

ประวัติศาสตร์และการพัฒนาการของดินในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรม

The History and Evolution of Earth as an Architectural Building Material

สิปปวิชญ์ กำบัง^{1*}Sippawich Kambung^{1*}¹ คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

¹ Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

* E-mail: sippawich.k@archd.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอการสำรวจประวัติศาสตร์อันยาวนานและการพัฒนาทางเทคนิคของการใช้ ดิน (Earth/Clay) ในฐานะวัสดุก่อสร้างหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์บทบาทของวัสดุนี้ในการกำหนดรูปแบบโครงสร้าง และอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมของสถาปัตยกรรม ตลอดจนศักยภาพของดินในการตอบสนองต่อความท้าทายด้านความยั่งยืนในยุคปัจจุบัน การศึกษารอบคอบตั้งแต่การค้นพบเทคนิคอิฐดินดิบ (Adobe) ในอารยธรรมเมโสโปเตเมีย (ราว 10,000 ปีก่อนคริสตกาล) และการพัฒนาเทคนิคดินอัด (Rammed Earth) ในภูมิภาคแห้งแล้ง จนกระทั่งการลดความสำคัญลงในช่วงการปฏิวัติอุตสาหกรรม

ผลการวิเคราะห์ทางเทคนิคในส่วนของเทคนิคสำคัญ เช่น Adobe, Rammed Earth และ Cob แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่โดดเด่นของดินในด้าน มวลความร้อนสูง (High Thermal Mass) และ พลังงานแฝงต่ำ (Low Embodied Energy) ในงานสถาปัตยกรรมร่วมสมัย ดินได้รับการฟื้นฟูโดยผ่านการใช้นวัตกรรมการคงสภาพ (Stabilization) และการบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การพิมพ์ 3 มิติด้วยดิน (3D Earth Printing) การอภิปรายสรุปว่า การกลับมาของสถาปัตยกรรมดินเป็นการเปลี่ยนกระบวนทัศน์จากความทันสมัยแบบอุตสาหกรรมไปสู่ความยั่งยืนเชิงนิเวศ โดยเน้นย้ำความจำเป็นในการพัฒนามาตรฐานทางวิศวกรรมและการวิจัยสารคงสภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ดินสามารถเป็นทางเลือกที่สำคัญและเชื่อถือได้สำหรับการก่อสร้างที่ยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ: สถาปัตยกรรมดิน, สถาปัตยกรรมยั่งยืน, เทคนิคการก่อสร้างด้วยดิน, ดินอัด

Abstract

This academic article explores the long history and technical evolution of Earth/Clay as a primary building material. The objective is to analyze its role in shaping the form, structure, and cultural identity of architecture, as well as its potential to address contemporary sustainability challenges. The study covers the historical timeline, beginning with the discovery of the Adobe

technique in Mesopotamian civilizations (circa 10,000 BCE) and the development of Rammed Earth in arid regions, through its decline during the Industrial Revolution.

Technical analysis of key techniques—including Adobe, Rammed Earth, and Cob—demonstrates the material's distinctive properties, notably its High Thermal Mass and Low Embodied Energy. In contemporary architecture, earth has experienced a significant revival using innovative stabilization techniques and integration with advanced technologies, such as 3D Earth Printing. The discussion concludes that the resurgence of earth architecture represents a paradigm shift from industrial modernity toward ecological sustainability. This study emphasizes the imperative need for developing robust engineering standards and researching eco-friendly stabilizers to ensure earth becomes a critical and reliable solution for sustainable construction in the future.

Keywords: Earth architecture, Sustainable architecture, Earth construction technique, Rammed earth

1. บทนำ

วัสดุก่อสร้างทำหน้าที่เป็นรากฐานทางกายภาพที่ กำหนดรูปแบบ (Form) และ โครงสร้าง (Structure) ของอาคารโดยตรง ตั้งแต่คุณสมบัติทางกลศาสตร์ เช่น กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ไปจนถึงพื้นผิวสัมผัส (Texture) และสี (Color) ล้วนส่งผลต่อการรับรู้ทางสุนทรียภาพ (Aesthetic Perception) ของผู้ใช้งาน ตัวอย่างเช่น การใช้วัสดุที่มีความโปร่งใสสูงอย่างกระจกช่วยสร้างความรู้สึกเปิดกว้างและเบาบาง ในขณะที่การใช้วัสดุที่มีมวลหนาแน่นอย่างคอนกรีตหรือหินจะสร้างความรู้สึกมั่นคงและหนักแน่น

นอกจากนี้ วัสดุยังเป็นกุญแจสำคัญในการสร้าง คุณภาพของพื้นที่ (Spatial Quality) ที่น่ารื่นรมย์ วัสดุที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการจัดการแสง (Light Reflection/Absorption) เสียง (Acoustic Performance) และความรู้สึกทางอุณหภูมิ (Thermal Properties) ภายในอาคาร ทำให้การเลือกวัสดุเป็นกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมกับศิลปะการออกแบบอย่างแยกไม่ออก

วัสดุก่อสร้างที่เลือกใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ถึง อัตลักษณ์ทางวัฒนธรรม (Cultural Identity) ของชุมชนนั้นๆ วัสดุดั้งเดิมหรือวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น (Local Materials) ไม่เพียงแต่แสดงถึงความชาญฉลาดในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่เท่านั้น แต่ยังเป็นส่วนหนึ่งของการถ่ายทอด ภูมิปัญญาดั้งเดิม (Vernacular Wisdom) ที่สั่งสมมาหลายชั่วอายุคน (Langenbach, 2016) เทคนิคการก่อสร้างแบบดั้งเดิมมักฝังแน่นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและบริบททางสังคม ทำให้สถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุท้องถิ่นมีความกลมกลืนและเป็นส่วนหนึ่งของภูมิทัศน์ทางวัฒนธรรมนั้นๆ

1.1 ดิน วัสดุดั้งเดิมแห่งความยั่งยืน

ในบริบทของการแสวงหาแนวทางที่ยั่งยืน (Sustainability) ในงานสถาปัตยกรรมปัจจุบัน ดิน (Earth/Clay) จึงถูกยกย่องให้เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีคุณค่าสูงสุด

1.1.1 การเข้าถึงและความยั่งยืน ดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ทั่วไปและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษ วัสดุที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเพียงเล็กน้อยนี้มี พลังงานแฝงต่ำมาก (Low Embodied Energy) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสมัยใหม่อย่างคอนกรีตหรือเหล็ก ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการผลิตและขนส่ง

1.1.2 ความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศ (Climatic Adaptability) โครงสร้างที่สร้างด้วยดิน (เช่น ดินอัด หรือ อิฐดินดิบ) มี มวลความร้อนสูง (High Thermal Mass) คุณสมบัตินี้ทำให้ผนังดินสามารถดูดซับและกักเก็บความร้อนในช่วงกลางวัน และค่อยๆ ปล่อยความร้อนออกมาในช่วงกลางคืน ซึ่งช่วย รักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ (Thermal Stability) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดความจำเป็นในการใช้ระบบปรับอากาศหรือทำ

ความร้อน ซึ่งนำไปสู่การประหยัดพลังงานตลอดวงจรชีวิตของอาคาร (Life Cycle Energy Efficiency) (Moriset et.al., 2021)

ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ดินจึงไม่เป็นเพียงวัสดุในประวัติศาสตร์ แต่เป็นวัสดุที่กลับมามีความสำคัญอย่างยิ่งในการตอบโจทย์การออกแบบสถาปัตยกรรมที่ใส่ใจสิ่งแวดล้อมในยุคปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการคือ

1.2.1 เพื่อศึกษาประวัติศาสตร์ของการใช้ดินในงานสถาปัตยกรรมทั่วโลก โดยมุ่งเน้นไปที่บทบาทของวัสดุดินในการสร้างสรรค์ที่พักอาศัยและโครงสร้างขนาดใหญ่ของอารยธรรมโบราณ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความหลากหลายของเทคนิคการใช้ดิน ที่พัฒนาขึ้นในพื้นที่ทางภูมิศาสตร์และวัฒนธรรมที่แตกต่างกัน เช่น เทคนิค อิฐดินดิบ (Adobe) ดินพอกโครงไม้ไผ่/กิ่งไม้ (Wattle and Daub) และ ดินอัด (Rammed Earth) รวมถึงการทำความเข้าใจในคุณสมบัติทางกายภาพและกลไกของแต่ละเทคนิค

1.2.3 เพื่อแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาและการนำเทคนิคดั้งเดิมกลับมาใช้ (Revitalization) ในงานสถาปัตยกรรมร่วมสมัย โดยเน้นย้ำถึงศักยภาพของดินในการเป็นทางเลือกสำหรับความท้าทายด้านความยั่งยืน และการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในยุคปัจจุบัน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

บทความนี้จะเป็นการศึกษาเอกสารวิชาการที่ครอบคลุมเนื้อหาเชิงประวัติศาสตร์และการพัฒนาทางเทคนิคของการใช้ดินในงานสถาปัตยกรรม ตั้งแต่ยุคโบราณ โดยยกตัวอย่างจากอารยธรรมสำคัญที่ใช้ดินเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก เช่น อารยธรรมเมโสโปเตเมีย (Mesopotamia) ด้วยซิกกูรัต (Zigurats) และกำแพงเมือง และอารยธรรมอีทรัสกัน (Etruscan) จนถึงตัวอย่างร่วมสมัย ที่สะท้อนถึงการฟื้นคืนชีพและการประยุกต์ใช้เทคนิคดินด้วยมุมมองสมัยใหม่และเทคโนโลยีปัจจุบัน เช่น ผลงานของสถาปนิกที่เน้นความยั่งยืน และตัวอย่างอาคารที่มีชื่อเสียง เช่น Bruder Klaus Chapel ในประเทศเยอรมนี ซึ่งใช้เทคนิคดินอัดเป็นโครงสร้างหลัก

