

**1. ชื่อเทคโนโลยี (Technology Title) :**

เทคโนโลยีรีไซเคิลเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (Fly Ash) ด้วยการผลิตเป็นโลหะโฟม (Metal Foam)

**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 onstrated 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 :**

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

จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม (แบบ สก. 2) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เถ้าลอยถ่านหินจัดอยู่ในกลุ่มตามรหัสของเสียและชื่อวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ปี พ.ศ. 2556 ดังตารางที่ 6-4 โดยการจำแนกตามประเภทของเถ้าลอยถ่านหิน ตามที่มีการรายงานต่อกรม

โรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีปริมาณเถ้าลอยถ่านหินประมาณ 1,045,976.00 ตัน ทั้งนี้ปริมาณที่เกิดขึ้นยังไม่รวม น้ำมันที่ไม่สามารถจำแนกประเภทได้ และจากการสอบถามผู้ประกอบการ บจก. บีแอลซีพี เพาเวอร์ ซึ่งเป็น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า (IPP) ที่ใช้ถ่านหินชนิดบิทูมินัสในการผลิตไฟฟ้า ที่ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบว่าทาง 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 กากซีเถ้าจาก 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 รวมถึงการเผาไหม้ที่ใช้ถ่านหินในกระบวนการผลิต กระแสไฟฟ้า ทำให้มีเถ้า และเถ้าที่เหลือมีสภาพเป็นเถ้าลอย (Fly ash) ปะปนไปพร้อมกับก๊าซเสียในรูปของเขม่า และควัน และเถ้าบางส่วนจะตกลงสู่ก้นเตาเผากลายเป็นเถ้าหนัก (Bottom ash) การแยกเถ้าลอยออกจากก๊าซ เสียส่วนใหญ่โรงไฟฟ้าจะใช้เครื่องกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น ด้วยเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator : ESP) เครื่องดักฝุ่นแบบถักกรอง (Fabric filter) และเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน (Cyclone separator) เป็นต้น เพื่อดักจับฝุ่น และเถ้าลอย หลังจากนั้นจะทำการนำเถ้าลอยที่ได้ไปเก็บรวบรวมและ ดำเนินการจัดการต่อไป ซึ่งเถ้าลอยถ่านหินจัดว่าเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีความอันตราย ตามรหัส 10 01 02 HM ที่ต้องมีวิธีการเก็บรวบรวม และกำจัดโดยเฉพาะ โดยไม่สามารถนำไปเก็บรวบรวม และกำจัดร่วมกับของเสีย ทั่วไปได้ ทั้งนี้แหล่งกำเนิดหลักของเถ้าลอยถ่านหิน จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงาน อุตสาหกรรม (แบบ สก. 2) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า (โรงงานประเภท 88)

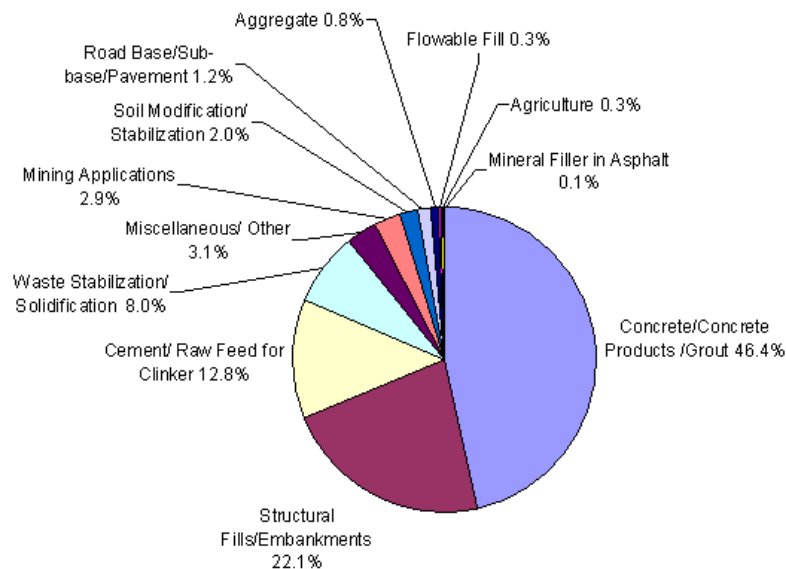
โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัด โดยถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (รหัสวิธีกำจัด 44) และนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกด้วยวิธีอื่นๆ (รหัสวิธีกำจัด 49) แต่ก็มีบางส่วนถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล (รหัสวิธีกำจัด 71) จากการศึกษาพบการจัดการเถ้าลอยถ่านหินของโรงไฟฟ้าในปัจจุบัน พบว่า โรงงานไฟฟ้าจะทำการรวบรวมเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการผลิตไ้ที่โรงงาน และทำการแจ้งปริมาณของเถ้าลอยที่ได้เพื่อขออนุญาตนำของเสียออกนอกโรงงานเพื่อกำจัด พร้อมส่งตัวอย่างทำการตรวจวิเคราะห์ความเป็นพิษ หลังจากนั้นจะมีผู้รับซื้อหรือรับจัดการเถ้าลอยนำรถขนส่งเฉพาะมาที่โรงงาน

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

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

ทั้ง 4 บริษัทข้างต้นนั้นนำเถ้าลอยไปผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตและปรับปรุงคอนกรีตให้ดีขึ้น

ยิ่งขึ้น



รูปที่ 6-6 แสดงการรีไซเคิลถ่านหินในในงานคอนกรีต

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

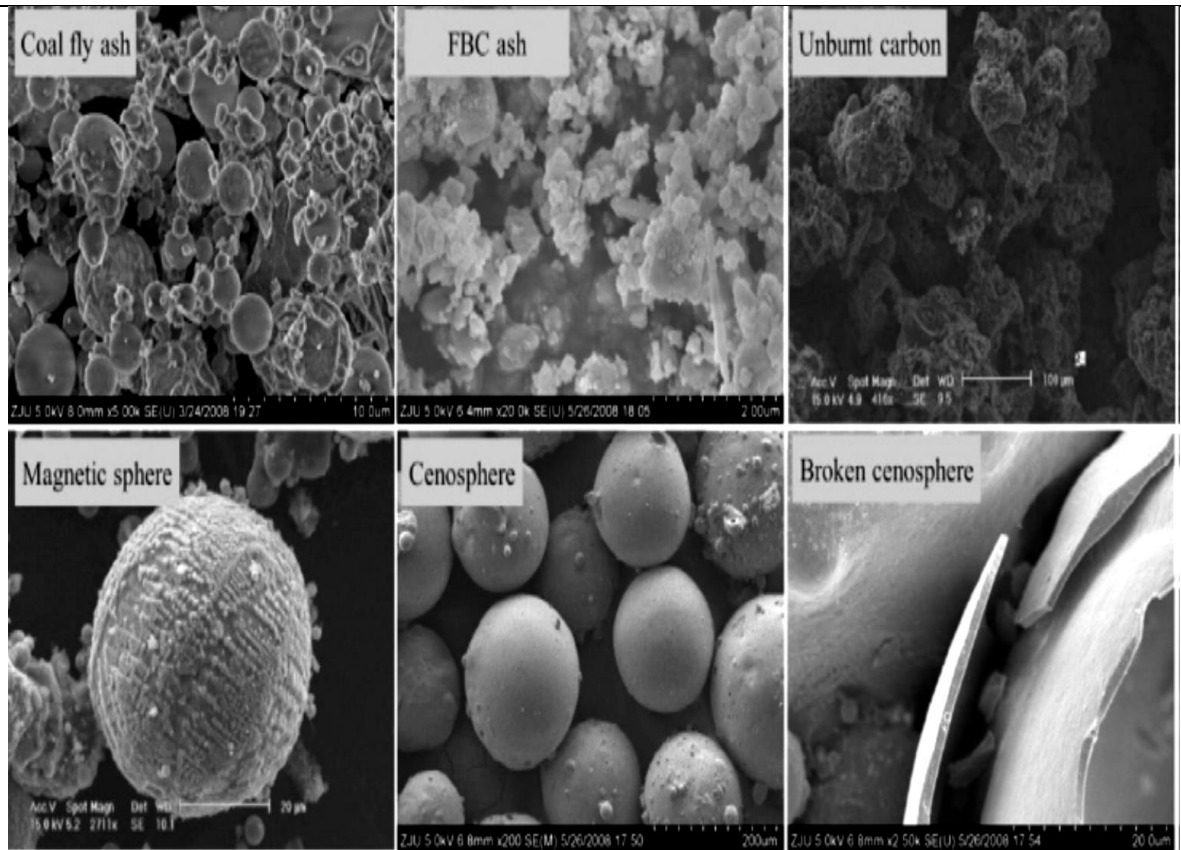
ปัจจุบันในประเทศไทย เถ้าลอยถ่านหินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่สามารถขายได้เกือบทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งไปที่โรงงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินนั้นสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนตามสัดส่วนที่กำหนดในการผลิตคอนกรีตได้ โดยราคาในการซื้อขายนั้นจะอยู่ที่ทางโรงไฟฟ้าและผู้ประกอบการเป็นผู้ตกลงซื้อขายเถ้าลอยเอง เนื่องจากทางโรงไฟฟ้าเป็นผู้ก่อการเกิดของเสียและมีต้นทุนในการส่งไปกำจัด ส่วนทางผู้รับซื้อเถ้าลอยมีความต้องการได้เถ้าลอยไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตจากการสอบถามผู้รับซื้อรายย่อย พบว่าราคาซื้อขายเถ้าลอยถ่านหินอยู่ที่ประมาณ 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 คือมีโครงสร้างที่ไม่ใช่แมกนีไทต์ที่เป็นโครงสร้างออกตะฮีตรอน (Magnetite crystal) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีสมบัติทางแม่เหล็กที่น้อยกว่าหากเทียบกับอนุภาคแมกนีไทต์ทั่วไป (Regular magnetite) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีความเปราะ แตกหักได้ง่าย จึงจะสามารถนำไปบดแล้วนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ ซึ่งอนุภาคนี้จะมาสามารถนำไปใช้ในการทำความสะอาดถ่านหิน (Coal cleaning) [3, 4]

