

คอนกรีตจากขยะแผงวงจรพิมพ์

CONCRETE PRODUCED FROM PRINTED CIRCUIT BOARD WASTE

ผศ.ดร. กฤษดา เลือเอี่ยม^๑

^๑คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 ความเชี่ยวชาญ : ปูนซีเมนต์, คอนกรีตเทคโนโลยี, และวัสดุวิศวกรรมโยธา



รศ.ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ^๒

^๒คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 ความเชี่ยวชาญ : ปูนซีเมนต์, คอนกรีตเทคโนโลยี, และวัสดุวิศวกรรมโยธา



รศ.ดร. ณัฏฐ์ มากุล^๓

^๓คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
 ความเชี่ยวชาญ : ปูนซีเมนต์, คอนกรีตเทคโนโลยี, และวัสดุวิศวกรรมโยธา



1. บทนำ

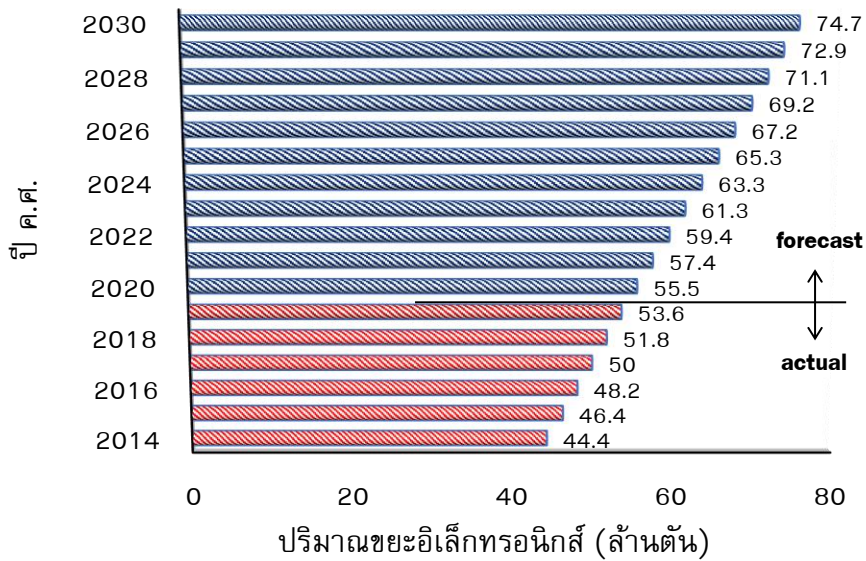
ในปัจจุบันปริมาณการเกิดขยะเป็นจำนวนมากเนื่องจากความต้องการทางด้านนวัตกรรมของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นและความจริงที่ว่าผลิตภัณฑ์จำนวนมากเหล่านั้นมีอายุการใช้งานที่สั้นลงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะและการบริหารจัดการ โดยหนึ่งในกลุ่มของปริมาณขยะที่มีจำนวนมากคือขยะเทคโนโลยี (technology waste) เป็นที่ทราบกันดีว่าการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (electrical and electronic equipment; EEE) เป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วที่สุดของโลกเนื่องจากการพัฒนาทางด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง โดยคาดการณ์ว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 3-5 ต่อปี ในทางคู่ขนานเนื่องจากอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สั้นลง และอัตราการแปรใช้ใหม่ที่กำลังส่งผลให้เกิดขยะจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (waste electrical and electronic equipment; WEEE) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากเหล่านี้ต้องได้รับการจัดการแก้ไขเพราะกำลังเป็นปัญหาสังคมที่สำคัญและเป็นภัยคุกคามต่อสิ่งแวดล้อม [1]

2. ขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ หรือ E-waste ซึ่งเป็นชื่อเรียกแบบไม่เป็นทางการหมายถึงผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใกล้จะหมดอายุการใช้งาน หมดอายุใช้งานหรือไม่มีคุณค่าต่อการใช้งานแล้วซึ่งมิได้มีการกำหนดอย่างชัดเจนว่าหมายถึงผลิตภัณฑ์ชนิดใด อาจเป็นของใช้ในครัวเรือนหรือสำนักงานมีวงจรหรือส่วนประกอบไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ที่มีแหล่งจ่ายไฟหรือแบตเตอรี่ อาทิเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ จอคอมพิวเตอร์ เครื่องขยายเสียง เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องโทรสารและผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เป็นต้น ทั้งนี้ European WEEE Directive ได้ให้คำจำกัดความเกี่ยวกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง อุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นของเสียรวมถึงส่วนประกอบทั้งหมดได้แก่ ส่วนประกอบย่อยและวัสดุสิ้นเปลืองซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์เมื่อถูกทิ้ง [2]

