

วัสดุก่อสร้างจากของเสีย

การวิเคราะห์เชิงลึกและแนวทางการคาร์บอนต่ำ

Waste-Derived Building Materials

In-Depth Analysis and Low-Carbon Pathways

ศิวัช ลาวัลย์วดีกุล

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



วัสดุก่อสร้าง จากของเสีย

การวิเคราะห์เชิงลึก
และแนวทางคาร์บอนต่ำ



Waste-Derived Building Materials
In-Depth Analysis and Low-Carbon Pathways

ศิวัช ลาวัลย์วุฒิกุล

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

วัสดุก่อสร้างจากของเสีย:

การวิเคราะห์เชิงลึกและแนวทางคาร์บอนต่ำ

Waste-Derived Building Materials:

In-Depth Analysis and Low-Carbon Pathways

บรรณาธิการ:

กรกฎ งานวงศ์พานิชย์

ISBN (e-book):

978-616-620-143-7

ผู้เขียน:

ศิวัช ลาวัลย์วดีกุล

จัดพิมพ์โดย:

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์: 0 5394 3603-5

<https://cmupress.cmu.ac.th>,

E-mail: cmupress.th@gmail.com

พิมพ์ครั้งที่ 1:

กันยายน 2569

ราคา:

320 บาท

หนังสือเล่มนี้ ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและต่างสถาบัน เพื่อตรวจสอบและรับรองการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ประเภทหนังสือหรือตำรา ซึ่งจัดพิมพ์โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เรียบร้อยแล้ว

© สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ห้ามลอกเลียนแบบ ทำซ้ำ ดัดแปลง ส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ รวมทั้งการจัดเก็บ ถ่ายทอดไม่ว่ารูปแบบหรือวิธีการใด ๆ ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายภาพ การบันทึกหรือวิธีการอื่นใด โดยไม่ได้รับอนุญาต

คำนำ

ตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การขยายตัวของเมือง และการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ แต่ในขณะเดียวกัน ภาคส่วนนี้ก็เป็นหนึ่งในแหล่งสร้างแรงกดดันต่อสิ่งแวดล้อมที่สูงที่สุด ทั้งในมิติของการปล่อยคาร์บอนแฝง (embodied carbon) จากการพึ่งพาวัสดุปฐมภูมิ และการก่อให้เกิดของเสีย ในปริมาณมหาศาลจากกระบวนการก่อสร้างและรีดถอน ตลอดจนของเสียที่ไหลมาจากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และชุมชนเมือง หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้นจากการตระหนักถึงวิกฤตการณ์ดังกล่าว และจากความเชื่อมั่นว่าของเสียที่ถูกมองข้ามเหล่านั้น แท้จริงแล้วคือทรัพยากรหุติภูมิที่มีศักยภาพในการเป็นรากฐานของวัสดุก่อสร้างแห่งอนาคต

หนังสือ วัสดุก่อสร้างจากของเสีย: การวิเคราะห์เชิงลึกและแนวทางคาร์บอนต่ำ มีจุดมุ่งหมายหลักในการสังเคราะห์ องค์ความรู้ด้านวัสดุก่อสร้างจากของเสียอย่างบูรณาการ ครอบคลุมมิติด้านวิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมโครงสร้าง วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และนโยบายสาธารณะ โดยใช้คำถามเชิงยุทธศาสตร์สามประการเป็นแกนกลางของการนำเสนอ ได้แก่ 1) ของเสียชนิดใดในประเทศไทยที่มีศักยภาพสูงสุดในการลดคาร์บอนแฝง 2) กระบวนการใดสามารถแปรรูปของเสียให้กลายเป็นวัสดุที่มีสมรรถนะเชิงวิศวกรรมที่น่าเชื่อถือและพิสูจน์ได้ และ 3) กรอบการทำงานใดที่สามารถปลดล็อกอุปสรรคเชิงระบบเพื่อขยายผลสู่การใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและตลาดเชิงพาณิชย์

เนื้อหาของหนังสือเล่มนี้พัฒนาขึ้นจากสามแหล่งสำคัญ ได้แก่ งานวิจัยเชิงลึกของผู้เขียนและคณะที่สั่งสมมาในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การศึกษาเชิงทดลองและงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับวัสดุก่อสร้างจากของเสียและการวิเคราะห์เชิงระบบต่อบริบทนโยบาย เศรษฐกิจ และสังคมของประเทศไทย ผู้เขียนพยายามผสานองค์ความรู้เหล่านี้เข้าด้วยกันในรูปของกรอบคิดและแบบจำลองเชิงแนวคิด เพื่อให้ผู้อ่านไม่เพียงได้รับข้อมูลเชิงข้อเท็จจริง แต่ยังสามารถมองเห็นโครงสร้างของปัญหาและทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ได้อย่างเป็นระบบ

หนังสือเล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากขาดการสนับสนุนจากหน่วยงานทางวิชาการ เพื่อนร่วมวิชาชีพ และนักศึกษาจำนวนมากที่มีส่วนร่วมในการเก็บข้อมูล ทดลองในห้องปฏิบัติการ และแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็นในระหว่างการจัดทำต้นฉบับ ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันการศึกษา หน่วยงานวิจัย แหล่งทุน และผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและเปิดโอกาสให้ได้ลงพื้นที่ศึกษากรณีจริง ตลอดจนขอขอบคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ผู้เขียนตระหนักดีว่าประเด็นวัสดุก่อสร้างจากของเสียและแนวทางคาร์บอนต่ำเป็นสาขาที่ยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หนังสือเล่มนี้จึงมีได้อ้างอิงให้คำตอบสุดท้าย หากแต่มุ่งหวังจะทำหน้าที่เป็นฐานความรู้และกรอบคิดที่จะช่วยให้การวิจัยและการสนทนาในประเด็นนี้ของประเทศไทยก้าวหน้าและลึกซึ้งยิ่งขึ้น ข้อเสนอแนะและข้อวิจารณ์จากผู้อ่านจึงมีคุณค่ายิ่งต่อการพัฒนางานวิชาการในสาขานี้ต่อไป

