

นิพนธ์ต้นฉบับ

ความสามารถซึมผ่านน้ำของส่วนผสมจากกากตะกอนน้ำเสีย เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว

สุเทพ ศิลปานันท์กุล⁽¹⁾, พีรวัฒน์ สินไชย⁽²⁾, พิศิษฐ์ วัฒนสมบุญ⁽²⁾ และไกรชาติ ดันตระการอาภา⁽³⁾

วันที่ได้รับต้นฉบับ: 21 กันยายน 2558

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 18 มกราคม 2559

บทคัดย่อ

(1) ผู้รับผิดชอบบทความ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์
อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล
(โทรศัพท์: 081-584 0130,
E-mail: k.suthep@yahoo.com)

(2) ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม
คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

(3) ภาควิชาเวชศาสตร์สังคมและสิ่งแวดล้อม
คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนน้ำเสียและวัสดุผสมประเภท เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว และความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำเมื่อผสมกากตะกอนน้ำเสียกับเถ้าหนัก เถ้าลอยและปูนขาว ในอัตราส่วนผสมส่วนต่างๆ ได้แก่ 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักและชั้นส่วนผสมที่มีความหนา 5, 10 และ 15 ซม. ตามลำดับ ทำการหาค่าการซึมผ่านของน้ำด้วยวิธี Constant-Head (ASTM D 2434) ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ ANOVA และค่าเฉลี่ยที่วัดได้นำมาเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยการทดสอบ LSD ที่ระดับนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05

ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะตะกอนน้ำเสียมีอนุภาคหยาบคล้ายดิน (พื้นที่ผิว 0.869 ตร.ม./ก.) เถ้าหนักมีอนุภาคละเอียดรองลงมา (พื้นที่ผิว 0.296 ตร.ม./ก.) ส่วนเถ้าลอยและปูนขาวมีอนุภาคละเอียดคล้ายแป้ง (พื้นที่ผิว 0.667 ตร.ม./ก. และ 0.434 ตร.ม./ก.) สารแคดเมียม ตะกั่ว และปรอทเป็นโลหะหนักที่ตรวจพบในตะกอนน้ำเสียมีค่าไม่เกินมาตรฐานตามประกาศเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วของกระทรวงอุตสาหกรรม เมื่อทำการศึกษาค่าการซึมผ่านของน้ำในส่วนผสมที่อัตราต่างๆ พบว่าการซึมผ่านได้ของน้ำที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 อัตราเท่ากับ 1.916×10^{-4} ซม./วินาที แตกต่างจากอัตราส่วนผสมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) และผลการทดลองที่ชั้นความหนา 15 ซม. ให้ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำสูงสุด (6.498×10^{-5} ซม./วินาที) ($p\text{-value} < 0.05$) อย่างไรก็ตามความสามารถการซึมผ่านของวัสดุผสมยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานการซึมผ่านของวัสดุรองพื้นหลุมฝังกลบมูลฝอย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปเป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบมูลฝอย แต่บ่งชี้ว่าวัสดุผสมตามเกณฑ์นี้สามารถนำไปใช้ในรูปแบบอื่นได้ เช่น การใช้เป็นวัสดุปูรองพื้นแบบผสม (Composite liner) ได้

คำสำคัญ: ค่าการซึมผ่านของน้ำ, กากตะกอนน้ำเสีย, เถ้าหนัก, เถ้าลอย, ปูนขาว, วัสดุรองพื้นฝังกลบ

Original Article

Hydraulic Permeability of Sewage Sludge Mixture Added with Bottom Ash, Fly Ash and Lime

Suthep Silapanuntakul⁽¹⁾, Peerawat Silapachai⁽²⁾, Pisit Vattanasomboon⁽²⁾ and Kraichat Tantakarnarpha⁽³⁾

Received Date: September 21, 2015

Accepted Date: January 18, 2016

Abstract

This research was conducted to study the physico-chemical properties of sewage sludge and mixing materials (bottom ash, fly ash, and lime) and hydraulic permeability of sewage sludge mixture added with different mixing material ratios of bottom ash, fly ash and lime (1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 and 50% by weight) and different heights of mixture (5, 10, and 15 cm). The hydraulic permeability of mixtures was determined by Constant-Head Permeameter (ASTM D 2434). Data analysis was undertaken using ANOVA and mean comparison was obtained using Fisher's Least Significant Difference Test (LSD) at the significant level of α 0.05.

