

Template Innovation Technology Database

1. ชื่อเทคโนโลยี (Technology Title) :								
เทคโนโลยีรีไซเคิลเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (Fly Ash) ด้วยการผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete)								
2. ประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม (Industrial Sector) :								
	อุตสาหกรรมแร่	อุตสาหกรรมโลหการ	X	อุตสาหกรรมรีไซเคิล				
3. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels) :								
ระดับต่ำ							ระดับสูง	
TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
Basic principle observed and reported	Technology concept and/or application formulated	Concepts demonstrated analytically or experimentally	Key elements demonstrated in laboratory environment	Key elements demonstrated in simulated environment	Representative of the deliverable demonstrated in relevant environments	Final development version of the deliverable demonstrated in operational environment	Actual deliverable qualified through test and demonstration	Operational use of deliverable
องค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน		ต้นแบบห้องปฏิบัติการ			ต้นแบบภาคสนาม			
4. รายละเอียดโดยสังเขป (Details Description) :								
แนวคิด :	<p>เถ้าลอยถ่านหินเป็นของเสียที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยลักษณะและองค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ชีวมวล น้ำมันต่างๆ เป็นต้น เถ้าลอยถ่านหินถือเป็นของเสียอุตสาหกรรมตัวหนึ่งที่มีปริมาณเกิดขึ้นมากตามปริมาณการใช้ถ่านหินที่เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโรงไฟฟ้าที่ต้องใช้พลังงานความร้อนอย่างมากในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ เนื่องจากถ่านหินเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับวัตถุดิบเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เมื่อนำถ่านหินมาเผาไหม้ โดยเฉลี่ยแล้วร้อยละ 80 ของน้ำหนักถ่านหิน จะเปลี่ยนกลายเป็นเถ้าถ่านหิน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) เถ้าลอย (Fly Ash) 2) เถ้าหนัก (Bottom Ash) โดยเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรม รหัสของเสีย 10 01 02 HM เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จากการที่เถ้าลอยถ่านหินจัดเป็นของเสียอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีปริมาณเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้เป็นภาระกับสิ่งแวดล้อมในการนำไปกำจัดโดยเฉพาะในการนำไปฝังกลบ ซึ่งในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีในการนำเถ้าลอยถ่านหินกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาปูนซีเมนต์ เป็นต้น</p> <p>จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม (แบบ สก. 2) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เถ้าลอยถ่านหินจัดอยู่ในกลุ่มตามรหัสของเสียและชื่อวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในนิคมอุตสาหกรรมมาบ</p>							

ตาพุด ปี พ.ศ. 2556 ดังตารางที่ 6-4 โดยการจำแนกตามประเภทของเถ้าลอยถ่านหิน ตามที่มีการรายงานต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีปริมาณเถ้าลอยถ่านหินประมาณ 1,045,976.00 ตัน ทั้งนี้ปริมาณที่เกิดขึ้นยังไม่รวมน้ำมันที่ไม่สามารถจำแนกประเภทได้ และจากการสอบถามผู้ประกอบการ บจก. บีแอลซีพี เพาเวอร์ ซึ่งเป็นโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า (IPP) ที่ใช้ถ่านหินชนิดบิทูมินัสในการผลิตไฟฟ้า ที่ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดพบว่าทาง โรงงานมีเถ้าลอยถ่านหินเกิดขึ้น ในปี พ.ศ. 2556 ประมาณ 567,000 ตัน ดังตารางที่ 6-5

ตารางที่ 6-4 รหัสของเสียและชื่อวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ประเภทเถ้าลอย ในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ปี พ.ศ. 2556

ของเสียประเภทเถ้าลอย	
รหัสของเสีย	ตัวอย่างชื่อวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามแบบ สก. 2
10 01 99	เถ้าลอย เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน
10 01 02	Ash เขม่า Boiler กากขี้เถ้าจาก burner
ปริมาณรวม	1,045,976.00 ตัน
แหล่งกำเนิด (ประเภทโรงงาน)	42(1), 53(5), 59, 64(10), 88, 89
วิธีการกำจัด	42, 44, 49, 71, 73, 75
ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม	

ตารางที่ 6-5 ปริมาณเถ้าลอยถ่านหินของ บจก. บีแอลซีพี เพาเวอร์ ปี พ.ศ. 2556

ประเภทโรงงาน	ชนิด	แหล่งที่มา	ปริมาณ(ตัน)
โรงไฟฟ้า	Fly Ash	บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด	567,000

ที่มา. จากการสอบถามผู้ประกอบการ

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ รวมถึงการเผาไหม้ที่ใช้ถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีเถ้า และเถ้าที่เหลือมีสภาพเป็นเถ้าลอย (Fly ash) ปะปนไปพร้อมกับก๊าซเสียในรูปของเขม่าและควัน และเถ้าบางส่วนจะตกลงสู่ก้นเตาเผากลายเป็นขี้เถ้าหนัก (Bottom ash) การแยกเถ้าลอยออกจากก๊าซเสียส่วนใหญ่โรงไฟฟ้าจะใช้เครื่องกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น ด้วยเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator : ESP) เครื่องดักฝุ่นแบบถักกรอง (Fabric filter) และเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน (Cyclone separator) เป็นต้น เพื่อดักจับฝุ่น และเถ้าลอย หลังจากนั้นจะทำการนำเถ้าลอยที่ได้ไปเก็บรวบรวมและดำเนินการจัดการต่อไป ซึ่งเถ้าลอยถ่านหินจัดว่าเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีความอันตราย ตามรหัส 10 01 02 HM ที่ต้องมีวิธีการเก็บรวบรวม และกำจัดโดยเฉพาะ โดยไม่สามารถนำไปเก็บรวบรวม และกำจัดร่วมกับของเสียทั่วไปได้ ทั้งนี้แหล่งกำเนิดหลักของเถ้าลอยถ่านหิน จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม (แบบ สก. 2) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า (โรงงานประเภท 88) โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัด โดยถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (รหัสวิธีกำจัด 44) และนำ

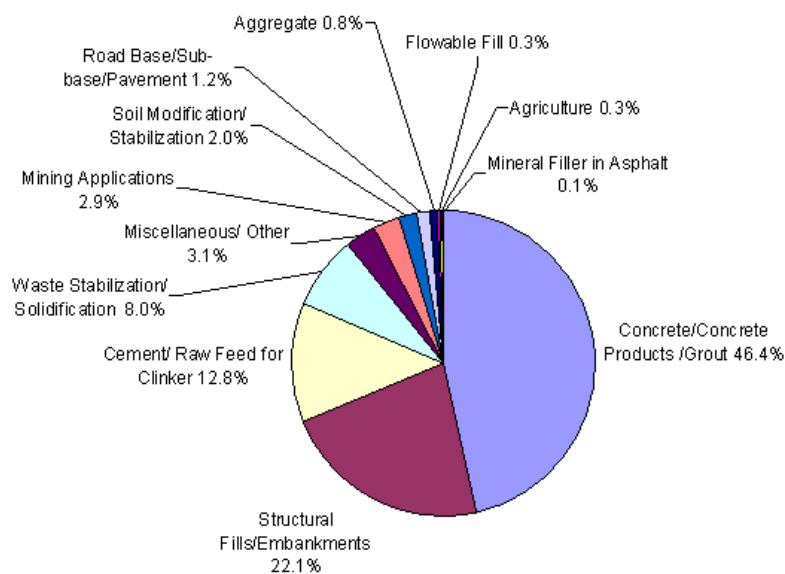
กลับมาใช้ประโยชน์อีกด้วยวิธีอื่นๆ (รหัสวิธีกำจัด 49) แต่ก็มีบางส่วนถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบตามหลักสุขภาพ (รหัสวิธีกำจัด 71) จากการศึกษาพบการจัดการเถ้าลอยผ่านหินของโรงไฟฟ้าในปัจจุบัน พบว่า โรงงานไฟฟ้าจะทำการรวบรวมเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการผลิตไว้ที่โรงงาน และทำการแจ้งปริมาณของเถ้าลอยที่ได้เพื่อขออนุญาตนำของเสียออกนอกโรงงานเพื่อกำจัด พร้อมส่งตัวอย่างทำการตรวจวิเคราะห์ความเป็นพิษ หลังจากนั้นจะมีผู้รับซื้อหรือรับจัดการเถ้าลายนำรถขนส่งเฉพาะมาที่โรงงาน

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่าในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.2006 [1] นั้นได้มีการนำเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินไปทำการรีไซเคิลประมาณ 29.3 - 32.4 ล้านเมตริกตัน โดยมีการใช้งานส่วนใหญ่ในด้านคอนกรีต ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของคอนกรีต งานโครงสร้าง และการผสมกับปูน ดังแสดงดังรูปที่ 6-6 ซึ่งในปัจจุบันทางบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด ได้ขายเถ้าลอยจากการเผาไหม้ทั้งหมดไปยังบริษัทด้านงานก่อสร้างและคอนกรีต [3] ดังนี้

- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง (CPAC)
- บริษัทนครหลวงคอนกรีตจำกัด (SCCO)
- บริษัทบอรัลคอนกรีตจำกัด (BORAL)
- บริษัททอรัส พอซโวลานซ์จำกัด (TARUS)

ทั้ง 4 บริษัทข้างต้นนั้นนำเถ้าลอยไปผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตและปรับปรุงคอนกรีตให้ดีขึ้น

ยิ่งขึ้น



รูปที่ 6-6 แสดงการรีไซเคิลถ่านหินในในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าลอยถ่านหินในงานคอนกรีตนั้นสามารถเติมเถ้าลอยถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับการใช้งานและชนิดของปูนซีเมนต์นั้นๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ (ราคาปูนซีเมนต์จะอยู่ในช่วง 50-75 ยูเอสดอลลาร์ต่อตัน ส่วนเถ้าลอยจะมีราคา 15-40 ยูเอสดอลลาร์ต่อตัน)

ปัจจุบันในประเทศไทย เถ้าลอยถ่านหินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่สามารถขายได้เกือบทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งไปที่โรงงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าลอยถ่าน

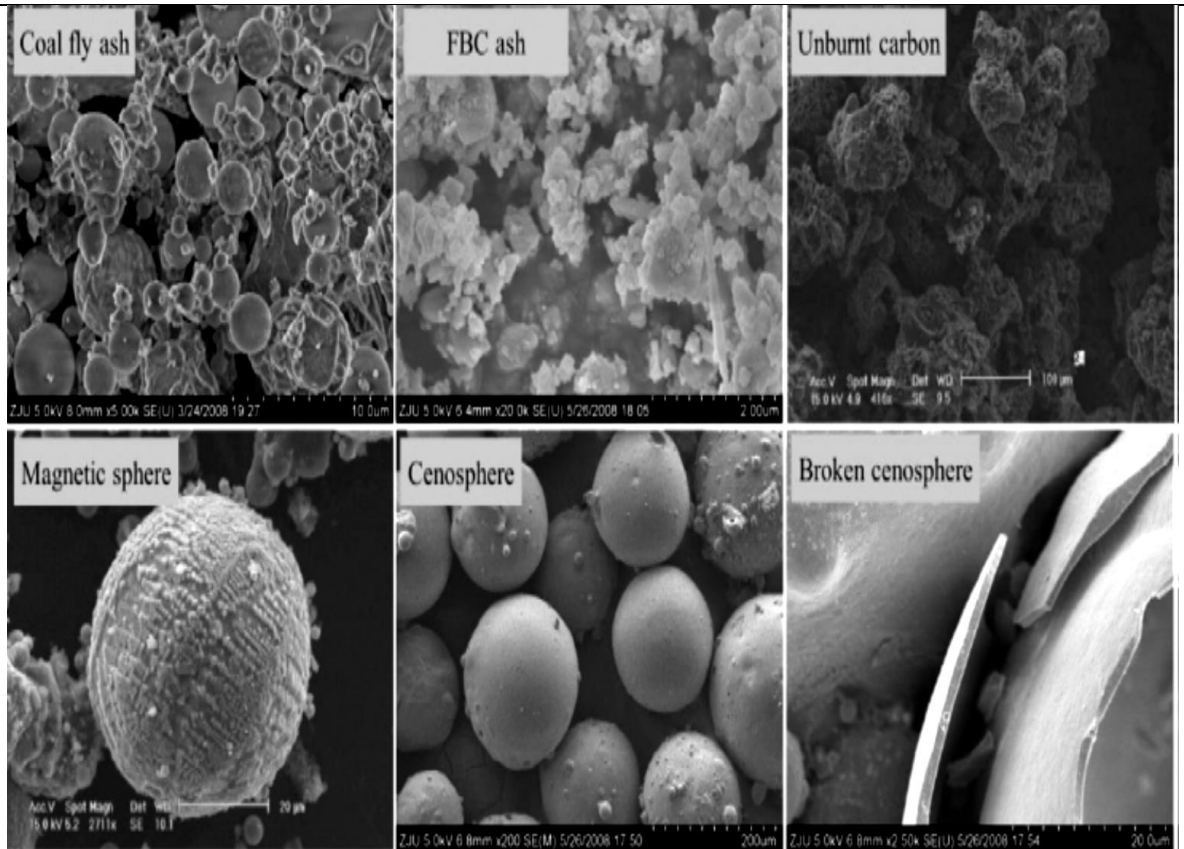
หินนั้นสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนตามสัดส่วนที่กำหนดในการผลิตคอนกรีตได้ โดยราคาในการซื้อขายนั้นจะอยู่ที่ทางโรงไฟฟ้าและผู้ประกอบการเป็นผู้ตกลงซื้อขายแต่ละรายเอง เนื่องจากทางโรงไฟฟ้าเป็นผู้ก่อกำเนิดของเสียและมีต้นทุนในการส่งไปกำจัด ส่วนทางผู้รับซื้อแต่ละรายมีความต้องการได้แต่ละรายไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตจากการสอบถามผู้รับซื้อรายย่อย พบว่าราคาซื้อขายแต่ละรายอยู่ที่ประมาณ 300 – 1000 บาทต่อตัน (ตามเกรดหรือคุณภาพของเถ้าถ่านหิน)

ลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น :

สมบัติทั่วไป เถ้าลอยถ่านหินจะอยู่ในรูปอนุภาคผง มีรูปร่างทรงกลม มีทั้งที่เป็นแบบทรงแข็งตัน (Solid) และกลวง (Hollow) โดยส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) กลุ่มไฮโดรคาร์บอนในเถ้าลอยจะเป็นอนุภาคเชิงมุม (angular particles) แสดงดังรูปที่ 6-1 เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous coal fly ash) จะมีขนาดน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตรค่าความถ่วงจำเพาะมีประมาณ 2.1-3.0 ในขณะที่ค่า พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) มีค่าอยู่ในช่วง 170- 1000 ตร.มต่อกิโลกรัม



รูปที่ 6-1 อนุภาคของเถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 6-2 แสดงเถ้าลอยถ่านหินแบบต่างๆ

ส่วนประกอบของเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะแสดงดังรูปที่ 6-2 ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญ ดังนี้

1) อนุภาคทรงกลมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic sphere) จะมีปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจากเถ้าลอยถ่านหินทั้งหมด แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สเฟียร์รูไรท์ (Spherulites) จะมีรูปร่างของอนุภาคทรงกลมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก มีสีดำ ซึ่งมีประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอนุภาคที่ไม่เป็นแม่เหล็ก คือมีโครงสร้างที่ไม่ใช่แมกนีไทต์ที่เป็นโครงสร้างออกตะฮีดรอน (Magnetite crystal) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีสมบัติทางแม่เหล็กที่น้อยกว่าหากเทียบกับอนุภาคแมกนีไทต์ทั่วไป (Regular magnetite) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีความเปราะ แตกหักได้ง่าย จึงจะสามารถนำไปบดแล้วนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ ซึ่งอนุภาคนี้จะสามารถนำไปใช้ในการทำความสะอาดถ่านหิน (Coal cleaning) [3, 4]

2) คาร์บอน (Carbon) คาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) ในเถ้าลอยถ่านหินนั้นจะมีปริมาณร้อยละ 3 - 70 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับการเผาไหม้ถ่านหินในแต่ละแหล่ง พื้นที่ผิวของความเข้มข้นคาร์บอนมีค่าประมาณ 11 ตารางเมตรต่อกรัม ในระหว่างการแยกนั้นจะทำให้เกิดการหายไปของน้ำหนักร้อยละ 18 และทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 160 ตารางเมตรต่อกรัม คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย (Low-surface-area carbon) จะสามารถนำไปใช้งานต่อได้ ที่นิยมนำไปใช้คือ การนำไปใช้ในกระบวนการดูดกลืนสารพิษจากเตาเผาขยะ (Waste incinerator) และปล่องควัน [5, 6] โดยบริษัท STEAG ที่เป็นบริษัทของประเทศเยอรมันได้จดสิทธิบัตรนี้ไว้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีไว้สำหรับ ใช้ในการดูดกลืนสารพิษในกระบวนการต่างๆ ที่ใช้คาร์บอนใน

อุตสาหกรรมนั้น [5]

สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านหินนั้นๆ นอกจากนี้ ยังเกี่ยวข้องกับลักษณะการเก็บถ่านหิน ซึ่งส่งผลต่อค่าความชื้นของเถ้าลอยถ่านหิน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากบรรยากาศที่แตกต่างกันในการเก็บเถ้าลอยถ่านหิน จากตารางที่ 6-1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินลิกไนต์ และถ่านหินซับบิทูมินัส ซึ่งพบว่าถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัสจะมีปริมาณแคลเซียม ออกไซด์และซัลเฟตที่มากกว่าถ่านหินบิทูมินัส แต่จะมีปริมาณ LOI (Loss of ignition) ที่น้อยกว่า ในบางครั้งเถ้าลอยจากถ่านหินที่เกิดขึ้นอาจจะมืองค์ประกอบบางอย่างหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษปะปนอยู่ตามแหล่งที่มา เช่น อาร์ซีนิกหรือสารหนู (As) และ โครเมียม (Cr) เป็นต้น ตามแสดงตารางที่ 6-3 ที่แสดงปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยถ่านหิน นอกจากนี้ตัวเถ้าลอยถ่านหินยังเป็นฝุ่นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถฟุ้งกระจายได้ อาจจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ถ้าทิ้งหรือฝังดินก็จะก่อให้เกิดปัญหาแก่ดินและแหล่งน้ำใต้ดิน

เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีเถ้า มีสภาพเป็นเถ้า มี 2 ลักษณะคือ 1) เถ้าลอย (Fly ash) มีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียดขนาดเล็กสีเทาอ่อน ซึ่งจะลอยปะปนไปพร้อมกับก๊าซเสียในรูปของเขม่าและควัน เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 80 - 90 ของน้ำหนักเถ้าทั้งหมด และ 2) เถ้าหนัก (Bottom ash) มีลักษณะเป็นตะกอนดินขนาดเล็ก สีเทาเข้มและดำ เป็นเถ้าที่ไม่ได้ลอยไปกับควันเขม่าและตกลงสู่กันเตาเผา เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 10 - 20 ของน้ำหนักเถ้าทั้งหมด

ตารางที่ 6-1 แสดงส่วนผสมของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน [1]

ส่วนประกอบ	บิทูมินัส (ร้อยละ)	ซับบิทูมินัส (ร้อยละ)	ลิกไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-6
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

* LOI = Loss of ignition

ในการศึกษาครั้งนี้ทางที่ปรึกษาฯ ได้รับความอนุเคราะห์เถ้าลอยถ่านหินจากโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้าแห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งตัวอย่างเถ้าลอยถ่านหินทั้งหมดเป็นเถ้าลอยถ่านหินที่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยเป็นถ่านหินประเภทบิทูมินัส โดยทางโรงงานมีเถ้าลอยถ่านหินที่เกิดจากกระบวนการผลิต 2 ประเภท คือ

1) เตาเผาที่ใช้ปูนขาวในกระบวนการดักจับมลพิษทางอากาศ (เป็นเทคโนโลยีดักจับมลพิษทางอากาศที่

โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้อยู่) ถ้ำที่ได้จะมีปูนขาวผสมอยู่
 2) เตาเผาที่ไม่ต้องใช้ปูนขาวในกระบวนการดักจับมลพิษทางอากาศ ถ้ำที่ได้จะไม่มีปูนขาว



รูปที่ 6-3 ตัวอย่างถ้ำลอย ทั้ง 2 แบบ

ทางที่ปรึกษา ได้นำตัวอย่างถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence) เพื่อหาสัดส่วนองค์ประกอบของถ้ำลอย และทำการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากถ้ำลอยด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และภาพถ่าย SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 6-2 –6-3 และรูปที่ 6-4 -6-5

ตารางที่ 6-2 สัดส่วนองค์ประกอบของถ้ำลอยทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์ด้วย XRF

Formula	Concentration(%wt)	
	ไม่ผสมปูนขาว	ผสมปูนขาว
SiO ₂	48.50%	24.20%
Al ₂ O ₃	20.00%	12.50%
Fe ₂ O ₃	13.40%	8.55%
CaO	8.47%	37.60%
MgO	3.41%	3.27%
K ₂ O	2.18%	0.93%
Na ₂ O	1.37%	3.58%
TiO ₂	1.02%	0.73%
SO ₃	0.98%	7.86%
P ₂ O ₅	0.20%	0.11%
BaO	0.14%	0.20%
MnO	0.11%	0.05%

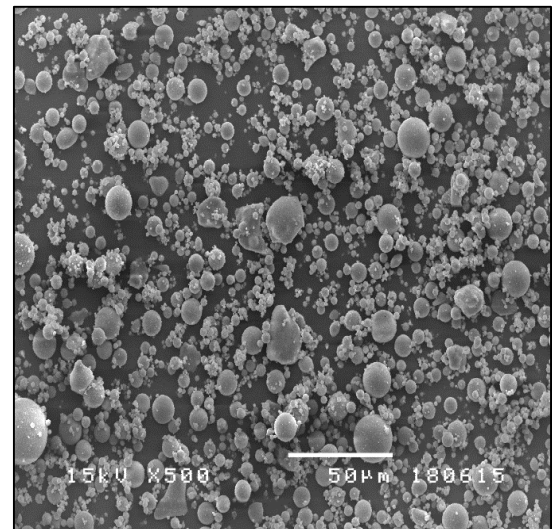
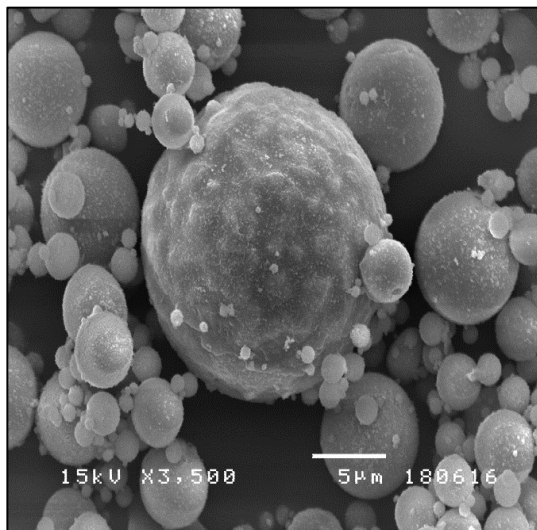
SrO	0.00%	0.27%
Sum	99.78%	99.84%

ตารางที่ 6-3 ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยด้วยวิธี TCLP

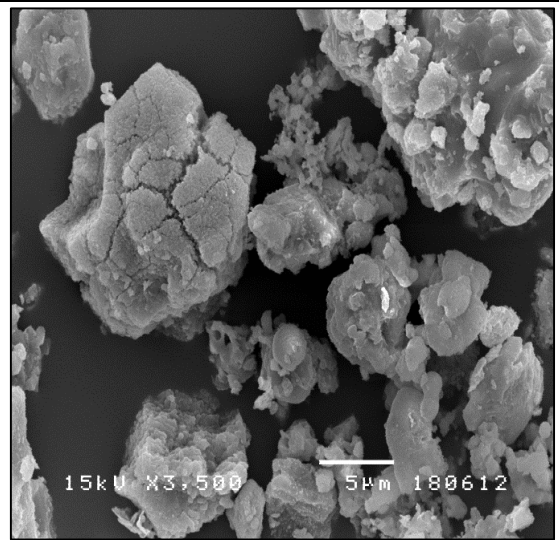
ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/L)					
	As (std <0.25)	Zn (std <5)	Pb (std <0.20)	Cd (std <0.03)	Cr (std <0.25)	Ba (std <1.00)
ผสมปูน ขาว	0.0±0.0 (√)	0.15±0.254 (√)	0.101±0.004 (√)	0±0 (√)	0±0 (√)	0.537±0.348 (√)
ไม่ผสม ปูนขาว	1.90±0.127 (x)	1.38±0.373 (√)	0.19±0.012 (√)	0±0 (√)	0.33±0.026 (x)	0.15±0.016 (√)

หมายเหตุ 1) TCLP คือ การชะละลายโลหะหนักด้วยกรดอะซิติก ที่ pH 2.88 เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และการวิเคราะห์โลหะหนักทำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

2) ค่าโลหะหนักอ้างอิงจาก มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม



รูปที่ 6-4 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ไม่ผสมปูนขาว

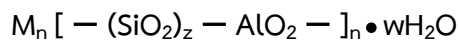


รูปที่ 6-5 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ผสมปูนขาว (ต่อ)

จากผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP พบว่า เถ้าลอยที่ผสมปูนขาวผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว และเถ้าลอยที่ไม่ผสมปูนขาว มีปริมาณสารหนู (1.90 ± 0.127 mg/L) และโครเมียม (0.33 ± 0.026 mg/L) ที่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ลักษณะและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ :

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซโอเลต (Polysialate) ที่มีซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต $[Si - O - Al - O]$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



โดยที่ z ซึ่งหมายถึงจำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เมื่อมีค่าแตกต่างกัน จะมีชื่อเรียกและคุณสมบัติที่มีความแตกต่างกันตามไปด้วย ดังต่อไปนี้

ถ้า z มีค่าเป็น 1 เรียกว่า โพลีไซโอเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 เรียกว่า โพลีไซโอเลตไฮลอกโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 เรียกว่า โพลีไซโอเลตไดไฮลอกโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุ และประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วน Si : Al เท่ากับ 1, 2 และ 3 จะได้สารที่มีลักษณะของโครงสร้างเป็นสามมิติ แต่ถ้าหากอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมแบบขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6-7 และที่อัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบที่มีความเป็นวัสดุโพลิเมอร์มากยิ่งขึ้น โดยตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์และลักษณะของการนำไปประยุกต์ใช้งานที่อัตราส่วนต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อัตราส่วน 2 : 1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3 : 1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียมที่สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ระหว่าง 200 - 1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วน 20 : 1 ถึง 35 : 1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