3. ประวัติศาสตร์และพัฒนาการของดินในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรม

นำเสนอผลการทดลองพร้อมกับอธิบายผลการทดลองโดยใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย มีความชัดเจน ตรงประเด็น ชี้ให้เห็นจุดเด่นของงานวิจัย กรณีมีภาพประกอบและตารางให้แทรกในเนื้อหาโดยจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการอธิบาย โดยมีรูปแบบตามที่กำหนด

3.1 ยุคโบราณและรากฐานของอารยธรรม (ตั้งแต่ 10,000 ปีก่อนคริสตกาล – ค.ศ. 500)

การใช้ดินเป็นวัสดุก่อสร้างหลักมีความเชื่อมโยงโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญของมนุษยชาติ นั่นคือการปฏิวัติเกษตรกรรม (Neolithic Revolution) เมื่อมนุษย์เริ่มตั้งถิ่นฐานอย่างถาวร (Sedentary Lifestyle) ในช่วงประมาณ 10,000 ปีก่อนคริสตกาล ความจำเป็นในการสร้างที่พักอาศัยที่มั่นคงและมีประสิทธิภาพได้นำไปสู่การค้นพบวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป (Abundant) และเข้าถึงง่าย ซึ่งก็คือดิน โดยไม่ต้องใช้พลังงานสูงหรือเครื่องมือซับซ้อนในการแปรรูป ทำให้ดินกลายเป็นรากฐานทางกายภาพของอารยธรรมแรกเริ่มของโลก

3.1.1 เมโสโปเตเมียและแอฟริกาเหนือ กำเนิดอิฐดินดิบ (Adobe) หลักฐานทางโบราณคดีเชื่อว่าเทคนิคการก่อสร้างดินที่เก่าแก่ที่สุดพบในบริเวณ Fertile Crescent และพื้นที่สำคัญอย่าง Jericho (เมืองโบราณในปาเลสไตน์) ย้อนไปถึงราว 10,000 ปีก่อนคริสตกาล

อารยธรรมเมโสโปเตเมีย เช่น สุเมเรียน บาบิโลน ได้พัฒนาเทคนิคการทำ อิฐดินดิบ (Adobe) อย่างเป็นระบบ เทคนิคนี้เกี่ยวข้องกับการนำดินเหนียวผสมกับน้ำและวัสดุเสริมแรง เช่น แกลบหรือฟาง นำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ไม้แล้วตากแดดให้แข็งตัว อาคารทางศาสนาและรัฐบาลที่สำคัญที่สุดในยุคนั้น เช่น วิหารซิกูรัต (Ziggurat) ของ บาบิโลนและอูรุก (Uruk) มักใช้โครงสร้างหลักเป็นอิฐดินดิบ ซึ่งบางครั้งมีการบุภายนอกด้วยอิฐดินเผา (Fired Bricks) เพื่อเพิ่มความทนทานต่อสภาพอากาศและการกัดเซาะ (Faiella, 2005) (Ceccarelli et.al., 2020)



รูปที่ 1 ซิกูรัต สถาปัตยกรรมดินในอารยธรรมเมโสโปเตเมีย

ที่มา: Mokhova, T. (2019)

ชาวอียิปต์ใช้ดินดิบอย่างแพร่หลายในการสร้างบ้านเรือนของสามัญชน, กำแพงเมือง, และวัดบางส่วนที่เน้นความเร็วในการก่อสร้าง เทคนิคนี้ตอบโจทย์การก่อสร้างที่รวดเร็วในสภาพแวดล้อมที่แห้งแล้ง ซึ่งดินดิบสามารถแข็งตัวได้ดี



รูปที่ 2 ซากปรักของหอคอย สมัยราชวงศ์อียิปต์ ราว พ.ศ.202-พ.ศ.220 ในประเทศจีน

ที่มา: The real bear (2008)

3.1.2 เทคนิคดินอัด (Rammed Earth) และ Cob เทคนิค ดินอัด (Rammed Earth หรือ Pisé de Terre) ซึ่งเป็นการนำดินชั้นที่มีสัดส่วนของทรายและกรวดเหมาะสมมาอัดแน่นทีละชั้นในแบบหล่อไม้ (Formwork) เพื่อสร้างผนังที่มีความหนาแน่นและแข็งแรงสูง ได้ปรากฏขึ้นในพื้นที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้งทั่วโลก เช่น สถาปัตยกรรมที่โดดเด่นของ เยเมน (Yemen) ที่มีการสร้างอาคารสูงหลายชั้นด้วยดินอัด และ โมร็อกโก (Morocco) (Makinde, 2012) (Ávila et.al., 2025)

ในประเทศจีน เทคนิคดินอัดถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างทางทหารและพลเรือน เพื่อความมั่นคงและยั่งยืน ส่วนที่เก่าแก่ที่สุดและสำคัญที่สุดของ กำแพงเมืองจีน ถูกสร้างด้วยดินอัดเป็นฐานและแกนกลาง แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของดินในการสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่และทนทานต่อกาลเวลา

3.2 ยุคกลางและยุคฟื้นฟูศิลปวิทยา (ค.ศ. 500 – ค.ศ. 1800)

ในช่วงยุคกลางจนถึงยุคฟื้นฟูศิลปวิทยา การใช้ดินยังคงเป็นวิธีหลักในการก่อสร้างสำหรับชนบทและผู้คนส่วนใหญ่ เนื่องจากวัสดุมีราคาถูก เข้าถึงง่าย และอาศัยทักษะดั้งเดิมในการก่อสร้าง โดยมีการพัฒนาเทคนิคเฉพาะทางภูมิศาสตร์ที่ชัดเจน

3.2.1 Pisé de Terre และ Cob ในยุโรป เทคนิคดินอัดกลับมาได้รับความนิยมอย่างสูงในพื้นที่ทางตะวันตกของฝรั่งเศส โดยเฉพาะในภูมิภาค Rhône-Alpes มีการสร้างบ้านเรือนชนบทและฟาร์มขนาดใหญ่ด้วยเทคนิค Pisé de Terre โดยมีแบบแผนการก่อสร้างที่ชัดเจนและเป็นระเบียบ ถือเป็นรูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นที่สำคัญ



รูปที่ 3 อาคารฟาร์มของเกษตรกร ในประเทศฝรั่งเศส

ที่มา: Monteux, A.-V. (2004)

ในพื้นที่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของอังกฤษ โดยเฉพาะในมณฑล Devon เทคนิค Cob ได้กลายเป็นที่นิยมอย่างมาก Cob เป็นการก่อสร้างแบบอิสระที่ใช้ดินเหนียวผสมทราย ฟาง และน้ำ แล้วนำมาปั้นเป็นก้อนหรือก่อขึ้นเป็นผนังโดยตรงโดยไม่ต้องใช้แบบหล่อ ทำให้สามารถสร้างผนังที่มีรูปทรงโค้งมนและมีความหนาแน่น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฉนวนความร้อนได้อย่างดีเยี่ยม

3.2.2 การผสมสถาปัตยกรรมพื้นเมืองกับอาณานิคมในสหรัฐอเมริกา การมาถึงของอาณานิคมสเปนได้นำเทคนิค อิฐดินดิบ (Adobe) เข้าสู่โลกใหม่ โดยเฉพาะในเม็กซิโก, อเมริกากลาง, อเมริกาใต้, และทางตะวันตกเฉียงใต้

ของสหรัฐอเมริกา (เช่น รัฐนิวเม็กซิโกและแคลิฟอร์เนีย) สถาปัตยกรรมแบบ Pueblo ของชาวพื้นเมืองได้ผสมผสานเข้ากับรูปแบบอาณานิคมสเปน (Spanish Colonial Architecture) ก่อให้เกิดสถาปัตยกรรมดินที่มีเอกลักษณ์ ซึ่งมักจะโดดเด่นด้วยกำแพงหนาที่ช่วยป้องกันความร้อนจากแสงอาทิตย์

3.3 ยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรม (ค.ศ. 1800 – ค.ศ. 1970)

การปฏิวัติอุตสาหกรรมถือเป็นจุดเปลี่ยนครั้งสำคัญที่ทำให้ความสำคัญของดินในฐานะวัสดุก่อสร้างลดลงอย่างรวดเร็ว

3.3.1 การแทนที่ด้วยวัสดุอุตสาหกรรม การผลิต ปูนซีเมนต์ (Cement) และ เหล็กกล้า (Steel) ในปริมาณมากและในราคาที่ถูกลง ทำให้เกิดวัสดุใหม่คือ คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) วัสดุนี้ให้ความแข็งแรงเชิงกลสูง, ความเร็วในการก่อสร้าง, และความสามารถในการสร้างโครงสร้างอาคารสูง (High-Rise) ที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน คอนกรีตเสริมเหล็กจึงกลายเป็นสัญลักษณ์ของความก้าวหน้าทางวิศวกรรมที่มาแทนที่วัสดุดั้งเดิมอย่างดิน