Results revealed that sewage sludge particles were largely coarse (surface area of 0.869 m²/g.) followed by fine bottom ash particle (surface area of 0.296 m²/g.), whereas fly ash and lime were fine powder like particles (surface areas of 0.667 m²/g. and 0.434 m²/g., respectively). Cadmium, lead and mercury were the heavy metals found in the sewage sludge and their amounts were not over the limit permitted by the Ministry of Industry. Hydraulic permeability of mixture of sewage sludge added with bottom ash, fly ash and lime at a ratio of 50% (1.916x10⁻⁴ cm./s) was significantly lower than other ratios (p-value<0.05). The hydraulic permeability of mixtures at 15 cm was significantly lower than other thicknesses (6.498x10⁻⁵ cm./s) (p-value<0.05).

The hydraulic permeability level was lower than the directives on the use of landfill base material; however, it could be used as a mixing material for composite liner.

Keywords: Hydraulic Permeability, Sewage Sludge, Bottom Ash, Fly Ash, Lime, Landfill Lining Material

(1) Corresponding author:

Department of Environmental Health
Sciences, Faculty of Public Health,
Mahidol University

(Tel.: 081-584 0130,
E-mail: k.suthep@yahoo.com)

(2) Department of Environmental Health
Sciences, Faculty of Public Health,
Mahidol University

(3) Department of Social and Environmental
Medicine, Faculty of Tropical Medicine,
Mahidol University

บทนำ

ปัญหาการเพิ่มขึ้นของมูลฝอยเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจากต้นเหตุที่สำคัญคือ จำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของชุมชน การเร่งรัดและพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว (ลดาวัลย์ คำภา, 2555) ในปี 2557 พบปริมาณมูลฝอยมีมากถึง 26.19 ล้านตัน หรือคิดเป็น 71,753.4 ตันต่อวัน และปริมาณมูลฝอยสะสมตกค้าง ประมาณ 30.8 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยเพิ่มจาก 23.93 ล้านตัน ในปี 2551 เป็น 26.77 ล้านตัน ในปี 2556 (กรมควบคุมมลพิษ, 2557)

ในประเทศไทยการจัดการมูลฝอยชุมชนมีหลากหลายวิธี ได้แก่ การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล การเผาด้วยเตาเผา การลดและนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) สำหรับการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลนั้นเป็นการจัดการที่มีการนำมาใช้สูงสุด เพราะเสียค่าใช้จ่ายน้อยและไม่ยุ่งยากในการจัดการ (ปรโมช เชี่ยวชาญ, 2557) โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุรองพื้นในการฝังกลบมีการกำหนดค่าการซึมผ่านได้ของน้ำที่เหมาะสมไว้นั้น คือต้องมีค่าไม่มากกว่า 1.0×10^{-10} ลบ.ซม.ต่อวินาที (Steniewskis, Widomski, & Horn, 2011) หรือเกณฑ์การทำวัสดุปิดทับ (Capping barrier layer) หลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนที่ไม่ต่ำกว่า 1.0×10^{-5} ลบ.ซม.ต่อวินาที (Gross et al., 2002) แต่ปัจจุบันพบปัญหาที่สำคัญคือ ดินเหนียวที่เป็นวัสดุฝังกลบเริ่มหาได้ยาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ประกอบกับวัสดุรองพื้นสังเคราะห์มีราคาสูง จึงมีความพยายามหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว เช่น การวิจัยเพื่อปรับปรุงดินเหนียวที่มีคุณลักษณะไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนดเป็นวัสดุฝังกลบโดยผสมกับเถ้าหนักและปูนขาว (Jirathanathaworn, 2003) หรือการใช้ดินโคราชที่ผสมเถ้าลอยแล้วทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุฝังกลบรายวันได้ (Srimoke, 2008) รวมทั้งการหาวัสดุอื่นมาทดแทน ได้แก่ วัสดุปรับปรุงดิน กากตะกอน หรือแม้แต่ชิ้นส่วนจากการรื้อถอนต่างๆ โดยเรียกวัสดุเหล่านี้ว่าวัสดุทางเลือก ซึ่งวัสดุทางเลือกเหล่านี้ถือเป็นวัสดุเหลือใช้หรือมูลฝอยที่หากนำมาใช้งานได้ก็จะสามารถช่วยลดปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นจำนวนมากอีกทางหนึ่ง ด้วยเหตุที่ยังไม่เคยมีการศึกษาถึงความสามารถของวัสดุทางเลือกเหล่านี้ต่อความสามารถซึมผ่านของน้ำเพื่อการนำวัสดุทางเลือกไปใช้ประโยชน์ในการจัดการมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนน้ำเสียและวัสดุผสมประเภท เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการซึมผ่านได้ของวัสดุผสมจากการผสมกากตะกอนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียกับเถ้าหนัก เถ้าลอยและปูนขาว ในอัตราส่วนการผสมและชั้นความหนาต่างๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) โดยมีวิธีการวิจัย ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้และการเตรียมการทดลอง

