คุณลักษณะการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

Shrinkage characteristic of soft Bangkok clay stabilized by cement and fly ash

อนุพงศ์ คำปลอด[1] ธนกร ชมภูรัตน์[2] อภิชาต บัวกล้า[3,*]

[1] นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[2] รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[3] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: apichat_bk@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหดตัว โดยการใช้เทคนิคภาพถ่ายของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สัดส่วนการผสมของดินผสมปูนซีเมนต์จะกำหนดไว้ที่ อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำในดิน (C/W_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณ 0 15 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์การหดตัวจะใช้วิธีภาพถ่ายแบบ 2 มิติรวมกับการใช้โปรแกรม PCAS และ ImageJ ซึ่งสามารถคำนวณค่าจำนวนรอยแตก ความยาวรอยแตกเฉลี่ย ความกว้างรอยเฉลี่ย พื้นที่รอยแตก และค่าความเข้มรอยแตก สุดท้ายของงานวิจัยนี้จะสรุปอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยสำหรับนำไปใช้การปรับปรุงคุณภาพดิน

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, เทคโนโลยีภาพถ่าย

Abstract

This article is to present the shrinkage characteristic of soft Bangkok clay stabilize with cement and fly ash by using image processing technique. The law materials consist of soft Bangkok clay, Portland cement type 1, and fly ash from Mae Moh Power Plant. The mix ratio of soft clay blended with cement is shown in term of the cement/clay-water ratio which are 0.3 and 0.4. From each mix ratio, fly ash is replaced in the amount of 0, 15, 30, 45, and 60%. For shrinkage analysis, the image processing method of 2D is used together with the PCAS and ImageJ software. The programs can analyze the number of cracks segment, crack length, crack width, and crack area as well as crack intensity factor. Finally, this study will suggest the optimum mix ratio of soft Bangkok clay admixed with cement and fly ash for applying soil improvement practices.

Keywords: soft Bangkok clay, cement, fly ash, image processing technology

1. คำนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ภายในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาในการรับน้ำหนักของดิน เนื่องจากชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ดินเหนียวดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (soft Bangkok clay) เป็นดินที่ถูกพัดพาสู่ทะเลและน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอนเป็นชั้นๆ มีความลึกโดยประมาณ 15-25 เมตร [1] ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง จึงส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือน (shear strength) และการรับน้ำหนักของดินต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนก่อนนำใช้ในงานก่อสร้างฐานราก

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในปัจจุบันนิยมใช้ วิธีการผสมลึก (deep mixing methods) โดยวิธีนี้ใช้สารเคมี คือ ปูนซีเมนต์ (cement) ผสมเข้ากับดินเหนียว วิธีการผสมลึกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column) โดยการทำเสาเข็มดินซีเมนต์จะใช้น้ำปูน (cement slurry) เข้าไปผสมกับดินแล้วหล่อเป็นเสาเข็มสำหรับใช้ในการรองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างต่างๆ ณ บริเวณที่สุ่มเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายเนื่องจากการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น การก่อสร้างคอสะพาน และการก่อสร้างถนนบริเวณดินเหนียวอ่อน เป็นต้น โดยทั่วไปเสาเข็มดินซีเมนต์มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50-60 เซนติเมตร และความลึกประมาณ 2-15 เมตร [2] การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์มีการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก จึงทำให้เปลืองค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง จากการศึกษางานวิจัยของ ชยานนท์ และคณะ (2557) [1] ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยเถ้าลอย (fly ash) ที่ใช้เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะถูกนำมาผสมและแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ในงานทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จริงในสนาม จากนั้นเจาะเก็บตัวอย่างดินแล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุการบ่มตัวในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษานี้สรุปว่าเถ้าลอยสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่ากับกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยที่

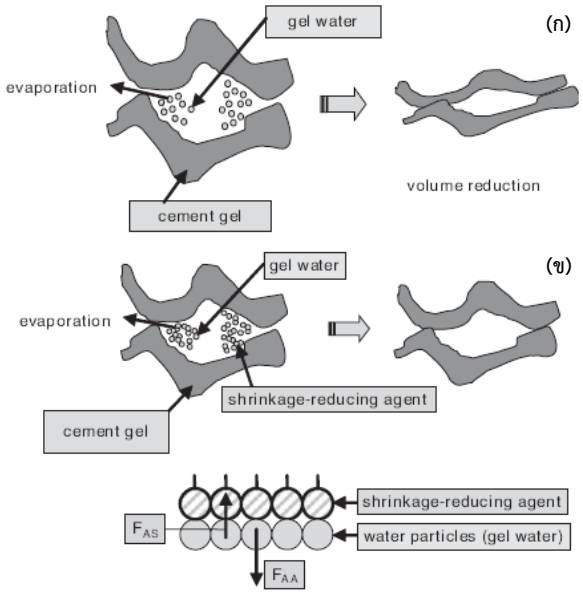
เหมาะสม และเถ้าลอยสามารถลดค่าใช้จ่ายปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างได้อยู่ที่ 12.75 เปอร์เซ็นต์