2) คาร์บอน (Carbon) คาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) ในเถ้าลอยถ่านหินนั้นจะมีปริมาณร้อยละ 3 - 70 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับการเผาไหม้ถ่านหินในแต่ละแหล่ง พื้นที่ผิวของความสัมพันธ์คาร์บอนมีค่าประมาณ 11 ตารางเมตรต่อกรัม ในระหว่างการแยกนั้นจะทำให้เกิดการหายไปของน้ำหนักร้อยละ 18 และทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 160 ตารางเมตรต่อกรัม คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย (Low-surface-area

carbon) จะสามารถนำไปใช้งานต่อได้ ที่นิยมนำไปใช้คือ การนำไปใช้ในกระบวนการดักกลืนสารพิษจากเตาเผาขยะ (Waste incinerator) และปล่องควัน [5, 6] โดยบริษัท STEAG ที่เป็นบริษัทของประเทศเยอรมันได้จดสิทธิบัตรนี้ไว้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีไว้สำหรับ ใช้ในการดักกลืนสารพิษในกระบวนการต่างๆ ที่ใช้คาร์บอนในอุตสาหกรรมนั้น [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 อาจจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจได้ 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 เป็นเถ้าที่ไม่ได้ลอยไปกับควันเขม่าและตกลงสู่ก้นเตาเผา เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 10 - 20 ของน้ำหนักเถ้าทั้งหมด

ตารางที่ 6-1 แสดงส่วนผสมของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน [1]

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

\* LOI = Loss of ignition

ในการศึกษาครั้งนี้ทางที่ปรึกษาฯ ได้รับความอนุเคราะห์แฉ่ำล่อยถ่านหินจากโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้าแห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมมาตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งตัวอย่างแฉ่ำล่อยถ่านหินทั้งหมดเป็นแฉ่ำล่อยถ่านหินที่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยเป็นถ่านหินประเภทบิทูมินัส โดยทางโรงงานมีแฉ่ำล่อยถ่านหินที่เกิดจากกระบวนการผลิต 2 ประเภท คือ

- 1) เตาเผาที่ใช้ปูนขาวในกระบวนการดักจับมลพิษทางอากาศ (เป็นเทคโนโลยีดักจับมลพิษทางอากาศที่โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้อยู่) แฉ่ำที่ได้จะมีปูนขาวผสมอยู่
- 2) เตาเผาที่ไม่ต้องใช้ปูนขาวในกระบวนการดักจับมลพิษทางอากาศ แฉ่ำที่ได้จะไม่มีปูนขาว



รูปที่ 6-3 ตัวอย่างแฉ่ำล่อย ทั้ง 2 แบบ

ทางที่ปรึกษาฯ ได้นำตัวอย่างแฉ่ำล่อยทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence) เพื่อหาสัดส่วนองค์ประกอบของแฉ่ำล่อย และทำการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากแฉ่ำล่อยด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และภาพถ่าย SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 6-2 -6-3 และรูปที่ 6-4 -6-5

ตารางที่ 6-2 สัดส่วนองค์ประกอบของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์ด้วย XRF

Formula	Concentration(%wt)	
	ไม่ผสมปูนขาว	ผสมปูนขาว
SiO <sub>2</sub>	48.50%	24.20%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.00%	12.50%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.40%	8.55%
CaO	8.47%	37.60%
MgO	3.41%	3.27%
K <sub>2</sub> O	2.18%	0.93%
Na <sub>2</sub> O	1.37%	3.58%
TiO <sub>2</sub>	1.02%	0.73%
SO <sub>3</sub>	0.98%	7.86%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20%	0.11%
BaO	0.14%	0.20%
MnO	0.11%	0.05%
SrO	0.00%	0.27%
Sum	99.78%	99.84%

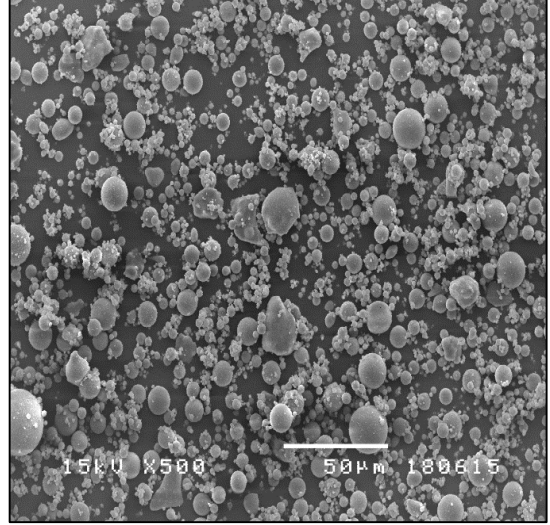
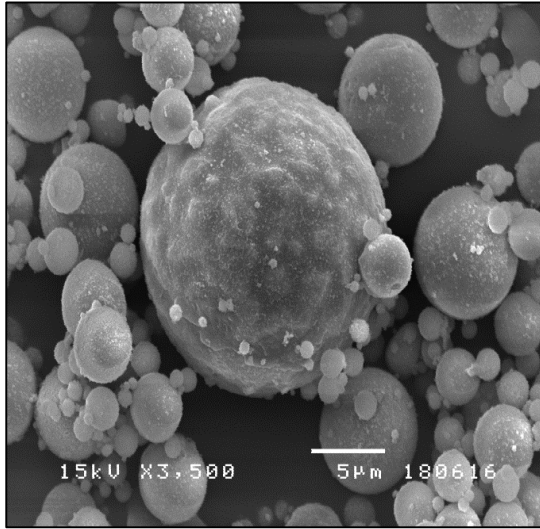
ตารางที่ 6-3 ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยด้วยวิธี TCLP

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)
ผสมปูนขาว	0.0±0.0 (v)	0.15±0.254 (v)	0.101±0.004 (v)	0±0 (v)	0±0 (v)	0.537±0.348 (v)
ไม่ผสมปูนขาว	1.90±0.127 (x)	1.38±0.373 (v)	0.19±0.012 (v)	0±0 (v)	0.33±0.026 (x)	0.15±0.016 (v)