ในการวิจัยใช้ตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียที่ได้มาจากโรงบำบัดน้ำเสียของสำนักงานการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร นำตัวอย่างกากตะกอนไปตากเพื่อให้ตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ ขณะตากทำการเกลี่ยให้กากตะกอนไม่หนาเกิน 2-3 ซม. เวลาตากเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้น้ำหนักตัวอย่างคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างไปร่อนผ่านตะแกรง ขนาดช่องกว้าง 0.15 มม. (No. 100) ตัวอย่างที่ไม่ผ่านตะแกรงได้นำไปบดให้มีความละเอียดแล้วจึงนำมาร่อนซ้ำอีกครั้ง แล้วนำตัวอย่างไปเก็บไว้ภาชนะพลาสติกปิดผนึกให้แน่นเพื่อป้องกันความชื้นสำหรับนำไปใช้ผสมทำการทดลอง

สำหรับตัวอย่างเถ้าหนัก เถ้าลอย ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ส่วนปูนขาว (Hydrated lime) ซื้อมาจากบริษัท เอแจ็กซ์ไพนเคมีจำกัด นำเถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาวไปตากแดดและร่อน ลักษณะเดียวกับกากตะกอนน้ำเสียเพื่อใช้สำหรับเป็นวัสดุผสมในการทดลอง

ขั้นตอนต่อไปทำการชั่งวัสดุผสมทั้งสาม (เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว) ในอัตราส่วนที่เท่ากัน อย่างละ 2 กิโลกรัม คนผสมวัสดุให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำกากตะกอนน้ำเสียที่เตรียมไว้มาผสมกับวัสดุผสมทั้งสามที่เตรียมไว้เป็นน้ำหนักรวม 3 กิโลกรัม โดยมีอัตราการผสมของกากตะกอนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย ต่อเถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว โดยน้ำหนักเท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, และ 50% พร้อมกับชุดควบคุม 1 ชุด ซึ่งเป็นตะกอนน้ำเสียอย่างเดียว ดังตารางที่ 2

2. วิธีการทดลอง

2.1 คุณลักษณะของกากตะกอนน้ำเสีย เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว

ก่อนทำการทดลองเพื่อการหาค่าการซึมผ่านของน้ำ ทำการศึกษาคูณลักษณะทางเคมีและกายภาพของกากตะกอนน้ำเสีย เถ้าหนัก เถ้าลอย และ ปูนขาว ดังวิธีการในตารางที่ 1

2.2 การทดลองค่าการซึมผ่านของน้ำได้ของวัสดุผสมและชั้นความหนาต่างๆ

การวิจัยนี้ใช้อัตราการผสมของกากตะกอนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย ต่อเถ้าหนัก เถ้าลอย และ ปูนขาว โดยน้ำหนักเท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, และ 50% พร้อมกับชุดควบคุม 1 ชุด ซึ่งเป็นตะกอนน้ำเสียอย่างเดียว (ตารางที่ 2) และชั้นความหนาของแต่ละอัตราการผสม 3 ระดับ คือ 5, 10, และ 15 ซม. แต่ละการทดลอง (Treatment) จำนวน 3 ซ้ำ รวม 90 ตัวอย่าง และชุดควบคุม 3 ตัวอย่าง รวม 93 ตัวอย่าง จากนั้นทำการทดลองหาค่าการซึมผ่านของน้ำด้วยวิธี ASTM D-2434: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) โดยใช้อุปกรณ์และทดลองที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ทำการทดลองหาค่าการซึมผ่านได้ของส่วนผสม โดยทำการทดลองที่ความหนา 5, 10, และ 15 ซม. ตามลำดับ โดยแต่ละชั้นความหนาและอัตราการผสมทั้งหมด 3 ชั้น บันทึกเวลาที่น้ำไหลออกจนมีปริมาตร 250 ลบ.ซม. และคำนวณค่าการซึมผ่านของน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับค่ากำหนดและอัตราการผสม สำหรับค่าการซึมผ่านของน้ำ คำนวณจากสมการ

$$k = QL/Ath \text{ ที่กำหนดให้}$$

k = ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านของน้ำ, ซม./วินาที

Q = ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านขณะทดลอง, ลบ.ซม.

