บทที่ 5
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนน้ำมันดิบ

กากตะกอนน้ำมันดิบที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นกากตะกอนก้นถังเก็บกักน้ำมันดิบของโรงกลั่นน้ำมันบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด ซึ่งถูกใช้งานไปได้ระยะเวลาประมาณ 5 ปี จากการศึกษาพบว่า กากตะกอนน้ำมันดิบเกิดขึ้นปีละไม่ต่ำกว่า 5 ล้านลิตร (ปี พ.ศ. 2540) หรือประมาณร้อยละ 0.012 จากปริมาณน้ำมันดิบทั้งหมด)

5.1.1 สมบัติทางกายภาพ

จากการสังเกตลักษณะภายนอกของกากตะกอนน้ำมันดิบ พบว่า เป็นตะกอนข้น สีน้ำตาลเข้มอมดำ (ดังรูปในภาคผนวก ฉ.) มีความหนืดสูง คล้ายดินเหนียว และมีกลิ่นของน้ำมันรุนแรง จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพอย่างละเอียดตามตารางที่ 5.1 พบว่า

- ความหนาแน่นรวม

จากการตวงกากตะกอนน้ำมันดิบแล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นรวมพบว่า มีค่าระหว่าง 1.01 และ 1.05 ตัน/ลูกบาศก์เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.03 ตัน/ลูกบาศก์เมตร

- ปริมาณน้ำบรรจุ

จากการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2216-80 พบว่า กากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณน้ำบรรจุเฉลี่ยร้อยละ 8.6 โดยน้ำหนัก

- ปริมาณน้ำมันและไขมัน

จากการทดสอบโดยวิธีการสกัดน้ำมันและไขมันในกากตะกอน (Extraction Method for Sludge Samples) พบว่า กากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณน้ำมันและไขมันเฉลี่ยร้อยละ 58.6 ของน้ำหนักแห้ง หรือเฉลี่ยร้อยละ 56 ของน้ำหนักเปียก จัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณน้ำมันและไขมันปนอยู่สูงมาก อาจเป็นผลมาจากกากตะกอนนี้ตกสะสมอยู่ที่ก้นถังเก็บกักน้ำมันดิบและสัมผัสกับน้ำมันดิบอยู่ตลอดเป็นระยะเวลานาน (5 ปี) จึงมีปริมาณน้ำมันสะสมอยู่สูง

- กำลังรับแรงอัด

กากตะกอนน้ำมันดิบไม่สามารถทดสอบหากำลังรับแรงอัดได้เนื่องจากมีลักษณะคล้ายดินเลน ไม่แข็งตัวเป็นก้อน

5.1.2 สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกากตะกอนน้ำมันดิบ โดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) ตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งประกาศไว้เมื่อวันที่ 3

สิงหาคม 2531 แล้วนำน้ำชะละลายมาทดสอบหาค่า พีเอช และค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่า ค่า pH ในน้ำชะละลายกากตะกอนน้ำมันดิบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.2 และมีความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย แคดเมียม (Cd) 2.64 มก./ล., โครเมียม (Cr) 4.80 มก./ล., ปรอท (Hg) 10.95 มก./ล., ตะกั่ว (Pb) 10.28 มก./ล., ส่วนอาร์เซนิค (As) มีปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่าขีดความสามารถที่เครื่องมือจะวัดได้ (น้อยกว่า 0.01 มก./ล.)

จากปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ในน้ำชะละลายกากตะกอนน้ำมันดิบ พบว่า มีปริมาณแคดเมียม, ปรอท และตะกั่ว เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ที่ค่า 1 มก./ล., 0.2 มก./ล. และ 5 มก./ล. ตามลำดับ จึงบ่งชี้ได้ว่ากากตะกอนน้ำมันดิบเป็นของเสียอันตรายประเภทหนึ่งซึ่งจำเป็นต้องดำเนินการบำบัดเบื้องต้นโดยการทำเสถียรโลหะหนักให้ได้ตามมาตรฐานของทางราชการ ก่อนนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ (Landfill) ในขั้นตอนต่อไป

รายละเอียดสมบัติทางเคมีของกากตะกอนน้ำมันดิบแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

5.2 ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง

กากตะกอนน้ำมันดิบจัดเป็นของเสียประเภทสารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอนที่สามารถติดไฟและให้พลังงานความร้อนจนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้พลังงานในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ จากการนำกากตะกอนน้ำมันดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ จนเป็นขี้เถ้าซึ่งเป็นสารอนินทรีย์และง่ายต่อการนำไปกำจัดนั้น ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของขี้เถ้าพบว่า

5.2.1 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 5.1 ประกอบกับการสังเกตลักษณะภายนอกของขี้เถ้าที่ถูกเผาทั้ง 3 อุณหภูมิ พบว่ามีเนื้อละเอียด น้ำหนักเบา และฟุ้งกระจายได้ โดยขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ จะมีสีดำ, สีดำอมน้ำตาล และสีเทาเข้ม ตามลำดับ (ดังรูปในภาคผนวก ฉ.)

- ความหนาแน่นรวม

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ เท่ากับ 0.88, 0.64 และ 0.52 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

- ปริมาณน้ำบรรจุ

ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ มีปริมาณน้ำบรรจุร้อยละ 1.50, 0.55 และ 0.06 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

- ปริมาณน้ำมันและไขมัน

จากการทดสอบโดยวิธีการสกัดน้ำมันและไขมันในกากตะกอน (Extraction Method for Sludge Samples) พบว่า ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ

1,200°ซ มีปริมาณน้ำมันและไขมันเพียงร้อยละ 8.26, 0.80 และ 0.06 ของน้ำหนักแห้งหรือร้อยละ 7.98, 0.78 และ 0.06 ของน้ำหนักเปียกตามลำดับ

- กำลังรับแรงอัด

ขี้เถ้าหลังการเผาทั้งที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ มีลักษณะร่วนเป็นผงละเอียด ไม่จับตัวเป็นก้อน จึงไม่สามารถทดสอบหากำลังรับแรงอัดได้ (งานวิจัยนี้ไม่ได้ทดลองนำขี้เถ้าผสมกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อนำส่วนผสมที่ได้ไปวัดหากำลังรับแรงอัด)

5.2.2 สมบัติทางเคมี

จากผลการทดสอบสมบัติทางเคมีของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 5.2 ประกอบกับการวัดค่าพีเอชและค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายตามวิธีการสกัดสารของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (Extraction Procedure) ของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ มีค่า พีเอช เท่ากับ 8.23, 8.60 และ 8.92 ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายมีดังนี้

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ

พบปริมาณแคดเมียม (Cd) 2.20 มก./ล., ปรอท (Hg) 0.16 มก./ล., ตะกั่ว (Pb) 6.20 มก./ล. ส่วน อาร์เซนิค (As) และ โครเมียม (Cr) มีค่าต่ำมากกว่าขีดความสามารถในการวัดของเครื่องมือ (น้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล.)

จากผลการวิเคราะห์น้ำชะละลายของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °ซ พบค่าแคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ที่ค่า 1 มก./ล. และ 5 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนปรอท (Hg) นั้น เหลือเพียง 0.16 มก./ล. ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามยังจัดว่าขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °ซ ยังเป็นของเสียอันตรายที่ต้องทำเสถียรก่อนนำไปกำจัดในขั้นตอนต่อไป

2) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

จากการวิเคราะห์น้ำชะละลาย พบปริมาณ แคดเมียม (Cd) 1.82 มก./ล., ปรอท (Hg) 0.14 มก./ล., ตะกั่ว (Pb) 3.40 มก./ล. ส่วน อาร์เซนิค (As) และโครเมียม (Cr) มีค่าต่ำกว่าขีดความสามารถของเครื่องวัด (น้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล.)

ผลการวิเคราะห์พบปริมาณแคดเมียม (Cd) เท่านั้นที่ยังเกินค่ามาตรฐาน ที่ค่า 1 มก./ล. ส่วนอาร์เซนิค (As), โครเมียม (Cr), ปรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

3) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

จากการวิเคราะห์น้ำชะละลาย พบปริมาณ แคดเมียม (Cd) 1.42 มก./ล., ปรอท (Hg) 0.10 มก./ล., ตะกั่ว (Pb) 2.80 มก./ล. ส่วน อาร์เซนิค (As) และ

โครเมียม (Cr) มีค่าต่ำกว่าขีดความสามารถของเครื่องวัด (น้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล.)

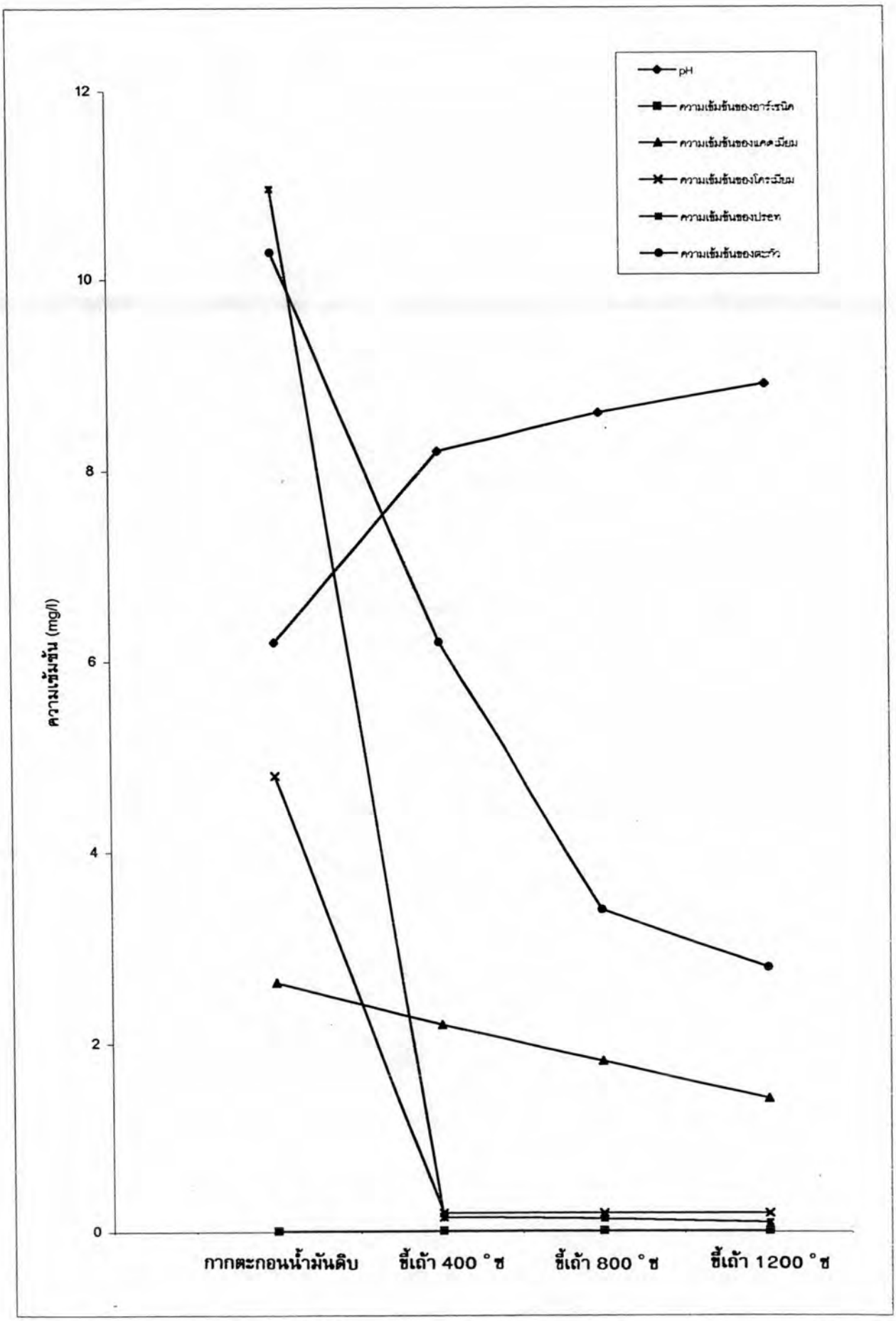
ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณแคดเมียม (Cd) เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ค่า 1 มก./ล. ค่าเดียว ส่วนปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักอีก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิค (As) โครเมียม (Cr), ปรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 5.1 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติด้านกายภาพของกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

สมบัติด้านกายภาพ	กากตะกอนดิบน้ำมันดิบ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400°ซ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 800°ซ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 1200°ซ
ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	1.03	0.88	0.64	0.52
ปริมาณน้ำบรรจุ (ร้อยละ)	8.6	1.50	0.55	0.06
ปริมาณน้ำมันและไขมัน (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)	58.6	8.26	0.80	0.06
กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว

ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของน้ำชะละลายกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

คุณสมบัติ	กากตะกอนน้ำมันดิบ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400°ซ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 800°ซ	ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 1200°ซ	**เกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม**
พีเอช	6.2	8.2	8.6	8.9	-
อาร์เซนิค(มก./ล.)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<5
แคดเมียม(มก./ล.)	**2.64**	**2.20**	**1.82**	**1.42**	<1
โครเมียม(มก./ล.)	4.80	<0.2	<0.2	<0.2	<5
ปรอท(มก./ล.)	**10.95**	0.16	0.14	0.10	<0.2
ตะกั่ว(มก./ล.)	**10.28**	**6.20**	3.40	2.80	<5



รูปที่ 5.1 ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200๐ ซ

จากรูปที่ 5.1 พบว่า ปริมาณโลหะหนักแคดเมียม, โครเมียม, ปรอท และตะกั่ว ในกากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณลดน้อยลงเมื่อถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 400๐ ซ ทั้งยังมีปริมาณลดลงอีก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น (800๐ ซ และ 1,200๐ ซ) อธิบายได้ว่าความร้อนที่เกิดจากการเผากากตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้เกิดการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนภายในกากตะกอนน้ำมันดิบให้กลายเป็นสารประกอบของเกลืออนินทรีย์ จากปฏิกิริยาดังกล่าวมีผลให้โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอินทรีย์-โลหะ (Organometallic compound) สารประกอบฟอสไฟด์หรือซัลไฟด์ในกากตะกอนน้ำมันดิบ ซึ่งมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบถูกทำลายแตกตัวเป็นอิออนอิสระของโลหะหนักเกาะติดไปกับอนุภาคเล็กๆ ไอน้ำ หรือรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นโลหะออกไซด์ เช่น As_2O_3, CdO_3, Cr_2O_3, HgO และ PbO ระเหยออกไปจากเตาในขณะเกิดการเผาไหม้ ส่วนโลหะหนักบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในขี้เถ้าหลังการเผาด้วยในปริมาณมากน้อยต่างกันไป (Calvin R. Brunner, 1993)