Si : Al = 1 โพลีไซอะเลต (PS)

Poly(sialate)
(-Si-O-Al-O-)



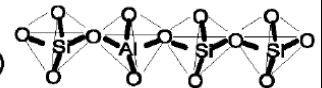
Si : Al = 2 โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (PSS)

Poly(sialate-siloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-)



Si : Al = 3 โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (PSDS)
รูปที่ 6-7 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะ

Poly(sialate-disiloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

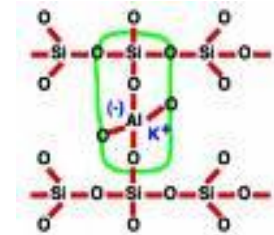


เลต

Si : Al > 3 ไซอะเลตเชื่อมขวางกัน

ซึ่งจะเป็นการศึกษา การทดลองเทคโนโลยีรีไซเคิล ทั้งในระดับ

ห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot scale)



ชนิดของ
เทคโนโลยี :

เทคโนโลยีรีไซเคิลด้วยการผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polimerization)

5. การรวบรวมองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน (Literature Review)

ในปัจจุบันนี้ นักวิจัยหลายกลุ่มมีความพยายามในการคิดค้นและผลิตคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างสมัยใหม่โดยใช้สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตได้นี้ จะมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่นเดียวกับคอนกรีตโดยทั่วไปที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ซึ่งได้แก่ วัสดุจำพวกทราย และมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ซึ่งได้แก่ วัสดุจำพวกหิน ประมาณร้อยละ 70-80 และมีเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟ เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันในขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากโดยทั่วไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสม ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานชนิดเถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก จะเกิดการทำให้ปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกนี้ จะมีความแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polimerization)

6. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ /
สารเคมี :

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

1) เถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 6-8 เถ้าลอย (Fly Ash)

2) ทรายแม่น้ำ



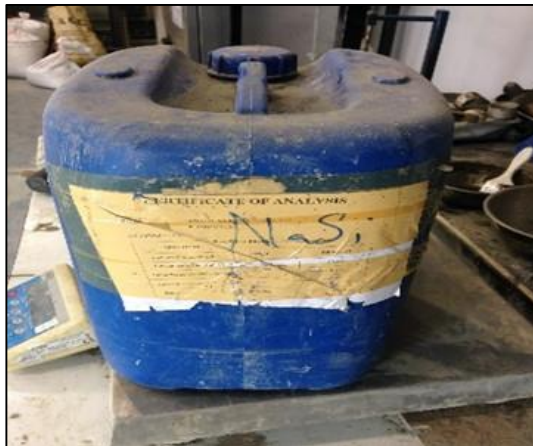
รูปที่ 6-9 ทรายแม่น้ำ

3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 6-10 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4) สารละลายโซเดียมซัลไฟด์



รูปที่ 6-11 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์

เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่สำคัญ

1) ทรายชั่ง ใช้สำหรับช่างวัดถุดิบ และสารเคมี



รูปที่ 6-12 ทรายชั่ง

2) เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Pan Mixer ใช้สำหรับผสมส่วนผสมให้เข้ากัน



รูปที่ 6-13 เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Pan Mixer

3) ตู้อบความร้อนควบคุมอุณหภูมิ สำหรับอบตัวอย่างทดสอบให้แข็งเร็วขึ้น



รูปที่ 6-14 ตู้อบความร้อนควบคุมอุณหภูมิ

4) ตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร สำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 6-15 ตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร

ขั้นตอนการ

ทดลอง :

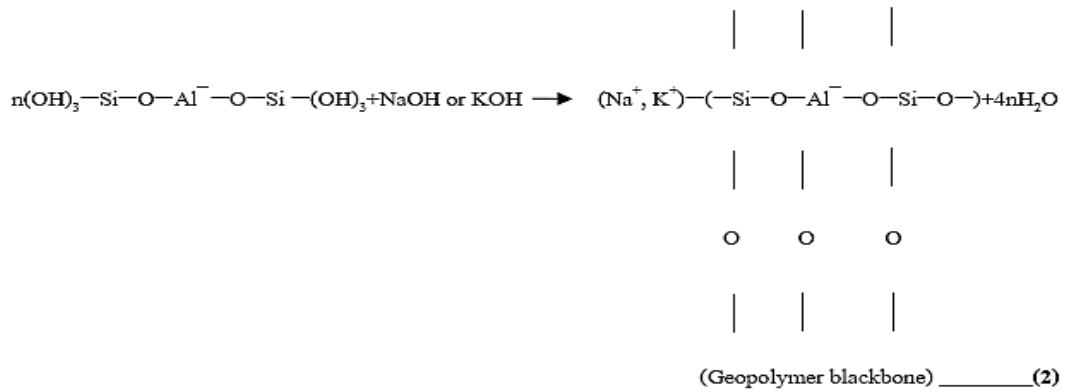
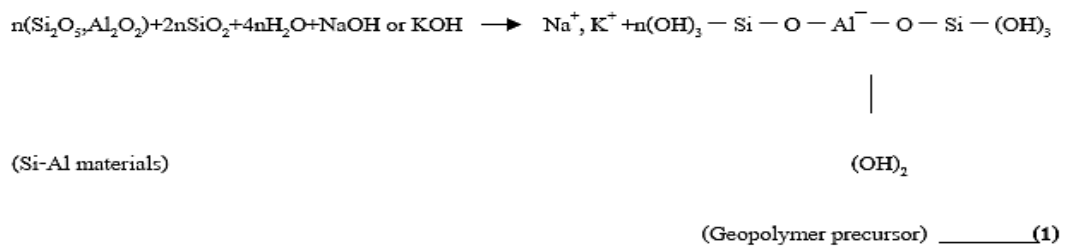
กรรมวิธีการผลิตจีโอโพลีเมอร์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายต่างแก่เข้มข้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเตชัน (Polycondensation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า จีโอโพลีเมอร์และมีสูตรทางเคมี ดังต่อไปนี้



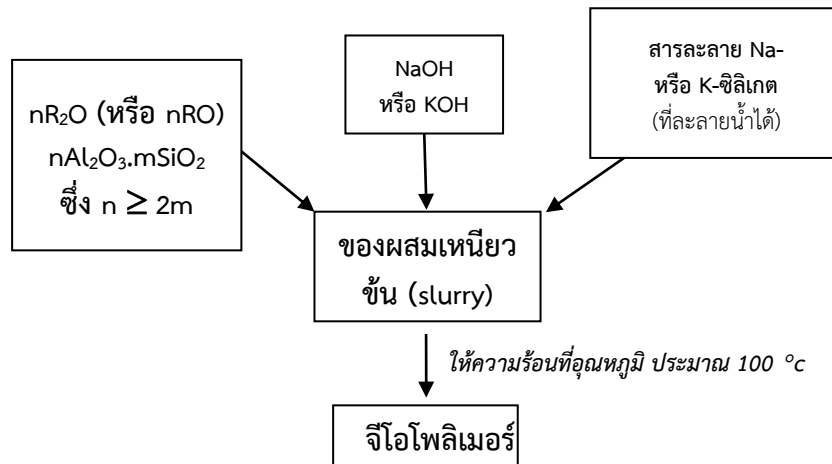
- โดยที่ M คือ ธาตุโลหะอัลคาไลน์
- คือ การยึดเกาะพันธะ
- z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO₂ (โดยมีค่าเป็นตัวเลข 1, 2 หรือ 3)
- w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ
- n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่
หรือ Degree of Polycondensation

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันของจีโอโพลิเมอร์ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจนเท่าใดนัก แต่อย่างไรก็ตาม Hua และ Ven Deventer [15] ได้เสนอกลไกความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยาไว้ดังต่อไปนี้