L = ระยะทางที่น้ำไหลผ่านวัสดุผสม, ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุผสมที่น้ำไหลผ่าน, ตร.ซม.

t = ระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านวัสดุผสม, วินาที

h = ระดับของ Head ขณะทดลอง, ซม.

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เพื่อศึกษาค่าเฉลี่ยการซึมของน้ำจากอัตราการผสมของผสมและชั้นความหนาของผสม และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการซึมของน้ำด้วย Fisher's Least Significant Difference Test (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 (ตารางที่ 2)

ผลการวิจัย

1. คุณลักษณะของกากตะกอนน้ำเสีย ถ้ำหนัก ถ้ำล่อย และปูนขาว

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพ และทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสีย ถ้ำหนัก ถ้ำล่อย และปูนขาว ได้แก่ ลักษณะเนื้อของวัสดุผสม สี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณความชื้น แสดงไว้ในตารางที่ 3 และภาพที่ 1 ลักษณะเนื้อของวัสดุผสมที่ส่องด้วยกล้อง SEM พบว่าส่วนใหญ่มีเนื้อละเอียด กากตะกอนมีเนื้อละเอียดคล้ายดินเหนียว รวมเป็นอนุภาคใหญ่ ช่องว่างน้อย ขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.869 ตร.ม./ก. (ก) ถ้ำหนักมีเนื้อหยาบคล้ายเม็ดทรายขนาดใหญ่หรือกรวด อนุภาคเล็กกว่าตะกอน มีช่องว่างมาก ขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.296 ตร.ม./ก. (ข) ถ้ำล่อยมีเนื้อละเอียดเป็นผงคล้ายแป้ง อนุภาคเล็กมีช่องว่างมาก ขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.667 ตร.ม./ก. (ค) ส่วนปูนขาวมีเนื้อละเอียดเป็นผงคล้ายแป้ง และอนุภาคเล็กมีช่องว่างมากเช่นกัน ขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.434 ตร.ม./ก. (ง)

นอกจากนี้พบว่าตะกอนน้ำเสียมีสีน้ำตาลเข้ม ถ้ำหนัก สีเทาอ่อน ถ้ำล่อยสีน้ำตาลอ่อน และปูนขาวมีสีขาว สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากตะกอนน้ำเสียเป็นกลาง (6.62) ส่วนวัสดุผสมอื่นๆ มีค่าเป็นด่าง โดยเฉพาะถ้ำล่อยและปูนขาวที่มีค่าความเป็นด่างสูงมาก (ถ้ำล่อย=12.41 และปูนขาว=12.77) ปริมาณ

ความชื้นของตัวอย่างกากตะกอนเป็นการคิดก่อนการนำไปตากให้แห้งเนื่องจากตัวอย่างทดลองมีลักษณะเป็นกึ่งแข็งกึ่งเหลวจึงมีปริมาณความชื้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้ง (กากตะกอนน้ำเสีย เท่ากับ 320.767%) สำหรับความชื้นของวัสดุผสมอื่นมีค่าต่ำ (ถ้ำหนัก เท่ากับ 29.316 % ถ้ำล่อยเท่ากับ 0.016% และปูนขาวเท่ากับ 0.012%) ดังตารางที่ 3

การตรวจสอบองค์ประกอบของตะกอนน้ำเสียด้านเคมีอื่นพบว่าตะกอนน้ำเสียมีองค์ประกอบเป็นอินทรีย์สารเฉลี่ยร้อยละ 8.944 คาร์บอนอินทรีย์ เฉลี่ยร้อยละ 4.972 มีปริมาณแคลเซียมสูงสุด เฉลี่ย 3.274 มก./กก. รองลงมาเป็นตะกั่ว เฉลี่ย 1.001 มก./กก. และปรอทน้อยที่สุด เฉลี่ย 0.511 มก./กก. (ตารางที่ 4)