ผลสรุปจากการทดสอบสมบัติทางเคมีของขี้เถ้าหลังจากการเผากากตะกอนน้ำมันดิบโดยตรง (ไม่ผสมปนกับวัสดุหรือของเสียอื่นๆ) ที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ นั้น พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายมีค่าเกินค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นขี้เถ้าที่ผ่านการเผากากตะกอนน้ำมันดิบแล้วยังจัดเป็นของเสียอันตรายชนิดหนึ่งที่ต้องผ่านการบำบัดโดยการทำเสถียรโลหะหนักในขี้เถ้าก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีที่ถูกต้องเหมาะสมในขั้นต่อไป

5.3 ผลการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

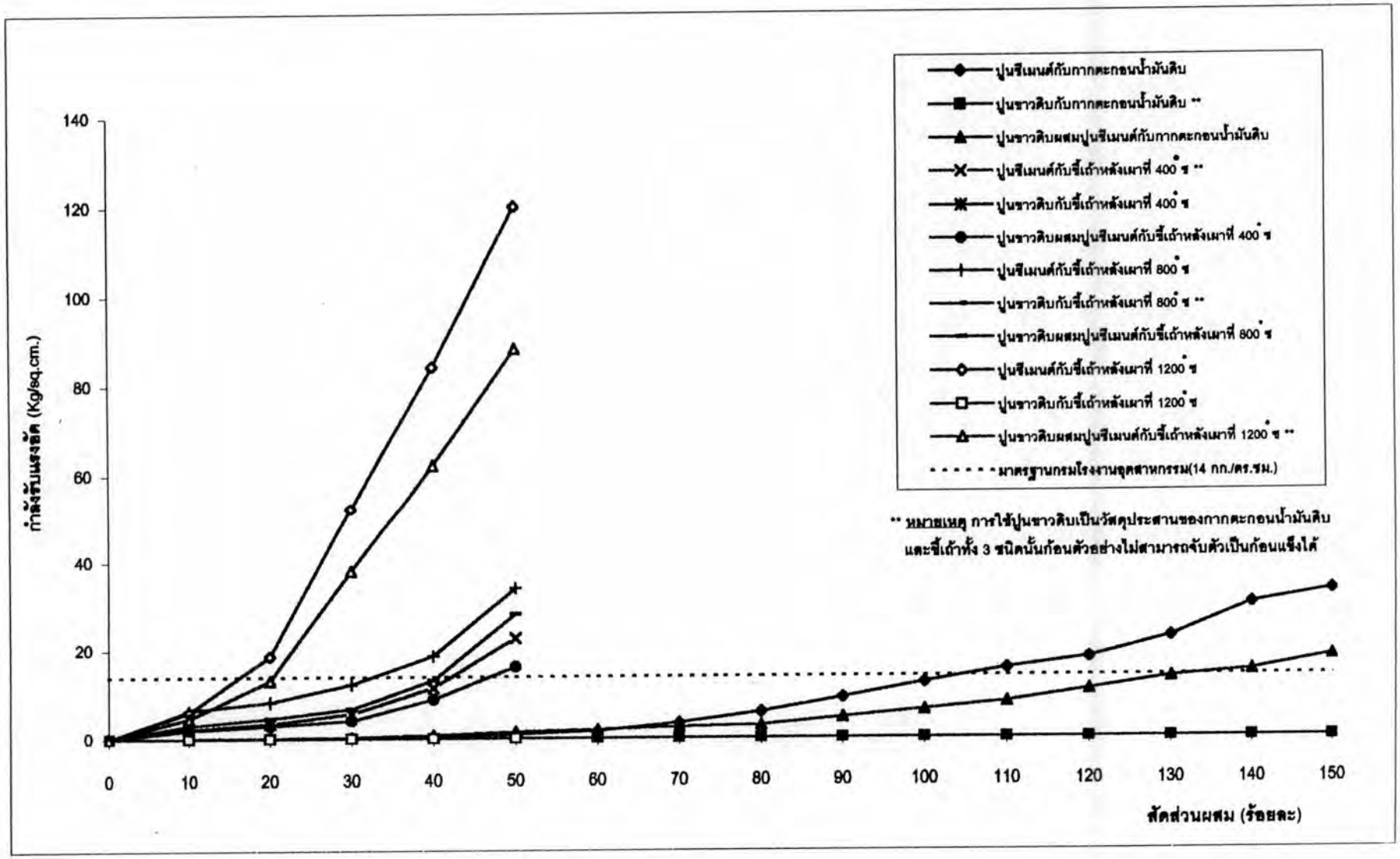
จากการทดสอบหาสมบัติทางเคมีสามารถระบุได้ว่ากากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200°ซ (ในกรณีนำกากตะกอนน้ำมันดิบไปเผาโดยตรง) เป็นของเสียอันตรายที่ต้องได้รับการทำเสถียรก่อนนำไปกำจัด ในขั้นตอนนี้จะสรุปผลจากการหาอัตราส่วนผสมเบื้องต้นและชนิดของวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำเสถียรโดยการนำกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังการเผามาทำให้เป็นก้อนแข็ง ผลของการศึกษาแยกสรุปได้ดังนี้

5.3.1 กากตะกอนน้ำมันดิบ

1) กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบที่ผ่านการผสมกับวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ที่แสดงจากรูปที่ 5.2 สรุปผลได้ว่า

- ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 110 และ 140 ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบสามารถทำให้ก้อนตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบแข็งตัวและผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 15.6 กก./ตร.ซม. และ 15 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ หลังผ่านการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน

- ปูนขาวดิบอย่างเดียวไม่สามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบแข็งตัวได้ (ไม่ให้กำลังรับแรงอัด) ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมปูนขาวดิบมากถึงร้อยละ 150 ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ
- ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับปูนขาวดิบและปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ที่สัดส่วนผสมเดียวกัน
- กำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้น แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น

รายละเอียดผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบ แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนน้ำมันดิบที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 10	0.1	8.6	<0.01	2.63	4.80	10.86	10.06
ร้อยละ 20	0.1	8.7	<0.01	2.60	4.78	10.86	10.00
ร้อยละ 30	0.2	8.7	<0.01	2.59	4.77	10.84	10.02
ร้อยละ 40	0.4	8.6	<0.01	2.60	4.76	10.82	10.02
ร้อยละ 50	0.9	8.9	<0.01	2.60	4.77	10.80	10.04
ร้อยละ 60	1.7	9.0	<0.01	2.58	4.77	10.80	10.04
ร้อยละ 70	3.6	9.2	<0.01	2.56	4.76	10.79	10.05
ร้อยละ 80	6.0	9.2	<0.01	2.54	4.78	10.78	10.03
ร้อยละ 90	9.2	9.4	<0.01	2.54	4.75	10.77	10.03
ร้อยละ 100	12.5	9.5	<0.01	2.53	4.74	10.77	10.05
ร้อยละ 110	15.6	9.6	<0.01	2.50	4.74	10.74	10.02
ร้อยละ 120	18.0	9.6	<0.01	2.50	4.73	10.72	10.02
ร้อยละ 130	22.6	9.7	<0.01	2.50	4.74	10.70	10.00
ร้อยละ 140	30.1	9.7	<0.01	2.48	4.74	10.69	10.02
ร้อยละ 150	33.1	9.8	<0.01	2.47	4.75	10.69	10.03
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนน้ำมันดิบที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุ - ประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนขาวดิบ							
ร้อยละ 10	ไม่แข็งตัว	9.6	<0.01	2.58	4.47	10.26	10.22
ร้อยละ 20	ไม่แข็งตัว	9.6	<0.01	2.58	4.78	10.24	10.24
ร้อยละ 30	ไม่แข็งตัว	9.7	<0.01	2.58	4.76	10.20	10.22
ร้อยละ 40	ไม่แข็งตัว	9.7	<0.01	2.56	4.77	10.18	10.23
ร้อยละ 50	ไม่แข็งตัว	9.7	<0.01	2.55	4.78	10.15	10.20
ร้อยละ 60	ไม่แข็งตัว	9.8	<0.01	2.55	4.80	10.11	10.18
ร้อยละ 70	ไม่แข็งตัว	9.8	<0.01	2.54	4.78	10.08	10.20
ร้อยละ 80	ไม่แข็งตัว	9.8	<0.01	2.53	4.79	10.06	10.20
ร้อยละ 90	ไม่แข็งตัว	9.8	<0.01	2.53	4.76	10.03	10.21
ร้อยละ 100	ไม่แข็งตัว	9.9	<0.01	2.54	4.76	10.00	10.22
ร้อยละ 110	ไม่แข็งตัว	10.0	<0.01	2.52	4.78	9.98	10.20
ร้อยละ 120	ไม่แข็งตัว	10.1	<0.01	2.52	4.77	9.98	10.18
ร้อยละ 130	ไม่แข็งตัว	10.2	<0.01	2.50	4.78	9.97	10.18
ร้อยละ 140	ไม่แข็งตัว	10.2	<0.01	2.48	4.79	9.97	10.18
ร้อยละ 150	ไม่แข็งตัว	10.2	<0.01	2.48	4.77	9.97	10.20
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนน้ำมันดิบที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 10	0.1	9.5	<0.01	2.62	4.62	10.62	10.00
ร้อยละ 20	0.1	9.6	<0.01	2.61	4.60	10.60	9.98
ร้อยละ 30	0.3	9.6	<0.01	2.60	4.58	10.58	9.98
ร้อยละ 40	0.8	9.6	<0.01	2.58	4.55	10.55	9.97
ร้อยละ 50	1.5	9.7	<0.01	2.56	4.50	10.53	9.95
ร้อยละ 60	2.0	9.7	<0.01	2.55	4.49	10.51	9.95
ร้อยละ 70	2.5	9.7	<0.01	2.53	4.48	10.51	9.95
ร้อยละ 80	3.0	9.7	<0.01	2.51	4.48	10.50	9.94
ร้อยละ 90	4.8	9.8	<0.01	2.51	4.47	10.50	9.94
ร้อยละ 100	6.4	9.9	<0.01	2.50	4.47	10.49	9.94
ร้อยละ 110	8.2	10.1	<0.01	2.50	4.46	10.48	9.92
ร้อยละ 120	10.9	10.3	<0.01	2.50	4.46	10.48	9.90
ร้อยละ 130	13.6	10.4	<0.01	2.50	4.46	10.48	9.90
ร้อยละ 140	15.0	10.4	<0.01	2.50	4.46	10.48	9.90
ร้อยละ 150	18.2	10.4	<0.01	2.50	4.46	10.47	9.88
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	-	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

2) การทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย

- ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

จากตารางที่ 5.3 ค่า pH ของน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างของปูนซีเมนต์กับกากตะกอนน้ำมันดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.6 ถึง 9.8 เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพความเป็นด่างของปูนซีเมนต์ที่มีผลทำให้ค่า pH ของน้ำชะละลายเพิ่มสูงขึ้น

- จากรูปที่ 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 พบว่า ปริมาณการชะละลายแคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ปรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) จากก้อนตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกับ ปริมาณโลหะหนักที่พบในน้ำชะละลายกากตะกอนน้ำมันดิบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ไม่มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบ เนื่องจากปริมาณแคดเมียม, โครเมียม, ปรอท และตะกั่ว โลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจากก้อนตัวอย่างไม่มีแนวโน้มที่ลดลง ถึงแม้จะเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์จนถึงร้อยละ 150 ก็ตาม (อาร์เซนิคนั้นไม่พบในกากตะกอนน้ำมันดิบและไม่พบในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่าง)

- จากตารางที่ 5.3 น้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างมีปริมาณแคดเมียม (Cd) อยู่ระหว่าง 2.50 มก./ล. ถึง 2.62 มก./ล. ปรอท (Hg) อยู่ระหว่าง 10.47 มก./ล. ถึง 10.62 มก./ล. และตะกั่ว อยู่ระหว่าง 9.88 ถึง 10.00 มก./ล. ซึ่งเกินมาตรฐานกรมโรงงานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 1 มก./ล., 0.2 มก./ล. และ 5 มก./ล. ตามลำดับ

- ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสาน

จากการผสมปูนขาวกับกากตะกอนน้ำมันดิบในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 150 ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ กากตะกอนและวัสดุประสานไม่สามารถจับตัวเป็นก้อนแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตาม นำเอาส่วนผสมของปูนขาวกับกากตะกอนน้ำมันดิบที่ผสมแล้วมาทดสอบการสกัดสาร (Extraction Procedure) เพื่อนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์หาค่าพีเอชและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักเพื่อศึกษาหาความสามารถในการทำเสถียรโลหะหนักของปูนขาวดิบ

จากตารางที่ 5.3 ค่า pH ของน้ำชะละลายมีค่าอยู่ระหว่าง 9.6 ถึง 10.2 และจากการสังเกตพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวดิบในส่วนผสม pH ของน้ำชะละลายที่วัดได้จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ต่าจะเป็นผลจากสภาพความเป็นด่างของปูนขาวดิบที่ทำให้ pH ของน้ำชะละลายเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น

- จากรูปที่ 5.3, 5.4, 5.5 และ 5.6 พบว่า ค่าโลหะหนักที่วิเคราะห์จากน้ำชะละลายทั้งแคดเมียม, โครเมียม, ปรอท และตะกั่ว ไม่มีแนวโน้มลดลงเลย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบก่อนนำมาผสมกับปูนขาวดิบแสดงให้เห็นว่าปูนขาวดิบไม่สามารถทำเสถียรโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนน้ำมันดิบได้

- จากตารางที่ 5.3 ยังพบว่า ในน้ำชะละลายตัวอย่างมีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 2.48 มก./ล. ถึง 2.58 มก./ล., ปรอทอยู่ระหว่าง 9.97 มก./ล. ถึง

10.26 มก./ล. และตะกั่วอยู่ระหว่าง 10.18 มก./ล. ถึง 10.24 มก./ล. ซึ่งโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เกินเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานฯ ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 1 มก./ล., 0.2 มก./ล. และ 5 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนโครเมียมและอาร์เซนิคมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานฯ

- ปูนขาวดิบผสมกับปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุประสาน

จากตารางที่ 5.3 ค่า pH ของน้ำชะละลายมีค่าระหว่าง 9.5 ถึง 10.4 ซึ่งเป็นผลจากค่าความเป็นด่างของปูนขาวดิบและปูนซีเมนต์ที่ถูกชะละลายออกมาและเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่า pH ของน้ำชะละลายเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

- ค่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจากก้อนตัวอย่างทั้งปริมาณแคดเมียม, โครเมียม, ปรอท และตะกั่ว มีปริมาณค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันก่อนนำมาทำเสถียรด้วยปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) แสดงว่าปูนขาวดิบและปูนซีเมนต์ ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบได้เช่นกัน

5.3.2 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ

1) กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400° ซ ที่ผ่านการผสมกับวัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในรูปที่ 5.2

- จากตารางที่ 5.4 ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ที่ส่วนผสมร้อยละ 50 สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400° ซ เป็นก้อนแข็งและผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 22.6 กก./ตร.ซม. และ 16.2 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ (มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้รับแรงอัดได้มากกว่า 14 กก./ตร.ซม.)