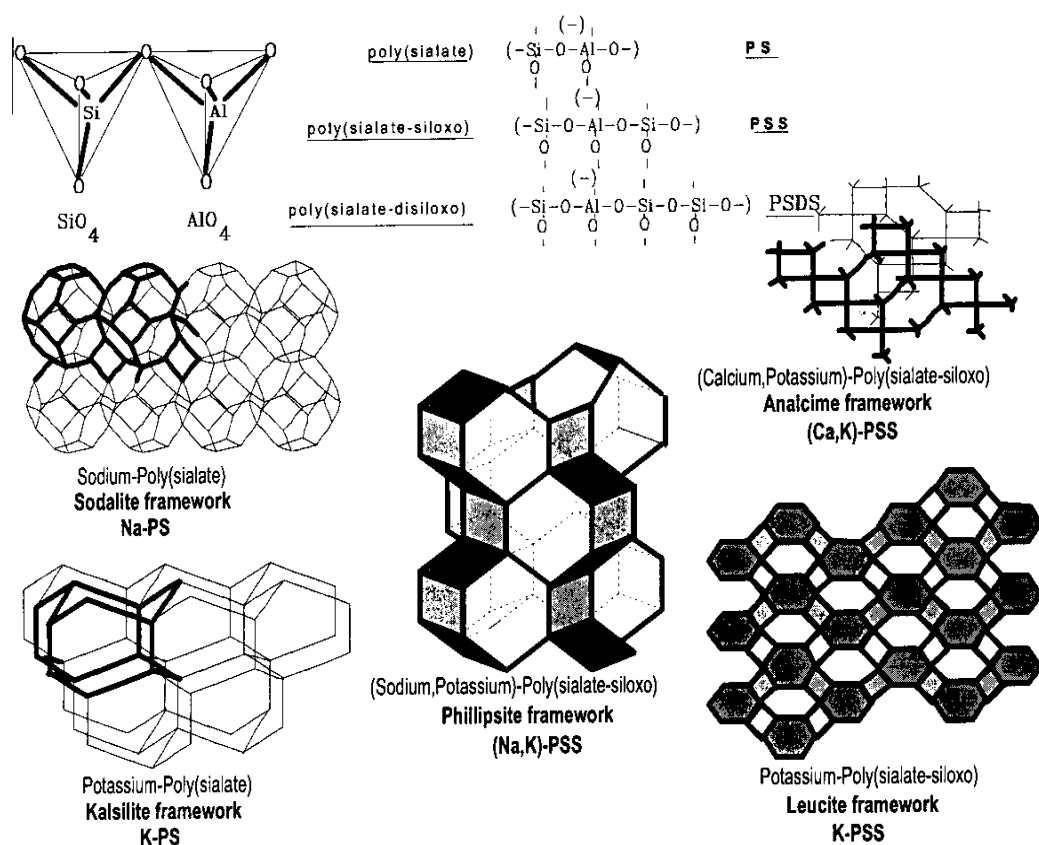


จากผลการวิจัยที่ผ่านมา พบว่า แก้วถ่านหิน มีส่วนประกอบของ SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นมากเพียงพอ จะสามารถเกิดเป็นสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติด้านการแข็งตัวได้ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากการที่องค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินามีความสามารถในการรวมตัวกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 6-4 เมื่อนำไปรวมตัวกับสารประกอบอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติในด้านความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี จะเกิดการอัดตัวแน่นทำให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปเป็นโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ซึ่งเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO₄ และ SiO₄ ดังแสดงในรูปที่ 6-16

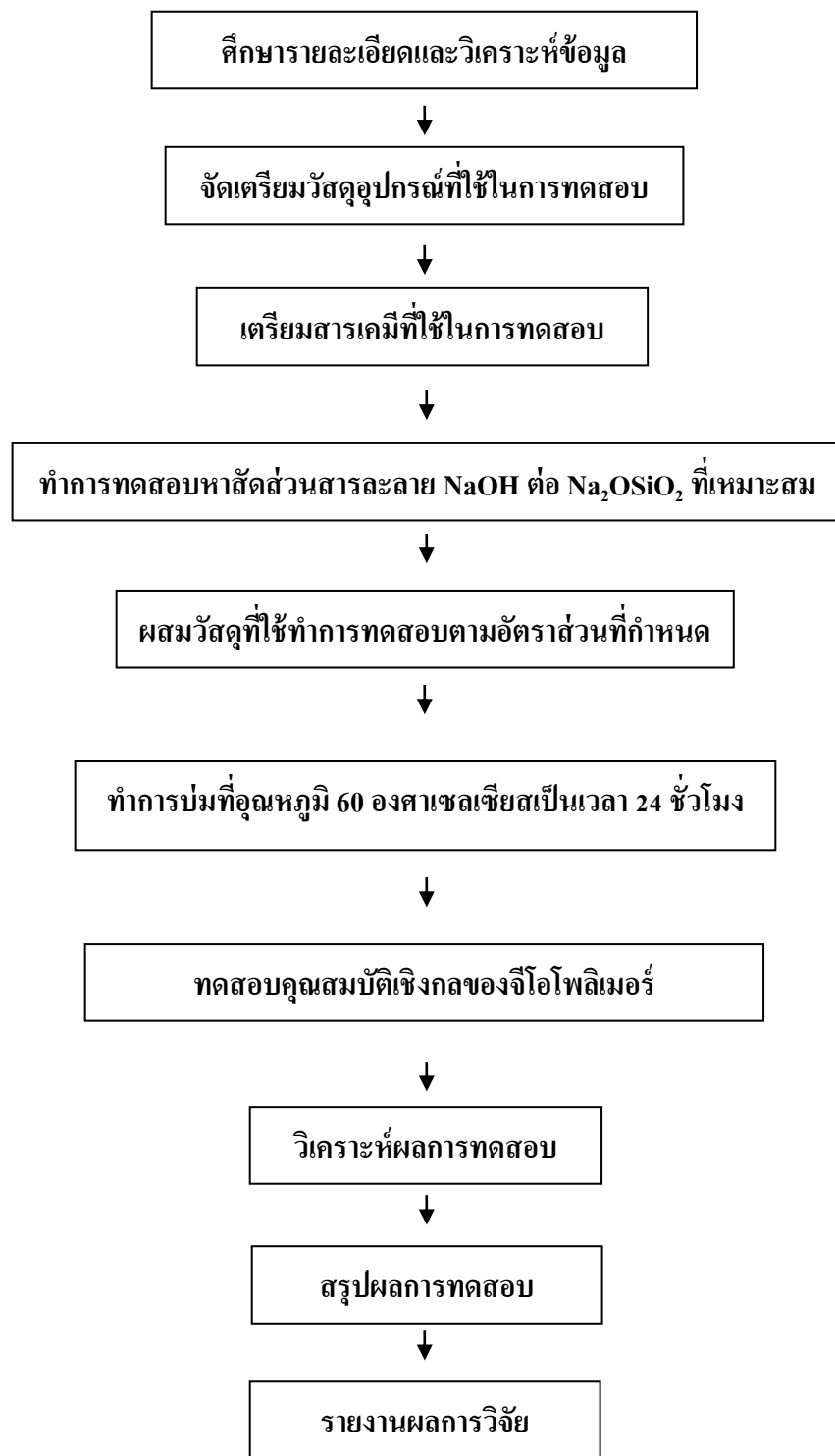


รูปที่ 6-16 แผนภูมิการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน)



รูปที่ 6-17 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต

ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 6-18 แผนภาพขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการทดลอง

การทดสอบหาอัตราส่วนของสารละลายและความเข้มข้นที่เหมาะสม

ในการทดสอบมีขั้นตอนการเลือกอัตราส่วนปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งทำได้โดยการจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ด้วยอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์อื่นๆ ซึ่งได้แก่ แก่ถ่านหิน ชนิดและปริมาณของมวลรวม โดยมีความเข้มข้นและอัตราส่วนดังแสดงตามตารางที่ 6-6 และ 6-7 ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการบ่มตัวอย่างทดสอบจนมีอายุครบ 24 ชั่วโมง จำนวนทั้งสิ้น 4 อัตราส่วน (อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก) ดังต่อไปนี้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1 : 1
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1 : 1.5
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1 : 2
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1 : 2.5

จากนั้นทำการทดสอบความสามารถด้านกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบตามอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้น เพื่อใช้ในการหาอัตราส่วนของปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของสารตั้งต้นดังกล่าว และนำมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ในขั้นตอนการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 6-6 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

NaOH (Molarity)	Percent by Weight		Density (g/cc)	Volume 500 ml.	
	Na ₂ O	H ₂ O		NaOH (g)	H ₂ O (g)
8M	25.32	74.68	1.264	160	472
10M	30.40	69.60	1.316	200	458
12M	35.20	64.80	1.364	240	442
14M	39.79	60.21	1.407	280	424

ตารางที่ 6-7 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้เพื่อหาสัดส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่เหมาะสม

วัตถุดิบ	ปริมาณที่ใช้ (kg/m ³)			
	1:1*	1:1.5*	1:2*	1:2.5*
FA	381	381	381	381
NaOH	59	59	59	59
Na ₂ OSiO ₂	59	88.5	118	147.5
RiverSand	1,613	1,613	1,613	1,613

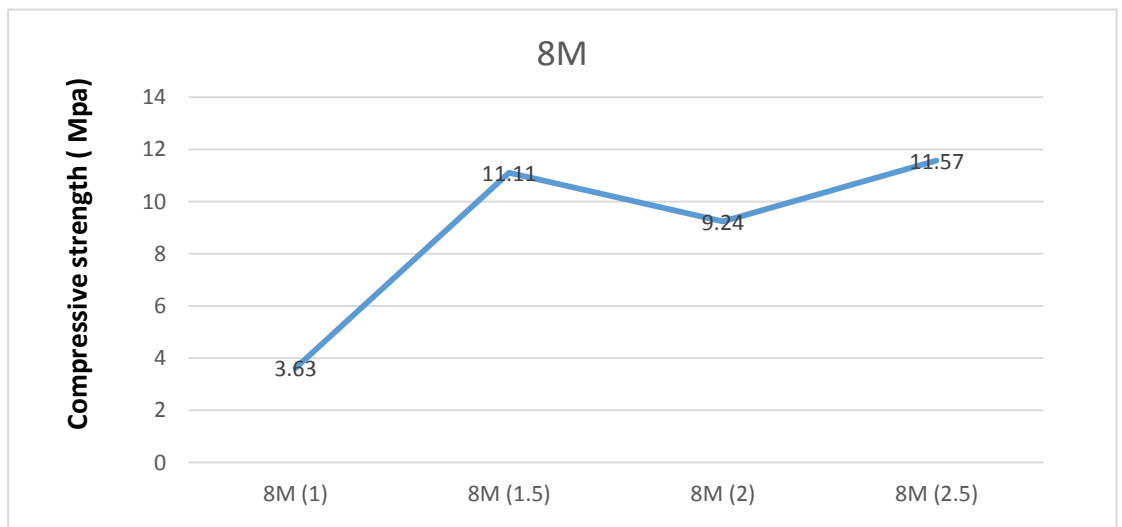
*อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ผลการทดลอง

