

การศึกษาการทำให้กากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันเป็นก้อนแข็ง ด้วยซีเมนต์และวัสดุผสมต่างๆ

วัชรภรณ์ สุนสิน¹ และ วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาวิธีการบำบัดกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นน้ำมันโดยใช้วิธีการหล่อเป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ (P) และวัสดุผสมต่างๆ ได้แก่ เถ้าลอยลิกไนต์ (F) ปูนขาว (L) และ หินดินเบา (D) จากการวิเคราะห์พบว่าในกากตะกอนมีปริมาณน้ำมัน 30.56 % โดยน้ำหนัก และมีความเข้มข้นของ โลหะหนัก สังกะสี, ตะกั่ว, แคดเมียม, นิกเกิล และโครเมียมที่ 9.27, 18.55, 0.20, 5.46 และ 21.20 มก. ต่อลิตร ตามลำดับ น้ำมันปนเปื้อนในกากตะกอนปริมาณสูงเป็นตัวขัดขวางการก่อตัวและการพัฒนาความสามารถรับแรงอัดของ ปูนซีเมนต์ จึงได้ใช้เฮกเซนทำการสกัดแยกน้ำมันออกจากกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันให้ลดลงเหลือ 15.21% โดยน้ำหนัก เมื่อนำกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและกากตะกอนที่แยกน้ำมันออกไปแล้วส่วนหนึ่ง หล่อเป็นก้อนแข็งโดยใช้ ปูนซีเมนต์ และวัสดุผสมเถ้าลอยลิกไนต์, ปูนขาว และหินดินเบา เปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งซึ่งไม่มีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน ผลการทดลองปรากฏว่า ก้อนหล่อแข็งซึ่งไม่มีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันแบบ PF จะให้ความสามารถรับแรงอัดสูงที่สุด 270 กก. ต่อ ซม.² ส่วนแบบ PFL, PLD และ PFLD ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดใกล้เคียงกันประมาณ 80 กก. ต่อ ซม.² การหล่อแข็งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและกากตะกอนที่แยกน้ำมันออกแล้ว พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีส่วนผสมแบบ PF ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดสูงที่สุดประมาณ 150-200 กก. ต่อ ซม.² ส่วนแบบ PFL, PLD และ PFLD มีค่าความสามารถรับแรงอัดสูงมากกว่า 3.5 กก. ต่อ ซม.² เกินกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 และจากการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักและน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งทั้ง 4 แบบ พบว่ามีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน EPA

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

A Study of Solidification of Oily Sludge with Cement and Binding Agents

Vacharaporn Soonsin¹ and Virote Boonamnuayvitaya²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

In this work we studied the treatment of oily sludge, waste from petroleum refinery, by solidification method using cement and other binding materials which were lignite fly ash (F), lime (L) and diatomaceous earth (D). The oil content was 30.56 wt% and the concentrations of heavy metals: zinc, lead, cadmium, nickel and chromium were 9.27, 18.55, 0.20, 5.46 and 21.20 ppm respectively. Since high content of oil in sludge affected the setting and the development characteristics of concrete, therefore we extracted some oil with hexane to reduce the content to 15.21wt%. Oily sludge and partially extracted oily sludge were subjected to solidification with cement (P) and other combination of binding agents. The results demonstrated that solidified materials without oily sludge, the combination of PF yielded the highest compress strength at 270 kg/cm², while the other combinations of PFL, PLD and PFLD yielded almost the same value of ca 80 kg/cm². Solidified materials with oily sludge and with partially extracted sludge yielded the compress strength ca 150-200 kg/cm², while the other combinations of PFL, PLD and PFLD yielded compress strength over 3.5 kg/cm², the standard set by the Notification of Ministry of Industrial No. 6. Also the heavy metals and oil released from the solidified materials of oily sludge met the EPA standard.

¹ Graduate Student, Department of Chemical Engineering.

² Associate Professor, Department of Chemical Engineering.

1. บทนำ

กากตะกอนชั้นปฐมภูมิของการกลั่นปิโตรเลียม จัดเป็นสิ่งปฏิภูลหรือของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 เรื่อง กำหนดวิธีการกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว [1] ซึ่งมีระบูกากตะกอนไว้หลายประเภท ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำจัดกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันที่เกิดจากหน่วยบำบัดน้ำเสียในส่วนการบำบัดทางเคมี เนื่องจากกากตะกอนในส่วนดังกล่าวมีน้ำมันและโลหะหนักในปริมาณมาก ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด วิธีการกำจัดกากของเสียนี้โดยทั่วไปมักจะนำไปเผาด้วยเตาเผาที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่มีการลงทุนค่อนข้างสูงทั้งในด้านการก่อสร้างและการดำเนินการหรือทำการส่งกากของเสียไปกำจัดที่ศูนย์กำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมหรือนำไปเผาในเตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) ของโรงงานซีเมนต์ ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งกากของเสียและอาจทำให้เกิดปัญหาการรั่วไหลและการแพร่กระจายของกากของเสียอันตรายระหว่างการขนส่งได้ การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง (solidification of hazardous waste) [2] เป็นวิธีการหนึ่งที่พัฒนาขึ้นโดยการเติมสารบางชนิดลงในของเสีย อาทิ ปูนซีเมนต์ ทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) [3] ทั้งนี้ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพื่อให้ได้ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสมบัติทางกายภาพด้านความคงตัวมากขึ้น ซึ่งทำให้พร้อมที่จะจัดการหรือขนส่งกากของเสียนั้นต่อไป

งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการหล่อเป็นก้อนแข็ง (solidification) มาใช้กำจัดกากตะกอน โดยใช้ซีเมนต์และวัสดุผสมอื่นๆ ได้แก่ แก้วลอยลิกไนต์ ปูนขาว และหินดินเบา เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการตรึงสารอินทรีย์ประเภทน้ำมันและโลหะหนัก ก่อนที่จะนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย วิธีนี้จัดเป็นวิธีการกำจัดของเสียแบบง่าย สามารถจัดเก็บเป็นระเบียบได้ไม่ยุ่งยาก เป็นการกำจัดที่แหล่งกำเนิดของเสีย ซึ่งจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งกากของเสียอันตรายไปยังแหล่งบริการกำจัดของเสีย นอกจากนี้ก้อนหล่อแข็งที่ได้อาจยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ เช่น นำไปใช้ในการถมที่ดิน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยและป้องกันการรั่วไหลของสารอันตรายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ในขณะที่นำก้อนหล่อแข็งไปจัดเก็บหรือทำการฝังกลบแบบปลอดภัย จึงต้องทำการทดสอบความสามารถรับแรงอัดและการชะละลายของสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อมให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด

2. วิธีการทดลอง

การศึกษาสมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน (oily sludge)

กากตะกอนน้ำมันในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด ซึ่งเป็นกากตะกอนจากหน่วย dissolved air flotation ในส่วนของกระบวนการบำบัดทางเคมี

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) ใช้วิธีห่าน้ำหนักตะกอนที่เหลือหลังทำการระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ปริมาณความชื้น (moisture content) ใช้วิธีหาปริมาณน้ำที่หายไปหลังทำการระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 105°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ปริมาณน้ำมันในกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน (oil content) ใช้วิธีการสกัดโดยใช้เฮกเซนด้วยเครื่อง Soxhlet ยี่ห้อ Tecator รุ่น Soxtec System HT2 1045 ตามวิธีตามมาตรฐาน EPA SW-846 METHOD 1330 : OILY WASTE EXTRACTION PROCEDURE [4]

ปริมาณโลหะหนัก (heavy metal content) ได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิลและโครเมียม ใช้วิธี ashing and flame analysis [5] และวิเคราะห์โดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น Z-8270

วิธีสกัดแยกน้ำมันออกจากกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากปริมาณน้ำมันในกากตะกอนมีปริมาณสูง ซึ่งเป็นปัญหาของการทำให้เป็นก้อนแข็ง จึงได้สกัดน้ำมันส่วนหนึ่งออกจากกากตะกอนก่อนนำไปทำให้เป็นก้อนแข็ง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเวลาทำให้เป็นก้อน โดยใช้เฮกเซนเป็นสารสกัดด้วยอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม ระหว่างปริมาณกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและปริมาณเฮกเซนที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 5 กิโลกรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการสกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิ 68°ซ

การทำอัตราส่วนของวัสดุผสมที่เหมาะสม

ในขั้นตอนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมหลัก ผสมกับวัสดุอื่นๆ ได้แก่ ถ้ำลอยลิกไนต์, ปูนขาว และหินดินเบา ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยกำหนดให้อัตราส่วนของน้ำต่อตัวผสม (Ratio W/S) ที่ให้ค่าการไหล (flow) อยู่ในช่วง 110±5 [-] ด้วยโต๊ะทดสอบการไหลแปรตามมาตรฐาน ASTM C203-90 [6] หล่อเป็นก้อนตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม.³ ตามมาตรฐาน ASTM C109-90 [7] และวัดความสามารถรับแรงอัดของวัสดุผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ที่อายุของก้อนตัวอย่าง 28 วัน

การศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำให้กากตะกอนเป็นก้อนแข็ง

ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุผสมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ได้คือ

ปูนซีเมนต์ : ถ้ำลอยลิกไนต์ (PF)	=	1 : 2
ปูนซีเมนต์ : ถ้ำลอยลิกไนต์ : ปูนขาว (PFL)	=	1 : 2 : 4
ปูนซีเมนต์ : ปูนขาว : หินดินเบา (FLD)	=	1 : 2 : 2
ปูนซีเมนต์ : ถ้ำลอยลิกไนต์ : ปูนขาว : หินดินเบา (PFLD)	=	1 : 2 : 2 : 2

หล่อตัวอย่างของก้อนแข็งโดยแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- (1) แบบควบคุมซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่มีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน
- (2) แบบผสมตะกอนปนเปื้อนน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุผสม
- (3) แบบผสมตะกอนที่สกัดน้ำมันออกไปแล้วบางส่วนในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุผสม

จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบความสามารถรับแรงอัดที่อายุของก้อนตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาการพัฒนาของความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อายุต่างๆ ของก้อนหล่อแข็ง

การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็ง

ทำการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งที่มีอายุของก้อนตัวอย่างเป็น 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ตรวจวัดค่าการชะละลายของโลหะหนัก สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และโครเมียม (Cr) ตามมาตรฐาน Extraction Procedure Toxicity Test [5] วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ค่ามาตรฐานความเป็นพิษของโลหะหนักตามมาตรฐาน EPA [8] กำหนดคือ Zn มีค่าไม่เกิน 5.0 มก. ต่อลิตร, Pb มีค่าไม่เกิน 0.5 มก. ต่อลิตร, Cd มีค่าไม่เกิน 0.1 มก. ต่อลิตร, Ni มีค่าไม่เกิน 0.5 มก. ต่อลิตร และ Cr มีค่าไม่เกิน 0.5 มก. ต่อลิตร

การทดสอบการชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

ทำการวิเคราะห์การชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็ง โดยนำก้อนตัวอย่างหล่อแข็งที่มีอายุของก้อนตัวอย่างเป็น 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมตรี โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ 2850 ซม.⁻¹ ทำการเตรียมตัวอย่างโดยปรับสภาพของน้ำให้มี pH ต่ำกว่า 2 และทำการสกัดน้ำมันด้วยเฮกเซน จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรดของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ ทั้งนี้ค่าความเป็นพิษของน้ำมัน ต้องมีค่าไม่เกิน 10.0 มก.ต่อลิตร ตามมาตรฐาน EPA [8]

3. ผลการทดลอง

คุณสมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

กากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันได้มาจากกระบวนการ dissolved air flotation ในส่วนของการบำบัดทางเคมี มีลักษณะเป็นกากตะกอนสีดำ มีกลิ่นเหม็นของน้ำมัน นำมาวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบ (แสดงในตารางที่ 1) พบว่าปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 5 ชนิดมีอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน [9]

สำหรับปริมาณน้ำมันในตะกอนหลังจากสกัดน้ำมันออกไปบางส่วนพบว่า น้ำมันลดลงจากร้อยละ 30.56 เป็น 15.21 และความเข้มข้นโลหะหนักก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากน้ำมันบางส่วนถูกสกัดออกไป

