเชิงโครงสร้าง ซึ่งเป็นลักษณะของการเตรียมความพร้อมในอนาคต

7.6 ซาอุดีอาระเบีย

ซาอุดิอาระเบียมีโครงการ 3D printed construction จริง เช่น มัสยิด 3D printed ในเจดดาห์ที่รายงานว่าสร้างเสร็จในปี 2024 และมีการเชื่อมโยงกับแนวโน้ม Construction technology ภายใต้ Vision 2030 [15] อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบหลักฐานจากแหล่งทางการที่ระบุว่ามีกฎหมายเฉพาะสำหรับ 3DCP เทียบเท่ากับ Decree ของดูไบ ดังนั้น ซาอุดิอาระเบียเป็น ประเทศที่มีการประยุกต์ใช้จริง ไม่ใช่ ประเทศที่มีกฎหมายเฉพาะชัดเจนแล้ว

ทั้งนี้สามารถดูข้อมูลเปรียบเทียบสถานะแต่ละประเทศได้ในตารางที่ 3

8. มาตรฐานสากลและกรอบเปรียบเทียบเชิงระบบ

ในปัจจุบัน มาตรฐานและเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างบ้านด้วยเทคโนโลยี 3D Concrete Printing ยังไม่ได้รวมเป็นมาตรฐานเดียวที่ใช้บังคับทั่วโลก แต่ประกอบด้วยหลายกลุ่ม ได้แก่ ICC-ES AC509 สำหรับการประเมินผนังคอนกรีตพิมพ์สามมิติ, UL 3401 สำหรับการประเมินระบบก่อสร้าง 3D printed building construction, IRC Appendix AW และ 2024 IRC Appendix BM สำหรับการออกแบบ ก่อสร้าง และตรวจสอบอาคารพักอาศัยที่ใช้เทคนิค 3D printing, ISO/ASTM 52939:2023 สำหรับหลักการรับรองคุณภาพของ Additive construction และแนวทางวิชาการจาก ACI Committee 564 และ RILEM TC 276-DFC ในด้านวัสดุซีเมนต์และ Digital fabrication

ดังนั้น การนำ 3DCP มาใช้ในประเทศไทยควรอาศัยกฎหมายควบคุมอาคารเดิมร่วมกับมาตรฐานเหล่านี้ เพื่อพิสูจน์สมรรถนะด้านโครงสร้าง วัสดุ ความทนทาน อัคคีภัย และการควบคุมคุณภาพของระบบก่อสร้าง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกรณีศึกษาในต่างประเทศ

ประเทศ/โครงการ	กลไกทางกฎหมายหรือการอนุมัติ	บทเรียนสำหรับไทย
Dubai, UAE	Decree No. 24 of 2021 กำหนด permit การขึ้นทะเบียนวิศวกร/ผู้รับเหมา การรับรองเครื่องพิมพ์ วัสดุ การทดสอบ และประกันภัย [8], [9]	เหมาะเป็นต้นแบบเมื่อรัฐพร้อมกำกับห่วงโซ่ทั้งหมด แต่ต้องมีศักยภาพหน่วยงานและห้องทดสอบ
สหรัฐอเมริกา	ใช้ building code เดิมและ alternative materials and methods ร่วมกับ AC509, UL 3401 และ IRC Appendix BM; ขึ้นกับการรับรองของท้องถิ่น [10,16-18,22]	แยก code requirement ออกจาก evaluation evidence และเปิดช่องอนุมัติระบบใหม่
Beckum, Germany	Approval for individual case ร่วมกับมาตรฐานเดิมและการทดสอบองค์ประกอบขนาดใหญ่ [12]	เหมาะกับช่วงเปลี่ยนผ่านที่ยังไม่มีมาตรฐานเฉพาะ แต่ต้องกำหนดผู้ประเมินอิสระ
Project Milestone, Netherlands	บ้านพิมพ์เป็นชิ้นส่วน off-site ได้รับอนุญาตเข้าอยู่อาศัยภายใต้ข้อกำหนดอาคารเดิม [13]	ชี้ว่าการใช้กฎหมายเดิมเป็นไปได้ เมื่อมีหลักฐานระบบและการควบคุมการผลิตเพียงพอ
Singapore	รัฐสนับสนุนงานวิจัยและโครงการนำร่องผ่านมหาวิทยาลัย อุตสาหกรรม และหน่วยงานด้านอาคาร [14]	เหมาะกับโมเดล sandbox และการสร้างฐานข้อมูลก่อนออกข้อกำหนดถาวร

8.1 ICC-ES AC509

ICC-ES AC509 ชื่อเต็มคือ Acceptance Criteria for 3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls คือ เกณฑ์การยอมรับ (Acceptance criteria) สำหรับเทคโนโลยีการก่อสร้างอัตโนมัติในการขึ้นรูปผนังคอนกรีตแบบ 3 มิติ (3D Printed concrete walls) ใช้ประเมินระบบผนังคอนกรีตที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี 3D automated construction หรือ 3DCP ซึ่งจัดทำขึ้นโดยองค์กร ICC Evaluation Service (ICC-ES) เพื่อใช้เป็นกรอบมาตรฐานในการประเมินและตรวจสอบความปลอดภัย ความแข็งแรง และความทนทานของอาคารที่สร้างด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ [10] มาตรฐานนี้จะเน้นการตรวจสอบองค์ประกอบสำคัญ 3 ด้านหลัก คือ

