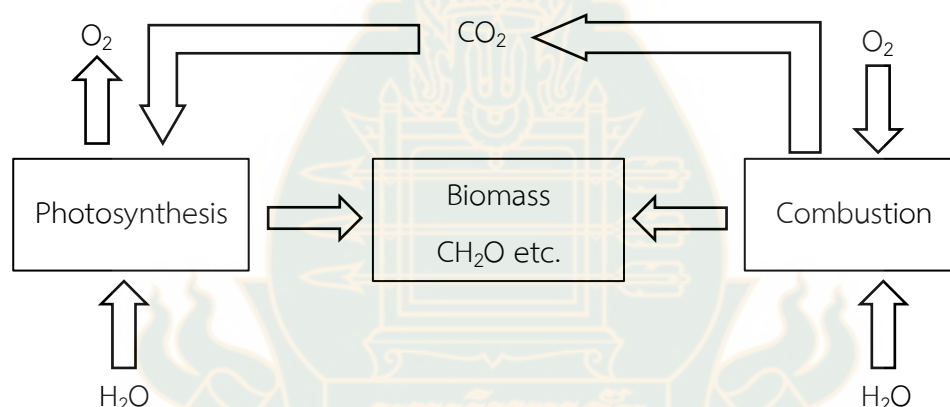


บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่หาได้ในประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทย ซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก อาทิ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม และเห้งามันสำปะหลัง เป็นต้น รวมถึงมูลสัตว์ ของเสียจากการแปรรูปสินค้าเกษตร น้ำเสียจากชุมชน และขยะ ซึ่งชีวมวลเหล่านี้ สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงวัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวมวลในภาพที่ 2.1 ประเทศไทยมีศักยภาพที่จะนำมาผลิตพลังงานเทียบเท่ากับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 3,000 เมกะวัตต์ ชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง นิยมเรียกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2562)



ภาพที่ 2.1 วัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวมวล
ที่มา: ปรับปรุงจาก ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2562

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 2.2 อุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทยผลิตน้ำตาลมากเป็นอันดับ 7 ของโลก หรือประมาณ 7 ล้านตัน ต่อปี และส่งออกมากเป็นอันดับ 2 ของโลกหรือประมาณ 4.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำตาล เริ่มจากนำอ้อย 1 ตัน ป้อนเข้าสู่โรงงานน้ำตาล และสามารถผลิตเป็นน้ำตาลได้ประมาณ 100 - 120 กิโลกรัม โดยใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาลทั้งในขั้นตอนของการหีบอ้อย และการผลิตน้ำตาลโดยเฉลี่ยอยู่ในรูปของไฟฟ้าประมาณ 30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงและไอน้ำ 0.4 ตันของวัตถุดิบ จากนั้นจะเหลือเป็นกากจากกระบวนการผลิตคือ ชานอ้อย ที่มีปริมาณสูงถึง 300 กิโลกรัม (นิตยา กานต์ กันต์รพีเกสร, 2562)



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล

ที่มา: บริษัท น้ำตาลครบุรี จำกัด (มหาชน), 2554

งานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในและต่างประเทศ พบว่าเถ้าชีวมวลบางชนิดสามารถนำมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ คือสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้บางส่วน หากมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างแล้ว จะเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จึงทำให้การใช้ปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์และลดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงมากเพื่อเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงถึง $1,400\text{-}1,500\text{ }^\circ\text{C}$ และพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่คือถ่านหิน และที่สำคัญคือมีการปล่อยสู่บรรยากาศประมาณ 1 ตันต่อการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ 1 ตัน นอกจากนี้การที่ใช้ปูนซีเมนต์ลดลงยังเป็นการสงวนวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งมีอย่างจำกัดให้ใช้ได้ยาวนานขึ้น และสามารถนำเถ้าชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่าให้กลับมีมูลค่าและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังเป็นการแก้ไขปัญหาตั้งแต่ด้านพลังงาน ด้านสิ่งแวดล้อม จนถึงการจัดเถ้าชีวมวลอย่างเป็นระบบและยั่งยืน