- ปูนขาวดิบไม่สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400° ซ แข็งตัวเป็นก้อนได้ โดยก้อนตัวอย่างที่ถูกถอดแบบเมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง ปริแตกจนไม่สามารถนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดได้

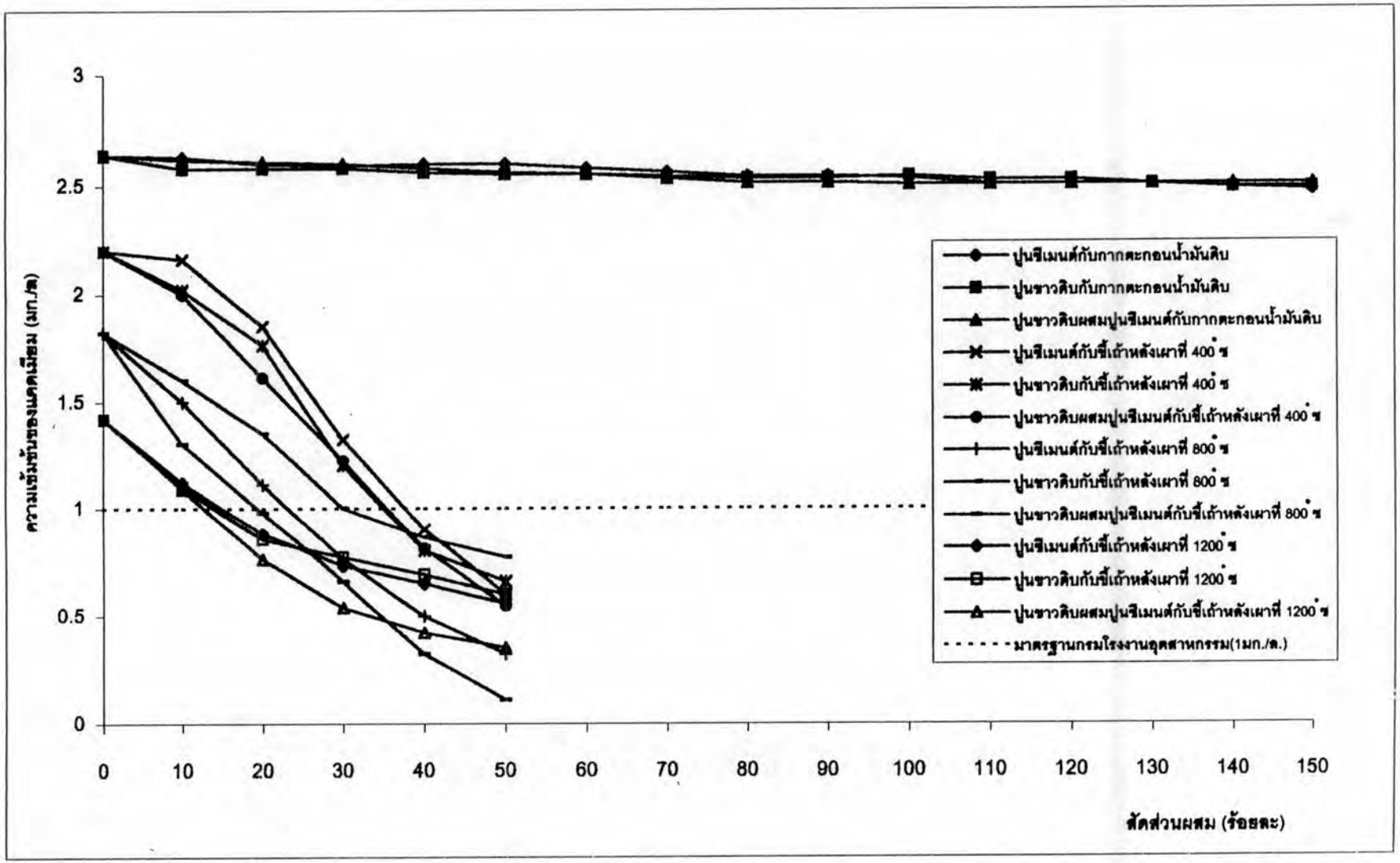
- ปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปูนขาวดิบและปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

- กำลังรับแรงอัดยังคงแปรผันตามปริมาณการเพิ่มส่วนผสมของปูน-ซีเมนต์หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ซึ่งใช้เป็นวัสดุประสาน

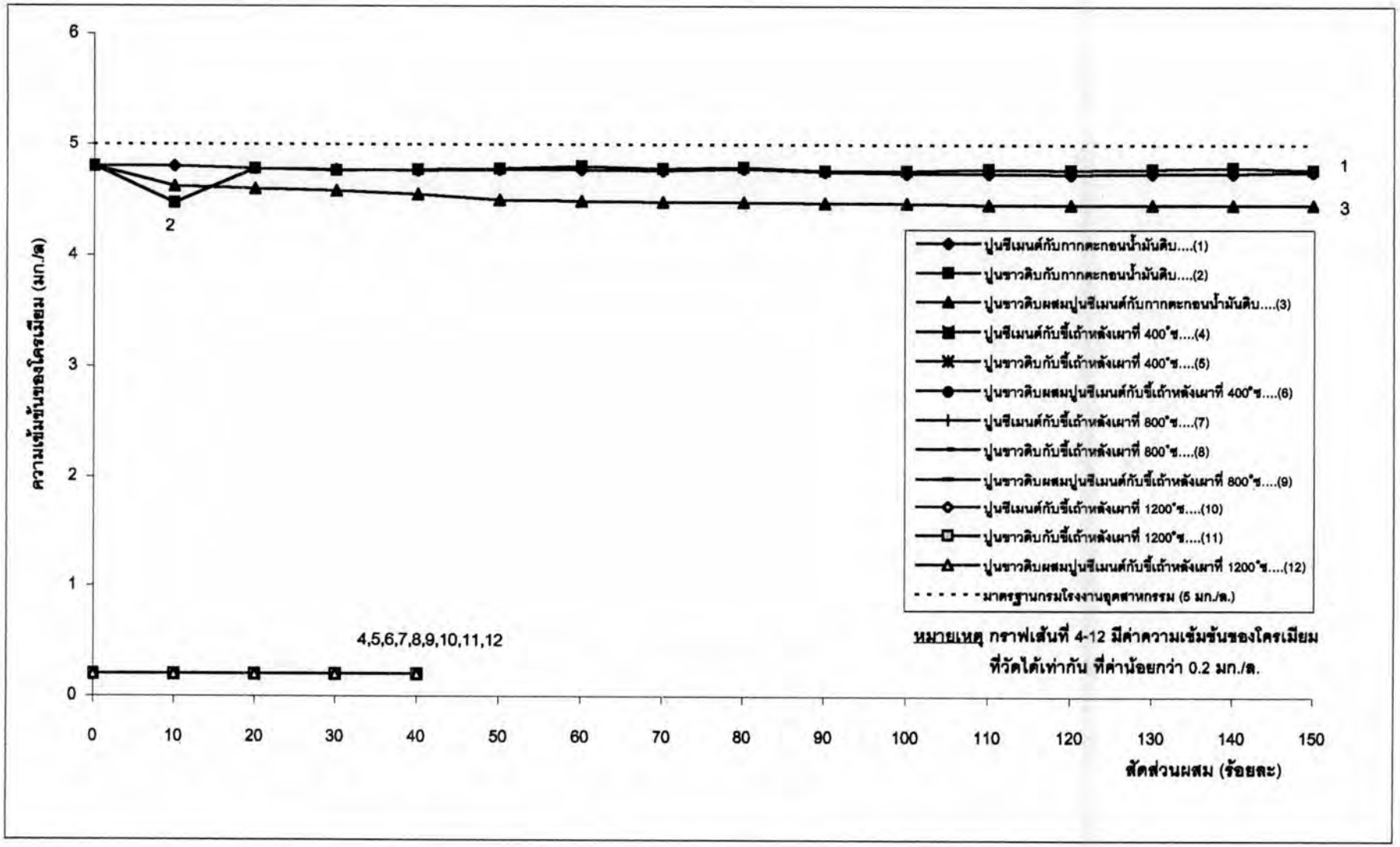
ผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ แสดงไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

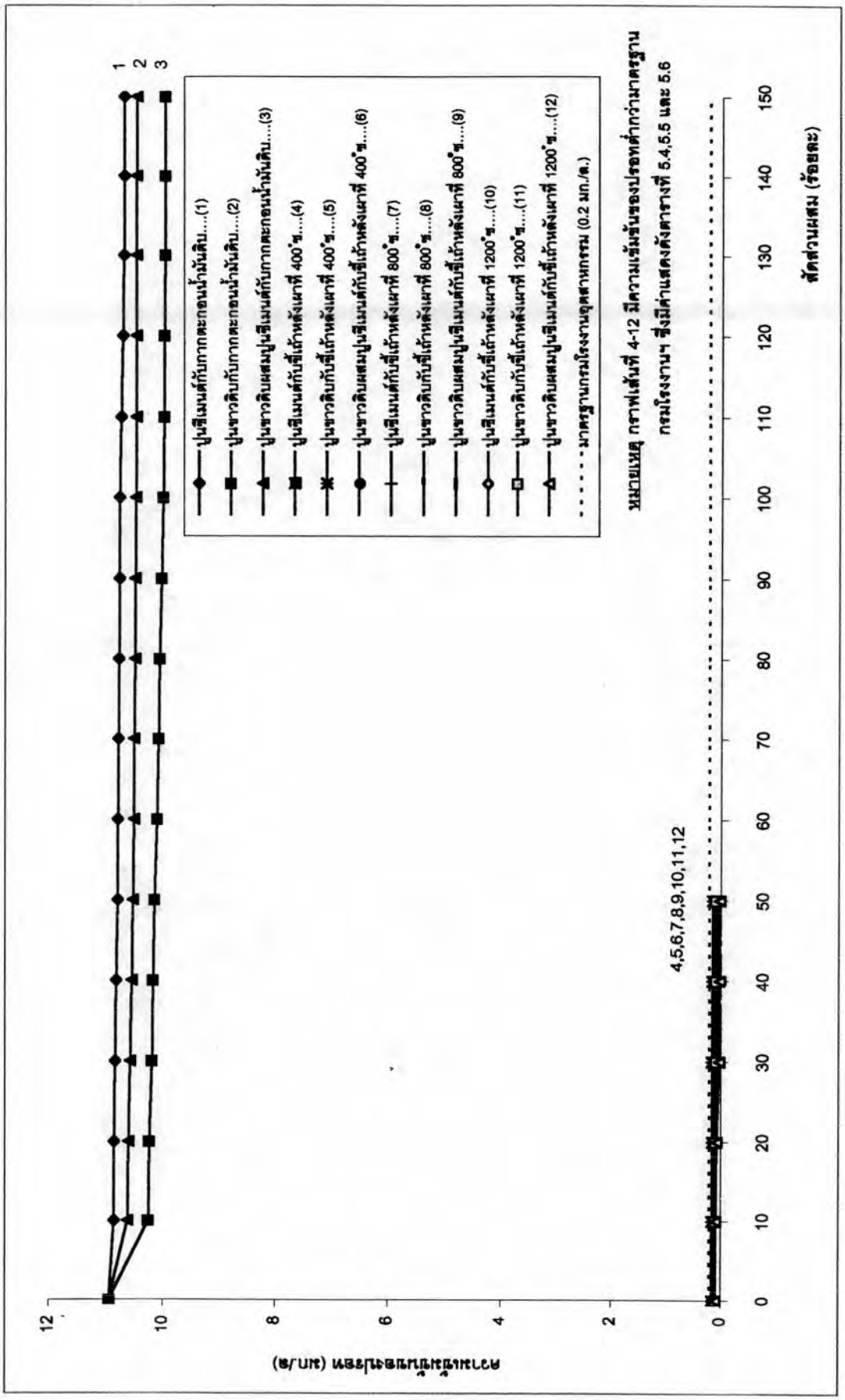
สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.02	< 0.01	2.20	< 0.2	0.16	6.20
ร้อยละ 10	2.2	9.5	<0.01	2.16	<0.2	0.14	5.28
ร้อยละ 20	3.6	9.7	<0.01	1.85	<0.2	0.14	4.80
ร้อยละ 30	5.8	10.0	<0.01	1.32	<0.2	0.11	3.95
ร้อยละ 40	11.5	10.3	<0.01	0.90	<0.2	0.10	3.20
ร้อยละ 50	22.6	10.6	<0.01	0.60	<0.2	0.08	2.10
ปูนขาวดิบ							
ร้อยละ 0	-	8.02	< 0.01	2.20	< 0.2	0.16	6.20
ร้อยละ 10	ไม่แข็งตัว	10.2	<0.01	2.02	<0.2	0.16	6.12
ร้อยละ 20	ไม่แข็งตัว	10.3	<0.01	1.76	<0.2	0.15	6.14
ร้อยละ 30	ไม่แข็งตัว	10.4	<0.01	1.20	<0.2	0.16	6.12
ร้อยละ 40	ไม่แข็งตัว	10.5	<0.01	0.80	<0.2	0.15	6.10
ร้อยละ 50	ไม่แข็งตัว	10.6	<0.01	0.66	<0.2	0.14	6.10
ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.02	< 0.01	2.20	< 0.2	0.16	6.20
ร้อยละ 10	2.0	10.2	<0.01	2.00	<0.2	0.12	5.20
ร้อยละ 20	3.0	10.3	<0.01	1.61	<0.2	0.10	4.66
ร้อยละ 30	4.2	10.4	<0.01	1.22	<0.2	0.09	3.70
ร้อยละ 40	9.0	10.6	<0.01	0.81	<0.2	0.08	2.80
ร้อยละ 50	16.2	10.8	<0.01	0.55	<0.2	0.06	1.80
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**