- **คุณสมบัติวัสดุและความทนทาน:** ตรวจสอบสูตรคอนกรีตเฉพาะ (Proprietary concrete mix) ที่ใช้พิมพ์
- **ประสิทธิภาพทางโครงสร้าง:** ทดสอบความแข็งแรงและการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีต 3 มิติ
- **การทนไฟ:** ประเมินความปลอดภัยและการทนต่อความร้อนเมื่อเกิดอัคคีภัย [16]

จุดสำคัญของ AC509 คือไม่ได้พิจารณาเพียงชิ้นงานสุดท้าย แต่พิจารณาทั้งกระบวนการผลิตและหลักฐานการทดสอบเพื่อยืนยันว่าองค์ประกอบอาคารสามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดของกฎหมายอาคารได้

สำหรับประเทศไทย AC509 สามารถใช้เป็นเอกสารอ้างอิงเพื่อประกอบการพิจารณาในกรณีที่ต้องพิสูจน์ว่าองค์ประกอบผนัง 3DCP มีสมรรถนะเทียบเท่าหรือไม่น้อยกว่าระบบผนังหรือโครงสร้างที่กฎหมายไทยยอมรับอยู่แล้ว โดยเฉพาะในโครงการนำร่อง บ้านพักอาศัยขนาดเล็ก อาคารชั้นเดียว หรือองค์ประกอบที่ยังไม่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักเต็มรูปแบบ สิ่งที่เกี่ยวข้องกับ AC509 แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับ AC509

ประเด็น	สิ่งที่ต้องพิสูจน์
วัสดุพิมพ์	mix design, compressive strength, durability
ผนัง	load-bearing / non-load-bearing / shear wall
รอยต่อชั้นพิมพ์	interlayer bonding
โครงสร้าง	structural performance
ไฟ	fire-resistance
คุณภาพ	inspection, sampling, quality control

8.2 UL 3401

UL 3401 หรือ Outline of Investigation for 3D Printed Building Construction เป็นเอกสารของ UL ที่ใช้ประเมินระบบก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติ โดย UL Solutions ระบุว่าเอกสารนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินและยืนยันคุณภาพของอุปกรณ์และระบบ 3D printing สำหรับงานก่อสร้าง [17] Outline of investigation for 3D Printed building construction เป็นแนวทางการประเมินองค์ประกอบและโครงสร้างที่ผลิตด้วยกระบวนการ Additive manufacturing (AM) โดยครอบคลุมทั้งผนัง พื้น หลังคา เสา คาน และองค์ประกอบอาคารอื่น ๆ [18] ลักษณะเด่นของ UL 3401 คือการมอง 3DCP เป็นระบบที่ประกอบด้วยเครื่องพิมพ์ วัสดุ กระบวนการผลิต และผลลัพธ์ทางอาคาร จึงให้ความสำคัญกับความสม่ำเสมอของการผลิตและการพิสูจน์ว่าองค์ประกอบที่ผลิตซ้ำสามารถมีคุณสมบัติตามที่ออกแบบได้จริง โดยส่วนที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 5

ในเชิงกฎหมาย UL 3401 ช่วยเติมช่องว่างที่กฎหมายอาคารทั่วไปไม่ได้กล่าวถึง เช่น การตรวจสอบเครื่องพิมพ์ การควบคุมกระบวนการพิมพ์ และความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับเครื่องจักร ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญมากสำหรับ 3DCP เพราะความผิดพลาดอาจไม่ได้เกิดจากช่างคนเดียว แต่อาจเกิดจากชุดคำสั่งดิจิทัล ความเร็วหัวพิมพ์ อัตราการไหลของวัสดุ หรือสภาพแวดล้อมหน้างาน

ตารางที่ 5 ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับ UL 3401

ส่วนของระบบ	ตัวอย่างสิ่งที่ต้องควบคุม
Design organization	องค์กรออกแบบ/ผลิตต้องมีระบบคุณภาพ
Production equipment	เครื่องพิมพ์ หัวพิมพ์ setting nozzle
Fabrication process	การเตรียมวัสดุ การพิมพ์ การ curing การ finishing
System components	ผนัง พื้น หลังคา ช่องเปิด จุดต่อ
Inspection	การตรวจสอบระหว่างและหลังผลิต

