

โครงการศึกษาความเป็นไปได้
ในการใช้ขยะจากการก่อสร้างและรีไซเคิล
เพื่อลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดิน

ทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่/นักวิจัยใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ปีงบประมาณ 2558

(เลขรหัส GDNS 58-039-54-002)

ผู้วิจัย

ศीलวุธ ดำรงศิริ

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 หลักการและเหตุผล | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา | 2 |
| บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร | 3 |
| 2.1 ปัจจัยสำคัญต่อการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน | 3 |
| 2.2 กระบวนการดูดซับ | 6 |
| 2.3 ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและรีดลอน | 8 |
| บทที่ 3 วิธีการศึกษา | 11 |
| 3.1 ตัวดูดซับ | 11 |
| 3.2 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ | 11 |
| 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าคงที่ของการดูดซับ และ Adsorption isotherm | 13 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา | 18 |
| 4.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และ ความสามารถในการสะเทินกรด | 18 |
| 4.2 สัณฐานของวัสดุ (topography of material) | 20 |
| 4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน | 23 |
| 4.4 ผลการตรวจสอบด้วย XRD | 24 |
| 4.5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) | 25 |
| 4.6 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ | 26 |
| 4.7 ค่าคงที่ของการดูดซับ และ Adsorption isotherm | 27 |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา | 34 |
| เอกสารอ้างอิง | 35 |

บทที่ 1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันมีพื้นที่ที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักต่าง ๆ อันเนื่องมาจากการทำเหมือง และการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ที่สามารถใช้ในการเพาะปลูกได้อย่างเหมาะสม แนวทางการบำบัดโดยการทำให้โลหะหนักอยู่ในสภาพที่คงตัวโดยการเติมตัวดูดซับ (adsorbent) ลงไปผสมในดินที่ปนเปื้อน เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าดำเนินการต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ มาก และไม่ทำลายโครงสร้างของดินตามธรรมชาติมากนัก เหมาะสมต่อสภาพพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนต่ำแต่มีพื้นที่มาก โดยวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาศึกษาได้แก่ ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์ วัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ และวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตร จากการทำเหมือง และจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ การบำบัดโดยวิธีนี้มุ่งเน้นไปที่การลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายไปยังชั้นน้ำใต้ดิน การดูดซับโดยพืช รวมถึงการส่งผ่านไปยังสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในห่วงโซ่อาหาร

โดยรวมแล้ว ตัวแปรที่สำคัญที่พบว่าส่งผลให้เกิดการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก ได้แก่ มีค่าพีเอชเป็นด่าง มีความสามารถในการสะเทินกรดสูง (acid buffering capacity) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง มีพื้นที่ผิวมาก มีหมู่ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักได้ดี และมีสารอินทรีย์ละลายน้ำต่ำ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลรวมกันทั้งหมดโดยสามารถชี้วัดความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้โดยการใช้ค่าคงที่ในการกระจายตัวของโลหะหนักระหว่างตัวดูดซับกับน้ำ (Solid-liquid distribution coefficient, K_d) ซึ่งหากเป็นการนำไปประยุกต์ใช้ในดินนั้น วัสดุนั้นควรมีค่า K_d สูงกว่า K_d ของดินเดิม 10 ถึง 100 เท่า เนื่องจากการเติมลงดินในปริมาณที่จำกัด (Venegas et al., 2015) และนอกจากนี้ ความคงตัวของตัวดูดซับก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เพราะหากตัวดูดซับสลายตัวได้ง่าย โลหะหนักที่ดูดซับไปแล้วก็จะถูกปลดปล่อยออกมาอีกครั้ง

ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและรื้อถอน (Demolition Waste) เป็นของเสียกลุ่มหนึ่งที่มีเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการพัฒนาของเมือง โดยมักไม่เกิดการนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดนอกจากนำไปใช้ในลักษณะของการถมที่ ลักษณะสมบัติของเศษวัสดุก่อสร้าง และรื้อถอน มีแนวโน้มที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุบำบัดดินได้ เนื่องจากมีพื้นผิวที่เป็นลบ มีความพรุน และทำให้พีเอชสูงขึ้น และยังเป็นวัสดุที่มีอายุยืนยาว ซึ่งล้วนแต่เป็นลักษณะที่เหมาะสมที่จะช่วยทำให้โลหะหนักในดินลดการเคลื่อนที่ จึงนับเป็นวัสดุที่น่าสนใจศึกษาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดดิน อย่างไรก็ตาม การศึกษาต่าง ๆ ที่ได้ทบทวนมาทั้งหมด พบว่าเป็นส่วนใหญ่เป็นการศึกษากับมลสารในกลุ่มที่มีประจุ

ลบ สำหรับในส่วนที่เป็นมลสารกลุ่มโลหะหนักนั้นเป็นการศึกษากับน้ำเสีย และเป็นลักษณะของการทดลองนำไปใช้งาน และสังเกตผลที่เกิดขึ้นจากการนำไปใช้ ซึ่งยังขาดข้อมูลอีกมากสำหรับการพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการบำบัดดิน ดังนั้น ในการศึกษานี้จะทำการศึกษากับโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดการปนเปื้อนขึ้นจริงในประเทศไทย โดยเจาะจงไปที่วัสดุหลักที่น่าจะมีความสามารถในการดูดซับที่สูง คือ ซีเมนต์เพสต์ อิฐแดง และ อิฐมวลเบา โดยศึกษาในด้านความเหมาะสมของวัสดุโดยพิจารณาจากผลของลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ส่งผลต่อการดูดซับอย่างครบถ้วน และ ศึกษาค่าคงที่ของการดูดซับอันเป็นผลลัพธ์จากลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของตัววัสดุ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวดูดซับกลุ่มนี้ในการบำบัดดิน

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ของเสียจากการก่อสร้างและรีดอน ได้แก่ เศษซีเมนต์เพสต์ เศษอิฐแดง และเศษอิฐมวลเบา ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เพื่อลดการเคลื่อนตัวของแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน โดยมีวัตถุประสงค์ย่อย ได้แก่

1. ทราบถึงลักษณะสมบัติพื้นฐานที่ส่งผลต่อการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินของ เศษซีเมนต์เพสต์ เศษอิฐแดง และเศษอิฐมวลเบา
2. ทดลองใช้เศษคอนกรีต เศษอิฐแดง และเศษอิฐมวลเบา ในการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการดูดซับบนตัวดูดซับเหล่านั้น
3. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยอาศัยหลักการทางวิชาการต่าง ๆ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ของเสียจากการก่อสร้างและรีดอน 3 ชนิด ได้แก่ เศษซีเมนต์เพสต์ เศษอิฐแดง และ เศษอิฐมวลเบา
2. สารมลพิษที่ศึกษา ได้แก่ แคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว
3. เป็นการประเมินความเป็นไปได้โดยพิจารณาจาก ลักษณะสมบัติพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ และ ค่าคงที่ในการดูดซับ
4. เป็นศึกษาในลักษณะของการทดลองในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร

2.1 ปัจจัยสำคัญต่อการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

การเติมตัวดูดซับลงไปผสมในดินที่ปนเปื้อน เพื่อให้โลหะหนักอยู่ในสภาพที่คงตัว เป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยม และมีการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปนเปื้อนอยู่มากมาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าดำเนินการต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ มาก และไม่ทำลายโครงสร้างของดินตามธรรมชาติเพียงเล็กน้อย เหมาะสมต่อสภาพพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนต่ำแต่มีพื้นที่มาก วัสดุต่าง ๆ ที่นำมาศึกษากัน ได้แก่ ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์ วัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมการเกษตร และวัสดุเหลือใช้จากการทำเหมือง หรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ การบำบัดโดยวิธีนี้มุ่งเน้นไปที่การลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายไปยังชั้นน้ำใต้ดิน การดูดซับโดยพืช รวมถึงการส่งผ่านไปยังสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในห่วงโซ่อาหาร โดยอาศัยกลไกการดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ และตกตะกอน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของโลหะหนัก โดยการเปลี่ยนแปลงพีเอช (speciation) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) และลักษณะและขนาดพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ ทั้งนี้ วัสดุแต่ละอย่างมีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดการลดความเคลื่อนที่ และลดการดูดซับโดยพืชของโลหะหนักที่แตกต่างกันไปตามแต่องค์ประกอบของวัสดุ และชนิดของโลหะหนัก (Houben et al., 2012; Venegas et al., 2015) นอกจากนี้ ลักษณะบางประการของตัววัสดุเองก็ส่งผลถึงความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ อาทิ วัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ แม้ดูดซับโลหะหนักได้ดีจากการที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง แต่วัสดุอินทรีย์บางประเภทกลับปลดปล่อยสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งทำให้โลหะหนักถูกชะออกมา เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Houben et al., 2012) หรือ วัสดุอินทรีย์บางชนิดก็ย่อยสลายตัวเองในระยะเวลาไม่นานทำให้เกิดการปลดปล่อยของโลหะหนักที่ดูดซับไว้กลับออกมาได้เช่นกัน (Akkajit et al., 2013)

โดยรวมแล้ว ตัวแปรที่สำคัญที่พบว่าส่งผลให้เกิดการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก ได้แก่ มีค่าพีเอชเป็นด่าง มีความสามารถในการสะเทินกรดสูง (acid buffering capacity) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง มีพื้นที่ผิวมาก มีหมู่ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักได้ดี และมีสารอินทรีย์ละลายน้ำต่ำ ทั้งนี้ ตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลร่วมกันทั้งหมดจึงยากที่จะชี้วัดให้ชัดเจนว่าวัสดุแบบใดจะเหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุที่สนใจมาทำการทดลองดูดซับโลหะหนักที่ต้องการศึกษาจะสามารถชี้วัดให้ชัดเจนขึ้นถึงผลที่ได้จากวัสดุที่นำมาใช้จากค่าคงที่ในการกระจายตัวของโลหะหนักระหว่างตัวดูดซับกับน้ำ (Solid-liquid distribution coefficient, K_d) ซึ่ง

หากเป็นการนำไปประยุกต์ใช้ในดินนั้น วัสดุนั้นควรมีค่า K_d สูงกว่า K_d ของดินเดิมตั้งแต่ 10 ถึง 100 เท่า เนื่องจากในทางปฏิบัติจะเป็นการเติมลงดินในปริมาณที่จำกัด (Venegas et al., 2015) ทั้งนี้ หากตัวดูดซับส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพีเอชด้วยก็จะยิ่งทำให้ K_d ของดินเดิมนั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Sauvé et al., 2000)

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดต่างนับว่าเป็นตัวแปรหลักต่อรูปแบบของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ความเป็นกรดต่างส่งผลต่อประจุที่พื้นผิวของวัสดุเนื้อดิน ปฏิกริยารีดอกซ์ การตกตะกอน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนต่าง ๆ ในสารละลายดิน และหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของวัสดุเนื้อดิน รวมถึง การกระจายตัวของคอลลอยด์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่โลหะหนักในสิ่งแวดล้อม และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของโลหะหนัก (Adriano, 1986; McLean and Bledsoe, 1992; Koptsik, 2014) โดยทั่วไป ค่าความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะหนักต่าง ๆ เกิดการตกตะกอนและเกิดการดูดซับกับวัสดุต่าง ๆ มากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของโลหะหนักลดลง (Berbecea et al., 2010)

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC)

CEC คือ ความจุของวัสดุในการดูดซับประจุบวก รวมถึง ไอออนโลหะหนักต่าง ๆ ไว้บนพื้นผิว โดยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเกิดขึ้นจากพื้นผิวที่มีประจุลบ ดินที่มีค่า CEC สูง ทำให้ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของโลหะหนักลดลง ทำให้สามารถจุปริมาณโลหะหนักได้มากโดยที่ไม่เกิดอันตรายลงต่อสิ่งแวดล้อม (Adriano, 1986)

ค่า CEC ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นผิวของเม็ดดิน ค่า CEC ของดินจึงเป็นผลของปริมาณและชนิดของดินเหนียว, อินทรีย์สาร และออกไซด์ของเหล็ก, อะลูมิเนียม และแมงกานีส ยกตัวอย่างเช่น CEC ของวัสดุเนื้อดิน เช่น ทราย 1-5 cmolc kg^{-1} ดินเหนียว >30 cmolc kg^{-1} ซิวมีส 100-300 cmolc kg^{-1} (Donahue et al, 1977)

นอกจากนี้ CEC ของดินขึ้นยังอยู่กับ pH ของดินอีกด้วย โดยที่ pH สูงจะมีค่า CEC สูงกว่าที่ pH ต่ำ โดยสามารถอธิบายได้ด้วยความสามารถในการแย่งจับพื้นผิวของไอออนบวก กับ H^+ ในสารละลาย โดยในสารละลายที่ pH สูง จะมี H^+ ในสารละลายเข้มข้นน้อยกว่าที่ pH ต่ำ ทำให้ไอออนบวกต่าง ๆ สามารถยึดจับกับพื้นผิวได้ง่ายกว่า (Havlin et al, 2011)

ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่าง (pH Buffering Capacity) และความสามารถในการสะเทินกรด (Acid Neutralizing Capacity, ANC) ของดิน

