

บทที่ 5

ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลการศึกษาของดินเหนียวบวมตัวต่ำ ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

แนวทางการหาตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลาน ปัจจุบันเถ้าลอยแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ เถ้าลอยที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน และเถ้าลอยที่เหลือจากการเผาไหม้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น แกลบ เปลือกไม้ ชานอ้อย เป็นต้น เรียกเถ้าประเภทนี้ว่าเถ้าชีวมวล สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมีอยู่มากมายดังนั้นการนำเถ้าชีวมวลมาใช้ทดแทนปริมาณซีเมนต์บางส่วนสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของดิน เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างและผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่น่าสนใจ อีกทั้งการใช้ประโยชน์จากเถ้าประเภทนี้มีส่วนช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ การประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวลในงานดินนั้นยังไม่มีที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากยังขาดความรู้ความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับการพัฒนาลักษณะทางวิศวกรรม ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการหาตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล พร้อมทั้งสร้างสมการทำนายกำลังอัด ตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล (k) นี้หมายถึงความสามารถของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่เปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกัน นั่นคือตัวแปรประสิทธิภาพ (k) มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกำลังของดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับดินซีเมนต์เถ้าลอย ดังนั้นเพื่อให้ตัวแปรประสิทธิภาพนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย การทำความเข้าใจในพฤติกรรมการรับกำลังอัดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

1. คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติพื้นฐาน

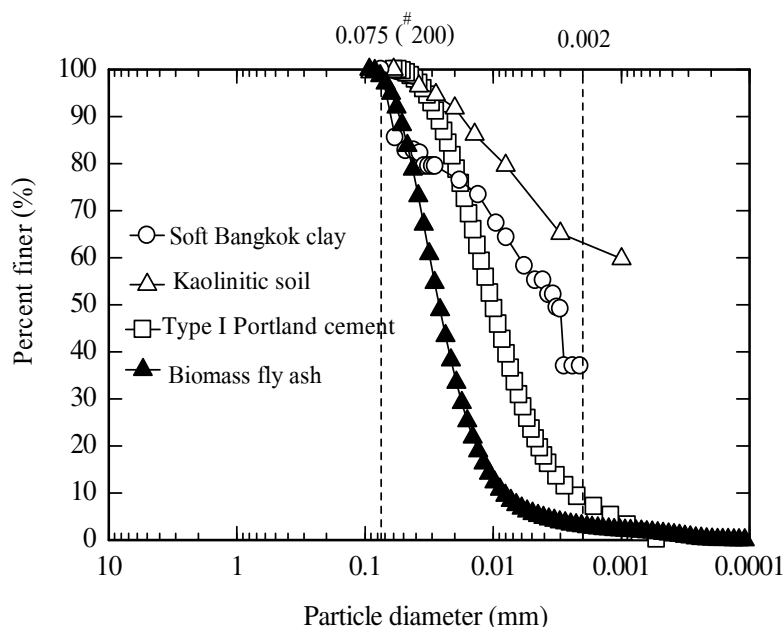
การศึกษาในส่วนนี้ใช้ดินที่มีการบวมตัวต่ำสองชนิดคือ ดินเหนียวคาโอไลน์หรือดินขาวและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพถูกเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตรจากผิวดินภายในบริเวณสถานที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษ (วงแหวนรอบนอกตะวันออก) อำเภอลำลูกกา จังหวัดกรุงเทพ ฯ ค่าพิกัดอัตราเบอร์กหาได้จากวิธี Fall cone ตามมาตรฐาน BS: 1377- part II, 1990 ค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวคาโอไลน์ และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเท่ากับ 42.5 และ 92.15

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 27.5 และ 31.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบแสดงดังในตารางที่ 5.1 และการกระจายตัวของวัสดุทดสอบดังในภาพที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินคาโอไลน์ที่ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
ถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

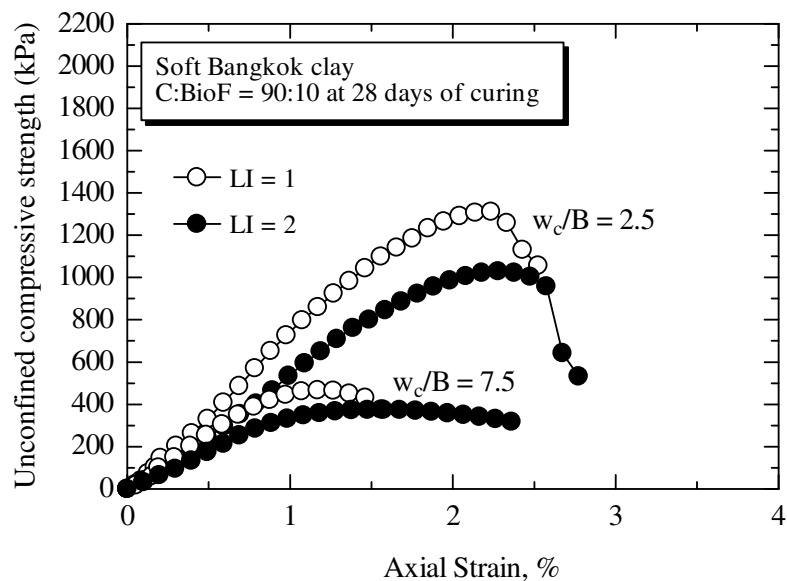
Chemical Compounds	Biomass ash	Portland Cement Type I	Kaolinitic Soil	Soft Bangkok clay
% SiO_2	74.12	20.90	59.79	63.83
% Al_2O_3	0.57	4.76	31.84	21.34
% Fe_2O_3	0.88	3.41	1.59	8.41
% MgO	1.54	1.25	-	1.54
% CaO	5.91	65.41	-	0.94
% Na_2O	3.33	0.24	-	0.28
% K_2O	1.71	0.35	3.05	2.45
% SO_3	0.50	2.71	0.05	1.22
Specific Gravity	1.95	3.15	2.78	2.71
LOI	7.45	0.96	3.68	
สูตรเชื้อเพลิง	ถ้าชีวมวล			
แกลบ	36%			
เปลือกไม้	24%			
ไม้บอร์ค	6%			
ไม้ยูคาสับละเอียด	23%			
แกลบอัดเม็ด	11%			



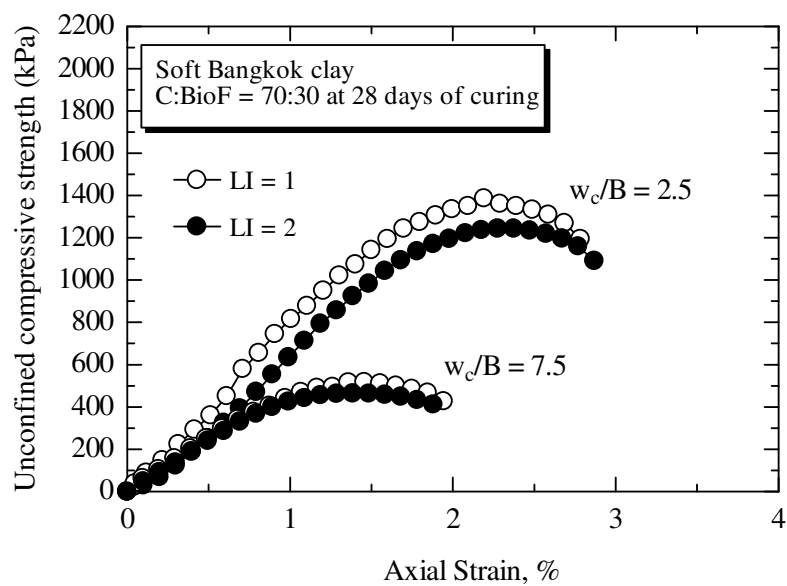
ภาพที่ 5.1 การกระจายตัวของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชีวมวล

2. ความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

ภาพที่ 5.2 ถึง 5.5 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพ ฯ และดินเหนียวคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่ระยะบ่ม 28 ถึง 60 วัน ตามลำดับพบว่ากำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีค่ากำลังใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกันก็ตามซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับดินซีเมนต์ดังได้กล่าวในบทที่ผ่านมา แม้ดินตัวอย่างจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ($LI = 1, 2$) ก็ตาม หากแต่มีอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมเท่ากันแล้ว ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดใกล้เคียงกัน และพบว่าที่ระยะเวลา 60 วัน ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลให้กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุดและสูงกว่าที่ระยะบ่ม 28 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยารวมที่เกิดจากปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ดังนั้นตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม

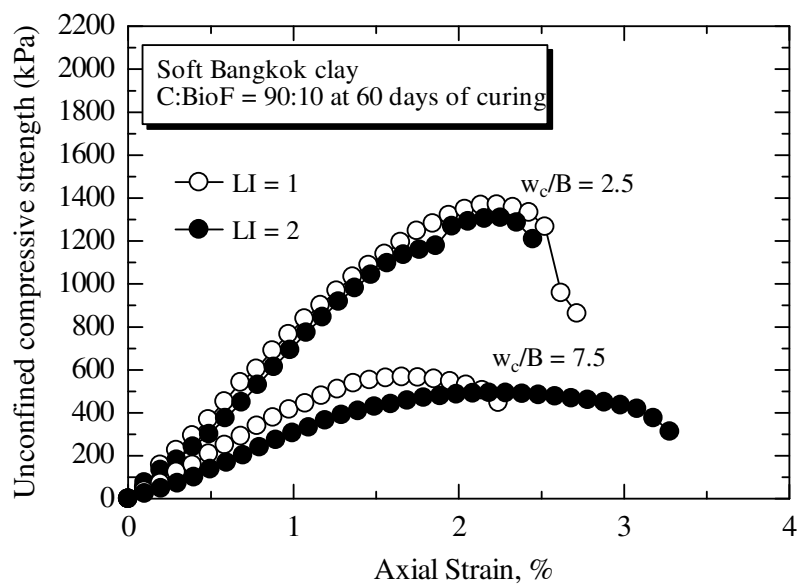


ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10

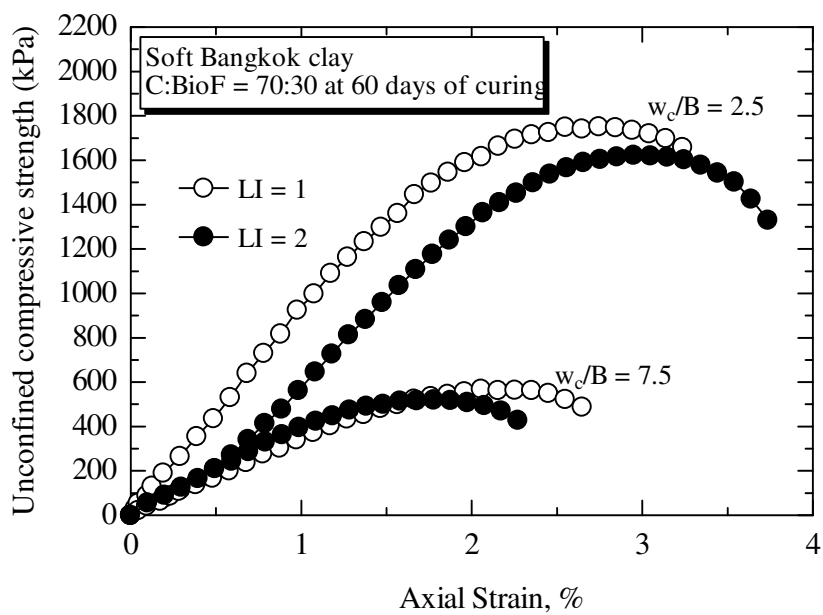


ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

ภาพที่ 5.2 ความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์และ
เถ้าชีวมวลที่อายุปม 28 วัน

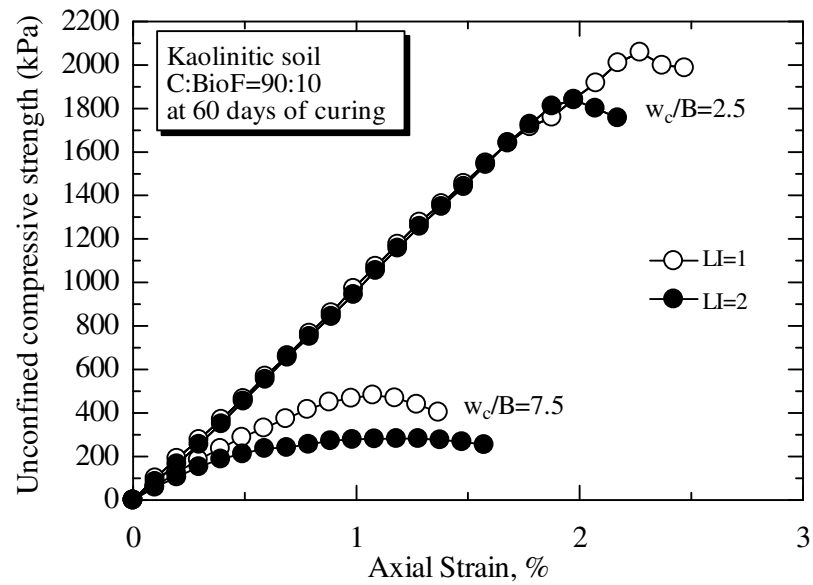


ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10

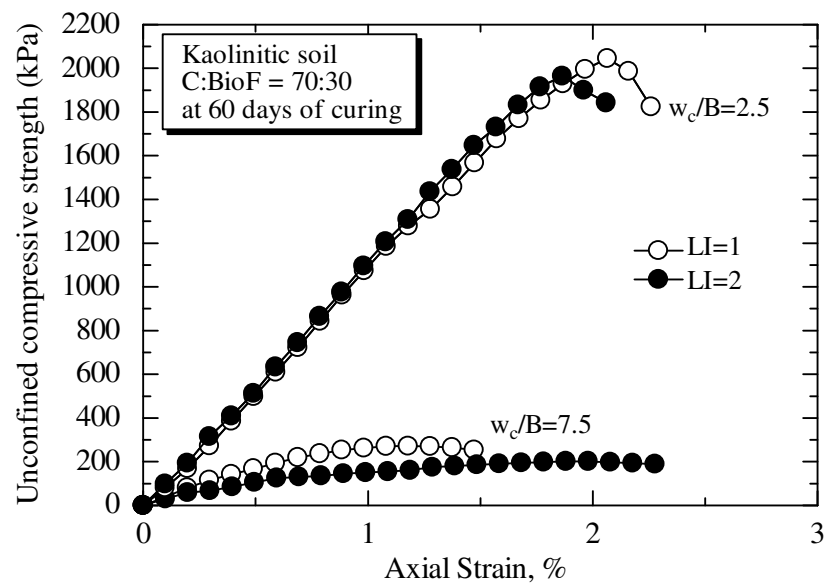


ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และ
เถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 60 วัน



ก) ปูนซีเมนต์ ต่อ ฝ้าชีวมวล = 90:10

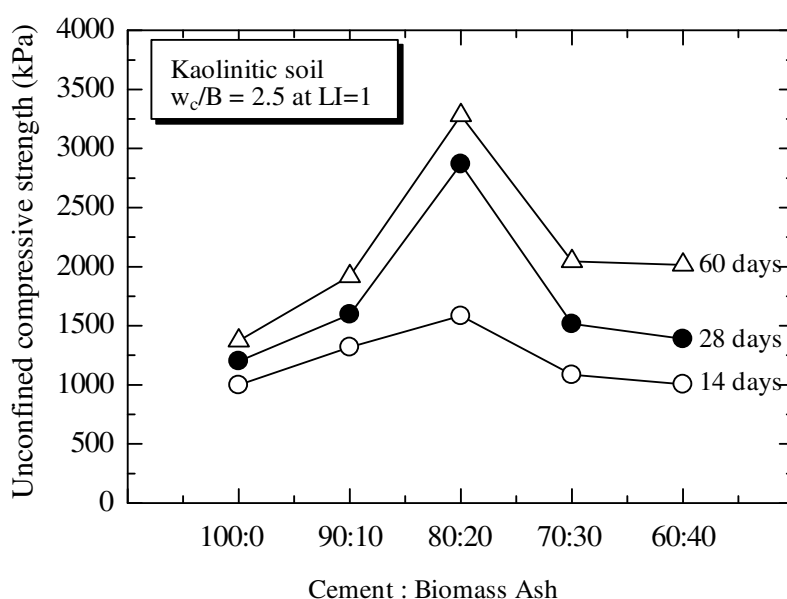


ข) ปูนซีเมนต์ ต่อ ฝ้าชีวมวล = 70:30

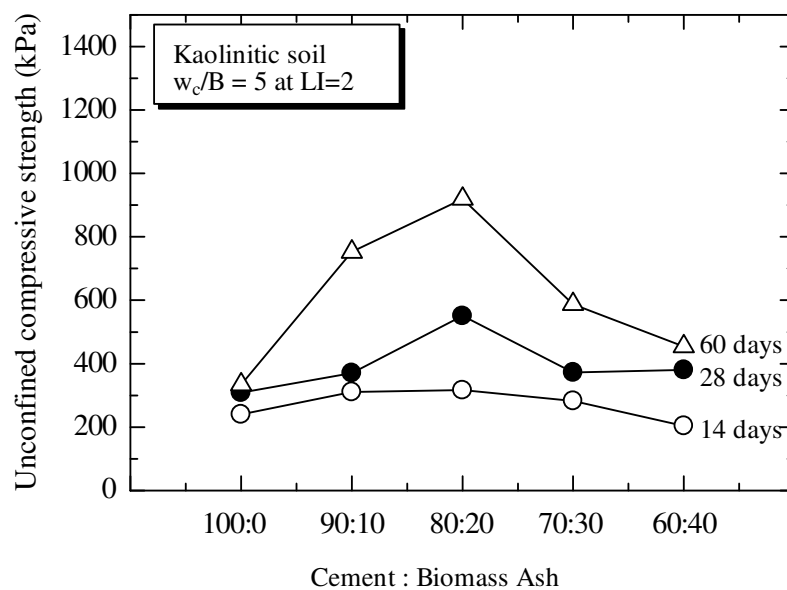
ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดของดินเหนียวคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์ และฝ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 60 วัน

นอกจากตัวแปรอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมและระยะเวลาบ่มจะเป็นตัวควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแล้ว อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณา

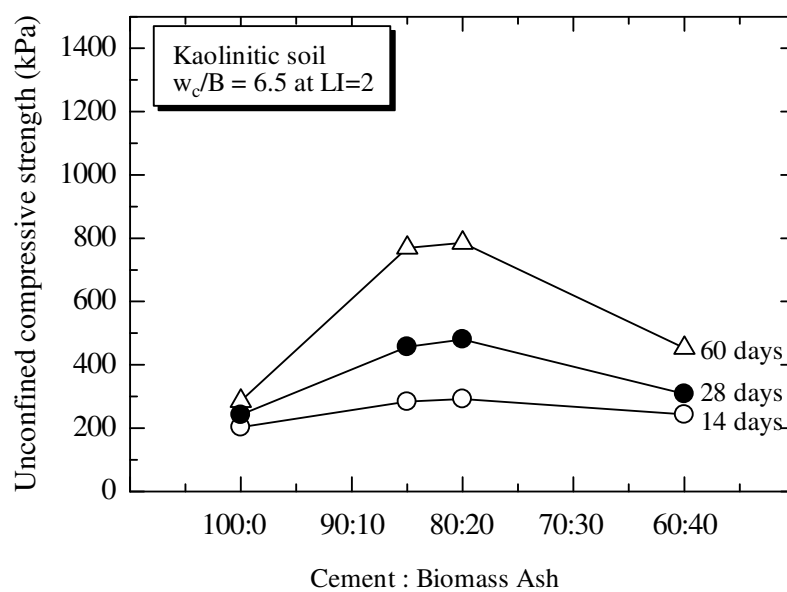
ภาพที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์กำลังอัดแกนเดียวของดินคาโอลินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน และมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวและอัตราส่วนการแทนที่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมและระยะเวลาบ่มหนึ่งๆ อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด และที่อัตราส่วนการแทนที่ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์กำลังลดลง ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์ที่ระยะบ่มมากกว่า 28 วันที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมเท่ากับ 2.5 5 และ 6.5 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากจากการใช้ปริมาณเถ้าชีวมวลในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากเกินไปทำให้ปริมาณของคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยที่ระยะเวลาช่วงต้นและไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาปอซโซลานได้



ก) ที่ $w_c/B = 2.5$



ข) ที่ $w_c/B = 5$

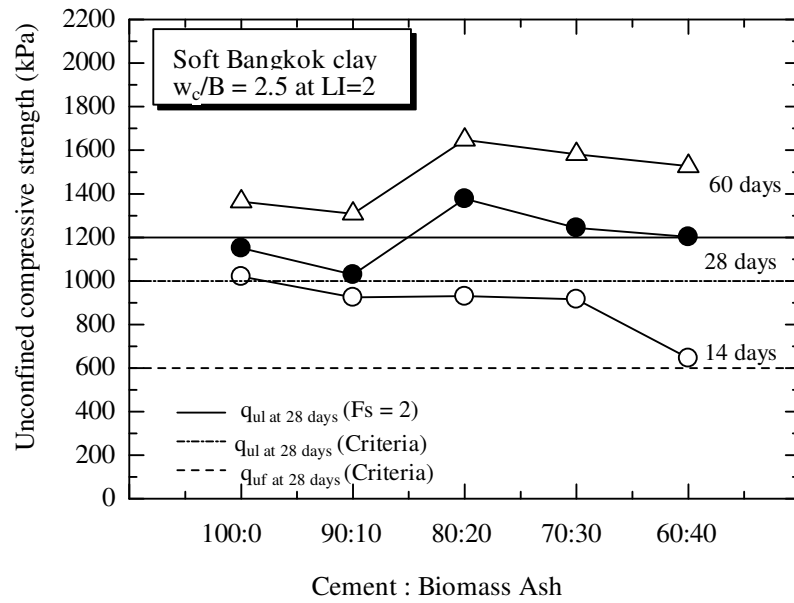


ค) ที่ $w_c/B = 6.5$

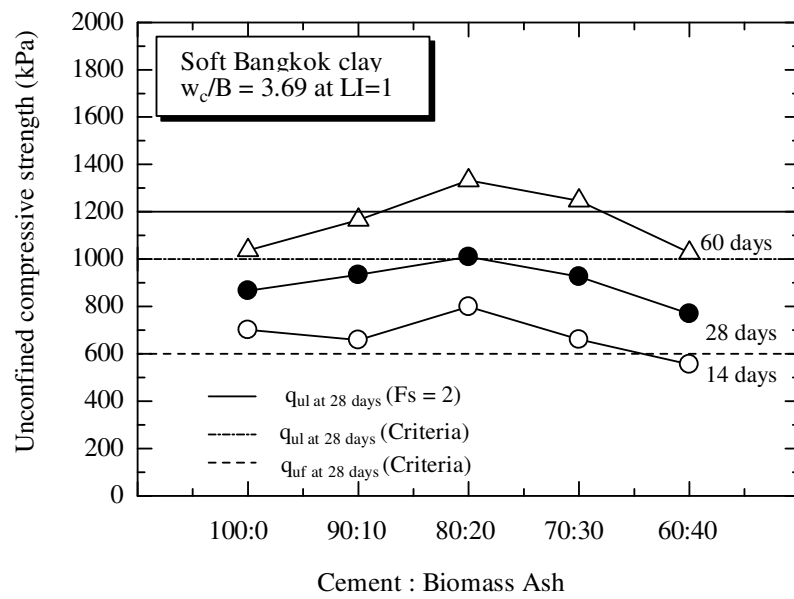
ภาพที่ 5.6 กำลังอัดแกนเดียวของดินขาวหรือดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

ภาพที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมเท่ากับ 2.5 ถึง 5.55 ที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่าทุกอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสม ($w_c/B = 2.5 - 5.55$) ที่ระยะบ่มมากกว่า 28 วัน อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุด เช่นเดียวกับดินเหนียวคาโอลิไนท์ และจากข้อกำหนดตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยสำหรับการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ได้กำหนดกำลังอัดของดินซีเมนต์ใน