ศิวัช ลาวัลย์วดีกุล

ตัวอย่าง

สารบัญ

	หน้า
คำนิยาม	III
คำนำ	V
สารบัญ	VII
สารบัญภาพ	X
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 สถานการณ์ของวัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วิกฤตการณ์คาร์บอนที่เกิดจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง	3
1.3 สถานการณ์ของเสียจากภาคการก่อสร้างในประเทศไทย	6
1.4 พัฒนาการงานวิจัยวัสดุก่อสร้างทางเลือกในประเทศไทย	10
1.5 แรงขับเคลื่อนเชิงนโยบายจากโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน	13
1.6 โอกาสและความท้าทายของวัสดุก่อสร้างทางเลือกจากของเสีย	15
1.7 บทสรุป	17
เอกสารอ้างอิงบทที่ 1	19
บทที่ 2 เศรษฐกิจหมุนเวียน นโยบาย BCG และการประเมินวัฏจักรชีวิต	25
ภายใต้กรอบการวิเคราะห์วัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ	
2.1 บทนำ	25
2.2 รากฐานเชิงทฤษฎีของเศรษฐกิจหมุนเวียน เศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจสีเขียว และแนวทางคาร์บอนต่ำ	27
2.3 การประยุกต์ใช้เศรษฐกิจหมุนเวียนเข้ากับวัสดุก่อสร้างทางเลือก	31
2.4 นโยบายและกลยุทธด้านวัสดุของไทยภายใต้นโยบาย เศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว	35
2.5 กรณีศึกษาด้านวิศวกรรมวัสดุในต่างประเทศ	40
2.6 ความท้าทายในการนำวัสดุก่อสร้างทางเลือกไปใช้งานจริง	42
2.7 บทสรุป	45
เอกสารอ้างอิงบทที่ 2	47

บทที่ 3 การวิเคราะห์เชิงลึกและการสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม	55
3.1 บทนำ	55
3.2 เติ้าลอย	56
3.3 ตะกรันจากอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า	61
3.4 ตะกอนแดง	66
3.5 ยิปซัม	70
3.6 บทสรุป	73
เอกสารอ้างอิงบทที่ 3	76
บทที่ 4 การวิเคราะห์เชิงลึกและการสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสียภาคเกษตร	81
4.1 บทนำ	81
4.2 ฟางข้าว	82
4.3 ชังข้าวโพด	86
4.4 ผักตบชวา	89
4.5 ทากกาแฟ	93
4.6 ไบโอดีเซล	96
4.7 บทสรุป	100
เอกสารอ้างอิงบทที่ 4	101
บทที่ 5 การวิเคราะห์เชิงลึกและการสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสียภาคชุมชน	109
5.1 บทนำ	109
5.2 พลาสติก	110
5.3 แก้ว	115
5.4 ยางรถยนต์	120
5.5 เศษวัสดุจากการก่อสร้างและรีดถอน	124
5.6 บทสรุป	130
เอกสารอ้างอิงบทที่ 5	132

บทที่ 6 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการประเมิน	139
วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์	
6.1 บทนำ	139
6.2 หลักการและระเบียบวิธีของการประเมินวัฏจักรชีวิต	141
6.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของวัสดุจากของเสียภาคอุตสาหกรรม	143
6.4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของวัสดุจากของเสียภาคเกษตร	147
6.5 การประเมินวัฏจักรชีวิตของวัสดุจากของเสียภาคชุมชน	151
6.6 ผลงานแผนและความเสี่ยงด้านมลพิษ	155
6.7 บทสรุป	159
เอกสารอ้างอิงบทที่ 6	160
บทที่ 7 บทสรุปเชิงสังเคราะห์และแผนที่นำทางสู่วัสดุที่ก่อสร้างคาร์บอนต่ำ	171
ของประเทศไทย	
7.1 บทนำ	171
7.2 ช่องว่างทางงานวิจัยและความต้องการเชิงนวัตกรรม	172
7.3 วัสดุและเทคโนโลยีเกิดใหม่	179
7.4 พลังขับเคลื่อนระหว่างมหาวิทยาลัย-อุตสาหกรรม-ชุมชน	183
7.5 การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบนิเวศการก่อสร้างคาร์บอนต่ำของประเทศไทย	186
7.6 บทสรุปและทิศทางอนาคต	188
เอกสารอ้างอิงบทที่ 7	189
ดัชนีคำค้น	193
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	197

บทที่ 1

สถานการณ์ของวัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ (Overview of Low-Carbon Construction Materials)