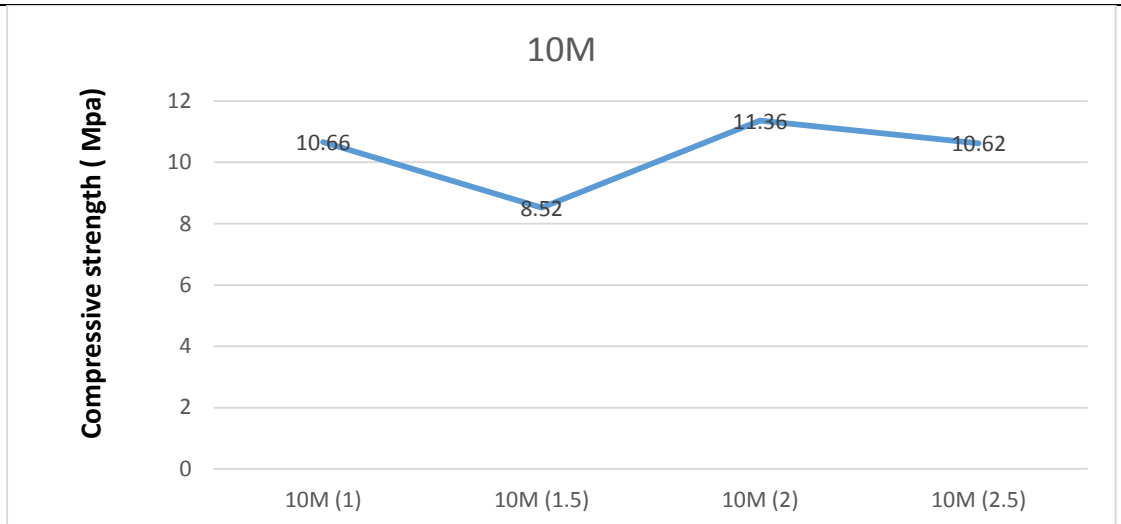
ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

หลังจากได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร แล้วจะนำมาทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของสารละลายและความเข้มข้นที่เหมาะสม ด้วยอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1 ต่อ 1 1 ต่อ 1.5 1 ต่อ 2 และ 1 ต่อ 2.5 ตามลำดับและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 10 12 และ 14 โมลาร์ตามลำดับ

จากผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังอัดของตัวอย่างทดสอบภายใต้สภาวะการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่างทดสอบที่ส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 3.63 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.11 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 9.24 MPa และที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.57 MPa

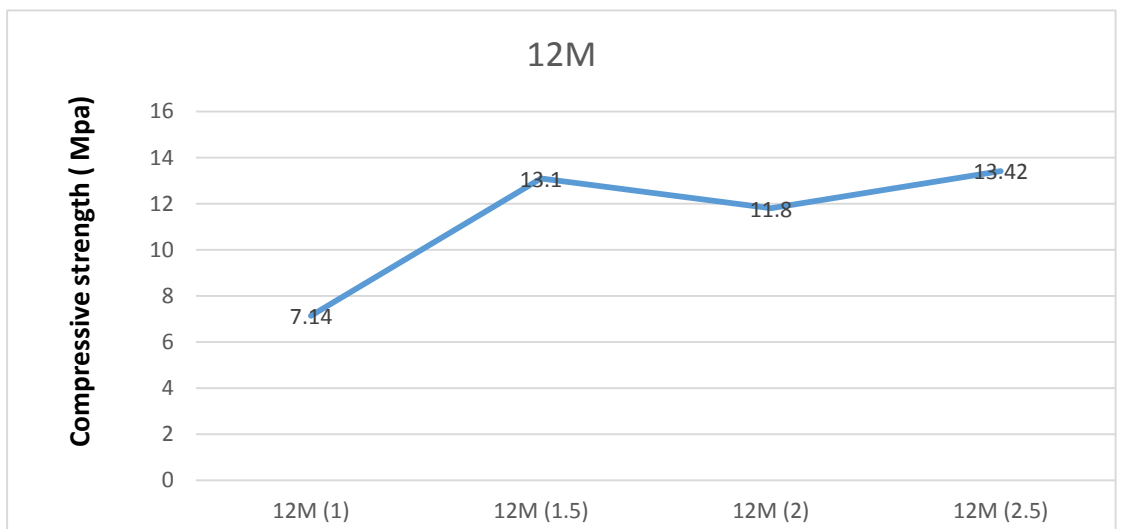


รูปที่ 6-19 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อแปรผันปริมาณสารละลายที่มีความเข้มข้น NaOH 8 โมลาร์ ที่ส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 10.66 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.52 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.36 MPa และที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 10.62 MPa



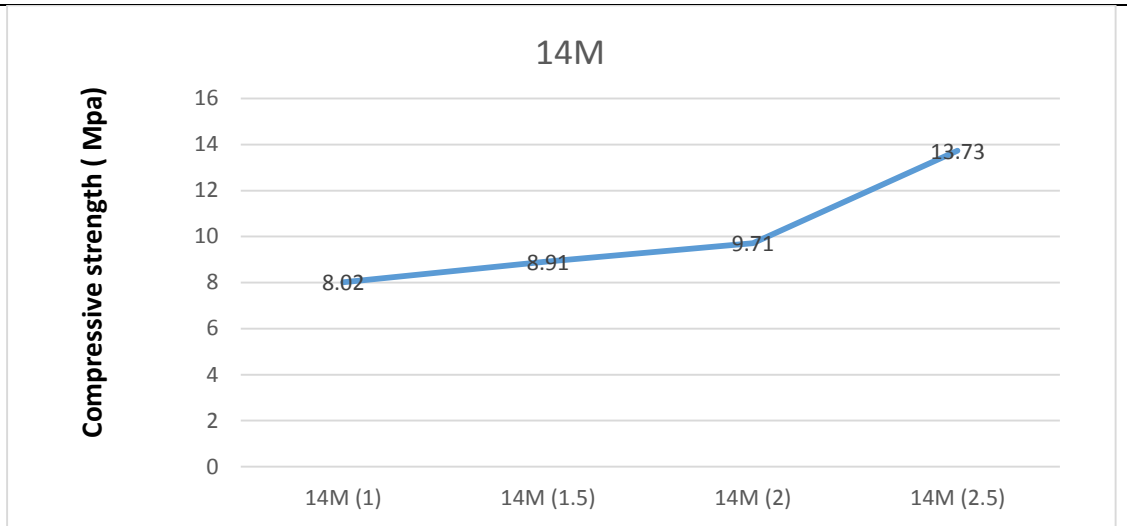
รูปที่ 6-20 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อแปรผันปริมาณสารละลายที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์

ที่ส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 7.14 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.10 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.80 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.42 MPa



รูปที่ 6-21 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อแปรผันปริมาณสารละลายที่ความเข้มข้น NaOH 12 โมลาร์

ที่ส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.02 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.91 MPa ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 9.71 MPa และ ที่อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 2.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.73 MPa



รูปที่ 6-22 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อแปรผันปริมาณสารละลายที่ความเข้มข้น NaOH 14 โมลาร์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

เก้าถ่านหินที่ผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกในการทดแทนคอนกรีตสำหรับผู้ประกอบการ ซึ่งในการออกแบบการผลิตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กำหนดให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าคอนกรีตมวลเบา และใช้ในงานผลิตผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในงานตกแต่งอาคาร

จากผลการทดสอบหาอัตราส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นทำให้ทราบว่า ที่ส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1 ต่อ 2.5 มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 13.73 MPa จึงเลือกใช้ความเข้มข้นและสัดส่วนผสมนี้ตลอดการทดสอบ

ตารางที่ 6-8 แสดงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

สัดส่วนผสมและความเข้มข้น	กำลังอัด (MPa)
	อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
8M (1)	3.63
8M (1.5)	11.11
8M (2)	9.24
8M (2.5)	11.57
10M (1)	10.66
10M (1.5)	8.52
10M (2)	11.36
10M (2.5)	10.62
12M (1)	7.14

12M (1.5)	13.1
12M (2)	11.8
12M (2.5)	13.42
14M (1)	8.02
14M (1.5)	8.91
14M (2)	9.71
14M (2.5)	13.73

7. การทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ /
สารเคมี :

ขั้นตอนการ
ทดลอง :

ผลการทดลอง
:

8. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility Study) :

NPV :