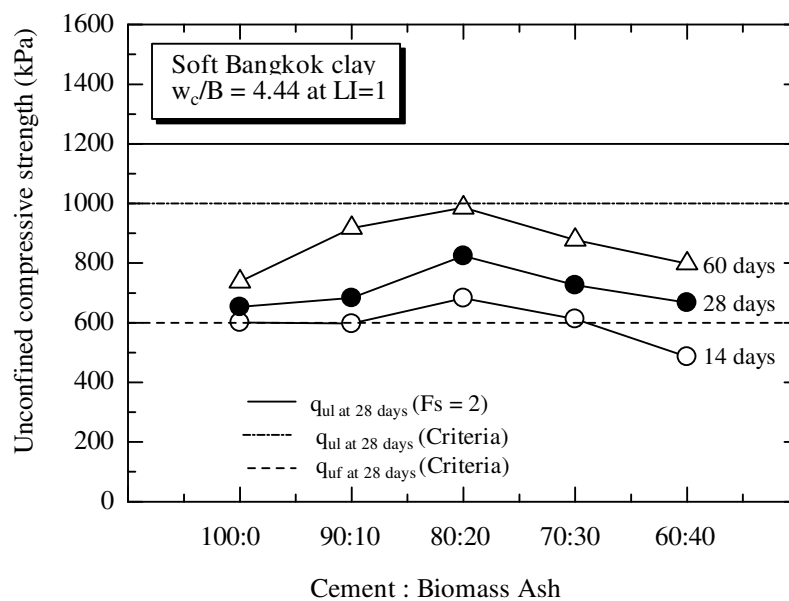
ห้องปฏิบัติการ (Laboratory unconfined compressive strength, q_{ul}) ที่ระยะบ่ม 28 วันเท่ากับ 1000 กิโลปาสคาล ดังนั้นจากภาพที่ 5.7 พบว่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมเท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลเท่ากับ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีประโยชน์อย่างมากเพราะสามารถให้กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์มากกว่าที่มาตรฐานกรมทางหลวงกำหนดไว้ แต่เมื่ออัตราส่วนผสมอยู่ในช่วง w_c/B เท่ากับ 3.69 แล้วนั้นที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นจึงจะเป็นอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครบริเวณอำเภอลำลูกกา- ธัญบุรี แต่เมื่อดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อส่วนผสมมากกว่า 3.69 แล้วนั้นจะเป็นสัดส่วนที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานสำหรับดินบริเวณนี้ เพราะกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลให้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดมาก แต่ถ้าพิจารณากับข้อกำหนดมาตรฐานกรมทางหลวงในสนาม (Field unconfined compressive strength, $q_{uf} = 600$ kPa ที่ 28 วัน) นั้น พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ตั้งแต่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมตั้งแต่ 2.5 ถึง 4.44 นั้นจะให้กำลังที่สูงกว่าค่ามาตรฐานในสนามที่กรมทางหลวงได้กำหนดไว้ แต่ทั้งนี้ที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามที่มาตรฐานกรมทางหลวงกำหนดไว้เมื่ออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมเท่ากับ 2.5 ถึง 5.55 สำหรับในกรณีของงานออกแบบที่ต้องการอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2 นั้น ($q_{ul} = 2q_{uf}$) พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมเท่ากับ 2.5 ถึง 3.69 ที่ระยะบ่มมากกว่า 60 วัน ให้ค่ากำลังอัดตามต้องการ (1200 kPa) ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ (กำลังและระยะเวลา) ผู้เขียนจึงขอแนะนำอัตราส่วนการแทนที่ที่ดีที่สุดด้วยเถ้าชีวมวลนี้สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์แต่สำหรับอัตราส่วนผสมนั้นควรประยุกต์ใช้สมการที่ 4.8 ช่วยในการออกแบบเมื่อปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของค่าดัชนีเหลว



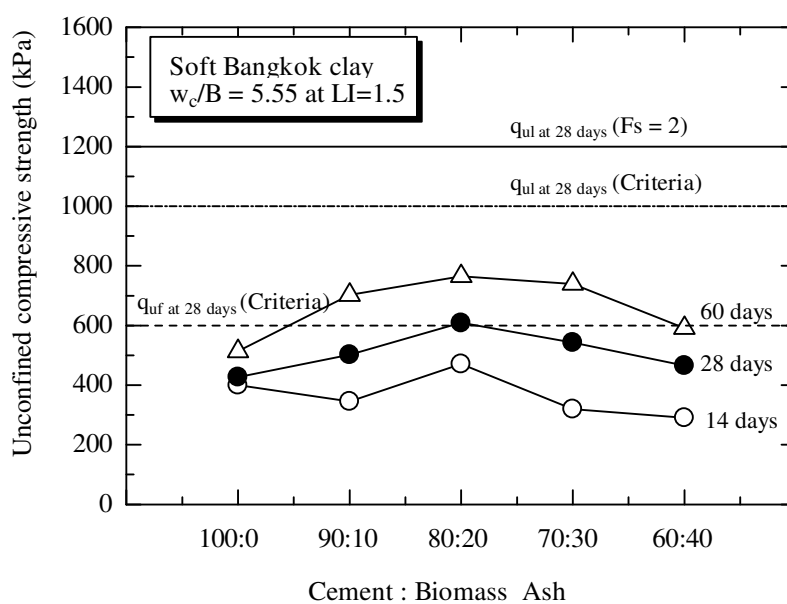
n) $w_c/B = 2.50$



ข) $w_c/B = 3.69$



ค) ที่ $w_c/B = 4.44$



ง) ที่ $w_c/B = 5.55$

ภาพที่ 5.7 กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพมหานครบริเวณอำเภอลำลูกกา – ธัญบุรี ผสมซีเมนต์ และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

ดังนั้นจากผลทดสอบข้างต้นผู้เขียนจะนำตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลทั้ง 3 ตัวแปรคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสม ระยะเวลาบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลด้านการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลในหัวข้อถัดไป

3. ตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลของดินบวมตัวต่ำ

3.1 ดินคาโอไลน์หรือดินขาว

ในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์เถ้าลอยยังไม่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย หากแต่สำหรับงานคอนกรีตผสมเถ้าลอยนั้น ตามมาตรฐานอังกฤษ (British Standard) ได้แนะนำค่าแฟกเตอร์ ประสิทธิภาพ (Efficiency Factor) หรือค่า k โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณเถ้าลอยที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าความสามารถของปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพนี้มาประยุกต์ใช้กับงานดินและเป็นแนวทางในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยได้

Horpibulsuk et al. (2003) ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใดๆ โดยอาศัยสมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio hypothesis) ซึ่งเสนอโดย Miura et al. (2001) สมมติฐานน้ำในดินต่อซีเมนต์กล่าวว่า “กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียวคืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C)” จากกรอบความคิดดังกล่าวและจากผลทดสอบในบทที่ผ่านมา ผู้เขียนได้ทำการพิจารณากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับส่วนกลับของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์, C/w_c ที่ระยะเวลาบ่มหนึ่งๆ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงดังสมการที่ 5.1

$$q_u = A \left(\frac{C}{w_c} \right) + E \quad (5.1)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ E คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และ C/w_c คือ cement/clay-water ratio ซึ่งคือปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักแห้งต่อน้ำในดิน

ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าลอย ผู้เขียนได้ประยุกต์กรอบความคิดข้างต้นและหลักการของการใช้ตัวแปรประสิทธิภาพของวัสดุปอชโซลานมาช่วยในการวิเคราะห์ โดยผู้เขียนได้กำหนดปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าคือ C_e เมื่อปริมาณซีเมนต์เทียบเท่านี้มีค่าดังสมการที่ 5.2

$$C_e = k.BioF \quad (5.2)$$

เมื่อ C_e คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า, k คือตัวแปรประสิทธิภาพและ $BioF$ คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%) ดังนั้นปริมาณส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และเถ้าลอย (Binder content) จึงเกิดจากผลรวมของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม, C_i และปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าที่เกิดจากการใส่เถ้าลอยเข้าไปแทนที่, C_e ความสัมพันธ์ของการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในสมการที่ 5.1 จึงถูกประยุกต์สำหรับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยได้ดังสมการที่ 5.3

$$q_u = A \left(\frac{C_i + k.BioF}{w_c} \right) + E \quad (5.3ก)$$

$$q_u = A \left(\frac{C_i}{w_c} \right) + A_2 \left(\frac{BioF}{w_c} \right) + E \quad (5.3ข)$$

เมื่อ ตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่ากับ $\frac{A_2}{A}$

ในกรณีที่ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงความสามารถของวัสดุปอชโซลานที่อัตราส่วนการแทนที่นี้มีค่าเทียบเท่าความสามารถของปูนซีเมนต์ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากสมการข้างต้น ถ้าเราทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรประสิทธิภาพ k ในพจน์ของอัตราส่วนการแทนที่และชนิดของดิน เราสามารถทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลได้ จากผลทดสอบดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลนำความสัมพันธ์จากสมการที่ 5.3 มาประยุกต์ได้ดังภาพที่ 5.8 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบสมการเส้นตรง และพบว่าความสัมพันธ์ของค่าคงที่ A และ E กับเวลาบนสเกลล็อกกาลีทิมได้ดังสมการที่ 5.4 และ 5.5 และภาพที่ 5.9

$$A = 78.54 + 1234.59 \ln D \quad (5.4)$$

$$E = 162.39 - 181.01 \ln D \quad (5.5)$$

เมื่อ D คือระยะเวลาบ่ม (วัน)