8.3 ISO/ASTM 52939:2023

ISO/ASTM 52939:2023 ชื่อเต็มคือ Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements เป็นมาตรฐานสากลที่สำคัญมาก เพราะไม่ได้มองเฉพาะบ้าน แต่ครอบคลุม Additive construction สำหรับองค์ประกอบอาคารและโครงสร้างพื้นฐาน [19] มาตรฐานนี้มีความสำคัญเนื่องจากมุ่งวางระบบการประกันคุณภาพในระดับกระบวนการ ตั้งแต่ข้อมูลดิจิทัล วัสดุ เครื่องจักร บุคลากร การผลิต การตรวจสอบ และการส่งมอบ ในบริบทไทย ISO/ASTM 52939:2023 อาจใช้เป็นกรอบในการจัดทำคู่มือควบคุมคุณภาพสำหรับโครงการ 3DCP โดยเฉพาะในกรณีที่รัฐยังไม่มีมาตรฐานเฉพาะ หากนำมาปรับใช้ร่วมกับกฎหมายควบคุมอาคาร จะช่วยให้การพิจารณาโครงการมีระบบเอกสารหลักฐาน และขั้นตอนตรวจสอบที่ชัดเจนขึ้น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับ ISO/ASTM 52939

ช่วงงาน	สิ่งที่มาตรฐานช่วยกำกับ
ก่อนพิมพ์	digital model, material, machine, procedure
ระหว่างพิมพ์	process control, site operation, layer deposition
หลังพิมพ์	inspection, qualification, documentation
ระบบคุณภาพ	traceability, repeatability, personnel qualification

8.4 ACI Committee 564

ACI Committee 564: 3-D Printing with Cementitious Materials เป็นคณะกรรมการของ American Concrete Institute ที่มีภารกิจในการพัฒนาและรายงานองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิมพ์สามมิติหรือ additive manufacturing ด้วยวัสดุซีเมนต์ [20] แม้แนวทางของ ACI Committee 564 ยังอยู่ในกระบวนการพัฒนาทางวิชาการและวิชาชีพ ทั้งด้าน Technical reports, Guide และ Future standards มากกว่าการเป็นมาตรฐานบังคับเต็มรูปแบบเหมือน ACI 318 แต่มีความสำคัญในฐานะแหล่งองค์ความรู้ด้านวัสดุซีเมนต์ การเสริมกำลัง การทดสอบ และคุณภาพของงานพิมพ์

สำหรับประเทศไทย การติดตามแนวทางของ ACI มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบวิศวกรรมโครงสร้างไทยมีความคุ้นเคยกับแนวคิดและมาตรฐานคอนกรีตเสริมเหล็กของสหรัฐอเมริกาในระดับหนึ่ง การนำหลักคิดของ ACI มาใช้ร่วมกับมาตรฐานไทยจึงอาจทำได้ง่ายกว่าการเริ่มต้นใหม่ทั้งหมดจากศูนย์

8.5 IRC Appendix AW และ 2024 IRC Appendix BM

ถ้ากล่าวถึงเฉพาะ “บ้าน” มาตรฐานที่ตรงที่สุดคือ International Residential Code: IRC Appendix AW / Appendix BM

ในปี 2021 IRC มี Appendix AW: 3D Printed Building Construction ซึ่งให้ข้อกำหนดด้านการออกแบบ การก่อสร้าง และการตรวจสอบอาคารหรือองค์ประกอบอาคารที่สร้างด้วยเทคนิค 3D printing [21] ต่อมาในปี 2024 IRC มี Appendix BM: 3D Printed Building Construction โดย ICC อธิบายว่า appendix นี้จัดทำขึ้นเพื่อรองรับการออกแบบ การก่อสร้าง และการตรวจสอบ 3D building construction และเชื่อมโยงกับ UL 3401 เพื่อให้เทคนิค 3D printed มีระดับความปลอดภัยและสมรรถนะเทียบเท่างานก่อสร้างเดิมใน code [22] ประเด็นสำคัญคือ Appendix ไม่ได้ใช้บังคับอัตโนมัติทุกที่ เมืองหรือรัฐต้อง “adopt” เข้าไปใน code ของตนก่อน หรือ Building official ต้องยอมรับเป็นวิธีทางเลือก หรือ “Alternative method” ทั้งนี้มีประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับ IRC Appendix AW/ 2024 IRC Appendix BM

หมวด	ความหมาย
Fabrication process	เตรียมพื้นที่ วัสดุ การพิมพ์ curing finishing การใส่องค์ประกอบ
Production equipment	เครื่องพิมพ์ setting nozzle และอุปกรณ์ที่ใช้ผลิต
System components	ผนัง ฉากกั้น roof assemblies structural components
Connections	วิธีเชื่อมต่อองค์ประกอบเข้าด้วยกัน
Inspection	การตรวจสอบงานก่อสร้าง 3D printed

8.6 RILEM TC 276-DFC

RILEM หรือ International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures เป็นองค์กรนานาชาติด้านวัสดุก่อสร้าง ระบบ และโครงสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับวัสดุก่อสร้าง ระบบ และโครงสร้าง [23] Technical Committee 276-DFC เป็นกลุ่มวิชาการด้าน Digital fabrication with cement-based materials ที่ถูกกล่าวถึงร่วมกับ ISO/ASTM 52939 และ ACI 564 ในฐานะกลุ่มที่กำลังพัฒนาองค์ความรู้และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับ 3D concrete printing [24]