จากรายงานการสำรวจของ The Global E-waste Monitor 2020 [3] พบว่าปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั่วโลก โดยในปี ค.ศ. 2019 ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้นถึง 53.6 ล้านตัน ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2014 ถึง 9.2 ล้านตัน คิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.7 และมีการคาดการณ์ว่าในอีก 10 ปีข้างหน้าจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นถึง 74.7 ล้านตัน คิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 38.6 ทั้งนี้คาดการณ์ว่าในช่วงเวลาเพียง 16 ปี (ค.ศ. 2014- 2030) ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มขึ้นถึงเกือบสองเท่า ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์

ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นส่วนใหญ่มาจากอัตราความต้องการอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุปกรณ์เหล่านั้นมีอายุการใช้งานสั้นลงและเมื่อเกิดการชำรุดระหว่างการใช้งานมักเลือกแนวทางการซื้ออุปกรณ์รุ่นใหม่ทดแทนมากกว่าการซ่อมแซมอุปกรณ์เดิมที่เป็นรุ่นเก่า

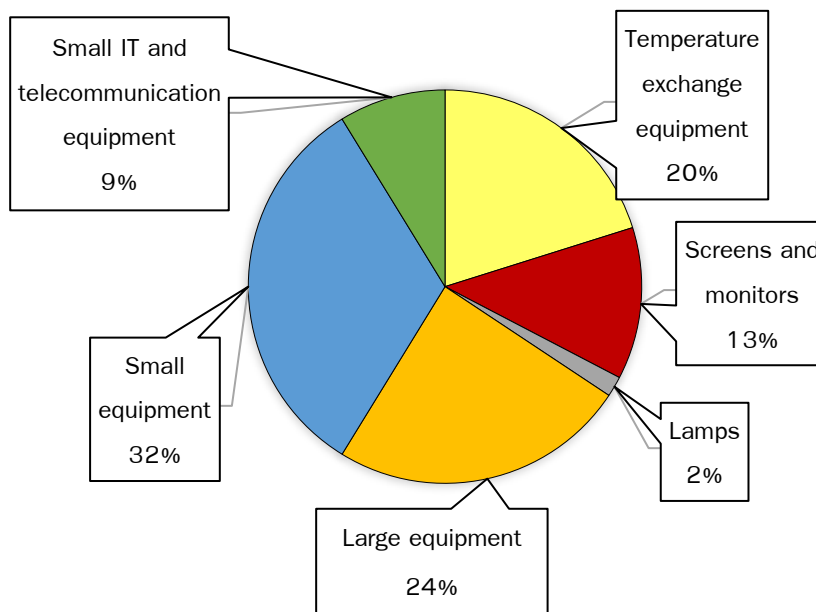


รูปที่ 1 คาดการณ์ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในแต่ละปีทั่วโลก [3]

ในปี ค.ศ. 2019 ทวีปเอเชียสร้างขยะอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด จำนวน 24.9 ล้านตัน ตามด้วยทวีปอเมริกา จำนวน 13.1 ล้านตัน และทวีปยุโรป จำนวน 12 ล้านตัน ในขณะที่ทวีปแอฟริกาและทวีปโอเชียเนียมีจำนวน 2.9 และ 0.7 ล้านตัน ตามลำดับ ทวีปยุโรปเป็นอันดับหนึ่งของโลกในด้านการสร้างขยะอิเล็กทรอนิกส์เมื่อคิดต่อหัวประชากร คิดเป็น 16.2 กิโลกรัมต่อคน ทวีปโอเชียเนียเป็นอันดับที่สอง คิดเป็น 16.1 กิโลกรัมต่อคน ตามด้วยทวีปอเมริกา คิดเป็น 13.3 กิโลกรัมต่อคน ในขณะที่ทวีปเอเชียและทวีปแอฟริกา คิดเป็น 5.6 และ 2.5 กิโลกรัมต่อคนตามลำดับ ประเทศจีนถือเป็นประเทศที่มีปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด

โดยมากกว่าครึ่งของปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละปีทั่วโลกที่เกิดขึ้นนั้นมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ อาทิเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องอบผ้า เครื่องล้างจาน เต้าไฟฟ้า เครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่ อุปกรณ์ถ่ายเอกสาร และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก อาทิเช่น เครื่องดูดฝุ่น ไมโครเวฟ อุปกรณ์ระบายอากาศ เครื่องปรับอากาศ กัดม้หน้าไฟฟ้า เครื่องโกนหนวดไฟฟ้า เครื่องชั่ง เครื่องคิดเลข วิทยุ กล้องวิดีโอ ของเล่นไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก อุปกรณ์ทางการแพทย์ขนาดเล็กรวมกันถึงร้อยละ 56 ส่วนที่เหลือได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยน

อุณหภูมิ ร้อยละ 20 หน้าจอคอมพิวเตอร์ ร้อยละ 13 อุปกรณ์ไอทีและโทรคมนาคมขนาดเล็ก ร้อยละ 9 และ หลอดไฟ ร้อยละ 2 ตามลำดับ [3] ดังแสดงในรูปที่ 2



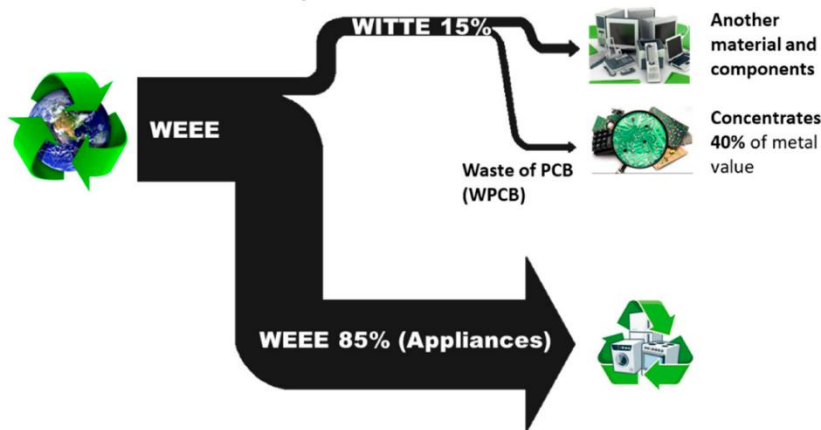
รูปที่ 2 ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นทั่วโลกแยกตามประเภท [3]

จากปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นสูงมากแต่มีการนำมาแปรใช้ใหม่ในสัดส่วนที่ต่ำ ตลอดจนวิธีการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์และไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณสารปรอท และพลาสติกที่มีสารประกอบโบรมีน (brominated flame retardants, BFR) จำนวนมากพบได้ในขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกซึ่งส่วนใหญ่ถูกปล่อยกลับสู่สภาพแวดล้อมชุมชนและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนงานที่สัมผัส วิธีการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์อย่างไม่เหมาะสมยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนอีกด้วย

3. ขยะจากแผงวงจรพิมพ์

แผงวงจรพิมพ์ หรือแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (printed circuit board: PCB) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พิจารณาจากองค์ประกอบของขยะอิเล็กทรอนิกส์พบว่าขยะที่เกิดจากแผงวงจรพิมพ์อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 3-6 โดยน้ำหนักของปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด [4] โดยแผงวงจรพิมพ์เป็นแผงวงจรที่สร้างจากพลาสติกเทอร์โมเซตเรซิน

(thermoset resin) ซึ่งมีการฉาบผิวด้วยฟิล์มทองแดง จากนั้นก็จะนำสายวงจรที่ต้องการมาทาบบหรือ สกรีนลายลงบนแผ่นทองแดง แผงวงจรพิมพ์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่าง ซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ แผงวงจรพิมพ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ทำจากใยแก้ว ยึดด้วยอีพอกซีเรซิน (flame Retardant; FR-4) นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีมูลค่าสูง (high grade) อาทิเช่น แผงวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์ไอทีขนาดเล็ก โทรศัพท์มือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น และประเภทที่ทำจากกระดาษเซลลูโลสยึดด้วยฟีนอลิกเรซิน (flame retardant; FR-2) นิยมใช้ใน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีมูลค่าไม่สูงมาก (low grade) อาทิเช่น แผงวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ หรือเครื่องซักผ้า เป็นต้น [4] โดยซากแผงวงจรพิมพ์จะมีขนาด และรูปแบบที่หลากหลายตามบริษัทผู้ผลิต เมื่อนำซากแผงวงจรพิมพ์ไปแปรใช้ใหม่ (recycle) พบว่า แผงวงจรพิมพ์จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีมูลค่าสูงซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 15 ของปริมาณขยะ อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด จะมีส่วนประกอบของโลหะที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 40 ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้น หากนำซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีทั้งหมดไปแปรใช้ใหม่อาจสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้สูงถึง 2300 ล้านบาท [5]



รูปที่ 3 ขยะอิเล็กทรอนิกส์แบ่งตามประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [6]