เมื่อกล่าวถึงความสามารถในการสะเทินกรด โดยทั่วไปจะหมายถึง ความสามารถในการสะเทินกรดของน้ำ หรือ Alkalinity ที่โดยทั่วไปเป็นผลของสารประกอบคาร์บอเนตที่ละลายอยู่ในน้ำ และในกรณีที่น้ำนั้นมีสารแขวนลอยรวมอยู่ด้วย จะเรียกว่า Acid Neutralizing Capacity ซึ่งใช้หลักการเดียวกัน และในกรณีของดินจะเรียกว่า Acid Neutralizing Capacity เช่นกัน แต่เป็นผลจากปฏิกิริยาที่ซับซ้อนกว่าน้ำ

โดยทั่วไป ดินมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับสภาพภาวะกรดตามธรรมชาติได้ด้วยปฏิกิริยาบัฟเฟอร์ทำให้กรดที่เข้ามาในระบบถูกสะเทินให้เป็นกลาง กระบวนการผุพังสลายตัว (Weathering process) เป็นปฏิกิริยาสะเทินกรดที่มีบทบาทกว่าปฏิกิริยาอื่น ๆ (Chesworth, 2008) Weathering process เป็นกระบวนการไฮโดรไลสิสที่ใช้ H^+ โดยแร่คาร์บอเนต และ แร่ซิลิเกต ปฏิกิริยา Weathering process ที่เกิดจากแร่คาร์บอเนตเร็วกว่าปฏิกิริยาจากแร่ซิลิเกตมาก และสามารถสะเทินกรดที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ระบบมีพีเอชคงอยู่ที่ประมาณ 8 ปฏิกิริยา Weathering process จากแร่ซิลิเกตจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มี Weathering process จากแร่คาร์บอเนตแล้ว อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยา Weathering process จากแร่ซิลิเกตนั้นช้ามาก และมักไม่สามารถรองรับกรดที่เข้าสู่ระบบดินได้ แม้ว่ามันจะเป็นแร่หลักบนเปลือกโลก ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange) เป็นอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่ลด H^+ ที่เข้ามาในดินโดยการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , and Na^+) การสลายตัวของอลูมิเนียม (Aluminum dissolution) เป็นอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่ลด H^+ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชน้อยกว่า 5 ซึ่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ไม่สามารถสะเทินกรดได้ ปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งหมดนี้ทำให้ดินสามารถรองรับกรดต่าง ๆ ที่เข้ามาในระบบได้ ซึ่งสามารถแสดงเป็นจำนวนได้โดยวิธีเดียวกับการหาค่า ANC ซึ่งโดยทั่วไปใช้กับสารละลาย (Chesworth, 2008) ทั้งนี้ วัสดุอย่างขยะในส่วน ขยะอินทรีย์จากชุมชน ปุ๋ยหมักต่าง ๆ มักมี ANC สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นบัฟเฟอร์สูงที่พีเอช 6 ในขณะที่วัสดุพวกถ่านชีวภาพนั้นมีค่า ANC ต่ำกว่ามาก (Venegas et al., 2015) ซึ่งพบว่า ANC มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบคาร์บอเนตและกรดอินทรีย์

2.2 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกลไกหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดิน การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด (Interface) เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง ซึ่งในที่นี้ เป็นแบบของเหลว-ของแข็ง โดยโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดินจะละลายออกมาอยู่ในน้ำดิน (Soil solution) และถูกดูดซับไว้ด้วยตัวดูดซับหรือวัสดุปรับปรุงดินที่เติมลงไป โดยในกระบวนการนี้ สารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวกลางที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

ในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนตัวออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทั้งภายในโพรง รูพรุน และพื้นผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลระหว่างน้ำกับตัวดูดซับจะเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ที่ความเข้มข้นของสารในน้ำและบนพื้นผิวไม่เปลี่ยนแปลง โดยในการดูดซับนี้จะมีกลไกหลักแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemisorption)

Physisorption เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับออร์บิทัลของอิเล็กตรอน การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ น้อยกว่า 20 kJ mol^{-1} และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย (Reversible) ตัวถูกดูดซับสามารถถูกดูดซับอยู่รอบ ๆ พื้นผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) โดยตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ทั้งนี้ Physisorption เป็นกลไกพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับทุก ๆ การดูดซับในระบบระหว่างของแข็งและของเหลว โดยได้รับผลกระทบจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารต่าง ๆ น้อยมาก สารที่ถูกดูดซับไม่ถูก

เปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยยังคงเป็นแบบเดียวกับที่อยู่ในน้ำ ทำให้ลักษณะทางเคมีของน้ำยังคงเหมือนเดิม

Chemisorption เป็นการดูดซับจากแรง Valence forces แบบเดียวกับปฏิกิริยาการเกิดสารเคมี ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม เป็นการดูดซับที่มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น เกิดพันธะทางเคมีที่แข็งแรง และมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ $50-400 \text{ kJ mol}^{-1}$ ทำให้ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากผิวตัวดูดซับได้ยาก หรือโดยทั่วไปจะไม่เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (irreversible) ทั้งนี้ การดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น เนื่องจากถูกจำกัดโดยการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวนั้นเอง อย่างไรก็ตาม กลไกการดูดซับทั้ง 2 ไม่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน แต่มีลักษณะที่เป็นข้อสังเกตของ Chemisorption ได้แก่ มีความเฉพาะทางเคมี มีการเปลี่ยนแปลง Electronic state และมักต้องมีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) และ ตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดไปแล้วไม่สามารถถูกปล่อยออกมาในรูปเดิม (เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไปแล้ว)

ข้อแตกต่างระหว่าง Physisorption และ Chemisorption

| Physisorption | Chemisorption |
|--|--|
| แรงกระทำไม่มาก เป็น Vander Waal's forces. | แรงกระทำเป็นลักษณะเดียวกับการเกิดพันธะเคมี |
| ค่า heat of adsorption ต่ำ ประมาณ $20 - 40 \text{ kJ mol}^{-1}$ | ค่า heat of adsorption สูง ประมาณ $40 - 400 \text{ kJ mol}^{-1}$ |
| ไม่มีการเกิดสารประกอบใหม่บนพื้นผิว | เกิดสารประกอบใหม่บนพื้นผิว |
| ปฏิกิริยาการดูดซับย้อนกลับได้ | ปฏิกิริยาการดูดซับ ไม่ย้อนกลับ แม้ถูกกระตุ้นให้ปลดปล่อยออกมา ก็จะอยู่ในรูปอื่น |
| ไม่ต้องการพลังงานในการกระตุ้น | ต้องใช้พลังงานในการกระตุ้น |
| การดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น | การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระดับที่เหมาะสม |
| ไม่เฉพาะเจาะจง | มีความเฉพาะเจาะจงระหว่างจุดดูดซับ (binding site) กับตัวถูกดูดซับ |
| ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่มีในระบบ | ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่มีในระบบ |
| เกิดการดูดซับซ้อนได้หลายชั้น | เกิดการดูดซับได้แค่ชั้นเดียว |

2.3 ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและรื้อถอน (Demolition Waste)

ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและรื้อถอน เป็นของเสียกลุ่มหนึ่งที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการพัฒนาของเมือง โดยมักไม่เกิดการนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดนอกจากนำไปใช้ในลักษณะของการถมที่ บางส่วนถูกทิ้งอย่างผิดกฎหมายโดยลักลอบทิ้งในพื้นที่โล่ง ป่า หรือหนองน้ำต่างๆ และบางส่วนถูกนำไปทิ้งยังหลุมฝังกลบ ซึ่งเป็นผลทำให้หลุมฝังกลบมีอายุสั้นลงโดยไม่คุ้มค่า เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วไม่ได้เน่าเสียและน่าจะมียูทิลิตี้ในการนำกลับไปใช้ประโยชน์ องค์ประกอบของของเสียเหล่านี้ประกอบไปด้วยคอนกรีต (ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ทราย และหิน) เป็นหลัก (ร้อยละ 73-88) รองลงมาได้แก่ อิฐ และ อิฐมวลเบา ส่วนที่เหลือเป็นเหล็ก หิน กระเบื้องต่าง ๆ ยิปซัมบอร์ด และไม้ โดยมีปริมาณทั้งสิ้นประมาณ 490,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2548 เฉพาะในเขตกรุงเทพมหานคร (อุษณีย์ และคณะ, 2007) เนื่องจากของเสียจากการก่อสร้างเหล่านี้ไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ และนับเป็นวัสดุที่ไม่มีมูลค่า จึงมีการศึกษาเพื่อหาทางนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการดูดซับสารมลพิษ

คอนกรีต

วิทยานิพนธ์ของนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ภายใต้ดูแลของ รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิต ที่ได้มีการนำของเสียเหล่านี้ไปทดลองใช้ในการบำบัดน้ำเสียลักษณะต่าง ๆ โดยใช้ตัวกลางเศษคอนกรีตเป็นตัวกรองภายใต้หลักการของการดูดซับ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง (ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนีย ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัส) จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (พูนศิริ, 2543) การกำจัดโลหะหนักบางชนิด (โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี) จากน้ำเสียอุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์ (ทศพร, 2545) และสารหนู (นันทนา, 2543) ซึ่งจากการศึกษาเหล่านี้ทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานของเศษคอนกรีตในภาพรวม

องค์ประกอบหลักของเศษคอนกรีต ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) (40-50%) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) (30-40%) (ทศพร, 2545) จากการทบทวนงานศึกษาต่าง ๆ พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะตั้งแต่ 2 ถึง $10 \text{ m}^2/\text{g}$ (ขนาด 0.5-2 มิลลิเมตร) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากความแตกต่างทั้งทางกายภาพและเคมีของเศษคอนกรีตที่แตกต่างกัน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) ประมาณ 30 cmole/kg จากการทดลองโดยใช้อัตราส่วนเศษคอนกรีตต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 1 g ต่อ 50 mL โดยมีความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น 10 mg/L พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก (โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี) จนถึงสมดุลน้อยกว่า 1 hr สามารถกำจัดโลหะหนักได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 (แปรผันตามชนิด) และพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน (4-9) จะมีความสามารถในการดูดซับไม่ต่างกัน และมีพีเอชสุดท้ายเท่า ๆ กัน คือ มี

ค่าประมาณ 8 (ทศพร, 2545) นอกจากนี้ ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่เกิดขึ้นมีผลต่อการตกตะกอนของโลหะหนักต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของโลหะหนักในน้ำด้วยเช่นกัน สำหรับการทดลองบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักเจือปนนั้น พบว่า การลดลงของโลหะหนัก สามารถเกิดย้อนกลับได้ คือโลหะหนักหลุดกลับออกมา ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับพีเอชของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลทำให้โลหะหนักถูกกำจัดออกจากน้ำด้วยกลไกต่าง ๆ กัน (การดูดติดของไอออน และการกรองตะกอนที่เกิดขึ้น) (ทศพร, 2545) ทั้งนี้ จากการทบทวนผลการศึกษาต่างๆ พบว่าค่าพีเอชสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 10 จนลดลงมาอยู่ในระดับปกติของน้ำเสียนั้น ๆ (พูนศิริ, 2543; ทศพร, 2545; นันทนา, 2543) เมื่อใช้ไปในระยะเวลาานาน ซึ่งเกี่ยวข้องทั้งกับสัดส่วนปริมาณเศษคอนกรีตกับน้ำ ระยะเวลาสัมผัส และองค์ประกอบในคอนกรีตที่ทำให้เกิดความเป็นด่างที่หลงเหลืออยู่

ทั้งนี้ คอนกรีตนั้นประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์+น้ำ) ทราย และหิน ซึ่งลักษณะสมบัติทั้งในด้านการดูดซับและผลต่อพีเอชของคอนกรีตนั้น น่าจะเป็นผลของซีเมนต์เพสต์มากกว่าที่จะเป็นผลของทรายและหิน โดยซีเมนต์เพสต์นั้นมีองค์ประกอบหลักเป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (50-70%) และมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) อยู่ประมาณ 15-25% ซึ่งทำให้มีพีเอชสูงราว 12 และมีรูพรุนอยู่มากโดยมีขนาดตั้งแต่ 0.5 nm – 10,000 nm

อิฐมวลเบา (autoclaved aerated concrete)

อิฐมวลเบา เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แทนอิฐเนื่องจากสามารถทำออกมาเป็นก้อนใหญ่ แต่มีน้ำหนักเบา จึงสะดวกในการก่อสร้าง และยังช่วยป้องกันความร้อนได้ดี อิฐมวลเบาทำจากทราย ปูนสุก ซีเมนต์ ยิบซั่ม และสารก่อฟองอย่างอลูมิเนียม และผ่านการให้ความร้อนทำให้ได้ออกมาเป็นโทเบอร์โมไรต์ (tobermorite, $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคล้ายกับซีเมนต์แต่มีสัดส่วนของสารประกอบแคลเซียมต่ำกว่า คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (44%) แคลเซียมออกไซด์ (28%) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (7%) (Damla et al, 2009) และยังมี ความพรุนสูงได้มากกว่า 80% (Narayanan และ Ramamurthy, 2000; Laukaitis และ Fiks, 2006) โดยมีขนาดรูพรุนต่าง ๆ กันไป (0.05-500 ไมโครเมตร) ตามแต่กระบวนการผลิต ทั้งนี้ จากการทบทวนผลงานวิจัยไม่พบการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำมาใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ด้วยความเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงมากจึงเป็นวัสดุอีกหนึ่งประเภทที่น่านำมาศึกษา