2. การซึมผ่านได้ของน้ำในส่วนผสมรวมและชั้นความหนาแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาจำนวนร้อยละของวัสดุผสมเพียงอย่างเดียวจากการรวมชั้นความหนาของวัสดุผสมทุกขนาด (Control, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 and 50) พบว่าค่าเฉลี่ยการซึมผ่านได้ของน้ำมีค่าเท่ากับ 1.612×10^{-4} , 1.598×10^{-4} , 1.529×10^{-4} , 1.504×10^{-4} , 1.469×10^{-4} , 1.392×10^{-4} , 1.381×10^{-4} , 1.402×10^{-4} , 1.397×10^{-4} , 1.457×10^{-4} และ 1.916×10^{-4} ซม./วินาที ตามลำดับ (ตารางที่ 5) แต่เมื่อพิจารณาการซึมผ่านได้ของน้ำจากชั้นความหนาวัสดุผสมเพียงอย่างเดียว (5, 10 และ 15 ซม.) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.780×10^{-4} , 1.113×10^{-4} และ 0.650×10^{-4} ซม./วินาที ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยการซึมของน้ำที่เกิดจากอัตราการผสมของวัสดุผสมและชั้นความหนาของวัสดุผสมไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p -value<0.05) จากนั้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการซึม ผ่านของน้ำจากปริมาณวัสดุผสมต่างกัน (ตารางที่ 5) พบว่าการเพิ่มวัสดุผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน ตั้งแต่ร้อยละ 2 ขึ้นไปจนถึงร้อยละ 40 ช่วยในด้านการป้องกันการซึมผ่านของน้ำให้ดีขึ้น ($1.598 \times 10^{-4} \pm 1.050 \times 10^{-4}$ ซม./วินาที ถึง $1.457 \times 10^{-4} \pm 9.267 \times 10^{-5}$ ซม./วินาที) และมีส่วนทำให้น้ำซึมผ่านนานขึ้น จากการที่มีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าชุดควบคุม แต่เมื่ออัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเป็นร้อยละ 50 (1:1 โดยน้ำหนัก) พบว่าสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้มากกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ($1.916 \times 10^{-4} \pm 1.307 \times 10^{-4}$ ซม./วินาที) (p -value<0.05)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการซึมผ่านของน้ำในชั้นความหนาของวัสดุผสมนั้น พบว่าชั้นวัสดุผสมที่มีความหนามากขึ้นจะสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำดีขึ้น โดยวัสดุผสมที่มีชั้นความหนา 15 ซม. ป้องกันการซึมผ่านได้ของน้ำสูงสุด ($6.498 \times 10^{-5} \pm 4.097 \times 10^{-6}$ ซม./วินาที) (p -value<0.05) (ตารางที่ 6)

บทสรุปและอภิปรายผล

ผลจากการศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพพบว่าวัสดุผสมประเภทถ้ำล่อย และปูนขาวมีพื้นที่ผิวมากกว่าถ้ำหนักซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้วัสดุผสมทั้งสองมีอนุภาคละเอียดและความพรุนมากกว่าถ้ำหนักจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการยึดจับ

กับตะกอนน้ำเสียได้ดี ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Kim et al. (1997) ในเรื่องประสิทธิภาพความพรุนและความเร็วของการไหลซึมผ่านของสารโบรไมด์ในดินเหนียวอัดแน่น (Compacted clay) ในถังทดสอบ ที่พบว่าความเร็วในการซึมผ่านของสารโบรไมด์มีความสัมพันธ์ลักษณะเชิงเส้น (Linear relationship) กับความพรุนของดินเหนียวอัดแน่นในถังทดสอบ

สำหรับการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในตะกอนน้ำเสียอันอาจจะรั่วไหลออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้นั้น พบว่าปริมาณโลหะหนักที่สำคัญได้แก่ ตะกั่ว (1.001 มก./กก.) แคดเมียม (3.274 มก./กก.) และปรอท (0.511 มก./กก.) มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานของประกาศเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ดังกล่าวมีค่า 1,000 มก./กก., 100 มก./กก. และ 20 มก./กก. ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

เมื่อศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในส่วนผสมจากตะกอนน้ำเสียที่ผสมวัสดุต่างๆ ได้แก่ แอชหนัก แอชลอย และปูนขาว ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการซึมผ่านได้ของน้ำจะลดลงเมื่อปริมาณวัสดุผสมเพิ่มขึ้นและการซึมผ่านจะน้อยที่สุดเมื่ออัตราส่วนผสมเป็นร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมเชื่อมประสานกับตะกอนน้ำเสียและลดความพรุนในตะกอนน้ำเสีย ส่งผลให้ส่วนผสมที่ได้มีความทึบน้ำสูงขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ

Tsai & Vesilind (1998) ซึ่งทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำในดินเหนียวที่เติมด้วยปูนขาวและมอนมอริไนท์ พบว่าในการเติมวัสดุดังกล่าวปริมาณที่ต่างๆ ทำให้การซึมผ่านได้ของน้ำลดลง แต่หากเติมในปริมาณที่สูงไป