1.1 บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเปรียบเสมือนกระดูกสันหลังของการพัฒนาอารยธรรมสมัยใหม่ เป็นรากฐานสำคัญของโครงสร้างพื้นฐาน การขยายตัวของเมือง และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจทั่วโลก แต่ภาคส่วนนี้กำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์คู่ขนาน (dual crisis) ที่ท้าทายความยั่งยืนของโลก ได้แก่ 1) การก่อให้เกิดของเสียในปริมาณมหาศาลจากกระบวนการผลิต การก่อสร้าง และการรื้อถอน และ 2) การเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases, GHGs) รายใหญ่ของโลก โดยรายงานสถานการณ์อาคารและการก่อสร้างระดับโลก พ.ศ. 2568–2569 ระบุว่า ภาคอาคารและการก่อสร้างมีส่วนประมาณร้อยละ 37 ของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก และเกี่ยวข้องกับการสกัดวัสดุเกือบร้อยละ 50 ของโลก (IEA, 2024; UNEP, 2021) สำหรับประเทศไทย ภาคการก่อสร้างมีส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ร้อยละ 27 ในขณะที่กระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างมีส่วนเพิ่มเติมอีกร้อยละ 25–30 ส่งผลให้เมื่อรวมทั้งสองส่วนแล้วภาคนี้มีน้ำหนักการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูง ดังแสดงในภาพที่ 1.1 (Poolsawad, n.d.)



ภาพที่ 1.1 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคการก่อสร้างในประเทศไทย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Poolsawad (n.d.)

กระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมยึดแบบจำลองเศรษฐกิจเส้นตรง (linear economy model) ซึ่งดำเนินตามแนวทาง ผลิต-ใช้-ทิ้ง ส่งผลให้ภาคการก่อสร้างพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติปฐมภูมิ (virgin resources) ในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง จนก่อให้เกิดความไม่ยั่งยืนทางทรัพยากรในระยะยาว ปัจจุบันภาคการก่อสร้างใช้วัตถุดิบมากกว่าร้อยละ 40 ของทรัพยากรโลกทั้งหมด (Bertino et al., 2021) และก่อให้เกิดของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน (construction and demolition waste, C&D waste) กว่า 2.24 พันล้านตันต่อปี (Eurostat, 2024; GlobalABC, 2022) วิกฤตการณ์คู่นี้ได้มาถึงจุดที่ไม่อาจเพิกเฉย และกำลังเร่งให้เกิดการแสวงหากระบวนทัศน์ใหม่ (new paradigm) เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาและความยั่งยืนอย่างแท้จริง

ท่ามกลางความท้าทายดังกล่าว กรอบแนวคิดหลักของหนังสือเล่มนี้มุ่งเน้นการสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสีย (waste valorization) ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าสามารถเปลี่ยนของเสียจากภาระที่ต้องกำจัดให้กลายเป็นทรัพยากรที่มนุษย์สร้างขึ้น (anthropogenic resources) และนำกลับเข้าสู่ระบบการผลิตได้ใหม่ (Krook et al., 2012) แนวคิดนี้สอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่เน้นการยืดอายุการใช้งานของวัสดุ การรีไซเคิล และการอัปไซเคิล เพื่อลดการพึ่งพาทรัพยากรปฐมภูมิและลดคาร์บอนแฝงในวัสดุก่อสร้าง ทั้งนี้ งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุรีไซเคิลแทนการผลิตวัสดุใหม่จากธรรมชาติสามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้ถึงร้อยละ 11 ของการปล่อยคาร์บอนทั่วโลก (Marzouk, 2025)

ประเทศไทยในฐานะสมาชิกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้กำลังเผชิญกับความท้าทายที่ซับซ้อน โดยเฉพาะการต้องขับเคลื่อนเศรษฐกิจผ่านการก่อสร้างและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ควบคู่กับพันธกรณีด้านสิ่งแวดล้อมในการลดการปล่อยคาร์บอนให้บรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2593 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (net-zero emissions) ภายในปี พ.ศ. 2608 ความท้าทายทั้งสองด้านนี้ทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น เมื่อปริมาณของเสียในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนซึ่งมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20–25 ของขยะมูลฝอยทั้งหมดในประเทศ หรือราว 15–20 ล้านตันต่อปี (Pollution Control Department, 2021)

ประเทศไทยมีศักยภาพเชิงทรัพยากรที่โดดเด่น ทั้งผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เช่น แก้วลอย และเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตะกรันเหล็กจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และยิปซัมสังเคราะห์จากกระบวนการบำบัดก๊าซ รวมถึงชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว และชานอ้อย วัสดุเหล่านี้ได้รับการพัฒนาให้เป็นวัตถุดิบทุติยภูมิ (secondary raw materials) สำหรับผลิตวัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำอย่างเป็นรูปธรรม เช่น การใช้แก้วลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต หรือการใช้เส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน

ในระดับนโยบาย ประเทศไทยได้กำหนดนโยบายเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (bio-circular-green economy, BCG) เป็นยุทธศาสตร์ชาติ เพื่อขับเคลื่อนการเติบโตทางเศรษฐกิจควบคู่กับความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม โมเดลนี้ทำหน้าที่เป็นกรอบที่เอื้ออำนวย (enabling framework) ในการเชื่อมโยงสามองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ 1) ศักยภาพทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศ 2) ความพร้อมขององค์ความรู้และงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยและหน่วยงานวิทยาศาสตร์ และ 3) การสนับสนุนเชิงนโยบายจากภาครัฐ (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2565) แต่ช่องว่างสำคัญที่ยังคงเป็นอุปสรรคในปัจจุบัน คือการขาดการเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการกับการนำไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการขาดมาตรฐานรับรองคุณภาพวัสดุทางเลือก ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการสร้างความเชื่อมั่นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