อิฐแดง (Brick)

อิฐแดงนั้นทำขึ้นจากดินเหนียวผสมกับแกลบ และขี้เถ้า แล้วจึงเผาให้เกิดความแข็ง ซึ่งอิฐแดงนั้น มีรพุนสูงและดูดซับน้ำได้ องค์ประกอบหลักของอิฐแดงคล้ายกับดินเหนียว คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (58-66%) อะลูมิเนียมออกไซด์ (14-18%) และเหล็กออกไซด์ (7-9%) (สุทัศน์, 2555; Tonnyopas, 2013) ซึ่งดินเหนียวนั้นเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวที่สูงและมีประจุพื้นผิวเป็นลบจึงมักมีการศึกษาเพื่อใช้ในการดูดซับไอออนที่มีประจุบวกของโลหะหนัก

อย่างไรก็ตาม สำหรับอิฐซึ่งเป็นดินเหนียวที่ผ่านการเผาที่ความร้อนสูงนั้นยังไม่มีผู้ศึกษาถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะนี้มากนัก จากการทบทวนการศึกษาผลงานวิจัยต่าง ๆ พบว่ามีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดมลพิษต่าง ๆ อยู่บ้าง อาทิ Djeribi และคณะ (2008) ศึกษาการใช้เศษอิฐในการดูดซับทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อความเข้มข้นของประจุในน้ำ (ionic strength) เพิ่มขึ้น และสามารถอธิบายได้ด้วย film diffusion mechanism และ pseudo second order kinetic model โดย isotherm ของการดูดซับเป็นทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich และพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน Kooli และ คณะ (2014) ได้ศึกษาการดูดซับสารสี (basic blue 41) และพบว่าที่พีเอชต่ำ (<3) ประสิทธิภาพจะต่ำลงซึ่งน่าจะเป็นผลของการผลึกกันของประจุบนพื้นผิวกับสารสีที่มีประจุเป็นบวก ค่าคงที่ของการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสีบนตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงคาดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่การปรับผิวให้มีประจุลบด้วยการใช้ต่างจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่น ๆ ได้แก่ การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยอิฐปน (Yadav et al, 2006) การดูดซับฟอสเฟส ไนเตรท คลอไรด์ และสารซักล้าง ด้วยเศษอิฐ (Selvaraju และ Pushpavanam, 2009)

โดยสรุป ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและรื้อถอน ที่น่าสนใจนำมาศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับ ได้แก่ เศษคอนกรีต อิฐแดง และอิฐมวลเบา อย่างไรก็ตาม คอนกรีตนั้นเป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพส ทราย และหิน ซึ่งตัววัสดุที่มีความพรุนและมีความเป็นด่างนั้นคือส่วนของซีเมนต์เพสดังนั้น ในการศึกษาจะเลือกใช้วัสดุ 3 ชนิด คือ ซีเมนต์เพส อิฐมวลเบา และ อิฐแดง

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

3.1 ตัวดูดซับ

วัสดุที่ใช้ศึกษา ได้แก่ 1) ซีเมนต์เพส เตรียมโดยการนำปูนซีเมนต์ ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 (Normal Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ผสมกับน้ำและ ทรายให้แข็งตัวและบ่มต่อเป็นเวลา 1 สัปดาห์ 2) อิฐมวลเบา ขนาด $60 \times 20 \times 7$ cm ซึ่งเป็นอิฐมวลเบาที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป และ 3) อิฐแดง ขนาด $14 \times 6 \times 2.5$ cm ซึ่งเป็นอิฐแดงขนาดเล็กที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ที่นิยมเรียกว่าอิฐมอญ

วัสดุแต่ละชนิดจะถูกนำมาบดย่อยจนมีขนาดเล็กกว่า 2 mm จากนั้นจึงนำมาร่อนด้วย ตะแกรงขนาดรูพรุน 0.063 mm และผสมกันให้มีสัดส่วน 0.063-2 mm และ เล็กกว่า 0.063 mm ที่ 5 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการบดย่อยในการทดลองนี้

ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่า ซีเมนต์เพสและอิฐมวลเบา มีพีเอชเป็นค่าต่างกัน จึงทำการทดลองได้ยาก เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของแคดเมียม ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งการดูดซับและการตกตะกอน ทำให้ไม่สามารถศึกษา adsorption isotherm ได้ จึงจำเป็นต้องทำการล้างด้วยกรดเจือจาง เพื่อให้วัสดุทั้ง 2 เป็นกลาง ทั้งนี้ การล้างจนเป็นกลางนับเป็นการจำลองสภาพที่เกิดขึ้นในอนาคตที่ตัววัสดุถูกชะล้างจากฝนจนมีสภาพเป็นกลาง ซึ่งในขั้นตอนการล้างนี้ใช้ระยะเวลาในการแช่และล้างตัวอย่างเศษซีเมนต์ บดนานกว่าหนึ่งเดือน ในที่นี้จะเรียกว้วัสดุที่ล้างแล้วทั้ง 2 ว่า ซีเมนต์เพส(ล้าง) และ อิฐมวลเบา(ล้าง)

3.2 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ

3.2.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ความสามารถในการสะเทินกรด (Acid neutralization capacity, ACN)

การทดลองในส่วนนี้ประยุกต์จากวิธีการของ Venegas et al. (2015) โดยการทดลองแบ่ง ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง นำตัวอย่าง 1 g ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 100 mL กวนทิ้งไว้ 20 นาทีแล้ว วัด pH จากนั้นไทเทรตโดยเติมสารละลายกรดไนตริกที่รู้ความเข้มข้นและปริมาตร กวนทิ้งไว้ 20 นาทีแล้ว วัด pH จากนั้นจึงทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนมีค่าพีเอชประมาณ 2 การทดลองอีกส่วนหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกับการทดลองส่วนแรก แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดไนตริกเป็นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนได้พีเอช 12 จากนั้นจึงนำผลที่ได้เขียนเป็นกราฟระหว่าง

พีเอชกับปริมาณกรดที่เติมลงไปเป็นหน่วย meq/g ส่วนในส่วนที่เป็นการสะท้อนด้วยค่าให้ใช้เป็นค่าติดลบของการเติมกรดในหน่วยเดียวกัน

- ค่าความเป็นกรดเป็นต่างของวัสดุ คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นก่อนทำการสะท้อน
- ACN เท่ากับ ปริมาณกรด (meq g^{-1}) ที่ใช้ในการเปลี่ยนพีเอชจากค่าเริ่มต้นไปยังค่าพีเอชค่าหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ใช้ค่าพีเอช 4 ซึ่งครอบคลุมปฏิกิริยาการสะท้อนกรดตามธรรมชาติ

3.2.2 สัณฐานของวัสดุ (Topography of material)

การศึกษานี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM; JEOL: model JSM-6610LV) และ Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM; JEOL model: JSM-7610F) เพื่อให้เห็นถึงสัณฐานของวัสดุที่ได้เตรียมไว้ ตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์ ได้แก่ ซีเมนต์เพส อีฐมวลเบา อีฐแดง ซีเมนต์เพส(ล้าง) และ อีฐมวลเบา(ล้าง)

3.2.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ขนาดรูพรุน (pore size) และปริมาตรรูพรุน (pore volume)

พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน วิเคราะห์โดยเครื่อง Surface area analyzer (Quantachrome, Autosorb-1) โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ ศูนย์บริการวิเคราะห์/ทดสอบ วิทยาลัยปิโตรเลียมและ ปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์ ได้แก่ ซีเมนต์เพส อีฐมวลเบา อีฐแดง ซีเมนต์เพส(ล้าง) และ อีฐมวลเบา(ล้าง)

3.2.4 โครงสร้างผลึก

ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) โดยส่งตรวจที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์ ได้แก่ ซีเมนต์เพส อีฐมวลเบา อีฐแดง ซีเมนต์เพส(ล้าง) และ อีฐมวลเบา(ล้าง)

3.2.5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก วิเคราะห์โดยวิธี ammonium saturation and distillation โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่โครงการพัฒนาวิชาการดินปุ๋ยและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์ ได้แก่ ซีเมนต์เพส อิฐมวลเบา อิฐแดง ซีเมนต์เพส (ล้าง) และ อิฐมวลเบา(ล้าง)

3.2.6 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC) และปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC)

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Total Organic Carbon Analyzer (Shimatsu: Tcvh) โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์ ได้แก่ ซีเมนต์เพส อิฐมวลเบา อิฐแดง ซีเมนต์เพส(ล้าง) และ อิฐมวลเบา(ล้าง)

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าคงที่ของการดูดซับ และ Adsorption isotherm

วิธีการทดลองเพื่อศึกษาค่าคงที่ของการดูดซับ และ Adsorption isotherm ทำโดยเริ่มจากการนำตัวดูดซับไป เตรียมพื้นผิวด้วยการแช่ในสารละลาย 0.01 M CaCl_2 แช่ 4 ชั่วโมง แล้วเอาไปอบแห้งก่อนนำมาใช้ จากนั้นในการทดลองจะนำตัวอย่างตัวดูดซับจำนวนหนึ่งผสมกับสารละลายที่มีสารมลพิษที่สนใจศึกษา ซึ่งในที่นี้คือ Cd โดยทั่วไปจะผสมตัวดูดซับกับ สารละลายของสารมลพิษที่ น้ำหนักต่อปริมาตรคงที่ค่าหนึ่ง โดยใช้หลอด Centrifuge ที่ทำจาก Polypropylene และทำการทดลองภายใต้สิ่งแวดล้อมเหมือนกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ไอออนต่าง ๆ ในน้ำ และความเป็นกรดต่างของสารละลายทำการเขย่าจนถึงจุดสมดุล ในที่นี้เป็น 24 ชั่วโมง (เนื่องจากการทดลองของ ทศพร ภูระหงษ์ (2545) พบว่า จะถึงสมดุลภายในเวลาน้อยกว่า 1 ชม และ แนวทางของ OCED (2002) ซึ่งระบุว่าโดยปกติจะถึงจุดสมดุลที่เวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง) จากนั้นจึงแยกสารละลายออกไป กรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 μm แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของ Cd Pb และ Zn ที่เหลือ ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectrometer (AAS) และจึงนำผลที่ได้มาเขียนกราฟในลักษณะต่าง ๆ เพื่อศึกษาด้วย Adsorption isotherm

ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q_e) คำนวณจากความเข้มข้นของโลหะในสารละลายตั้งต้นและความเข้มข้นที่จุดสมดุล ด้วยสมการ

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

โดย

q_e = ความเข้มข้นของสารมลพิษในตัวดูดซับ (mg kg^{-1})

C_0 = ความเข้มข้นของมลพิษในน้ำก่อนเติมตัวดูดซับ (mg L^{-1})

C_e = ความเข้มข้นของมลพิษที่เหลือในน้ำที่จุดสมดุล (mg L^{-1})

V = ปริมาตรสารละลายของสารมลพิษ (L)

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (kg)

สัมประสิทธิ์การกระจายตัวบนของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid distribution coefficient, K_d , L kg^{-1}) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือสัดส่วนของโลหะหนักที่ดูดซับบนตัวดูดซับ (q_e) ต่อโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล (C_e) ดังสมการ

$$K_d = \frac{q_e}{C_e}$$

แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm model) เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ซึ่งมีรูปแบบที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ทั้งแรงดึงดูดและแรงผลักร ผลการทดลองถูกนำมาทดสอบกับแบบจำลองการดูดซับต่าง ๆ ได้แก่

1) แบบจำลอง Langmuir

แบบจำลอง Langmuir เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมากที่สุด โดยเป็นแบบจำลองที่ตั้งอยู่บนสมมติฐาน ได้แก่ มีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ มีจุดดูดซับที่มีลักษณะเหมือนกัน (พลังงานในการดูดซับเท่ากัน) แต่ละจุดดูดซับสามารถติดสารได้ 1 โมเลกุล (monolayer sorption) สารที่ถูกดูดซับจะไม่เคลื่อนที่อีก และไม่มีปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับแต่ละตัวที่อยู่ใกล้กัน โดยมีความเป็นไปได้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_0}$$

โดย

q_m คือ จำนวนตัวถูกดูดซับที่สูงที่สุดที่ดูดซับได้แบบชั้นเดียวบนตัวดูดซับ (mg kg^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่ของการดูดซับของ Langmuir (L mg^{-1})

ทั้งนี้ รูปแบบการดูดซับของ Langmuir ไอโซเทอม สามารถคำนวณได้ด้วย equilibrium parameter (R_L) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

โดย

$R_L > 1$ ความตึงดูดกันต่ำ (Unfavorable conditions for sorption)

$R_L = 1$ ความตึงดูดคงที่ (Linear)

$0 < R_L < 1$ ความตึงดูดกันสูง (Favorable conditions for sorption)

$R_L = 0$ ปฏิกิริยาดูดซับแบบไม่ย้อนกลับ (Irreversible)