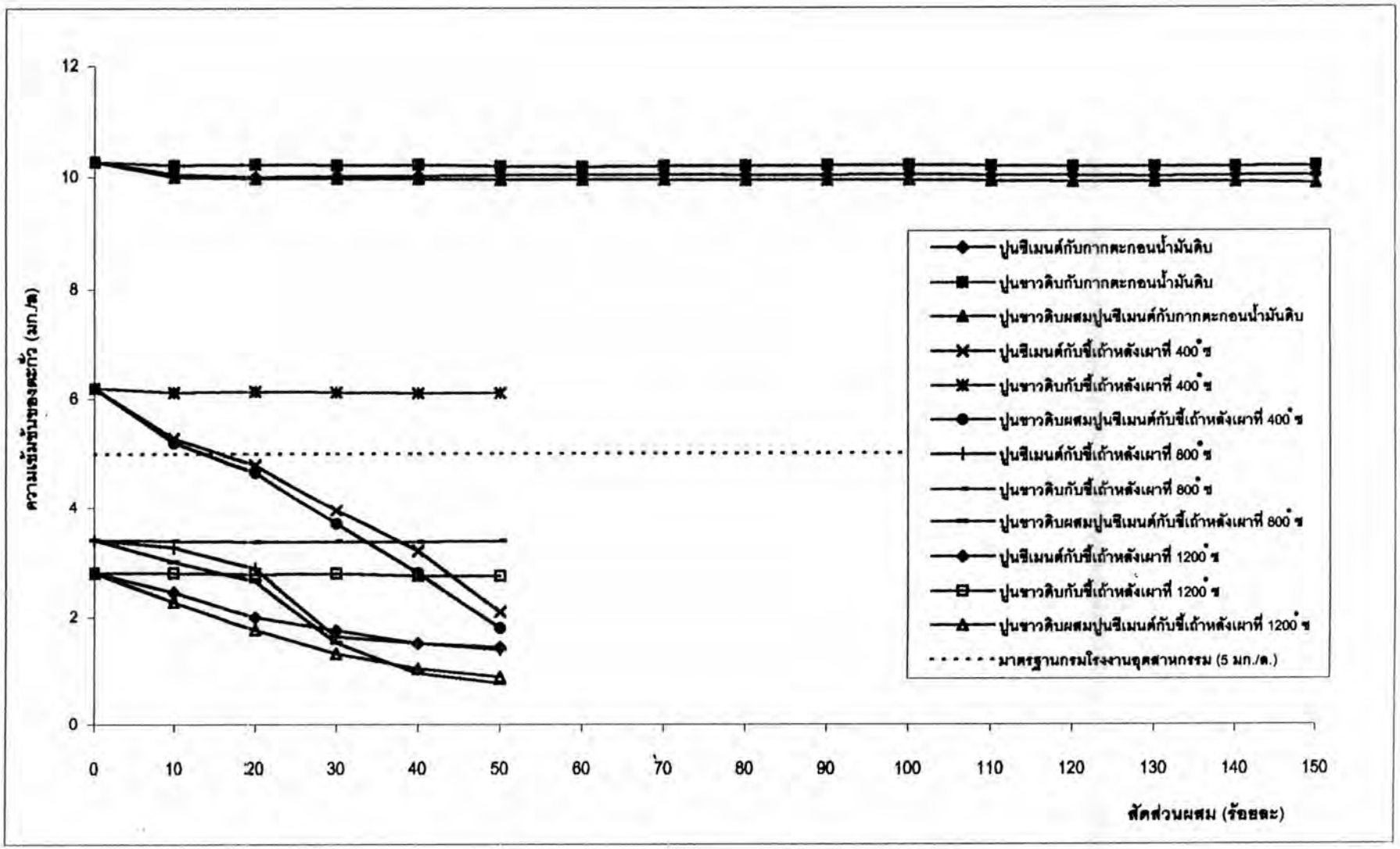
รูปที่ 5.3 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานและสัดส่วนผสมต่างๆ กันในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น



รูปที่ 5.4 ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานและสัดส่วนผสมต่างๆ กันในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น



รูปที่ 5.5 ความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานและอัตราส่วนผสมต่างๆ กันในขั้นตอนการทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม



รูปที่ 5.6 ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานและสัดส่วนผสมต่างๆ กันในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

2) การทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย

- อาร์เซนิค (As) ตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์น้ำชะละลายของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 ซ ไม่พบอาร์เซนิค ดังนั้นในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างไม่มีอาร์เซนิคด้วยเช่นกัน ซึ่งมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีปริมาณอาร์เซนิคได้ไม่เกิน 5 มก./ล.

- แคดเมียม (Cd) จากรูปที่ ข-9 (ภาคผนวก ข.) การชะละลายของแคดเมียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์, ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์) ในส่วนผสมของก้อนตัวอย่าง โดยจากค่ามาตรฐานแคดเมียมในน้ำชะละลายของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ไม่เกิน 1 มก./ล. พบว่า ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์, ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 40, 40 และ 40 ก้อนแข็งผ่านการทดสอบค่าแคดเมียมในน้ำชะละลายที่ 0.90 มก./ล., 0.80 มก./ล. และ 0.81 มก./ล. ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า ปูนขาวดิบไม่สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ แต่สามารถทำเสถียรโลหะแคดเมียมได้ดีพอๆ กับการใช้ปูนซีเมินต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

- โครเมียม (Cr) ตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่า จากการวิเคราะห์น้ำชะละลายของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 ซ ไม่พบปริมาณโครเมียม และจากการวัดหาค่าโครเมียมในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างก็ไม่พบโครเมียมเช่นกัน ซึ่งจากมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีปริมาณโครเมียมไม่เกิน 5 มก./ล.

- ปรอท (Hg) จากรูปที่ ข-10 (ภาคผนวก ข) พบว่า การชะละลายของปรอทมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์ หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ ในส่วนผสมของก้อนตัวอย่าง แต่สำหรับปูนขาวดิบนั้นไม่สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงของปรอทในน้ำชะละลายได้อย่างเด่นชัดทุกตัวอย่างมีปริมาณปรอทในน้ำชะละลายต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.2 มก./ล.

- ตะกั่ว (Pb) จากรูปที่ 5.6 พบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ในส่วนผสมของก้อนตัวอย่างและยังพบว่าการใช้ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) เป็นวัสดุประสาน จะทำให้เกิดการชะละลายตะกั่วออกมาน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว สำหรับปูนขาวดิบไม่สามารถนำมาใช้ในการทำเสถียรโลหะหนักตะกั่วในขี้เถ้าเนื่องจากปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวดิบเป็นตัวทำเสถียรไม่มีแนวโน้มที่ลดลงเลย นอกจากนั้นพบว่า สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 20 น้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างพบปริมาณตะกั่ว 4.80 มก./ล. และ 4.66 มก./ล. ตามลำดับซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ไม่เกิน 5 มก./ล.

5.3.3 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

1) กำลังรับแรงอัด

- จากตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.2 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 40 และ 50 ทำให้ก้อนแข็งของขี้เถ้าผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ที่ 18.6 กก./ตร.ซม. และ 28.1 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ โดยมีมาตรฐานกำลังรับแรงอัดของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดที่ 14 กก./ตร.ซม.

- ปูนขาวดิบไม่สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ แข็งตัวเป็นก้อนได้ โดยเมื่อครบกำหนดถอดแบบก้อนตัวอย่างเกิดการปริแตกเป็นส่วนๆ

- ปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) และปูนขาวดิบ ที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

- กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างยังคงแปรผันตามการเพิ่มปริมาณวัสดุประสานในส่วนผสมของก้อนตัวอย่าง

ผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างขี้เถ้าหลังการเผาที่ 800° ซ แสดงในตารางที่ 5.5

2) การทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย

- อาร์เซนิค (As) ตารางที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์น้ำชะละลายขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ ไม่พบปริมาณอาร์เซนิค ดังนั้นจากการวิเคราะห์น้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างก็ไม่พบปริมาณอาร์เซนิคด้วยเช่นกัน

- แคดเมียม (Cd) จากรูป ข-12 (ภาคผนวก ข.) พบว่า การชะละลายของแคดเมียมมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์, ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์) ในส่วนผสม โดยพบว่าที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30, 40 และ 20 สามารถทำให้ก้อนตัวอย่างของขี้เถ้าผ่านเกณฑ์มาตรฐานแคดเมียมในน้ำชะละลายที่ 0.76 มก./ล., 0.86 มก./ล., 0.98 มก./ล. ตามลำดับ โดยค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ไม่เกิน 1 มก./ล. จากรูป ข-12 ยังแสดงให้เห็นว่า ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรแคดเมียมได้ดีกว่าปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบ ที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

- โครเมียม (Cr) จากการวิเคราะห์น้ำชะละลายขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ ไม่พบโครเมียม และเมื่อหาค่าโครเมียมในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างก็ไม่พบปริมาณโครเมียมด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 5.5 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.6	< 0.01	1.82	< 0.2	0.14	3.40
ร้อยละ 10	6.6	9.8	<0.01	1.50	<0.2	0.12	3.26
ร้อยละ 20	8.4	9.9	<0.01	1.11	<0.2	0.11	2.88
ร้อยละ 30	12.3	10.2	<0.01	0.76	<0.2	0.10	1.64
ร้อยละ 40	18.6	10.6	<0.01	0.50	<0.2	0.10	1.52
ร้อยละ 50	34.0	10.9	<0.01	0.32	<0.2	0.10	1.40
ปูนขาวดิบ							
ร้อยละ 0	-	8.6	< 0.01	1.82	< 0.2	0.14	3.40
ร้อยละ 10	ไม่แข็งตัว	10.2	<0.01	1.60	<0.2	0.12	3.38
ร้อยละ 20	ไม่แข็งตัว	10.3	<0.01	1.35	<0.2	0.12	3.36
ร้อยละ 30	ไม่แข็งตัว	10.5	<0.01	1.00	<0.2	0.13	3.37
ร้อยละ 40	ไม่แข็งตัว	10.8	<0.01	0.86	<0.2	0.13	3.36
ร้อยละ 50	ไม่แข็งตัว	11.2	<0.01	0.77	<0.2	0.13	3.38
ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.6	< 0.01	1.82	< 0.2	0.14	3.40
ร้อยละ 10	3.1	10.2	<0.01	1.30	<0.2	0.10	3.00
ร้อยละ 20	4.8	10.4	<0.01	0.98	<0.2	0.08	2.66
ร้อยละ 30	6.9	10.7	<0.01	0.66	<0.2	0.07	1.53
ร้อยละ 40	13.2	11.2	<0.01	0.32	<0.2	0.07	0.98
ร้อยละ 50	28.1	11.6	<0.01	0.11	<0.2	0.06	0.79
เกณฑ์มาตรฐาน	**14.0**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

- ปรอท (Hg) จากรูปที่ ข-13 (ภาคผนวก ข.) พบว่าปริมาณปรอทในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มวัสดุประสานในก้อนตัวอย่าง สำหรับปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ส่วนปูนขาวดิบไม่สามารถลดปริมาณปรอทในน้ำชะละลายได้อย่างเด่นชัด แต่สำหรับผลการทดลองพบว่าทุกก้อนตัวอย่างสามารถผ่านเกณฑ์ความเข้มข้นปรอทในน้ำชะละลายได้เนื่องจากปริมาณปรอทในขี้เถ้าที่เผา 800 ซ มีปริมาณน้อยมาก (0.14 มก./ล.)

- ตะกั่ว (Pb) จากรูป 5.6 การชะละลายโลหะตะกั่วมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มปูนซีเมนต์หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ในส่วนผสม ส่วนก้อนแข็งที่ใช้ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสานนั้น มีค่าตะกั่วละลายออกมาในปริมาณค่อนข้างคงที่ แสดงว่า ปูนขาวดิบไม่เหมาะกับการทำเสถียรของเสียประเภทที่มีโลหะหนักเป็นสารตะกั่ว

5.3.4 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

1) กำลังรับแรงอัด

- จากตารางที่ 5.6 พบว่า สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ต่อขี้เถ้า ที่ร้อยละ 20 และ 30 ทำให้ก้อนตัวอย่างผ่านเกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 18.6 กก./ตร.ซม. และ 38.0 กก./ลบ.ซม. โดยมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่เกิน 14 กก./ตร.ซม.
- ปูนขาวดิบไม่สามารถทำให้ขี้เถ้าคงรูปเป็นก้อนแข็งได้
- ปูนซีเมนต์ให้กำลังรับแรงอัดดีที่สุด เมื่อเทียบกับปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ และปูนขาวดิบที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน
- กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างแปรผันตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประสาน

ผลการทดสอบของก้อนแข็งขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ซ แสดงในตารางที่ 5.6

2) การทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย

- อาร์เซนิค (As) จากการวิเคราะห์น้ำชะละลายของขี้เถ้าหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ซ ไม่พบอาร์เซนิค โดยน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างไม่มีอาร์เซนิคด้วยเช่นกัน

- แคดเมียม (Cd) จากรูป ข-15 (ภาคผนวก ข.) แสดงให้เห็นว่า การชะละลายแคดเมียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานในส่วนผสม และจากตารางที่ 5.6 พบว่า ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักขี้เถ้าทำให้ก้อนแข็งที่ได้ผ่านเกณฑ์ทดสอบแคดเมียมในน้ำชะละลายที่ 0.88 มก./ล., 0.85 มก./ล. และ 0.76 มก./ล. ตามลำดับ โดยค่ามาตรฐานกรมโรงงานกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 1 มก./ล. มีข้อสังเกตคือ ปูนขาวดิบสามารถทำเสถียรแคดเมียมได้ดีพอๆ กับวัสดุประสานชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 5.6 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล)				
			อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.9	< 0.01	1.42	< 0.2	0.10	2.80
ร้อยละ 10	6.2	10.6	<0.01	1.12	<0.2	0.10	2.46
ร้อยละ 20	18.6	10.8	<0.01	0.88	<0.2	0.08	2.00
ร้อยละ 30	52.3	11.1	<0.01	0.73	<0.2	0.06	1.75
ร้อยละ 40	84.0	11.4	<0.01	0.65	<0.2	0.05	1.52
ร้อยละ 50	120.0	11.8	<0.01	0.56	<0.2	0.05	1.45
ปูนขาวดิบ							
ร้อยละ 0	-	8.9	< 0.01	1.42	< 0.2	0.10	2.80
ร้อยละ 10	ไม่แข็งตัว	10.8	<0.01	1.10	<0.2	0.10	2.80
ร้อยละ 20	ไม่แข็งตัว	11.1	<0.01	0.85	<0.2	0.10	2.77
ร้อยละ 30	ไม่แข็งตัว	11.5	<0.01	0.77	<0.2	0.09	2.79
ร้อยละ 40	ไม่แข็งตัว	11.8	<0.01	0.69	<0.2	0.09	2.75
ร้อยละ 50	ไม่แข็งตัว	12.2	<0.01	0.60	<0.2	0.09	2.75
ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์							
ร้อยละ 0	-	8.9	< 0.01	1.42	< 0.2	0.10	2.80
ร้อยละ 10	4.8	10.6	<0.01	1.09	<0.2	0.09	2.28
ร้อยละ 20	13.2	10.8	<0.01	0.76	<0.2	0.07	1.76
ร้อยละ 30	38.0	11.0	<0.01	0.54	<0.2	0.03	1.33
ร้อยละ 40	62.0	11.4	<0.01	0.42	<0.2	0.02	1.06
ร้อยละ 50	88.0	11.8	<0.01	0.35	<0.2	0.02	0.90
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

- โครเมียม (Cr) เนื่องจากในขี้เถ้าหลังการเผาไม่มีโครเมียม จึงทำให้น้ำชะละลายก้อนตัวอย่างไม่มีโครเมียม โดยมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีค่าโครเมียมไม่เกิน 5 มก./ล.