ต่อมาปัญหาสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การเกิดการหดตัว (shrinkage) เพราะดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเป็นดินประเภทดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ซึ่งมีปริมาณน้ำในมวลดินสูงสามารถการหดตัวได้ง่าย เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้น้ำในมวลดินจะค่อยๆ ระเหยออกไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ส่งผลให้เกิดรอยแตก (crack) ซึ่งน้ำในมวลดินและรอยแตกดังกล่าว อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีในภายหลังได้ จากการศึกษาของ Chompoorat and Likitlersuang (2016) [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยโดยการใช้วิธีภาพถ่าย (image processing method) แบบ 2 มิติ ในห้องปฏิบัติการ และการศึกษาพบว่าการผสมเถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์สามารถลดการหดตัวในมวลดินได้โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Tang et al. (2008) [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียว ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงเปียกสลับแห้งโดยใช้วิธีภาพถ่ายแบบ 2 มิติ การวิเคราะห์การหดตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นในมวลดินใช้โปรแกรม particles and cracks analysis system (PCAS) ที่สามารถวิเคราะห์รอยแตกจากการหดตัวของตัวอย่างดินอย่างละเอียด ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวแสดงผลลัพธ์ของค่าจำนวนรอยแตก ความยาว ความกว้าง พื้นที่ และค่าความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF) ในหน่วย พิกเซล ต่อมา El-Halim et al. (2017) [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวผสมชานอ้อย ซึ่งเขาได้ทำการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Tang et al. แต่การวิเคราะห์การหดตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นใช้โปรแกรม ImageJ และผลลัพธ์ของโปรแกรมนี้ที่ได้คือค่าของจำนวนรอยแตก ความยาว ความกว้าง พื้นที่ และค่าความเข้มรอยแตกในหน่วย พิกเซล และในหน่วยเซนติเมตร

เมื่อการใส่ปูนซีเมนต์ในดินเหนียวมีผลทำให้เกิดการหดตัว และรอยแตก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยการทดสอบการหดตัวจะใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพ (image processing) แบบ 2 มิติ มาวิเคราะห์การหดตัวอย่างละเอียด

2. กลไกการลดการหดตัวของดินผสมปูนซีเมนต์

Lee et al. (2006) [6] ได้อธิบายเกี่ยวกับกลไกการทำงานของตัวนำที่ลดการหดตัว (shrinkage-reducing agent) ซึ่งเป็นตัวออกฤทธิ์แบบพื้นผิวไม่มีประจุ (nonionic surface) สามารถลดแรงตึงผิวของน้ำในโพรงแคพิลลารี (capillary pores) ซึ่งโพรงแคพิลลารีเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซีเมนต์เจล (cement gel) กับน้ำส่วนเกิน เมื่อตัวนำดังกล่าวถูกเพิ่มลงในซีเมนต์เจลทำให้เกิดการดูดอนุภาคความชื้นตามพื้นผิวของอนุภาคน้ำเจล (gel water) และสร้างแรง F_{AS} เพื่อดึงดูดอนุภาคพื้นผิวของน้ำไปยังตัวนำที่ลดการหดตัว แรง F_{AA} ที่เป็นแรงดึงน้ำออกจากโพรงแคพิลลารีจะลดลง ส่งผลโดยรวมทำให้แรงตึงผิวลดลงเมื่อการระเหยของน้ำส่วนเกินสิ้นสุดจึงทำให้การหดตัวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยในงานวิจัยนี้ตัวนำที่ลดการหดตัวคือ เถ้าลอย



รูปที่ 1 กลไกของตัวนำที่ลดการหดตัว (ก) แบบไม่มีตัวนำที่ลดการหดตัว (ข) แบบที่มีตัวนำที่ลดการหดตัว (Lee et al., 2006) [6]

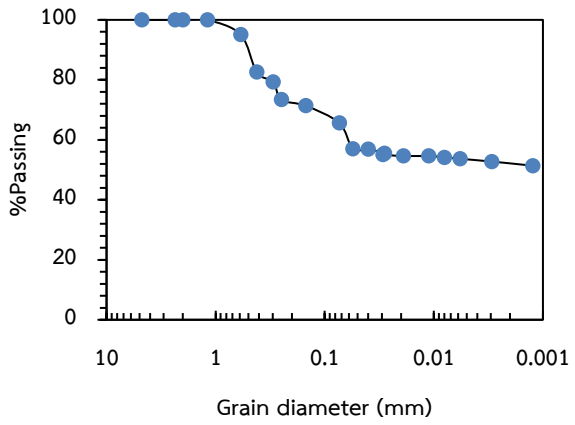
3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ระดับความลึกประมาณ 3-14 เมตรบริเวณถนนสายกาญจนาภิเษก-พุทธมณฑล สาย 2 และพื้นที่ใกล้เคียง สำหรับปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยคือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในตารางที่ 1 และขนาดคละของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

คุณสมบัติของดิน	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	2.64
ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)	77.80 %
ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)	35.78 %
ขีดจำกัดแห้ง (shrinkage limit)	16 %
ดัชนีพลาสติก (plastic index)	42.02 %
ดัชนีเหลว (liquid limit)	0.63
ปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content)	62.24 %
หน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight)	10.36 kN/m^3
เปอร์เซ็นต์การร่อนตะแกร่งผ่านเบอร์ 200	56.98 %
การจำแนกประเภทดิน (soil classification, USCS)	CH