ตัวนี้ไม่ได้เป็น building code แต่มีประโยชน์มากสำหรับงานวิจัย เพราะ RILEM มักลงลึกเรื่องวัสดุ วิธีทดสอบ พฤติกรรมการพิมพ์ ความทนทาน และคุณภาพของ cement-based materials

8.7 Dubai 3D Printing Construction Regulation/Standards

ตัวนี้ไม่ได้เป็น building code แต่มีประโยชน์มากสำหรับงานวิจัย เพราะ RILEM มักลงลึกเรื่องวัสดุ วิธีทดสอบ พฤติกรรมการพิมพ์ ความทนทาน และคุณภาพของ cement-based materials Decree No. 24 of 2021 ถูกออกมาเพื่อกำกับการใช้เทคโนโลยี 3D printing ในภาคก่อสร้างของดูไบ ทั้งเรื่องของการออก Permit, Contractor classification, Consultant registration, Printer conformity Certificate, Material testing และการกำกับดูแลการใช้เทคโนโลยี 3D printing ในงานก่อสร้าง [25] และมีเป้าหมายให้ภายในปี 2030 อาคารใหม่ในดูไบ 25% ใช้เทคโนโลยี 3D printing ตัวกฤษฎีการะบุว่าบังคับใช้กับงานก่อสร้างที่ใช้เทคโนโลยี 3D printing ใน Emirate of Dubai รวมถึงเขตพัฒนาพิเศษและ free zones [26]

กรณีดูไบควรจัดเป็น Regulatory framework มากกว่ามาตรฐานวัสดุเดี่ยว ๆ เพราะครอบคลุมทั้งการอนุญาต เครื่องพิมพ์ วัสดุ ผู้รับเหมา และผู้ประกอบวิชาชีพ ทั้งนี้ ตารางสรุปมาตรฐาน และประเทศต่าง ๆ เป็นไปดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 สรุปมาตรฐาน/เอกสาร 3DCP และแหล่งที่มา

มาตรฐาน / เอกสาร	องค์กรเจ้าของ / ผู้ออก	ประเทศ / สถานะองค์กร	ลักษณะองค์กร	บทบาทต่อ 3DCP
ICC-ES AC509	ICC Evaluation Service/ICC-ES	สหรัฐอเมริกา	หน่วยประเมินผลิตภัณฑ์ วัสดุ และระบบอาคารในเครือ International Code Council	ใช้ประเมินระบบผนังคอนกรีตพิมพ์สามมิติให้สอดคล้องกับ building code
IRC Appendix AW / 2024 IRC Appendix BM	International Code Council: ICC	สหรัฐอเมริกา	องค์กรจัดทำ model codes เช่น IBC, IRC	เป็นภาคผนวกในรหัสอาคารพักอาศัย สำหรับ 3D Printed Building Construction
UL 3401	UL Standards & Engagement/UL	สหรัฐอเมริกา	องค์กรด้านมาตรฐานความปลอดภัย การทดสอบ และการรับรอง	ใช้ประเมินระบบ 3D Printed Building Construction ทั้งเครื่องพิมพ์ กระบวนการ และองค์ประกอบอาคาร
ISO/ASTM 52939:2023	ISO ร่วมกับ ASTM International	ISO = องค์กรสากล มีสำนักงานที่สวิตเซอร์แลนด์ / ASTM = สหรัฐอเมริกา	องค์กรมาตรฐานระหว่างประเทศ	ใช้กำหนดหลักการประกันคุณภาพและ qualification สำหรับ additive construction
ACI Committee 564	American Concrete Institute: ACI	สหรัฐอเมริกา	องค์กรวิชาชีพด้านคอนกรีต	พัฒนาองค์ความรู้และรายงานด้าน 3D printing with cementitious materials
RILEM TC 276-DFC	RILEM	องค์กรนานาชาติ มีฐานในยุโรป	เครือข่ายผู้เชี่ยวชาญด้านวัสดุก่อสร้าง ระบบ และโครงสร้าง	พัฒนาองค์ความรู้ด้าน digital fabrication with cement-based materials

ตารางที่ 9 สรุปเนื้อหาและระดับการกำดับของมาตรฐานต่าง ๆ

เอกสาร	ระดับการกำกับ	ประเด็นหลัก	สิ่งที่ยังต้องอาศัยกฎหมาย/เอกสารอื่น
ICC-ES AC509	เกณฑ์ประเมินระบบ/ผลิตภัณฑ์	วัสดุ ความทนทาน ผนังรับแรง/ไม่รับแรง การทนไฟ และ QC [16]	การอนุญาตโครงการ ผังเมือง ระบบอาคารอื่น และความรับผิดชอบวิชาชีพ
UL 3401	Outline of Investigation	เครื่องพิมพ์ วัสดุ กระบวนการผลิต และความสม่ำเสมอขององค์ประกอบ [17], [18]	แบบโครงสร้างเฉพาะโครงการและข้อกำหนดท้องถิ่น
ISO/ASTM 52939:2023	มาตรฐานระบบคุณภาพ	การ qualification กระบวนการ บุคลากร เอกสาร traceability และลำดับกิจกรรม [19], [25]	ไม่ครอบคลุมการอนุมัติแบบและการกำหนดคุณสมบัติวัสดุเฉพาะ
IRC Appendix BM	ข้อกำหนด code สำหรับที่อยู่อาศัย	การออกแบบ ก่อสร้าง และตรวจสอบอาคาร 3D printed ในขอบเขตที่กำหนด [22]	ใช้ได้เมื่อเขตอำนาจรับ code และอาคารอยู่ในขอบเขต
ACI 564 / RILEM	องค์ความรู้และงานพัฒนามาตรฐาน	วัสดุซีเมนต์ การทดสอบ การเสริมกำลัง และ digital fabrication [20], [23]	ยังต้องแปลงเป็นเกณฑ์บังคับหรือข้อกำหนดโครงการ