โดยแผงวงจรพิมพ์ที่ผลิตในแต่ละโรงงานจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปองค์ประกอบของ แผงวงจรพิมพ์ประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นโลหะซึ่งมีทั้งโลหะมีค่าและโลหะหนักประมาณร้อยละ 40 เซรามิคร้อยละ 30 และพลาสติกร้อยละ 30 ตามลำดับ ดังนั้นขยะแผงวงจรพิมพ์จึงได้รับความสนใจ จากทั้งนักวิจัยและผู้ประกอบการมากขึ้นเนื่องจากการมีส่วนประกอบโลหะมีค่าในขณะเดียวกันความ

เสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์หากกระบวนการแปรใช้ใหม่ทำอย่างไม่ถูกวิธี สำหรับกระบวนการแปรใช้ใหม่ขยะแผงวงจรพิมพ์ทำโดยการรื้อและคัดแยกส่วนประกอบที่เป็นโลหะและไม่ใช่โลหะออกจากกัน โดยส่วนที่เป็นโลหะมีอยู่ประมาณร้อยละ 30-40 สามารถนำไปหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ ในขณะที่ส่วนที่เป็นอโลหะร้อยละ 60-70 จะต้องนำไปสู่กระบวนการฝังกลบอย่างปลอดภัย เนื่องจากขยะแผงวงจรพิมพ์ส่วนที่เป็นอโลหะยังมีสารประกอบที่เป็นอันตรายปนเปื้อนอยู่ หากทำการฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธีจะส่งผลทำให้เกิดมลพิษจากโลหะหนักและสารหน่วงไฟประเภทโบรมีนปนเปื้อนไปกับน้ำใต้ดิน [7] ดังนั้นจึงมีความพยายามในการนำขยะจากแผงวงจรพิมพ์ส่วนอโลหะนี้กลับมาใช้ใหม่มากขึ้น โดยหนึ่งในนั้นคือความพยายามในการนำมาพัฒนาใช้งานร่วมในการผลิตคอนกรีต

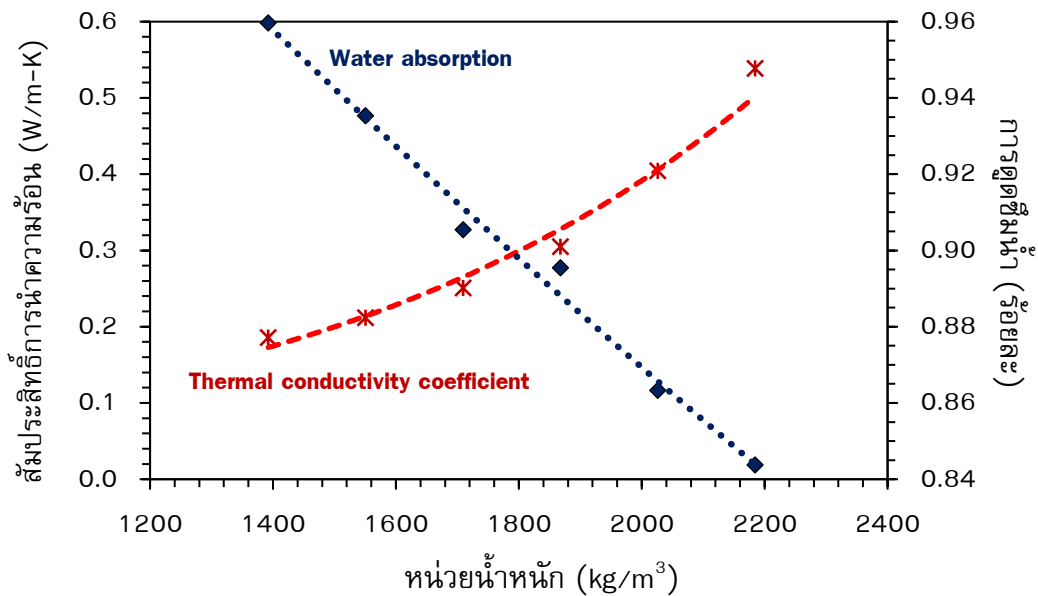
4. การประยุกต์ใช้แผงวงจรพิมพ์ในงานคอนกรีต

คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ประโยชน์กันอย่างมากมาย เป็นการผสมผสานกันระหว่างมวลรวมจากธรรมชาติ ปูนซีเมนต์และน้ำ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าทรัพยากรธรรมชาติที่เราใช้กันอยู่นั้นมีอย่างจำกัด ตลอดจนกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ยังมีแนวโน้มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นจนส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนอีกด้วย ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นหาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์หรือมวลรวมจากธรรมชาติในการผลิตคอนกรีต โดยแนวทางการนำขยะแผงวงจรพิมพ์มาใช้ในงานคอนกรีตมีความเป็นไปได้ในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของวัสดุ อาทิเช่น การนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 การนำมาแทนที่มวลรวมละเอียด การนำมาแทนที่มวลรวมหยาบ หรือการนำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เป็นต้น