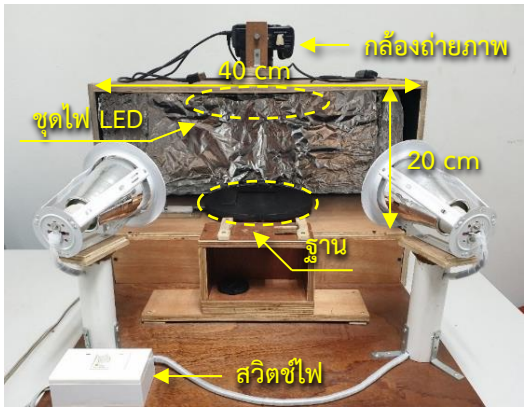


รูปที่ 2 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

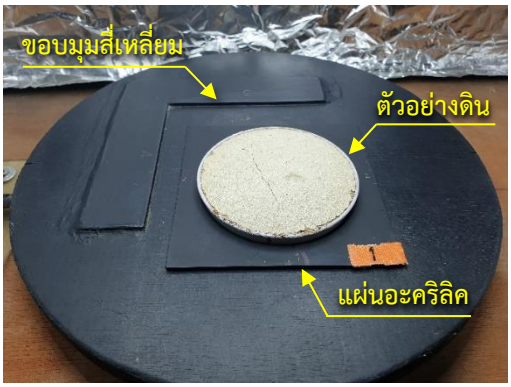
3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 เครื่องมือถ่ายภาพตัวอย่างดิน (soil studio)

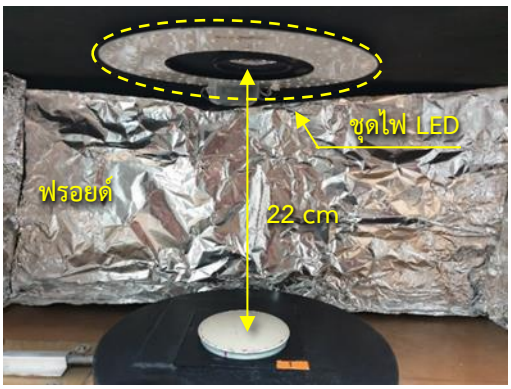
ผู้วิจัยมีแนวคิดที่ต้องการทำการถ่ายภาพตัวอย่างดินในแบบฝารูปวงกลมจากด้านบนของตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่างดินต้องอยู่ในตำแหน่งเดิมของการถ่ายภาพเสมอ จึงเริ่มจากนำแผ่นไม้อัดทำเป็นโครงโดยมีขนาดความสูง 20 เซนติเมตร กว้าง 40 เซนติเมตร ทำการเจาะรูเป็นวงกลมสำหรับติดตั้งกล้องที่ไม้อัดแผ่นบน จากนั้นทำการติดตั้งกล้อง DSLR ต่อมาทำการติดตั้งหลอดไฟ LED กับแผ่นไม้อัดด้านบน ดังรูปที่ 3 จากนั้นได้การทำฐานวางตัวอย่างดินที่มีขอบเป็นมุมสี่เหลี่ยมเพื่อวางแผ่นอะคริลิค โดยได้ทำแผ่นแผ่นอะคริลิครูปสี่เหลี่ยม ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ซึ่งแผ่นอะคริลิคดังกล่าวเจาะรูตรงกลางขนาดเท่าแบบฝาวงกลมเพื่อให้สามารถวางตัวอย่างฝาวงกลมได้ ดังรูปที่ 4 (ก) ภายในเครื่องมือภาพถ่ายตัวอย่างดินจะมีการเปิดไฟระหว่างการถ่ายภาพตัวอย่างโดยแสงไฟจะตกกระทบกับตัวอย่างดินทำมุม 90 องศา และมีการนำกระดาษฟรอยด์ติดไว้ 3 ด้าน เพื่อให้การสะท้อนแสงไปตกที่ตัวอย่างดินและสามารถช่วยลบเงาได้ ระยะโฟกัสระหว่างกล้องด้านบนกับตัวอย่างดิน 22 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 (ข) ภายนอกเครื่องมือภาพถ่ายตัวอย่างดินได้มีการทำโครงท่อ PVC ที่มีขนาดใหญ่กว่าเครื่องมือภาพถ่ายตัวอย่างดิน แล้วใช้ผ้าสีดำคลุมโครงท่อ PVC เพื่อควบคุมแสงไม่ให้แสงภายนอกเข้าสู่ภายใน ส่วนการตั้งค่ากล้อง DSLR ทำการปรับโหมดการถ่ายภาพเป็นโหมด M ค่ารูรับแสงที่ F20 ค่าชดเชยแสง ISO100 ความเร็วชัตเตอร์อยู่ประมาณ 1/13 ตั้งระบบวัดแสงให้เฉลี่ยทั้งภาพ เพื่อทำให้ภาพคมชัดที่สุด



รูปที่ 3 เครื่องมือภาพถ่ายตัวอย่างดิน



ก



ข

รูปที่ 4 ภายในเครื่องมือภาพถ่ายตัวอย่างดิน

3.2.2 การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย (shrinkage test by image processing)

สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายงานในวิจัยนี้จะใช้แบบฝาวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร โดยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้วบดเป็นผงนำมาผสมกับน้ำ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ตามส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 2 แล้วทำการหล่อตัวอย่างในแบบฝาวงกลม นำตัวอย่างไปถ่ายรูปเริ่มต้นใน soil studio หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกแล้วนำไปบ่มตามอายุที่ต้องการนำไปทดสอบ แล้วนำไปถ่ายรูปหลังจากการบ่มตัวแล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปถ่ายรูปสุดท้ายหลังจากการอบ สำหรับอัตราส่วนผสมในการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