2) แบบจำลองของ Freundlich

แบบจำลองของ Freundlich เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งประยุกต์ขึ้นมาจาก แบบจำลองของ Langmuir โดยพัฒนาให้ใช้กับพื้นผิวที่มีแรงดึงดูดสารไม่สม่ำเสมอ และการดูดซับเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer sorption) ทับกันไป ไม่มีจุดอิ่มตัว ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะกับการดูดซับที่ยังไม่เข้าใกล้จุดอิ่มตัวของพื้นผิว โดยมีสมการเป็น

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$$

โดย

K_F คือ ค่าคงที่ของ Freundlich ($L \text{ kg}^{-1}$) ที่เป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัวบนของแข็งของเหลว หรือความสามารถในการดูดซับ

$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของแรงดูดของพื้นผิว (ไม่มีหน่วย) โดย

$1/n < 1$ ความดึงดูดกันสูง (Favorable conditions for sorption) โดยที่พื้นผิวมีความสม่ำเสมอ

$1/n = 1$ ความดึงดูดคงที่ (Linear) เป็นลักษณะตามสมมติฐานของ Langmuir

$1/n > 1$ ความดึงดูดกันต่ำ (Unfavorable conditions for sorption) หรือเป็นลักษณะของ Cooperative adsorption ที่แรงดึงดูดไม่สม่ำเสมอ หรือตัวถูกดูดติดมีแรงกระทำระหว่างกัน รวมถึงลักษณะของการดูดซับแบบ Multilayer ด้วย

3) แบบจำลองของ Dubinin-Radushkevich

แบบจำลองของ Dubinin-Radushkevich (Dubinin and Radushkevich, 1947) นี้นิยมใช้ในการแสดงกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นบนวัสดุโดยอาศัยหลักการกระจายตัวของพลังงานแบบ Gaussian บนพื้นผิวที่มีแรงดึงดูดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับระบบที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ปานกลางจนถึงสูงได้ดี (Altin et al., 1998) โดยมีสมการ คือ

$$\ln q_e = \ln q_D - B_D \left[RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \right]^2$$

และสามารถคำนวณ mean free energy ได้ด้วยสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2B_D}}$$

โดย

B_D คือ เป็นค่าคงที่ของ Dubinin-Radushkevich ซึ่งใช้ในการคำนวณพลังงานในการดูดซับต่อโมลของตัวถูกดูดซับที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังพื้นผิวของดูดซับ (E , kJ mol^{-1}) โดยค่า E ที่น้อยกว่า 8 kJ mol^{-1} บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับด้วยกลไกทางฟิสิกส์ และค่า E ที่มากกว่า 8 kJ mol^{-1} บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับด้วยกลไกทางเคมี

R คือ ค่าคงที่ ideal gas constant $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิ ในหน่วย K

q_D คือ ความจุ ณ จุดอิ่มตัวตามทฤษฎี (หน่วยเดียวกับ q_e)

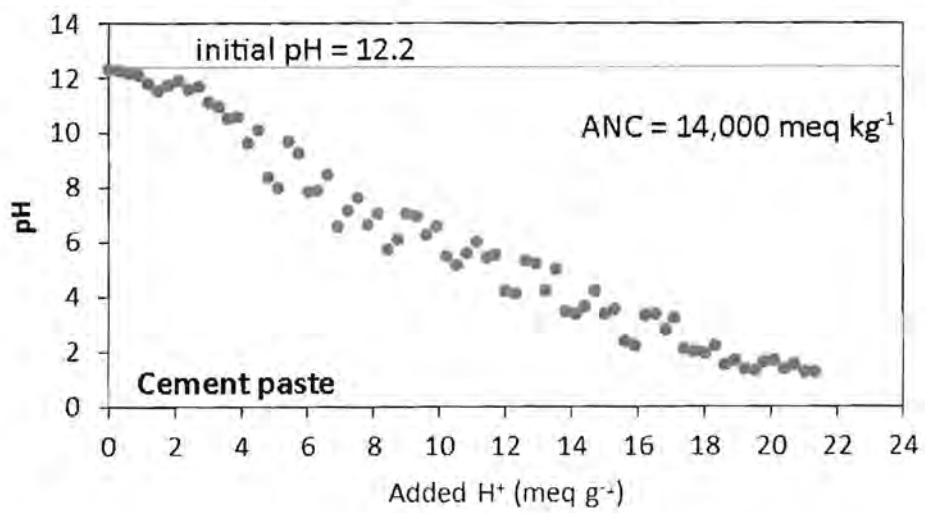
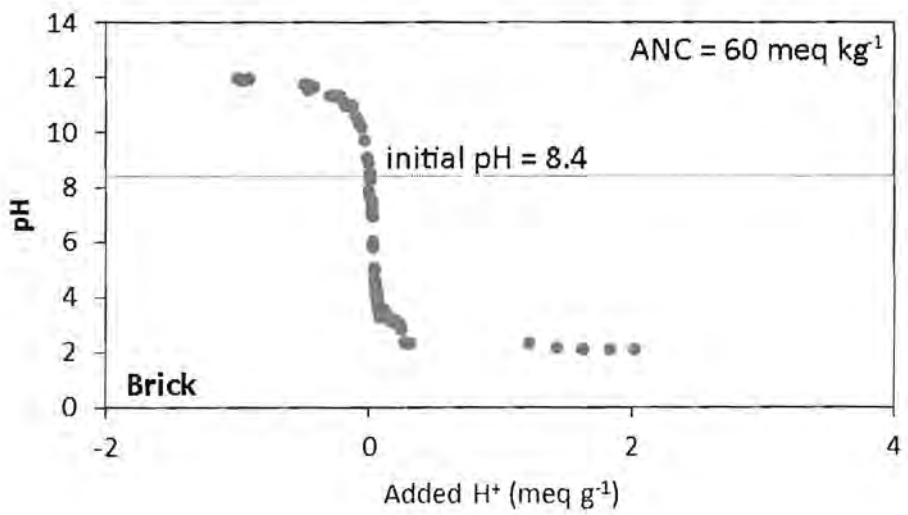
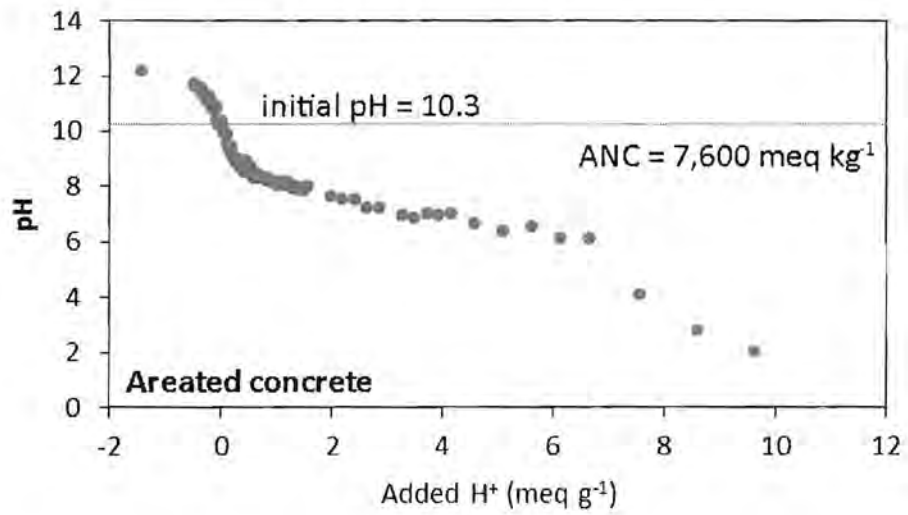
บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และ

ความสามารถในการสะเทินกรด (Acid neutralization capacity, ACN)

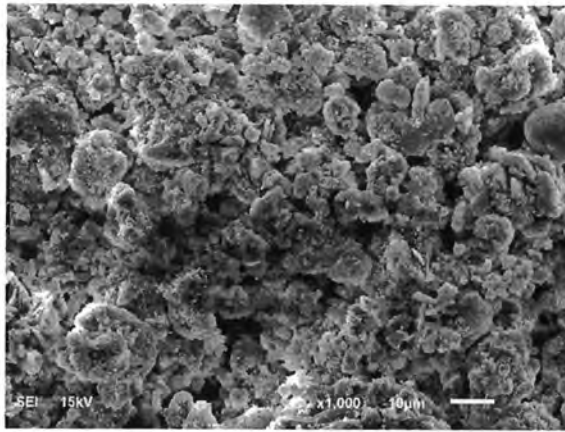
ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรต แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนทั้ง 3 ชนิด มีค่าเกิน 7 ซึ่งเป็นด่างทั้งหมด โดยค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากอิฐแดง อิฐมวลเบา และซีเมนต์เพส ตามลำดับ โดยเฉพาะซีเมนต์เพสนั้นมีค่าพีเอชสูงถึง 12.2 ซึ่งน่าจะเป็นผลของการละลายของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักหนึ่ง (15-25%) ของซีเมนต์ (Scrivener et al., 2004) ลำดับของพีเอชสอดคล้องกับกับปริมาณ Ca ในซีเมนต์เพส อิฐมวลเบา และอิฐแดง ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 65 28 และ 0.8 ในรูป CaO ตามลำดับ (Chindaprasirt et al., 2007; Damla et al., 2009; สุทัศน์ จันบัวลา, 2555) ทั้งนี้ อิฐแดงมีสัดส่วนของ Ca น้อยมากเนื่องจากผลิตมาจากดินซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น Si

ค่า ANC ของซีเมนต์เพส มีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ อิฐมวลเบา และอิฐแดง ตามลำดับ โดยซีเมนต์เพส และ อิฐมวลเบา มีค่า ANC ($14,000 \text{ meq kg}^{-1}$ และ $7,600 \text{ meq kg}^{-1}$ ตามลำดับ) ซึ่งสูงกว่าอิฐแดงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ ANC ของวัสดุอินทรีย์และปุ๋ยหมักหลายชนิดซึ่งมีค่าระหว่าง $189-7,100 \text{ meq kg}^{-1}$ (Venegas et al., 2015) และ ANC ของถ่านชีวภาพมีค่าระหว่าง $421-725 \text{ meq kg}^{-1}$ (Venegas et al., 2015) จะเห็นได้ชัดว่าอิฐมวลเบาและซีเมนต์เพสมี ANC สูงกว่ามากนักนับเป็นจุดเด่นจุดหนึ่งของวัสดุนี้

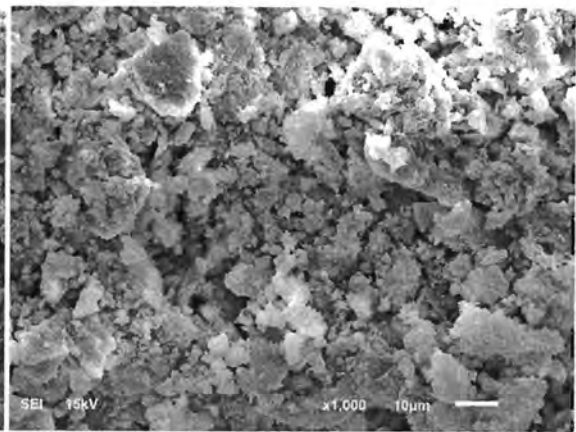


รูปที่ 4.1 กราฟการไทเทรตพีเอชของวัสดุ และค่า pH ANC และ ANC7

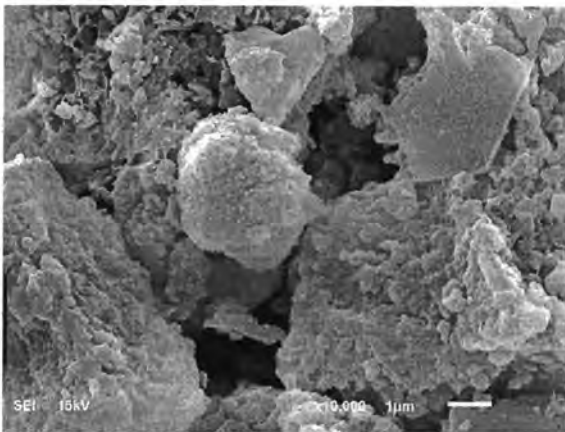
4.2 สัณฐานของวัสดุ (topography of material)