หนังสือเล่มนี้จึงมีเป้าหมายในการรวบรวมและสังเคราะห์องค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างทางเลือก เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว และสร้างกรอบยุทธศาสตร์วัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำในบริบทของประเทศไทย โดยเริ่มจากการวิเคราะห์สถานการณ์ของอุตสาหกรรมและทรัพยากร วางกรอบเศรษฐกิจและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวิเคราะห์เชิงลึกถึงช่องเสียจากสามภาคส่วนหลัก ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และภาคชุมชน ก่อนเชื่อมโยงสู่การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการกำหนดแนวทางสำหรับอนาคตของประเทศ เพื่อตอบคำถามสำคัญว่า ประเทศไทยจะสามารถเปลี่ยนวิกฤตการณ์คู่นานให้เป็นโอกาส และสร้างภาคการก่อสร้างที่มีความพร้อมรับมือกับอนาคต (future-resilient construction sector) ได้อย่างไร

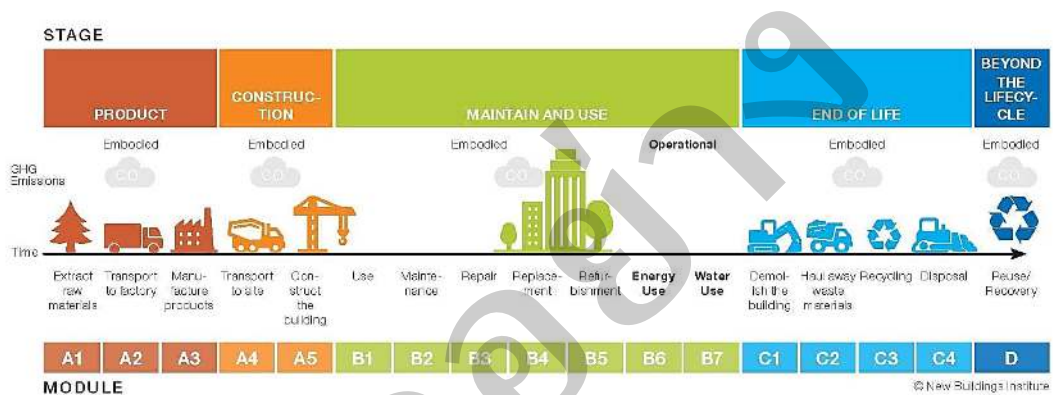
1.2 วิกฤตการณ์คาร์บอนที่เกิดจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง

แม้ว่าภาคการก่อสร้างจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมากดังที่แสดงในภาพที่ 1.1 แต่ความท้าทายที่แท้จริงไม่ได้อยู่ที่ปริมาณการปล่อยเพียงอย่างเดียว หากยังอยู่ที่ลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดการปล่อยตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคารและสิ่งก่อสร้าง การปล่อยคาร์บอนในวัฏจักรดังกล่าวแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ คาร์บอนจากการดำเนินงาน (operational carbon) และคาร์บอนแฝง (embodied carbon) สำหรับวิศวกรวัสดุและผู้กำหนดนโยบาย คาร์บอนแฝงถือเป็นโจทย์ที่ซับซ้อนกว่าเนื่องจากเกิดขึ้นก่อนที่อาคารจะเริ่มใช้งาน ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง และกระบวนการผลิตวัสดุ (Liu et al., 2020)

ในภาพที่ 1.2 มาตรฐาน EN 15978 ได้จัดระบบการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคารออกเป็น 4 ช่วงหลัก โดยแต่ละช่วงมีขอบเขตดังนี้

1) ช่วง A (product and construction) ครอบคลุมคาร์บอนแฝงทั้งหมดก่อนอาคารเริ่มใช้งาน แบ่งเป็นมอดูล A1–A3 ได้แก่ การสกัดวัตถุดิบ การขนส่งสู่โรงงาน และการผลิตวัสดุ และมอดูล A4–A5 ได้แก่ การขนส่งวัสดุสู่หน้างานและกระบวนการก่อสร้าง ช่วงนี้เป็นจุดที่วิศวกรวัสดุมีบทบาทสำคัญที่สุดในการลดคาร์บอนแฝง เนื่องจากการเลือกวัสดุในขั้นตอนนี้ส่งผลกระทบต่อการปล่อยคาร์บอนตลอดทั้งวัฏจักร

2) ช่วง B (maintain and use) ครอบคลุมทั้งคาร์บอนแฝงและคาร์บอนจากการดำเนินงาน ในช่วงที่อาคารถูกใช้งาน แบ่งเป็นมอดูล B1–B5 ได้แก่ การใช้งาน การบำรุงรักษา การซ่อมแซม การเปลี่ยนชิ้นส่วน และการปรับปรุง และมอดูล B6–B7 ซึ่งเป็นคาร์บอนจากการดำเนินงาน ได้แก่ การใช้พลังงานและการใช้น้ำในอาคาร



ภาพที่ 1.2 ตลอดวัฏจักรชีวิตของวัสดุก่อสร้าง ตั้งแต่การขุดวัตถุดิบถึงการรีไซเคิล

ที่มา: European Committee for Standardization (2011)

3) ช่วง C (end of life) ครอบคลุมมอดูล C1–C4 ได้แก่ การรื้อถอน การขนส่งของเสีย การแปรรูปของเสีย และการฝังกลบ ซึ่งเป็นช่วงที่มีกฎหมายเข้ามาในการประเมิน แต่มีนัยสำคัญต่อการออกแบบวัสดุเพื่อการรีไซเคิล