- ปรอท (Hg) ในขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ซ มีปริมาณปรอทอยู่น้อยมาก แต่จากรูปที่ ข-16 พบว่า ปูนซีเมนต์ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) สามารถลดการชะละลายปรอทของก้อนตัวอย่างได้เมื่อเพิ่มส่วนผสมลงไปในก้อนตัวอย่าง สำหรับปูนขาวดิบ จากรูปที่ ข-16 ค่าปรอทในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างมีค่าคงที่ไม่มีปริมาณลดลง แม้จะเพิ่มปริมาณปูนขาวดิบในส่วนผสม จึงพอสรุปได้ว่า ปูนขาวดิบไม่สามารถทำเสถียรปรอทในขี้เถ้าได้ แต่ทุกก้อนตัวอย่างมีค่าความเข้มข้นของปรอทอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหรรมกำหนด (ไม่เกิน 0.2 มก./ล.)

- ตะกั่ว (Pb) จากรูป 5.6 พบว่า ปูนซีเมนต์ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุประสานที่ทำเสถียรตะกั่วได้ดี และเมื่อเพิ่มปริมาณในส่วนผสมมากขึ้นจะทำให้ตะกั่วถูกชะละลายออกมาน้อยลงด้วย โดยปูนขาวดิบไม่มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรตะกั่วในขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ซ ค่าความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ 5 มก./ล. ในทุกก้อนตัวอย่าง เนื่องจากในขี้เถ้ามีปริมาณตะกั่วน้อยอยู่แล้ว

5.3.5 สรุปผลการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

ขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้นสามารถสรุปหาชนิดของวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำเสถียรกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าที่ผ่านการเผาแล้ว โดยใช้เกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบสมบัติของน้ำชะละลายเป็นหลัก สรุปได้ดังนี้

1) กากตะกอนน้ำมันดิบ

- กากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายเกินมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม จนจัดได้ว่าเป็นของเสียอันตราย คือ
  - แคดเมียม 2.64 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 1 มก./ล.)
  - ปรอท 10.95 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 0.2 มก./ล.)
  - ตะกั่ว 10.28 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 5 มก./ล.)

- วัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์, ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) มีเพียง 2 ชนิดที่สามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบเป็นก้อนแข็ง และผ่านเกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ (14 กก./ตร.ซม.) คือ ปูนซีเมนต์ และปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ที่สัดส่วนผสมวัสดุประสานต่อกากตะกอนน้ำมันดิบ เท่ากับร้อยละ 110 และ 140 ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ ตามลำดับ แต่จากผลการทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย ก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด เป็นส่วนผสม พบว่า ปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจากก้อนตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนน้ำมันดิบ

สรุปได้ว่า ปริมาณวัสดุประสานปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ที่ใช้สามารถทำให้เกิดการประสานตัวกันและห่อหุ้มกากตะกอนน้ำมันดิบไว้ในโพรงช่องว่างขณะเกิดการแข็งตัว แต่สารประกอบซิลิเกตและไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ไม่เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกับโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบ ซึ่งโดยปกติแล้วที่พีเอช 11-12 ขณะผสมวัสดุประสานกับกากตะกอนนั้น โลหะหนักในของเสียจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของซิลิเกตและไฮดรอกไซด์ถูกดูดติดอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างก้อนปูนซีเมนต์

จากผลการทดลองดังกล่าว วัสดุประสานทั้งปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ไม่สามารถทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบได้เลย อาจเนื่องมาจากกากตะกอนน้ำมันดิบเป็นสารอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณน้ำมันอยู่สูงมากจนเป็นตัวขัดขวางการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบที่ซับซ้อนในน้ำมันกับวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าว

2) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ

- ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายเกินมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ
  - แคดเมียม 2.20 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 1 มก./ล.)
  - ตะกั่ว 6.20 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 5 มก./ล.)

- จากการทดลองพบว่า วัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพียงพอในการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ ให้เป็นก้อนแข็ง โดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัด (14 กก./ตร.ซม.) และเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลายของกรมโรงงานอุตสาหกรรม มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) โดยที่สัดส่วนผสมเดียวกัน (ร้อยละ 50) ปูนซีเมนต์รับแรงอัดได้ 22.6 กก./ตร.ซม. เทียบกับ 16.2 กก./ตร.ซม. ของปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงเลือกปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและกำหนดสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ เท่ากับร้อยละ 50 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า สำหรับใช้ศึกษาในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุประสานต่อไป

3) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

- ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายเกินมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ
  - แคดเมียม 1.82 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 1 มก./ล.)

- จากการทดลองพบว่า วัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพียงพอในการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ ให้เป็นก้อนแข็งโดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบรับแรงอัด (14 กก./ตร.ซม.) และเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม มี 2 ชนิดคือ ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) โดยสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 40 วัดค่ากำลังรับแรงอัดได้ 18.6 กก./ตร.ซม. และสัดส่วนปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 50 วัดค่ากำลัง รับแรงอัดได้ 28.12 กก./ตร.ซม.

เนื่องจากที่สัดส่วนผสมเดียวกัน วัสดุประสานปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้น จึงเลือกปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและกำหนดสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ เท่ากับร้อยละ 40 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า สำหรับใช้ศึกษาในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

4) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

- ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายเกินมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ

  - แคดเมียม 1.42 มก./ล. (มาตรฐานไม่เกิน 1 มก./ล.)

- จากการทดลองพบว่า วัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพียงพอในการทำเสถียรขี้เถ้า หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ ให้เป็นก้อนแข็งโดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบรับแรงอัด (14 กก./ตร.ซม.) และเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลายของกรมโรงงานอุตสาหกรรม มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) โดย สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 20 วัดค่ากำลังรับแรงอัดได้ 18.6 กก./ตร.ซม. และสัดส่วนปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 30 วัดค่ากำลังรับแรงอัดได้ 38 กก./ตร.ซม.

เนื่องจากที่สัดส่วนผสมเดียวกัน วัสดุประสานปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้น จึงเลือกปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและกำหนดสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ เท่ากับร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า สำหรับใช้ศึกษาในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบและขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200°ซ หลังผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ (ผ่านระยะเวลาการบ่ม 28 วัน) แสดงไว้ในรูปที่ ข-1 ถึง ข-4 (ภาคผนวก ข.)

ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างของกากตะกอนน้ำมันดิบหรือขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200°ซ หลังผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ ข-5 ถึง ข-17 (ภาคผนวก ข.)

5.4 ผลการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดสอบหาชนิดและสัดส่วนผสมเบื้องต้นของวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับขี้เถ้าที่เผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200๐ ซ ในขั้นตอนนี้จะปรับลดสัดส่วนของวัสดุประสานในอัตราร้อยละ 2 เพื่อหาปริมาณวัสดุประสานที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ก้อนแข็งที่ได้ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย แบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 ๐ซ ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยกำหนดสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 42, 44, 46, 48 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า (โดยมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 40 และ 50 จากการทดลองที่ผ่านมา เป็นข้อมูลประกอบ)

2) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 ๐ซ ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยกำหนดสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 32, 34, 36, 38 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า (โดยมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 30 และ 40 จากการทดลองที่ผ่านมา เป็นข้อมูลประกอบ)

3) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200๐ซ ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยกำหนดสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 12, 14, 16, 18 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า (โดยมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 10 และ 20 จากการทดลองที่ผ่านมา เป็นข้อมูลประกอบ)

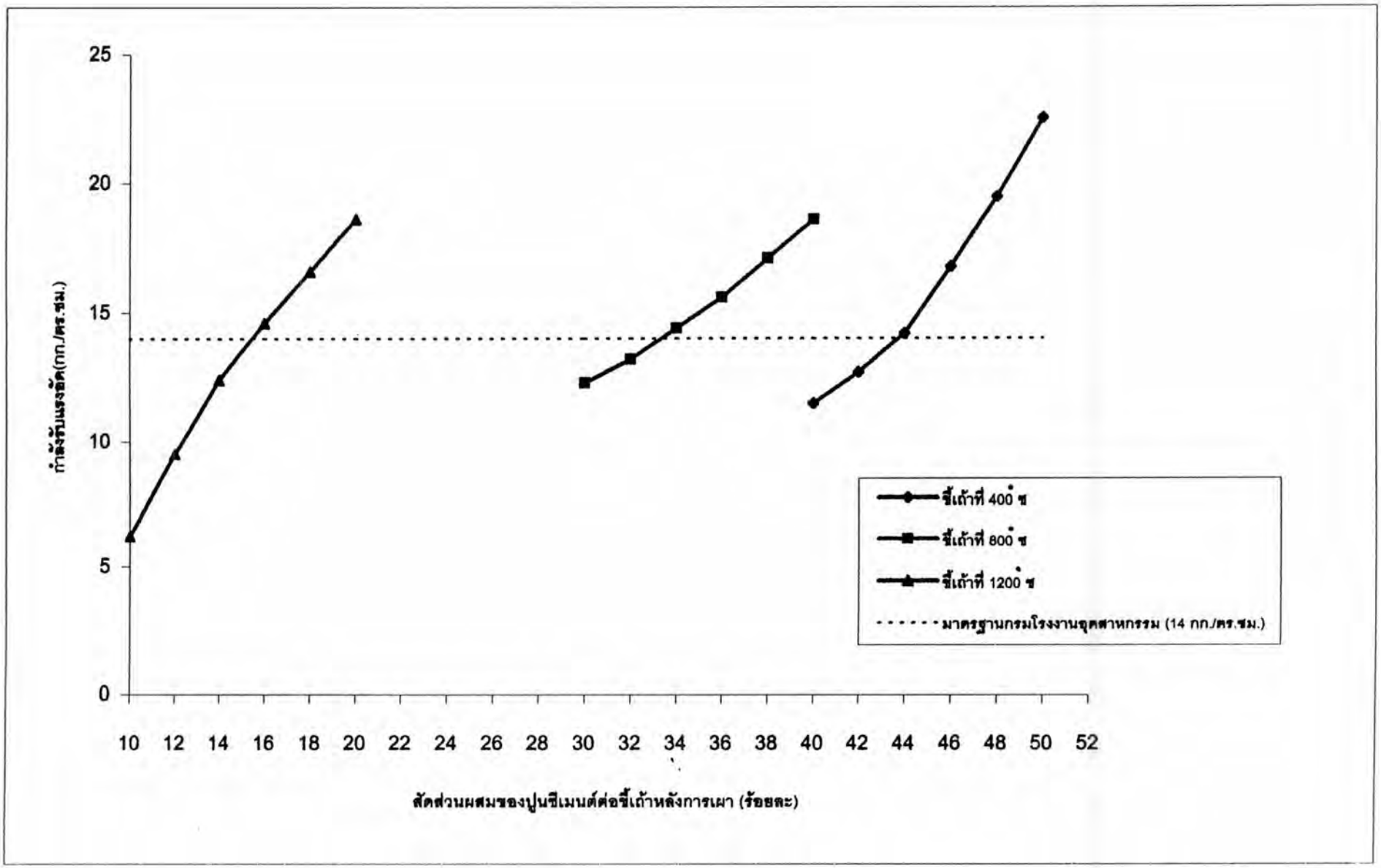
5.4.1 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400๐ซ

1) กำลังรับแรงอัด

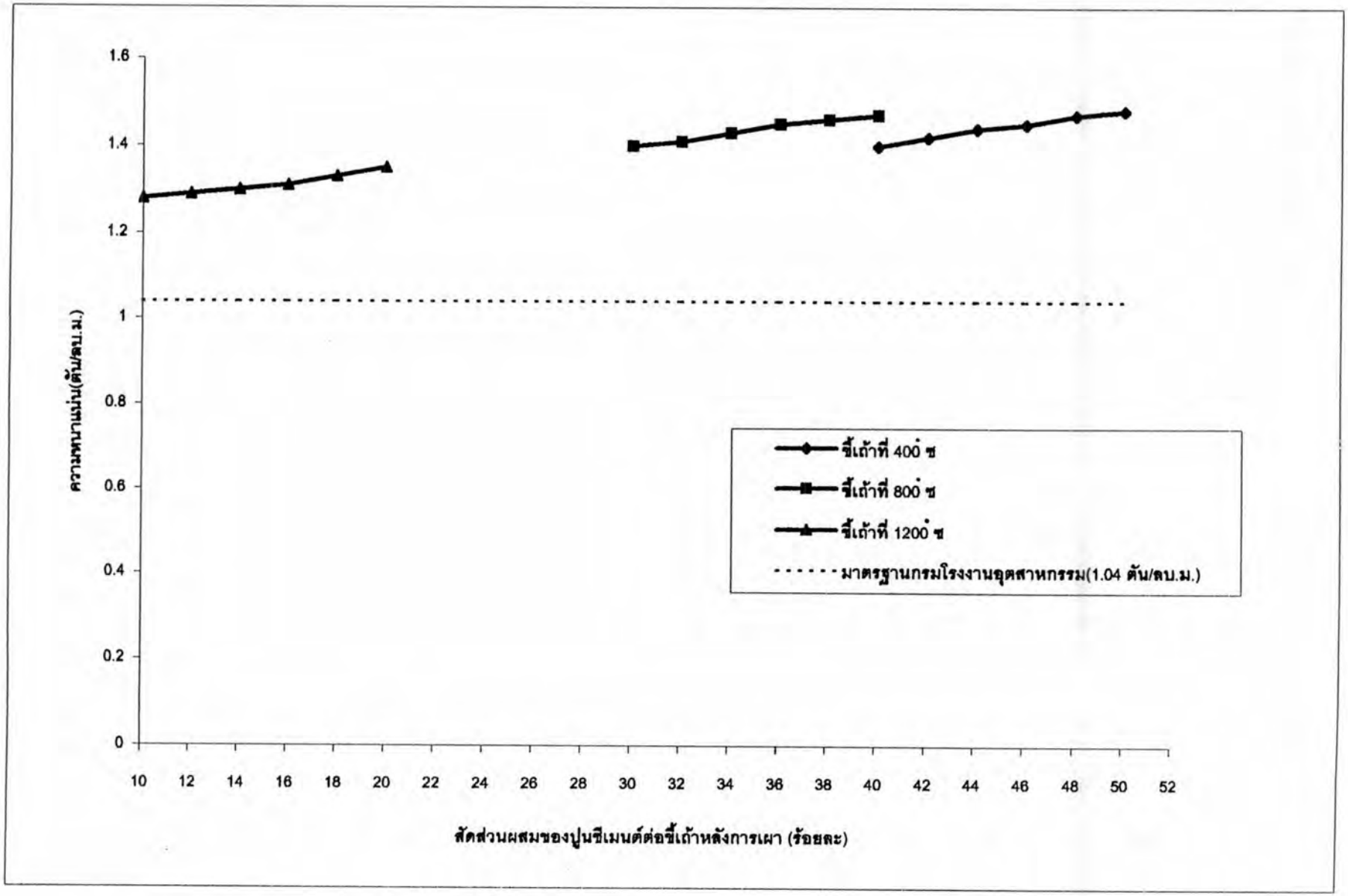
จากรูปที่ 5.7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างขี้เถ้า โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 40, 42, 44, 46, 48 และ 50 พบว่า ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 44 ก้อนตัวอย่างสามารถผ่านเกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ที่ 14.2 กก./ตร.ซม. แต่เมื่อปรับลดสัดส่วนปูนซีเมนต์เหลือร้อยละ 42 ค่ากำลังรับแรงอัดได้ 12.7 กก./ตร.ซม. ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีค่าเกิน 14 กก./ตร.ซม.

2) ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 โดยจากมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ก้อนตัวอย่างต้องมีค่าความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตัน/ลบ.ม. ซึ่งผลการทดสอบทุกๆ ก้อนตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นเกินมาตรฐานที่กำหนด โดยที่ในสัดส่วนปูนซีเมนต์ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ก้อนแข็งผ่านเกณฑ์กำลังรับแรงอัดในหัวข้อที่ผ่านมา (ร้อยละ 44) มีค่าความหนาแน่น 1.44 ตัน/ลบ.ม. การแปรสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพียงร้อยละ 2 มีผลต่อค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างน้อยมาก



รูปที่ 5.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างขี้เถ้าที่สัดส่วนผสมต่างๆ ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5.8 ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างขี้เถ้าที่สัดส่วนผสมต่างๆ ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

3) ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลาย

จากตารางที่ 5.7 พบว่า ค่า pH ของน้ำชะละลาย มีค่าอยู่ระหว่าง 10.3 ถึง 10.6 โดยเป็นผลมาจากการทดสอบการสกัดสารที่ใช้ตัวทำลายมีฤทธิ์เป็นกรด (pH = 6) โครงสร้างของปูนซีเมนต์ถูกบดทำลายจนสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกชะล้างออกมาพร้อมกับน้ำชะละลาย ค่า pH เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนปูนซีเมนต์จะทำให้ pH ของน้ำชะละลายเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 5.7 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

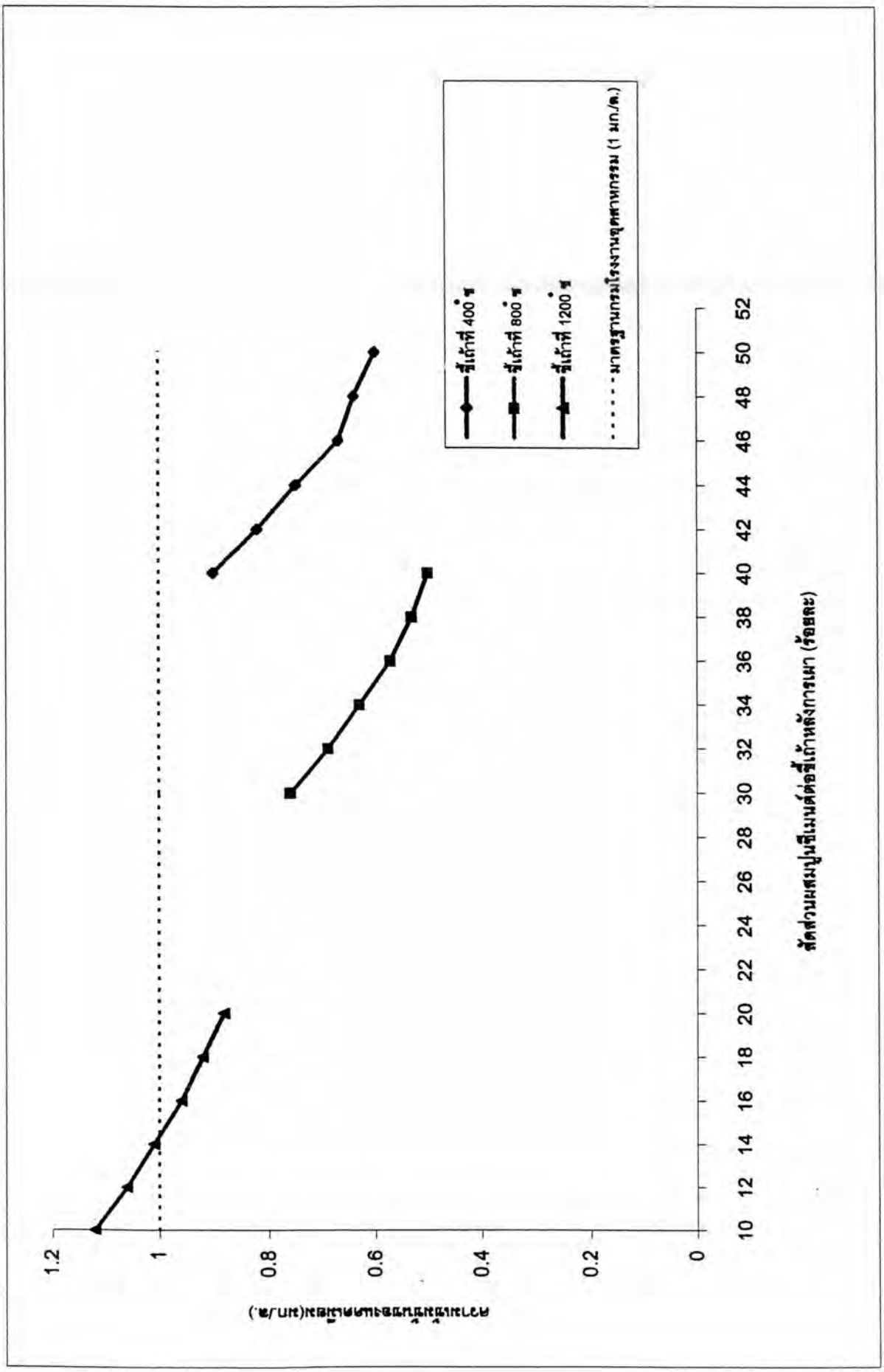
สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผา	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด(มก./ล)				
				อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ร้อยละ 40	11.5	1.40	10.3	<0.01	0.90	<0.2	0.10	3.20
ร้อยละ 42	12.7	1.42	10.4	<0.01	0.82	<0.2	0.09	3.10
ร้อยละ 44	14.2	1.44	10.4	<0.01	0.75	<0.2	0.09	2.90
ร้อยละ 46	16.8	1.45	10.5	<0.01	0.67	<0.2	0.09	2.60
ร้อยละ 48	19.5	1.47	10.5	<0.01	0.64	<0.2	0.09	2.40
ร้อยละ 50	22.6	1.48	10.6	<0.01	0.60	<0.2	0.08	2.10
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**1.04**	-	<5	<1	<5	<0.2	<5

- อาร์เซนิคและโครเมียม (As, Cr)

ปริมาณอาร์เซนิคและโครเมียมที่พบในน้ำชะละลายมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล.) สาเหตุเนื่องจากในขี้เถ้ามีปริมาณอาร์เซนิคและโครเมียมต่ำมาก โดยมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีอาร์เซนิคและโครเมียมในน้ำชะละลายอย่างละไม่เกิน 5 มก./ล.

- แคดเมียม (Cd)

จากรูปที่ 5.9 พบว่า การชะละลายแคดเมียมในก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนปูนซีเมนต์โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.64 มก./ล. ถึง 0.82 มก./ล. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ ไม่เกิน 1 มก./ล. และเมื่อสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 44 ปริมาณแคดเมียมถูกชะละลายออกมา 0.74 มก./ล.



รูปที่ 5.9 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมของน้ำชะละลายกอนตัวอย่างซี้เถ้าที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

- ปรอท (Hg)

การชะละลายของปรอทในก้อนตัวอย่างที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 44 พบปริมาณปรอทในน้ำชะละลายเท่ากับ 0.09 มก./ล. จากตารางที่ 5.7 การแปรเปลี่ยนส่วนผสมปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 2 พบว่าไม่มีผลต่อการชะละลายปรอทอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในขี้เถ้าหลังการเผามีปริมาณปรอทเหลืออยู่ต่ำกมาก ส่วนใหญ่ระเหยกลายเป็นไอในขณะทำการเผา โดยมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ไม่เกิน 0.2 มก./ล.

- ตะกั่ว (Pb)

จากตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.11 พบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนปูนซีเมนต์ โดยที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 44 พบปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลาย 2.90 มก./ล. ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่เกิน 5 มก./ล.

รายละเอียดสรุปผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.7

5.4.2 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

1) กำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 5.7 กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์สูงขึ้น โดยสัดส่วนปูนซีเมนต์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ก้อนตัวอย่างผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดคือ สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 34 ผ่านเกณฑ์ทดสอบกำลังที่ 14.4 กก./ตร.ซม. โดยที่สัดส่วนผสมร้อยละ 32 และ 36 วัดกำลังรับแรงอัดได้ 13.2 กก./ตร.ซม. และ 15.6 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

2) ความหนาแน่น

จากรูปที่ 5.8 ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยทุกก้อนตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

3) ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลาย

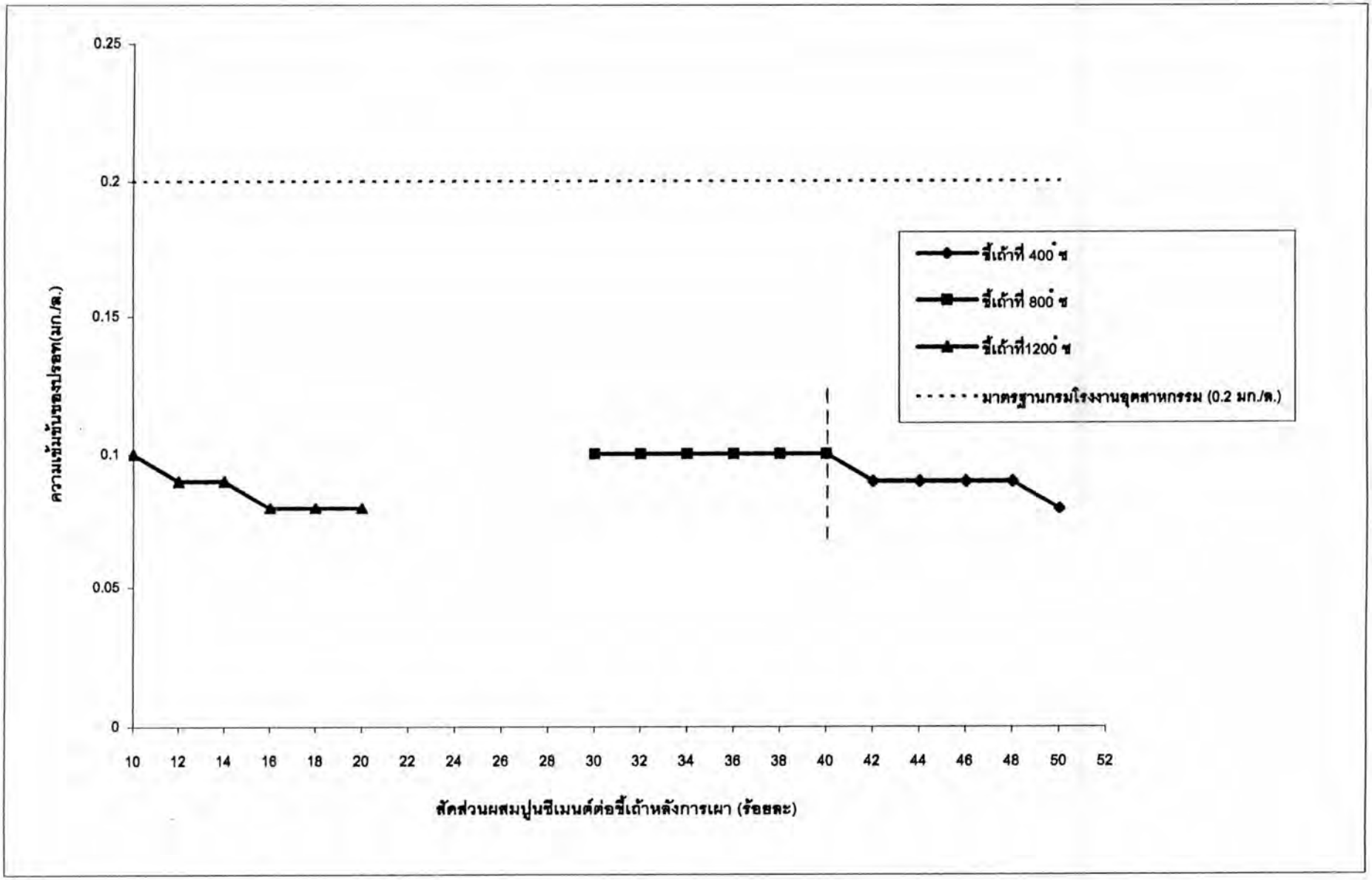
จากตารางที่ 5.8 ค่า pH ในน้ำชะละลายมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองอื่นๆ คือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนปูนซีเมนต์ จะทำให้ค่า pH ของน้ำชะละลายเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากสภาพความเป็นด่างของปูนซีเมนต์ที่ถูกชะละลายออกมา

- อาร์เซนิคและโครเมียม (As, Cr)

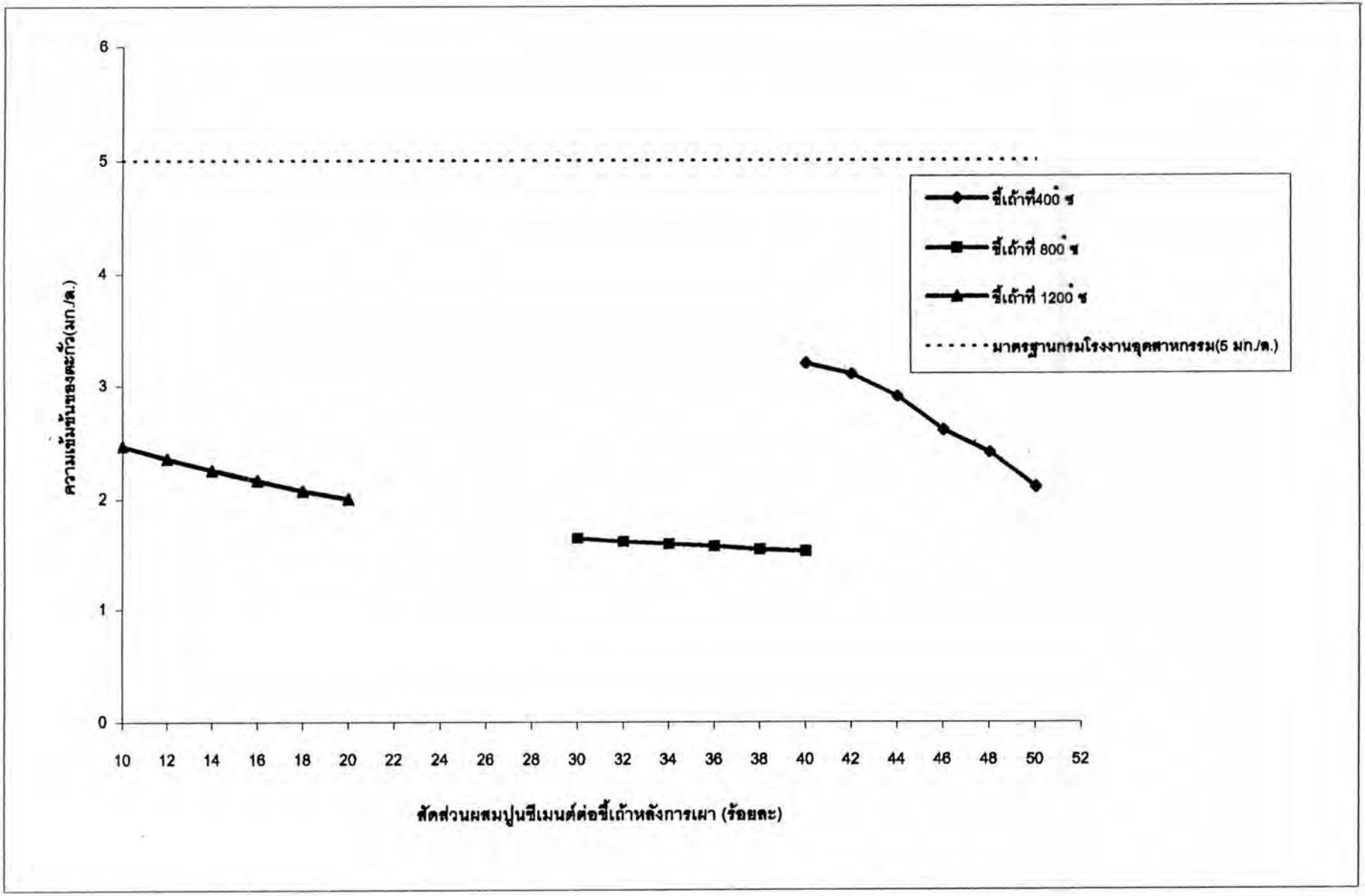
จากตารางที่ 5.8 ค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิคและโครเมียม มีค่าน้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล. เนื่องจากขี้เถ้ามีปริมาณอาร์เซนิคและโครเมียมอยู่ต่ำมาก