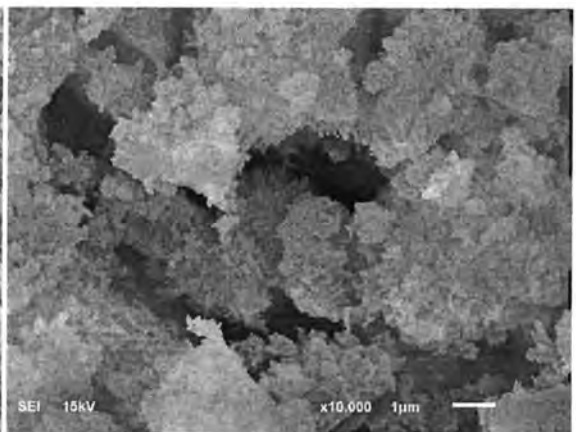
1,000 เท่า



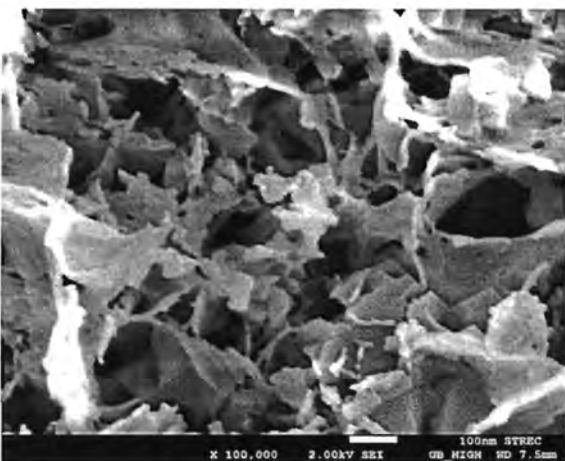
1,000 เท่า



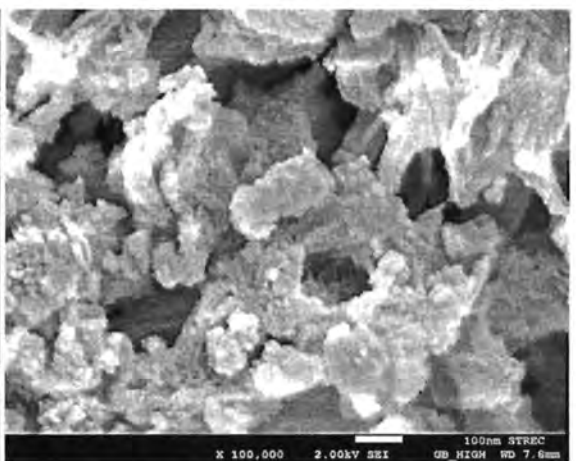
10,000 เท่า



10,000 เท่า



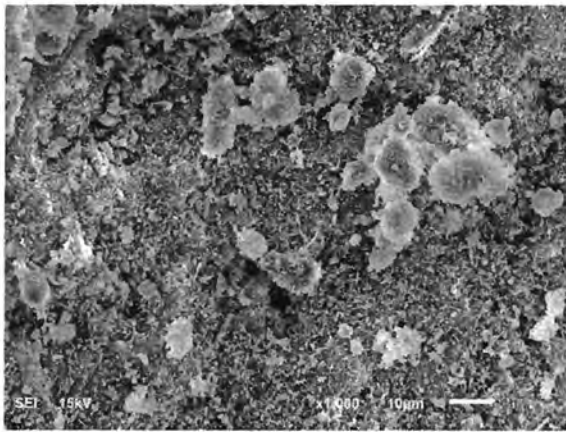
100,000 เท่า



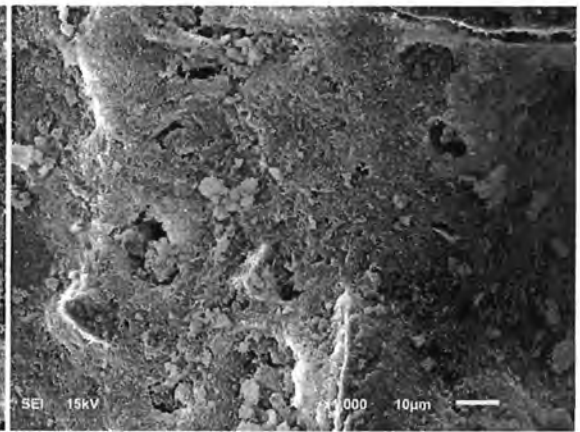
100,000 เท่า

ซีเมนต์เพสต์

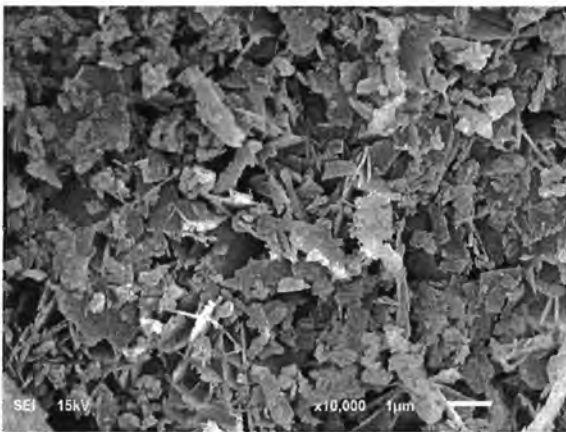
ซีเมนต์เพสต์(ล้า)



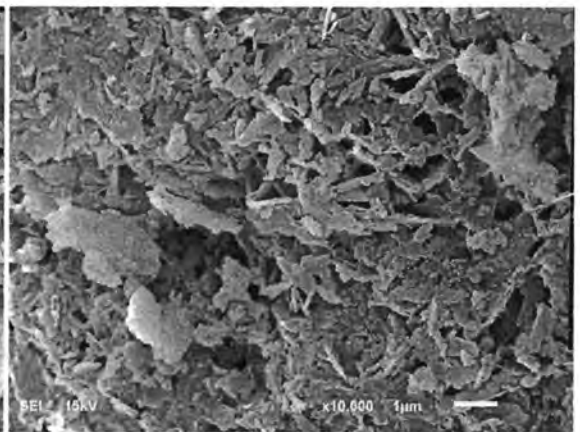
1,000 เท่า



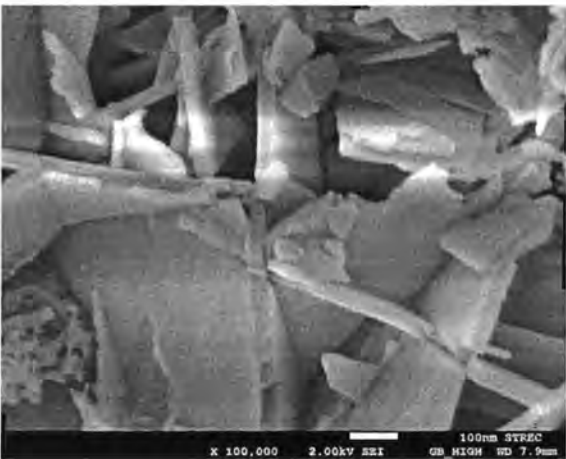
1,000 เท่า



10,000 เท่า

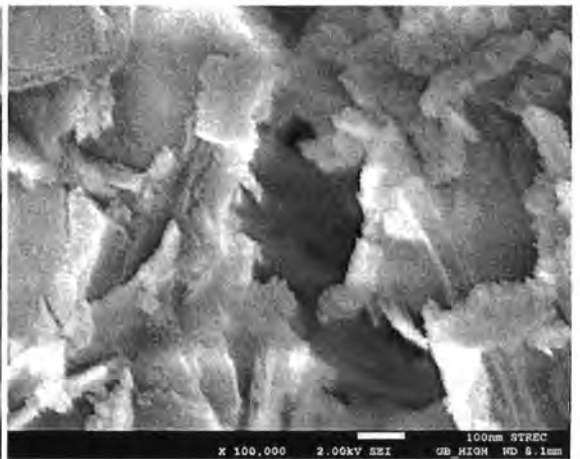


10,000 เท่า



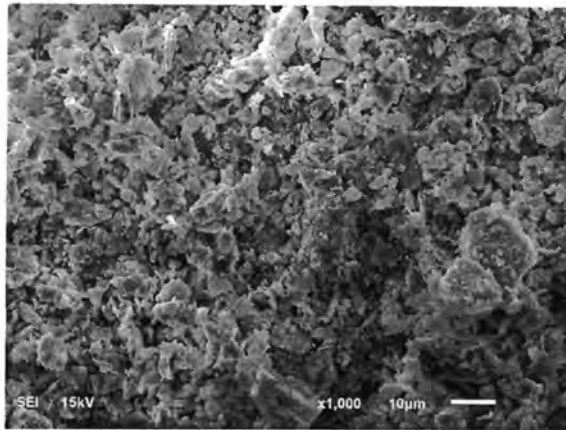
100,000 เท่า

อิฐมวลเบา

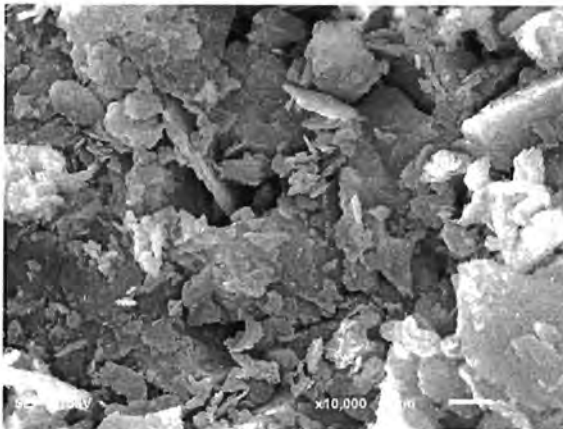


100,000 เท่า

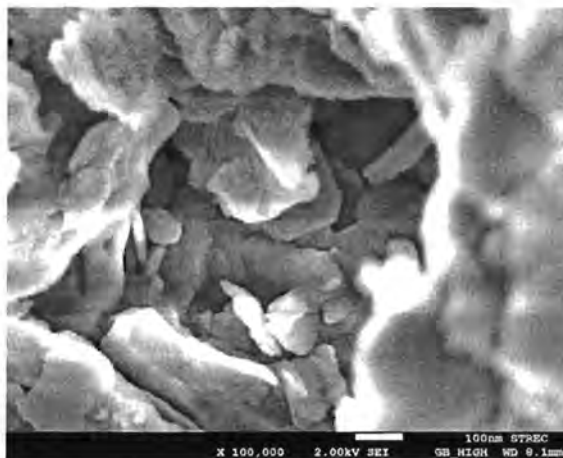
อิฐมวลเบา(ล้าง)



1,000 เท่า



10,000 เท่า



100,000 เท่า

อิฐแดง

รูปที่ 4.2 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุต่าง ๆ
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า 10,000 เท่า และ 100,000 เท่า

ผลการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุด้วย SEM แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งที่กำลังขยายระดับนี้จะเห็นโครงสร้างของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ โครงสร้างของซีเมนต์โดยทั่วไปจะเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีลักษณะเป็นก้อนหยาบ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะหลากหลายทั้งเป็นแท่งยาวและเป็นแผ่น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์-pH7 จะเห็นได้ว่า ซีเมนต์-pH7 มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ต่างกับซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ล้างมากนัก โดยมีความหนาแน่น และขนาดรูพรุน ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก แต่พื้นผิวของโครงสร้างมีลักษณะเป็นขุย ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายของสารประกอบที่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์โครงสร้างของอิฐมวลเบาจะเห็นเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นจำนวนมาก เกาะเกี่ยวกันอย่างซับซ้อน และน่าจะมีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากกว่าในซีเมนต์เพส และเมื่อผ่านการล้างน้ำจะเห็นได้ชัดว่า แม้โครงสร้างโดยรวมจะคล้ายกันแต่ผลึกที่เป็นแผ่นจะดูหยาบและมีเหลี่ยมมุมลดลง ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายของสารประกอบอย่างเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนโครงสร้างของอิฐแดงจะเห็นเป็นลักษณะก้อนหยาบ ๆ ที่ไม่เป็นรูปทรง คล้ายกับซีเมนต์เพส โดยรวมแล้ว รูพรุนที่ปรากฏเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งที่มีลักษณะเป็นก้อนและที่เป็นผลึกซ้อนทับกัน การชะล้างโดยน้ำทำให้ผิวมีลักษณะเป็นขุย ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน่าจะส่งผลให้ มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น

4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง Surface area analyzer

| วัสดุ | พื้นที่ผิวจำเพาะ $m^2 g^{-1}$ | ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด $mL g^{-1}$ | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย \AA |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| ซีเมนต์เพส | 22.09 | 0.0762 | 138.0 |
| ซีเมนต์เพส(ล้าง) | 371.25 | 0.4514 | 48.63 |
| อิฐมวลเบา | 12.85 | 0.0628 | 195.4 |
| อิฐมวลเบา(ล้าง) | 47.05 | 0.1023 | 86.95 |
| อิฐแดง | 20.70 | 0.0573 | 110.7 |

ผลการตรวจสอบ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ของวัสดุทั้ง 3 มีค่าไม่ต่างกันมากนัก โดยต่างกันไม่เกิน 2 เท่า โดยอิฐแดงมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กที่สุด มีปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุด ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากที่สุด แต่เมื่อซีเมนต์เพสต์และอิฐมวลเบาถูกล้างด้วยน้ำจันทน์เป็น 7 จะพบว่า ทั้ง ซีเมนต์เพสต์(ล้าง) และอิฐมวลเบา(ล้าง) มีขนาดรูพรุนเฉพาะเล็กลงมากจนมีค่าเล็กกว่ารูพรุนเฉลี่ยของอิฐแดง และมีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยเช่นกัน โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นมากในซีเมนต์เพสต์ แสดงให้เห็นว่าหากนำวัสดุนี้ไปใช้ประสิทธิภาพในการดูดซับอาจดีขึ้นเมื่อถูกน้ำฝนชะล้างไป ทั้งนี้ ขนาดรูพรุนทั้งหมดนี้อยู่ในช่วงของ Mesopore ซึ่งเป็นขนาดปานกลาง (20-500 nm, Gregg and Sing, 1982)

ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์และอิฐมวลเบาในการศึกษานี้อยู่ในช่วงเดียวกับการศึกษาอื่น ๆ (Narayanan และ Ramamurthy, 2000; Yu et al., 2013; Chen and Wu, 2013) ลักษณะสมบัติของอิฐแดงจากการทบทวนเอกสารมีความแตกต่างกัน เช่น อิฐแดงในการศึกษาของ Kooli et al. (2014) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ และ มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.001 mL g^{-1} และ ในการศึกษาของ Selvaraju และ Pushpavanam (2009) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $2.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.029 mL g^{-1} และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 30 \AA ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่วิธีการผลิตของแต่ละที่

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำลักษณะสมบัติของวัสดุทั้ง 3 เปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งมีค่าตั้งแต่หลักร้อยจนถึงเกือบ $2,000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (รวบรวมโดย Jain et al., 2016; Yahya et al., 2015) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย $8-340 \text{ \AA}$ ส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ $20-30 \text{ \AA}$ (รวบรวมโดย Yahya et al., 2015) พบว่าโดยรวมแล้ววัสดุทั้ง 3 จากของเสียจากสิ่งก่อสร้างและการรีไซเคิลมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า และมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า

4.4 ผลการตรวจสอบด้วย XRD

ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงองค์ประกอบของวัสดุ ได้ดังนี้

ซีเมนต์เพสต์ พบองค์ประกอบหลักที่เด่นชัดที่สุดเป็น Calcite (CaCO_3) นอกจากนี้ยังพบ Calcium hydroxide (CaOH) Aluminium silicate hydrate และ Calcium silicate hydrate เล็กน้อย ทั้งนี้ สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ล้างจันทน์เป็น 7 พบว่าองค์ประกอบหลักที่เหลืออยู่เป็น Quartz (SiO_2) และ Calcite เล็กน้อย

อิฐมวลเบา พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็น Calcium silicate hydrate (Tobermorite) และ Quartz โดยพบ Calcite เล็กน้อย โดยเมื่อผ่านการล้างจนมีพีเอชเป็นกลางแล้วจะเหลือเพียง Quartz เป็นองค์ประกอบหลัก

อิฐแดง มีองค์ประกอบหลักเป็น Quartz และกลุ่มแร่ดินเหนียว (Aluminium silicate: Halloysite และ Phengite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทั่วไปของดิน

4.5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC)

ตารางที่ 4.2 ค่า CEC ของวัสดุ

| วัสดุ | $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ | $\mu\text{mol}_c \text{ m}^{-2}$ |
|------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| ซีเมนต์เพส | 47.6 | 21.6 |
| ซีเมนต์เพส(ล้าง) | 59.3 | 1.6 |
| อิฐมวลเบา | 28.6 | 22.3 |
| อิฐมวลเบา(ล้าง) | 9.2 | 2.0 |
| อิฐแดง | 9.6 | 4.6 |

CEC ของซีเมนต์เพสมีค่าสูงที่สุด ทั้งตัวอย่างดั้งเดิมและตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดแล้ว ในขณะที่ CEC ของอิฐมวลเบา มีค่ารองลงมา แต่เมื่อล้างด้วยกรดแล้วจะมีค่าลดลงมาก ส่วน CEC ของอิฐแดงมีค่าต่ำ เมื่อพิจารณา CEC เหล่านี้ กับ CEC ของคอนกรีต ที่มีค่าประมาณ $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (ทศพร, 2545) ซึ่งเป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพส หิน และทราย ทำให้เชื่อได้ว่า CEC ของคอนกรีตมีที่มาจากซีเมนต์เพส

เมื่อพิจารณาค่า CEC ในหน่วย $\mu\text{mol}_c \text{ m}^{-2}$ พบว่า CEC ของซีเมนต์เพสและอิฐมวลเบา มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งก่อนและหลังล้างด้วยกรด โดยเมื่อล้างด้วยกรดแล้วจะทำให้ CEC ลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตาม CEC ในหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสที่ล้างด้วยกรดแล้วกลับมีค่าเพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลจากการที่พื้นที่ผิวของซีเมนต์เพสที่ล้างด้วยกรดมีค่าเพิ่มขึ้นมาก

เมื่อเปรียบเทียบกับ CEC ของวัสดุต่าง ๆ พบว่า CEC ของวัสดุจากการก่อสร้างและรีไซเคิลเหล่านี้ โดยรวมแล้ว ค่าน้อยกว่า CEC ของวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ ($70\text{-}200 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, Venegas et al., 2015) และมีค่า CEC อยู่ในช่วงเดียวกับถ่านชีวภาพจากวัสดุการเกษตรหลายชนิด ($3\text{-}50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, Lee et al., 2010; Jien and Wang, 2103; Venegas et al., 2015; Jiang et al., 2016)

4.6 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์

ผลการตรวจสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยคาร์บอนส่วนใหญ่ในซีเมนต์เพสและอิฐมวลเบา อยู่ในรูปของคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) ซึ่งจากผลการตรวจสอบด้วย XRD ทำให้คาดว่าคาร์บอนอนินทรีย์ ดังกล่าวน่าจะอยู่ในรูปของคาร์บอเนต ซึ่งมีผลให้ตัววัสดุมี ANC สูง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC) และปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) ของวัสดุ

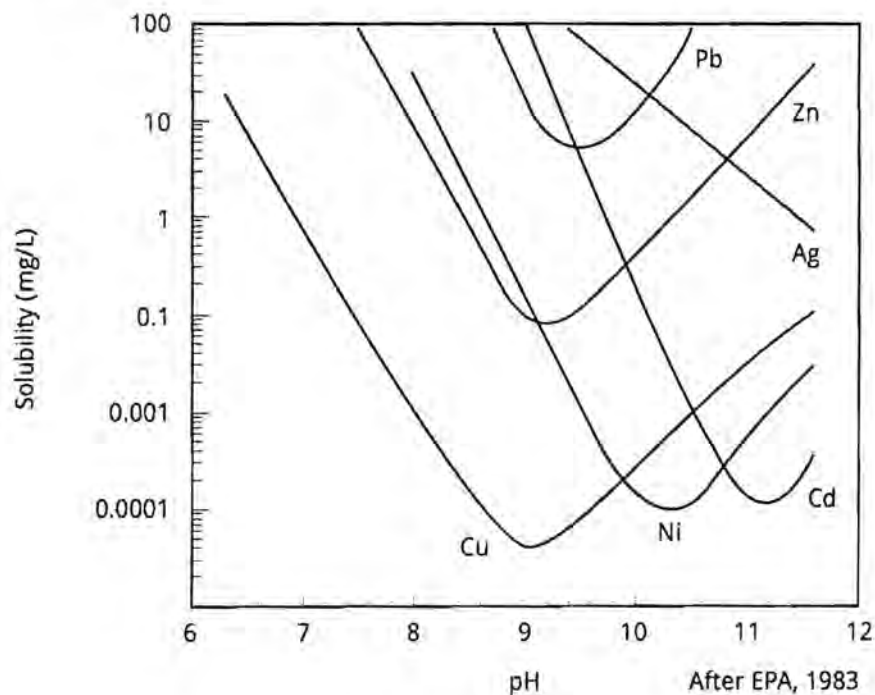
| วัสดุ | OC, % | IC, % | TC, % |
|------------------|--------|--------|--------|
| ซีเมนต์เพส | 1.2630 | 4.7730 | 6.0360 |
| ซีเมนต์เพส(ล้าง) | 0.2769 | 0.0000 | 0.2769 |
| อิฐมวลเบา | 0.1571 | 0.7591 | 0.9162 |
| อิฐมวลเบา(ล้าง) | 0.2036 | 0.0000 | 0.2036 |
| อิฐแดง | 0.0796 | 0.0000 | 0.0796 |

4.7 ค่าคงที่ของการดูดซับ และ Adsorption isotherm

4.7.1 การทดลองขั้นต้น

การเตรียมสารละลายตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม

ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม เมื่อประมาณจากความสามารถในการละลายที่พีเอชต่าง ๆ (รูปที่ 4.3) พบว่า ที่พีเอช 7 ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี น่าจะสามารถละลายได้มากกว่า 100 mg L^{-1} อย่างไรก็ตาม จากการทดลองเบื้องต้น กลับพบว่า เมื่อเตรียมสารละลายตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ที่ 5 mg L^{-1} แล้วปรับพีเอชเป็น 7 แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ เพื่อแยกโลหะที่ตกตะกอนออก พบว่า สารละลายเกิดการตกตะกอนของตะกั่ว และสังกะสี จนมีค่าต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถนำมาทำการทดลองต่อได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงจะกระทำกับแคดเมียม



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการละลายของโลหะต่าง ๆ ที่พีเอชต่าง ๆ

สัดส่วนของตัวดูดซับและสารละลายที่เหมาะสม

ในการสร้าง Adsorption isotherm นั้น จะต้องใช้ข้อมูลที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน อุณหภูมิเท่ากัน พีเอชเท่ากัน และเป็นผลการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลแล้ว และยังจำเป็นต้องมีความเข้มข้นของสารมลพิษที่เหลืออยู่ในน้ำหลังการดูดซับ (C_e) ที่เหมาะสม คือ ไม่ถูกดูดซับจนเกือบหมดจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้น ในการทดลองเพื่อสร้าง Adsorption isotherm จึงมักใช้วิธีการแปรค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในการทดลองเริ่มต้นตั้งแต่ค่าความเข้มข้นต่ำไปค่าความเข้มข้นสูง แต่เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายนั้นถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายที่ค่อนข้างต่ำ จึงไม่อาจแปรค่าให้มีความเข้มข้นสูงได้ การทดลองในส่วนนี้จึงดำเนินการโดยเริ่มจากการหาสัดส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองขั้นต้น โดยใช้สารละลายแคดเมียม 4.28 mg L^{-1} ที่พีเอช 7.01 และการใช้น้ำ DI โดยใช้สัดส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 20 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 โดย pH_e คือ พีเอชของสารละลายแคดเมียมที่จุดสมดุล C_{e-DI} และ pH_{e-DI} เป็นความเข้มข้นของแคดเมียม และพีเอชของสารละลายในการทดลองกับน้ำ DI ที่จุดสมดุล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการดูดซับเบื้องต้น

| ตัวอย่าง | $C_{e-DI} \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$ | pH_{e-DI} | $C_e \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$ | pH_e |
|------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------|
| ซีเมนต์เพส | <0.1 | 8.91 | <0.1 | 8.30 |
| ซีเมนต์เพส(ล้าง) | <0.1 | 7.18 | 0.193 ± 0.019 | 7.13 |
| อิฐมวลเบา | <0.1 | 8.69 | <0.1 | 7.35 |
| อิฐมวลเบา(ล้าง) | <0.1 | 6.83 | 1.817 ± 0.053 | 6.96 |
| อิฐแดง | <0.1 | 7.31 | 0.896 ± 0.002 | 7.31 |

จากผลการทดลองเบื้องต้นระหว่างตัววัสดุกับน้ำ DI พบว่า ไม่พบการชะละลายของแคดเมียมในระดับที่ตรวจวัดได้ (C_{e-DI} ของวัสดุทั้งหมดน้อยกว่า detection limit ของการตรวจวัด) โดยซีเมนต์เพส และ อิฐมวลเบา มีผลทำให้พีเอชของระบบเพิ่มขึ้นจนเกือบถึง 9 การทดลองกับสารละลายแคดเมียมพบว่า ค่า C_e ของการทดลองด้วย ซีเมนต์เพส และ อิฐมวลเบา มีค่าน้อยมากจนตรวจวัดไม่ได้ ซึ่งน่าจะเกิดจากการตกตะกอนของแคดเมียมอันเป็นผลจากค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นปัญหาในการอภิปรายผล ดังที่พบในการศึกษาของ ทศพร ภูระหงษ์ (2545) ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาใน

การแปลผล เนื่องจากโลหะหนักต่าง ๆ ไม่ได้ลดลงจากการถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ แต่ตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์

ส่วนค่า C_e ของการทดลองด้วย ซีเมนต์เพส(ล้าง) อิฐมวลเบา(ล้าง) และอิฐแดง มีค่าเหลือน้อยแต่พอให้ตรวจวัดได้ ส่วนการทดลองกับซีเมนต์เพส(ล้าง) มีค่าอยู่ใกล้ detection limit มาก ส่วนค่าพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ทั้งนี้ จากผลการทดลองขั้นต้น จึงได้แนวทางในการทดลอง Adsorption isotherm คือ

1. ใช้สัดส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายมลพิษ เท่ากับ 1 g ต่อ 40 mL
2. สารมลพิษที่ศึกษาต่อ คือ แคดเมียม (เนื่องจากตะกั่วและสังกะสีตกตะกอน) โดยจะต้องเตรียมสารละลายไว้ แล้วปรับพีเอชเป็น 7 แล้วกรองก่อนนำไปใช้
3. ตัวดูดซับที่ใช้ศึกษาต่อ คือ ซีเมนต์เพส(ล้าง) อิฐมวลเบา(ล้าง) และอิฐแดง
4. ทดลองที่ความเข้มข้น 0.4 0.6 0.8 1 2 3 และ 4 mg L^{-1}
5. เมื่อทำการเขย่าจนถึงสมดุลตามแผนงานแล้ว ต้องตรวจเช็คพีเอชแล้วปรับค่าให้อยู่ที่ 7 ± 0.1 ก่อนเก็บตัวอย่าง