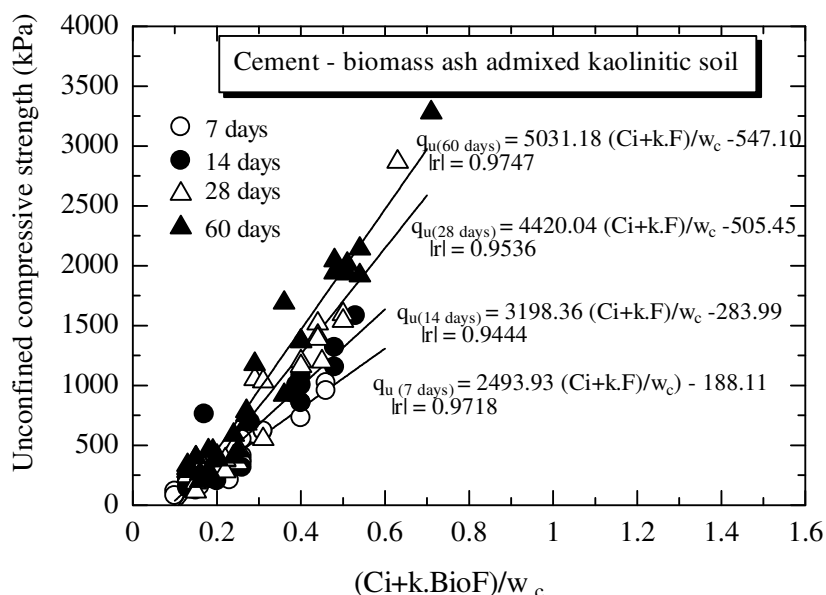
จากการแก้ปัญหาด้วยวิธี Multi Linear Regression ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k แสดงดังตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าค่าตัวแปร k ที่อัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาดังนั้นผู้เขียนได้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรประสิทธิภาพ k กับเวลาในสเกลล็อกกาลีที่พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังในภาพที่ 5.10 และได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized k -factor กับเวลาโดยใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นตัวอ้างอิงได้ผลดังสมการที่ 5.6

สำหรับเถ้าชีวมวล

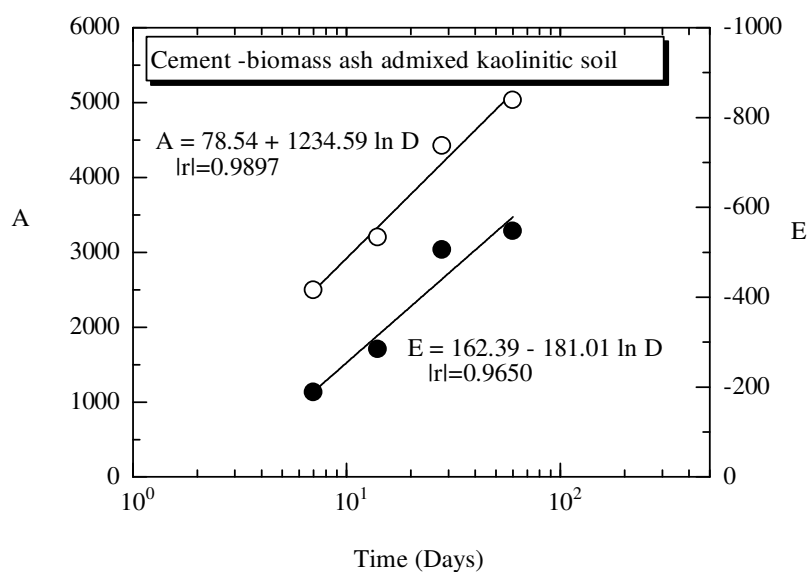
$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4198 \ln D - 0.405 \quad (5.6)$$

เมื่อ k_D คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก D วัน, k_{28} คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก 28 วัน

สมการที่ 5.6 สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หากทราบเพียงค่าตัวแปร k ที่ระยะเวลา 28 วันของอัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ เราสามารถทำนายค่าตัวแปร k ของอัตราส่วนนั้น ๆ ที่ระยะเวลาอื่น ๆ (7 – 60 วัน) ได้



ภาพที่ 5.8 กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวคาโอลินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล 10 ถึง 40% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่มต่าง ๆ



ภาพที่ 5.9 พารามิเตอร์ A และ E กับสเกลล็อกการเพิ่มขึ้นของเวลาของดินเหนียวคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล 10 ถึง 40% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

ตารางที่ 5.2

ตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลในดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

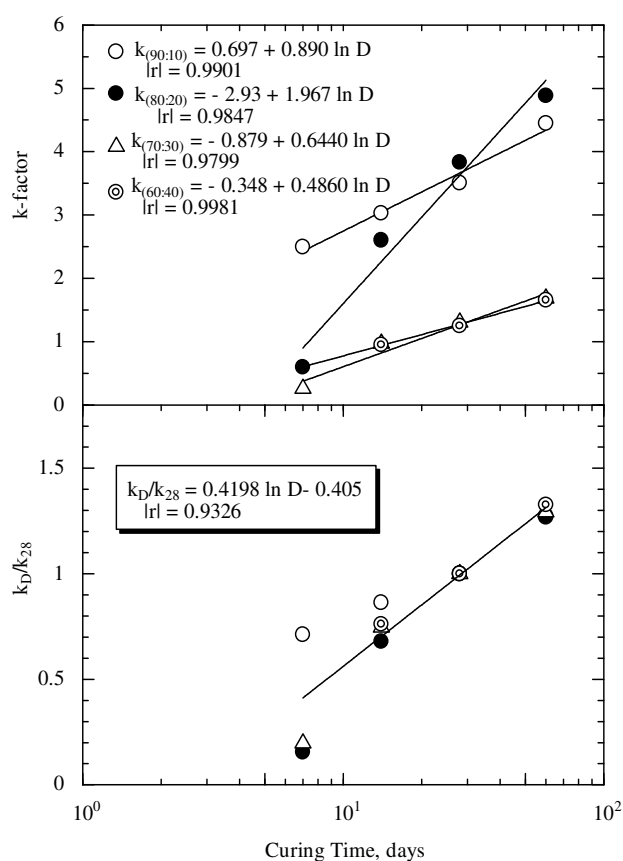
C:BioF	ระยะเวลาบ่ม, วัน	Multi-Linear Regression	R^2	$k = \frac{A_2}{A}$
		A	A_2	
90:10	7	2609.02	6511.56	0.957
	14	3065.28	9281.24	0.955
	28	3663.28	12844.88	0.954
	60	4469.22	19876.29	0.979
80:20	7	1994.07	1188.45	0.836
	14	3233.18	8416.85	0.919
	28	4632.00	17749.53	0.877
	60	4937.58	24115.57	0.956
70:30	7	2495.63	642.29	0.968
	14	3099.05	3014.71	0.951

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

C:BioF	ระยะเวลาบ่ม, วัน	Multi-Linear Regression		R^2	$k = \frac{A_2}{A}$
		A	A_2		
	28	4094.07	5337.84	0.922	1.30
	60	5209.91	8775.15	0.953	1.68
60:40	14	2917.70	2784.68	0.935	0.95
	28	3908.80	4881.14	0.919	1.25
	60	4512.54	7478.68	0.876	1.66

หมายเหตุ

1. $C/w_c = 0.1-0.4$ และ $BioF/w_c = 0 - 0.16$
2. C:BioF = ปริมาณซีเมนต์: ปริมาณเถ้าชีวมวล ในหน่วยเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรประสิทธิภาพ k ของดินคาโอไลน์ที่ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลกับเวลารวมกับการ Normalization

เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำตัวแปรประสิทธิภาพ k นี้ ไปประยุกต์ใช้งาน ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินคาโอไลน์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะบ่ม 7 ถึง 60 วัน เมื่อค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ นี้หาจากการ Interpolation และสามารถคำนวณหาค่า A และ E ได้จากสมการที่ 5.4 และ 5.5 พบว่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE เท่ากับ 17.84 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

ตารางที่ 5.3

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวคาโอไลน์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล 15 %
($LL = 42.50\%$ and $PL = 33.5\%$)

C:BioF	Time, days	w_c , %	C_i , %	$BioF$, %	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
						strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa	
								, %
100:0	7	42.50	17.00	0	1.00	856.57	802.54	6.31
	7	51.60	20.64	0	1.00	731.17	802.54	9.76
	7	50.89	14.54	0	1.00	626.82	519.00	17.20
	7	58.69	16.77	0	1.00	590.50	519.06	12.10
	7	42.50	8.50	0	1.00	262.81	306.35	16.57
	7	50.89	7.83	0	1.00	220.89	191.88	13.13
	7	51.60	6.88	0	1.00	145.21	140.95	2.93
85:15	7	43.10	10.47	1.85	1.94	579.81	618.93	6.75
	7	50.89	12.36	2.18	1.94	570.84	618.96	8.43
	7	58.69	14.25	2.52	1.94	587.52	618.94	5.35
	7	43.10	5.64	0.99	1.94	268.52	245.68	8.51
	7	50.89	6.66	1.17	1.94	218.59	245.68	12.39
	7	58.69	7.67	1.35	1.94	171.71	245.64	43.05
100:0	14	42.50	17.00	0.00	1.00	997.96	1019.37	2.15
	14	51.60	20.64	0.00	1.00	856.95	1019.37	18.95
	14	50.89	14.54	0.00	1.00	760.28	638.04	16.08