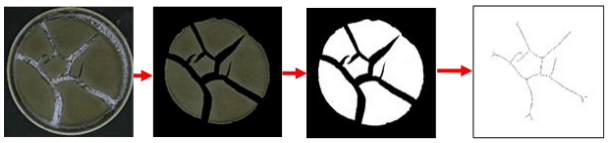
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมในการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย

LI (W_c,%)	C/W_c	เปอร์เซนต์เถ้าลอยแทนที่เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์	อายุการบ่มตัว
1.3, 1.6	0.3, 0.4	0, 15, 30, 45, 60	7, 28, 60

*LI คือ ดัชนีเหลว (liquidity index), C/W_c คือ เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน, FA คือ เปอร์เซ็นต์เถ้าลอย (fly ash)

3.2.3 การประมวลผลภาพถ่าย (image processing)

หลังจากการถ่ายภาพตัวอย่างดิน ดังรูปที่ 5 (ก) แล้วนำภาพถ่ายมาเข้าในโปรแกรม Photoshop CS6 เพื่อทำการตัดรูปเฉพาะส่วนที่เป็นผิวดิน ดังรูปที่ 5 (ข) หลังจากนั้นนำภาพที่ตัดเสร็จแล้วไปเข้าโปรแกรม PCAS และโปรแกรม ImageJ เพื่อวิเคราะห์รอยแตกและการหดตัวของตัวอย่างดิน โดยนำภาพที่ตัดเสร็จไปแปลงภาพเป็นภาพไบนารี (Binary) ดังรูปที่ 5 (ค) เพื่อหาพื้นที่การหดตัว (A_{sk}) และพื้นที่รอยแตก (A_c) ของตัวอย่างดิน หลังจากนั้นนำภาพไบนารีไปแปลงเป็นภาพเส้นโครงรอยแตก ดังรูปที่ 5 (ง) เพื่อหาความยาวรอยแตก (L_c) และความกว้างรอยแตกเฉลี่ย ($W_{c,av}$) ของตัวอย่างดิน พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณค่าปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก (crack density factor, CDF) และ ปัจจัยความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF) ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ K. Mukherjee and A. K. Mishra (2019) [7] ส่วนความกว้างรอยแตกเฉลี่ย (W_c) คำนวณจากสมการที่ 3 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ El-Halim et al. (2017) [5]



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 5 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ (ก) ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอล, (ข) ภาพตัดเฉพาะผิวดิน, (ค) ภาพไบนารี, (ง) ภาพเส้นโครงรอยแตก

$$CDF = \frac{A_{sk} + A_c}{A_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$CIF = \frac{A_c}{A_r} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ A_i คือ พื้นที่ผิวตัวอย่างดินเริ่มต้น (พิกเซล), A_r คือ พื้นที่ผิวตัวอย่างดินที่ลดลง (พิกเซล), A_c คือ พื้นที่รอยแตกของตัวอย่างดิน (พิกเซล), A_{sk} คือ พื้นที่การหดตัวของตัวอย่างดิน (พิกเซล)

$$W_{c,av} = \frac{A_c}{L_c} \quad (3)$$

โดยที่ $W_{c,av}$ คือ ความกว้างรอยแตกเฉลี่ย (เซนติเมตร), A_c คือ พื้นที่รอยแตก (ตารางเซนติเมตร), L_c คือ ความยาวรอยแตก (เซนติเมตร)

4. ผลงานวิจัย

4.1 ผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย

4.1.1 ปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก

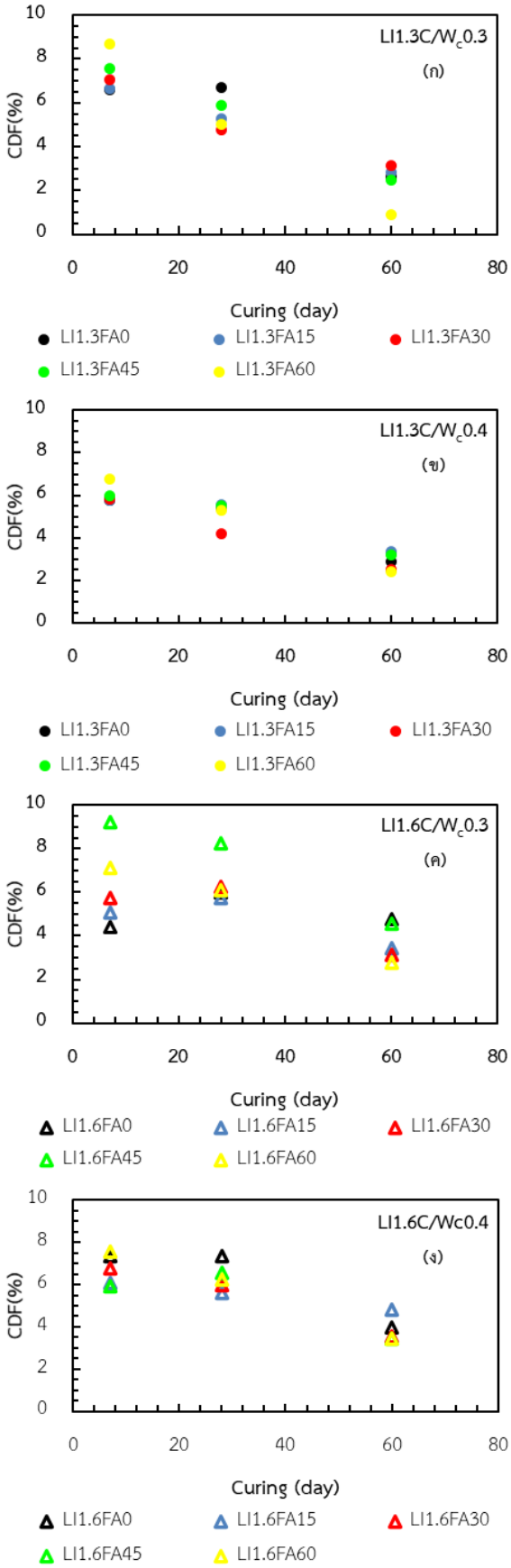
(crack density factor, CDF)