- แคดเมียม (Cd)

จากรูปที่ 5.9 ปริมาณแคดเมียมในน้ำชะละลายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยพบว่า ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าอยู่ระหว่าง



รูปที่ 5.10 ค่าความเข้มข้นของปรอทของน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างขี้เถ้าที่สัดส่วนผสมต่างๆ ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5.11 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วของน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างขี้เถ้าที่สัดส่วนผสมต่างๆ ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

0.50 มก./ล. ถึง 0.67 มก./ล. ซึ่งทุกก้อนตัวอย่างมีปริมาณแคดเมียมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ไม่เกิน 1 มก./ล.

- ปรอท (Hg)

จากรูปที่ 5.10 ค่าของปรอทที่ถูกชะละลายออกมามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อสัดส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะละลายของทุกก้อนตัวอย่างอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ที่ไม่เกิน 0.2 มก./ล.

- ตะกั่ว (Pb)

รูป 5.11 แสดงให้เห็นว่า ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกชะละลายออกมามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมก้อนตัวอย่าง โดยน้ำชะละลายของทุกก้อนตัวอย่างมีค่าตะกั่วผ่านเกณฑ์ที่กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ไม่เกิน 5 มก./ล.

5.4.3 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

1) กำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 5.7 เมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 16 ก้อนตัวอย่างสามารถผ่านเกณฑ์การทดสอบรับแรงอัดที่ 14.6 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 14 กก./ตร.ซม.

2) ค่าความหนาแน่น

จากรูปที่ 5.8 ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และพบว่า ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 1.04 ตัน/ลบ.ม.

3) ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลาย

จากตาราง 5.9 ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จาก 10.7 เป็น 11.2 เมื่อสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วย อันเป็นผลจากสภาพความเป็นด่างของปูนซีเมนต์ ทำให้ค่าพีเอชของน้ำชะละลายสูงขึ้นกว่าเดิม

- อาร์เซนิคและโครเมียม (As, Cr)

ค่าอาร์เซนิคและโครเมียมในน้ำชะละลาย มีค่าน้อยกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล. เนื่องจากในขี้เถ้ามีปริมาณอาร์เซนิคและโครเมียมในปริมาณที่ต่ำมาก ซึ่งน้ำชะละลายที่นำมาวิเคราะห์ทุกสัดส่วนผสมมีค่าอาร์เซนิคและโครเมียมอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด คือไม่เกิน 5 มก./ล.

- แคดเมียม (Cd)

จากรูปที่ 5.9 ปริมาณแคดเมียมในน้ำชะละลายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์จากมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีแคดเมียมได้

ไม่เกิน 1 มก./ล. พบว่าที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าร้อยละ 10, 12 และ 14 มีปริมาณแคดเมียมเกินค่ามาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ 1.12 มก./ล., 1.06 มก./ล. และ 1.01 มก./ล. ตามลำดับ แต่ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 16, 18 และ 20 ของน้ำหนักขี้เถ้า จะมีปริมาณแคดเมียมในน้ำชะละลายผ่านเกณฑ์ มาตรฐานที่ 0.96 มก./ล., 0.92 มก./ล., 0.88 มก./ล.

- ปรอท (Hg)

ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะละลายมีค่าอยู่ระหว่าง 0.08 มก./ล. ถึง 0.10 มก./ล. ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนด คือไม่เกิน 0.2 มก./ล.

- ตะกั่ว (Pb)

จากรูปที่ 5.11 ปริมาณตะกั่วที่ถูกชะละลายออกมาขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า ซึ่งเมื่อสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น อัตราการชะละลายตะกั่วจะลดลง โดยปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างทุกส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด คือไม่เกิน 5 มก./ล.

ตารางที่ 5.8 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผา	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด(มก./ล)				
				อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ร้อยละ 30	12.3	1.40	10.2	<0.01	0.76	<0.2	0.10	1.64
ร้อยละ 32	13.2	1.41	10.3	<0.01	0.69	<0.2	0.10	1.61
ร้อยละ 34	14.4	1.43	10.4	<0.01	0.63	<0.2	0.10	1.59
ร้อยละ 36	15.6	1.45	10.4	<0.01	0.57	<0.2	0.10	1.57
ร้อยละ 38	17.1	1.46	10.5	<0.01	0.53	<0.2	0.10	1.54
ร้อยละ 40	18.6	1.47	10.6	<0.01	0.50	<0.2	0.10	1.52
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**1.04**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

ตารางที่ 5.9 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200°ซ ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าหลังการเผา	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด(มก./ล)				
				อาร์เซนิค	แคดเมียม	โครเมียม	ปรอท	ตะกั่ว
ร้อยละ 10	6.2	1.28	10.7	<0.01	1.12	<0.2	0.10	2.46
ร้อยละ 12	9.5	1.29	10.8	<0.01	1.06	<0.2	0.09	2.35
ร้อยละ 14	12.4	1.30	10.8	<0.01	1.01	<0.2	0.09	2.25
ร้อยละ 16	14.6	1.31	10.9	<0.01	0.96	<0.2	0.08	2.16
ร้อยละ 18	16.6	1.33	11.1	<0.01	0.92	<0.2	0.08	2.07
ร้อยละ 20	18.6	1.35	11.2	<0.01	0.88	<0.2	0.08	2.00
เกณฑ์มาตรฐาน	**14**	**1.04**	**-**	**<5**	**<1**	**<5**	**<0.2**	**<5**

4) ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

จากการนำกากตะกอนน้ำมันดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ แล้วนำขี้เถ้ามาทำเสถียรด้วยวัสดุประสานปูนซีเมนต์ด้วยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 16 (ผลการทดสอบการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด) การคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากกากตะกอนดิบไปเป็นก้อนแข็งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ซม. พบว่า ปริมาตรเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.95 เท่า หรือ 95 เปอร์เซนต์

การคำนวณหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป จะแสดงไว้เพื่อเป็นการอ้างอิงเฉพาะตัวอย่างขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ เท่านั้น

5) ค่าความซึมน้ำได้

ผู้วิจัยเลือกทดสอบสมบัติความซึมผ่านของน้ำกับก้อนตัวอย่างขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ ซึ่งผ่านการทำเสถียรโดยปูนซีเมนต์ในสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้า เท่ากับร้อยละ 16 เพื่อเป็นกรณีตัวอย่างอ้างอิงในการทำวิจัย

จากการส่งก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกไปทดสอบหาความซึมน้ำได้โดยเครื่องทดสอบแบบ Triaxial test ของแผนกปฐพีวิทยา กองปฐพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วัดค่าเฉลี่ยได้ 4.828×10^{-7} ซม./วินาที ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ มีค่าไม่เกิน 1×10^{-6} ซม./วินาที (ใบรายงานผลอยู่ในภาคผนวก ข.)

5.5 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด จะทราบชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพและประหยัดที่สุดสำหรับใช้ในการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาทั้ง 3 อุณหภูมิ ให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้าย ในขั้นตอนนี้จะแสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบหลังผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว

5.5.1 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ

จากตารางที่ 5.7 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักหลังการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °ซ ด้วยปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับ ร้อยละ 44 สามารถลดปริมาณโลหะหนัก ในน้ำชะละลาย คือ แคดเมียม (Cd) ร้อยละ 76.1, โครเมียม (Cr) ร้อยละ 95.8, ปรอท (Hg) ร้อยละ 99.1, ตะกั่ว (Pb) ร้อยละ 84.5 ส่วนอาร์เซนิคนั้นไม่หาประสิทธิภาพในการกำจัด เนื่องจากไม่พบอาร์เซนิคในกากตะกอนน้ำมันดิบอยู่แล้ว

5.5.2 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

จากตารางที่ 5.8 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักหลังการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °ซ ด้วยปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับ ร้อยละ 34 สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย คือ แคดเมียม (Cd) ร้อยละ 76.1, โครเมียม (Cr) ร้อยละ 95.8, ปรอท (Hg) ร้อยละ 99.1, ตะกั่ว (Pb) ร้อยละ 84.5 ส่วนอาร์เซนิคนั้นไม่หาประสิทธิภาพในการกำจัด เนื่องจากไม่พบอาร์เซนิคในกากตะกอนน้ำมันดิบอยู่แล้ว

5.5.3 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

จากตารางที่ 5.9 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักหลังการทำเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ ด้วยปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 16 สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย คือ แคดเมียม (Cd) ร้อยละ 63.6, โครเมียม (Cr) ร้อยละ 95.8, ปรอท (Hg) ร้อยละ 99.3, ตะกั่ว (Pb) ร้อยละ 78.9 ส่วนอาร์เซนิคนั้นไม่หาประสิทธิภาพในการกำจัด เนื่องจากไม่พบอาร์เซนิคในกากตะกอนน้ำมันดิบอยู่แล้ว

สรุปผลจากการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแสดงไว้ในตาราง 5.10

ตารางที่ 5.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในการทำเสถียรกากตะกอนน้ำมันดิบด้วยวิธีการเผาแล้วทำให้เป็นก้อนแข็ง

วิธีการทำเสถียร	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (%)				
	As	Cd	Cr	Hg	Pb
การเผาที่อุณหภูมิ 400๐ ซ โดยใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 44	-	71.6	95.8	99.2	71.8
การเผาที่อุณหภูมิ 800๐ ซ โดยใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 34	-	76.1	95.8	99.1	84.5
การเผาที่อุณหภูมิ 1,200๐ ซ โดยใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 16	-	63.6	95.8	99.3	78.9

5.6 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบ

ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบสามารถจำแนกออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1) ค่าบริการขนส่งกากตะกอนน้ำมันดิบจากโรงกลั่น
2) ค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนน้ำมันดิบ
3) ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนแข็ง
4) ค่าขนส่งและขนย้ายก้อนตะกอนแข็งไปยังหลุมฝังกลบ
5) ค่าฝังกลบ

5.6.1 ค่าบริการขนส่งกากตะกอนน้ำมันดิบจากโรงกลั่น

ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมฯ แสมดำ จะมีบริการขนส่งของเสียจากแหล่งกำเนิด โดยคิดค่าขนส่งประมาณ 2.5 บาทต่อตันกิโลเมตร ซึ่งระยะทางจากโรงกลั่นฯ ถึงศูนย์กำจัดกากฯ เป็นระยะทางประมาณ 50 กิโลเมตร ดังนั้นค่าขนส่งรวมขาไป-กลับ เท่ากับ 250 บาทต่อตัน

5.6.2 ค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนน้ำมันดิบ

เนื่องจากการเผากากตะกอนน้ำมันดิบในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้เตาเผาชนิดเชื้อเพลิงแก๊สจากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ โดยไม่ได้เสียค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนเลย รวมถึงเตาเผากากของเสียของศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมฯ แสมดำยังดำเนินการสร้างไม่แล้วเสร็จและยังไม่มีการกำหนดราคาในการให้บริการเผาของเสีย จึงขอใช้อัตราการเผาของเสียของนิคมอุตสาหกรรมบางพลี ซึ่งคิดอัตราค่าเผาเท่ากับ 3,800 บาทต่อของเสีย 1 ตัน ที่อุณหภูมิการเผาประมาณ 400๐ ซ อัตรา 4,500 บาทต่อตัน และ 6,000 บาทต่อตัน สำหรับการเผาของเสียที่อุณหภูมิ 800๐ ซ และ 1,200๐ ซ ตามลำดับ

5.6.3 ค่าใช้จ่ายในการทำขี้เถ้าให้เป็นก้อนแข็ง

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400°ซ

จากการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 400° ซ เป็นก้อนได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพที่สุด โดยใช้สัดส่วนผสมร้อยละ 44 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการทำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ ให้เป็นก้อนตะกอนแข็งนั้น จะเสียค่าใช้จ่ายแยกเป็นค่าวัสดุปูนซีเมนต์ 440 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ และค่าแรงที่ใช้เท่ากับ 88 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ รวมค่าใช้จ่ายในการทำให้กากตะกอนแข็งเท่ากับ 528 บาทต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ 1 ตัน

2) ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 800°ซ

จากการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 800° ซ เป็นก้อนได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพที่สุด โดยใช้สัดส่วนผสมร้อยละ 34 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการทำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ ให้เป็นก้อนตะกอนแข็งนั้น จะเสียค่าใช้จ่ายแยกเป็นค่าวัสดุปูนซีเมนต์ 306 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ และค่าแรงที่ใช้เท่ากับ 61 บาทต่อตัน ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ รวมค่าใช้จ่ายในการทำให้กากตะกอนแข็งเท่ากับ 367 บาทต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ 1 ตัน

3) ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 1,200°ซ

จากการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง สามารถทำให้ขี้เถ้าหลังการเผาที่ 1,200° ซ เป็นก้อนได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพที่สุด โดยใช้สัดส่วนผสมร้อยละ 16 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการทำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ ให้เป็นก้อนตะกอนแข็งนั้น จะเสียค่าใช้จ่ายแยกเป็นค่าวัสดุปูนซีเมนต์ 128 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ และค่าแรงที่ใช้เท่ากับ 26 บาทต่อตัน ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ รวมค่าใช้จ่ายในการทำให้กากตะกอนแข็งเท่ากับ 154 บาท ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ 1 ตัน