3.2 ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

จากหลักการข้างต้นเมื่อนำดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลด้วยอัตราส่วนการแทนที่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำการแก้ปัญหาด้วยวิธี Multi Linear Regression ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k แสดงดังตารางที่ 5.4 จะเห็นว่าค่าตัวแปร k ที่อัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา จากผลทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และดินกรุงเทพซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลนำความสัมพันธ์จากสมการที่ 5.3 และตัวแปร k จากตารางที่ 5.4 มาประยุกต์ได้ดังภาพที่ 5.11 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบสมการเส้นตรง และพบว่าความสัมพันธ์ของค่าคงที่ A และ E กับเวลาบนสเกลล็อกกาติฟมได้ดังสมการที่ 5.7 และ 5.8 และภาพที่ 5.12 เมื่อ D คือระยะเวลาป่ม (วัน)

$$A = 1686.86 + 439.38 \ln D \quad (5.7)$$

$$E = -235.65 + 56.95 \ln D \quad (5.8)$$

ตารางที่ 5.4

ตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลในดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

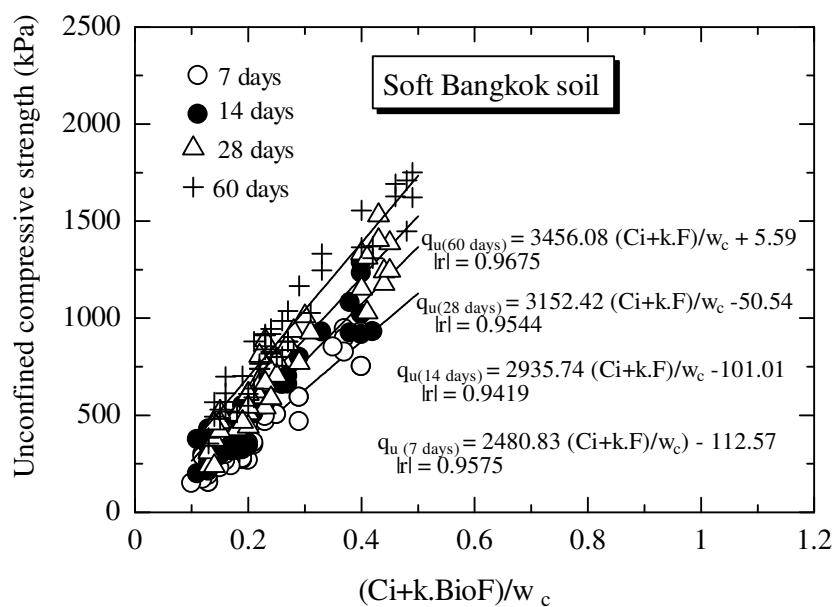
C:BioF	ระยะเวลาป่ม, วัน	Multi-Linear Regression A	Multi-Linear Regression A_2	R^2	$k = \frac{A_2}{A}$
90:10	7	2282.16	830.43	0.862	0.36
	14	3189.34	1724.46	0.916	0.54
	28	3305.52	3870.34	0.912	1.17
	60	3531.17	5479.20	0.909	1.55
80:20	7	2239.94	1528.05	0.869	0.68
	14	3036.34	3969.41	0.873	1.31
	28	3105.50	4754.69	0.913	1.53
	60	3530.86	7256.07	0.921	2.06
70:30	7	2136.29	1182.08	0.805	0.55
	14	3224.47	3189.74	0.895	0.99
	28	3223.61	4600.51	0.915	1.43

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

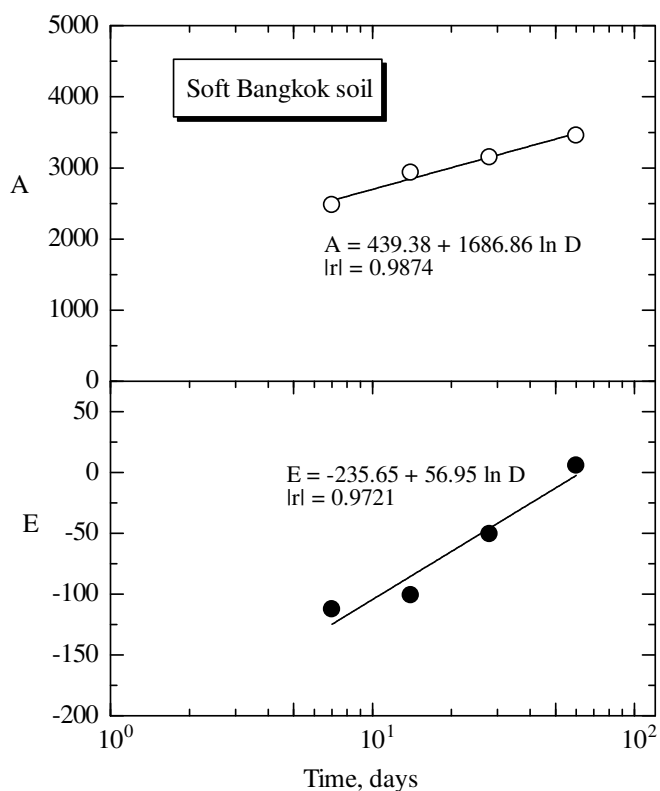
C:BioF	ระยะเวลาบ่ม, วัน	Multi-Linear Regression		R^2	$k = \frac{A_2}{A}$
		A	A_2		
	60	3774.67	6567.13	0.940	1.74
60:40	7	2008.31	654.25	0.799	0.33
	14	2966.89	1683.84	0.832	0.57
	28	3830.18	4581.51	0.917	1.20
	60	3916.82	5405.05	0.937	1.38

หมายเหตุ

1. $C/w_c = 0.08-0.4$ BioF/ $w_c = 0 - 0.16$
2. C:BioF = ปริมาณซีเมนต์: ปริมาณเถ้าชีวมวล ในหน่วยเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 5.11 กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่มต่าง ๆ

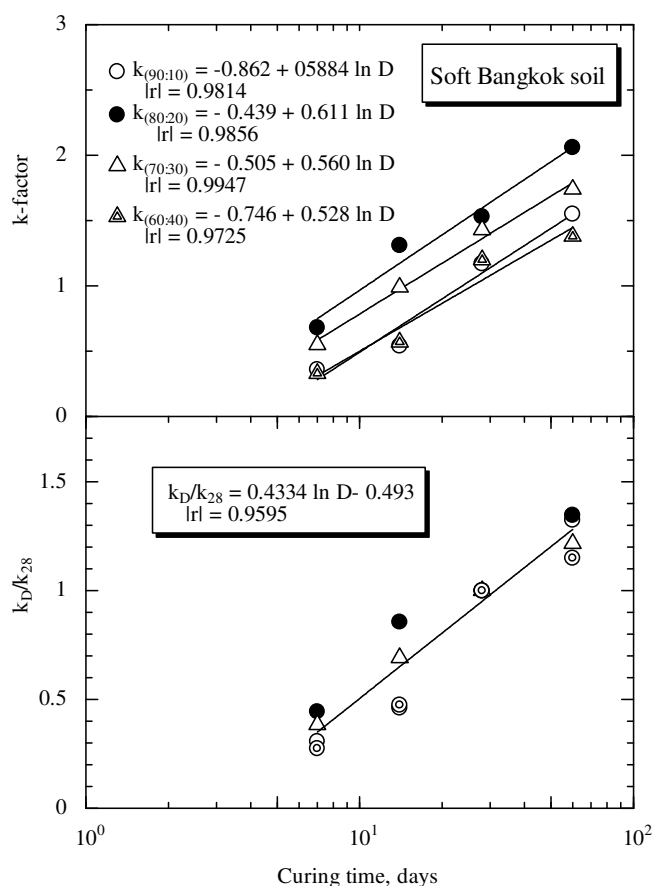


ภาพที่ 5.12 พารามิเตอร์ A และ E กับสเกลล็อกการที่มของเวลาของดินเหนียวกรุงเทพ
ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

จากตารางที่ 5.4 พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ ค่าตัวแปร k จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มดังนั้นพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรประสิทธิภาพ k กับเวลาในสเกลล็อกกาไลที่มเช่นเดียวกับในกรณีของดินคาโอไลไนท์พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังในภาพที่ 5.13 และได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized k -factor กับเวลาโดยใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นตัวอ้างอิงได้ผลดังสมการที่ 5.9

$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4334 \ln D - 0.493 \quad (5.9)$$

เมื่อ k_D คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก D วัน, k_{28} คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก 28 วัน