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอายุการบ่มตัว (curing) ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (C/W_c) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 ดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60 จากผลการทดสอบในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) พบว่าค่า CDF สูงซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 9 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นค่า CDF จะลดลงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกของเถ้าลอย โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด

ในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) พบว่ามีแนวโน้มการหดตัวที่ลดลงเหมือนกับส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ซึ่งมีค่า CDF ต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า CDF พอๆ กับส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 รวมถึงส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 มีการหดตัวตัวต่ำสุด ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวได้

ในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 6 (ค) พบว่าค่า CDF สูงซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นค่า CDF จะลดลงอยู่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 15 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกของเถ้าลอย โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ซึ่งมีการหดตัวที่สูงกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

สุดท้ายในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง) พบว่าค่า CDF สูงซึ่งค่ามากที่สุดอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นค่า CDF จะลดลงเล็กน้อยประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 15 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดอยู่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ซึ่งมีการหดตัวที่สูงกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง CDF กับอายุการบ่มตัว (curing)
(ก) LI1.3C/W_c0.3 (ข) LI1.3C/W_c0.4 (ค) LI1.6C/W_c0.3 (ง) LI1.6C/W_c0.4

โดยสรุปแล้ว การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวได้ในอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นได้ ดังกลไลการลดการหดตัวในหัวข้อที่ 2 ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุด เป็นเพราะการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดินที่เกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้าลอย อนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยช่วยลดขนาดของช่องว่างในมวลดินทำให้ลดอัตราการหดตัวตามขนาดของช่องว่างที่ลดลงไปด้วย (Chompoorat and Likitlersuang, 2016) [3] ต่อมา C/W_c เท่ากับ 0.3 จะมีการหดตัวน้อยกว่า 0.4 อยู่เล็กน้อย เพราะปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น ซึ่งการผสมปูนซีเมนต์ในดินเนื้อละเอียดเป็นอัตราการเกิดของรอยแตกหดตัว อย่างไรก็ตาม Chompoorat and Likitlersuang (2016) [3] ได้อธิบายว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ลดการหดตัวลด เพราะการเพิ่มปูนซีเมนต์จะทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงสูงขึ้นส่งผลให้ความเค้นแรงดึงภายในช่องว่างสูงจึงทำให้การหดตัวลดลง และที่ LI เท่ากับ 1.3 มีการหดตัวน้อยกว่า 1.6 อยู่เล็กน้อย ซึ่งผลการทดสอบตรงกับงานวิจัยของ Singh et al. (2017) [8] ที่ว่าค่า CDF ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินเริ่มต้น

นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะมีการหดตัวที่สูงมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันที่ค่า CDF ประมาณ 34 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า CDF ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 จากนั้นค่า CDF ลดลงประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน จนอายุการบ่มตัวที่ 60 วันค่า CDF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนแทบจะคงที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า CDF ประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า CDF ประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีการหดตัวที่ต่ำมาก ซึ่งมีการหดตัวต่างกันอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 จะแสดงในตารางที่ 3 และสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 จะแสดงในตารางที่ 4

4.1.2 ปัจจัยความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF)

สำหรับผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 จะแสดงในตารางที่ 3 และสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 จะแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งค่าความเข้มรอยแตก (CIF) จะมีค่าเฉพาะตัวอย่างดินที่มีรอยแตกเท่านั้น ซึ่งมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (C/W_c) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 ดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60 จากผลการทดสอบในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 พบว่าไม่มีค่า CIF หรือไม่มีรอยแตก ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน จากนั้นมีเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 เปอร์เซ็นต์มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.06 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการหดตัวสำหรับดัชนีเหลวเท่ากับ 1.3