มีแนวโน้มที่ทำให้การซึมผ่านได้ของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าการปรับเสถียรชั้นทรายที่มีดินเหนียวปน (Clayey sand) ด้วยแอชลอยและปูนขาวปริมาณ 10% และปรับความชื้นของวัสดุผสมให้เหมาะสมช่วยทำให้การซึมผ่านได้ของน้ำลดลง ($<1 \times 10^{-7}$ ซม./วินาที) (Jirathanathaworn, 2003) แอชหนักมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอลิซิลิโคนที่มีองค์ประกอบซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ขณะที่แอชลอยและปูนขาวมีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งถ้าผสมกับน้ำได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยาได้กับซิลิกาและอะลูมินาได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) คล้ายกับคอนกรีต (Karlene & Clifford, 2000; Witayakul & Nokkaew, 1996; Srimek, 2008; ศรีณัฐ พวงพัฒน,

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2551). Problems and direction on operation the sanitary landfill. ค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2558, จาก <http://www.pcd.go.th/Operate/Landfill/thai.pdf>
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2557). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2557. ค้นเมื่อ 6 มกราคม 2559, จาก http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_report.cfm?task=pcdreport2557
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). ร่างแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศไทย. ค้นเมื่อ 12 ตุลาคม 2558, จาก <http://www.pcd.go.th/Download/regulation.cfm?task=s10> กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). การจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. ค้นเมื่อ 6 มกราคม 2559, จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_garbage.html

2545) ทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านได้ของน้ำดีขึ้น

นอกจากนี้ในการทดลองที่ขึ้นความหนาของส่วนผสมที่แตกต่างกันนั้นพบว่าขึ้นความหนา 15 ซม. มีความสามารถทำให้น้ำซึมผ่านต่ำสุด ผลการวิจัยสอดคล้องกับการศึกษาของ Daniel (1984) ในการทำนายการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวและการศึกษาต่างๆ ที่รายงานความสามารถซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อขึ้นความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้น (Liu & Evett, 2008)

ผลการศึกษาสรุปได้ว่าวัสดุผสมประเภท แอชหนัก แอชลอย และปูนขาว สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานและปรับปรุงความสามารถการซึมผ่านน้ำของส่วนผสมจากตะกอนน้ำเสียให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ร้อยละ 50 และขึ้นความหนาของส่วนผสม 15 ซม. นี้ ค่าที่ได้ยังต่ำกว่าเกณฑ์ค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในการทำวัสดุรองพื้น (Landfill base material) หลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนที่กำหนด คือ 1.0×10^{-9} ลบ.ซม. ต่อวินาที (Steniewskis, Widomski & Horn, 2011) และต่ำกว่าเกณฑ์การทำวัสดุปิดทับ (Capping barrier layer) หลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน (1.0×10^{-5} ลบ.ซม.ต่อวินาที) (Gross et al., 2002) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะยังไม่ได้เกณฑ์ตามที่กำหนดแต่บ่งชี้ว่าสามารถนำไปใช้ในรูปแบบอื่นได้ เช่น การใช้เป็นวัสดุปูรองพื้นแบบผสม (Composite liner) สำหรับหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนในลักษณะวัสดุรองพื้นต่างๆ กับกากตะกอนน้ำเสียที่ผสมกับแอชหนัก แอชลอย และปูนขาวได้

ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ สามารถนำไปปรับปรุง โดยการผสมกับวัสดุผสมประเภทแอชหนัก แอชลอย และปูนขาวได้ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ ตะกอนน้ำเสียต่อวัสดุผสมดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 50 (1:1 โดยน้ำหนัก) และผสมให้มีขึ้นความหนาประมาณ 15 ซม.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยเหลือในการทดสอบและวิเคราะห์งานวิจัยสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการจัดตั้งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548. ค้นเมื่อ 12 ตุลาคม 2558, จาก http://www2.diw.go.th/PIC/law_01.html
- ปราโมช เชี่ยวชาญ. (2557). การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) ตอนที่ 2 การดำเนินการ ขุดดี และข้อจำกัด. จุลสารสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพออนไลน์. ค้นเมื่อ 6 มกราคม 2559, จาก <http://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/book573/Senitary573.pdf>
- ลดาวีลย์ คำภา. (2555). ยุทธศาสตร์การพัฒนาเศรษฐกิจไทยภายใต้แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. วารสารเศรษฐศาสตร์สุโขทัย, 6(2), 1-27.
- ศรัณย์รัฐ พวงพัฒน์. (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Daniel, D. E. (1984). Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 110(2), 385-400.
- Gross, B. E., Bonaparte, R., Daniel, D. E., Koemer, R. M., & Dwyer, S. (2002). *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. Washington, DC: United states Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Jirathanathaworn, T. (2003). *Stabilization of clayey sand with lime and fly ash for landfill liners*. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Graduate Studies, Kasetsart University.
- Karlene F., & Clifford P. (2000). *Use of bottom ash and fly ash in Rammed-Earth Construction (Final Report)*. Dakota: Energy & Environmental Research Center.
- Kim, J. Y., Edil T. B., & Park J. K. (1997). Effective porosity and seepage velocity in column test on compacted clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12), 1135-1142.
- Liu, C., & Evett, J. B. (2008). *Soil properties: Testing, measurement, and evaluation*. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Srimoke, W. (2008). *Lead removal efficiency by korat soil series with added fly ash*. Master's Thesis, Faculty of Graduated Studies, Mahidol University.
- Stepniewski, W., Widomski, M. K., & Horn, R. (2011). Hydraulic conductivity and landfill construction. In O. Dikinya (Ed.), *Development in hydraulic conductivity research* (pp.250-270). Rijeka: In Tech.
- Tsai, T. D., & Vesilind, P. A. (1998). A new landfill liner to reduce ground-water contamination for heavy metal. *Journal of Environmental Engineering*, 124(11), 1061-1065.
- Witayakul, W. & Nokkaew, N. (1996). Optimum ratio of lignite bottom ash and rock dust in asphalt concrete. *Kasetsart Journal of Natural Science*, 30(1), 364-372.

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการทดสอบคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของกากตะกอนน้ำเสีย เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว

พารามิเตอร์	วิธีการทดสอบ
คุณลักษณะทางเคมี	
pH	ASTM D 4972 Standard test method for pH of soils
โลหะหนัก (ตะกั่ว แคดเมียม โปรท)	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer (ICP-MS)
คุณลักษณะทางกายภาพ	
ขนาดอนุภาคและพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
ปริมาณความชื้น	ASTM D 2216-92 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock

ตารางที่ 2 อัตราการผสมของวัสดุผสมจากกากตะกอนน้ำเสียกับเถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาว

การผสม (%)	อัตราการผสม (กรัม)	
	กากตะกอน	เถ้าหนัก เถ้าลอย และปูนขาวที่ผสมแล้ว
0*	3,000	0
1	2,970	30
2	2,940	60
4	2,880	120
6	2,820	180
8	2,760	240
10	2,700	300
20	2,400	600
30	2,100	900
40	1,800	1,200
50	1,500	1,500

หมายเหตุ : * ชุดควบคุม

ตารางที่ 3 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสีย ถ้ำหนัก ถ้ำลอย และปูนขาว

คุณลักษณะ	กากตะกอนน้ำเสีย	ถ้ำหนัก	ถ้ำลอย	ปูนขาว
ลักษณะเนื้อของวัสดุผสม	เนื้อละเอียดคล้ายดินเหนียว รวมเป็นอนุภาคใหญ่ ช่องว่าง น้อย (ก)	เนื้อหยาบคล้ายทรายขนาด ใหญ่หรือกรวด อนุภาคเล็กกว่า ตะกอน มีช่องว่างมาก (ข)	เนื้อละเอียด เป็นผงคล้ายแป้ง อนุภาคเล็กมีช่องว่างมาก (ค)	เนื้อละเอียด เป็นผงคล้าย แป้งอนุภาคใหญ่กว่าถ้ำ ลอย มีช่องว่างมาก (ง)
สี	สีน้ำตาลเข้ม	สีเทาอ่อน	สีน้ำตาลอ่อน	สีขาว
pH	6.62	9.95	12.41	12.77
ปริมาณความชื้น, % ต่อ น้ำหนักแห้ง	320.767	29.316	0.016	0.012

ตารางที่ 4 ปริมาณของอินทรีย์สาร คาร์บอน และโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย

โลหะหนัก	$\bar{x} \pm (SD)$
% อินทรีย์สาร	8.944 (1.010)
% คาร์บอนอินทรีย์	4.972 (0.557)
ตะกั่ว (มก./กก.)	1.001 (0.391)
แคดเมียม (มก./กก.)	3.274 (1.567)
ปรอท (มก./กก.)	0.511 (0.485)