3.3.2 การรับรู้ที่เปลี่ยนไป ในยุคสมัยใหม่ วัสดุดินถูกลดสถานะลงและถูกมองว่าเป็นเทคนิคที่ "ล้าสมัย" "ไม่แข็งแรง" หรือเป็นสถาปัตยกรรม "สำหรับคนยากจน" ในทางตรงกันข้าม อาคารที่สร้างด้วยวัสดุที่ผลิตจากโรงงานถือเป็นสัญลักษณ์ของความทันสมัย ความเจริญ และการเป็นส่วนหนึ่งของโลกอุตสาหกรรม

3.3.3 การอยู่รอดในท้องถิ่น แม้การใช้ดินเป็นวัสดุก่อสร้างจะมีการลดลงทั่วโลก แต่การก่อสร้างด้วยดินยังคงดำรงอยู่และเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ชนบทที่ห่างไกล ในประเทศกำลังพัฒนา หรือในพื้นที่ที่ทรัพยากรอื่น ๆ ซึ่งหาได้ยาก ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ถึงความทนทานและความยืดหยุ่นของเทคนิคนี้

3.4 ยุคฟื้นฟูและยุคความยั่งยืน (ค.ศ. 1970 – ปัจจุบัน)

จากวิกฤตการณ์พลังงานโลกในปี 1970 และการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 ได้นำไปสู่การกลับมาให้ความสนใจในวัสดุธรรมชาติ และเทคนิคการก่อสร้างที่มี พลังงานแฝงต่ำ (Low Embodied Energy) อย่างดิน

3.4.1 การวิจัยทางวิชาการและผลประโยชน์ทางนิเวศวิทยา สถาบันการศึกษาและนักวิจัยเริ่มศึกษาคุณสมบัติของดินอย่างเป็นระบบอีกครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติ มวลความร้อน (Thermal Mass) ที่ช่วยลดภาระการทำความเย็น/ทำความร้อน และศักยภาพในการประหยัด พลังงานปฏิบัติการ (Operational Energy) ของอาคาร ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของสถาปัตยกรรมเชิงชีวนิเวศ (Bioclimatic Design)

3.4.2 การประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมร่วมสมัย เพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดด้านความแข็งแรงของสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ มีการนำสารคงสภาพ (Stabilizers) เช่น ปูนซีเมนต์ หรือ ปูนขาว มาผสมกับดินอัดในปริมาณที่จำกัด เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดเซาะของน้ำ (Erosion Resistance) และความแข็งแรงเชิงกล ทำให้สามารถนำไปใช้กับอาคารสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Heath et al., 2009)

สถาปนิกสมัยใหม่ เช่น Martin Rauch และ Herzog & de Meuron ได้ใช้เทคนิคดินอัดเพื่อสร้างพื้นผิวที่มีความสวยงามตามธรรมชาติ (Layered Texture) และยังเป็น การส่งเสริม คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality) เนื่องจากดินสามารถช่วยควบคุมความชื้นและไม่ปล่อยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) หรือตัวอย่างที่โดดเด่นคือโบสถ์ Bruder Klaus Chapel ออกแบบโดยเฟเธอร์ ซุมธอร์ (Peter Zumthor) ที่สร้างด้วยเทคนิคดินอัดอย่างประณีต



รูปที่ 4 โบสถ์ Bruder Klaus Chapel ที่สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี
ที่มา: <https://nrw-skulptur.net/en/skulptur/bruder-klaus-feldkapelle>

3.4.3 เทคโนโลยีและอนาคต นวัตกรรมล้ำสมัยล่าสุดคือการรวมเทคโนโลยี การพิมพ์สามมิติ (3D Printing) เข้ากับวัสดุดินโบราณ เพื่อสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูงได้อย่างรวดเร็วและลดต้นทุนแรงงานอย่างมาก (Cherner, 2021)



รูปที่ 5 การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการก่อสร้างบ้าน ในประเทศอิตาลี ในปี ค.ศ.2021
ที่มา: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>

ปัจจุบัน ดินได้รับการยอมรับในระดับโลกในฐานะองค์ประกอบสำคัญของ สถาปัตยกรรมที่ยั่งยืน (Sustainable Architecture) และเป็นทางออกที่น่าเชื่อถือในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการก่อสร้างยุคใหม่ (Parisi, 2024)

4. เทคนิคและการวิเคราะห์ทางเทคนิคของวัสดุดิน

ส่วนนี้จะเจาะลึกถึงความหลากหลายของเทคนิคการก่อสร้างด้วยดินดั้งเดิม พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดิน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำความเข้าใจถึงประสิทธิภาพและความท้าทายของการใช้ดินในงานสถาปัตยกรรม

4.1 การจัดจำแนกและคุณสมบัติพื้นฐานของดินก่อสร้าง

ดินที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างมักเป็นส่วนผสมของแร่ธาตุและอนุภาคอินทรีย์ ซึ่งสามารถจำแนกตามขนาดอนุภาคได้เป็น ทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และ ดินเหนียว (Clay)

ตารางที่ 1 การจัดจำแนกและคุณสมบัติพื้นฐานของดินก่อสร้าง

อนุภาค	ขนาดอนุภาค (มม.)	บทบาทในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง
ทราย	2.00-0.05	ให้ความแข็งแรงเชิงกล (Strength) และลดการหดตัว (Shrinkage)
ทรายแป้ง	0.05-0.002	เป็นสารเติมเต็ม (Filler) และช่วยในการอัดแน่น (Compaction)
ดินเหนียว	น้อยกว่า 0.002	ทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะ (Binder) เมื่อผสมกับน้ำ

หมายเหตุ: ดัดแปลงจาก สรรวธ จริตงาม, 2545 และ กองสำรวจดิน, 2523

คุณสมบัติที่สำคัญ

ความสามารถในการปั้นขึ้นรูป (Plasticity) ถูกกำหนดโดยปริมาณน้ำและความเหนียวของดินเหนียว ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้ขีดจำกัดของแอตเทอร์เบอร์ก (Atterberg Limits) (Das, 2006)

ความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content, OMC) ปริมาณน้ำที่ทำให้ดินสามารถอัดแน่นได้หนาแน่นที่สุด (Maximum Dry Density) ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในเทคนิคดินอัด

4.2 เทคนิคการก่อสร้างดินที่สำคัญ

เทคนิคการใช้ดินมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของดินเหนียว/ทราย และปริมาณน้ำที่ใช้

4.2.1 อิฐดินดิบ (Adobe)

เป็นการนำดินผสมน้ำและวัสดุเสริมแรง เช่น ฟางหรือกลบ มาขึ้นรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยมในแม่พิมพ์ แล้วตากแดดให้แห้งและแข็งตัวโดยไม่ผ่านการเผา

ความแข็งแรงรับแรงอัดของอิฐดินดิบขึ้นอยู่กับสัดส่วนของดินเหนียว/ทราย, ความหนาแน่น, และความชื้นขณะใช้งาน (Service Moisture Content) โดยทั่วไปมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 1.5 - 3.0 เมกะปาสกาล (MPa)

ผนัง Adobe มี มวลความร้อนสูง (High Thermal Mass) ซึ่งช่วยชะลอการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคาร (Thermal Lag) ทำให้เหมาะสำหรับสภาพอากาศที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิกลางวัน-กลางคืนสูง (Cornerstones Community Partnerships, 2006)

สำหรับการศึกษาสถาปัตยกรรมดินดิบนั้น จากการค้นคว้าข้อมูลสามารถสรุปประเด็นโดยสังเขปได้ดังนี้

4.2.1.1 บริบททางประวัติศาสตร์และการจัดทำฐานข้อมูลมรดกสถาปัตยกรรม

การศึกษาในปัจจุบันให้ความสำคัญกับการสำรวจและบันทึกตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของอาคารดินดิบเพื่อการอนุรักษ์:

1) การจัดทำแผนที่ดิจิทัล มีการใช้เทคโนโลยี QGIS และ Qfield เพื่อระบุตำแหน่งอาคารดินดิบในภูมิภาคของปาпу ประเทศฝรั่งเศส พบว่าการกระจายตัวของอาคารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแหล่งทรัพยากรธรณีวิทยาในพื้นที่ (Aras-Gaudry et.al., 2023)

2) หลักฐานทางโบราณคดีที่เก่าแก่ที่สุด การค้นพบอาคารอนุสาวรีย์ในเปรูที่มีอายุมากกว่า 5,100 ปี แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี Adobe ยุคแรกเริ่มใช้วิธีการตัดก้อนดินเหนียวธรรมชาติจากตะกอนปรากฏการณ์เอลนีโญ (Mauricio et.al., 2021)

3) มรดกทางวัฒนธรรมในเอเชีย ในภูมิภาคเบงกอลและบาเรนดรา บ้านดินดิบเป็นตัวแทนของภูมิปัญญาที่สอดคล้องกับวิถีชีวิตและการตกแต่งผนังด้วยศิลปะปูนต่ำ (Mitra, 2022)

4.2.1.2 วิทยาศาสตร์วัสดุและการปรับปรุงคุณสมบัติทางเทคนิค

งานวิจัยสมัยใหม่มุ่งเน้นการยกระดับสมรรถนะของอิฐดินดิบผ่านการปรับปรุงส่วนผสม (Calatan et.al., 2020)

1) การเพิ่มความแข็งแรง สัดส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือการผสมดินเหนียว ทราย และสารละลายกาวกระดูก (Bone glue) ร่วมกับการเสริมใยสังเคราะห์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึง

2) การเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน การเติมฟางข้าวช่วยลดค่าการนำความร้อน ทำให้อิฐมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีขึ้น

3) การป้องกันความชื้น การเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีด (Linseed oil) ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันน้ำโดยยังคงความสามารถในการระบายอากาศของวัสดุ

4.2.1.3 นวัตกรรมการออกแบบและการผลิตด้วยระบบดิจิทัล

การบูรณาการเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยให้ Adobe ก้าวข้ามขีดจำกัดเดิม (Gonidakis et.al., 2024)

1) การวิเคราะห์แสงสว่างและโครงสร้าง การใช้แนวคิด DTD (Daylight Analysis, Topology Optimization, Digital Fabrication) ช่วยออกแบบผนังที่มีช่องเปิดเพื่อรับแสงธรรมชาติสูงสุดโดยไม่กระทบความแข็งแรงของโครงสร้าง

2) เทคโนโลยีแม่พิมพ์ การใช้แม่พิมพ์หลักที่ผลิตจากการพิมพ์ 3 มิติ ช่วยลดการใช้วัสดุได้ถึง 25-60% และลดเวลาการผลิตลง 30% เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม

4.2.1.4 ประสิทธิภาพพลังงานและความยั่งยืน

สถาปัตยกรรมดินดิบได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุคาร์บอนต่ำที่ตอบโจทย์ความยั่งยืนในทุกมิติ

1) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม: กระบวนการผลิต Adobe ใช้พลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ (De Obaldia et.al., 2022) มีพลังงานแฝงต่ำ และสามารถรีไซเคิลได้ทั้งหมด (Aras-Gaudry et.al., 2023)

2) การประหยัดพลังงาน คุณสมบัติมวลสารทางความร้อนช่วยรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ ลดความต้องการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศ (Mitra, 2022), (De Obaldia et.al., 2022)

3) มิติทางเศรษฐกิจและสังคม เป็นวัสดุราคาถูกที่ส่งเสริมการสร้างงานในท้องถิ่นและการสร้างอาคารด้วยตนเอง (Self-construction) (De Obaldia et.al., 2022)

4.2.1.5 การอนุรักษ์และการจัดการโบราณสถาน

แนวทางการดูแลรักษาโครงสร้างดินดิบที่มีความเปราะบางสูง (Nadali, 2023)

1) ปรัชญาการบูรณะ เน้นวิธีการที่ไม่รุกรานพื้นที่และสามารถย้อนกลับได้ (Reversible) เช่น การใช้สารเอทิลซิลิเกตเพื่อเสริมความแข็งแรงจากภายใน และการใช้ปูนฉาบดินผสมปูนขาวเพื่อป้องกันการสึกกร่อนจากสภาพอากาศ

2) ความท้าทายในสภาวะวิกฤต กรณีศึกษาในเมืองเฮ็บลา ประเทศซีเรีย ชี้ให้เห็นว่าความไม่สงบทางการเมืองส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการบำรุงรักษาอาคารดินดิบที่ขุดพบ

จากข้อมูลที่กำลังมาสะท้อนให้เห็นว่า Adobe ไม่ได้เป็นเพียงวัสดุในอดีต แต่มีศักยภาพสูงในการเป็นวัสดุก่อสร้างหลักของสถาปัตยกรรมยั่งยืนในอนาคต หากมีการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาช่วยในการออกแบบและการควบคุมคุณภาพวัสดุให้เป็นมาตรฐานสากล

4.2.2 ดินอัด (Rammed Earth / Pisé de Terre)

เป็นการนำดินที่มีความชื้นต่ำ (ใกล้เคียงกับ OMC) มาเทลงในแบบหล่อชั่วคราว (Formwork) ที่ละชั้น (Lift) และทำการ อัดแน่น (Compaction) โดยใช้เครื่องมือกลหรือเครื่องอัดลม

เป็นเทคนิคที่ให้ความหนาแน่นสูงที่สุด (Highest Density) ในบรรดาเทคนิคดินดั้งเดิม ทำให้มีความแข็งแรงรับแรงอัดสูง (มักสูงกว่า 3.0 - 5.0 MPa) และมีเสถียรภาพทางโครงสร้างที่ดีเยี่ยม

ความทนทานต่อน้ำ (Erosion Resistance) เป็นประเด็นสำคัญที่ต้องจัดการ โดยมักใช้ ฐานรากหิน (Stone Plinth) และ ชายคาที่ยื่นยาว ตามหลักการ 'ใส่หมวกและรองเท้า' เพื่อป้องกันน้ำ

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างด้วยดินอัด สามารถเรียบเรียงประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.2.2.1 ความยั่งยืนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวัฏจักรชีวิต ดินอัดเป็นวัสดุที่มีพลังงานแฝง (Embodied Energy) ต่ำและสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน. อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างสมัยใหม่มักผสมปูนซีเมนต์ 5-10% เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งอาจเพิ่มการปล่อยคาร์บอนแฝงขึ้นมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับดินอัดธรรมชาติ. ผู้วิจัยจึงเสนอให้มีการประเมินแบบ "Cradle-to-Grave" เพื่อให้ครอบคลุมมิติด้านมวลสารทางความร้อน (Thermal Mass) ที่ช่วยลดการใช้พลังงานในขั้นตอนการใช้งาน. นอกจากนี้ยังเน้นการพัฒนาสารช่วยคงตัวคาร์บอนต่ำ เช่น จีโอโพลิเมอร์ หรือสารชีวภาพมาทดแทนปูนซีเมนต์ (Dai, 2026), (Montalbano, 2024), (Niroumand, 2021)

4.2.2.2 สมรรถนะทางวิศวกรรมและการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

สมบัติทางกลของดินอัดแบบไม่ผสมสารคงตัว (Unstabilized Rammed Earth: URE) มีความแปรผันสูงตามแหล่งที่มาของดิน โดยมีประเด็นสำคัญดังนี้

1) ค่ากำลังอัดและจุดอ่อน ค่ากำลังอัด (UCS) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.72 MPa แต่มีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนต่ำมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการรับน้ำหนัก (Peric et.al., 2021)

2) พฤติกรรมเมื่อเกิดแผ่นดินไหว อาคาร URE มีการดูดซับพลังงานสูงถึง 9.81% แต่การวิบัติมักเกิดจากการโก่งตัวออกนอกระนาบ (Out-of-plane) (Peric et.al., 2021)

3) การเสริมความแข็งแรง การใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC frame) ล้อมรอบผนังดินอัด สามารถเพิ่มแรงสูงสุด (Ultimate load) ได้ถึง 597 kN เมื่อเทียบกับผนังปกติที่มีเพียง 382 kN (Gao et.al., 2025)

4.2.2.3 ความคงทนและการสึกกร่อนตามสภาพภูมิอากาศ (Umubyeyi, 2023)

ความทนทานของผนังดินอัดขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบเพื่อป้องกันสภาพอากาศและสัดส่วนผสม

1) อัตราการสึกกร่อน บริเวณที่สัมผัสสภาพแวดล้อมสูงมีอัตราการสึกกร่อน 3.5 มม./ปี ขณะที่บริเวณที่มีการป้องกันจะอยู่ที่ 0.5 มม./ปี

2) อายุการใช้งาน ผนังดินอัดที่ขาดการป้องกันจะมีอายุการใช้งาน 37 ถึง 75 ปี แต่หากมีการออกแบบชายคาหลังคาให้กว้าง (Roof Overhang) จะช่วยยืดอายุการใช้งานออกไปได้เกือบไม่มีที่สิ้นสุด

4.2.2.4 นวัตกรรมก่อสร้างและเทคโนโลยีดิจิทัล

มีการยกระดับจากเทคนิคพื้นถิ่นสู่การก่อสร้างสมัยใหม่ด้วยนวัตกรรมต่างๆ ได้แก่

1) ระบบไม้แบบและรอยต่อ การใช้ไม้แบบสำเร็จรูปขนาดใหญ่ช่วยให้ก่อสร้างได้รวดเร็วและประหยัดขึ้น (Chen et.al., 2024), (Montalbano, 2024) รวมถึงมีการพัฒนา "รอยต่อแบบยืดหยุ่น" (Flexible joints) โดยใช้ตะแกรงเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการแตกร้าวจากการหดตัวในอาคารสูง (Chen et.al., 2024)

2) การวิเคราะห์ขั้นสูง มีงานวิจัยเสนอให้ใช้ซอฟต์แวร์ดิจิทัล เช่น BIM-LCA และการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Modeling) เพื่อความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมโครงสร้าง (Niroumand, 2021), (Montalbano, 2024), (Dai, 2026)

4.2.2.5 มิติด้านสถาปัตยกรรมและสังคม

การใช้ดินอัดสะท้อนถึงบริบททางสังคมและวัฒนธรรมที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) สถาปัตยกรรมเพื่อการอนุรักษ์วัฒนธรรมในประเทศจีน งานวิจัยเปรียบเทียบอาคารดินอัดในเมือง "ถู่โหลว" "ถู่เป่า" และ "จ้ายถู่" พบว่ามีความแตกต่างกันตามบริบทเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรมของแต่ละพื้นที่ (Lin et.al., 2024)

2) การมีส่วนร่วมและเศรษฐกิจ ทักษะการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อนเอื้อต่อกิจกรรมการสร้างบ้านด้วยตนเองของชาวบ้าน ซึ่งช่วยสร้างการมีส่วนร่วมในชุมชนและลดต้นทุน (Montalbano, 2024)