4.1 การนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์

การประยุกต์ใช้ขยะแผงวงจรพิมพ์ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ แล้วนำมาผ่านกระบวนการคัดแยกส่วนประกอบโลหะในโรงงานกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดนำมาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขยะแผงวงจรพิมพ์ พบว่ามีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักคิดเป็นร้อยละ 38.01 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11.52 ไอรอนไดออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 1.43 ตามลำดับ ลักษณะอนุภาคส่วนใหญ่เป็นแท่งยาวและมีพื้นผิวเรียบ ในขณะที่บางส่วนมีรูปร่างไม่แน่นอนขนาดเล็กกระจายโดยทั่วไป เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใน

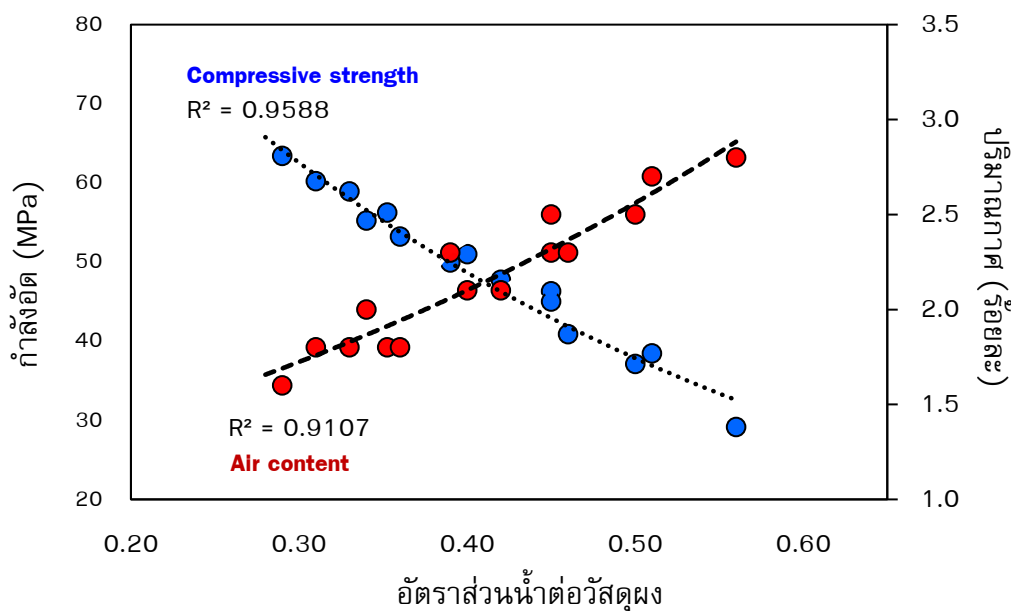
ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้องการน้ำ ระยะเวลาก่อตัวและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นและกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยขยะแฉะวงจรมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [8]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการดูดซึมน้ำ [8]

จากนั้นเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของการผสมร่วมขยะแฉะวงจรมีผลโดยนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระหว่างอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยปริมาตร สำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นเพื่อคงความสามารถในการไหลแผ่ (slump flow 70±5 cm) ในระยะที่กำหนด เมื่อทำการประเมินความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสดตามเกณฑ์มาตรฐานของ European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC) เห็นได้ชัดว่าคอนกรีตมีความสามารถในการไหลลดลง มีแนวโน้มติดขัดระหว่างมวลรวมและเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตไหลผ่านกล่องรูปทรงวี (V-Funnel) ตลอดจนคอนกรีตมีแนวโน้มเกิดการแยกตัวเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 11.49, 21.42, 29.96, 38.51, 48.99 และ 57.44 ตามลำดับเมื่อ

เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม [9] ทั้งนี้เมื่อนำเถ้าลอยมาทำการผสมร่วมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงพบว่าช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้และสมบัติทางกลของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยอัตราส่วนผสมร่วมระหว่างขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 5 และเถ้าลอยร้อยละ 10 (แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15) คอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดสูงกว่า 60 MPa นอกจากนี้ผลของการนำเถ้าลอยมาผสมร่วมยังช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาในการบ่มยาวนานมากขึ้นถึง 180 วัน [10] โดยจากผลการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงกับกำลังอัดและปริมาณอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงกับกำลังอัดและปริมาณอากาศ [10]