9. ช่องว่างทางกฎหมายและมาตรฐานในประเทศไทย

เมื่อพิจารณากฎหมายไทยร่วมกับมาตรฐานต่างประเทศ พบช่องว่างสำคัญอย่างน้อย 6 ประเด็น

ประการแรก คือช่องว่างด้านนิยาม กฎหมายไทยยังไม่ได้ระบุว่า 3DCP เป็นระบบก่อสร้างประเภทใด เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นผนังสำเร็จรูป เป็นวัสดุใหม่ หรือเป็นระบบก่อสร้างพิเศษ ความไม่ชัดเจนนี้ส่งผลต่อวิธีการยื่นแบบรายการคำนวณ และเอกสารประกอบการอนุญาต

ประการที่สอง คือช่องว่างด้านวัสดุ วัสดุสำหรับ 3DCP ต้องมีคุณสมบัติทั้งในสภาวะสดและสภาวะแข็งตัว ได้แก่ ความสามารถในการไหลผ่านหัวพิมพ์ ความสามารถในการคงรูป การรับน้ำหนักชั้นถัดไป ระยะเวลาเซตตัว กำลังอัด กำลังดัด และการยึดเกาะระหว่างชั้น [4] คุณสมบัติเหล่านี้ไม่เหมือนคอนกรีตทั่วไปทั้งหมด จึงต้องมีวิธีทดสอบเฉพาะ

ประการที่สาม คือช่องว่างด้านโครงสร้างและการเสริมกำลัง อาคารคอนกรีตทั่วไปสามารถอ้างอิงระบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีมาตรฐานรองรับ แต่ 3DCP มักมีความท้าทายในการวางเหล็กเสริมแนวดิ่ง แนวนอน จุดต่อมุมผนัง ช่องเปิด และรอยต่อระหว่างองค์ประกอบ หากไม่มีแนวทางการเสริมกำลังที่ชัดเจน จะทำให้การรับรองความปลอดภัยของอาคารทำได้ยาก

ประการที่สี่ คือช่องว่างด้านอัคคีภัยและความทนทาน ผนัง 3DCP อาจมีโพรงภายในหรือมีรูปทรงหน้าตัดที่แตกต่างจากผนังคอนกรีตทั่วไป จึงต้องพิสูจน์สมรรถนะด้านการทนไฟ การลามไฟ การกันเสียง การกันความชื้น และความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ไม่ใช่ดูเพียงกำลังอัดของวัสดุ

ประการที่ห้า คือช่องว่างด้านการควบคุมคุณภาพหน้างาน งาน 3DCP มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหน้างานหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความต่อเนื่องของวัสดุ ความเร็วหัวพิมพ์ ความแม่นยำของแกนเครื่องจักร และความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งพิมพ์ หากไม่มีแผนตรวจสอบระหว่างพิมพ์ ความเสียหายอาจเกิดขึ้นโดยตรวจพบช้าเกินไป

ประการที่หก คือช่องว่างด้านความรับผิดทางวิชาชีพ ในงานก่อสร้างทั่วไป ความรับผิดมักแบ่งระหว่าง

สถาปนิก วิศวกร ผู้รับเหมา และผู้ควบคุมงาน แต่ใน 3DCP มีผู้เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้น เช่น ผู้พัฒนาเครื่องพิมพ์ ผู้ผลิตวัสดุ ผู้เขียนซอฟต์แวร์ ผู้สร้างไฟล์พิมพ์ และผู้ควบคุมระบบดิจิทัล จึงต้องกำหนดขอบเขตความรับผิดให้ชัดเจน ทั้งนี้สามารถสรุปช่องว่างต่าง ๆ และแนวทางการเติมช่องว่างเหล่านั้นได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ช่องว่างเกี่ยวกับ 3DCP และแนวทางการเติมช่องว่างเสนอแนะ

