

การใช้รังสีแกมมาเหนี่ยวนำในกระบวนการแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน เพื่อปรับปรุงพื้นผิวซิลิกา

นริศรา อยู่ประเสริฐ¹ สลักจิต บัวทอง¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

พิริยาร สุวรรณมาลา² เกศินี เหมวิเชียร²

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ถนนวิภาวดีรังสิต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

กมลวรรณ ธรรมเจริญ³ และ ธีราวุธ พงศ์ประยูร^{3*}

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

รับเมื่อ 7 มีนาคม 2551 ตอรับเมื่อ 16 มกราคม 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักในการปรับปรุงพื้นผิวซิลิกา โดยการนำรังสีแกมมามาประยุกต์ใช้เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน โดยทำการทดลองในระบบของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ซึ่งมีไอโซพรีนเป็นมอนอเมอร์สำหรับการสร้างพอลิไอโซพรีนฟิล์มภายในชั้นของ CTAB ที่ถูกดูดซับบนผิวซิลิกา ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณพอลิไอโซพรีนฟิล์มที่เคลือบบนผิวซิลิกา การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) และการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า รังสีแกมมาสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างฟิล์มพอลิเมอริบนผิวซิลิกาได้ โดยมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบใช้ความร้อน เนื่องจากไม่ต้องอาศัยตัวริเริ่ม ใช้เวลาน้อยกว่า และเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มในปริมาณที่สูงกว่า

คำสำคัญ : ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว / แอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน / รังสีแกมมา / โพลีไอโซพรีน

* ผู้เขียนที่รับผิดชอบ; e-mail: tpongprayoon@yahoo.com , thp@kmitnb.ac.th

1 นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 นักวิจัย กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์

3 นักวิจัย

γ -ray Induced Admicellar Polymerization for Silica Surface Modification

Narissara Yooprasert¹, Salukjit Buathong¹,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800 Thailand

Phiriyatorn Suwanmala², Kasinee Hemvichian²,

Thailand Institute of Nuclear Technology

(Public Organization), Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, Bangkok 10900 Thailand

Gamolwan Tumcharern³, and Thirawudh Pongprayoon^{3*}

National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency,
Patumthanee 12120 Thailand

Received 7 March 2008 ; accepted 16 January 2009

Abstract

The objective of this study is to modify silica surface by radiation-induced admicellar polymerization. The experiment was carried out in the aqueous solution of cetyl trimethylammonium bromide (CTAB). Isoprene monomer was used for forming polyisoprene film inside the template of CTAB adsorbed on silica surface. The amount of polyisoprene film formed on silica was analyzed by measuring the weight loss during thermal degradation. The modified silica was also characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and Scanning Electron Microscope (SEM). From the results, gamma radiation was proved to be a more effective technique to induce admicellar polymerization, compared with thermal process, since this convenient technique requires no initiators, takes shorter time, yields more film formation.

Keywords : Modified Silica / Admicellar Polymerization / Gamma Radiation / Polyisoprene

* Corresponding author; e-mail: tpongprayoon@yahoo.com , thp@kmitnb.ac.th

¹ Graduate Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

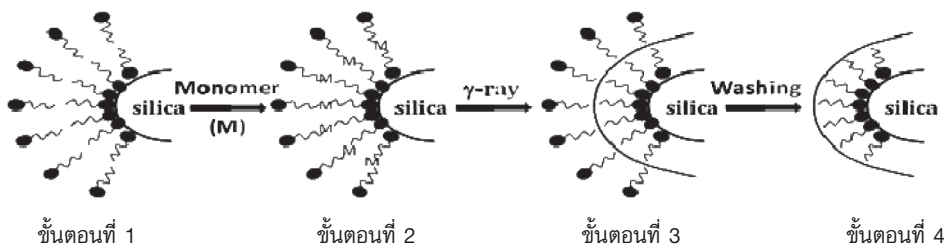
² Researcher, Research and Development Group.

³ Researcher.