5.6.4 ค่าขนส่งและขนย้ายไปยังหลุมฝังกลบ

ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมฯ แสมดำ รับขนส่งและขนถ่ายก้อนตะกอนแข็งไปยังหลุมฝังกลบของศูนย์ฯ โดยคิดค่าขนส่ง 140 บาทต่อตัน และค่าขนย้าย 250 บาทต่อตัน รวม 390 บาทต่อตัน ดังนั้น สำหรับขี้เถ้าที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400°, 800° และ 1,200° ซ และนำมาทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน จะเสียค่าใช้จ่ายเพื่อขนถ่ายไปยังหลุมฝังกลบเท่ากับ 280.8 บาท, 234 บาท และ 179.4 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ ตามลำดับ

5.6.5 ค่าฝังกลบ

ในส่วนนี้ทางศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมฯ แสมดำ จะคิดเฉพาะค่าแรงในการขุดหลุมเท่านั้น ส่วนค่าที่ดินนั้นไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ สำหรับขี้เถ้าที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐, 1,200๐ ซ และนำมาทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ตามสัดส่วนที่ผ่านการทดสอบส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้น จะเสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบเท่ากับ 324 บาท, 270 บาท และ 207 บาทต่อตันของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ ตามลำดับ

5.6.6 สรุปการประมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบด้วยวิธีการเผาแล้วทำให้เป็นก้อนแข็ง

- อุณหภูมิที่ใช้เผากากตะกอนน้ำมันดิบ 400๐ ซ
  - ค่าขนส่งกากตะกอนน้ำมันดิบจากโรงกลั่น 250 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนน้ำมันดิบ 3,800 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนตะกอนแข็ง 528 บาทต่อตัน
  - ค่าขนส่งและขนย้ายก้อนตะกอนแข็งไปฝังกลบ 280.8 บาทต่อตัน
  - ค่าฝังกลบ 324 บาทต่อตัน

รวมเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400๐ ซ แล้วทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ เท่ากับ 5,182 บาทต่อตัน ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ

- อุณหภูมิที่ใช้เผากากตะกอนน้ำมันดิบ 800๐ ซ
  - ค่าขนส่งกากตะกอนน้ำมันดิบจากโรงกลั่น 250 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนน้ำมันดิบ 4,500 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนตะกอนแข็ง 367 บาทต่อตัน
  - ค่าขนส่งและขนย้ายก้อนตะกอนแข็งไปฝังกลบ 234 บาทต่อตัน
  - ค่าฝังกลบ 270 บาทต่อตัน

รวมเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800๐ ซ แล้วทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ เท่ากับ 5,621 บาทต่อตัน ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ

- อุณหภูมิที่ใช้เผากากตะกอนน้ำมันดิบ 1,200๐ ซ
  - ค่าขนส่งกากตะกอนน้ำมันดิบจากโรงกลั่น 250 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการเผากากตะกอนน้ำมันดิบ 6,000 บาทต่อตัน
  - ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนตะกอนแข็ง 154 บาทต่อตัน
  - ค่าขนส่งและขนย้ายก้อนตะกอนแข็งไปฝังกลบ 179.4 บาทต่อตัน
  - ค่าฝังกลบ 207 บาทต่อตัน

รวมเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1,200๐ ซ แล้วทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ เท่ากับ 6,790 บาทต่อตัน ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ

ตารางที่ 5.11 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา	ค่าบริการขนส่งจากโรงงาน (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)	ค่าใช้จ่ายในการเผา (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)	ค่าทำให้เป็นก้อน (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)	ค่าขนส่งและขนย้ายไปหลุมฝังกลบ (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)	ค่าฝังกลบ (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)	ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาทต่อตันกากตะกอนน้ำมันดิบ)
400°ซ	250	3,800	528	280	324	5,182
800°ซ	250	4,500	367	234	270	5,621
1,200°ซ	250	6,000	154	179	207	6,790

(รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.)

5.7 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพอสรุปได้ว่า

5.7.1 กากตะกอนน้ำมันดิบ

1) กากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณน้ำบรรจุร้อยละ 8.6 ปริมาณน้ำมันและไขมันร้อยละ 58.6 ของน้ำหนักแห้ง หรือ 56 ของน้ำหนักเปียก ความหนาแน่นรวม 1.03 ตัน/ลบ.ม ส่วนในน้ำชะละลายของกากตะกอนน้ำมันดิบมีค่าพีเอชประมาณ 8.6 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคต่ำกว่า 0.01 มก./ล. ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 2.64 มก./ล. ความเข้มข้นของโครเมียม เท่ากับ 4.80 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 10.95 มก./ล. และความเข้มข้นของตะกั่วต่ำกว่า 10.28 มก./ล. ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียม, ปรอท และตะกั่วเกินค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 1 มก./ล., 0.2 มก./ล. และ 5 มก./ล. ตามลำดับ

2) ในขั้นตอนการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น ได้นำกากตะกอนน้ำมันดิบมาผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ พบว่า ไม่สามารถก่อตัวเป็นก้อนแข็งได้ ทั้งนี้เนื่องจากในกากตะกอนน้ำมันดิบมีปริมาณน้ำมันและไขมันซึ่งเป็นสารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางปฏิกริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ ดังนั้น จึงทดลองเพิ่มวัสดุประสานในส่วนผสม จนกระทั่งสามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบก่อตัวเป็นก้อนแข็งและผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 14 กก./ตร.ซม. ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ค่า 15.6 กก./ตร.ซม. และ 15.0 กก./ตร.ซม. เมื่อใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนน้ำมันดิบ และสัดส่วนผสมปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนน้ำมันดิบเท่ากับร้อยละ 110 และ 140 ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานทั้ง 3 ชนิดเป็นส่วนผสม พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียม, ปรอท และตะกั่ว ก็ยังเกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ดังนั้น วัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ทำเสถียรกากตะกอนน้ำมันดิบ

5.7.2 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°ซ มีปริมาณน้ำบรรจุร้อยละ 1.50 ปริมาณน้ำมันและไขมันอยู่เพียงร้อยละ 8.26 ของน้ำหนักแห้ง หรือร้อยละ 7.98 ของน้ำหนักเปียก ความหนาแน่นรวม 0.88 ตัน/ลบ.ม. ส่วนในน้ำชะละลายของขี้เถ้ามีค่าพีเอชเท่ากับ 8.23 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคต่ำกว่า 0.01 มก./ล. ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 2.20 มก./ล. ความเข้มข้นของโครเมียมน้อยกว่า 0.2 มก./ล. และความเข้มข้นของปรอท เท่ากับ 0.16 มก./ล. และความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 6.20 มก./ล. ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วเกินมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ค่า 1 มก./ล. และ 5 มก./ล.

2) การทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น โดยการนำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ มาผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า พบว่า วัสดุ-ประสานที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ก้อนตัวอย่างผ่านเกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย คือ ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 50

3) จากการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่สัดส่วนผสม ร้อยละ 42, 44, 46 และ 48 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า พบว่า ในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าพีเอชในช่วง 10.4 ถึง 10.5 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคและโครเมียมมีค่าต่ำกว่าความสามารถของเครื่องมือ คือ 0.01 และ 0.2 มก./ล. ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าอยู่ในช่วง 0.64 ถึง 0.82 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอท มีค่าเท่ากับ 0.09 มก./ล. ส่วนความเข้มข้นของตะกั่ว มีค่าอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 3.10 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ร้อยละ 44 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า เป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดในการเสถียรขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ ให้เป็นก้อนแข็ง คือสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. (ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน) ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานการชะละลายโลหะหนักของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

5.7.3 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °ซ มีปริมาณน้ำบรรจุร้อยละ 0.55 ปริมาณน้ำมันและไขมันอยู่เพียงร้อยละ 0.80 ของน้ำหนักแห้ง หรือร้อยละ 0.78 ของน้ำหนักเปียก ความหนาแน่นรวม 0.64 ตัน/ลบ.ม. ส่วนในน้ำสกัดของขี้เถ้ามีค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคและโครเมียมต่ำกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล. ตามลำดับ ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 1.82 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 0.14 มก./ล. และความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 3.4 มก./ล. สรุปว่ามีปริมาณแคดเมียมเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดที่ค่า 1 มก./ล. จัดว่าขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ เป็นของเสียอันตรายที่ต้องผ่านการบำบัดก่อนนำไปกำจัดตามวิธีที่ได้มาตรฐานต่อไป

2) ในขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น ได้นำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°ซ มาผสมกับวัสดุประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า พบว่า วัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เกณฑ์การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบโลหะหนักในน้ำชะละลาย คือ ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 40 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า

3) สำหรับการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่สัดส่วนผสมร้อยละ 32, 34, 36 และ 38 ต่อน้ำหนักเถ้า พบว่า ในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าพีเอชในช่วง 10.3 ถึง 10.5 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคและโครเมียมมีค่าต่ำกว่าความสามารถของเครื่องมือ คือ 0.01 และ 0.2 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำสกัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.53 ถึง 0.69 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอทมีค่า 0.10 ส่วนความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าอยู่ระหว่าง 1.54 ถึง 1.61 นอกจากนั้นสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 34 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดในการทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย

5.7.4 ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ

1) ขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °ซ มีปริมาณน้ำบรรจุร้อยละ 0.06 ปริมาณน้ำมันและไขมันอยู่เพียงร้อยละ 0.06 ของน้ำหนักแห้ง หรือร้อยละ 0.06 ของน้ำหนักเปียก ความหนาแน่นรวม 0.52 ตัน/ลบ.ม. ส่วนในน้ำชะละลายของขี้เถ้ามีค่าพีเอชเท่ากับ 8.9 ความเข้มข้นของอาร์เซนิคและแคดเมียมต่ำกว่า 0.01 มก./ล. และ 0.2 มก./ล. ความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 1.42 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 0.10 มก./ล. และความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 2.80 มก./ล. โดยมีค่าแคดเมียมเกินมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ค่า 1 มก./ล. ดังนั้นจัดว่าขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ ยังจัดว่าเป็นของเสียอันตรายซึ่งต้องนำไปบำบัดก่อนกำจัดในขั้นตอนต่อไป

2) จากขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น โดยการนำขี้เถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°ซ มาผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า พบว่า วัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายคือ ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักเถ้า

3) จากการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่สัดส่วนผสม ร้อยละ 12, 14, 16 และ 18 ต่อน้ำหนักขี้เถ้า พบว่า ในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าพีเอชในช่วง 10.8 ถึง 11 ความเข้มข้นของอาร์เซนิค และโครเมียมในน้ำชะละลาย มีค่าต่ำกว่าความสามารถในการวัดของเครื่องมือ คือ 0.01 และ 0.2 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะละลายมีค่าอยู่ในช่วง 0.92 ถึง 1.06 มก./ล. ความเข้มข้นของปรอทมีค่าอยู่ในช่วง 0.08 ถึง 0.09 มก./ล. และค่าความเข้มข้นของตะกั่ว มีค่าอยู่ระหว่าง 2.07 และ 2.35 มก./ล. นอกจากนั้นปูนซีเมนต์ร้อยละ 16 ต่อน้ำหนักขี้เถ้าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดในการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดและ

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย และเมื่อทดลองหาความหนาแน่นของก้อนแข็งที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 1.29 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ทางราชการกำหนดคือ 1.04 ตัน/ลบ.ซม.

5.8 การวิจารณ์ผลการทดลอง

5.8.1 กากตะกอนน้ำมันดิบ เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณน้ำมันปนอยู่สูง จากการวิจัยพบว่า สามารถทำให้เป็นก้อนแข็งได้โดยใช้วัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์ หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) แต่ต้องใช้สัดส่วนถึงร้อยละ 110 และร้อยละ 140 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์น้ำชะละลายก้อนตัวอย่างตามวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมามีปริมาณและลักษณะการชะละลายคล้ายกับโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบ และยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลายของกรมโรงงานอุตสาหกรรมด้วย

5.8.2 ปริมาณน้ำมันในกากตะกอนมีผลขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโลหะหนักในกากตะกอนกับสารประกอบไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ (สุวรรณา, 2540) ทำให้ก้อนตัวอย่างที่แข็งตัวแล้วนั้น ไม่เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนแต่อย่างใด เหตุที่วัสดุประสานสามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบแข็งตัวได้ น่าจะเกิดจากการที่อนุภาคของซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณมากพอที่จะล้อมรอบอนุภาคกากตะกอนน้ำมันดิบจนเกิดการประสานตัวกันขึ้นห่อหุ้มกากตะกอนไว้ภายใน ดังนั้นเมื่อทดสอบการชะละลายโครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกบดทำลายในขณะวัดผลโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนน้ำมันดิบ จึงถูกชะละลายออกมา

5.8.3 การทำเสถียรโลหะหนักในกากของเสีย ตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ก.) มีข้อแนะนำให้เติมปูนขาวในกากตะกอนของเสียอันตรายก่อนนำไปกำจัด แต่จากการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเบื้องต้น ปรากฏว่า เมื่อใช้ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสานผสมกับกากตะกอนน้ำมันดิบหรือขี้เถ้ากับน้ำแล้ว ไม่สามารถทำให้กากตะกอนหรือขี้เถ้าจับตัวกันเป็นก้อนแข็งได้

5.8.4 จากการเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุประสานในการทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนนั้น พบว่า

- ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่หาง่าย ราคาไม่แพง มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรโลหะหนักได้ดี และยังให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุดในบรรดาวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด
- ปูนขาวดิบ สามารถทำเสถียรโลหะหนักแคดเมียมในขี้เถ้าหลังการเผาทั้งที่อุณหภูมิ 400๐, 800๐ และ 1,200๐ ซ ได้ดี แต่สำหรับโลหะหนักตัวอื่นๆ ปูนขาวดิบยังเป็นวัสดุประสานที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรโลหะหนักในกากตะกอนน้ำมันดิบ ซึ่งนอกจากนี้ปูนขาวดิบยังไม่สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้อีกด้วย

- ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) มีความสามารถในการทำเสถียรโลหะหนักได้ดี และดีกว่าการใช้ปูนขาวดิบหรือปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่ขณะเดียวกันก็ให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

5.8.5 จากผลการวิจัยพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของปูนซีเมนต์หรือปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ในก้อนตัวอย่าง จะทำให้อัตราการชะละลายของโลหะหนักในก้อนตัวอย่างมีค่าลดลง แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนน้ำมันดิบหรือขี้เถ้าในส่วนผสมของก้อนตัวอย่างจะพบว่า ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.8.6 จากการวิจัยนำกากตะกอนน้ำมันดิบไปเผาโดยตรงนั้น พบว่าขี้เถ้าที่ได้ยังมีโลหะหนักบางตัวดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเกินมาตรฐานอยู่ แต่หากนำไปเผารวมกับของเสียขยะ หรือหินปูน โดยใช้สัดส่วนที่เหมาะสม อาจเป็นผลทำให้ขี้เถ้าที่ได้มีโลหะหนักต่างๆ ลดลงจนขี้เถ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของทางราชการ หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้