มิติ	สิ่งที่กฎหมายไทยควบคุมได้	ช่องว่างเฉพาะ 3DCP	หลักฐาน/แนวทางเติมช่องว่าง
สถานะอาคาร	การขออนุญาต ประเภทอาคาร ระยะร่น ผังเมือง	ไม่มีประเภทอาคาร 3DCP แยกเฉพาะ	ไม่จำเป็นต้องสร้างประเภทใหม่ทันที ใช้การจำแนกระดับความเสี่ยง
วัสดุ	กำลังและคุณภาพวัสดุก่อสร้างทั่วไป	anisotropy, interlayer bond, print window, cold joint	แผนทดสอบวัสดุหลายทิศทางและชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกระบวนการจริง
โครงสร้าง	แบบ รายการคำนวณ และผู้รับผิดชอบ	การเสริมกำลัง จุดต่อ ช่องเปิด และความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์	ทดสอบองค์ประกอบ/ต้นแบบเต็มขนาดและ independent review
เครื่องจักร/ดิจิทัล	แทบไม่มีข้อกำหนดเฉพาะในกฎหมายอาคาร	calibration, toolpath, software version, parameter log	machine qualification, digital change control และบันทึกการพิมพ์
อัคคีภัย/ความทนทาน	กำหนดผลลัพธ์ด้านความปลอดภัยทั่วไป	โพรง รูปหน้าตัด รอยต่อ และวัสดุเฉพาะสูตร	fire test/assessment, moisture, durability และระบบป้องกันผิว
QC และการตรวจรับ	มีผู้ควบคุมงานและการตรวจอาคาร	ไม่กำหนด hold point ระหว่างพิมพ์และ traceability	Inspection and Test Plan พร้อม witness/hold point
ความรับผิด	สถาปนิก วิศวกร ผู้ควบคุมงาน และผู้รับเหมา	บทบาทผู้ผลิตระบบ ซอฟต์แวร์ และ operator ไม่ชัด	responsibility matrix, manufacturer declaration และประกันภัย

10. แนวทางการประยุกต์ใช้กฎหมายเดิมกับโครงการ 3DCP ในประเทศไทย

ในระยะสั้น ประเทศไทยสามารถใช้แนวทาง “กฎหมายเดิม + หลักฐานสมรรถนะ + มาตรฐานอ้างอิง” เพื่อรองรับโครงการ 3DCP ได้ โดยมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

หนึ่ง โครงการต้องยื่นขออนุญาตตามกฎหมายควบคุมอาคารตามปกติ ไม่ควรตีความว่า 3DCP เป็นเพียงงานทดลองที่อยู่นอกระบบการควบคุมอาคาร เพราะเมื่อมีการใช้งานเป็นอาคารจริง ย่อมต้องรับผิดชอบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคารเช่นเดียวกับอาคารทั่วไป

สอง ผู้ออกแบบควรจัดทำเอกสารแสดงระบบก่อสร้างเฉพาะ ได้แก่ รายละเอียดเครื่องพิมพ์ วัสดุผสม ขั้นตอนการพิมพ์ การควบคุมคุณภาพ วิธีการเสริมกำลัง จุดต่อ ช่องเปิด ระบบกันซึม ระบบป้องกันอัคคีภัย และมาตรการตรวจสอบหลังการพิมพ์ โดยอาจอ้างอิงหลักการของ AC509, UL 3401 และ ISO/ASTM 52939:2023

สาม ควรเริ่มจากประเภทอาคารที่มีความเสี่ยงต่ำก่อน เช่น อาคารชั้นเดียว อาคารขนาดเล็ก อาคารทดลอง ศาลา อาคารบริการ หรือบ้านพักอาศัยที่มีระบบโครงสร้างหลักแยกจากผนังพิมพ์สามมิติ เพื่อลดความเสี่ยงในระยะแรก ก่อนขยายไปสู่อาคารหลายชั้นหรือผนังรับน้ำหนักเต็มรูปแบบ

สี่ ต้องมีการทดสอบวัสดุและองค์ประกอบจริง ไม่ใช่อาศัยค่ากำลังอัดของลูกปูนมาตรฐานเพียงอย่างเดียว เพราะพฤติกรรมของชิ้นงานพิมพ์ขึ้นกับทิศทางการพิมพ์ การยึดเกาะระหว่างชั้น และคุณภาพของกระบวนการพิมพ์ การทดสอบจึงควรรวมถึงชิ้นตัวอย่างที่ผลิตด้วยเครื่องและกระบวนการเดียวกับงานจริง

ห้า ควรกำหนดแผน Inspection and Test Plan: ITP สำหรับ 3DCP โดยเฉพาะ เช่น การตรวจสอบวัตถุดิบก่อนพิมพ์ การทดสอบ rheology ของวัสดุ การตรวจสอบขนาดชั้นพิมพ์ การตรวจสอบความคลาดเคลื่อน การบันทึกพารามิเตอร์เครื่องพิมพ์ การเก็บตัวอย่างระหว่างพิมพ์ และการตรวจรับหลังพิมพ์

หก ต้องมีวิศวกรและผู้ควบคุมงานที่รับผิดชอบชัดเจน โดยเฉพาะกรณีที่ชิ้นส่วน 3DCP ทำหน้าที่รับน้ำหนักหรือเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของอาคาร การรับรองควรครอบคลุมทั้งแบบโครงสร้าง รายการคำนวณ วัสดุ กระบวนการผลิต และผลการทดสอบ