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์เบื้องต้น

จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม (แบบ สก.2) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2556 พบว่าของเสียประเภทเถ้าลอยที่ขออนุญาตออกนอกโรงงาน ของนิคมอุตสาหกรรมมาตาพุด ตามรหัสของเสีย 10 01 02 HM มีปริมาณสะสมทั้งสิ้นประมาณ 1,045,976 ตัน (หมายเหตุ ปริมาณแสดงอาจคลาดเคลื่อน เนื่องจากตัวเลขที่รายงานการนำของเสียออกนอกโรงงานตามแบบ สก.2 ยังไม่สามารถรวบรวมข้อมูลทั้งหมดได้ หรือคิดเป็นเพียง ร้อยละ 8 ของโรงงานที่ต้องรายงานทั้งหมด) ซึ่งเป็นของเสียที่มีจำนวนมากที่สุดที่เกิดขึ้นในนิคมฯ หรือที่สัดส่วนร้อยละ 50 ของปริมาณของเสียทั้งหมดในนิคมฯ จากข้อมูลด้านปริมาณมีปริมาณของเสียเพียงพอที่จะนำมาศึกษา ที่ปรึกษาฯ จึงเห็นสมควรเลือกตัวอย่างเถ้าลอยถ่านหินเป็นของเสียเป้าหมายที่จะทำการทดลองในระดับปฏิบัติการ ซึ่งจากการศึกษารายละเอียดในการจัดการหรือการกำจัดตลอดจนการนำเถ้าลอยถ่านหินกลับมาใช้ประโยชน์ พบว่าในอดีตได้มีการจัดการทั้งแบบถูกต้องและไม่ถูกต้อง โดยนำเถ้าลอยถ่านหินไปกำจัดโดยส่งให้กับผู้รับจัดการของเสียด้วยวิธีการฝังกลบ และเนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นของเสียอันตราย เป็นฝุ่นละอองฟุ้งกระจาย มีปริมาณมาก ทำให้เป็นภาระแก่ผู้ประกอบการ ตั้งแต่การขนออกนอกโรงงาน ตลอดจนการขนส่ง และขนถ่ายไปยังผู้รับกำจัด แต่ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการนำเถ้าลอยถ่านหินกลับไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การนำไปเป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา การนำไปใช้เป็นวัตถุปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นต้น ทำให้เถ้าลอยถ่านหินเป็นที่ต้องการของผู้ประกอบการที่

ต้องการนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้ของเสียถ้อยถ่านหิน โดยเฉพาะถ้อยถ่านหินจากโรงไฟฟ้ากลายเป็น วัตถุประสงค์ที่มีราคา ดังนั้นจากถ้อยถ่านหินที่เกิดขึ้นและต้องเป็นภาระในการเสียค่ากำจัด กลายเป็นของเสียที่เป็นที่ ต้องการและมีราคา การนำถ้อยถ้อยไปรีไซเคิลจึงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการได้มาของถ้อยถ้อยถ่านหินรวมเข้าไป ด้วย จากการศึกษาในด้านเทคโนโลยีการรีไซเคิลถ้อยถ้อยถ่านหิน โดยการนำไปผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคุณสมบัติและการใช้คล้ายกับผลิตภัณฑ์คอนกรีต ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นถือเป็น ผลิตภัณฑ์ทางเลือกในการนำไปทดแทนการใช้งานคอนกรีตในบางผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งจะให้ผลทางด้านภาพลักษณ์ใน ด้านสิ่งแวดล้อม ในการใช้และลดปริมาณของเสียจากสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นประโยชน์

โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำถ้อยถ่านหินไปผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกในการ ทดแทนคอนกรีตสำหรับผู้ประกอบการ ซึ่งในการออกแบบการผลิตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กำหนดให้มี คุณสมบัติเทียบเท่าคอนกรีตมวลเบา และใช้ในงานผลิตผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในงานตกแต่งอาคาร โดยข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นในการนำถ้อยถ้อยถ่านหินไปผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มี รายละเอียดดังนี้

1 ด้านต้นทุน (Cost) ในการลงทุนเทคโนโลยีฯ

ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการลงทุนเทคโนโลยีฯ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1) ต้นทุนคงที่ (Fix cost) เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการลงทุนในปีแรก ได้แก่ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ค่าก่อสร้างและติดตั้งระบบต่างๆ ค่าระบบและอุปกรณ์ป้องกันผลกระทบทาง สิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 6-9

1.1 ค่าปรับพื้นที่ ค่าก่อสร้างอาคารโรงงาน ระบบไฟฟ้า - ประปาภายในโรงงาน โดย กำหนดพื้นที่ภายในโรงงานสำหรับการติดตั้งเครื่องจักรและสถานที่หรือโกดังจัดเก็บวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซึ่งใน พื้นที่เท่ากับ 100 ตารางเมตร คิดเป็นเงินประมาณ 300,000 บาท

1.2 ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ ซึ่งใช้อุปกรณ์แบบเดียวกันกับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น เครื่องผสมซีเมนต์หรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แบบหล่อหรือเป่าสำเร็จรูปทรงต่างๆ เครื่องอบหรือบ่มซีเมนต์ เป็น ต้นเท่ากับ 300,000 บาท

1.3 ค่าชุดอุปกรณ์และการติดตั้งระบบรักษาความปลอดภัยและระบบป้องกันการมลพิษ สำหรับกระบวนการ เท่ากับ 60,000 บาท (คิดที่ร้อยละ 10 ของต้นทุนคงที่) ตารางที่ 6-9 ตารางสรุปต้นทุนคงที่ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด	บาท
1	ค่าปรับพื้นที่	100 ตร.ม ระบบไฟฟ้า-ประปา อาคารเก็บกอง ฯลฯ	300,000.00
2	ค่าเครื่องจักรอุปกรณ์	อุปกรณ์ทั้งหมด	300,000.00
3	ค่าชุดอุปกรณ์และการติดตั้งระบบรักษา ความปลอดภัยและระบบป้องกันมลพิษ	เครื่องดูดควันและอุปกรณ์ป้องกัน ความร้อน	60,000.00

รวม

660,000.00

2 ต้นทุนดำเนินการ (Operation cost) เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดำเนินการตลอดอายุโครงการ ได้แก่ ค่าวัสดุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าอุปกรณ์ ค่าบำรุงรักษาต่างๆ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 6-10

2.1 ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร ใช้ พนักงาน 1 คน ในการดำเนินการงาน (8 ชม. ต่อวัน) อัตราจ้าง 15,000 บาทต่อเดือน

2.2 ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุดิบและสารเคมี ได้แก่

- 1) แก๊สลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า 300 บาทต่อตัน
- 2) โซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{OSi}_2\text{O}$) 8 บาทต่อกิโลกรัม
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 12 บาทต่อกิโลกรัม
- 4) ทราเยมน้ำ 400 บาทต่อตัน

2.3 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน จากการประเมินกำลังไฟฟ้าของเครื่องกวนผสม ประมาณ 300 บาทต่อรอบ และเครื่องบ่มซีเมนต์ ในกรณีที่ใช้ 600 บาทต่อรอบ (คิดค่าไฟฟ้าที่ 3 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า)

2.4 ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ถังโลหะความจุ 200 ลิตร ใส่วัตถุดิบ สารเคมี และใส่ผลิตภัณฑ์ (สามารถใส่ซ้ำได้) ราคาประมาณถังละ 500 บาท

2.6 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน เฉลี่ยปีละ 2 ครั้ง ครั้งละ 5,000 บาท เท่ากับ 10,000 บาทต่อปี

โดยตารางสรุปด้านต้นทุนดำเนินการผลิตซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ตามตารางที่ 6-10 ตารางที่ 6-10 สรุปต้นทุนดำเนินการผลิตซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

ลำดับ	ต้นทุนดำเนินการ	รายละเอียด	ต้นทุน	หน่วย
1	ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร	1 คน (8 ชั่วโมงต่อวัน)	15,000	บาทต่อเดือน
2	ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุดิบ	-แก๊สลอยถ่านหิน	300	บาท/ตัน
		-โซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{OSi}_2\text{O}$)	8	บาท/กก.
		-โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	12	บาท/ กก.
		-ทราเยมน้ำ	400	บาท/ตัน
3	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	เครื่องกวนและเครื่องบ่ม	900	บาทต่อวัน
5	ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ถังโลหะความจุ 200 ลิตร ถังสารเคมี		500	บาทต่อถัง

6	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เครื่องจักรอุปกรณ์ และ อุปกรณ์ป้องกันของ พนักงาน	5,000 บาทต่อรอบ ปีละ 2 ครั้ง	10,000	บาทต่อปี
---	--	---------------------------------	--------	----------

1. ด้านประโยชน์ (Benefit) เป็นผลประโยชน์ที่เกิดจากการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 6-11

ตารางที่ 6-11 สรุปด้านประโยชน์ที่เกิดจากการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับ	ด้านผลประโยชน์	รายละเอียด	ราคา
1	ผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตสำเร็จรูป	แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป ขนาด กว้างยาว 1 ตร.ม. หน้า 5 ซม.	300 บาทต่อแผ่น