วัสดุพอซโซลานที่เป็นเถ้าถ่านหินต้องมีค่าดัชนีกำลังไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งเถ้าถ่านหินหรือวัสดุพอซโซลานที่มีคุณภาพดีจะมีค่าของดัชนีกำลังที่สูง คือเกินกว่าร้อยละ 100 ซึ่งจะมีคุณภาพดีมาก แสดงว่าวัสดุพอซโซลاندังกล่าวทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ดี และสามารถนำวัสดุพอซโซลานไปใช้ในงานคอนกรีตได้โดยไม่มีปัญหาของการให้กำลังต่ำ

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการนำเถ้าชีวมวลมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์

เถ้าชานอ้อย (bagasse ash) (ภาพที่ 2.3) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อยและใบอ้อย เผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าชานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์



ภาพที่ 2.3 เถ้าชานอ้อย

ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังการบดทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อยมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก เหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55-77 มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ต่ำ แต่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20 การที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป

คอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อย มีความสามารถด้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านทานคลอไรด์และการเกิดคาร์บอนชั้นเหมือนกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแข็งตัวและการละลายของน้ำสลัดกันได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตาม ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่ค่อนข้างสูงของเถ้าชานอ้อยไม่ได้เป็นคาร์บอน แต่เป็นสารประกอบอื่นที่สลายภายใต้การเผาที่อุณหภูมิสูง เพราะการทดสอบ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาใช้อุณหภูมิในการ

เผาตัวอย่างที่ 750 °C พบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่มีค่าสูงไม่ได้ส่งผลอย่างรุนแรงต่อการลดกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมากนัก

สำหรับประเทศไทย มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตไม่มากนัก นอกจากนี้ การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานกรดซัลฟูริกและการต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต คอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มให้ค่าการหดตัวสูงขึ้นและอาจหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตได้อย่างมากหากเถ้าชานอ้อยยังมีน้ำตาลหลงเหลืออยู่ การศึกษาเถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีต จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า เถ้าชานอ้อยมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ และมีปริมาณมากพอที่จะสามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้เช่นกัน แต่ความรู้เกี่ยวกับเถ้าชานอ้อยยังค่อนข้างจำกัด เช่น ในด้านความคงทน รวมถึงคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งผลิต ซึ่งมีคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกัน อาจทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าวัสดุที่เหลือใช้ จากภาคการเกษตรหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมสามารถนำกลับมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุประเภทอิฐบล็อกสำหรับก่อผนังได้ โดยในส่วนของคุณสมบัติทางด้านการรับแรงอัด จะพบว่าวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมจำพวกเถ้าต่าง ๆ ทั้งเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงกำลังของวัสดุให้ดีขึ้น หรือนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดต้นทุนในการใช้ปูนซีเมนต์ แต่ยังคงให้มีกำลังรับแรงอัดได้ตามมาตรฐาน ทั้งนี้ปริมาณที่ทดแทนปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง ร้อยละ 20 – 40 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้ทำให้กำลังของวัสดุต่ำกว่ามาตรฐาน หรืออาจจะบิ่นขึ้นรูปได้ยาก (ณัฐวุฒิ อินทบุตร, 2560)

กำลังต้านแรงอัดของวัสดุก่อซึ่งทำจากคอนกรีต (Compressive Strength of masonry unit) หมายถึงแรงเค้นอัด ขณะที่ทำให้ชิ้นทดสอบเสียหาย โดยการทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine โดยจะต้องมีแท่นธาร (Bearing frame) เป็นเหล็กสองแท่ง แท่นบนมีปารับทรงกลม อีกแท่นหนึ่งเป็นแผ่นเรียบแข็งสำหรับรองรับก้อนตัวอย่าง ผิวของแท่นธาร (Bearing surfaces) จะต้องไม่เอียงจากระนาบเกิน 0.025 มิลลิเมตร ทุกระยะ 150 มิลลิเมตรของมิติศูนย์กลางของทรงกลมในปารับทรงกลม ถ้าใช้แผ่นธาร (Bearing Plate) ศูนย์กลางของทรงกลมในปารับทรงกลมของแท่นธารจะต้องอยู่ในแนวตั้ง และผ่านศูนย์กลางเนื้อที่ของพื้นที่ธาร (Bearing Area) ของก้อนตัวอย่าง โดยการทดสอบนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ มอก.109-2517 และ ASTM C140-70 คอนกรีตบล็อกจะมีคุณสมบัติของกำลังต้านทานแรงอัดเท่ากับ 2 MPa หรือเท่ากับ 20.39 ksc เมื่อทำการทดสอบบล็อกคอนกรีตที่ละก้อน อ้างอิงตาม มอก.58-2560 ตามตารางที่ 2.1 แสดงความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อก ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งหากมิได้มีการกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น จะถือว่าเป็นการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.1 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