11. ข้อเสนอเชิงนโยบายสำหรับประเทศไทย

เพื่อให้ 3DCP สามารถพัฒนาในประเทศไทยได้อย่างปลอดภัยและไม่ติดหล่มกับระบบอนุญาตแบบเดิม ควรมีข้อเสนอเชิงนโยบายดังนี้

ประการแรก ควรจัดทำแนวปฏิบัติชั่วคราวสำหรับการขออนุญาตอาคาร 3DCP โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง หรือหน่วยงานวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เจ้าพนักงานท้องถิ่น ผู้ออกแบบ และเจ้าของโครงการมีหลักเกณฑ์เบื้องต้นร่วมกัน

ประการที่สอง ควรพัฒนามาตรฐานการทดสอบวัสดุ 3DCP ในประเทศ เช่น การทดสอบกำลังอัดตามทิศทางการพิมพ์ การทดสอบแรงดึงแยก การทดสอบแรงดัด การทดสอบการยึดเกาะระหว่างชั้น และการทดสอบความทนทานต่อสภาพอากาศร้อนชื้น

ประการที่สาม ควรจัดทำระบบรับรองเครื่องพิมพ์และกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากหลักการของ UL 3401 และ ISO/ASTM 52939:2023 เพื่อให้ระบบการพิมพ์มีความสม่ำเสมอและสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้

ประการที่สี่ ควรส่งเสริมโครงการนำร่องภายใต้การกำกับร่วมระหว่างมหาวิทยาลัย หน่วยงานรัฐ วิศวกร ผู้ผลิตวัสดุ และองค์กรวิชาชีพ เพื่อสร้างฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ไม่ใช่อ้างอิงข้อมูลจากต่างประเทศอย่างเดียว เพราะสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน

ประการที่ห้า ควรพัฒนาแนวทางกฎหมายแบบ performance-based regulation คือไม่จำกัดเฉพาะวิธีการก่อสร้างแบบเดิม แต่กำหนดผลลัพธ์ที่อาคารต้องทำได้ เช่น ความมั่นคงแข็งแรง ความปลอดภัยจากอัคคีภัย ความทนทาน สุขอนามัย และการใช้งานได้จริง หากระบบ 3DCP สามารถพิสูจน์ได้ว่ามีสมรรถนะเทียบเท่าหรือดีกว่า ก็ควรมีช่องทางให้ได้รับอนุญาต

12. สรุป

3D Concrete Printing เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการเปลี่ยนแปลงกระบวนการก่อสร้าง แต่การนำมาใช้ในงานอาคารจริงจำเป็นต้องพิจารณามิติทางกฎหมายและมาตรฐานอย่างรอบด้าน ในประเทศไทย แม้กฎหมายควบคุมอาคารยังไม่มีบทบัญญัติเฉพาะสำหรับ 3DCP แต่ไม่ได้หมายความว่าไม่สามารถใช้เทคโนโลยีนี้ได้ หากผู้ออกแบบและผู้เกี่ยวข้องสามารถพิสูจน์ความมั่นคงแข็งแรง ความปลอดภัย และคุณภาพของระบบได้อย่างเพียงพอ

แนวทางที่เหมาะสมในระยะปัจจุบัน คือการใช้กฎหมายควบคุมอาคารเดิมเป็นฐาน ร่วมกับการอ้างอิงมาตรฐานต่างประเทศ เช่น ICC-ES AC509, UL 3401, ISO/ASTM 52939:2023 และองค์ความรู้จาก ACI

Committee 564 เพื่อจัดทำเอกสารประกอบการขออนุญาต การทดสอบ และการควบคุมคุณภาพอย่างเป็นระบบ ในระยะยาว ประเทศไทยควรพัฒนามาตรฐานเฉพาะสำหรับ 3DCP ที่สอดคล้องกับบริบทวัสดุ แรงงาน สภาพภูมิอากาศ ระบบราชการ และอุตสาหกรรมก่อสร้างภายในประเทศ

กล่าวโดยสรุป ความท้าทายของ 3DCP ไม่ได้อยู่ที่ว่า “เครื่องพิมพ์สร้างบ้านได้หรือไม่” แต่อยู่ที่ว่า “ระบบกฎหมายและวิชาชีพสามารถพิสูจน์และรับรองความปลอดภัยของบ้านที่ถูกพิมพ์ขึ้นมาได้อย่างไร” หากตอบคำถามนี้ได้ 3DCP จะไม่ใช่เพียงภาพข่าวน่าตื่นเต้น แต่จะกลายเป็นเครื่องมือจริงในการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. *Automation in Construction, 13*(1), 5–19. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012

[2] 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*, 262-268. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010

[3] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2564). *คำอธิบายสรุปสาระสำคัญของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522*. กระทรวงมหาดไทย. https://info.dpt.go.th/app-service/wan/lawdpt/data/07/2564/description_law01.pdf

[4] Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z., & Du, S. (2021). Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites, 122*, 104115. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115

[5] SCG. (n.d.). *SCG 3D Printing: เทคโนโลยีการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยปูนมอร์ตาร์*. SCG Smart Living. https://www.scgsmartliving.com/product/structure/scg-3d-printing