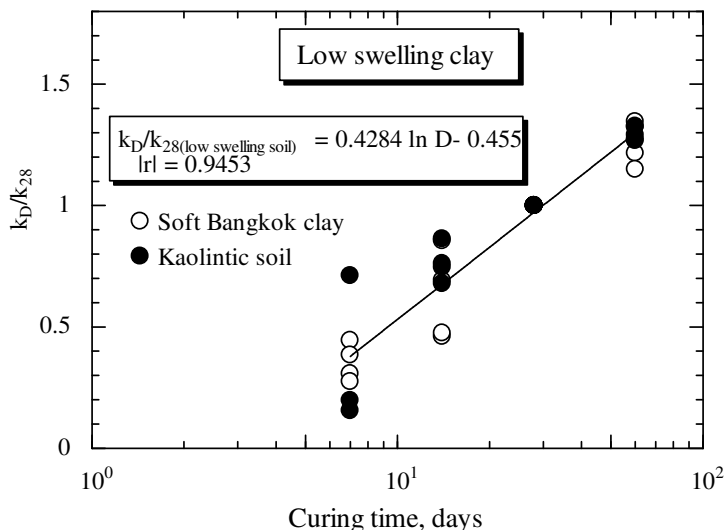
ภาพที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรประสิทธิภาพ k ของดินกรุงเทพกับเวลาร่วมกับ

Normalization

จากสมการที่ 5.6 และ 5.9 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized k -factor ของไส้ชีวมวลสำหรับดินคาโอไลน์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพกับเวลาโดยใช้ระยะเวลาปมที่ 28 วันเป็นตัวอ้างอิงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับดินบวมตัวต่ำหนึ่ง ๆ ที่แต่ละอัตราส่วนการแทนที่จะมีตัวแปรประสิทธิภาพ k ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและชนิดของไส้ล่อยทั้งนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแต่จะมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรประสิทธิภาพ k กับเวลาในสเกลล็อกกาลีที่มคงที่ ดังนั้นจากภาพที่ 5.14 ผู้เขียนขอแนะนำวิธีการทำนายค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของไส้ชีวมวลนี้สำหรับดินบวมตัวต่ำที่ระยะปมต่าง ๆ (7 – 60 วัน) เพียงทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ไส้ชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่ระยะปม 28 วันเพียงการทดสอบเดียวเท่านั้นดังสมการที่ 5.10

สำหรับดินบวมตัวต่ำ (7 – 60 วัน)

$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4284 \ln D - 0.455 \quad (5.10)$$



ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalization ของตัวแปรประสิทธิภาพ k ของดินเหนียววมตัวต่ำผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลกับเวลา

สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

จากสมการที่ 4.8 จะได้สมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ($LI = 1 - 2$ สำหรับดินบวมตัวต่ำ และ $LI = 0.6 - 1$ สำหรับดินบวมตัวสูง) ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดี่ยวที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งสมการนี้เป็นสมการสากลที่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด ผู้เขียนคาดว่าสมการที่ 4.8 สามารถประยุกต์ใช้กับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล โดยเรียกส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และเถ้าชีวมวลว่าวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ดังนั้นสมการที่ 4.8 ถูกประยุกต์และสามารถเขียนใหม่เป็น

สำหรับดินที่ครอบคลุมการบวมตัวต่ำถึงสูง (7 – 60 วัน)

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C^*)_D}}{q_{(w_c/C^*)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C^*)_{28}}{(w_c/C^*)_D} \right]^{1.40} (0.103 + 0.265 \ln D) \quad (5.11)$$

เมื่อ C^* คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$C^* = C_i + k.BioF \quad (5.12)$$

เมื่อ k คือตัวแปรประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม C_i คือปริมาณชีเมนต์ที่ใส่ในการผสม (%) และ $BioF$ คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%) และเมื่อเราสามารถทราบความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรประสิทธิภาพ k จากสมการที่ 5.10 ในกรณีของดินบวมตัวต่ำ

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.11 เราสามารถทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินชีเมนต์เถ้าชีวมวลเพียงทำการทดสอบผสมดินชีเมนต์กับเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ (10 – 40%) และที่ระยะบ่ม 28 วันเท่านั้นได้ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการช่วยทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินชีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ (7-60 วัน) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในที่นี้ผู้เขียนขอเลือกตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ 5.5 เมื่อตัวแปรประสิทธิภาพ k หาได้จากการแก้ปัญหาด้วยวิธี Multi Linear Regression ได้ผลดังในตารางที่ 5.5 และอาศัยสมการที่ 5.10 ในการหาค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่ระยะบ่มอื่น ๆ ของแต่ละอัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ ดังนั้นประยุกต์ใช้สมการที่ 5.11 ในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินชีเมนต์เถ้าชีวมวลแสดงดังในตารางที่ 5.6 ถึง 5.8 พบว่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE เท่ากับ 20.73%, 17.77% และ 15.97% สำหรับที่อายุบ่ม 7, 14 และ 60 วัน ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม และพบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะน้อยลงตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น

ตารางที่ 5.5

กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมชีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน

($LL = 92.15\%$ and $PL = 42.5\%$)

C:BioF	Time, days	w_c , %	C_i , %	$BioF$, %	k	w_c/C^*	Laboratory strength, q_{ul} kPa	Remark
100:0	28	92.15	25.00	0	1.00	3.69	866.59	Reference
	28	110.94	25.00	0	1.00	4.44	733.55	
90:10	28	92.15	22.50	2.50	1.13	3.64	934.08	
	28	110.94	22.50	2.50	1.13	4.38	684.43	
80:20	28	92.15	20.00	5.00	1.55	3.32	1009.78	
	28	110.94	20.00	5.00	1.55	4.00	786.47	

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	$BioF$	k	w_c/C^*	Laboratory	Remark
	days	, %	, %	, %			strength, q_{ul}	
							kPa	
70:30	28	92.15	17.50	7.50	1.06	3.62	926.26	
	28	110.94	17.50	7.50	1.06	4.36	703.81	
60:40	28	92.15	15.00	10.00	0.67	4.25	769.40	
	28	110.94	15.00	10.00	0.67	5.11	587.47	

หมายเหตุ - ตัวแปรประสิทธิภาพ k หาได้จากการแก้ปัญหาด้วยวิธี Multi Linear Regression

ตารางที่ 5.6

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพ ฯ ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 7 วัน

C:BioF	Time,	w_c	C_i	$BioF$	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul}	strength, q_{up}	
						kPa	kPa (Eq.5.11)	, %
100:0	7	103.00	41.20	0.00	1.00	928.54	924.68	0.42
	7	167.80	67.12	0.00	1.00	751.47	924.68	23.05
	7	110.94	31.70	0.00	1.00	593.49	577.31	2.73
	7	129.72	37.06	0.00	1.00	592.78	577.31	2.61
	7	110.94	24.99	0.00	1.00	466.81	413.78	11.36
	7	110.94	20.17	0.00	1.00	365.85	306.62	16.19
	7	129.72	19.96	0.00	1.00	305.28	242.68	20.51
	7	103.00	13.73	0.00	1.00	154.24	198.62	28.77
	7	167.80	22.37	0.00	1.00	190.02	198.62	4.52
90:10	7	103.00	37.08	4.12	0.43	944.71	851.47	9.87
	7	167.80	60.41	6.71	0.43	604.33	851.47	40.89
	7	103.00	18.54	2.06	0.43	513.50	322.65	37.17
	7	167.80	30.20	3.34	0.43	270.13	322.52	19.40
	7	103.00	12.36	1.37	0.43	299.91	182.89	39.02
	7	167.80	20.14	2.24	0.43	195.71	182.89	6.55
	7	92.15	22.50	2.50	0.43	504.04	494.43	1.91

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
	7	92.15	18.00	2.00	0.43	457.23	361.77	20.88
	7	110.94	22.50	2.50	0.43	347.32	381.31	9.78
	7	110.94	18.00	2.00	0.43	247.93	279.00	12.53
80:20	7	103.00	32.96	8.24	0.59	894.98	819.51	8.43
	7	167.80	53.70	13.42	0.59	824.55	819.51	0.61
	7	103.00	16.48	4.12	0.59	558.64	310.54	44.41
	7	167.80	26.85	6.71	0.59	278.19	310.54	11.63
	7	103.00	10.99	2.75	0.59	285.34	176.03	38.31
	7	167.80	17.90	4.47	0.59	199.94	176.03	11.96
	7	92.15	20.00	5.00	0.59	503.59	475.88	5.50
	7	92.15	16.00	4.00	0.59	456.90	348.19	23.79
	7	110.94	20.00	5.00	0.59	359.80	367.00	2.00
	7	110.94	16.00	4.00	0.59	266.36	268.53	0.81
70:30	7	103.00	28.84	12.36	0.40	851.01	700.86	17.64
	7	167.80	46.98	20.14	0.40	485.18	700.86	44.45
	7	103.00	14.42	6.18	0.40	539.03	265.58	50.73
	7	167.80	23.49	10.07	0.40	238.72	265.58	11.25
	7	103.00	9.61	4.12	0.40	327.12	150.54	53.98
	7	167.80	15.66	6.71	0.40	170.70	150.54	11.81
	7	92.15	17.50	7.50	0.40	493.63	406.98	17.56
	7	92.15	14.00	6.00	0.40	449.93	297.78	33.82
	7	110.94	17.50	7.50	0.40	357.49	313.86	12.20
	7	110.94	14.00	6.00	0.40	264.09	229.65	13.04
60:40	7	167.80	40.27	26.85	0.25	466.96	562.87	20.54
	7	103.00	12.36	8.24	0.25	553.05	213.29	61.43
	7	167.80	20.14	13.42	0.25	228.86	213.29	6.81
	7	103.00	8.24	5.49	0.25	340.15	120.90	64.46
	7	167.80	13.42	8.95	0.25	149.74	120.90	19.26