ความต้านแรงอัด ต่ำสุด เมกะพาสคัล (เฉลี่ยจากพื้นที่ รวม)	
เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน
2.5	2.0

ที่มา : มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ มอก.58-2560 , กระทรวงอุตสาหกรรม

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการผสมส่วนต่างๆ เช่น หินปูน (lime stone) หรือดินปูนขาว (marl) กับดินเหนียว (clay) หรือหินดินดาน (shale) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลัก 4 ส่วนคือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) 3CaOSiO_2 (C_3S)
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) 2CaOSiO_2 (C_2S)
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ (C_3A)
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetrecalciumaluminoferrite) $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

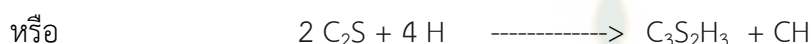
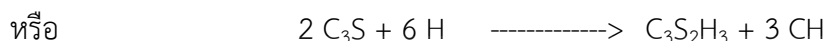
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaOSiO_2	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaOSiO_2	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

2.4 ปฏิริยาไฮเดรชัน

ปฏิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกัน ทำให้ปฏิริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวของน้ำ

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$, CSH โดยอัตราส่วนของ CaO , SiO_2 และ H_2O เป็นค่าโดยประมาณ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$, CH) ดังสมการต่อไปนี้



2.5 ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ

สารประกอบของปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีอิทธิพลต่อกันและกัน อาทิ เช่น ทั้ง C_3A และ C_4AF จะแย่งอิออนของซัลเฟต ขณะที่ C_3A ซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า เป็นผลให้ไม่ถูกหน่วงการ ทำปฏิกิริยามากเท่ากับ C_3A นอกจากนี้ในปูนซีเมนต์ยังมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ซึ่งมีผลต่อปฏิกิริยาได้ เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับ ปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งในบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ขั้นตอนการเกิดผลผลิตของ ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยา จะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบบางของเอททริงไกต์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลงและซีเมนต์เฟสที่มีสภาพพลาสติก อยู่ช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วย ปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S ทำให้เอททริงไกต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินตและเกิดสารประกอบ ของ C_4AFH_{13} แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไป ทำให้เกิด CSH มากขึ้นและขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อ มีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.6 โครงสร้างของซีเมนต์เฟส

ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์เฟสขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่อายุ 7 วัน พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เฟสมีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอททริงไกต์มีลักษณะเป็นเข็มยาว เกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่อายุ 28 วัน ผลผลิตไฮเดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกต-ไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซัลโฟลูมินต ซัลโฟเฟอร์ไรต์ และส่วนประกอบย่อยอื่น ขยายเข้าไป ในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เฟสมีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน

2.7 น้ำในซีเมนต์เพสต์

น้ำในซีเมนต์เพสต์แบ่งออกได้เป็น 2 จำพวก คือ

ก) **น้ำที่ระเหยได้** (evaporable water) เป็นส่วนที่ถูกกำจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C (หรือใช้น้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิ -79 °C) น้ำส่วนนี้จะรวมถึงน้ำในโพรงคาปิลารี น้ำในโพรงของเจล และน้ำบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรต

ข) **น้ำที่ระเหยไม่ได้** (non-evaporable water) น้ำที่ระเหยไม่ได้เป็นน้ำที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์และกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจล และจะขจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C น้ำที่ระเหยไม่ได้จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาและขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าน้ำที่ระเหยไม่ได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าปริมาตรของเนื้อซีเมนต์เจลมีอยู่ 49.0 ซม.³ ซึ่งน้อยกว่าปริมาตรของปูนซีเมนต์บวกกับน้ำคือ $31.8 + 23 = 54.8$ ซม.³ ความจริงเป็นปริมาตรของซีเมนต์เพสต์จะประมาณเท่ากับปริมาตรของปูนซีเมนต์บวกกับปริมาตรของน้ำ ดังนั้น จึงต้องมีปริมาตรที่อยู่ในรูปของโพรงขนาดใหญ่ที่กระจายอยู่ในเนื้อ