4.2.3 ดินพอกโครงไม้ (Wattle and Daub)

เป็นโครงสร้างผสม (Composite Structure) โดยใช้โครงร่างสานจากกิ่งไม้หรือไม้ไผ่ (Wattle) แล้วนำดินเหนียวผสมสารเสริมแรง (Daub) มาพอกทับโครงร่างเพื่อสร้างผนัง



รูปที่ 7 การใช้โครงสร้างไม้ผสมกับดินในการสร้างบ้านที่ประเทศโปแลนด์

ที่มา: <https://www.foveotech.co.uk/colors/worldwide-trends/wattle-and-daub-houses-ie-what-do-sudetes-and-gdansk-pomerania-have-in-common>

เทคนิคนี้มี น้ำหนักเบา และมีความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Capacity) ได้ดีกว่า Adobe เนื่องจากมีโครงไม้ช่วยรับแรง แต่มีมวลความร้อนต่ำกว่า เหมาะสำหรับสภาพอากาศชื้นหรือบริเวณที่ต้องการผนังที่น้ำหนักเบาและมีความสามารถในการระบายอากาศ (Breathability) (Forsyth, 2008)

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการก่อสร้างด้วยดินพอกसान (Wattle and Daub) สามารถจัดกลุ่มโดยสังเขปได้ดังนี้

4.2.3.1 ความเป็นมา มิติทางสังคม และการจัดการพื้นที่ เทคนิคการก่อสร้างด้วยดินสะท้อนถึงภูมิปัญญาและการจัดการทรัพยากรตามบริบทของแต่ละพื้นที่

1) มรดกทางสถาปัตยกรรม ในประเทศโปรตุเกส เทคนิคดินพอกसान (Wattle and Daub) ถูกนำไปใช้ในอาคารหลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่บ้านพักอาศัยจนถึงพระราชวัง โดยมีการพัฒนาโครงสร้าง "Pombaline cage" เพื่อต้านทานแผ่นดินไหว (Soares et al., 2025)

2) หลักฐานทางโบราณคดี การศึกษาที่แหล่ง Forcello ในอิตาลี พบว่าชาวอีทรัสกันมีการเลือกใช้ไม้โอ๊คและดินเหนียวปนทรายจากท้องถิ่นมาสร้างอาคาร ซึ่งการที่หลักฐานยังคงอยู่มาจนถึงปัจจุบันเป็นผลมาจากการที่ดินถูกเผาจนแข็งตัวในช่วงที่เกิดเพลิงไหม้ครั้งใหญ่ (Amicone et al., 2020)

3) มิติทางสังคมและการจัดสรรพื้นที่ ในชูแดนช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 17-18 การเลือกใช้เทคนิคดินพอกसानสะท้อนถึงอัตลักษณ์และสถานะทางสังคมที่แตกต่างจากบ้านอิฐดินดิบ โดยมีการออกแบบพื้นที่เพื่อเน้นความเป็นส่วนตัว เช่น การใช้ผนังบังตา (Wyzgot and Deptuła, 2020)

4.2.3.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงานและความสบายเชิงความร้อน

1) คุณสมบัติการเป็นฉนวน ผนังดินพอกसानมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงกว่าผนังคอนกรีตสมัยใหม่ถึง 50% เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อน (U-value) ต่ำ และมีรอยเท้าคาร์บอนต่ำกว่าอาคารทั่วไป 30% (Soares et al., 2025)

2) สภาวะน่าสบาย (Thermal Comfort) จากการศึกษาในศรีลังกา พบว่าบ้านดินพอกसानที่ใช้กลยุทธ์การออกแบบเชิงรับ (Passive Design) เช่น การระบายอากาศธรรมชาติและการบังแดด สามารถทำค่าความสบายเชิงความร้อน (PMV) ได้ดีเยี่ยมที่ระดับ -0.5 (Rammuthupura and Rupasinghe, 2024)

4.2.3.3 นวัตกรรมสมัยใหม่และความยั่งยืน

1) การบูรณาการวัสดุรีไซเคิล มีการพัฒนานวัตกรรมนำพลาสติก r-HDPE จากฝาขวดน้ำมาสร้างเป็นโครงตะแกรงสำหรับผนังดินพอกसान เพื่อแก้ปัญหาความลื่นของพลาสติกและเพิ่มความทนทานในระยะยาวตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Ceolin et al., 2025)

4.2.3.4 การศึกษาและการถ่ายทอดองค์ความรู้

1) การเรียนรู้ผ่านการปฏิบัติ (Hands-on) การจัดการเรียนการสอนในอียิปต์ยืนยันว่า การให้นักศึกษาลงมือสร้างแบบจำลอง 1:10 และผนังจริง 1:1 ช่วยให้เห็นข้อผิดพลาดและปรับปรุงเทคนิคได้เร็วกว่าการบรรยายทฤษฎีเพียงอย่างเดียว (Maher et al., 2025)

4.2.4 Cob / Monolithic Earth

เป็นการใช้ดินเหนียวผสมทรายและฟางที่มีความชื้นสูงคล้ายแป้งโด (Dough-like Consistency) นำมาปั้นและก่อขึ้นเป็นผนังโดยตรงโดยไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ ทำให้สามารถสร้างผนังที่มีรูปร่างโค้งมนหรือเป็นอิสระได้ แต่มีมวลความร้อนสูงมากเนื่องจากผนังมีความหนาและมีความหนาแน่นพอสมควร (Goodnow, 2007) (ICAEN, 2004)

มีการศึกษาพัฒนาการปรับปรุงสูตรผสม Cob เพื่อรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่เน้นไปที่การเพิ่มสัดส่วนน้ำเพื่อให้วัสดุมีความลื่นไหล (Flowability) สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ โดยสูตรมาตรฐานดั้งเดิมที่มีน้ำเพียง 20% ถูกปรับเพิ่มเป็น 24.6% - 26% ในขณะที่สัดส่วนเส้นใยฟางคงที่ที่ 2% เพื่อรักษาความสมดุลระหว่างความสามารถในการฉีดผ่านหัวพิมพ์ (Extrudability) และความสามารถในการแข็งตัวเพื่อรับน้ำหนักชั้นถัดไป (Buildability) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนา

Cob ชนิดพิเศษ เช่น ชนิดโครงสร้างที่เน้นความแข็งแรง และชนิดฉนวนที่เพิ่มสัดส่วนเส้นใยเป็น 25% เพื่อประสิทธิภาพทางความร้อน

งานศึกษา วิจัย และทดลองเกี่ยวกับโครงสร้างดินแบบ Cob ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สามารถสรุปประเด็นโดยสังเขปได้ดังนี้

4.2.4.1 วิทยาศาสตร์วัสดุและการพัฒนาส่วนผสม

การพัฒนา Cob เพื่อรองรับเทคโนโลยีการก่อสร้างสมัยใหม่เน้นไปที่การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยระบบดิจิทัล:

1) การปรับปรุงสัดส่วนผสม สูตรผสมแบบดั้งเดิมถูกปรับเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 24.6% - 25% เพื่อให้มีความชื้นไหลเพียงพอต่อการฉีดผ่านหัวพิมพ์ (Gomaa et.al., 2021), (Shi et.al., 2023) ในขณะที่บางงานวิจัยระบุการใช้น้ำสูงถึง 26% เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลตัว (Yemesegen and memari, 2023)

2) การจำแนกประเภทตามการใช้งาน มีการพัฒนาวัสดุแยกตามวัตถุประสงค์ เช่น ประเภทโครงสร้าง (ดินผสมฟาง 2.5%) และประเภทฉนวน (ดินผสมไส้แกนปาน 25%) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อน (Gounni and Louahlia, 2020)

3) การเสริมแรงด้วยวัสดุธรรมชาติ การใช้ไม้เป็นวัสดุเสริมแรงช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงดึงและแรงสั่นสะเทือนให้กับโครงสร้างดิน (Yemesegen and memari, 2023)

4.2.4.2 นวัตกรรมระบบการผลิตและเทคโนโลยีการก่อสร้าง

การนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์และเครื่องจักรมาช่วยก้าวข้ามขีดจำกัดด้านแรงงานและเวลา เช่น

1) ระบบการพิมพ์ 3 มิติ การพัฒนาเครื่องฉีดลูกสูบคู่ไฟฟ้า (Bespoke Dual-Ram Extruder) ช่วยให้พิมพ์ได้ต่อเนื่องและเร็วขึ้น 20 เท่า (Gomaa et.al., 2021) นอกจากนี้ยังมีการใช้ซอฟต์แวร์ Rhino-Grasshopper ในการคำนวณเส้นทางการพิมพ์ที่เหมาะสม (Gomaa et.al., 2021), (Yemesegen and memari, 2023)

2) กระบวนการ Variable Aggregate Impact Printing (VAIP) เป็นนวัตกรรมการใช้แขนหุ่นยนต์หยิบบางและกดอัดก้อนดินเพื่อสร้างพื้นระยิดเกาะ ช่วยแก้ปัญหาส่วนผสมที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีหินขนาดใหญ่ (Hetherington et.al., 2023)

3) การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเครื่องจักรหนัก การใช้รถตัก (Skid steer) ร่วมกับระบบไม้แบบปรับระดับได้ (Slipforms) ช่วยเพิ่มความสูงผนังได้ถึงรอบละ 18 นิ้ว และลดเวลาในการตกแต่งผิว (Hren, 2024)