Mix	Curing (day)	CDF (%)	CIF (%)	Wc (cm)
LI1.3	7	34.096 ± 1.504	17.058 ± 0.559	0.135 ± 0.002
	28	33.714 ± 0.730	16.947 ± 1.763	0.121 ± 0.024
	60	36.456 ± 0.660	13.962 ± 0.564	0.137 ± 0.021
LI1.3C/W0.3FA0	7	6.556 ± 0.275	-	-
	28	6.703 ± 0.494	-	-
	60	2.620 ± 0.223	0.207 ± 0.171	0.008 ± 0.005
LI1.3C/W0.3FA15	7	6.641 ± 0.090	-	-
	28	5.298 ± 1.046	-	-
	60	2.853 ± 1.396	0.032 ± 0.032	0.002 ± 0.002
LI1.3C/W0.3FA30	7	7.037 ± 0.492	-	-
	28	4.767 ± 0.207	0.060 ± 0.039	0.005 ± 0.003
	60	3.159 ± 0.424	-	-
LI1.3C/W0.3FA45	7	7.588 ± 0.114	-	-
	28	5.898 ± 0.285	-	-
	60	2.466 ± 0.459	0.061 ± 0.040	0.011 ± 0.004
LI1.3C/W0.3FA60	7	8.706 ± 0.303	-	-
	28	5.019 ± 0.404	-	-
	60	0.876 ± 0.319	-	-
LI1.3C/W0.4FA0	7	5.783 ± 0.250	0.002 ± 0.001	0.004 ± 0.002
	28	5.387 ± 0.356	-	-
	60	2.871 ± 0.734	-	-
LI1.3C/W0.4FA15	7	5.760 ± 0.297	-	-
	28	5.543 ± 0.111	-	-
	60	3.341 ± 0.218	-	-
LI1.3C/W0.4FA30	7	5.807 ± 0.514	-	-
	28	4.209 ± 0.542	-	-
	60	2.509 ± 0.931	0.012 ± 0.009	0.002 ± 0.001
LI1.3C/W0.4FA45	7	5.965 ± 0.219	-	-
	28	5.506 ± 0.547	-	-
	60	3.227 ± 0.178	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001
LI1.3C/W0.4FA60	7	6.777 ± 0.612	-	-
	28	5.306 ± 0.403	0.074 ± 0.039	0.004 ± 0.002
	60	2.403 ± 0.610	0.054 ± 0.035	0.003 ± 0.002

*หมายเหตุ ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± 1ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) ซึ่งได้มาจากตัวแปรอิสระซ้ำ 3 ค่า

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการหดตัวสำหรับดัชนีเหลวเท่ากับ 1.6

Mix	Curing (day)	CDF (%)	CIF (%)	Wc (cm)
LI1.6	7	37.770 ± 1.016	10.336 ± 0.000	0.074 ± 0.000
	28	35.785 ± 0.073	21.313 ± 0.199	0.151 ± 0.008
	60	36.901 ± 0.774	14.162 ± 0.000	0.117 ± 0.000
LI1.6C/W0.3FA0	7	4.404 ± 0.604	-	-
	28	6.012 ± 0.698	-	-
	60	4.766 ± 0.294	0.046 ± 0.031	0.006 ± 0.004
LI1.6C/W0.3FA15	7	5.064 ± 0.347	0.012 ± 0.012	0.002 ± 0.002
	28	5.736 ± 0.115	-	-
	60	3.450 ± 0.087	-	-
LI1.6C/W0.3FA30	7	5.724 ± 0.792	-	-
	28	6.241 ± 0.517	0.040 ± 0.040	0.002 ± 0.002
	60	3.130 ± 0.153	-	-
LI1.6C/W0.3FA45	7	9.225 ± 0.439	0.008 ± 0.008	0.003 ± 0.003
	28	8.261 ± 0.125	-	-
	60	4.572 ± 0.481	0.097 ± 0.046	0.007 ± 0.002
LI1.6C/W0.3FA60	7	7.134 ± 0.111	-	-
	28	6.124 ± 0.301	-	-
	60	2.790 ± 0.098	0.002 ± 0.002	0.001 ± 0.001
LI1.6C/W0.4FA0	7	7.354 ± 0.581	-	-
	28	7.340 ± 0.369	-	-
	60	3.966 ± 0.125	-	-
LI1.6C/W0.4FA15	7	6.065 ± 0.618	-	-
	28	5.595 ± 0.162	-	-
	60	4.832 ± 0.474	-	-
LI1.6C/W0.4FA30	7	6.759 ± 0.181	0.011 ± 0.010	0.004 ± 0.002
	28	5.970 ± 0.336	0.001 ± 0.000	0.004 ± 0.000
	60	3.564 ± 0.144	-	-
LI1.6C/W0.4FA45	7	5.912 ± 0.093	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.002
	28	6.559 ± 0.393	-	-
	60	3.422 ± 0.191	0.008 ± 0.008	0.001 ± 0.001
LI1.6C/W0.4FA60	7	7.551 ± 0.108	-	-
	28	6.232 ± 0.096	0.087 ± 0.043	0.005 ± 0.002
	60	3.467 ± 0.161	0.067 ± 0.042	0.005 ± 0.001

*หมายเหตุ ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± 1ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) ซึ่งได้มาจากตัวแปรอิสระซ้ำ 3 ค่า

60 วันมีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 0 15 และ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุด คือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 15 มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกของเถ้าลอย

ในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.4 พบว่าเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่ไม่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.002 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.07 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันมีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุด คือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 45 มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.001 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์เท่ากันมีรอยแตกลดลงประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีรอยแตกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ C/W_c เท่ากับ 0.3

ในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.3 พบว่าเกิดรอยแตกเพียง 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์และ 45 เปอร์เซ็นต์ มีค่า

CIF อยู่ประมาณ 0.007 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันมีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 0 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุด คือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.002 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกของเถ้าลอย

สุดท้ายในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.4 พบว่าเกิดรอยแตก 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์และ 45 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.002 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันจากนั้นเกิดรอยแตก 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.001 เปอร์เซ็นต์และ 60 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันมีรอยแตก 2 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 45 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.008 เปอร์เซ็นต์และ 60 เปอร์เซ็นต์ มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.06 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน รอยแตกลดลงประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีรอยแตกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ C/W_c เท่ากับ 0.3