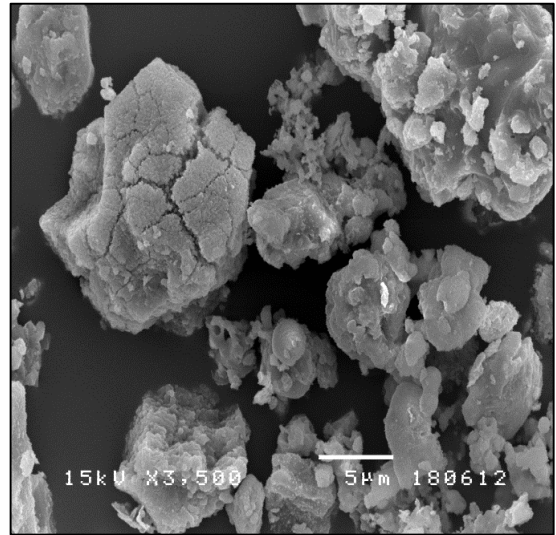
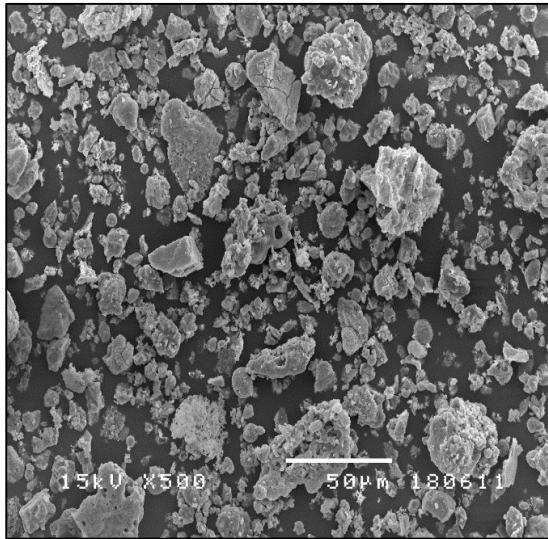
หมายเหตุ 1) TCLP คือ การชะละลายโลหะหนักด้วยกรดอะซิติก ที่ pH 2.88 เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และการวิเคราะห์โลหะหนักทำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

2) ค่าโลหะหนักอ้างอิงจาก มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม





รูปที่ 6-4 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ไม่ผสมปูนขาว



รูปที่ 6-5 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ผสมปูนขาว (ต่อ)

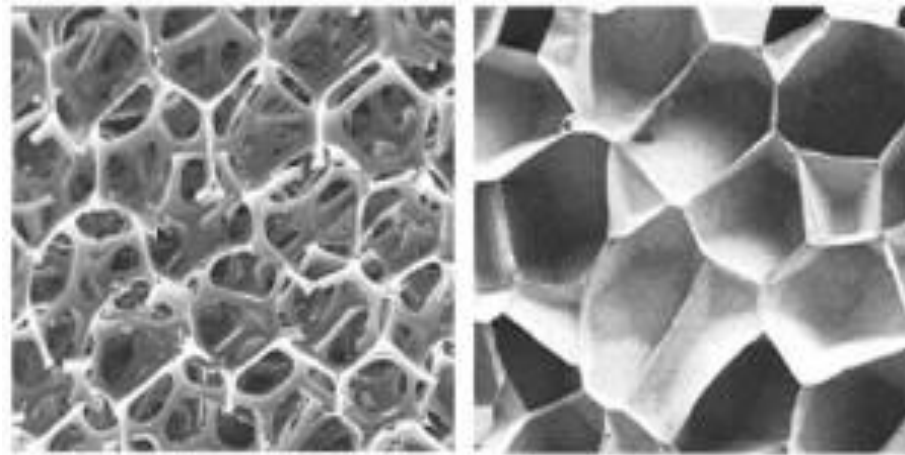
จากผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP พบว่า เถ้าลอยที่ผสมปูนขาวผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว และเถ้าลอยที่ไม่ผสมปูนขาว มีปริมาณสารหนู ( $1.90 \pm 0.127$  mg/L) และโครเมียม ( $0.33 \pm 0.026$  mg/L) ที่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

**ลักษณะและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ :**

โลหะโฟม (Metallic or metal foams) คือ วัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นต่ำมีปริมาณรูพรุนหรือจำนวนโพรงอากาศสูง จึงทำให้มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรที่เท่ากัน นอกจากนี้โลหะโฟมยังมีสมบัติเด่นอีกหลายอย่าง เช่น มีความแข็งดิ่งที่สูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (High stiffness to weight ratio) มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี สมบัติทางกลของโลหะโฟมจะมีค่าน้อยกว่าหากเทียบกับโลหะเดิม แต่มีสมบัติเฉพาะในการใช้งานยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ทำจากโลหะอะลูมิเนียมโฟมจะมีน้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเทียบกับโลหะอะลูมิเนียมเดิม ส่งผลทำให้ประหยัดน้ำมันมากขึ้น

**ประเภทของโลหะโฟม**

ในการพิจารณาแยกประเภทของโลหะโฟม สามารถทำได้โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของโพรงอากาศภายในโฟม ดังนั้นจึงสามารถแบ่งโฟมโลหะออกได้เป็น โฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด (Close-cell foams) และโฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด (Opened-cell foams) ในกรณีของโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดนั้น จะมีลักษณะคล้ายกับมีชั้นเยื่อหุ้มปิดล้อมรอบโพรงอากาศทั้งหมด ทำให้ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ สำหรับโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับร่างแหต่อกันระหว่างโพรงอากาศและจะไม่มีชั้นเยื่อหุ้ม จึงทำให้ของเหลวสามารถไหลผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 6-23

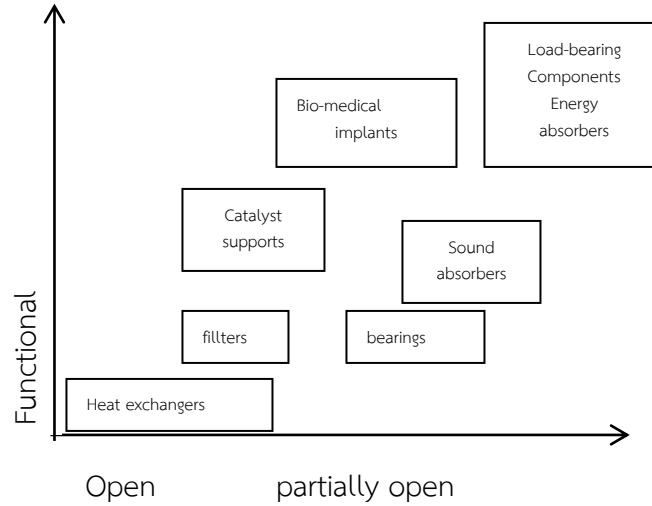


รูปที่ 6-23 แสดงชนิดของโลหะโฟมแบบเปิด (ซ้าย) และ โลหะโฟมแบบปิด (ขวา)

**การใช้งาน**

การนำโลหะโฟมไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างแต่ที่สำคัญได้แก่ ประเภทของโครงสร้างโพรงอากาศของโฟมและประเภทของงานที่จะนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 6-24 โดยส่วนใหญ่โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดจะถูกนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมที่ต้องรับแรงกระทำเนื่องจากโลหะโฟมมีความหนาแน่นต่ำและมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงถูกนำไปใช้งานทางด้านโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบาและต้องการความแข็งแรงพอสมควร ส่วนโลหะโฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โดยทั่วไปจะมีสมบัติทางกลที่ดีน้อยกว่า

โลหะโพลีมีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด แต่ประโยชน์ที่ได้จากโครงสร้างแบบเปิดก็คือการที่ของไหลสามารถไหลผ่านได้รวมทั้งการที่มีพื้นที่ผิวในปริมาณมาก ทำให้มีความเหมาะสมแก่งานเฉพาะด้านเช่น ใช้เป็นตัวคัดกรองอนุภาค หรือใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 6-24 แสดงการใช้งานของโลหะโพลีประเภทต่างๆ

ตารางที่ 6-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการนำไปใช้งานและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้สำหรับโลหะโพลี

คุณสมบัติ	การนำไปใช้งาน	รูปแบบของผลิตภัณฑ์
High specific bending stiffness and strength	-แผ่นวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงที่น้ำหนักเบาในการขนส่งหรือทางสถาปัตยกรรม	-shaped parts -sandwich panels -3d-shaped (sandwich) panels
Isotropic absorption of impact energy at a nearly constant low stress level	-ชิ้นส่วนรองรับแรงในชิ้นส่วนรถยนต์ -วัสดุห่อหุ้ม -วัสดุป้องกันความเสียหายจากการกระแทก	-shaped parts -large panels
Good sound absorption, electromagnetic shielding, and vibration damping	-ติดตั้งป้องกันเสียง -กล่องบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ -วัสดุป้องกันเสียงจากเครื่องยนต์ -วัสดุดูดซับเสียงบริเวณถนนหรือทางรถไฟ	-large panels -Sandwich panels