4.2.4.3 สมรรถนะเชิงโครงสร้างและความมั่นคงของอาคาร

ผลการทดสอบทางวิศวกรรมยืนยันศักยภาพของ Cob ในอาคารแนวราบ

1) กำลังอัดและความไม่เท่ากันในทุกทิศทาง 3DP Cob มีกำลังอัดเฉลี่ย 0.87 - 1.8 MPa โดยทิศแนวตั้ง (Z) แข็งแรงที่สุดเนื่องจากแรงกดทับระหว่างชั้น (Gomaa et.al., 2021), (Yemesegen and memari, 2023), (Shi et.al., 2023)

2) ความมั่นคงระหว่างก่อสร้าง ขีดจำกัดความสูงในการพิมพ์รอบเดียว (Lift height) อยู่ที่ประมาณ 37.5 - 58 ซม. และต้องการเวลาหยุดพักอย่างน้อย 48 ชั่วโมงเพื่อให้ชั้นล่างแข็งแรงพอจะรับน้ำหนักใหม่ได้ (Gomaa et.al., 2021), (Shi et.al., 2023)

3) การวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง: ผนังแบบกลวง (Hollow sections) มีประสิทธิภาพในการรับแรงและฉนวนความร้อนดีกว่าผนังทึบ และมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับบ้าน 1-2 ชั้น (Gomaa et.al., 2021)

4.2.4.4 ประสิทธิภาพพลังงานและความคงทนต่อสภาพแวดล้อม

1) การจัดการพลังงาน บ้าน Cob ช่วยลดภาระการทำความร้อนได้ 20%-50% (Gounni and Louahlia, 2020) และเมื่อใช้ Hempcrete ฝ้าภายนอกจะช่วยชะลอความร้อน (Decrement Delay) ได้ดีเยี่ยม (Hren, 2024) นอกจากนี้การใช้ชั้นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) ยังช่วยลดการแกว่งของอุณหภูมิได้อีก 35% (Gounni and Louahlia, 2020)

2) ความทนทานต่อสภาพอากาศ ผลการทดสอบฝนเร่งด่วนพิสูจน์ว่าดินธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมี (โดยเฉพาะจากแหล่ง Kashiba) มีความทนทานต่อการสึกกร่อนสูงมาก แม้ต้องเผชิญสภาวะฝนหนักสะสมเทียบเท่า 4 ปี (Reynolds and Muramoto, 2024)

3) ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ แม้ต้นทุนเริ่มต้นจะสูง แต่บ้าน Cob มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า (คาดการณ์ 400 ปี) ทำให้มีต้นทุนตลอดอายุขัย (LCC) ต่ำกว่าบ้านคอนกรีต (Gounni and Louahlia, 2020)

4.2.4.5 ภูมิปัญญาพื้นถิ่นและการอนุรักษ์ (Vernacular Heritage)

1) มรดกทางสถาปัตยกรรม การศึกษาในประเทศจีนพบเทคนิคโบราณเรียกว่า "Ba-shi" เป็นการใช้หินเสริมความมั่นคง และการใช้ในการทำผนังโรงงาน (Kangyan) เพื่อบ่มยาสูบ ซึ่งสะท้อนถึงการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติทางความร้อนของดิน (Xie, 2025)

จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการนำเทคโนโลยีดิจิทัลและวิศวกรรมสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้ สามารถยกระดับวัสดุ Cob ให้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างที่ยั่งยืน มีประสิทธิภาพพลังงานสูง และมีความคุ้มค่าในระยะยาวภายใต้มาตรฐานการก่อสร้างปัจจุบัน

4.3 การจัดการกับความท้าทายทางเทคนิค

แม้ว่าดินจะเป็นวัสดุที่มีข้อดีด้านนิเวศวิทยา แต่การนำมาใช้งานในสถาปัตยกรรมกระแสหลักยังเผชิญกับความท้าทายทางเทคนิคสำคัญ 3 ประการ ซึ่งงานวิจัยปัจจุบันได้เสนอแนวทางจัดการที่ชัดเจน ดังนี้

4.3.1 การต้านทานการสึกกร่อนจากน้ำและความชื้น ความท้าทายหลักคือการที่ดินสูญเสียความแข็งแรงเมื่อสัมผัสความชื้นสูงหรือน้ำฝนโดยตรง แนวทางการจัดการประกอบด้วย

4.3.1.1 การออกแบบเชิงสถาปัตยกรรม ใช้หลักการ 'ใส่หมวกและรองเท้า' โดยการยกฐานรากด้วยหินเพื่อป้องกันความชื้นจากดิน และการออกแบบชายคาที่ยื่นยาว เพื่อป้องกันฝนชะล้างผนัง ซึ่งหากออกแบบได้เหมาะสม จะช่วยยืดอายุการใช้งานอาคารได้เกือบไม่มีที่สิ้นสุด

4.3.1.2 สารคงสภาพ การผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในสัดส่วนที่จำกัด (5%-10%) ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการชะล้างได้ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยุคใหม่ได้เสนอแนวทางที่ยั่งยืนกว่าด้วยการใช้สารคงสภาพทางชีวภาพ (Bio-based Stabilizers) หรือการใช้น้ำมันธรรมชาติ เช่น น้ำมันลินสีด เคลือบผิวเพื่อรักษาความสามารถในการระบายอากาศ

4.3.2 สมรรถนะเชิงโครงสร้างและการรับแรง ดินมีกำลังรับแรงอัดที่ดี (โดยเฉพาะดินอัดและอิฐดินดิบที่มีค่า 1.5 - 5.0 MPa ขึ้นไป) แต่มีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนต่ำมาก วิธีการจัดการในปัจจุบัน ได้แก่

4.3.2.1 การออกแบบเชิงแรงอัด ออกแบบผนังรับน้ำหนัก (Load-bearing walls) ให้มีความหนาเป็นพิเศษเพื่อเสถียรภาพ และใช้คานทับหลัง (Lintels) ที่แข็งแรงเหนือช่องเปิด

4.3.2.2 โครงสร้างเสริมแรง การบูรณาการดินเข้ากับโครงสร้างร่วมสมัย เช่น การใช้โครงคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC frame) หรือโครงเหล็กล้อมรอบผนังดินอัด จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดสูงสุดได้มากกว่าปกติถึง 50% และเพิ่มความปลอดภัยในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

4.3.2.3 นวัตกรรมรอยต่อ การพัฒนา "รอยต่อแบบยืดหยุ่น" (Flexible joints) โดยใช้ตะแกรงเหล็กเสริม ช่วยแก้ปัญหาตื้นเดิมเรื่องการทรุดตัวและการแตกร้าวของผนังดินที่มีความสูงมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.3 การหดตัวและการยึดเกาะของวัสดุ (Shrinkage and Adhesion) ปัญหาการหดตัว (Shrinkage) เมื่อดินแห้งส่งผลให้เกิดรอยร้าว ซึ่งจัดการได้โดย

4.3.3.1 การปรับสัดส่วนอนุภาค การรักษาสัดส่วนทรายที่เหมาะสม (ประมาณ 40%-50%) ทำหน้าที่เป็นโครงร่างทางกลช่วยลดการหดตัว

4.3.3.2 การเติมเส้นใย การผสมวัสดุเส้นใย เช่น ฟาง แกลบ หรือใยกล้วย ช่วยกระจายแรงดึงและลดรอยร้าวขนาดเล็ก

4.3.3.3 นวัตกรรมการยึดเกาะ ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้โครงสร้างเสริมจากพลาสติกรีไซเคิล r-HDPE ปัญหาความลื่นของพื้นผิวถูกจัดการด้วยการเพิ่มความขรุขระ เพื่อให้พันธะระหว่างดินและโครงสร้างเสริมมีความมั่นคง

นอกจากนี้ การใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ขั้นสูงอย่าง BIM-LCA และการทำแบบจำลอง Finite Element ช่วยให้สถาปนิกและวิศวกรสามารถทำนายพฤติกรรมโครงสร้างดินได้แม่นยำขึ้น ทำให้ดินก้าวข้ามจากวัสดุภูมิปัญญาไปสู่วัสดุวิศวกรรมที่มีมาตรฐานสากล

5. การประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมร่วมสมัย

การกลับมาของดินในฐานะวัสดุก่อสร้างร่วมสมัยไม่ได้เป็นเพียงการหวนคืนสู่อดีต แต่เป็นผลมาจากการตระหนักรู้ถึงวิกฤตการณ์สิ่งแวดล้อมและความจำเป็นในการลดการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง (Decarbonization of the Built Environment) การประยุกต์ใช้ในยุคปัจจุบันจึงเป็นการผสมผสานระหว่างภูมิปัญญาดั้งเดิมเข้ากับวิทยาศาสตร์วัสดุและเทคโนโลยีการออกแบบสมัยใหม่ (Morel et.al., 2021)

5.1 กรอบความคิดด้านความยั่งยืนและการลดพลังงานแฝง

ในบริบทของ สถาปัตยกรรมที่ยั่งยืน (Sustainable Architecture) ดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรลุเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม

การผลิตคอนกรีตและเหล็กเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการเผาปูนซีเมนต์ ในทางตรงกันข้าม ดินดิบที่ไม่ได้ผ่านการเผามีพลังงานแฝงต่ำที่สุดในบรรดาวัสดุก่อสร้างทั้งหมด การใช้ดินจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเริ่มต้น (Initial Environmental Impact) ของโครงการ