4.2 การนำมาแทนที่มวลรวมหยาบ

สำหรับการประยุกต์ใช้ขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ผ่านกระบวนการคัดแยกส่วนประกอบโลหะซึ่งยังคงสภาพเป็นแผ่นในขนาดที่แตกต่างกัน โดยขยะแผงวงจรพิมพ์ถูกนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 mm เพื่อนำมาแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งถูกออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัด 60 MPa ที่อายุ 28 วัน ขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ถูกตัดเตรียมไว้ นำมาทำการแทนที่มวลรวมหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 8, 12 และ 16 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่อยู่ในระดับที่ดีทุกส่วนผสม ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตแข็งตัวได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวล

รวมหยาบด้วยขยะผงวงจรมีเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกส่วนผสม [11] ในขณะเดียวกันเมื่อนำเถ้าลอยมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดสูงพบว่าช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้และสมบัติทางกลของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยผลการทดสอบกำลังอัด กำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดของคอนกรีต [12] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของคอนกรีตผสมร่วมขยะผงวงจรมีเพิ่ม [11-12]

ร้อยละการแทนที่ มวลรวมหยาบ	กำลังอัด (MPa)		กำลังดึงผ่าซีก (MPa)		กำลังดัด (MPa)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
<i>ไม่มีเถ้าลอยในส่วนผสม</i>						
0	20.96	65.25	2.20	4.10	1.31	3.30
8	21.71	64.61	2.40	4.30	1.40	3.53
12	22.50	66.09	2.70	4.70	1.70	3.90
16	22.74	69.02	2.90	4.90	2.43	4.90
<i>ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่ม (additive)</i>						
0	21.89	65.31	2.43	4.30	1.44	3.49
8	22.84	65.43	2.70	4.60	1.50	3.90
12	23.10	67.75	3.01	4.80	2.00	4.00
16	24.38	63.57	3.00	4.90	2.70	5.00

4.3 การนำมาแทนที่มวลรวมละเอียด

ส่วนการประยุกต์ใช้ขยะผงวงจรมีที่ได้มาจากกระบวนการคัดแยกส่วนประกอบโลหะในโรงงานกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่เป็นซากผงวงจรมีจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า (low grade) ขยะผงวงจรมีที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบมีขนาดใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด (รูปที่ 6) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการนำขยะผงวงจรมีส่วนนี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด คอนกรีตถูกออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัด 24 MPa ที่อายุ 28 วัน โดยขยะผงวงจรมีถูกนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบระยะการยุบตัวของคอนกรีตทดสอบอยู่ในช่วง 20-80 mm เมื่อเปรียบเทียบกับตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C143 (50-100 mm) ปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดต้องไม่เกินร้อยละ 30 ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตเชิงตัว ได้แก่ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 1.89-7.46 เมื่ออัตราส่วนการ

แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยขยะแผงวงจรพิมพ์เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง
ผ่าซีก ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 21-35 MPa จากการศึกษาเบื้องต้นปริมาณ
การแทนที่มวลรวมละเอียดที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 20 [13]



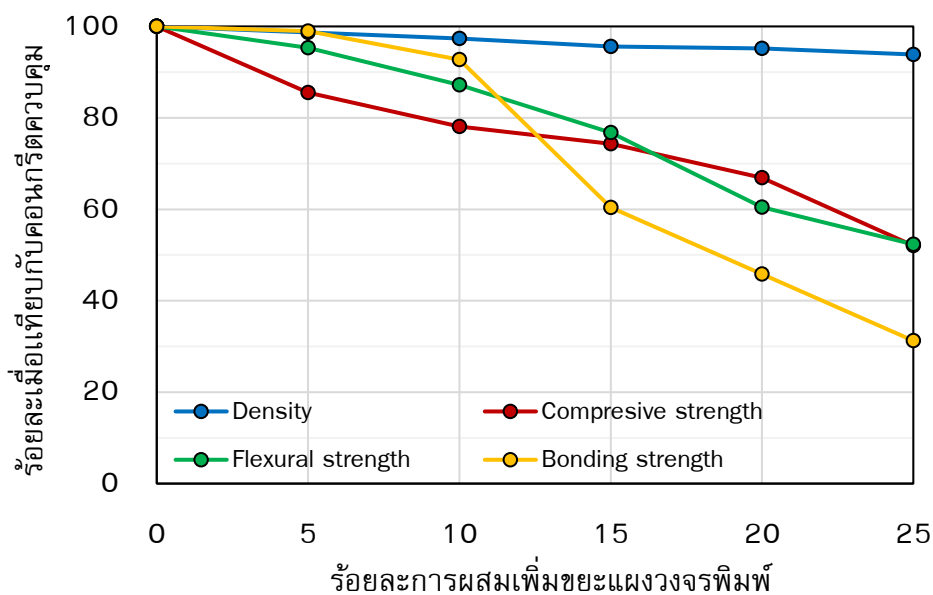
รูปที่ 6 ขยะแผงวงจรพิมพ์ก่อนและหลังทำการบดย่อย