[6] Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University. (n.d.). *Sustainable Construction Material and Innovation Research Unit*. https://www.eg.mahidol.ac.th/dept/egce/scmi/

[7] Dubai Municipality. (n.d.). *3D printing in the construction sector*. Retrieved June 24, 2026, from https://www.dm.gov.ae/municipality-business/3d-printing-in-the-construction-sector/

[8] Government of Dubai. (2021). *Decree No. (24) of 2021 regulating the use of three-dimensional printing in construction works in the Emirate of Dubai*. Dubai Legislation Portal. https://dlp.dubai.gov.ae/Legislation%20Reference/2021/Decree%20No.%20%2824%29%20of%202021%20Regulating%20the%20Use%20of%20Three-dimensional%20Printing%20in%20Construction%20Works.pdf

[9] Dubai Municipality. (n.d.). *3D printing in the construction sector*. Retrieved June 23, 2026, from https://www.dm.gov.ae/municipality-business/3d-printing-in-the-construction-sector/

[10] ICC Evaluation Service. (n.d.). *3D printing*. https://icc-es.org/3d-printing/

[11] ICC Evaluation Service. (2022, October 5). First ICC-ES report to AC509 for 3D concrete walls issued to Black Buffalo 3D Corporation. *ICC Evaluation Service*. https://icc-es.org/news/ac509-3d-concrete-walls-black-buffalo-3d-corporation-nr/

[12] Weger, D., Stengel, T., Gehlen, C., Maciejewski, Y., & Meyer-Brötz, F. (2021). Approval for the construction of the first 3D printed detached house in Germany—Significance of large scale element testing. In S. Z. Jones & E. L. Kreiger (Eds.), *Standards development for cement and concrete for use in additive construction* (pp. 144–169). ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP163620200119

[13] 3dprintedhouse. (2021, April 30). *First resident of 3D-printed concrete house receives key*. https://www.3dprintedhouse.nl/en/news/5257/first-resident-of-3d-printed-concrete-house-receives-key/

[14] National University of Singapore College of Design and Engineering. (2026, May 11). *NUS researchers advance sustainable 3D concrete printing for the construction industry*. EurekAlert! https://www.eurekalert.org/news-releases/1127572

[15] Marketing & Communications. (2024, July 24). *Next-gen construction: Saudi Arabia's shift to 3D printing and modules*. Saudi Construction Consulting. https://saudiconstructionconsulting.com/insights/articles/next-gen-construction-saudi-arabias-shift-to-3d-printing-and-modules

[16] ICC Evaluation Service. (2023). *Acceptance criteria for 3D automated construction technology for 3D concrete walls: AC509*. ICC-ES. https://icc-es.org/wp-content/uploads/AC509-0823-R1-Staff-Letter-and-Draft.pdf

[17] UL Solutions. (n.d.). *UL Solutions helps build safety with 3D printed technology*. https://www.ul.com/resources/ul-helps-build-safety-3d-printed-technology

[18] UL Standards & Engagement. (2022). *UL 3401: Outline of investigation for 3D printed building construction*. UL Standards & Engagement. https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=UL3401_2_O_20221128

[19] [8] International Organization for Standardization, & ASTM International. (2023). *ISO/ASTM 52939:2023 Additive manufacturing for construction—Qualification principles—Structural and infrastructure elements*. ISO. https://www.iso.org/standard/81177.html

[20] American Concrete Institute. (n.d.). *ACI Committee 564: 3-D printing with cementitious materials*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/getinvolved/committees/directoryofcommittees/acommitteeHome.aspx?committee_code=C0056400

[21] International Code Council. (2021). Appendix AW: 3D printed building construction. In *2021 International Tiny House Provisions: Code, commentary and standards for design*. ICC Digital Codes. https://codes.iccsafe.org/content/THPOTIRC2021P1/appendix-aw-3d-printed-building-construction

[22] International Code Council. (2024). Appendix BM: 3D printed building construction. In *2024 International Residential Code (IRC)*. ICC Digital Codes. https://codes.iccsafe.org/content/IRC2024P2/appendix-bm-3d-printed-building-construction

[23] RILEM. (n.d.). *RILEM: The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*. Retrieved June 24, 2026, from https://www.rilem.net/

[24] Gamage, K., Fawzia, S., Zahra, T., Teixeira, M. B. F., & Sulong, N. H. R. (2024). Advancement in sustainable 3D concrete printing: A review on materials, challenges, and current progress in Australia. *Buildings, 14*(2), Article 494. https://doi.org/10.3390/buildings14020494

[25] International Organization for Standardization, & ASTM International. (2023). *ISO/ASTM 52939:2023: Additive manufacturing for construction—Qualification principles—Structural and infrastructure elements*. https://www.iso.org/standard/81177.html

[26] Government of Dubai. (2021). *Decree No. (24) of 2021 regulating the use of three-dimensional printing in construction works in the Emirate of Dubai*. Dubai Legislation Portal. https://dlp.dubai.gov.ae/Legislation%20Reference/2021/Decree%20No.%20%2824%29%20of%202021%20Regulating%20the%20Use%20of%20Three-dimensional%20Printing%20in%20Construction%20Works.pdf