4) ช่วง D (beyond the lifecycle) เป็นช่วงที่ไม่บังคับในการรายงาน แต่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน ครอบคลุมศักยภาพในการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ (reuse) และการนำพลังงานกลับคืน (energy recovery) ซึ่งสะท้อนถึงคุณค่าของวัสดุที่ยังคงมีอยู่เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของอาคาร

ต้นทุนหลักของคาร์บอนแฝงมาจากกระบวนการผลิตวัสดุพื้นฐานที่ใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักของโลก กระบวนการผลิตปูนเม็ด (clinker) ต้องอาศัยปฏิกิริยาแคลไซน์ชัน (calcination) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1450 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ให้กลายเป็นปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปฏิกิริยาเคมีนี้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงคิดเป็นส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 40 มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Orsini & Marrone, 2019) ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าแม้ภาคอุตสาหกรรมจะเปลี่ยนไปใช้พลังงานสะอาดได้มากเพียงใด การปล่อยคาร์บอนจากปฏิกิริยาเคมีของวัตถุดิบปฐมนิคมก็ยังคงอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อพิจารณาในเชิงอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแคลไซน์ชัน $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ เห็นได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนหนึ่งเกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยตรง มิใช่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพเตาเผาหรือการเปลี่ยนแหล่งพลังงานสามารถลดการปล่อยจากเชื้อเพลิงได้ แต่ไม่สามารถกำจัดการปล่อยจากปฏิกิริยาเคมีของวัตถุดิบได้ทั้งหมด ประเด็นนี้สะท้อนข้อจำกัดเชิงพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และชี้ให้เห็นความจำเป็นของวัสดุประสานทางเลือกที่ลดการพึ่งพาวัตถุดิบคาร์บอนเนต การเปลี่ยนมาใช้วัสดุทางเลือกจึงเป็นกลไกสำคัญในการลดคาร์บอนแฝงเชิงลึกของภาคการก่อสร้าง

นอกจากซีเมนต์แล้ว อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีส่วนรับผิดชอบต่อการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั่วโลกประมาณร้อยละ 7–9 โดยกระบวนการถลุงเหล็กด้วยถ่านหินเป็นปัจจัยหลัก (Holappa, 2021) ในขณะที่อุตสาหกรรมอิฐดินเผาและเซรามิก แม้จะมีสัดส่วนการปล่อยต่อหน่วยน้อยกว่า แต่ก็มีผลกระทบสะสมจากการใช้พลังงานในกระบวนการเผาในระดับที่ไม่อาจมองข้ามได้ ซึ่งค่าคาร์บอนแฝงโดยประมาณของวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมในแต่ละประเภทวัสดุแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคาร์บอนแฝงของวัสดุก่อสร้าง

วัสดุตั้งเดิม	คาร์บอนแฝงโดยประมาณ ($\text{kg CO}_2\text{e}$)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	0.8–0.9
เหล็กโครงสร้าง	1.8–2.5
อิฐดินเผา	0.2–0.4

ที่มา: Crawford, 2022; Kumar et al., 2025

วิกฤตการณ์กำลังขยายผลสู่มิติเศรษฐศาสตร์และการค้าระหว่างประเทศ โดยกลไกการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดนของสหภาพยุโรป (carbon border adjustment mechanism, CBAM) (Firoozi et al., 2024) และแนวโน้มการจัดเก็บภาษีคาร์บอนในประเทศไทยส่งผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตวัสดุก่อสร้าง ผู้ประกอบการที่ไม่สามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์กำลังเผชิญกับความเสี่ยงด้านขีดความสามารถในการแข่งขันที่เพิ่มสูงขึ้น (Misila et al., 2020)

ในระดับการตอบสนองเชิงนโยบาย การประกาศใช้มาตรฐานปูนซีเมนต์ ไฮดรอลิก (มอก. 2594-2556) ซึ่งอนุญาตให้ใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณร้อยละ 10-15 (Bangviwat et al., 2025) ควบคู่กับการพัฒนาวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer binders) ที่ได้รับการพิจารณาเป็นทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Luhar & Luhar, 2022) แต่การเปลี่ยนผ่านสู่วัสดุทางเลือกยังเผชิญอุปสรรคเชิงระบบ (systemic barriers) ได้แก่ ความได้เปรียบเชิงขนาดของอุตสาหกรรมวัสดุดั้งเดิม ต้นทุนการผลิตในระยะเริ่มต้นที่ยังสูง และการขาดกรอบนโยบายและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่รองรับวัสดุประสานรูปแบบใหม่ ด้วยเหตุนี้ ประเทศไทยจึงจำเป็นต้องเร่งดำเนินการทั้งด้านการวิจัย การกำหนดมาตรฐาน และกลไกสนับสนุนอุตสาหกรรม เพื่อบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนอย่างสมบูรณ์

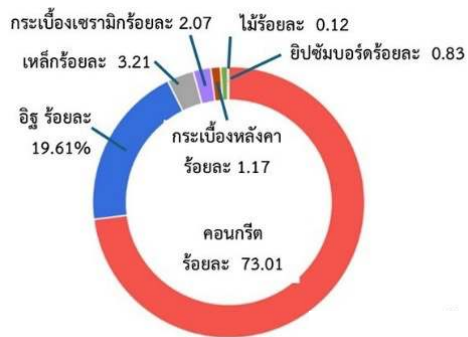
1.3 สถานการณ์ของเสียจากภาคการก่อสร้างในประเทศไทย