ในขณะเดียวกันเมื่อนำซากแผงวงจรพิมพ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีมูลค่าสูง (high grade) ที่ได้จากกระบวนการคัดแยกส่วนประกอบโลหะในโรงงานกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ขยะแผงวงจรพิมพ์ ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบผสมเส้นใย เมื่อนำขยะแผงวงจรพิมพ์ส่วนนี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 50 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ออกแบบให้มีกำลังอัด 30 MPa ที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 20 (38.87 MPa) หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณการแทนที่สูงสุดร้อยละ 50 คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงร้อยละ 28 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการนำขยะอิเล็กทรอนิกส์มาแทนที่มวลรวมละเอียด ส่งผลให้ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity; K value) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient ; U value) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งหมายถึงคอนกรีตมีค่าต้านทานความร้อนดีขึ้น [14-15]

4.4 การนำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม

การนำขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ได้มาจากกระบวนการคัดแยกส่วนประกอบโลหะในโรงงานกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม (admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต โดยทำการออกแบบส่วนผสมอัตรากำหนดสัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับทราย 1:3 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 นำขยะแผงวงจรพิมพ์ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.16 - 0.63 mm มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนโดย

น้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ตามลำดับ พบว่าปริมาณอากาศ (air content) การหดตัว (shrinkage) และการดูดซึมน้ำ (water absorption) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุผสมเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงข้ามหน่วยน้ำหนัก (density) กำลังอัด (compressive strength) กำลังดัด (flexural strength) และกำลังยึดเหนี่ยว (bonding strength) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 ในขณะที่เดียวกันสมบัติด้านกำลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน คอนกรีตผสมรวมขยะแผงวงจรพิมพ์อัตราส่วนร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงถึง 40 MPa [16]



รูปที่ 7 แนวโน้มการลดลงของสมบัติคอนกรีตแข็งตัวเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม [16]

4.5 การชะละลายของโลหะหนัก

เนื่องจากในองค์ประกอบของขยะแผงวงจรพิมพ์ยังมีสารอันตรายอยู่ รวมถึงโลหะหนัก เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) หรือแคดเมียม (Cd) เป็นต้น การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในขยะแผงวงจรพิมพ์หลังจากการนำขยะแผงวงจรพิมพ์ไปผสมรวมในการผลิตคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาผลกระทบที่เป็นพิษของโลหะหนักต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการนำไปใช้งาน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าไม่มีโลหะหนักถูกชะละลาย (heavy metal leaching) ออกจากขยะแผงวงจรพิมพ์เมื่อนำมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดในส่วนผสมมอร์ตาร์ซึ่งถือว่าเป็นผลจากการตรึง (immobilization) โลหะหนักของซีเมนต์ไฮเดรต (cement hydrate) [17]

5. สรุป

การจัดการกับปริมาณขยะแผงวงจรพิมพ์ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นและกำลังสร้างปัญหาทางด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีส่วนผสมของโลหะหนัก การนำมาแปรใช้ใหม่ในการผลิตคอนกรีตถือได้ว่าเป็นหนึ่งในแนวทางการจัดการกับขยะแผงวงจรพิมพ์ที่น่าสนใจเนื่องจากความต้องการใช้วัสดุจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีตสูงมาก โดยความเป็นไปได้ในการนำขยะแผงวงจรพิมพ์มาใช้ในงานคอนกรีตมีหลายแนวทางขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของวัสดุ ขยะแผงวงจรพิมพ์ที่มีความละเอียดสามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนที่ได้จากการบดหยาบสามารถนำมาแทนที่มวลรวมละเอียด หรือการนำแผ่นขยะแผงวงจรพิมพ์มาทำการตัดหยาบเพื่อแทนที่มวลรวมหยาบ ตลอดจนการนำส่วนละเอียดมาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เป็นต้น โดยสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตแข็งตัวขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและปริมาณการนำมาแทนที่หรือผสมรวมของขยะแผงวงจรพิมพ์ ในขณะเดียวกันการนำวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย มาผสมรวมสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตลอดจนไม่พบการชะละลายของโลหะหนักหลังจากผสมรวมในการผลิตคอนกรีต ดังนั้นการหาแนวทางใหม่ๆ ในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสมและประเด็นทางด้านความคงทนในการใช้งานเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นหัวข้อที่ควรศึกษาในอนาคต

เอกสารอ้างอิงหรือบรรณานุกรม

- [1] Marques, A. C., Marrero, J. -M. C., & de Fraga Malfatti, C. (2013). Printed circuit boards: a review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management*, 131(15), 298-306.
- [2] European Parliament (2012). Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, L197, 38-71.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj>.
- [3] Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.