4.7.2 ผลการทดสอบด้วย Adsorption Isotherm

ผลการทดสอบการดูดซับแคดเมียม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าซีเมนต์เพส มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาเป็นอิฐแดง และอิฐมวลเบาตามลำดับ โดยทุกวัสดุมีค่าความชันของกราฟลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดกันสูง (high affinity pattern) รูปแบบการดูดซับนี้ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ K_d ตามความเข้มข้นอีกด้วย โดยค่า $K_{d \max}$ และ $K_{d \min}$ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งค่า K_d นี้ เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการดูดซับ ค่า K_d สูงจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 mg L^{-1} ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของซีเมนต์เพส(ล้าง) อิฐแดง และ อิฐมวลเบา(ล้าง) เท่ากับ 97% 86% และ 84% ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยแบบจำลองของ Langmuir

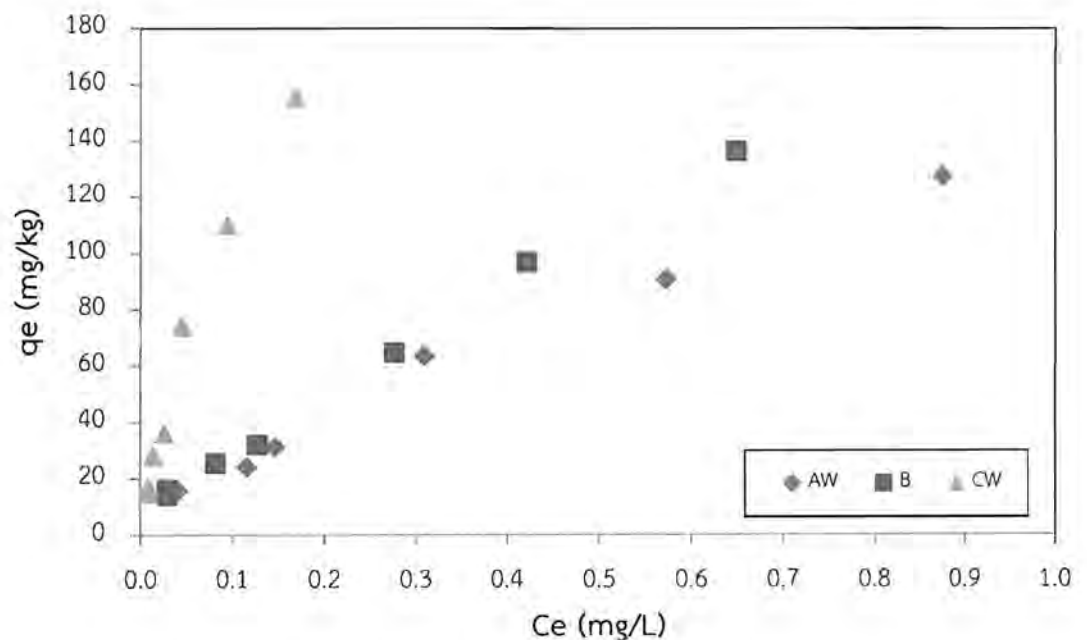
ค่าดัชนีตามแบบจำลองของ Langmuir แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 โดยมีค่า r^2 สูงกว่า 0.9 แสดงถึงความเข้ากันได้กับสมการ โดยค่า K_L และ q_m ของซีเมนต์เพส(ล้าง) มีค่าสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ อิฐแดง และอิฐมวลเบา ตามลำดับ ค่า R_L จากการทดลองกับวัสดุทั้ง 3 มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าระหว่าง 0.06-0.4 บ่งชี้ถึงการตั้งจุดแบบ Favorable conditions

ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองของ Freundlich

ค่าดัชนีตามแบบจำลองของ Freundlich แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 โดยมีค่า R^2 สูงกว่า 0.9 แสดงถึงความเข้ากันได้กับสมการ โดยค่าคงที่ K_f ของซีเมนต์ล้างมีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ อิฐแดง และ อิฐมวลเบา ตามลำดับ ค่า $1/n$ ของวัสดุทั้ง 3 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดแบบ Favorable conditions และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว

ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองของ Dubinin-Radushkevich

ค่าดัชนีตามแบบจำลองของ Dubinin-Radushkevich แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 โดยมีค่า R^2 ค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายการดูดซับได้ ค่า q_D ของซีเมนต์ล้างมีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ อิฐแดง และ อิฐมวลเบา ตามลำดับ ค่า E มีค่าน้อยกว่า 8 kJ mol^{-1} ซึ่งจัดว่าอยู่ในช่วงของการดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์



รูปที่ 4.4 ผลการดูดซับแคดเมียม

ตารางที่ 4.5 ดัชนีการดูดซับของแคดเมียมบนวัสดุ จากแบบจำลองต่าง ๆ

| วัสดุ | q_e vs C_e | | | | Langmuir model | | |
|------------------|--|--|--------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------------|-------|
| | $K_{d \text{ min}}$ (L kg ⁻¹) | $K_{d \text{ max}}$ (L kg ⁻¹) | K_d (L kg ⁻¹) | r^2 | K_L (L mg ⁻¹) | q_m (mg kg ⁻¹) | r^2 |
| ซีเมนต์เพส(ล้าง) | 925 | 2,058 | 1,031 | 0.906 | 6.67 | 294 | 0.977 |
| อิฐมวลเบา(ล้าง) | 145 | 447 | 156 | 0.947 | 6.15 | 81 | 0.926 |
| อิฐแดง | 210 | 555 | 220 | 0.977 | 6.29 | 93 | 0.942 |

| วัสดุ | Freundlich model | | | Dubinin-Radushkevich model | | |
|----------------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------------|------------------------------|-------|
| | K_F (L kg ⁻¹) | 1/n | r^2 | q_0 (mg kg ⁻¹) | E (kJ mol ⁻¹) | r^2 |
| ซีเมนต์เพส (ล้าง) | 689 | 0.780 | 0.981 | 228 | 5.08 | 0.985 |
| อิฐมวลเบา (ล้าง) | 130 | 0.677 | 0.978 | 94 | 4.18 | 0.869 |
| อิฐแดง | 167 | 0.703 | 0.980 | 106 | 4.32 | 0.888 |

4.4.3 อภิปรายผลการทดลอง

โดยที่ไปแล้ว การดูดซับของโลหะหนักบนดินและวัสดุต่าง ๆ นั้นเกิดจากกลไกหลัก 2 ชนิด ได้แก่ 1) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ซึ่งเจาะจงและมีพลังงานสูง และ 2) การแลกเปลี่ยนไอออนจากแรงทางไฟฟ้า (Ion exchange) ซึ่งไม่เฉพาะเจาะจงและมีพลังงานต่ำกว่า ซึ่งในการทดลองที่พีเอช 7 รูปแบบของ Cd นั้นอยู่ในรูป Cd²⁺ ส่วนพื้นผิวของวัสดุทั้ง 3 มี Quartz เป็นองค์ประกอบหลักจะมีพื้นผิวเป็นลบ ดังนั้น การดูดซับจึงน่าจะเกิดขึ้นด้วยกลไก Ion exchange ซึ่งเป็นกลไกแบบ chemisorption ที่น่าจะมี E สูงกว่า 8 kJ mol⁻¹ แต่ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองของ Dubinin-Radushkevich พบว่าวัสดุทั้ง 3 มี mean free energy หรือค่า E ใกล้เคียงกัน คือ 4-5 kJ mol⁻¹ บ่งชี้ว่ากลไกการดูดซับเป็น Physisorption (E < 8 kJ mol⁻¹) หรือ แรง Van der Waals ทั้งนี้ เมื่อได้ทบทวนงานวิจัยเพิ่มเติม พบว่า แม้ตัวดูดซับจะมีกลไกที่ตรวจพบเป็น Chemisorption (Balaz et al., 2015) หรือ Ion exchange (Noor and Al-Solmi, 2011) ค่า E ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ก็มีค่าน้อยกว่า 8 kJ mol⁻¹ ได้ (2-6 kJ mol⁻¹) ซึ่งอธิบายได้หลายแนวทาง ได้แก่ 1) กลไก Ion exchange อาจมีกำลังการดูดซับอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 8 kJ mol⁻¹ หรือ 2) การดูดซับไม่ได้

เกิดขึ้นจาก Chemisorption เพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้าม กลับเกิดขึ้นด้วยแรง Physisorption เป็นหลัก

ทั้งนี้ การเกิดการดูดซับแบบ Chemisorption นั้นมีข้อจำกัดที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันกับ ตัวถูกดูดซับตามสมดุทธ์ทางเคมีซึ่งมีจำกัดและเกิดขึ้นได้ครั้งเดียว ในขณะที่แรงทาง Physisorption เกิดจากการเหนี่ยวนำทางขั้วไฟฟ้าในโมเลกุล ซึ่งแม้มีกำลังไม่มากแต่เกิดขึ้นได้เสมอ และไม่ได้จำกัดที่ ชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับ q_m ซึ่งเป็นปริมาณการดูดซับสูงสุดตามสมดุทธ์าน ของ Langmuir (ดูดซับบนจุดดูดซับ และเกิดขึ้นได้ชั้นเดียว) พบว่า ค่า q_e ของอิฐแดงและอิฐมวลเบา (ล่าง) นั้นมีค่าเกิน q_m ซึ่ให้เห็นว่าการดูดซับนั้นเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนกว่าสมดุทธ์านนั้น หรือ เกิดขึ้นมากกว่า 1 ชั้น จึงกล่าวได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นด้วยกลไกทั้งทาง Chemisorption และ Physisorption ร่วมกัน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองและผลการทดสอบด้วย Isotherm ของการดูดซับ พบว่า ผลการ ทดสอบทั้งหมดสอดคล้องกัน โดยการดูดซับเป็นลักษณะ Favorable conditions ซึ่งแสดงถึงสภาวะ ที่เหมาะสมกับการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่สม่ำเสมอของแรงดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะถูก ดูดซับด้วยจุดดูดซับที่มีกำลังสูงก่อน ตามด้วยจุดที่มีกำลังน้อยลงเป็นลำดับ ทำให้ค่า K_d ที่ความเข้มข้น ต่ำมีค่าสูง และลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า $1/n$ ค่อนข้างสูง และผลการทดลองเข้า กันได้กับแบบจำลองของ Langmuir ด้วย จึงสามารถพิจารณาได้ว่า พื้นที่ผิวไม่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ ของแรงดูดซับมากนัก ลำดับของค่า K_d , K_L , K_f , q_m และ q_D สอดคล้องกันทั้งหมด โดยซีเมนต์เพลส(ล่าง) มีค่าดัชนีดังกล่าวสูงที่สุด รองลงมาเป็นอิฐแดง และอิฐมวลเบา(ล่าง) ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ถึง ประสิทธิภาพการดูดซับของซีเมนต์เพลส(ล่าง)ที่สูงที่สุด

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองข้างต้น พบว่า กลไกการดูดซับน่าจะเป็นไปในลักษณะ เดียวกัน องค์ประกอบพื้นผิวคล้ายกัน มีกำลังไม่ต่างกันมาก (E และ CEC ในหน่วย $\mu\text{mol}_c \text{ m}^{-2}$ ใกล้เคียงกัน) ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับของซีเมนต์เพลส(ล่าง)ที่สูงกว่าอิฐมวลเบา(ล่าง) และ อิฐแดง จึงย่อมเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของซีเมนต์เพลส(ล่าง)ที่มีมากกว่าวัสดุทั้ง 2 มาก

เมื่อเปรียบเทียบค่า q_m ของ Cd กับ วัสดุต่าง ๆ หลายชนิด มีค่าระหว่าง 600 mg kg^{-1} ถึง มากกว่า $100,000 \text{ mg kg}^{-1}$ (รวบรวมโดย Rao et al., 2010) พบว่าค่า q_m ของวัสดุทั้ง 3 ที่ใช้ในการ ศึกษานี้มีค่าต่ำกว่ามาก

ทั้งนี้ เมื่อมีแนวคิดจะนำไปใช้ในการลดการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในดิน จึงต้องเปรียบเทียบ ค่าคงที่การดูดซับ หรือค่า K_d ของตัววัสดุ กับดิน โดยตัวดูดซับที่จะนำไปใช้จะต้องมีค่า K_d สูงกว่าดิน

มากกว่าลิมิต เนื่องจาก การเติมตัวดูดซับเหล่านี้จะมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับดินในพื้นที่ ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วดินเป็นตัวดูดซับที่ดีตามธรรมชาติอยู่แล้ว โดย ค่า K_d ของดินมีค่าประมาณ 500-750 L kg^{-1} (Bradl, 2004; Venegas et al, 2015) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่า K_d ของวัสดุทั้ง 3 แล้ว พบว่า ซีเมนต์เพส(ล้าง) มีค่า K_d สูงกว่า ไม่มากนัก ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับแคดเมียมจากดิน

ซีเมนต์เพส และ อิฐมวลเบา มีความเป็นต่างมากกว่าวัสดุอื่น ๆ จะส่งผลต่อการลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักมาก โดยเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ความสามารถในการดูดซับ Cd ของดินเพิ่มขึ้นราว 3 เท่า และยังช่วยในการตกตะกอนของ Cd อีกด้วย (Street et al., 1978) แต่จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนของพีเอชของดินด้วยเพราะอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศได้