ผลกระทบเชิงประจักษ์ที่ชัดเจนที่สุดของอุตสาหกรรมก่อสร้างคือ การเกิดของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน ซึ่งเป็นหนึ่งในกระแสของเสียที่มีปริมาณสูงที่สุดในระบบจัดการของเสียของเขตเมือง ในบริบทของประเทศไทย การขยายตัวของความเป็นเมืองและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ส่งผลให้ปริมาณของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีการประมาณการว่ามีสัดส่วนสูงถึงหนึ่งในสี่ของขยะมูลฝอยทั้งหมดในประเทศ (Kofoworola & Gheewala, 2008) ปริมาณมหาศาลดังกล่าวไม่เพียงสร้างแรงกดดันต่อพื้นที่ฝังกลบที่มีจำกัด แต่ยังสะท้อนถึงความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการละทิ้งทรัพยากรที่ยังมีศักยภาพ

องค์ประกอบของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนในประเทศไทยสะท้อนถึงวิธีการก่อสร้างที่พึ่งพาวัสดุน้ำหนักเป็นหลัก โดยคอนกรีตเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งในของเสียจากการก่อสร้าง ร้อยละ 76.70 และจากการรื้อถอน ร้อยละ 73.01 รองลงมาคือ อิฐ ร้อยละ 13.73 และร้อยละ 19.61 ตามลำดับ (Luangcharoenrat et al., 2019) ดังภาพที่ 1.3



(a) ของเสียจากการก่อสร้าง



(b) ของเสียจากการรื้อถอน

ภาพที่ 1.3 องค์ประกอบของของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและการรื้อถอนที่พบในประเทศไทย

ที่มา: Poolsawad (n.d.)

เพื่อให้เข้าใจศักยภาพในการสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสียเหล่านี้ (valorization potential) จึงได้จำแนกตามสมบัติทางวัสดุศาสตร์ออกเป็น 3 กลุ่มเชิงยุทธศาสตร์ ดังนี้

- 1) กลุ่มมวลรวมเฉื่อย (inert aggregates) ประกอบด้วยเศษคอนกรีต อิฐ และหิน มีความเสถียรทางเคมีสูง เหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นมวลรวมทุติยภูมิ (secondary aggregates) เพื่อทดแทนหินธรรมชาติในงานคอนกรีตโครงสร้างหรือชั้นพื้นทาง
- 2) กลุ่มทรัพยากรฐานชีวภาพ (bio-based resources) ได้แก่ เศษไม้และแบบหล่อคอนกรีตสามารถแปรรูปเป็นวัสดุคอมโพสิต แผ่นขึ้นไม้อัด หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล
- 3) กลุ่มวัสดุที่นำกลับคืนได้ (recoverable materials) ประกอบด้วยโลหะ แก้ว และพลาสติกมีมูลค่าตลาดรองรับสูงหากมีการคัดแยกที่มีประสิทธิภาพตั้งแต่ต้นทาง

แม้ว่าวัสดุทั้งสามกลุ่มจะมีศักยภาพสูง แต่แนวปฏิบัติในการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนของไทยในปัจจุบันยังคงห่างไกลจากหลักการลำดับขั้นการจัดการของเสีย (waste hierarchy) หลักการนี้จัดลำดับแนวทางการจัดการของเสียจากที่พึงประสงค์มากที่สุดไปหาน้อยที่สุด โดยเริ่มจาก 1) การปฏิเสธและออกแบบใหม่เพื่อไม่ให้เกิดของเสีย (refuse, rethink, redesign) 2) การลดและนำกลับมาใช้ซ้ำ (reduce and reuse) 3) การเตรียมวัสดุเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (preparation for reuse) 4) การรีไซเคิลและการหมักทางชีวภาพ (recycling and composting) 5) การนำวัสดุและสารเคมีกลับคืน (material and chemical recovery) และ 6) การจัดการกากของเสีย (residuals management) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 ลำดับชั้นการจัดการของเสีย

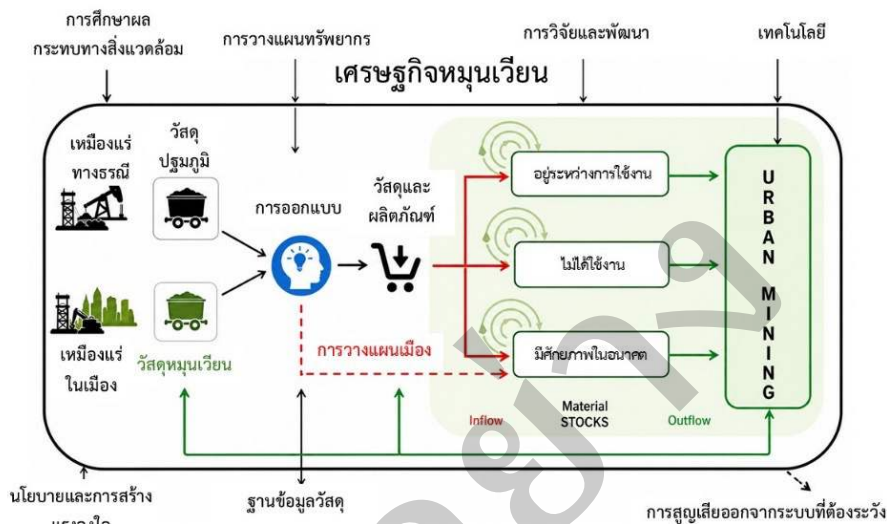
ที่มา: Zero Waste International Alliance (2018)