2.8 การชะละลาย

2.8.1 ความหมาย

กระบวนการชะละลายเป็นกระบวนการที่สารอินทรีย์ สารอินทรีย์ปนเปื้อน หรืออะตอมที่ปล่อยรังสีได้เกิดการรั่วไหลจากสภาวะของแข็งเข้าสู่สภาวะของเหลวภายใต้อิทธิพลของแรงธาตุ การละลาย การดูดซับ กระบวนการที่ซับซ้อนโดยเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช ปฏิกิริยารีดอกซ์ การละลายของสารอินทรีย์และการกระทำของแบคทีเรีย โดยกระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั่วไปเมื่อน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน สัมผัสหรือผ่านของเสีย น้ำจะซึมผ่านเข้าไปทำให้ของเสียบางส่วนละลายออกมาจากผิวภายนอกของเสียหรืออาจเกิดจากภายใน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความพรุนของของเสีย กระบวนการนี้เรียกว่า การชะละลาย (leaching) โดยเรียกน้ำว่า สารชะ เรียกน้ำปนเปื้อนที่ผ่านออกมาว่า leachate และเรียกความสามารถของของเสียในการถูกชะว่า ความสามารถในการชะละลาย (leachability)

2.8.2 กลไกการชะละลาย (สุธาทิพย์, 2545)

ก่อนหลอแข็งของเสียปนของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งอิมด้วยน้ำ ประกอบด้วยเฟสของแข็งหนึ่งเฟสหรือมากกว่า ช่องว่างของอากาศ และเฟสของเหลว ที่เรียกว่าสารละลายในรูพรุน (pore solution) ทั้งหมดอยู่ในสมดุลเคมี เมื่อของแข็งสัมผัสสภาวะการชะละลายสมดุลจะถูกรบกวนทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ระหว่างของแข็ง และสารละลายที่ใช้ในการชะละลาย ซึ่งจะเกิดฟลักซ์ โดยมวลระหว่างผิวหน้าของของแข็งและสารชะ ทำให้เกิดการแพร่ (bulk diffusion) ในของแข็งทั้งก่อน โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและสารชะ กลไกย่อยหลายแบบเป็นกลไกที่เกิดในของแข็งที่ผิวของของแข็ง และในสารชะ (bulk leachant)

ก) การละลาย (Solubilization) สำหรับการชะละลายขององค์ประกอบต่าง ๆ ชั้นแรก องค์ประกอบนั้นต้องละลายในสารละลายที่อยู่ในรูปของของแข็ง หรือสารละลายในสารละลายที่ซึมผ่านเข้าไปในของแข็ง สารบางตัวละลายช้ากว่าตัวอื่น ๆ เพราะอัตราการละลายถูกควบคุมโดยความสามารถในการละลาย และโดยความเข้มข้นในสารละลายที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของของแข็งสำหรับกรณีของการหลอแข็ง ของแข็งมักจะสัมผัสกับน้ำใต้ดิน อัตราการละลายจะถูกควบคุมโดยการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ละลายน้ำ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดตอนแรกอัตราการละลายจะถูกจำกัดโดยจำนวนไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ หลังจากนั้นจะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบของของเสีย เพราะว่าการแพร่ของไฮโดรเจนไอออนจะเร็วกว่าอนุภาคอื่น ๆ มาก

ข) การเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง (Transport Through the Solid) ภายในก่อนหลอแข็งของเสีย การเคลื่อนที่อาจจะเกิดโดยการนำ (convection) หรือการแพร่ ก่อนหลอแข็งของเสียส่วนมากมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ดังนั้นการเคลื่อนที่แบบการนำอาจจะไม่สำคัญทั้งในการทดสอบการชะละลาย และในสภาวะจริง การแพร่จึงเป็นกระบวนการเดียวที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง

ค) การแพร่ผ่านชั้นที่ถูกชะ (Diffusion Through the Leached Layer) เนื่องจากองค์ประกอบที่ละลายน้ำจำนวนมากถูกชะจากของแข็งที่ไม่ละลายน้ำทำให้เกิดชั้นที่ถูกชะ (Leached Layer) ขึ้นในของแข็ง ภายใต้สภาวะที่พีเอชต่ำ ทั้งไฮโดรเจนไอออนและองค์ประกอบที่สามารถถูกชะได้จะแพร่ผ่านชั้นนี้ ในทางตรงกันข้ามจากที่ทราบว้ออัตราการชะละลายในชั้นที่ถูกชะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบ เพราะไฮโดรเจนไอออนแพร่เร็วกว่าตัวอื่น ๆ ชั้นที่ถูกชะนี้จึงไม่ได้เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายทั้งหมดในกระบวนการชะละลายเพราะเมื่อองค์ประกอบถูกชะออกมา ชั้นที่ถูกชะก็อาจจะกลายเป็นมีรูพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับของแข็งที่ไม่ได้ถูกชะ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนจะกลายเป็นปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายด้วย

ง) การเคลื่อนที่ผ่านชั้นที่กั้นระหว่างของแข็งกับของเหลว (Transport Through the Solid-Liquid Boundary Layer) ชั้นที่ของแข็งเชื่อมต่อกับของเหลวอาจจะทำให้เกิดสภาวะที่จำกัดสำหรับการชะละลายเหมือนกันในปรากฏการณ์ไฟฟ้าเคมี ความเร็วที่ระบบเข้าสู่สมดุลมักจะถูกจำกัดโดยความหนาและธรรมชาติของชั้นที่กั้นอยู่

จ) การเคลื่อนที่ทั้งหมดในการชะ (Bulk Transport in Liquid Leachant) เมื่อระบบเข้าใกล้สมดุลอัตราการชะละลายจะลดลงตามความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสของแข็งและเฟสสารละลาย จนเข้าใกล้ศูนย์ ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นในหลุมฝังกลบที่อึดตัว แต่ไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มข้นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ขององค์ประกอบใน leachate แต่อัตราการชะละลายทั้งหมดอาจจะต่ำกว่าระบบที่มีการเคลื่อนที่ในอีกทางหนึ่งน้ำใต้ดินที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจะทำให้องค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ดีในของแข็งที่มีรูพรุนมีอัตราการชะละลายเร็วมาก

2.8.3 เกณฑ์การพิจารณาสำหรับการทดสอบการชะละลาย

การทดสอบความสามารถในการชะละลายเป็นสิ่งที่ใช้กำหนดว่า ความเข้มข้นขององค์ประกอบใน leachate เป็นค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ ความเข้มข้นที่สามารถยอมรับได้ คือ ความเข้มข้นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก สำหรับของเสียที่ไม่ได้อยู่ในรายการของเสียอันตราย ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่

ยอมรับได้คือไม่เกิน 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม สำหรับองค์ประกอบที่เป็นพิษยังไม่มีข้อกำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นที่ยอมรับได้ขององค์ประกอบใน Leachate จะต่างกันไปตามวิธีทดสอบ ค่าความเข้มข้นของสารอันตรายที่ยอมรับได้ในสารชะที่กำหนดโดย US. Environmental Protection Agency (บางส่วน) แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ของสารอันตรายที่ยอมรับได้ในสารชะ

Hazardous Waste Number	Contaminant	Regulatory Level (mg/L)
D004	Arsenic	5.00
D005	Barium	100.00
D006	Cadmium	1.00
D007	Chromium	5.00
D008	Lead	5.00
D009	Mercury	0.20
D010	Selenium	1.00
D011	Silver	5.00

ที่มา : US. Environmental Protection Agency

https://www.nyu.edu/content/dam/nyu/environmentalHealthSafety/documents/listed_waste_s.pdf

2.9 การทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี X-ray Diffraction: XRD

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffraction (XRD) (ภาพที่ 2.4) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้ และยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin \theta = n \lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ใน

ตัวอย่างโดยจะใช้เครื่องตรวจจับรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ซึ่งเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมชหรือประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งประมาณ 1-2 กรัม