ตารางที่ 6-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการนำไปใช้งานและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้สำหรับโลหะโฟม (ต่อ)

คุณสมบัติ	การนำไปใช้งาน	รูปแบบของผลิตภัณฑ์
High thermal stability and low thermal conductivity	-ฉนวนป้องกันความร้อน	-large panels
Decorative, non-combustible, weather resistant	-เฟอร์นิเจอร์ -ติดผนัง	-large panels -shaped parts
Low-weight	-ใส่แบบหล่อทราย -วัสดุลอยน้ำ	-complex shaped parts with a dense surface skin
High inner surface	-อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน -ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา -ใช้ในงานด้าน Cryogenic	-complex open-cell parts

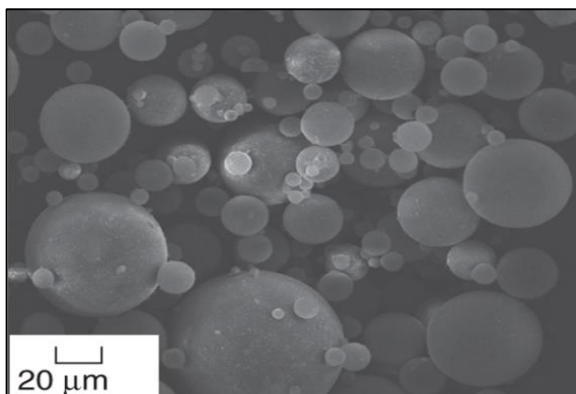
ชนิดของเทคโนโลยี :

เทคโนโลยีรีไซเคิลด้วยการผลิตเป็นโลหะโฟม (Metal Foam)

### 5. การรวบรวมองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน (Literature Review)

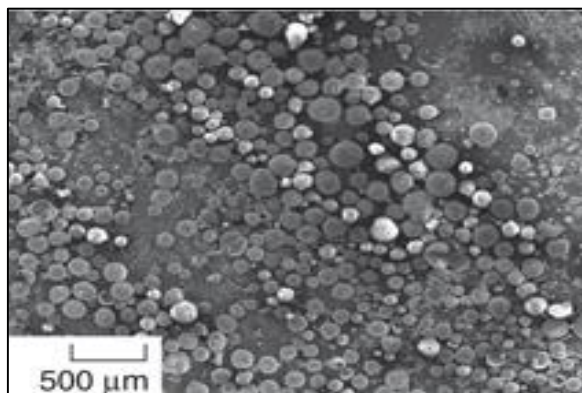
การผลิตโลหะโฟมทำได้โดยการผสมอนุภาคที่มีลักษณะกลวง (Hollow particles) ลงไปในเนื้อโลหะเดิม ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคกลวงที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

1) Microballoons : คืออนุภาคของเซรามิกขนาดไมครอนที่มีรูปร่างทรงกลม ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้ จึงสามารถทำการควบคุมขนาด การกระจายขนาด ความหนาของ shell ได้ จากรูปที่ 6-25 แสดงตัวอย่างของอนุภาค Microballoons ที่มีลักษณะทรงกลม ขนาดต่างๆ โดยทั่วไปจะทำจากเซรามิก เช่น อะลูมินา ซิลิกา เซอร์โคเนีย และคาร์บอน



รูปที่ 6-25 แสดงตัวอย่างอนุภาค Microballoons

2) ซีโนสเฟียร์ (Fly ash cenosphere) การเผาไหม้ถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งในเถ้าลอยนั้นในบางส่วนจะเป็น Cenosphere หนึ่งในความท้าทายในการนำเถ้าลอยมาใช้งานคือ การแยกอนุภาคกลางที่มีประโยชน์ที่เรียกว่า Cenospheres จากการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ หากเปรียบเทียบราคาแล้วค่าใช้จ่ายในการแยก Cenospheres ยังคงต่ำกว่าทำสังเคราะห์ Microballoons ส่วนประกอบของ Cenospheres โดยหลักจะเป็นซิลิกา (Silica) เหล็กและอะลูมินา มีขนาดอยู่ในช่วง 1-500 ไมโครเมตร โดยมีค่าแข็งแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 3000 psi จากรูปที่ 6.26 แสดงตัวอย่าง Cenospheres ที่ผ่านการแยกออกจากเถ้าลอย



รูปที่ 6-26 แสดงเถ้าลอยแบบ Cenospheres

### การแยกอนุภาค Cenospheres จากเถ้าลอยถ่านหิน

เถ้าลอยถ่านหินจะมีอนุภาคของ Cenospheres อยู่ไม่มากจากการศึกษาของมนัสวี เชื้ออรัน ในปี ค.ศ. 2011 พบว่าจากการทดลอง พบว่าปริมาณซีโนสเฟียร์ที่เก็บได้จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีปริมาณร้อยละ 1.07 โดยน้ำหนัก และปริมาณซีโนสเฟียร์ที่เก็บได้จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี มีปริมาณ 0.33 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นของอนุภาคซีโนสเฟียร์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและบีแอลซีพีเท่ากับ 0.7521 และ 0.8881 กรัมต่อลบ.ซม. วิธีในการแยก Cenospheres มีหลายวิธีดังนี้

1) การแยกออกโดยการลอยน้ำ ทำโดยการนำเถ้าลอยถ่านหินไปลอยน้ำ อนุภาคของ Cenospheres ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำก็จะลอยขึ้นมาจากนั้น ก็ทำการตักแยก นำไปทำให้แห้งและ ร่อนแยกขนาดของอนุภาค

2) U.S. Pat. No. 4,652,433 โดยการแยกเถ้าลอยถ่านหินออกมาแบบหยาบและแบบละเอียดในขั้นแรก Cenospheres จะถูกนำออกมาจากอนุภาคหยาบโดยการนำไปผสมกับน้ำ ทำให้อนุภาค Cenospheres จะลอยแยกออกมาและทำการตักแยกออกมา

3) U.S. Pat. No. 8,074,804 B2 เป็นกรรมวิธีการแยกโดยอาศัยการใช้ลมเป่าแยกหลายๆครั้ง อนุภาคของ Cenospheres ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าก็จะมีระยะตกที่แตกต่างจากอนุภาคอื่นๆ ก็จะสามารถแยกอนุภาคที่แตกต่างกันออกมาได้ ข้อดีของกระบวนการนี้คือ เป็นกระบวนการที่ปราศจากน้ำทำให้ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค

6. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ / สารเคมี :

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

- 1) แก้วลอยถ่านหิน ใช้สำหรับเป็นตัวอย่างทดสอบ
- 2) อนุภาคกลวง ใช้ผสมกับโลหะที่หลอมเหลว
- 3) Thermocouple

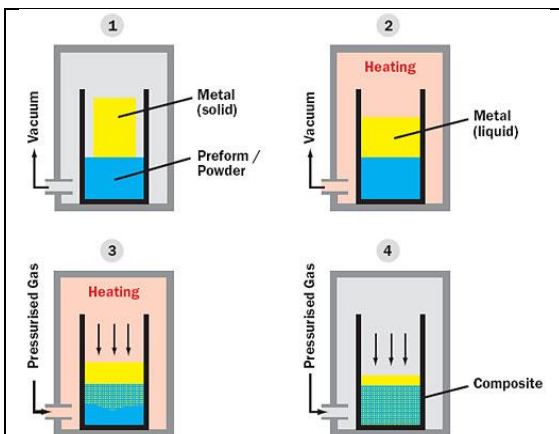
เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่สำคัญ

- 1) ทรายซั้ง ใช้สำหรับช่างวัตถุดิบ และสารเคมี
- 2) หอให้ความร้อน สำหรับหลอมโลหะ
- 3) หอพรม ใช้ใบพัดผสมโลหะที่หลอมเหลวกับอนุภาคกลวงให้เข้ากัน
- 4) Mold
- 5) Argon gas