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและค่ามาตรฐานน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน [9]

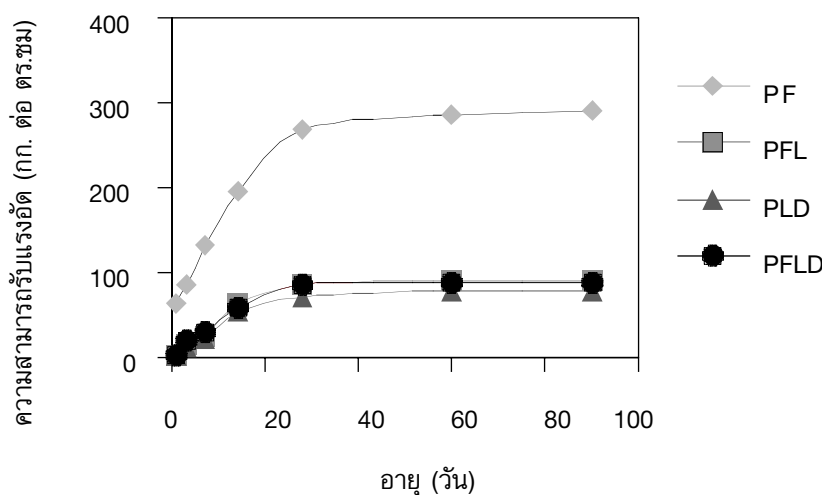
		มาตรฐานน้ำทิ้ง [9]	กากตะกอนปนเปื้อน น้ำมัน	กากตะกอนสกัดน้ำมัน ออกบางส่วน
ปริมาณของแข็งทั้งหมด		ไม่เกิน 3000 มก. ต่อลิตร	33.83 %โดยน้ำหนัก	-
ความชื้น		-	35.61 %โดยน้ำหนัก	-
พีเอช		5.5-9.0	6.8-7.2	6.8-7.2
น้ำมัน		ไม่เกิน 5.0 มก. ต่อลิตร	297 กรัมต่อลิตร (30.56 %โดยน้ำหนัก)	147 กรัมต่อลิตร (15.21 %โดยน้ำหนัก)
โลหะหนัก	สังกะสี	ไม่เกิน 5.0 มก. ต่อลิตร	9.27 มก. ต่อลิตร	10.30 มก. ต่อลิตร
	ตะกั่ว	ไม่เกิน 0.2 มก. ต่อลิตร	18.55 มก. ต่อลิตร	19.27 มก. ต่อลิตร
	แคดเมียม	ไม่เกิน 0.03 มก. ต่อลิตร	0.20 มก. ต่อลิตร	0.30 มก. ต่อลิตร
	นิกเกิล	ไม่เกิน 1.0 มก. ต่อลิตร	5.46 มก. ต่อลิตร	6.81 มก. ต่อลิตร
	โครเมียม	ไม่เกิน 0.25 มก. ต่อลิตร	21.20 มก. ต่อลิตร	23.26 มก. ต่อลิตร

อัตราส่วนของวัสดุผสมที่เหมาะสม

วัสดุผสมที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ (P) เถ้าลอยลิกไนต์ (F) หินดินเบา (D) และปูนขาว (L) ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อเป็นก้อนแข็ง โดยหาอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผสม เพื่อให้ได้ค่าการไหล อยู่ในช่วง 110 ± 5 [-] แล้วนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดที่อายุของก้อนตัวอย่าง 28 วัน ก้อนตัวอย่างหล่อแข็งที่มีส่วนผสมเป็นปูนซีเมนต์ : เถ้าลอยลิกไนต์ (PF) = 1 : 2 มีความสามารถรับแรงอัด 253.03 กก. ต่อ ซม.², ปูนซีเมนต์ : เถ้าลอยลิกไนต์ : ปูนขาว (PFL) = 1 : 2 : 4 มีความสามารถรับแรงอัด 85.14 กก. ต่อ ซม.², ปูนซีเมนต์ : ปูนขาว : หินดินเบา (PLD) = 1 : 2 : 2 มีความสามารถรับแรงอัด 70.19 กก. ต่อ ซม.² และ ปูนซีเมนต์ : เถ้าลอยลิกไนต์ : ปูนขาว : หินดินเบา (PFLD) = 1 : 2 : 2 : 2 มีความสามารถรับแรงอัด 84.21 กก. ต่อ ซม.² ดังนั้นอัตราส่วนทั้ง 4 แบบมีความสามารถรับแรงอัดมากกว่า 3.5 กก. ต่อ ซม.² ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 จึงนำไปใช้เป็นอัตราส่วนผสมกับกากตะกอนเพื่อหล่อเป็นก้อนแข็งในการทดลองต่อไป

การศึกษาวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำให้กากตะกอนเป็นก้อนแข็ง

แบบที่ 1 ไม่มีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน



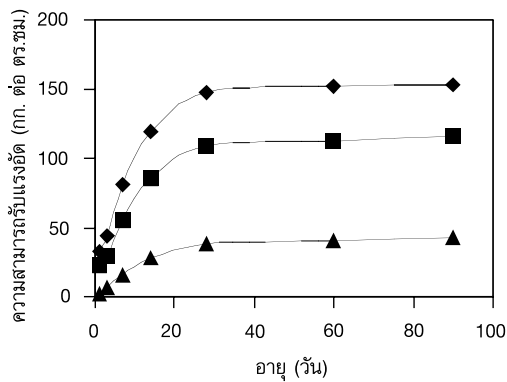
รูปที่ 1 ความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง โดยช่วงแรกความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลจากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งมีสมบัติรับแรงอัดจากภายนอก ทำให้ความสามารถรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาก แล้วหลังจากนั้นความสามารถการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเริ่มคงที่ที่อายุของก้อนหล่อแข็งประมาณ 28 วัน นอกจากนี้พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีส่วนผสมแบบ PF ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 270 กก. ต่อ ซม.² ส่วนแบบ PFL, PLD และ PFLD ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน คือ 85.9±7.05 กก. ต่อ ซม.² เนื่องจากมีปริมาณของสารปอซโซลาน ซึ่งเป็นสารที่ตัวเองไม่มีสมบัติเป็นตัวประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วก่อตัวเป็นตัวประสานได้เป็นองค์ประกอบอยู่คล้ายกันทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเหมือนกัน แต่ให้ความแข็งแรงน้อยกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าแบบ PF [10], [11]