ภาพที่ 2.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

ที่มา : SHIMADZU CORPORATION, 2564

2.10 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence: XRF

เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence: XRF (ภาพที่ 2.5) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่ธาตุเบริลเลียม (Be) จนถึงธาตุยูเรเนียม (U) โดยใช้หลักการทำงานแบบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence โดยที่ลำรังสีเอกซ์จากเครื่องจะถูกส่งไปยังชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ กับชิ้นงานทดสอบ แล้วเกิดอิเล็กตรอนฟลูออเรสเซนซ์จากธาตุนั้นขึ้นมา ซึ่งจะถูกแยกตามความยาวคลื่นโดย Crystal ชนิดต่าง ๆ ก่อนเข้าไปตรวจวัดโดยชุดตรวจจับรังสี (Detector) ซึ่งภายในห้องสเปกโตรมิเตอร์เป็นแบบสุญญากาศ (Vacuum) หรือ Helium โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการทำงานและประมวลผลภายในตัวเองโดยอัตโนมัติ สามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม การแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรม เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการของรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมาโดยพลังงานที่คายหรือเรืองแสงออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบ มีธาตุอะไรอยู่บ้างโดยใช้หัววัดวัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

เครื่อง XRF โดยทั่วไปจะมี 2 แบบคือ Wavelength Dispersive XRF (WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF) โดยเครื่อง XRF สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งแบบไม่มีมาตรฐานและมีมาตรฐาน (ต้องมีสารมาตรฐาน) สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในหลายลักษณะทั้งของแข็ง ผง ตัวอย่างที่ขึ้นรูปแล้ว หรือ ตัวอย่างที่เป็นของเหลวข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ คือเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลาย ตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็วและไม่จำเป็นต้องใช้ในสารมาตรฐานในการทดสอบ ข้อเสียของ XRF แบบ EDXRF คือความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จะทำได้ยากโดยเฉพาะธาตุในกลุ่มธาตุเบา หากมีปริมาณน้อยๆ ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งหากตัวอย่างนั้นไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นของแข็งเพื่อทดสอบในสภาพความดันต่ำ จะเกิดการดูดกลืนรังสีของอากาศภายในห้องใส่ตัวอย่างซึ่งมีผลให้ความเข้มข้นของ X-ray ที่ได้ลดลง การใช้งานสามารถหาปริมาณธาตุด้านวัสดุที่เป็นแม่เหล็กหรืออิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัสดุเซมิคอนดักเตอร์ แบตเตอรี่ คอนเดนเซอร์ ได้ งานด้านอุตสาหกรรมเคมี เช่น วิเคราะห์สี สีย้อม ยาง เครื่องสำอาง งานอุตสาหกรรมด้านปิโตรเลียม เช่น น้ำมันหล่อลื่น โพลีเมอร์ งานอุตสาหกรรมด้านเซรามิกส์ เช่น ซีเมนต์ ดิน แก้ว หิน งานอุตสาหกรรมด้านโลหะและอโลหะ งานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสียโรงงาน น้ำทะเล แม่น้ำ งานอุตสาหกรรมด้านการเกษตรและอาหาร งานอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence: XRF

ที่มา : SHIMADZU CORPORATION, 2564

2.11 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค Scanning Electron Microscope: SEM

เครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค Scanning Electron Microscope: SEM (ภาพที่ 2.6) ใช้หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากและเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่า ลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ

ใช้วัตถุขนาดเล็กที่สุดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 10,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น การวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) และการวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (Wavelength Dispersive Spectrometry: WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมีจึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสงโดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนท์ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงานแบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valence band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงานโดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆ ที่กระเจิงกลับมานั้น จะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนชนิดนี้ จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอ จนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค

Scanning Electron Microscope: SEM

ที่มา : JEOL, 2564

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีน เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 350 ksc ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าแทนหินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าและใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อย ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียด 3 ถึง 5 เท่า

นิโรจน์ เงินพรหม และสำเร็จ รักซ้อน (2555) ทำการทดลองใช้ตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้าทิ้งจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุก่อสร้างอิฐประสานตามความเหมาะสม ตามอัตราส่วนและกำลังที่ต้องการโดยมีองค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรัง เถ้าแกลบ และเถ้าขานอ้อย พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบเถ้าขานอ้อยที่มีกำลังอัดน้อยกว่า 70 ksc 25 ตัวอย่าง ระหว่าง 70-100 ksc 8 ตัวอย่างและมากกว่า 100 ksc 32 ตัวอย่าง ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่า อิฐประสานจากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยหลังการ

แช่น้ำไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ จำนวน 11 ตัวอย่าง ซึ่งเห็นว่าไม่มีวัสดุที่ก่อให้เกิดการแข็งตัว อิฐประสานจากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยกว่า ร้อยละ 30 จำนวน 51 ตัวอย่าง และ 53 ตัวอย่าง ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากความชื้นพบว่า อิฐประสานจากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือเกิดน้อยมาก จำนวน 10 และ 14 ตัวอย่าง ตามลำดับ

จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา (2560) ศึกษาคุณสมบัติเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์และหินฝุ่นในด้านความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและกำลังอัด อัตราส่วนที่ใช้แบ่งเป็น 3 ชุดคือ ชุดซีเมนต์ผสมหินฝุ่น ชุดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ และหินฝุ่นสำหรับการหล่อขึ้นรูป และชุดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์และหินฝุ่นสำหรับการอัดขึ้นรูป ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบชุดที่มีหินฝุ่นผสมอยู่มากจะมีผลทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า ถ้าปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มมากขึ้นจะทำให้คุณภาพตัวอย่างทดสอบด้อยลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบมากที่สุดเป็นของชุดที่มีเถ้าขานอ้อยแต่ไม่ผสมหินฝุ่น ส่วนการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบชุดที่อัดขึ้นรูปมีแนวโน้มมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่หล่อขึ้นรูปเล็กน้อย สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่มีกำลังอัดสูงกว่า 25 ksc ซึ่งเป็นเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าขานอ้อยน้อยจะส่งผลดีต่อกำลังอัด

จากงานวิจัยคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากงานวิจัยต่างๆ ในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.4 พบว่า เถ้าขานอ้อยมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ได้และยังได้พัฒนาเพิ่มคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยเพื่อให้สามารถนำไปใช้จริงโดยมีผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศรองรับ เมื่อนำเถ้าขานอ้อยไปหาค่าประกอบทางเคมีแล้วพบว่า มีส่วนผสมของซิลิกา (silica) และอลูมินา (alumina) ค่อนข้างสูง เมื่อธาตุเหล่านี้ไปทำปฏิกิริยากับต่างที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดการยึดประสาน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน” และเรียกวัสดุประเภทนี้ว่า “วัสดุปอซโซลาน” ซึ่งเป็นคำเรียกเฉพาะ จากนั้นจึงได้ทดลองนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนต่างๆ กัน ระหว่างร้อยละ 15-25 ซึ่งโดยปกติในกระบวนการผลิตคอนกรีตต้องใช้น้ำปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลดลงเหลือเพียง 230 กิโลกรัม ที่เหลืออีก 70 กิโลกรัมเป็นเถ้าขานอ้อย หลังการทดลองทิ้งไว้ประมาณ 30-60 วันผ่านไป ผลปรากฏว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย สามารถรับแรงได้ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับคอนกรีตปกติ ถือได้ว่าเถ้าขานอ้อยเหล่านี้มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดการระเบิดภูเขาเพื่อนำมาผลิตปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต ลดปัญหามลพิษและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นการแก้ปัญหาของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมโดยนำกลับมาใช้ประโยชน์ เพราะปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่พยายามหาวิธีกำจัดของเหลือทิ้งที่แต่ละปีจะมีวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้รวมกันมากกว่า 3 ล้านตัน จากเดิมที่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ และหากเราสามารถนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งถือเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่แต่ละปีมีการผลิตปูนซีเมนต์มากกว่า 30 ล้านตันได้ จะช่วยลดปัญหาขยะที่จะกลายเป็นปัญหาต่อสังคมได้ในอนาคต (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2557)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากงานวิจัยต่างๆ ในประเทศไทย

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	สาโรจน์ ดำรงค์ศิลป์และสุวิมล สัจจวาณิชย์ (2550)	รัฐพล สมณาและชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554)	สุทัศน์ จันบัวลาและธนากร วาสนาเพียรพงศ์ (2560)
SiO ₂	70.6	55.0	58.0
Al ₂ O ₃	3.8	5.1	2.10
CaO	2.8	11.0	4.01
Fe ₂ O ₃	0.7	4.1	1.30
K ₂ O	-	1.2	4.21
MgO	-	0.9	1.25
P ₂ O ₅	-	-	3.31
Na ₂ O	-	0.2	-
SO ₃	0.2	2.2	-
LOI	15.4	19.6	14.5