สถาปนิกสมัยใหม่ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติ มวลความร้อนสูง (High Thermal Mass) ของดินในการออกแบบอาคารเชิงชีวนิเวศ (Bioclimatic Design) ผนังดินช่วยรักษาความเสถียรของอุณหภูมิภายในอาคาร โดยลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวัน (Diurnal Temperature Fluctuation) ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานปฏิบัติการ (Operational Energy) ในระบบปรับอากาศและการทำความร้อน

5.2 นวัตกรรมทางเทคนิคและการยกระดับวัสดุ

การนำดินกลับมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมระดับสูงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเทคนิคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทาน

5.2.1 การคงสภาพแบบจำกัด (Minimal Stabilization)

เทคนิคดินอัดสมัยใหม่ มักใช้ สารคงสภาพ (Stabilizers) เช่น ปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในปริมาณที่จำกัด (5%-10%) เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อน้ำและการกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การใช้สารคงสภาพในปริมาณ

ที่พอเหมาะจะยังคงรักษาคุณสมบัติความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติด้านสุขอนามัย (เช่น การควบคุมความชื้นของดินไว้ได้)

5.2.2 การออกแบบทางวิศวกรรมสำหรับแรงอัด

วิศวกรโครงสร้างได้พัฒนาหลักเกณฑ์การออกแบบที่เน้นการใช้กำลังรับแรงอัดที่สูงของดิน โดยใช้ผนังรับน้ำหนัก (Load-Bearing Walls) ที่มีความหนาและสอดคล้องกับมาตรฐานทางวิศวกรรมสากล

5.2.3 คุณภาพอากาศและความงาม

ผนังดินดิบโดยเฉพาะดินอัดและปูนฉาบดิน (Earth Plaster) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่ม คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality, IAQ) เนื่องจากดินสามารถดูดซับความชื้นส่วนเกินเมื่ออากาศชื้น และปล่อยความชื้นกลับสู่พื้นที่เมื่ออากาศแห้ง (Hygroscopic Properties) นอกจากนี้ สวดลายและพื้นผิวของดินอัดที่เกิดจากการอัดชั้นดินที่แตกต่างกันยังให้ สุนทรียภาพที่ซับซ้อนและเป็นธรรมชาติ ที่วัสดุอุตสาหกรรมเลียนแบบได้ยาก (Fontana, 2007)

5.3 แนวโน้มและอนาคตของสถาปัตยกรรมดิน

5.3.1 การพิมพ์ 3 มิติด้วยดิน (3D Earth Printing) เทคโนโลยีนี้ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติขนาดใหญ่ในการฉีดพ่นส่วนผสมของดิน (มักมีการคงสภาพ) ที่ละชั้นเพื่อสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง (Palumbo, 2021) สิ่งนี้จะช่วยลดความต้องการแรงงานฝีมือดั้งเดิมและเปิดโอกาสให้สามารถสร้างรูปทรงโค้งและอิสระที่ยากจะทำด้วยเทคนิคแบบเดิม

5.3.2 การรับรองและมาตรฐานสากล ในปัจจุบัน มีการพัฒนามาตรฐานและข้อกำหนดทางวิศวกรรมสำหรับวัสดุดินในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เยอรมนี แอฟริกาใต้ เป็นต้น เพื่อให้ดินเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับการยอมรับและสามารถใช้ได้ในโครงการสถาปัตยกรรมที่ซับซ้อนได้อย่างปลอดภัย

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การสำรวจประวัติศาสตร์และการพัฒนาการของดินในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรมแสดงให้เห็นว่า วัสดุดังเดิมนี้เป็นมากกว่าเพียงทางเลือกในอดีต แต่เป็น ปัจจัยพื้นฐานที่ขับเคลื่อนอารยธรรม มาอย่างยาวนานหลายศตวรรษ ตั้งแต่การสร้างเมืองโบราณในเมโสโปเตเมียด้วยเทคนิคอิฐดินดิบ (Adobe) และโครงสร้างป้องกันในจินด้วยดินอัด (Rammed Earth) ไปจนถึงสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นที่หลากหลายทั่วโลก

การศึกษาได้ยืนยันความสำคัญของดินใน 3 มิติหลัก คือ

6.1.1 มิติทางวัฒนธรรม ดินทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนภูมิปัญญาท้องถิ่นและความชาญฉลาดในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่

6.1.2 มิติทางเทคนิค ดินมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้าน มวลความร้อน (Thermal Mass) และ ความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศ (Climatic Adaptability) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

6.1.3 มิติทางนิเวศวิทยา ในยุคของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดินกลับมามีความสำคัญในฐานะวัสดุที่มี พลังงานแฝงต่ำ (Low Embodied Energy) ที่สามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ

แม้ว่าดินจะถูกลดความสำคัญลงในช่วงการปฏิวัติอุตสาหกรรม การกลับมาของสถาปัตยกรรมดินในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผ่านเทคนิคดินอัดสมัยใหม่และการใช้สารคงสภาพในปริมาณที่จำกัด ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความทนทาน ศักยภาพทางสุนทรียภาพ และความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมโครงสร้าง

6.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการวิจัย

เพื่อให้ดินสามารถบรรลุศักยภาพสูงสุดในฐานวัสดุแห่งอนาคต ข้อเสนอแนะจึงมุ่งเน้นไปที่การส่งเสริมการใช้และพัฒนาทางเทคนิค

6.2.1 การพัฒนามาตรฐานและข้อกำหนดทางกฎหมาย

ควรมีการจัดทำ มาตรฐานทางวิศวกรรมสำหรับวัสดุดิน (Earth Building Codes) ที่ได้รับการยอมรับในระดับชาติและสากล เพื่อให้ผู้ประกอบการวิชาชีพ สถาปนิก และวิศวกร มีความมั่นใจในการออกแบบและก่อสร้างด้วยวัสดุนี้

กำหนดหลักเกณฑ์ที่ชัดเจนสำหรับ การคงสภาพของดิน (Stabilization) โดยระบุปริมาณสารคงสภาพสูงสุดที่อนุญาต เพื่อให้ยังคงรักษาคุณสมบัติด้านพลังงานแฝงต่ำไว้ได้

6.2.2 การวิจัยและพัฒนาวัสดุ

ควรมีการลงทุนในการวิจัยและพัฒนา สารคงสภาพทางชีวภาพ (Bio-based Stabilizers) และโพลีเมอร์ธรรมชาติ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่ปล่อยคาร์บอนสูง

ส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยี การพิมพ์ 3 มิติด้วยดิน (3D Earth Printing) เพื่อเพิ่มความเร็วในการก่อสร้างและลดต้นทุนแรงงานฝีมือในการสร้างรูปทรงที่ซับซ้อน

การวิเคราะห์และเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับ ประสิทธิภาพด้านความร้อนและความชื้น (Thermal and Hygrothermal Performance) ของอาคารดินในสภาพภูมิอากาศที่หลากหลาย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบเชิงชีวภูมิอากาศ

เอกสารอ้างอิง

กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2523). *คู่มือการจำแนกความเหมาะสมของที่ดินสำหรับพืชเศรษฐกิจ*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สรารุจ จิตงาม. (2545). *กลศาสตร์ของดิน*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Amicone, S., Croce, E., Castellano, L., & Giovanni, V. (2020). Building Forcello: Etruscan wattle-and-daub technique in the Po Plain (Bagnolo San Vito, Mantua, northern Italy). *Archaeometry*, 62(3), 521–537. <https://doi.org/10.1111/arcm.12535>

Anireddy, A. R. (2024). Labor cost estimation in construction: Analyzing factors that affect labor pricing and productivity. *European Journal of Engineering Education*, 11(4), 88–92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14044948>

Aras-Gaudry, A., Fronteau, G., & Hamard, E. (2023). Rediscovering raw earth heritage of Champagne area (France): Cartography and typology of a specific adobe vernacular architecture. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.310>

Ávila, F., Puertas, E., Blanca-Hoyos, Á., & Gallego, R. (2025). Rammed earth in modern construction: Physical and mechanical properties. In *Rammed earth in modern construction* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97818-0_9

Ball, V., & Norton, G. W. (2002). *Agricultural productivity: Measurement and sources of growth*. Springer.

Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Szilagyi, H. (2020). Opportunities regarding the use of adobe-bricks within contemporary architecture. *Procedia Manufacturing*, 46, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.023>

- Ceccarelli, L., Moletti, C., Bellotto, M., Dotelli, G., & Stoddart, S. (2020). Compositional characterization of Etruscan earthen architecture and ceramic production. *Archaeometry*, 62(6), 1130–1144.
- Ceolin, V. N., Gomes, M. I., & Oliveira, F. (2025). Application of recycled high-density polyethylene for construction of non-structural wattle and daub walls. *Interactions*, 246, Article 45.
<https://doi.org/10.1007/s10751-025-02266-z>
- Chen, L., Lan, Z., Wei, C., Ouyang, D., Shi, B., Chen, P., Wang, M., & Xie, T. (2024). Practice and reflection on rammed earth architecture: The case study of Tiles Hill-Xiangshan Campus Reception Centre in China. *Buildings*, 14(12), Article 4034. <https://doi.org/10.3390/buildings14124034>
- Cherner, J. (2021, April 29). Take a look at one of the world's first 3D-printed homes. *Architectural Digest*. <https://www.architecturaldigest.com/story/take-a-look-at-one-of-the-worlds-first-3d-printed-homes>
- Cornerstones Community Partnerships. (2006). *Adobe conservation: A preservation handbook*. Sunstone Press.
- Dai, S. (2026). A state-of-the-art review of the life cycle assessment of rammed earth building construction. *Energy & Buildings*, 350, Article 116643.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116643>
- Das, B. M. (2006). *Principles of geotechnical engineering*. Thomson Learning College.
- De Obaldia, M., Cortés-Chávez, F., Rosa-Sierra, L. A., & Garcia-Hernandez, M. (2022). The importance of the adobe brick for a sustainable architecture in Mexico. *Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure*, 58, 79–84.
<https://doi.org/10.54941/ahfe1002336>
- Faiella, G. (2005). *The technology of Mesopotamia*. The Rosen Publishing Group.
- Fontana, L. (2007). Molding earth outline: Typology, technology and morphology of earth building. In *Proceedings of the 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage* (pp. 1137–1154).
- Forsyth, M. (2008). *Materials and skills for historic building conservation*. Wiley-Blackwell.
- Foveo Tech. (n.d.). *Wattle and daub houses – i.e. what do Sudetes and Gdańsk Pomerania have in common?* <https://www.foveotech.co.uk/colors/worldwide-trends/wattle-and-daub-houses-ie-what-do-sudetes-and-gdansk-pomerania-have-in-common>
- Gomaa, M., Jabi, W., Veliz Reyes, A., & Soebarto, V. (2021). 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. *Automation in Construction*, 124, Article 103577.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>
- Gomaa, M., Vaculik, J., Soebarto, V., Griffith, M., & Jabi, W. (2021). Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction. *Construction and Building Materials*, 301, Article 124079. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124079>

- Gonidakis, D. N., Frangedaki, E. I., & Lagaros, N. D. (2024). Optimizing daylight performance of digital fabricated adobe walls. *Architecture*, 4(3), 515–540.
<https://doi.org/10.3390/architecture4030028>
- Goodnow, C. (2007, October 5). Thinking of building a cob home? *Seattle Post-Intelligencer*.
<https://www.seattlepi.com/lifestyle/homegarden/article/Thinking-of-building-a-cob-home-1251785.php>
- Gounni, A., & Louahlia, H. (2020). Dynamic behavior and economic analysis of sustainable building integrating cob and phase change materials. *Construction and Building Materials*, 262, Article 120795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120795>
- Heath, A., Lawrence, M., Walker, P., & Fourie, C. (2009). The compressive strength of modern earth masonry. In *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009)*.
- Hetherington, E., Perutxet Olesti, G., Lee, B., & Devadass, P. (2023). Variable aggregate impact printing of cob. In *HUMAN-CENTRIC: Proceedings of the 28th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)* (Vol. 2, pp. 613–622). CAADRIA.
- Hren, S. (2024). Experiments in modernizing cob construction. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 18(6), 276–281. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2024.06.003>
- ICAEN. (2004). *Sustainable building – Design manual: Sustainable building design practices*. TERI Press.
- Kultursekretariat NRW Gütersloh. (n.d.). *Bruder Klaus Feldkapelle* [Chapelle de campagne de frère Klaus]. NRW Skulptur. <https://nrw-skulptur.net/en/skulptur/bruder-klaus-feldkapelle/>
- Langenbach, R. (2016). Ancient and modern earthen construction in an earthquake: Bam, Iran in 2003. In H. Feiglstorfer (Ed.), *Earth construction and tradition* (Vol. 2). IVA-ICRA.
- Lin, X., Zhang, Y., Wu, Y., & Yang, Y. (2024). Assessment of architectural typologies and comparative analysis of defensive rammed earth dwellings in the Fujian region, China. *Buildings*, 14(11), Article 3652. <https://doi.org/10.3390/buildings14113652>
- Maher, J., Maged, A., Samy, S., Dewedar, H., Rostom, R., & Ghaz, L. (2025). Rammed earth in architecture education: From theoretical to hands-on pedagogy. *Journal of Engineering Education Transformations*, 39(2).
- Makinde, O. O. (2012). Ecological and sustainability issues in earth construction. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 1(4), 20–28.
- Mauricio, A. C., Grieseler, R., Heller, A. R., Kelley, A. R., Rumiche, F., Sandweiss, D. H., & Viveen, W. (2021). The earliest adobe monumental architecture in the Americas. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 118(48), Article e2102941118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Mitra, S. (2022). Architectural analysis of mud housing and adobe housing: Case of Bengal. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3(2), 560–575.

- Mokhova, T. (2019). *A large building in the middle of a desert* [Photograph]. Unsplash.
<https://unsplash.com/photos/a-large-building-in-the-middle-of-a-desert-9mfT6bA7yA0>
- Montalbano, G., Santi, G., & Khouloud, N. (2024). Rammed earth construction: A circular solution for sustainable building. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11(1), Article SUS-01. [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).SUS-01](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).SUS-01)
- Monteux, A.-V. (2004). *Grange en pisé à Bassey, Saint-Nicolas-de-Macherin* [Photographie]. Wikipédia.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pis%C3%A9#/media/Fichier:Grange.Bassey.Saint.Nicolas.Macherin.jpg>
- Morel, J-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., & Bui, Q-B. (2021). Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(182), 20200182. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>
- Moriset, S., Rakotomamonjy, B., & Gandreau, D. (2021). Can earthen architectural heritage save us? *Built Heritage*, 5, Article 19. <https://doi.org/10.1186/s43238-021-00041-x>
- Nadali, D. (2023). How to deal with adobe architecture in the ancient Near East: The case of Ebla in Syria. *Heritage*, 6(2), 1856–1870. <https://doi.org/10.3390/heritage6020099>
- Nasution, A. A., Muda, I., Ulfah, Y., Erlina, & Nedelea, A. M. (2022). The effect of labor input, construction cost, and building permits on production construction: Evidence from Europe. *International Journal of Professional Business Review*, 7(3), Article e0592. <https://doi.org/10.26668/businessreview/2022.v7i3.592>
- Ning, P., Gao, Y., Wahab, A. G., Zhong, T., Bai, W., & Yang, W. (2025). Rammed earth construction for sustainable and seismic-resilient buildings: Structural advances and constraints methods. *Materials and Structures*, 58, Article 221. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02742-6>
- Niroumand, H., Akbari, R., Khanlari, K., Gültekin, A. B., & Barcelo, J. A. (2021). A systematic literature review of rammed earth walls. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58(4), 295–301. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09742-y>
- Palumbo, J. (2021, April 27). Is this 3D-printed home made of clay the future of housing? *CNN Style*. <https://edition.cnn.com/style/article/tecla-3d-printed-house-clay/index.html>
- Parisi, N. (2024). New paradigms for earth construction. In *Proceedings of EARTH USA 2024* (pp. 212–219).
- Perić, A., Kraus, I., Kaluđer, J., & Kraus, L. (2021). Experimental campaigns on mechanical properties and seismic performance of unstabilized rammed earth—A literature review. *Buildings*, 11(8), Article 367. <https://doi.org/10.3390/buildings11080367>
- Rammuthupura, O., & Rupasinghe, H. (2024, September 27–29). *Variation of thermal comfort with the availability of climate responsive design strategies in wattle and daub residences: Case study* [Paper presentation]. The LEHM 2024: 9th International Conference on Building with Earth, Weimar, Germany.

- Reynolds, E. K., & Muramoto, M. (2024). Durability of Japanese-earth cob walls subjected to accelerated rain simulation. *Heritage Science*, 12, Article 154. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01251-z>
- Shah, D. L., & Shroff, A. V. (2003). *Soil mechanics and geotechnical engineering*. CRC Press.
- Soares, K., Torres, I., & Velosa, A. (2025). Portugal's wattle and daub constructive legacy. *Buildings*, 15(7), Article 1009. <https://doi.org/10.3390/buildings15071009>
- Szóstak, M. (2023). Best fit of cumulative cost curves at the planning and performed stages of construction projects. *Buildings*, 13(1), 13. <https://doi.org/10.3390/buildings13010013>
- The Real Bear. (2007). *Watchtower in the morning light, Dunhuang, Gansu Province* [Photograph]. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Rammed_earth#/media/File:Summer_Vacation_2007,_263,_Watchtower_In_The_Morning_Light,_Dunhuang,_Gansu_Province.jpg
- Umubyeyi, C., Wenger, K., Dahmen, J., & Ochsendorf, J. (2023). Durability of unstabilized rammed earth in temperate climates: A long term study. *Construction and Building Materials*, 409, Article 133953. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133953>
- WASP. (n.d.). *TECLA: 3D printed house from local earth*. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>
- Wu, X., Shi, Q., Huo, J., & Tao, Y. (2023). *Experimental study on buildability and mechanical properties of 3D printing cob* (Version 1) [Preprint]. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3303412/v1>
- Wyźgół, M., & Deptuła, A. (2020). Living outside the wall: The quarter of wattle-and-daub houses in Old Dongola of the Funj period. *Journal of African Archaeology*, 18(1), 109–132. <https://doi.org/10.1163/21915784-20200005>
- Xie, T. Y. (2025, September). *Preliminary study on traditional Chinese cob buildings and their construction techniques: A case study of Yaozhuang Township* [Conference paper]. HERITAGE 2025: International Conference on Earthen and Vernacular Heritage, Valencia, Spain. <https://doi.org/10.4995/HERITAGE2025.2025.19344>
- Yemesegen, E. B., & Memari, A. M. (2023). A review of experimental studies on cob, hempcrete, and bamboo components and the call for transition towards sustainable home building with 3D printing. *Construction and Building Materials*, 399, Article 132603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132603>