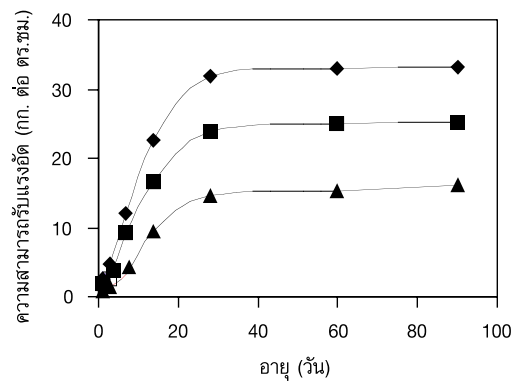
แบบที่ 2 ผสมกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

รูปที่ 2(ก), 2(ข), 2(ค) และ 2(ง) แสดงความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันต่อวัสดุผสมประเภทต่างๆ ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง โดยในช่วงแรกจะมีความสามารถรับแรงอัดสูงแล้วจะเริ่มคงที่เมื่ออายุของก้อนหล่อแข็งมากกว่า 28 วัน ซึ่งมีลักษณะเดียวกับแบบที่ 1 แต่ความสามารถรับแรงอัดจะมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากมีกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันผสมอยู่ ทำให้น้ำมันไปขัดขวางการก่อตัว

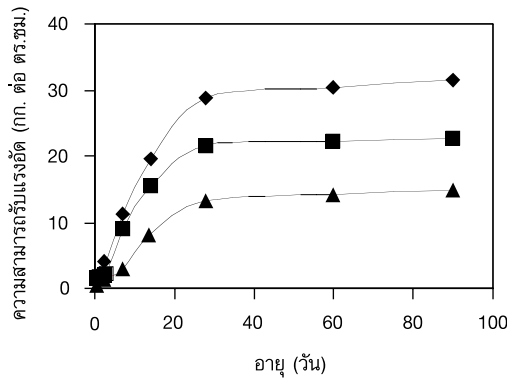
ของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยลิกไนต์ ปูนขาว และหินดินเบา ซึ่งเป็นสารปอซโซลานจึงทำให้ความสามารถรับแรงอัดจากภายนอกน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการตากตะกอน และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนปูนเบื่อน้ำมันให้มากขึ้น พบว่าความสามารถรับแรงอัดยังมีค่าลดน้อยลง โดยชุดการทดลองที่เป็น PF ที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนปูนเบื่อน้ำมันร้อยละ 10 และร้อยละ 20 จะมีค่าความสามารถรับแรงอัดได้ในช่วง 100-150 กก. ต่อ ซม.² ส่วนการทดลองที่ใช้วัสดุผสมอื่นๆ ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดในช่วง 3.5-33.0 กก. ต่อ ซม.²



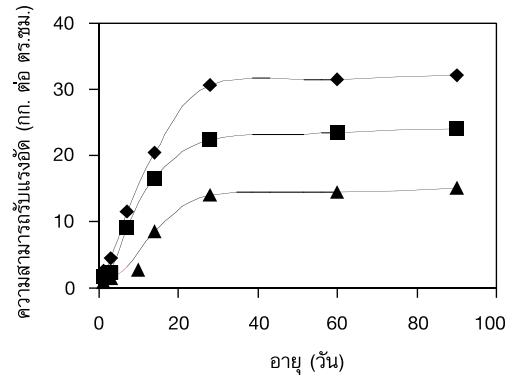
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

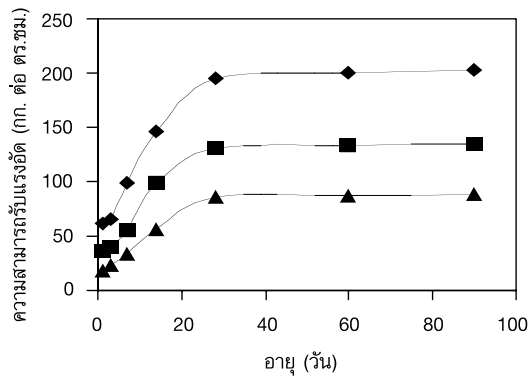
รูปที่ 2 ความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ของกากตะกอนปูนเบื่อน้ำมัน

ต่อวัสดุผสม 4 ชนิด (ก) PF (ข) PFL (ค) PLD (ง) PFLD

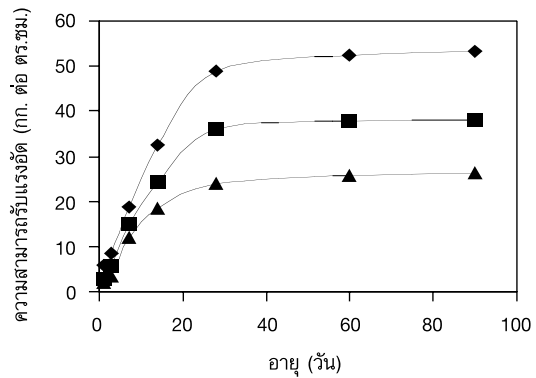
(สัญลักษณ์ ◆ = ร้อยละ 10; ■ = ร้อยละ 20; ▲ = ร้อยละ 30)

แบบที่ 3 ผสมกากตะกอนที่สกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

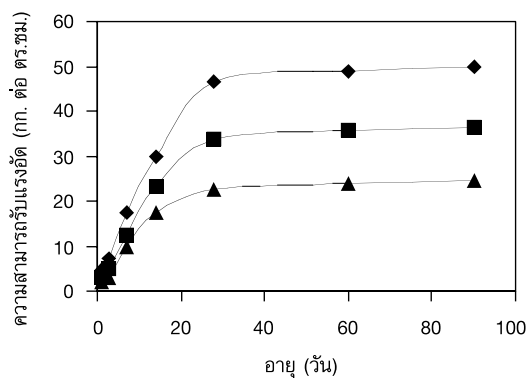
รูปที่ 3 (ก), 3 (ข), 3 (ค) และ 3 (ง) แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่เพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง โดยในช่วงแรกจะมีการพัฒนาความสามารถรับแรงอัดสูงแล้วเริ่มคงที่เมื่ออายุของก้อนหล่อแข็งมากกว่า 28 วัน ซึ่งมีลักษณะเดียวกับแบบที่ 1 และแบบที่ 2 อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถรับแรงอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันในแบบที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณน้ำมันซึ่งเป็นตัวขัดขวางการก่อตัวของวัสดุผสมในกากตะกอนน้อยกว่าโดยชุดการทดลองที่เป็น PF ที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันร้อยละ 10 และร้อยละ 20 จะมีค่าความสามารถรับแรงอัดได้ในช่วง 130-200 กก. ต่อ ซม.² ส่วนการทดลองที่ใช้วัสดุผสมอื่นๆ ให้ค่าความสามารถรับแรงอัดในช่วง 20-55 กก. ต่อ ซม.²