หมายเหตุ

- ราคาขายผลิตภัณฑ์แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป 1 ตร.ม หน้า 5 เซนติเมตร เท่ากับ 200 บาทต่อแผ่น
- ราคาขายผลิตภัณฑ์แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปจากจีโอพอลิเมอร์ 1 ตร.ม หน้า 5 เซนติเมตร เท่ากับ 300 บาทต่อแผ่น

สรุปการเปรียบเทียบการต่อทุนต่อหน่วยของการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีต

เนื่องจากการใช้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในการผลิตแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป เครื่องจักรและอุปกรณ์การ
การผสมและหล่อแบบ ใช้แบบเดียวกันกับงานคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นในการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยระหว่าง
การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตจะใช้ต้นทุนที่เกิดจากการดำเนินงานด้านวัตถุดิบและองค์ประกอบใน
การผลิตที่ปริมาตร 1 ลบ. ม โดยการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14
molar ที่สัดส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1:2.5 ที่แรงอัด 14 Mpa โดยมีตารางเปรียบเทียบที่แสดง
ในตารางที่ 6-12 ดังนี้

ตารางที่ 6-12 เปรียบเทียบการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีต (1 ลบ.ม.)				ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (1 ลบ.ม.)			
รายการ	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	รวม (บาท)	รายการ	ปริมาณ	ราคา (บาท/กก.)	รวม
ปูนซีเมนต์	529	2.10	1,110.90	เถ้าลอย	381	0.3	114.3
น้ำ	139	0.03	4.17	NaOH	59	12	708
ทราย	713	0.3	213.90	Na ₂ OSiO ₂	147.5	8	1,180
				ทรายแม่น้ำ	1,613	0.4	645.2

				น้ำยาผสม คอนกรีต	6	15	90
		รวม	1,328.97			รวม	2,737.5

จากตารางข้างต้น พบว่าการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีต้นทุนที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมอยู่มาก โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีต้นทุนสูงกว่าประมาณร้อยละ 50 ของต้นทุนการผลิต โดยมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ประการ ที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตสูง คือ 1) ราคาของสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต และ 2) ความต้องการของเถ้าลอยถ่านหินที่นำไปใช้ทดแทนผสมซีเมนต์ในการผสมคอนกรีต ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ไม่เป็นที่นิยมในการนำไปใช้ก่อสร้างมากนัก แต่ในปัจจุบันคอนกรีตสำเร็จรูปหรือที่ขึ้นรูปไว้แล้วถูกนำมาใช้มากขึ้นในการก่อสร้างเพื่อความรวดเร็วและการคำนึงถึงวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมถูกนำมาเป็นเกณฑ์หรือการโฆษณาในการก่อสร้างมากขึ้น ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีข้อได้เปรียบในการเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยเฉพาะในเรื่องของการนำของเสียเถ้าลอยถ่านหินกลับมาใช้ประโยชน์และการผลิตไม่ต้องใช้พลังงานมากซึ่งเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ หรือที่นิยมเรียกว่าแนวคิด “Green Concept” หรือ “Green Building” ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีราคาที่สูงขึ้นได้

B/C :

IRR :

9. กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง :

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

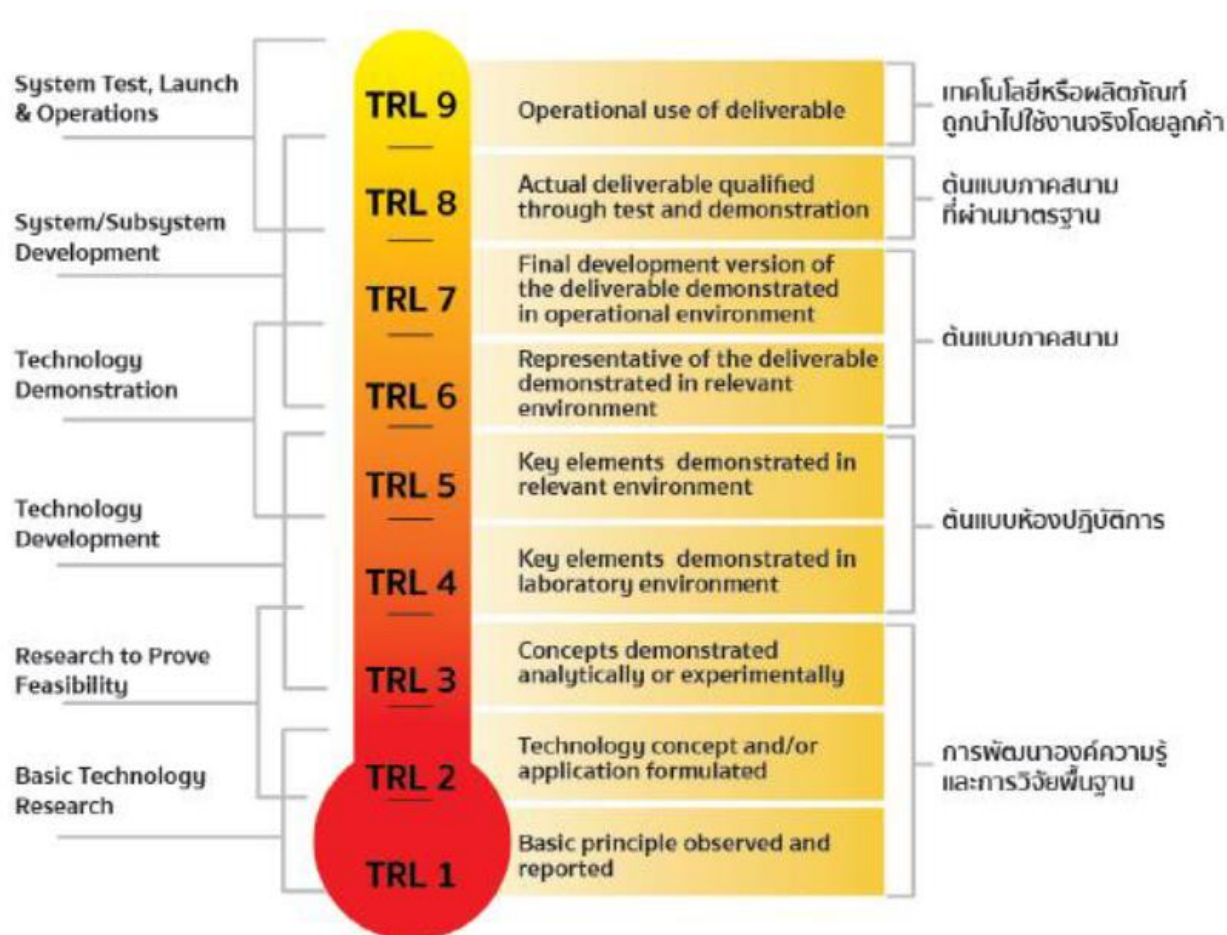
เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า จัดเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 มีรหัสของเสีย คือ 10 01 02 HM เป็นของเสียที่ต้องมีการวิเคราะห์ความเป็นพิษก่อนส่งไปกำจัดหรือจัดการออกนอกโรงงาน เนื่องจากในบางครั้งเถ้าลอยจากถ่านหินที่เกิดขึ้นอาจจะมียังมีองค์ประกอบบางอย่างหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษปะปนอยู่ตามแหล่งที่มา เช่น อาร์ซีนิกหรือสารหนู (As) และ โครเมียม (Cr) เป็นต้น ตามแสดงตารางที่ 6-3 ข้างต้นที่แสดงปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยถ่านหิน นอกจากนี้ตัวเถ้าลอยถ่านหินยังเป็นฝุ่นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถฟุ้งกระจายได้ อาจจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ถ้าทิ้งหรือฝังดินก็จะก่อให้เกิดปัญหาแก่ดินและแหล่งน้ำใต้ดิน

10. เอกสารอ้างอิง (References) :

หมายเหตุ

1. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี

Technology Readiness Level (TRL: 1 - 9) TRL เป็นเครื่องมือบริหารจัดการโครงการหรือโปรแกรมที่นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างความเข้าใจร่วมกันระหว่างนักพัฒนาเทคโนโลยีกับผู้ที่จะนำเทคโนโลยีไปถ่ายทอดสู่ลูกค้า และสามารถเปรียบเทียบความพร้อมและเสถียรภาพของเทคโนโลยีระหว่างเทคโนโลยีที่แตกต่างกันได้



2. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ตารางแสดงหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความเป็นไปได้ของโครงการโดยการปรับค่าของเงินตามเวลา

NPV	B/C	IRR	ความเป็นไปได้ของการลงทุน
เป็นบวก (NPV > ๐)	มากกว่า ๑	มากกว่าค่าเสียโอกาส (i)	เป็นไปได้
เป็นศูนย์ (NPV = ๐)	เท่ากับ ๑	เท่ากับค่าเสียโอกาส (i)	ยังพอไปได้
เป็นลบ (NPV < ๐)	น้อยกว่า ๑	น้อยกว่าค่าเสียโอกาส (i)	ไม่ควรลงทุน