- [4] Kaya, M. (2019). Electronic waste and printed circuit board recycling technologies, The Minerals, Metals & Materials Series. Springer International Publishing, Switzerland.
- [5] Wang, Q., Zhang, B., Yu, S., Xiong, J., Yao, Z., Hu, B., & Yan, J. (2020). Waste-printed circuit board recycling: focusing on preparing polymer composites and geopolymers. *ACS Omega*, 5, 17850-17856.
- [6] Vermeşan, H., Tiuc, A. -E., & Purcar, M. (2020). Advanced recovery techniques for waste materials from IT and telecommunication equipment printed circuit boards. *Sustainability*, 12(74), doi:10.3390/su12010074.
- [7] Guo, J., Guo, J., & Xu, Z. (2009). Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 168, 567-590.
- [8] Sua-iam, G., Khymarn, A., Chatveera, B., & Makul, N. (2021). Cementitious Properties of Cement Paste mixed with Laminated Powder from Electronic Waste. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 13(3), 676-691.
- [9] Sua-iam, G., & Chatveera, B. (2022). Effect of printed circuit board dust on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete: A preliminary study. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00862.
- [10] Sua-iam, G., & Chatveera, B. (2021). A study on workability and mechanical properties of eco-sustainable self-compacting concrete incorporating PCB waste and fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129523.
- [11] Needhidasan, S., & Anbuarasu, G. (2020). Experimental study on high strength concrete (M60) with reused E-waste plastics. *Materials Today: Proceedings*, 22, 919-925.
- [12] Needhidasan, S., & Sai, P. (2020). Demonstration on the limited substitution of coarse aggregate with the E-waste plastics in high strength concrete. *Materials Today: Proceedings*. 22, 004-1009.
- [13] Saengpaeng, P. Kanchanapiya, P., & Tuakta. C. (2017). Properties of alternative concrete mixed with non-metallic powder from recycled printed circuit boards. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. 4, 95-99

- [14] Dhanraj, A. A., & Selvamony, C. (2017). An experimental study to analyze the strength and thermal insulation properties of e-waste (FR-4) concrete with partial replacement of fine aggregate. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(1), 210-218.
- [15] Dhanraj, A. A., Selvamony, C., & Joshuva, A. (2017). An experiment investigation on concrete by using e-waste as fine aggregate and enhanced the thermal insulation and ultrasonic properties. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 8(12), 392-399.
- [16] Wang, R., Zhang, T., & Wang, P. (2012). Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar. *Materials and Structures*, 45, 1439-1445.
- [17] Ban, B. C., Song, J. Y., Lim, J. Y., Wang, S. K., An, K. G., & Kim, D. S. (2005). Studies on the Reuse of Waste Printed Circuit Board as an Additive for Cement Mortar. *Journal of Environmental Science and Health*. 40, 645-656.

เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ

ผศ.ดร. กฤษดา เสือเอี่ยม สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร งานวิจัยที่สนใจด้านวัสดุที่ใช้ซีเมนต์ คอนกรีตสมรรถนะสูง การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งในงานคอนกรีต และความคงทนของคอนกรีต

รศ.ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย งานวิจัยที่สนใจด้านคอนกรีตเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ คอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตสมรรถนะสูง และความคงทนของคอนกรีต

รศ.ดร. ณัฐ มากุล สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ งานวิจัยที่สนใจด้านคอนกรีตสมรรถนะสูง การนำมวลรวมกลับมาใช้ใหม่ การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในงานคอนกรีต และความคงทนของคอนกรีต

การอ้างอิงบทความ (citation)

กฤษดา เสือเอี่ยม, บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณัฐภูมิ มากุล (2565), "คอนกรีตจากขยะแผงวงจรพิมพ์ (Concrete Produced from Printed Circuit Board Waste)," *วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, บทความหมายเลข TCA_M 160303, กันยายน-ธันวาคม, 15 หน้า.

Sua-iam, G., Chatveera, B., & Makul, N. (2022) "Concrete Produced from Printed Circuit Board Waste," *TCA Magazine, Thailand Concrete Association*, Vol.16, Issue 3, Paper ID TCA_M 160303, Sep. - Dec., 15 pages.