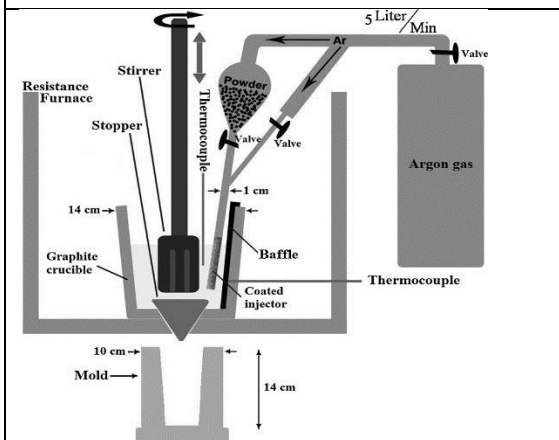
ขั้นตอนการทดลอง :

ขั้นตอนการผลิตโลหะโฟม (SYNTHESIS METHODS FOR SYNTACTIC FOAMS)

ในการผลิตโลหะ syntactic foam นั้นแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังรูปที่ 6-27 ต่อไปนี้



1. Pressure Infiltration: ทำโดยการเตรียม preform เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ จากนั้นให้ความร้อนแก่โลหะจนหลอมเหลว จากนั้นให้ความดันในระบบ ก็จะทำให้โลหะหลอมเหลวไหลแทรกไปยังช่องว่างของ preform เกิดเป็นโลหะผสม



2. Stir Casting: การผลิตด้วยกระบวนการนี้เริ่มต้นจากหลอมโลหะให้เป็นโลหะหลอมเหลว จากนั้นก็จะเติมอนุภาคกลวงลงไปยังน้ำโลหะหลอมเหลว ตัวใบพัดจะทำหน้าที่กวนให้อนุภาคกลวงนั้นกระจายไปได้ทั่วน้ำโลหะหลอมเหลว จากนั้นก็จะเทเข้าสู่แบบตามที่ต้องการ และรอให้น้ำโลหะหลอมเหลวแข็งตัว



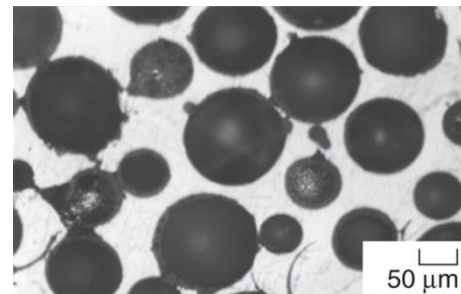
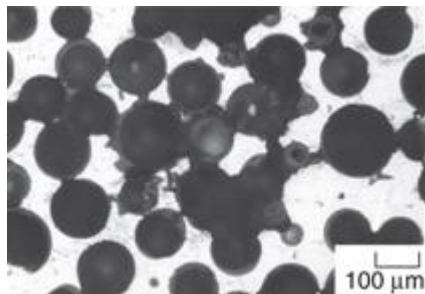
3. Powder metallurgy: การขึ้นรูปโลหะแบบผงทำโดยการนำโลหะผงและอนุภาคกลวงมาผสมให้เข้ากัน จากนั้นก็นำของผสมที่ได้ไปให้ความดันและความร้อน ตัวผงโลหะก็จะเกิดการประสานกัน (Sintering) เกิดเป็น syntactic foams

รูปที่ 6-27 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะโฟม

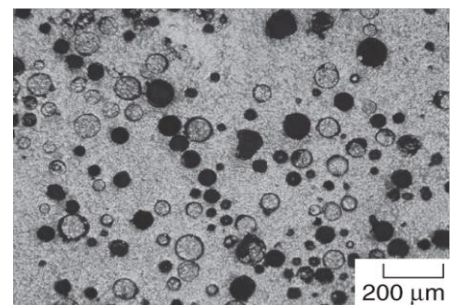
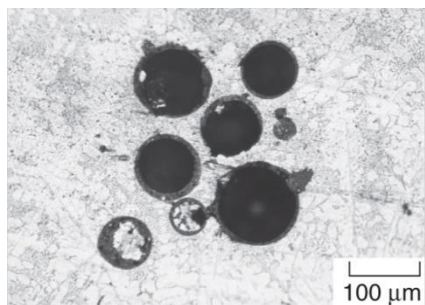
ผลการทดลอง :

**โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)**

โลหะโฟมจะมีส่วนประกอบด้วยกัน 2 อย่าง คือ โลหะเนื้อพื้น (Matrix material) และ อนุภาคกลวง (Hollow particles) โดยที่โครงสร้างที่แตกต่างกันนั้นจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน จากรูปที่ 6-28 (ซ้าย) และรูปที่ 6-28 (ขวา) แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะโฟมอะลูมิเนียม โดยที่มีรูพรุนเกิดขึ้นภายใน



รูปที่ 6-28 แสดงชิ้นงานโลหะโฟมอะลูมิเนียมที่มีขนาดของรูพรุนต่างกัน



รูปที่ 6-29 แสดงชิ้นงานโลหะโฟมบริเวณที่เกิดการแตกของ Cenospheres

จากรูปที่ 6-29 (ซ้าย) แสดงขนาดของเกรนของโลหะเนื้อพื้นที่มีการเติม Cenospheres ลงไปซึ่งส่งผลให้ขนาดของเกรนเล็กลง เช่นเดียวกันกับการทดลองในโลหะแมกนีเซียม ในโลหะเกรด AZ91 เกิดโครงสร้าง

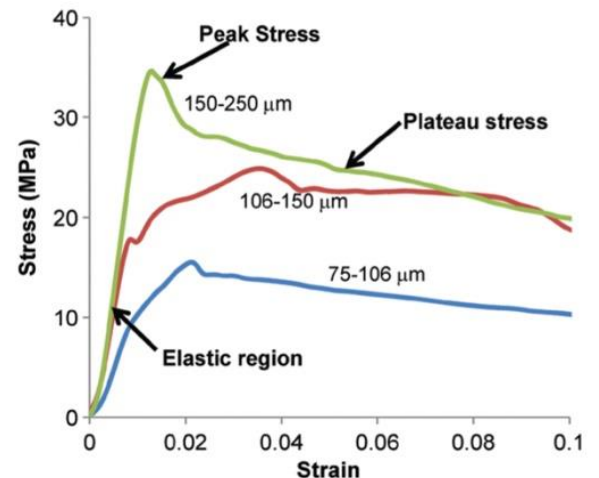
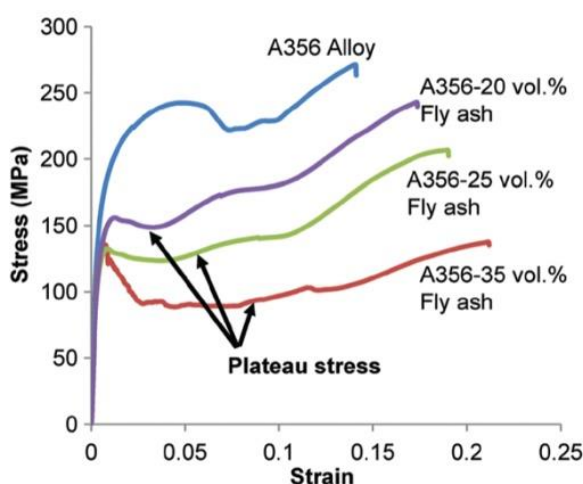
ตะกอนของแข็ง (Intermetallic precipitates) บริเวณของขอบเกรน โดยที่ขนาดของตะกอนของแข็งนั้นสามารถลดขนาดลงได้ในสัดส่วนระหว่าง AZ91/เถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 6-29 ธาตุจำนวนมากที่แสดงในโลหะโม่ที่ใช้ Cenosphere เป็นส่วนผสมจะสามารถแพร่ออกมายังโลหะเนื้อพื้นได้มากกว่าและเป็นการลดขนาดของเกรน การแพร่ของธาตุต่างๆ จากอนุภาคของโลหะเนื้อพื้นบริเวณระหว่างพื้นผิวไปยังบริเวณอนุภาคภายใน (Interparticle) ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสม ความเข้มข้น อุณหภูมิหลอมเหลว และกระบวนการผลิต

จากผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน ปฏิกริยาระหว่าง Particle-matrix interface ซึ่งบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะโม่ที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมจะเป็นบริเวณที่มีความเปราะ ซึ่งทำให้เกิดสมบัติทางกลที่ไม่ดีแก่โลหะโม่ ในโลหะโม่ผสมระหว่างอะลูมิเนียมและเถ้าลอยถ่านหิน (Aluminum / Fly ash) จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopic) แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกที่มีการเชื่อมต่อกันเนื่องจากการซึมเข้าไปในโลหะเนื้อพื้นที่ประกอบด้วยของอนุภาค  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ล้อมรอบด้วยโครงสร้างแบบต่อเนื่องของโลหะ ปริมาณของธาตุซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสมเนื้อพื้นระหว่าง A356/ Fly ash จากผลการศึกษาปฏิกริยาระหว่างธาตุซิลิกาในเถ้าลอยกับเนื้อพื้นของโลหะผสม ส่วนในโลหะผสมแมกนีเซียม ZC63 / Fly ash ปฏิกริยาหลักที่ระหว่างผิวสัมผัส ตรวจสอบได้ว่า MgO ปฏิกริยาเหล่านี้สามารถควบคุมได้โดยการเคลือบผิวอนุภาคก่อนที่จะทำการผสม

### สมบัติการรับแรงอัด (Compressive properties)

การทดสอบแรงอัดของโลหะโม่เป็นการศึกษาสมบัติทางกลที่สำคัญอย่างมาก การทดสอบแรงอัดสามารถแสดงออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น (Stress-strain curves) สำหรับโลหะอะลูมิเนียมเกรด A356 ค่าการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 6-30

จากรูปที่ 6-30 (ซ้าย) สมบัติการรับแรงอัดของโลหะอะลูมิเนียมผสมเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอะลูมิเนียมโม่ที่มีสัดส่วนของอนุภาค Cenospheres ผสมที่แตกต่างกัน และรูปที่ 6-30 (ขวา) แสดงผลของอนุภาค Cenospheres ที่มีขนาดที่แตกต่างกันต่อสมบัติการรับแรงอัด





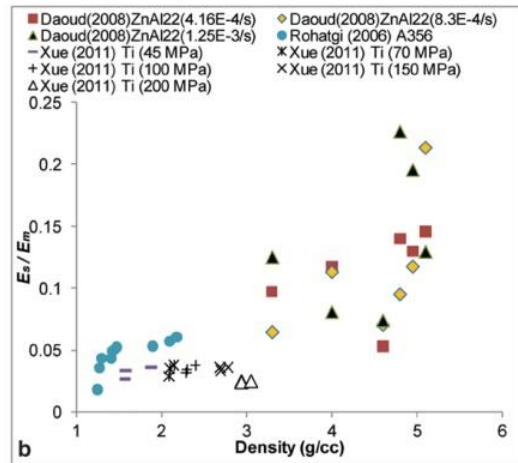
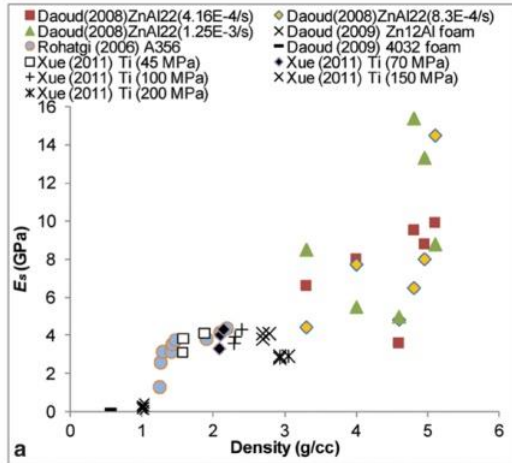
รูปที่ 6-30 แสดงค่า Compressive stress-strain ของ A365 / Fly ที่สัดส่วนต่างๆ (ซ้าย) และ (ขวา) ขนาดของเถ้าลอยที่ต่างกันที่สัดส่วน 65 vol.%.

ค่า Compressive stress-strain curves สามารถแยกได้จากบริเวณที่เป็นเส้นตรง (Linear region) จากบริเวณ (Stress plateau) บริเวณที่เป็นจุดสิ้นสุดของบริเวณที่กราฟจะเพิ่มขึ้นอีก ในช่วงแรกของกราฟจะเป็นช่วงที่ขึ้นงานประพหุสมบัติ Elastic ซึ่งสามารถคำนวณค่า Modulus ได้ แต่ในโลหะโพลีสังเคราะห์ที่ซึ่งมีขนาดของอนุภาค ขนาดของความหนาของผิวอนุภาคที่แตกต่าง ค่า Elastic ที่แสดงออกมาจากการทดลองนั้นอาจจะไม่ใช่บริเวณที่เป็น Elastic ที่แท้จริง อนุภาคจำนวนหนึ่งสามารถที่จะสลายได้ในบริเวณที่มีความเค้นต่ำ (Low stress level) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ โดยทั่วไปค่าความเค้นจะตกลงเล็กน้อยในบริเวณจุดสุดท้ายของเส้นตรงก่อนที่จะเกิด Plateau stress จุดเริ่มต้นรอยแตกในชิ้นงานมักจะเกิดขึ้นในจุดนี้

ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโลหะโพลีจะขึ้นอยู่กับความสูงและความยาวของบริเวณ Plateau stress จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้อนุภาคที่มีความหนาของผนังจะสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและค่า Modulus ของโลหะโพลีผสมได้ บริเวณ Plateau stress ที่เกิดการบดของ Microballoon เป็นจุดที่เกิดการดูดซับพลังงานของวัสดุโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงในวัสดุ การถูกอัดของอนุภาคภายในเป็นผลทำให้เกิดความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของโลหะโพลี เมื่อความหนาแน่นเพิ่มไปยังจุดๆ หนึ่ง ค่าความแข็งแรง (Stress) ก็จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6-30 (ซ้าย)

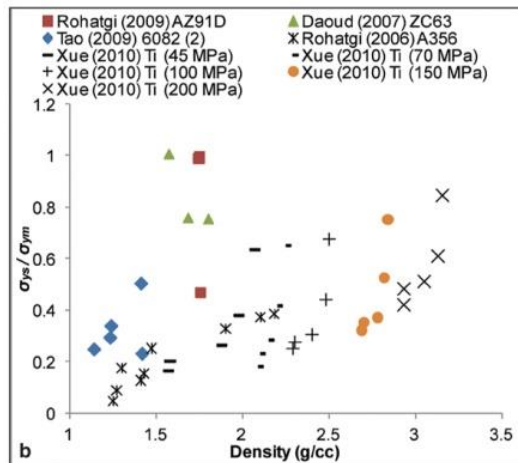
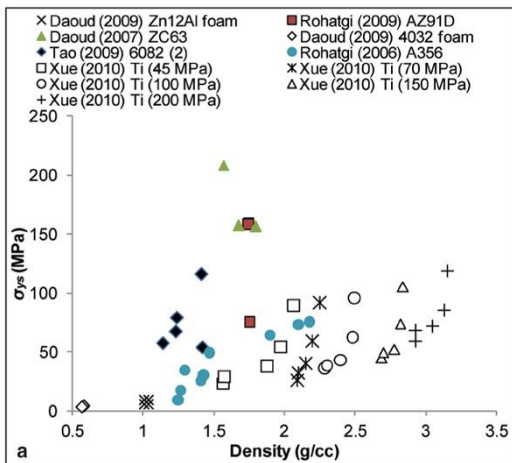
#### สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

จากการสืบค้นข้อมูลของสมบัติความแข็งแรงอัดของชิ้นงานโลหะโพลีสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 6-31 -6-33 ข้อมูลที่แสดงนั้นเป็นโลหะโพลีที่มีเนื้อพื้นเป็นโลหะอะลูมิเนียม โลหะแมกนีเซียม โลหะไทเทเนียม และโลหะสังกะสี โดยแต่ละการทดลองนั้นจะมีการผลิตหรือกรรมวิธีที่แตกต่างกัน รวมทั้งตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการทดลองที่แตกต่าง ได้แก่ โลหะเนื้อพื้น (Matrix) ชนิดของอนุภาค (Particle material) ความหนาผนังของอนุภาค (Particle wall thickness) ขนาดสัดส่วนของอนุภาค และกระบวนการอบ (Heat treatment) ซึ่งตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อขนาดของโพรงอากาศภายในชิ้นงานและจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน รวมถึงความหนาแน่นของชิ้นงาน