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
	7	92.15	15.00	10.00	0.25	448.07	326.85	27.06
	7	92.15	12.00	8.00	0.25	358.45	239.15	33.28
	7	110.94	15.00	10.00	0.25	297.00	252.07	15.13
	7	110.94	12.00	8.00	0.25	246.05	184.43	25.04
Mean Absolute Percent Error, MAPE ($MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$)								20.73 %

ตารางที่ 5.7

ผลทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 14 วัน

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
100:0	14	103.00	41.20	0.00	1.00	1284.92	1199.22	6.67
	14	167.80	67.12	0.00	1.00	1020.20	1199.22	17.55
	14	92.15	24.97	0.00	1.00	701.26	695.31	0.85
	14	110.94	24.99	0.00	1.00	553.30	536.63	3.01
	14	92.15	19.99	0.00	1.00	600.76	509.14	15.25
	14	103.00	20.60	0.00	1.00	352.05	454.42	29.08
	14	167.80	33.56	0.00	1.00	339.26	454.42	33.94
	14	110.94	20.17	0.00	1.00	399.55	397.66	0.47
	14	103.00	13.73	0.00	1.00	211.67	257.59	21.70
90:10	14	167.80	22.37	0.00	1.00	234.10	257.59	10.04
	14	103.00	37.08	4.12	0.76	1079.91	1159.68	7.39
	14	167.80	60.41	6.71	0.76	924.33	1159.68	25.46
	14	103.00	18.54	2.06	0.76	550.12	439.44	20.12
	14	167.80	30.20	3.34	0.76	321.64	439.15	36.53

ตารางที่ 5.7 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
	14	103.00	12.36	1.37	0.76	340.15	249.10	26.77
	14	167.80	20.14	2.24	0.76	282.96	249.10	11.97
	14	92.15	22.50	2.50	0.76	658.34	673.41	2.29
	14	92.15	18.00	2.00	0.76	597.12	492.72	17.48
	14	110.94	22.50	2.50	0.76	501.76	519.34	3.50
	14	110.94	18.00	2.00	0.76	345.05	379.99	10.13
80:20	14	103.00	32.96	8.24	1.05	929.97	1215.08	30.66
	14	103.00	16.48	4.12	1.05	593.22	460.43	22.39
	14	103.00	10.99	2.75	1.05	294.77	260.99	11.46
	14	167.80	17.90	4.47	1.05	297.98	261.00	12.41
	14	92.15	20.00	5.00	1.05	799.18	705.57	11.71
	14	92.15	16.00	4.00	1.05	682.73	516.26	24.38
	14	110.94	20.00	5.00	1.05	752.09	544.14	27.65
	14	110.94	16.00	4.00	1.05	470.46	398.14	15.37
70:30	14	103.00	28.84	12.36	0.72	1232.09	1058.71	14.07
	14	167.80	46.98	20.14	0.72	916.00	1058.71	15.58
	14	103.00	14.42	6.18	0.72	557.25	401.18	28.01
	14	167.80	23.49	10.07	0.72	346.94	401.18	15.63
	14	103.00	9.61	4.12	0.72	429.07	227.41	47.00
	14	167.80	15.66	6.71	0.72	251.05	227.41	9.42
	14	92.15	17.50	7.50	0.72	660.41	614.77	6.91
	14	92.15	14.00	6.00	0.72	612.72	449.82	26.59
	14	110.94	17.50	7.50	0.72	574.31	474.12	17.45
	14	110.94	14.00	6.00	0.72	319.56	346.91	8.56
60:40	14	103.00	24.72	16.48	0.45	928.40	848.50	8.61
	14	167.80	40.27	26.85	0.45	645.42	848.50	31.46
	14	167.80	20.14	13.42	0.45	316.27	321.52	1.66
	14	167.80	13.42	8.95	0.45	197.66	182.26	7.79

ตารางที่ 5.7 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
	14	103.00	12.36	8.24	0.45	651.84	321.52	50.67
	14	103.00	8.24	5.49	0.45	375.25	182.26	51.43
	14	92.15	15.00	10.00	0.45	555.59	492.71	11.32
	14	92.15	12.00	8.00	0.45	486.04	360.51	25.83
	14	110.94	15.00	10.00	0.45	444.88	379.98	14.59
	14	110.94	12.00	8.00	0.45	290.50	278.03	4.29
Mean Absolute Percent Error, MAPE ($MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$)								17.77 %

ตารางที่ 5.8

ผลทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 60 วัน

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
100:0	60	103.00	41.20	0.00	1.00	1555.17	1775.63	14.18
	60	167.80	67.12	0.00	1.00	1364.20	1775.63	30.16
	60	92.15	24.97	0.00	1.00	1037.35	1029.51	0.76
	60	110.94	24.99	0.00	1.00	838.70	794.57	5.26
	60	92.15	19.99	0.00	1.00	737.93	753.85	2.16
	60	103.00	20.60	0.00	1.00	549.33	672.84	22.48
	60	167.80	33.56	0.00	1.00	609.26	672.84	10.44
	60	110.94	20.17	0.00	1.00	513.51	588.79	14.66
	60	103.00	13.73	0.00	1.00	353.46	381.40	7.90
	60	167.80	22.37	0.00	1.00	383.44	381.40	0.53
90:10	60	103.00	37.08	4.12	1.47	1369.75	1893.02	38.20
	60	167.80	60.41	6.71	1.47	1308.74	1893.02	44.64

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

C:BioF	Time,	w_c	C_i	BioF	k	Laboratory	Predicted	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$
	days	, %	, %	, %	(Eq.5.10)	strength, q_{ul} kPa	strength, q_{up} kPa (Eq.5.11)	, %
	60	103.00	18.54	2.06	1.47	879.99	717.32	18.49
	60	167.80	30.20	3.34	1.47	637.91	716.46	12.31
	60	103.00	12.36	1.37	1.47	566.90	406.62	28.27
	60	167.80	20.14	2.24	1.47	492.78	406.62	17.49
	60	92.15	22.50	2.50	1.47	1165.63	1099.24	5.70
	60	92.15	18.00	2.00	1.47	917.99	804.30	12.38
	60	110.94	22.50	2.50	1.47	825.64	847.74	2.68
	60	110.94	18.00	2.00	1.47	702.31	620.28	11.68
80:20	60	103.00	32.96	8.24	2.01	1709.21	2299.16	34.52
	60	167.80	53.70	13.42	2.01	1447.69	2299.16	58.82
	60	103.00	16.48	4.12	2.01	918.37	871.22	5.13
	60	167.80	26.85	6.71	2.01	818.31	871.22	6.47
	60	103.00	10.99	2.75	2.01	698.53	493.85	29.30
	60	167.80	17.90	4.47	2.01	613.65	493.85	19.52
	60	92.15	20.00	5.00	2.01	1332.32	1335.08	0.21
	60	92.15	16.00	4.00	2.01	985.82	976.86	0.91
	60	110.94	20.00	5.00	2.01	880.28	1029.62	16.97
	60	110.94	16.00	4.00	2.01	764.99	753.36	1.52
70:30	60	103.00	28.84	12.36	1.38	1750.73	2062.97	17.83
	60	167.80	46.98	20.14	1.38	1621.84	2062.97	27.20
	60	103.00	14.42	6.18	1.38	1112.96	781.72	29.76
	60	167.80	23.49	10.07	1.38	945.03	781.72	17.28
	60	103.00	9.61	4.12	1.38	567.65	443.12	21.94
	60	167.80	15.66	6.71	1.38	519.42	443.12	14.69
	60	92.15	17.50	7.50	1.38	1246.36	1197.93	3.89
	60	92.15	14.00	6.00	1.38	877.75	876.51	0.14
	60	110.94	17.50	7.50	1.38	835.99	923.85	10.51
	60	110.94	14.00	6.00	1.38	739.58	675.97	8.60