ค่า ANC ของซีเมนต์เพส และ อิฐมวลเบา มีค่าสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ อยู่มาก (เช่น วัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ และถ่านชีวภาพ, Venegas et al, 2015) จากการศึกษาของ Giampaolo et al. (2002) กับวัสดุที่ใช้ในซึ่งเป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพส บ่งชี้ว่า ANC เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ Ca ในส่วนผสม ซึ่งน่าจะอยู่ในรูปของ $CaCO_3$ ในองค์ประกอบซึ่งมีค่า pK_{a2} และ pK_{a3} ที่ 6.3 และ 10.3 ซึ่งเพิ่มความสามารถในความเป็นบัฟเฟอร์โดยเฉพาะที่พีเอชนั้น ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการศึกษา ANC ร่วมกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ ปริมาณคาร์บอนแล้ว ทำให้สรุปได้ว่า ANC ในวัสดุก่อสร้างนี้ เป็นผลจากคาร์บอเนตในโครงสร้าง

ทั้งนี้ ANC ของซีเมนต์เพส และอิฐมวลเบา ในการศึกษาที่สูงกว่า ANC ของดินที่สำรวจพบในการศึกษาอื่นอยู่มาก (ไม่เกิน 2,000 meq kg^{-1} , Cappuyens et al., 2004) ดังนั้น เมื่อเติมวัสดุเหล่านี้ลงในดิน ย่อทำให้ ANC ของดินสูงขึ้น ซึ่ง ANC ที่สูงจะเป็นผลดีในการช่วยให้ดินสามารถรองรับภาระกรดจากธรรมชาติได้มากขึ้น และไม่เกิดการชะละลายของโลหะหนักออกมาเมื่อถูกภาวะฝนกรด ส่วนอิฐแดง จะไม่ส่งผลต่อเรื่องของพีเอชและความสามารถในการสะเทินกรดของดินมากนัก นอกจากนี้ ในกรณีที่ดินมี CEC ต่ำและมีอินทรีย์วัตถุน้อย และมีพีเอชมากกว่า 7 คาร์บอเนตจะส่งผลให้แคดเมียมเกิดการตกตะกอนในรูป $CdCO_3$ (McBride, 1980)

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

วัสดุที่ได้จากขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอนที่นำมาศึกษา ได้แก่ ซีเมนต์เพส อิฐมวลเบา และอิฐแดง ซีเมนต์เพส เป็นวัสดุที่มีพีเอชและความสามารถในการสะเทินกรดสูงที่สุด รองลงมาเป็น อิฐมวลเบา และอิฐแดง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลของคาร์บอนัตในโครงสร้าง โดยความสามารถในการ สะเทินกรดของซีเมนต์เพสและอิฐมวลเบาสูงกว่าวัสดุทั่วไปและดินมาก

สัณฐานของวัสดุทั้ง 3 แตกต่างกัน การชะล้างด้วยสารละลายกรดทำให้สัณฐานของซีเมนต์ ีเพสและอิฐมวลเบาเปลี่ยนไป โดยมีลักษณะเป็นขุยและมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการละลายของ สารประกอบแคลเซียม ทำให้มีพื้นที่และปริมาตรรูพรุนผิวมากขึ้น และมีขนาดรูพรุนเล็กลง อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวนี้ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ ค่า CEC ของวัสดุทั้ง 3 น้อยกว่าวัสดุอินทรีย์ ทั่วไป โดยใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์

กลไกการดูดซับน่าจะเกิดขึ้นทั้งจาก Chemisorption และ Physisorption โดยมีกลไกหลัก เป็น Physisorption ค่าคงที่ของการดูดซับของซีเมนต์เพส(ล้าง) มีค่าสูงกว่าอิฐมวลเบา(ล้าง) และอิฐ แดง อย่างไรก็ตาม ค่า q_m ค่อนข้างน้อยกว่าวัสดุอื่น ๆ และค่า K_d มีค่าไม่สูงกว่าดินมากนัก

จากผลการศึกษา ซีเมนต์เพส เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อลด การเคลื่อนตัวของโลหะหนักมากกว่าอิฐมวลเบา และอิฐแดง ผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อเติมซีเมนต์เพส คือ การที่ดินมีพีเอชสูงขึ้นซึ่งจะลดการเคลื่อนตัวของโลหะหนักได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโลหะ หนัก และทำให้ดินมี ANC สูงขึ้นช่วยลดการเปลี่ยนแปลงพีเอชจากสภาวะกรดจากภายนอก แต่ไม่มี ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักออกจากดินไว้กับตัว ทั้งนี้ การทำให้ดินมีพีเอชและ ANC เพิ่มขึ้น นับเป็นลักษณะเด่นที่วัสดุอื่น อย่างวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและถ่านกัมมันต์ไม่มี ซึ่งแม้ตัวซีเมนต์ เพสเองไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพียงพอ แต่อาจมีประโยชน์ในการใช้ร่วมกับวัสดุดูดซับอื่น ใน แ่งของการเพิ่มพีเอชและ ANC ของดินให้เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- ทศพร ภูระหงษ์. ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์ ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- นันทนา ชูฉัตร. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- พูนศิริ สินธุรัตน์. การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการกรองที่มีเศษคอนกรีตเป็นสารกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- สุทัศน์ จันบัวลา. การพัฒนาส่วนผสมผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และอ่างทอง. วารสารวิจัย มสค สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 5 (1) 2555: 13-21.
- อุษณีย์ อยะเสถียร, อัจฉรา อิศวรจิกุลชัย, และ ธัชวีร์ สิละวัฒน์. การประเมินปริมาณและองค์ประกอบของของเสียจากการก่อสร้างและรีดถอนอาคารในกรุงเทพมหานคร. *Environment and Natural Resources Journal*, (5) 2 (2007): 133-140.
- Adriano, D. C. Trace elements in terrestrial environments biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals. 2nd ed. United States of America: Springer. 1986.
- Altin, O., Ozbelge, H.O., Dogu, T. Use of general purpose adsorption isotherms for heavy metal-clay mineral interactions. *Journal of colloid and interface science*, 198 1 (1998): 130-140.
- Akkajit, P., DeSutter, T., and Tongcumpou, C. Fractionation of Cd and Zn in Cd-contaminated soils amended by sugarcane waste products from an ethanol production plant. *Journal of Soils and Sediments*, 13 (2013): 1057-1068.
- Balaz, M., Bujnakova, Z., Balaz, P., Zorkovska, A., Danvoka, Z., Briancin, J. Adsorption of cadmium(II) on waste biomaterial. *Journal of Colloid and Interface Science*, 454 (2015): 121-133.

- Berbecea, A., Radulov, I., Sala, F., and Crista, F. Trace element and metal bioavailability in soils treated with industrial residuals. *Research Journal of Agricultural Science*, 42 3 (2010): 25-30.
- Bradl, H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277 (2004): 1–18.
- Cappuyens, V., Swennen, R., Verhulst, J. Assessment of acid neutralizing capacity and potential mobilisation of trace metals from land-disposed dredged sediments. *Science of the Total Environment*, 333 (2004): 233– 247.
- Chen, X., Wu, S. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 804–812.
- Cheng, Q., Huang, Q., Khan, S., Liu, Y., Liao, Z., Li, G., Ok, Y.S. Adsorption of Cd by peanut husks and peanut husk biochar from aqueous solutions. *Ecological Engineering*, 87 (2016): 240–245
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21 (2007): 1534–1541.
- Damla, N., Cevik, U., Kobya, A.I., Celik, A., Grieken, R.V., and Kobya, Y. Characterization of gas concrete materials used in buildings of Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, 168 (2009): 681–687.
- Djeribi, R., Hamdaoui, O. Sorption of copper (II) from aqueous solutions by cedar sawdust and crushed brick. *Desalination*, 225 (2008): 95–112.
- Donahue, R.L., Miller, R.W., Shickluna, J.C. *Soils: an introduction to soils and plant growth* 4th edition. New Jersey : Prentice- Hall, 1977.
- Dubinin, M.M., Radushkevich, L.V. The equation of the characteristic curve of the activated charcoal. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences Physical Chemistry Section*, 55 (1947): 331–337.

- Flores-Cano, J.V., Leyva-Ramos, R., Mendoza-Barron, J., Guerrero-Coronado, R.M., Aragon-Pina, A., Labrada-Delgado, G.J., Sorption mechanism of Cd(II) from water solution onto chicken eggshell. *Applied Surface Science*, 276 (2013) 682–690.
- Giampaolo, C., Mastro, S.L., Polettoni, A., Pomi, R., Sirini, P. Acid neutralisation capacity and hydration behaviour of incineration bottom ash–Portland cement mixtures. *Cement and Concrete Research*, 32 (2002): 769–775.
- Gregg, S.J., Sing, K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. 2nd ed. New York : Academic press, 1982.
- Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Beaton, J.D., Nelson, W.L. *Soil Fertility and Fertilizers*. New Delhi, India : Prentice Hall of India, 2011.
- Houben, D., Pircar, J., Sonnet, P. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability. *Journal of Geochemical Exploration*, 123 (2012): 87–94.
- Jain, A., Balasubramanian, R., Srinivasan, B. Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283 1 (2016): 789–805.
- Jiang, S., Huang, L., Nguyen, T.A.H., Ok, Y.S., Rudolph, V., Yang, H., Zhang, D. Copper and zinc adsorption by softwood and hardwood biochars under elevated sulphate-induced salinity and acidic pH conditions. *Chemosphere*, 142 (2016): 64–71.
- Jien, S.H., Wang, C.S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110 (2013): 225–233.
- Kooli, F., Yan, L., Al-Faze, R., and Al-Sehimi, A. Removal enhancement of basic blue 41 by brick waste from an aqueous solution. *Arabian Journal of Chemistry*, (2014)
- Koptsik, G.N. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: A Review. *Eurasian Soil Science*, 47 7 (2014): 707–722.

- Kumar, U., Bandyopadhyay, M. Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk. *Bioresource Technology*, 97 (2006): 104–109
- Laukaitis, A., and Fiks, B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*, 67 (2006): 284–296.
- Lee, K.W., Kidder, M., Evans, B.R., Paik, S., Buchanan III, A.C., Garten, C.T., Brown, R.C. Characterization of Biochars Produced from Cornstovers for Soil Amendment. *Environmental Science & Technology*, 44 (2010): 7970–7974.
- McBride, M.B, Sauve, S., and Hendershot, W. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48 2 (1997): 337–346.
- McBride, M.B. Chemisorption of Cd^{2+} on calcite surface. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (1980): 26-28.
- McLean, J.E. and Bledsoe, B.E. Ground Water Issue - Behavior of Metals in Soils. 1992
- Narayanan, N., and Ramamurthy, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, 22 (2000): 321-329.
- Noor, E.A., Al-Solmi, F.M. Analysis of adsorption, ion exchange, thermodynamic behaviour of some organic cations on Dowex 50WX4-50/H+ cation exchanger in aqueous solutions. *E-Journal of Chemistry*, 8(51) (2011): S171-S188.
- OECD. Adsorption - Desorption Using a Batch Equilibrium Method. GUIDELINE FOR THE TESTING OF CHEMICALS. 106, 2000.
- Ok, Y.S., Yang, J.E., Zhang, Y.S., Kim, S.J., and Chung, D.Y. Heavy metal adsorption by a formulated zeolite-Portland cement mixture. *Journal of Hazardous Materials*, 147 (2007): 91–96.
- Rao, K.S., Mohapatra, M. , Anand, S., Venkateswarlu, P. Review on cadmium removal from aqueous solutions. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2 7 (2010): 81-103.
- Sauvé, S., Hendershot, W., Allen, H.E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden and organic matter. *Environmental Science & Technology*, 34 (2000): 1125–1131.

- Scrivener, K.L., Fullmann, T., Gallucci, E., Walenta, G., Bermejo, E. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research*, 34 (2004): 1541–1547.
- Selvaraju, N., and Pushpavanam, S. Adsorption characteristics on sand and brick beds. *Chemical Engineering Journal*, 147 (2009): 130–138.
- Street, J.J., Sabey, B.R., Lindsay, W.L. Influence of pH, Phosphorus, Cadmium, Sewage Sludge, and Incubation Time on the Solubility and Plant Uptake of Cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 7 2 (1978) 286-290.
- Tonnayopas, D. Green building bricks made with clays and sugar cane bagasse ash. *The 11th International Conference on Mining, Materials, and Petroleum Engineering*, 2013.
- Venegas, A., Rigol, A., Vldal, M. Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils. *Chemosphere*, 119 (2015): 190–198.
- Ward Chesworth. *Encyclopedia of soil science*. New York : Springer Dordrecht, 2008
- Yadav, A.K., Kaushik, C.P., Haritash, A.K., Kansal, A., and Rani, N. Defluoridation of groundwater using brick powder as an adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, B128 (2006): 289–293.
- Yahya, M.A. Al-Qodah, Z., Zanariah Ngah, C.W. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46 (2015): 218–235.
- Yu, Z., Ye, G. The pore structure of cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*, 45 (2013): 30–35.