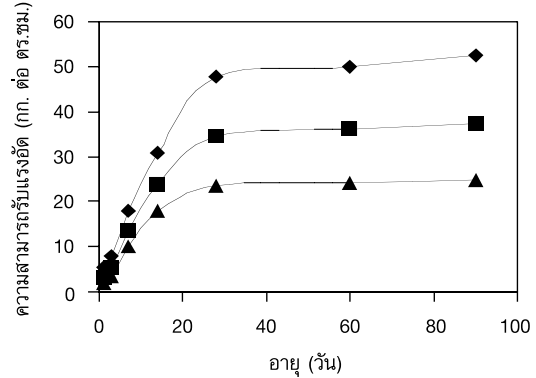
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3 ความสามารถรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ของกากตะกอนที่สกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

ต่อวัสดุผสม 4 ชนิด (ก) PF (ข) PFL (ค) PLD (ง) PFLD

(สัญลักษณ์ ◆ = ร้อยละ 10; ■ = ร้อยละ 20; ▲ = ร้อยละ 30)

ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็ง

ในการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งทั้งภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและภาคตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วนทุกชุดการทดลองพบว่า ค่าการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดต่ำกว่าค่ามาตรฐาน EPA และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมันต่อตัวผสมจะทำให้ค่าการชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณภาคตะกอนลงไปในก้อนหล่อแข็ง ทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง และปริมาณภาคตะกอนที่เพิ่มขึ้นนี้ไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้ลดการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสามารถยึดตรึงโลหะหนักได้โดยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี ผลการชะละลายของโลหะจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมันได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-6 และผลการชะละลายของโลหะจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนที่แยกน้ำมันออกแล้วได้แสดงไว้ในตารางที่ 7-11

ตารางที่ 2 การชะละลายของสังกะสีจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

วัสดุผสม-อัตราส่วน ภาคตะกอน	ค่าการชะละลายของสังกะสี (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.085±0.001	0.084±0.001	0.080±0.001	0.075±0.001	0.073±0.001	0.073±0.001
PF-20%	0.120±0.001	0.120±0.001	0.115±0.001	0.109±0.001	0.100±0.001	0.100±0.001
PF-30%	0.165±0.001	0.160±0.001	0.155±0.001	0.151±0.001	0.143±0.001	0.143±0.001
PFL-10%	0.105±0.001	0.100±0.001	0.092±0.001	0.086±0.001	0.075±0.001	0.075±0.001
PFL-20%	0.150±0.001	0.150±0.001	0.146±0.001	0.140±0.001	0.135±0.001	0.135±0.001
PFL-30%	0.210±0.001	0.210±0.001	0.200±0.001	0.189±0.001	0.180±0.001	0.180±0.001
PLD-10%	0.105±0.001	0.100±0.001	0.094±0.001	0.090±0.001	0.084±0.001	0.084±0.001
PLD-20%	0.155±0.001	0.150±0.001	0.143±0.001	0.140±0.001	0.138±0.001	0.138±0.001
PLD-30%	0.205±0.001	0.200±0.001	0.196±0.001	0.186±0.001	0.176±0.001	0.176±0.001
PFLD-10%	0.105±0.001	0.100±0.001	0.089±0.001	0.082±0.001	0.071±0.001	0.071±0.001
PFLD-20%	0.156±0.001	0.150±0.001	0.142±0.001	0.138±0.001	0.131±0.001	0.131±0.001
PFLD-30%	0.212±0.001	0.210±0.001	0.198±0.001	0.185±0.001	0.178±0.001	0.178±0.001

ตารางที่ 3 การชะละลายของตะกั่วจากก้อนหล่อแข็งกาตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กาตะกอน	ค่าการชะละลายของตะกั่ว (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.255±0.001	0.252±0.001	0.205±0.001	0.156±0.001	0.065±0.001	0.060±0.001
PF-20%	0.358±0.001	0.355±0.001	0.302±0.001	0.225±0.001	0.098±0.001	0.095±0.001
PF-30%	0.454±0.001	0.450±0.001	0.375±0.001	0.300±0.001	0.122±0.001	0.120±0.001
PFL-10%	0.242±0.001	0.240±0.001	0.195±0.001	0.145±0.001	0.055±0.001	0.050±0.001
PFL-20%	0.333±0.001	0.330±0.001	0.287±0.001	0.200±0.001	0.082±0.001	0.080±0.001
PFL-30%	0.412±0.001	0.410±0.001	0.354±0.001	0.285±0.001	0.105±0.001	0.101±0.001
PLD-10%	0.223±0.001	0.220±0.001	0.181±0.001	0.132±0.001	0.043±0.001	0.040±0.001
PLD-20%	0.314±0.001	0.312±0.001	0.265±0.001	0.196±0.001	0.074±0.001	0.072±0.001
PLD-30%	0.405±0.001	0.402±0.001	0.336±0.001	0.276±0.001	0.098±0.001	0.095±0.001
PFLD-10%	0.210±0.001	0.208±0.001	0.172±0.001	0.121±0.001	0.035±0.001	0.032±0.001
PFLD-20%	0.305±0.001	0.301±0.001	0.254±0.001	0.185±0.001	0.067±0.001	0.065±0.001
PFLD-30%	0.410±0.001	0.408±0.001	0.345±0.001	0.282±0.001	0.106±0.001	0.104±0.001