การฝังกลบโดยไม่มีการแปรรูปใด ๆ เป็นแนวทางที่ยอมรับไม่ได้ (unacceptable) ในบริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียน ในความเป็นจริงของเสียจากการก่อสร้างและรีไซเคิลของไทยส่วนใหญ่ยังถูกนำไปฝังกลบโดยตรง ขาดระบบคัดแยกและแปรรูปที่มีประสิทธิภาพ สะท้อนให้เห็นว่าประเทศไทยยังติดอยู่ในระดับล่างสุดของลำดับชั้นนี้ และมีช่องว่างอีกมากในการยกระดับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและรีไซเคิลสู่แนวทางที่ยั่งยืนกว่า

การจัดลำดับชั้นดังกล่าวให้ความสำคัญกับการป้องกันการเกิดของเสีย (most preferable) ไปสู่การกำจัด (least preferable) สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักคืออันตรายทางคาร์บอนของแต่ละลำดับชั้น การฝังกลบหรือการเผาทำลายเปรียบเสมือนการสูญเสียคาร์บอนแฝงที่ได้ลงทุนไปแล้วในกระบวนการผลิตวัสดุ (loss of embodied carbon) อีกทั้งยังก่อภาระคาร์บอนใหม่จากการขนส่งไปกำจัดและการปล่อยก๊าซมีเทนในทางตรงข้าม การใช้ซ้ำและการรีไซเคิลช่วยรักษาคาร์บอนแฝงให้คงอยู่ในระบบเศรษฐกิจ และลดการปล่อยคาร์บอนใหม่ผ่านการหลีกเลี่ยงกระบวนการผลิตวัสดุปฐมภูมิ (avoided burden)

อย่างไรก็ตาม สถานการณ์จริงในประเทศไทยยังพึ่งพาภาคการรีไซเคิลนอกระบบ (informal recycling sector) เป็นหลัก แม้จะช่วยหมุนเวียนทรัพยากรได้บางส่วน แต่กระบวนการมักขาดมาตรฐานทางวิศวกรรม ส่งผลให้เกิดการลดระดับคุณภาพวัสดุ (downcycling) หรือการรีไซเคิลที่ได้มูลค่าต่ำ (low-value recycling) ทำให้วัสดุจำนวนมากสูญเสียศักยภาพที่จะนำไปใช้ในระดับที่สูงกว่า (Kofoworola & Gheewala, 2008)

เพื่อปลดล็อกศักยภาพของเสียจากการก่อสร้างและรีออลอน เริ่มจากการเปลี่ยนแนวคิดที่มองของเสียเป็นภาระที่ต้องกำจัด ไปสู่การมองว่าเป็นเหมืองแร่ในเมือง (urban mine) หรือคลังวัสดุสะสม (material stock) เมื่อผ่านกระบวนการออกแบบอย่างชาญฉลาด การผลิตวัสดุและผลิตภัณฑ์ ทั้งในรูปแบบที่อยู่ระหว่างการใช้งาน ไม่ได้ใช้งาน และคาดว่าจะมีศักยภาพสำหรับการนำกลับมาใช้ในอนาคต จะสามารถนำกลับเข้าสู่ระบบเป็นวัสดุหมุนเวียนอีกครั้ง ดังแสดงกระบวนการในภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.5 ระบบการจัดการแหล่งทรัพยากรในเมืองตามแนวเศรษฐกิจหมุนเวียน

ที่มา: Medkova & Fifield (n.d.)

หากพิจารณาด้วยมุมมองการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (material flow analysis, MFA) พบว่าความท้าทายสำคัญของประเทศไทยไม่ได้อยู่ที่การมีของเสียจากการก่อสร้างและรีออลอนเพียงพอหรือไม่ แต่อยู่ที่การขาดข้อมูลคลังวัสดุสะสมของเมืองในเชิงพื้นที่และเวลา ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการคาดการณ์ว่า วัสดุประเภทใดจะกลายเป็นของเสีย เมื่อใด ที่ใด และในปริมาณเท่าใด หากไม่มีข้อมูลนี้ ระบบรีไซเคิลจะไม่สามารถวางแผนกำลังการผลิต การขนส่ง และการควบคุมคุณภาพของวัสดุดิบป้อนเข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวคิดเหมืองแร่ในเมืองจึงต้องพัฒนาไปพร้อมกับฐานข้อมูลวัสดุ ระบบคัดแยกต้นทาง และมาตรฐานวัสดุทุติยภูมิ

1.4 พัฒนาการงานวิจัยวัสดุก่อสร้างทางเลือกในประเทศไทย

ประเทศไทยมีบริบทที่น่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนานวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง อันเนื่องมาจากโครงสร้างเศรษฐกิจแบบผสมผสานระหว่างภาคเกษตรกรรมที่แข็งแกร่งและภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว นอกเหนือจากการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและรีไซเคิล ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 1.3 แล้ว ประเทศไทยยังมีศักยภาพสูงในการบูรณาการของเสียจากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมเข้าสู่ห่วงโซ่อุปทานวัสดุก่อสร้าง เพื่อแก้ปัญหามลพิษทางดินและน้ำ การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกัน ในเชิงวิศวกรรมวัสดุจากของเสียเหล่านี้มีลักษณะเป็นวัสดุพิเศษที่มีคุณสมบัติที่สามารถพัฒนาให้ตอบโจทย์ทั้งสมรรถนะเชิงโครงสร้างและการลดคาร์บอนได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยและการศึกษาเชิงทดลองจำนวนมากในประเทศได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิค (technical feasibility) ในการสร้างมูลค่าเพิ่มจากกระแสของเสียที่หลากหลาย ทั้งในรูปของวัสดุประสาน วัสดุผสม และวัสดุฟังก์ชันเฉพาะทาง ดังตัวอย่างกรณีศึกษาต่อไปนี้