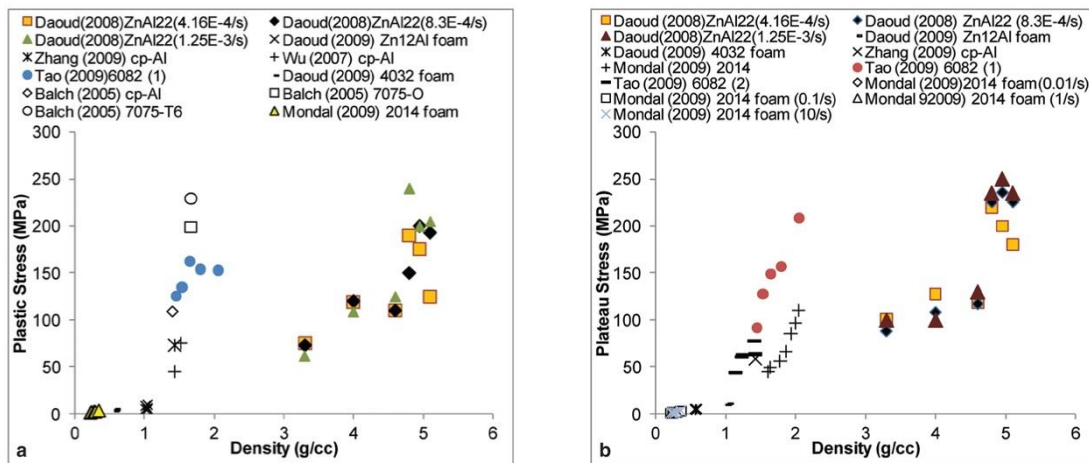
รูปที่ 6-31 แสดงค่า Compressive modulus ของโลหะโฟม (ซ้าย) และ ค่า modulus ที่ผ่านการ normalized กับค่า Modulus ของโลหะเนื้อพึ้นกับค่าความหนาแน่น (ขวา)

จากรูปที่ 6-31 (ซ้าย) แสดงค่าพลังงาน Compressive modulus ของโลหะโฟมสังเคราะห์ที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปโลหะโฟมสังเคราะห์ที่มีโลหะอะลูมิเนียมและโลหะแมกนีเซียมเป็นโลหะเนื้อพึ้นจะมีความหนาแน่นที่ต่ำ โลหะไทเทเนียมและโลหะสังกะสีจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่า จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่านั้นจะมีค่า Modulus ที่สูงกว่า จากรูปที่ 6-31 (ขวา) แสดงผลการทดลองส่วนที่เป็นสัดส่วนของค่า Modulus ของโลหะโฟมสังเคราะห์หารด้วยค่า Modulus ของโลหะเนื้อพึ้น ซึ่งจะแสดงถึงค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักในโลหะโฟมสังเคราะห์ (Weight saving potential) พบว่าโลหะโฟมไทเทเนียมนั้นมืค่า Modulus ที่สูงที่สุดแต่ทว่าโลหะโฟมไทเทเนียมและโลหะโฟมสังกะสีนั้นมืค่าความหนาแน่นสูง 3 กรัม/ซีซี ส่วนโลหะโฟมอะลูมิเนียมและโลหะโฟมแมกนีเซียมที่มีความหนาแน่นต่ำนั้นก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมเช่นกัน เนื่องจากมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าหากเทียบกับความหนาแน่นของโลหะเนื้อพึ้นนั้นๆ



รูปที่ 6-32 แสดงค่า Compressive yield strength กับความหนาแน่น ของโลหะโฟม (ซ้าย) และ ค่า syntactic foam yield กับค่าความหนาแน่นของโลหะเนื้อฟอง (ขวา)

ค่า Compressive yield strength ของโลหะโฟมสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับค่า (Normalized) ด้วยโลหะเนื้อฟองมีค่าดังแสดงในรูปที่ 6-32. แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงของโลหะโฟมสังเคราะห์นั้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้ในช่วงกว้างๆ เพื่อที่จะเลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 6-32 (ขวา) ค่าความแข็งแรงของโลหะโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำบางชนิดนั้นก็มีค่าที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันกับโลหะเนื้อฟองบางชนิด จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำโลหะโฟมไปแทนที่โลหะเนื้อฟองบางชนิดได้ ซึ่งจะได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักที่เบากว่า (Weight saving) โดยทั่วไปนั้นโลหะโฟมที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความแข็งแรงสูงตาม แต่ Modulus นั้นไม่ได้จำกัดอยู่ในวงแคบๆ แต่จะกระจายไปตามค่าความหนาแน่นต่างๆ ของชิ้นงาน แม้ว่าชิ้นงานโลหะโฟมผสมนั้นจะมีความหนาแน่นที่เท่ากันแต่มีความแข็งแรงที่แตกต่าง



รูปที่ 6-33 แสดงค่า Plastic stress กับค่าความหนาแน่น [8]

จากรูปที่ 6-33 แสดงค่า Plastic stress และ Plateau stress ของโลหะโฟมสังเคราะห์ แสดงให้เห็นบริเวณที่แตกต่างกัน 2 บริเวณ ค่าของ Plastic stress ของโลหะโฟมอะลูมิเนียมเกาะกลุ่มกันไป แต่ของโลหะโฟมสังกะสี และโลหะไทเทเนียมนั้นจะแตกต่างออกไปอีก ค่าความแข็งแรงของโลหะโฟมอะลูมิเนียมนั้นมีค่ากระจายในวงกว้างในช่วงความหนาแน่นแคบๆ ค่า Plateau stress เป็นค่าที่มีความสำคัญมากเพราะบ่งบอกถึงค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุนั้นๆ (Energy absorption capability ซึ่งค่า Plateau stress ที่มีค่าสูงกว่า 250 MPa แสดงในโลหะโฟมในหลายๆ ชนิด

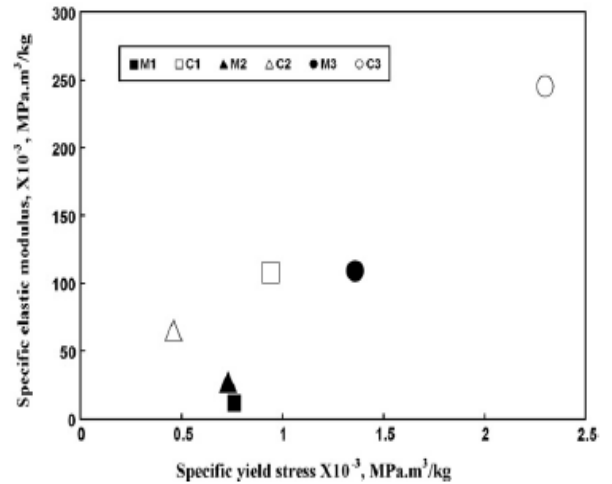
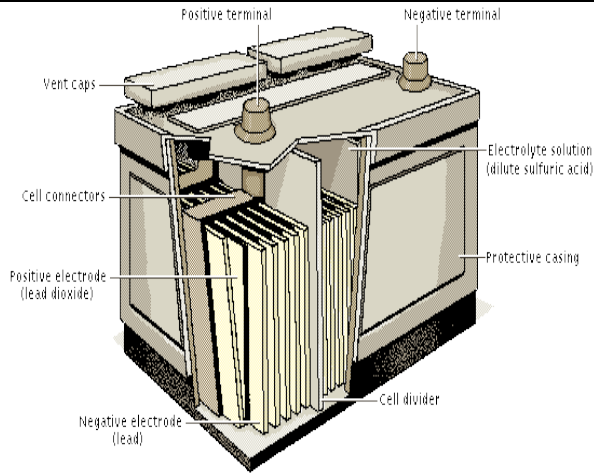
### สมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical behavior)

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่ามิงงานวิจัยของ A.Daoud [9] ได้นำถั่วลยถ่านหินมาทำการรีไซเคิล โดยการนำไปผสมกับโลหะตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้งานในแบตเตอรี่ โดยทำการผสมโลหะตะกั่วกับถั่วลยถ่านหินเป็นอัตราส่วนของโลหะตะกั่วร้อยละ 55 โดยปริมาตร และถั่วลยถ่านหินชนิดไมโครบอลูน (Microballoon) ร้อยละ 45 โดยปริมาตร