ตารางที่ 4 การชะละลายของแคดเมียมจากก้อนหล่อแข็งกาตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กาตะกอน	ค่าการชะละลายของแคดเมียม (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.020±0.001	0.020±0.001	0.015±0.001	0.010±0.001	0.002	0.002
PF-20%	0.025±0.001	0.025±0.001	0.020±0.001	0.015±0.001	0.008±0.001	0.008±0.001
PF-30%	0.030±0.001	0.030±0.001	0.025±0.001	0.021±0.001	0.012±0.001	0.012±0.001
PFL-10%	0.025±0.001	0.024±0.001	0.018±0.001	0.015±0.001	0.010±0.001	0.010±0.001
PFL-20%	0.030±0.001	0.030±0.001	0.025±0.001	0.020±0.001	0.016±0.001	0.016±0.001
PFL-30%	0.035±0.001	0.034±0.001	0.029±0.001	0.024±0.001	0.020±0.001	0.020±0.001
PLD-10%	0.022±0.001	0.022±0.001	0.017±0.001	0.012±0.001	0.006±0.001	0.006±0.001
PLD-20%	0.028±0.001	0.028±0.001	0.024±0.001	0.018±0.001	0.012±0.001	0.012±0.001
PLD-30%	0.032±0.001	0.032±0.001	0.027±0.001	0.020±0.001	0.016±0.001	0.016±0.001
PFLD-10%	0.024±0.001	0.024±0.001	0.019±0.001	0.013±0.001	0.008±0.001	0.008±0.001
PFLD-20%	0.030±0.001	0.030±0.001	0.026±0.001	0.020±0.001	0.014±0.001	0.014±0.001
PFLD-30%	0.033±0.001	0.033±0.001	0.030±0.001	0.022±0.001	0.018±0.001	0.018±0.001

ตารางที่ 5 การชะละลายของนิกเกิลจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

วัสดุผสม-อัตราส่วน ภาคตะกอน	ค่าการชะละลายของนิกเกิล (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.020±0.001	0.020±0.001	0.018±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010
PF-20%	0.028±0.001	0.028±0.001	0.025±0.001	0.020±0.001	0.010	0.010
PF-30%	0.040±0.001	0.040±0.001	0.035±0.001	0.031±0.001	0.015±0.001	0.015±0.001
PFL-10%	0.025±0.001	0.024±0.001	0.022±0.001	0.018±0.001	0.010±0.001	0.010±0.001
PFL-20%	0.035±0.001	0.035±0.001	0.030±0.001	0.028±0.001	0.020±0.001	0.020±0.001
PFL-30%	0.045±0.001	0.043±0.001	0.040±0.001	0.037±0.001	0.030±0.001	0.030±0.001
PLD-10%	0.022±0.001	0.020±0.001	0.017±0.001	0.013±0.001	0.010	0.010
PLD-20%	0.025±0.001	0.024±0.001	0.021±0.001	0.017±0.001	0.010	0.010
PLD-30%	0.042±0.001	0.042±0.001	0.038±0.001	0.032±0.001	0.022±0.001	0.022±0.001
PFLD-10%	0.032±0.001	0.030±0.001	0.028±0.001	0.025±0.001	0.015±0.001	0.015±0.001
PFLD-20%	0.036±0.001	0.035±0.001	0.030±0.001	0.027±0.001	0.020±0.001	0.020±0.001
PFLD-30%	0.045±0.001	0.042±0.001	0.038±0.001	0.032±0.001	0.027±0.001	0.027±0.001

ตารางที่ 6 การชะละลายของโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน

วัสดุผสม-อัตราส่วน ภาคตะกอน	ค่าการชะละลายของโครเมียม (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.215±0.001	0.213±0.001	0.174±0.001	0.123±0.001	0.082±0.001	0.080±0.001
PF-20%	0.312±0.001	0.310±0.001	0.278±0.001	0.215±0.001	0.146±0.001	0.105±0.001
PF-30%	0.413±0.001	0.411±0.001	0.361±0.001	0.306±0.001	0.254±0.001	0.161±0.001
PFL-10%	0.205±0.001	0.202±0.001	0.168±0.001	0.117±0.001	0.078±0.001	0.076±0.001
PFL-20%	0.308±0.001	0.305±0.001	0.266±0.001	0.204±0.001	0.141±0.001	0.098±0.001
PFL-30%	0.404±0.001	0.402±0.001	0.354±0.001	0.296±0.001	0.247±0.001	0.158±0.001
PLD-10%	0.201±0.001	0.200±0.001	0.163±0.001	0.110±0.001	0.071±0.001	0.068±0.001
PLD-20%	0.305±0.001	0.304±0.001	0.258±0.001	0.200±0.001	0.132±0.001	0.087±0.001
PLD-30%	0.408±0.001	0.407±0.001	0.342±0.001	0.284±0.001	0.236±0.001	0.151±0.001
PFLD-10%	0.195±0.001	0.193±0.001	0.156±0.001	0.100±0.001	0.067±0.001	0.065±0.001
PFLD-20%	0.294±0.001	0.292±0.001	0.242±0.001	0.194±0.001	0.128±0.001	0.078±0.001
PFLD-30%	0.391±0.001	0.390±0.001	0.332±0.001	0.274±0.001	0.221±0.001	0.142±0.001

ตารางที่ 7 การชะละลายของสังกะสีจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของสังกะสี (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.070±0.001	0.070±0.001	0.065±0.001	0.051±0.001	0.050±0.001	0.050±0.001
PF-20%	0.110±0.001	0.110±0.001	0.100±0.001	0.091±0.001	0.084±0.001	0.084±0.001
PF-30%	0.148±0.001	0.147±0.001	0.140±0.001	0.138±0.001	0.125±0.001	0.125±0.001
PFL-10%	0.092±0.001	0.090±0.001	0.087±0.001	0.081±0.001	0.074±0.001	0.074±0.001
PFL-20%	0.141±0.001	0.140±0.001	0.138±0.001	0.134±0.001	0.121±0.001	0.121±0.001
PFL-30%	0.200±0.001	0.200±0.001	0.197±0.001	0.192±0.001	0.182±0.001	0.182±0.001
PLD-10%	0.091±0.001	0.091±0.001	0.089±0.001	0.083±0.001	0.072±0.001	0.072±0.001
PLD-20%	0.142±0.001	0.140±0.001	0.139±0.001	0.135±0.001	0.123±0.001	0.123±0.001
PLD-30%	0.191±0.001	0.190±0.001	0.188±0.001	0.185±0.001	0.174±0.001	0.174±0.001
PFLD-10%	0.092±0.001	0.091±0.001	0.087±0.001	0.079±0.001	0.073±0.001	0.073±0.001
PFLD-20%	0.141±0.001	0.140±0.001	0.138±0.001	0.131±0.001	0.125±0.001	0.125±0.001
PFLD-30%	0.201±0.001	0.201±0.001	0.197±0.001	0.183±0.001	0.167±0.001	0.167±0.001