1.4.1 การใช้ของเสียจากการเกษตร กรณีศึกษาเถ้าแกลบและไบโอชาร์

เถ้าแกลบ (rice husk ash, RHA) เป็นหนึ่งในผลพลอยได้ทางการเกษตรที่ได้รับการศึกษาวิจัยมากที่สุดในประเทศไทย กระบวนการเผาเถ้าแกลบภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนอย่างเหมาะสมให้เถ้าแกลบที่อุดมไปด้วยซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reactivity) สูง จึงสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบในสัดส่วนร้อยละ 10–20 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยเพิ่มความทนทานในระยะยาวและลดการซึมผ่านของน้ำและคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นสมบัติที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างในสภาพอากาศเขตร้อนชื้น (Jaroenkietkajorn et al., 2024)

นอกเหนือจากการใช้เป็นปอซโซลานแล้ว ไบโอชาร์จากแกลบ (rice husk biochar) ซึ่งผลิตผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ยังแสดงศักยภาพในการใช้เป็นมวลรวมน้ำหนักเบา โดยสามารถลดความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกได้ถึงร้อยละ 25 ขณะที่ยังคงความแข็งแรงเพียงพอสำหรับงานที่ไม่ใช่โครงสร้างรับน้ำหนักหลัก พร้อมทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนและสามารถควบคุมความชื้นได้ดีขึ้น (Narattha et al., 2024) กรณีศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่า ชีวมวลเหลือทิ้งในประเทศสามารถยกระดับเป็นทั้งวัสดุประสานเสริมและมวลรวมฟังก์ชันพิเศษได้พร้อมกัน โดยช่วยลดคาร์บอนแฝงของวัสดุฐานและยกระดับสมรรถนะการใช้งานของอาคาร (building performance)

ในยุคที่วิกฤตสภาพภูมิอากาศกดดันให้ทุกภาคส่วนต้องเร่งบรรเทาปัญหาความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (net zero) ภาคการก่อสร้างของไทยซึ่งเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากรและปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนสูงที่สุดกำลังเผชิญจุดเปลี่ยนผ่านครั้งสำคัญ

หนังสือเล่มนี้สังเคราะห์องค์ความรู้เชิงลึกเกี่ยวกับ “วัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ” สำหรับประเทศไทยอย่างครบวงจร โดยร้อยเรียงตั้งแต่การสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสีย (waste valorization) การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) นวัตกรรมวัสดุเกิดใหม่ เช่น วัสดุฐานชีวภาพ ไบโอชาร์ คอนกรีตวิศวกรรมนาโน ไปจนถึงเทคโนโลยีดิจิทัลอย่างปัญญาประดิษฐ์ (AI) และฝาแฝดดิจิทัล (digital twin) พร้อมทั้งวิเคราะห์ช่องว่างเชิงนโยบาย ตัวบทกฎหมาย และกลไกความร่วมมืออุตสาหกรรม (quadruple helix) เพื่อผลักดันงานวิจัยจากห้องปฏิบัติการสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์และสังคมอย่างแท้จริง

จุดเด่นของหนังสือ

- วิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุท้องถิ่นและฐานข้อมูลบัญชีรายการคาร์บอนของไทย ภายใต้สภาวภูมิอากาศเขตร้อนชื้นอย่างตรงจุด
- เชื่อมโยงเทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ พลังศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และนโยบายภาครัฐ (BCG model) ไว้อย่างเป็นระบบ
- นำเสนอกลยุทธการขับเคลื่อน 3 ระยะ พร้อมข้อเสนอเชิงยุทธศาสตร์ด้านการเงิน กลไกตลาด (T-VER, Carbon Credit) และการปลดล็อกข้อจำกัดทางกฎหมาย
- ครอบคลุมทั้งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนผ่านที่เป็นธรรมของแรงงานและชุมชน (Just Transition)

หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับ

- วิศวกร สถาปนิก และนักออกแบบ ที่ต้องการประยุกต์ใช้วัสดุทางเลือกคาร์บอนต่ำและเทคโนโลยีอาคารเขียวในการออกแบบโครงสร้างยุคใหม่
- ผู้ประกอบการและนักพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ ที่มองหาโอกาสทางธุรกิจ และการปรับตัวรับมาตรการการค้าสีเขียวระดับสากล เช่น EU-CBAM
- นักวิจัย อาจารย์ และนักศึกษา: ในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาปัตยกรรมศาสตร์ วัสดุศาสตร์ และการจัดการสิ่งแวดล้อม
- ผู้กำหนดนโยบายและหน่วยงานภาครัฐ: ที่ต้องการข้อมูลเชิงยุทธศาสตร์เพื่อจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรการจัดซื้อจัดจ้างสีเขียว (GPP) และข้อเสนอแนะนโยบายระดับประเทศ



CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ISBN 978-616-620-143-7