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยการซึมผ่านได้ของน้ำในวัสดุผสมอัตราต่างๆ

อัตราส่วนของวัสดุผสมโดยน้ำหนัก (%)	ค่าเฉลี่ยการซึมผ่านได้ของน้ำ (ซม./วินาที)
0*	^a $1.612 \times 10^{-4} \pm 1.018 \times 10^{-4}$
1	^a $1.598 \times 10^{-4} \pm 1.050 \times 10^{-4}$
2	^b $1.529 \times 10^{-4} \pm 9.900 \times 10^{-5}$
4	^c $1.504 \times 10^{-4} \pm 9.769 \times 10^{-5}$
6	^d $1.469 \times 10^{-4} \pm 9.476 \times 10^{-5}$
8	^{ef} $1.392 \times 10^{-4} \pm 8.589 \times 10^{-5}$
10	^{ef} $1.381 \times 10^{-4} \pm 8.618 \times 10^{-5}$
20	^{ef} $1.402 \times 10^{-4} \pm 8.686 \times 10^{-5}$
30	^{ef} $1.397 \times 10^{-4} \pm 8.695 \times 10^{-5}$
40	^d $1.457 \times 10^{-4} \pm 9.267 \times 10^{-5}$
50	^g $1.916 \times 10^{-4} \pm 1.307 \times 10^{-4}$

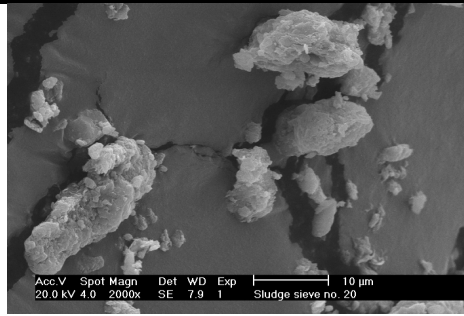
หมายเหตุ: * ชุดควบคุม

ตัวอักษรที่เหมือนกันและแสดงบนค่าเฉลี่ยนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha=0.05$

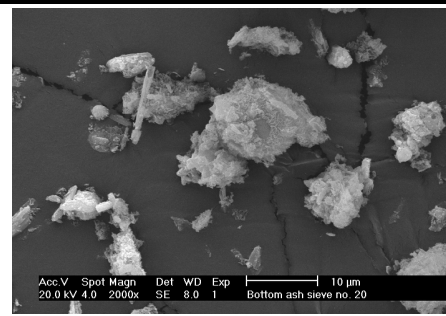
ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยของการซึมผ่านได้ของน้ำที่ชั้นความหนาของวัสดุผสมแตกต่างกัน

ความหนาของวัสดุผสม (ซม.)	การซึมผ่านได้ของน้ำ (ซม./วินาที) ($\bar{x} \pm SD$)
5	^a $2.780 \times 10^{-4} \pm 3.147 \times 10^{-5}$
10	^b $1.113 \times 10^{-4} \pm 1.044 \times 10^{-5}$
15	^c $6.498 \times 10^{-5} \pm 4.097 \times 10^{-6}$

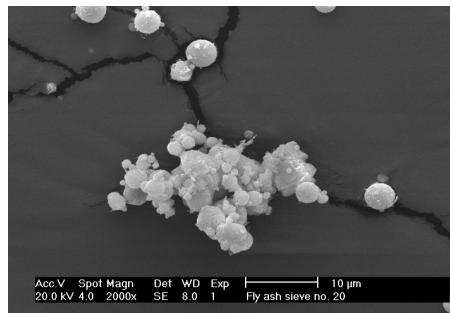
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันและแสดงบนค่าเฉลี่ยนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha=0.05$



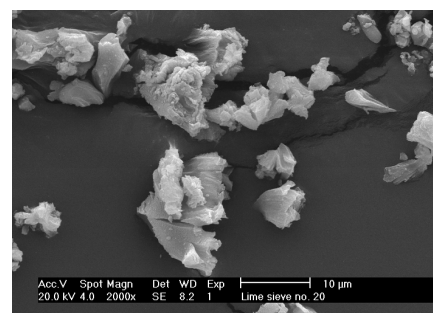
ก. กากตะกอนน้ำเสีย



ข. ถ่านหนัก



ค. ถ่านลอย



ง. ปูนขาว

ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมต่างๆ จากการตรวจด้วย SEM
(ก.ตะกอนน้ำเสีย ข.ถ่านหนัก ค.ถ่านลอย ง.ปูนขาว)