โดยสรุปแล้ว การเกิดรอยแตกในส่วนผสมจำนวนน้อยมากและส่วนใหญ่แทบจะไม่มีรอยแตกเลย ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันพบว่าการเกิดรอยแตกในแต่ละส่วนผสมเพิ่มขึ้นแต่ในส่วนผสมเดียวกันจะช่วยลดรอยแตกลงในอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นนอกจากนี้ส่วนผสมที่มี C/W_c เท่ากับ 0.4 มีค่า CIF น้อยกว่า 0.3 และ LI เท่ากับ 1.3 จะมีค่า CIF น้อยกว่า 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน โดยค่า CIF ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งผลการทดสอบตรงกับ Singh et al. (2017) [8] ที่ว่าความเข้มรอยแตกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในมวลดินเริ่มต้น และจากผลการทดสอบการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยอาจทำให้เกิดรอยแตกมากขึ้นในแต่ละส่วนผสมเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์จะไม่พบรอยแตก หรือเกิดรอยแตกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะเกิดรอยแตกจำนวนมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันที่ค่า CIF ประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 จากนั้นค่า CIF ลดลงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน จนอายุการบ่มตัวที่ 60 วันค่า CIF ลดลงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 7 วันมีค่า CIF ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นค่า CIF จะเพิ่มขึ้นประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน จนอายุการบ่มตัวที่ 60 วันค่า CIF ลดลงประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นเพราะมีความชื้นในมวลดินสูงทำให้รอยแตกเพิ่มขึ้น โดยรวมของรอยแตกเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดการเกิดรอยแตกลงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 ความกว้างรอยแตกเฉลี่ย (average crack width, $W_{c,av}$)

สำหรับผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 จะแสดงในตารางที่ 3 และสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 จะแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งค่าความความกว้างรอยแตกเฉลี่ย ($W_{c,av}$) จะมีค่าเฉพาะตัวอย่างดินที่มีรอยแตกเท่านั้นซึ่งเหมือนกับค่าปัจจัยความเข้มรอยแตก ซึ่งมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำ (C/W_c) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 ดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60 จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับค่า CIF กล่าวคือ เมื่อมีค่า CIF เพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่า $W_{c,av}$ เพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องการงานวิจัยของ Tang et. al. 2012 [9] ที่ว่าค่า CIF และ $W_{c,av}$ มีทิศทางเดียวกัน ซึ่งการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยอาจทำให้เกิดความกว้างรอยแตกในแต่ละส่วนผสมมากขึ้นเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมเดียวกันยังช่วยลดความกว้างรอยแตกด้วยเมื่ออายุการบ่มตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่วนผสมที่มี C/W_c เท่ากับ 0.4 มีค่า $W_{c,av}$ น้อยกว่า 0.3 และ LI เท่ากับ 1.3 จะมีค่า $W_{c,av}$ น้อยกว่า 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน โดยค่า $W_{c,av}$ ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งผลการทดสอบตรงกับ Singh et al. (2017) [8] ที่ว่าความกว้างรอยแตกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในมวลดินเริ่มต้น โดยส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์จะไม่พบรอยแตก หรือเกิดความกว้างรอยแตกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะเกิดรอยแตกจำนวนมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันที่ค่า $W_{c,av}$ ประมาณ 0.13 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า $W_{c,av}$ ประมาณ 0.074 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 จากนั้นค่า $W_{c,av}$ ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนอายุการบ่มตัวที่ 60 วันค่า $W_{c,av}$ ลดลงเล็กน้อยจนแทบจะคงที่ ซึ่งค่า $W_{c,av}$ ประมาณ 0.137 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า $W_{c,av}$ ประมาณ 0.117 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดความกว้างรอยแตกประมาณ 0.1 เซนติเมตร นอกจากนี้ LI เท่ากับ 1.6 มีค่า $W_{c,av}$ น้อยกว่า LI เท่ากับ 1.3

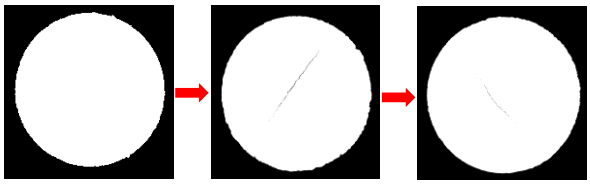
4.2 ลักษณะรอยแตกของตัวอย่างดิน

ลักษณะรอยแตกของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าลักษณะรอยแตกของตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีรอยแตกเป็นจำนวนมาก ก้อนรอยแตกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้มีความยาวรอยแตก และความกว้างรอยแตกมาก โดยลักษณะรอยแตกจะมีลักษณะเป็นรูป “T” และ “Y” ซึ่งลักษณะรอยแตกรูปร่างตัว “T” มักจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นถูกครอบด้วยรูปร่าง “Y” ดังรูปที่ 7 (ก) และเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ปรับปรุงคุณภาพพบว่ามีรอยแตกน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยลักษณะรอยแตกจะเป็นรอยแตกตามยาวมีความกว้างของรอยแตกเล็กน้อย ดังรูปที่ 7 (ข) ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับ

งานวิจัยของ Tang et al. (2012) [9] ที่ลักษณะรอยแตกการหดตัวแบบแห้งของดินเหนียวจะมีลักษณะเป็นรูปตัว “T” “Y” และ “+”

(ก) (ข)

รูปที่ 7 ลักษณะรอยแตก (ก) ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (ข) ดินที่ปรับปรุงคุณภาพ



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 8 การพัฒนารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน (ค) ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน

การพัฒนารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพที่อายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าเมื่อที่อายุการบ่มตัว 7 วันไม่พบรอยแตกหรือเกิดรอยแตกน้อยมาก ดังรูปที่ 8 (ก) จากนั้นได้เกิดรอยแตกเป็นเส้นตามยาว ซึ่งรอยแตกมีความยาวมากเกือบจะแบ่งพื้นที่ผิวตัวอย่างดินออกเป็นส่วนๆ และความกว้างรอยแตกหนาเล็กน้อยที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังรูปที่ 8 (ข) จนอายุการบ่มตัวครบ 60 วันเกิดรอยแตกที่มีความยาวลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีความยาวน้อยกว่ารอยแตกที่อายุการบ่มตัว 28 วัน และความกว้างรอยแตกลดลงจนบางมาก อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอตโซลานนิกของเถ้าลอย ดังรูปที่ 8 (ค) โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันไม่เกิดรอยแตกหรือมีรอยแตกเล็กน้อยนั้นคล้ายกับผลงานวิจัยของ Rafizul and Datta (2018) [10] เนื่องจากการผสมปูนซีเมนต์ทำให้รอยแตกลดลง หรือเกิดรอยแตกขึ้นเล็กน้อย ในช่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ยังไม่สมบูรณ์

5. บทสรุป

1. ความหนาแน่นรอยแตก (CDF) พบว่าดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้การหดตัวลดลง และเมื่อค่า CDF เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมาก นอกจากนี้ดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดการหดตัวให้ต่ำมากประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

2. ความเข้มรอยแตก (CIF) พบว่าดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้รอยแตกลดลง และทำให้แต่ละส่วนผสมเกิดรอยแตกมากขึ้น แต่ส่วนผสมที่เพิ่มปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์สามารถลดรอยแตกได้ต่ำที่สุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 และ 60 วัน จึงเป็นปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม และเมื่อค่า CIF เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมาก นอกจากนี้ดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดการเกิดรอยแตกประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

3. ความกว้างรอยแตกเฉลี่ย ($W_{c,av}$) พบว่ามีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับค่าความเข้มรอยแตก เมื่อค่า CIF มากขึ้นทำให้ค่า $W_{c,av}$ มากขึ้นด้วย ในดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ความกว้างรอยแตกลดลง นอกจากนี้ในส่วนผสมที่เพิ่มปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์สามารถลดความกว้างรอยแตกได้ต่ำที่สุด ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 และ 60 วัน จึงเป็นปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม และเมื่อค่า $W_{c,av}$ เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมาก นอกจากนี้ดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดความกว้างรอยแตกประมาณ 0.1 เซนติเมตรเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

4. ดินที่ปรับปรุงคุณภาพส่วนใหญ่จะไม่พบรอยแตกหรือมีรอยแตกน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยลักษณะของรอยแตกดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีลักษณะรอยแตกรูปร่างตัว “T” มักจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นถูกครอบด้วยรูปร่าง “Y”

5. การพัฒนารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพส่วนใหญ่จะเกิดรอยแตกเป็นเส้นตามยาว ซึ่งมีความยาวมาก และมีความกว้างรอยแตกที่หนาในอายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จนเมื่ออายุการบ่มตัวที่ 60 วัน ความยาวรอยแตกและความกว้างรอยแตกจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสันบสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา ภายใต้ทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษาปี 2563

เอกสารอ้างอิง

[1] ชยานนท์ ศรีเจริญ, รุ้งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข (2557). การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 37*, กรุงเทพมหานคร, 2 เมษายน – มิถุนายน, หน้า 151-164.

[2] ปิยะ รัตนสุวรรณ และ วรรณสิริ พันธ์อุไร (2555). การวิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 23 ฉบับที่ 2.

[3] T. Chompoorat and S. Likitlersuang (2016). Assessment of shrinkage characteristic in blended cement and fly ash admixed soft clay. Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol 2 (6), pp. 311-316.

[4] Chaosheng Tang, Bin Shi, Chun Liu, Lizheng Zhao and Baojun Wang (2008). Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. Engineering Geology, Vol 101, pp. 204-217.

[5] A.A. Abd El-Halim (2017). Image processing technique to assess the use of sugarcane pith to mitigate clayey soil cracks: Laboratory experiment. Soil & Tillage Research, Vol 169, pp. 138-145.

[6] Y. H. Cho, K. W. Lee, and S. W. Ryu (2006). Development of Cement-Treated Base Material for Reducing Shrinkage Cracks. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1952(1), pp. 134-143

[7] K. Mukherjee and A. K. Mishra (2019). Hydro-Mechanical Properties of Sand-Bentonite-Glass Fiber Compositefor Landfill Application. KSCE Journal of Civil Engineering (2019), Vol 23(11), pp. 4631-4640.

[8] S. P. Singh, S. Rout & A. Tiwari (2017). Quantification of desiccation cracks using image analysis technique. International Journal of Geotechnical Engineering, Vol 12(4), pp. 383-388.

[9] Chao-Sheng Tang, Bin Shi, Yu-Jun Cui, Chun Liu, and Kai Gu (2012). Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal* 2012, Vol 49(9), pp. 1088-1101.

[10] I. M. Rafizul and D. Datta (2018). Quantification of Geometrical and Morphological Characteristics of Desiccation Crack and Shrinkage Behavior of Composite Clay Liner. Iranica Journal of Energy & Environment, Vol 9(4), pp.284-294