ตารางที่ 8 การชะละลายของตะกั่วจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของตะกั่ว (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.222±0.001	0.220±0.001	0.185±0.001	0.132±0.001	0.045±0.001	0.040±0.001
PF-20%	0.305±0.001	0.302±0.001	0.248±0.001	0.205±0.001	0.072±0.001	0.070±0.001
PF-30%	0.412±0.001	0.410±0.001	0.348±0.001	0.284±0.001	0.094±0.001	0.092±0.001
PFL-10%	0.212±0.001	0.210±0.001	0.176±0.001	0.121±0.001	0.032±0.001	0.030±0.001
PFL-20%	0.295±0.001	0.291±0.001	0.232±0.001	0.195±0.001	0.062±0.001	0.060±0.001
PFL-30%	0.373±0.001	0.370±0.001	0.325±0.001	0.267±0.001	0.081±0.001	0.080±0.001
PLD-10%	0.198±0.001	0.195±0.001	0.164±0.001	0.110±0.001	0.025±0.001	0.023±0.001
PLD-20%	0.279±0.001	0.274±0.001	0.214±0.001	0.176±0.001	0.051±0.001	0.050±0.001
PLD-30%	0.378±0.001	0.375±0.001	0.328±0.001	0.197±0.001	0.066±0.001	0.064±0.001
PFLD-10%	0.186±0.001	0.184±0.001	0.152±0.001	0.102±0.001	0.021±0.001	0.020±0.001
PFLD-20%	0.270±0.001	0.276±0.001	0.212±0.001	0.172±0.001	0.047±0.001	0.045±0.001
PFLD-30%	0.382±0.001	0.380±0.001	0.330±0.001	0.195±0.001	0.068±0.001	0.066±0.001

ตารางที่ 9 การชะละลายของแคดเมียมจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของแคดเมียม (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.015±0.001	0.015±0.001	0.011±0.001	0.005±0.001	0.002	0.002
PF-20%	0.018±0.001	0.018±0.001	0.013±0.001	0.007±0.001	0.002	0.002
PF-30%	0.022±0.001	0.021±0.001	0.015±0.001	0.010±0.001	0.005±0.001	0.005±0.001
PFL-10%	0.018±0.001	0.017±0.001	0.012±0.001	0.006±0.001	0.002	0.002
PFL-20%	0.022±0.001	0.022±0.001	0.015±0.001	0.009±0.001	0.002	0.002
PFL-30%	0.026±0.001	0.025±0.001	0.019±0.001	0.012±0.001	0.006±0.001	0.006±0.001
PLD-10%	0.017±0.001	0.017±0.001	0.012±0.001	0.006±0.001	0.002	0.002
PLD-20%	0.020±0.001	0.020±0.001	0.014±0.001	0.008±0.001	0.002	0.002
PLD-30%	0.024±0.001	0.024±0.001	0.016±0.001	0.010±0.001	0.005±0.001	0.005±0.001
PFLD-10%	0.018±0.001	0.018±0.001	0.013±0.001	0.008±0.001	0.002	0.002
PFLD-20%	0.023±0.001	0.023±0.001	0.016±0.001	0.009±0.001	0.003±0.001	0.003±0.001
PFLD-30%	0.027±0.001	0.027±0.001	0.020±0.001	0.010±0.001	0.004±0.001	0.004±0.001

ตารางที่ 10 การชะละลายของนิกเกิลจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของนิกเกิล (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.015±0.001	0.014±0.001	0.010	0.010	0.010	0.010
PF-20%	0.020±0.001	0.020±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010	0.010
PF-30%	0.025±0.001	0.024±0.001	0.020±0.001	0.010	0.010	0.010
PFL-10%	0.020±0.001	0.018±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010	0.010
PFL-20%	0.030±0.001	0.028±0.001	0.021±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010
PFL-30%	0.040±0.001	0.035±0.001	0.030±0.001	0.020±0.001	0.015±0.001	0.015±0.001
PLD-10%	0.015±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010	0.010	0.010
PLD-20%	0.022±0.001	0.022±0.001	0.018±0.001	0.015±0.001	0.010	0.010
PLD-30%	0.035±0.001	0.035±0.001	0.030±0.001	0.025±0.001	0.015±0.001	0.015±0.001
PFLD-10%	0.028±0.001	0.027±0.001	0.022±0.001	0.015±0.001	0.001	0.010
PFLD-20%	0.030±0.001	0.030±0.001	0.025±0.001	0.018±0.001	0.015±0.001	0.015±0.001
PFLD-30%	0.030±0.001	0.032±0.001	0.027±0.001	0.020±0.001	0.018±0.001	0.018±0.001

ตารางที่ 11 การชะละลายของโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของโครเมียม (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	0.196±0.001	0.195±0.001	0.156±0.001	0.112±0.001	0.052±0.001	0.050±0.001
PF-20%	0.295±0.001	0.294±0.001	0.254±0.001	0.145±0.001	0.075±0.001	0.072±0.001
PF-30%	0.391±0.001	0.390±0.001	0.344±0.001	0.223±0.001	0.095±0.001	0.094±0.001
PFL-10%	0.191±0.001	0.190±0.001	0.148±0.001	0.100±0.001	0.042±0.001	0.040±0.001
PFL-20%	0.288±0.001	0.286±0.001	0.246±0.001	0.132±0.001	0.064±0.001	0.063±0.001
PFL-30%	0.383±0.001	0.382±0.001	0.325±0.001	0.195±0.001	0.081±0.001	0.080±0.001
PLD-10%	0.187±0.001	0.188±0.001	0.137±0.001	0.095±0.001	0.031±0.001	0.015±0.001
PLD-20%	0.278±0.001	0.277±0.001	0.226±0.001	0.120±0.001	0.053±0.001	0.050±0.001
PLD-30%	0.376±0.001	0.375±0.001	0.305±0.001	0.176±0.001	0.072±0.001	0.071±0.001
PFLD-10%	0.182±0.001	0.180±0.001	0.121±0.001	0.082±0.001	0.028±0.001	0.010±0.001
PFLD-20%	0.271±0.001	0.270±0.001	0.208±0.001	0.112±0.001	0.047±0.001	0.046±0.001
PFLD-30%	0.372±0.001	0.370±0.001	0.287±0.001	0.154±0.001	0.061±0.001	0.060±0.001

ผลการทดสอบการชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็ง

ในการทดสอบการชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งทั้งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วนทุกชุดการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันต่อวัสดุผสมจะทำให้ค่าการชะละลายของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเหตุผลเดียวกับการชะละลายโลหะหนัก อย่างไรก็ตาม ทุกชุดการทดลองจะให้ค่าการชะละลายของน้ำมันต่ำกว่าค่ามาตรฐาน EPA ที่ 10 มก. ต่อลิตร ผลการทดสอบการชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งทั้งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันแสดงไว้ในตารางที่ 12 โดยชุดการทดลองที่มีวัสดุผสมเป็น PFLD ให้ค่าการชะละลายต่ำสุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่มีวัสดุผสมเป็น PFL ชุดการทดลองที่มีวัสดุผสมเป็น PLD ชุดการทดลองที่มีวัสดุผสมเป็น PF ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมประเภทปูนขาวร่วมกับหินดินเบามีส่วนช่วยตรึงน้ำมันได้ดีกว่าปูนขาวหรือหินดินเบายิ่งอย่างเดียวนั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียวผลการตรึงน้ำมันก็ดีกว่าการเติมหินดินเบายิ่งอย่างเดียวทั้งนี้คาดว่าปูนขาวผสมหินดินเบามีโครงสร้างทางกายภาพที่สามารถยึดเกาะน้ำมันได้ดี

ตารางที่ 12 การชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน
(มาตรฐาน EPA 10 มก. ต่อ ลิตร)

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของน้ำมัน (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PF-20%	4±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PF-30%	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFL-10%	3±0.71	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFL-20%	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFL-30%	6±0.71	4±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002
PLD-10%	3±0.71	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PLD-20%	6±0.71	4±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002
PLD-30%	8±0.71	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002
PFLD-10%	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFLD-20%	7±0.71	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002
PFLD-30%	9±0.71	7±0.71	4±0.71	1±0.71	0.002	0.002

ตารางที่ 13 การชะละลายของน้ำมันจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนสกัดน้ำมันออกไปบางส่วน
(มาตรฐาน EPA 10 มก. ต่อ ลิตร)

วัสดุผสม-อัตราส่วน กากตะกอน	ค่าการชะละลายของน้ำมัน (มก. ต่อ ลิตร)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
PF-10%	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PF-20%	3±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PF-30%	4±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PFL-10%	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PFL-20%	3±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PFL-30%	4±0.71	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PLD-10%	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PLD-20%	3±0.71	2±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PLD-30%	4±0.71	2±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFLD-10%	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002	0.002
PFLD-20%	4±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002
PFLD-30%	5±0.71	3±0.71	1±0.71	0.002	0.002	0.002

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน พบว่า กากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณน้ำมันและปริมาณโลหะหนักอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงานจึงควรมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม การศึกษาวิธีบำบัดโดยการหล่อเป็นก้อนแข็ง พบว่าก้อนหล่อแข็งที่มีส่วนผสมแบบ PF จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 270 กก. ต่อ ซม², ก้อนหล่อแข็งแบบ PLD และ PFLD จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียง คือ 85.9 ± 7.05 กก. ต่อ ซม² ส่วนก้อนหล่อแข็งผสมกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันและก้อนหล่อแข็งผสมกากตะกอนที่แยกน้ำมันออกไปแล้วบางส่วน พบว่าก้อนหล่อแข็งที่มีส่วนผสมแบบ PF, PFL, PLD และ PFLD มีค่าความสามารถรับแรงอัดสูงกว่า 3.5 กก. ต่อ ซม² ซึ่งทำให้นำไปทำการฝังกลบได้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 และจากการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักและน้ำมันจากก้อนหล่อแข็ง พบว่ามีค่าต่ำกว่า 10 มก. ต่อ ลิตร ตามมาตรฐาน EPA [8] การบำบัดกากตะกอนปนเปื้อนน้ำมันโดยวิธีนี้จึงไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

บริษัท ไทยออยล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน คุณเชิดศักดิ์ อรรถการุณ กองเศรษฐกิจวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์หินดินเบา ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อความกรุณา มา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.
2. วิชัย มาชูตระกูล, 2538, การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และซีเมนต์แกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
3. วิชิต ช่อวิเชียร, 2539, *คอนกรีตเทคโนโลยี*, พิมพ์ครั้งที่ 7, ป. สัมพันธ์พาณิชย์, หน้า 11-23.
4. Conner, J. R., 1990, *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*, New York, Van Nostrand Reinhold, 692 p.
5. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), 1985, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16th Edition, Washington DC., American Public Health Association, pp. 92-100, 496-503.

6. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM Designation C 230-90 : Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement," *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 178-182.

7. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM Designation C 109-90 : Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement (using 2-in, or 50-mm, cube specimen)," *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 59-63.

8. Deuel, L. E. and Holliday, G. H., 1994, *Soil Remediation for the Petroleum Extraction Industry*, Penn Well Publishing, pp. 107-116.

9. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดลักษณะของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน.

10. ชนิดาวรรณ อ่ำเอี่ยม และวราเชษฐ์ ศรีวัชชัย, 2530, การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยปูนขาว, *ปริญญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, หน้า 3-23.

11. Rijal, S. P., 1990, Solidification of Laboratory Waste by Using Cementitious Binder, *Master of Engineering Thesis, Environmental Engineering Program, Asia Institute of Technology*, 65 p.