การทดลองของ A.Daoud นั้นได้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 กลุ่มของโลหะตะกั่วผสม แสดงดังตารางที่ 6-14 ซึ่งจะเป็นโลหะตะกั่วผสมอยู่ 3 กลุ่มได้แก่ M1 M2 และ M3 กับโลหะตะกั่วผสมกับถั่วลย ได้แก่ C1 C2 และ C3 จากรูปที่ 6-34 (ขวา) พบว่าโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับถั่วลยถ่านหินนั้นจะมีค่า Specific yield strength และ Specific modulus ที่สูงกว่าหากเทียบกับโลหะตะกั่วผสมที่ไม่มีการเติมถั่วลยถ่านหิน นั้นหมายความว่าหากมีการเติมถั่วลยถ่านหินผสมกับตะกั่วจะทำให้เกิดตะกั่วผสมที่มีน้ำหนักเบาแต่จะมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมถั่วลยถ่านหินลงไปไนตะกั่ว นั้นหากนำไปใช้งานในแบตเตอรี่สมบัติที่สำคัญที่สุดก็คือความสามารถในการนำไฟฟ้า ซึ่งคณะผู้ทำการทดลองก็ได้นำชิ้นงานทั้ง 6 กลุ่มนี้ไปทำการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าต่อ ซึ่งพบว่าการนำไฟฟ้าของโลหะตะกั่วผสมที่มีการเติมถั่วลยถ่านหินนั้นจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า เนื่องจากตัวถั่วลยถ่านหินก่อนนำไปผสมนั้นได้มีการเคลือบผิวด้วยโลหะนิกเกิล (Ni) ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 6-14 แสดงส่วนผสมของโลหะตะกั่วผสมที่ใช้ในการทดลอง

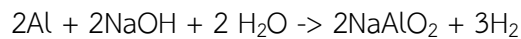
กลุ่มการทดลอง	ส่วนผสม
M1	Pb-0.06 Ca-1.2 Sn
M2	Pb-0.13 Ca-0.3 Sn-0.014 Al
M3	Pb-0.065 Ca-1.1 Sn-0.014 Mg
C1	Pb-0.06 Ca-1.2 Sn ผสมกับ 45% vol fly ash
C2	Pb-0.13 Ca-0.3 Sn-0.014 Al ผสมกับ 45% vol fly ash
C3	Pb-0.065 Ca-1.1 Sn-0.014 Mg ผสมกับ 45% vol fly ash



รูปที่ 6-34 (ซ้าย) บริเวณที่ใช้ตะกั่วในแบตเตอรี่ และ (ขวา) Specific yield strength และ Specific modulus [9]

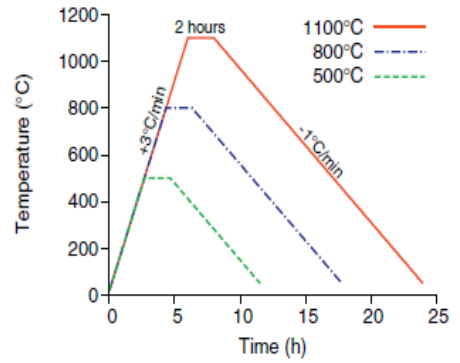
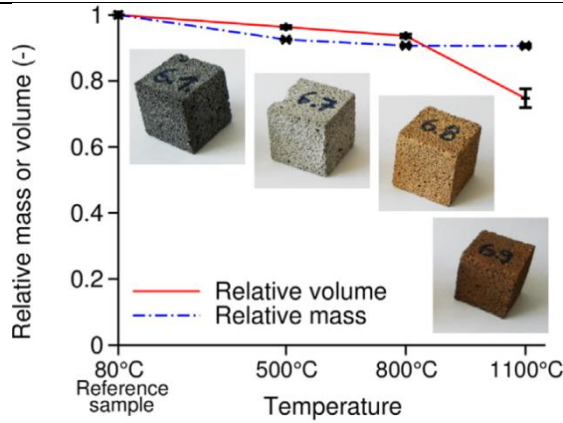
### สมบัติการต้านทานความร้อน (Thermal resistant)

P.Hlavacek ได้ทดลองทำการผสมโลหะอะลูมิเนียมเข้ากับแก้วลอยถ่านหินโดยวิธีการผสมกันเรียกว่า Inorganic foam โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวช่วยผสมเรียกว่า Alkali-activated เกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



โดยสัดส่วนของผสมที่เหมาะสมกับการทดลองนี้อยู่ที่ ส่วนผสมระหว่างแก้วลอยถ่านหิน 50 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.9 กรัม โซเดียม 16.1 กรัม ผงอะลูมิเนียม 0.045 กรัม และสัดส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวอยู่ที่ 0.38 ต่อน้ำหนัก

เมื่อได้ชิ้นงาน Inorganic foam ก็จะนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบความต้านทานความร้อนดังแสดงในรูปที่ 6-35 ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ได้นั้นจะสามารถทนความร้อนได้ถึง 800 องศาเซลเซียส (ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร) แต่เมื่อให้ความร้อนไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงนั้นจะทำให้สารออร์แกนิกเกิดการสลายตัว



รูปที่ 6-35 (ซ้าย) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อนำชิ้นงานไปอบทนไฟ และ (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงาน

### การนำไปใช้งาน (Applications)

ความเป็นไปได้ที่จะนำโลหะโพลีเมอสังเคราะห์ไปใช้ เนื่องจากสมบัติการดูดซับพลังงานที่ดี ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโลหะโพลีเมอสังเคราะห์เกรด 6061Al / Fly ash และ เกรด Al-Si alloy / Fly ash จะมีค่าที่สูงกว่าโลหะอะลูมิเนียมเกรด ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ นอกจากนี้โลหะโพลีเมออะลูมิเนียมถูกนำไปใช้ทำเป็นใบพัดเบรกรถยนต์ (Automotive brake rotors) และยังมีข้อเสนอให้นำไปใช้ในบริเวณที่เป็นการดูดซับแรงขณะเกิดอุบัติเหตุ

นอกจากนี้สมบัติการขัดสี (Wear resistance) ของโลหะโพลีเมอเกรด A356 / Fly ash Ni-P / Fly ash 47 Ni-Co / Fly ash Al / Fly ash และ AA6061 / Fly ash 46 ที่สูงกว่าโลหะเนื้อพื้นอาจจะสามารถนำไปสร้างอุปกรณ์อื่นๆ ได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม กลุ่มโลหะตะกั่วผสมระหว่างแก๊ลโลยถ่านหินยังสามารถนำไปใช้งานในการแทนที่แบตเตอรี่ ซึ่งจะช่วยให้น้ำหนักของแบตเตอรี่นั้นลดน้อยลง

จากการทดลองต่างๆ แสดงให้เห็นว่าโลหะโพลีเมอนั้นมีค่า Modulus ที่ต่ำหากเทียบกับโลหะเนื้อพื้น ค่าความแข็งแรงของโลหะโพลีเมอมีค่าที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความแข็งแรงของโลหะเนื้อพื้น ค่า Plateau stress และ Yield stress จะสามารถปรับแต่งได้ในช่วงที่กว้างโดยการเลือกสัดส่วนและขนาดของอนุภาคที่เหมาะสม

### 7. การทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ / สารเคมี :	
ขั้นตอนการทดลอง :	
ผลการทดลอง :	

<b>8. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility Study) :</b>	
NPV :	
B/C :	
IRR :	
<b>9. กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง :</b>	
<p><b>กฎหมายที่เกี่ยวข้อง</b></p> <p>    ถ้ำลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า จัดเป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 มีรหัสของเสีย คือ 10 01 02 HM เป็นของเสียที่ต้องมีการวิเคราะห์ความเป็นพิษก่อนส่งไปกำจัดหรือจัดการออกนอกโรงงาน เนื่องจากในบางครั้งถ้ำลอยจากถ่านหินที่เกิดขึ้นอาจจะมืองค์ประกอบบางอย่างหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษปะปนอยู่ตามแหล่งที่มา เช่น อาร์ซีนิกหรือสารหนู (As) และ โครเมียม (Cr) เป็นต้น ตามแสดงตารางที่ 6-3 ข้างต้นที่แสดงปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยถ่านหิน นอกจากนี้ตัวถ้ำลอยถ่านหินยังเป็นฝุ่นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถฟุ้งกระจายได้ อาจจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ถ้าทิ้งหรือฝังดินก็จะก่อให้เกิดปัญหาแก๊ดินและแหล่งน้ำใต้ดิน</p>	
<b>10. เอกสารอ้างอิง (References) :</b>	