1. บทนำ

เทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน (Admicellar polymerization) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ โดยการเคลือบพื้นผิววัสดุด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ที่บางในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวของวัสดุภายในชั้นของสารลดแรงตึงผิว เทคนิคดังกล่าวมีการเผยแพร่ครั้งแรกโดย Wu และคณะเมื่อปี ค.ศ. 1987 [1] กระบวนการของเทคนิคนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ การเกิดแอตโมเซลลาร์พอลิเมอร์ของวัสดุที่ต้องการปรับปรุง (Admicelle formation) การละลายของมอนอเมอร์ไปในชั้นของแอตโมเซลลาร์ (Adsolubilization) การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของมอนอเมอร์ที่

ละลายอยู่ในชั้นแอตโมเซลลาร์ และการล้างสารลดแรงตึงผิวชั้นนอกออกเพื่อให้ปรากฏฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนผิววัสดุ (Surfactant removal) งานวิจัยนี้นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้สำหรับปรับปรุงผิวซิลิกา โดยเลือกสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไอโซพรีนบนผิวซิลิกา เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างผิวซิลิกากับยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง (Filler) ให้ดีขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการทางรังสี (Radiation processing) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์ รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีแกมมา



รูปที่ 1 ขั้นตอนของกระบวนการแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีแกมมา เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงผิวซิลิกา

การปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcement) ในพอลิเมอร์และยาง เนื่องจากโดยธรรมชาติพื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ซิลอกเซน [SiOR_2]_n และซิลานอล [R_3SiOH] ที่มีความเป็นกรดและมีสถานะเป็นขั้ว ทำให้มีความเข้ากันได้กับเนื้อพอลิเมอร์หรือยางไม่ดีเท่าที่ควร การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิจัยในการนำมาประยุกต์ใช้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเลือกใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ทั้งโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) หรือโคพอลิเมอร์ (Copolymer) เช่น โคพอลิเมอร์ของสไตรีน-บิวตาไดอีน (Styrene-butadiene copolymer) หรือ โคพอลิเมอร์ของสไตรีน-ไอโซพรีน (Styrene-isoprene copolymer) [1-6] เป็นต้น แต่งานวิจัยดังกล่าว

ข้างต้นใช้ความร้อนและตัวริเริ่มปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดฟิล์มพอลิเมอร์ งานวิจัยนี้จึงนับได้ว่าเป็นงานวิจัยแรก ที่นำรังสีแกมมา มาประยุกต์ใช้ในการเหนี่ยวนำปฏิกิริยาแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มบางของพอลิไอโซพรีนเคลือบบนผิวซิลิกา ซึ่งฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนี้มีความหนาในระดับนาโนเมตร โดยเทคนิคนี้สามารถรักษาคุณสมบัติโดยรวมของซิลิกาให้ยังคงอยู่ แต่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะคุณสมบัติของผิวซิลิกา ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงผิวซิลิกาโดยอาศัยกระบวนการแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน มักใช้สารเคมีเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา [1-6] โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดฟิล์มพอลิเมอร์แตกต่างกัน และมีผลต่ออัตราส่วนของมอนอเมอร์กับตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งควบคุมได้ยาก นอกจากนี้ตัวริเริ่มที่เหลื่อ

จากการทำปฏิกิริยาจะเป็นสารเคมีตกค้างที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้รังสีแกมมาในการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแทนการใช้ตัวริเริ่มที่เป็นสารเคมีทำให้ไม่มีสารตกค้างและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้กว้างขวางมากขึ้น นอกจากนี้ขั้นตอนการริเริ่มปฏิกิริยาไม่ต้องใช้ความร้อนสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิต ประยุกต์ใช้ได้กับตัวอย่างในทุกสถานะ (ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) นอกจากนี้แล้วการใช้รังสีแกมมาในกระบวนการแอดไมเซลล์ลาร์พอลิเมอไรเซชัน จะทำให้เกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์บนผิวซิลิกาที่ดีเนื่องจากรังสีแกมมามีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ตัวอย่างงานวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยรังสีแกมมา ได้แก่ การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลฟูมาเรท [7] พอลิไอโซพรีน [8] พอลิไวนิลคลอไรด์ [9] พอลิบิวตาไพนีน [10] พอลิเมทิลเมทาโครเลท และ พอลิบิวทิวเมทาโครเลท [11] เป็นต้น

กลไกของการปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีแกมมา คล้ายคลึงกับกลไกของการใช้ความร้อนโดยทั่วไป โดยประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนริเริ่มของปฏิกิริยา (Initiation) ขั้นตอนการสร้างสายโซ่ (Propagation) และขั้นตอนการสิ้นสุดการสร้างสายโซ่ (Termination) โดยรังสีแกมมาทำให้เกิดการแตกของพันธะคู่ของมอนอเมอร์ (Monomer) เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก โดยไม่ต้องใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยในการศึกษานี้จะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณรังสี (Total dose) ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา รังสีแกมมาที่ใช้ได้มาจากการสลายตัวของโคบอล-60 (Co-60) ซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 10-13 นาโนเมตร (สั้นกว่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์) ทำให้คลื่นมีความถี่สูงและให้พลังงานสูงด้วย จึงมีประสิทธิภาพที่ดีในการเหนี่ยวนำให้พันธะเคมีของสารเกิดการแตกตัว ดังนั้นนอกจากรังสีแกมมาจะช่วยในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แล้ว ในขณะเดียวกันการใช้ปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลให้พอลิเมอร์ที่สร้างขึ้นเกิดสลายตัวได้เช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการใช้รังสีแกมมาควบคู่ไปกับการใช้วิธีความร้อน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองระบบ โดยในการศึกษาได้ทำการศึกษาหา

สภาวะที่ดีที่สุดของระบบที่ใช้ความร้อนก่อน แล้วนำสภาวะที่ได้จากระบบความร้อนมาปรับใช้กับระบบที่ใช้รังสีแกมมา เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของระบบที่ใช้รังสีแกมมาอีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้รังสีแกมมา เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ความร้อน เพราะนอกจากจะสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ แล้ว ยังสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาแอดไมเซลล์ลาร์พอลิเมอไรเซชันได้ โดยทำให้เกิดฟิล์มพอลิเมอร์ในปริมาณที่มากกว่าระบบที่ใช้ความร้อนอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง

ซิลิกา Hi-Sil®233 จากบริษัทสยามซิลิกา ประเทศไทย (Siam Silica Co., Ltd.) เซทิลไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethylammonium bromide ; CTAB) ไอโซพรีน (Isoprene) และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) จากบริษัท Fluka เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran) จากบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel บริษัท MDS Nordian ประเทศแคนาดา เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (FT-IR) รุ่น Spectrum 2000 บริษัท Perkin Elmer กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM 6400 บริษัท Jeol

2.2 แอดไมเซลล์ลาร์พอลิเมอไรเซชันโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาและรังสีแกมมา

2.2.1 แอดไมเซลล์ลาร์พอลิเมอไรเซชันโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา

นำ CTAB 0.4 กรัม มาละลายในน้ำกลั่น 100 มล. และปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ให้มีค่าประมาณ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นำซิลิกา 2.5 กรัม ใส่ลงในสารละลาย CTAB ที่เตรียมได้โดยกวนอย่างสม่ำเสมอ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่น 2.3 มล. และเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและไอโซพรีน ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นกวนสารละลายให้เข้ากันอย่างช้าๆ และให้ความ

ร้อนแก่ระบบเพื่อให้ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน หลังการเกิดปฏิกิริยาแล้วกรองแยกซิลิกา และล้างด้วยน้ำกลั่นจน

กระทั่งฟองที่เกิดจาก CTAB หหมด แล้วนำซิลิกาที่ได้ไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำซิลิกาที่ได้ไปวิเคราะห์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนสารเคมีของระบบที่ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของตัวริเริ่มปฏิกิริยา:ไอโซพรีน = 1:10

ซิลิกา (กรัม)	CTAB (กรัม)	เอทานอล (มล.)	K ₂ S ₂ O ₈ (กรัม)	อัตราส่วนเชิงโมล CTAB:Isoprene
2.5	0.4	2.3	0.05	1:2
2.5	0.4	2.3	0.10	1:4
2.5	0.4	2.3	0.15	1:6
2.5	0.4	2.3	0.20	1:8
2.5	0.4	2.3	0.25	1:10
2.5	0.4	2.3	0.30	1:12
2.5	0.4	2.3	0.35	1:14
2.5	0.4	2.3	0.40	1:16

2.2.2 แอดโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้รังสีแกมมา

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2.2.1 แต่ไม่เติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และฉายรังสีแกมมาแทนการให้ความร้อนที่ปริมาณรังสีต่างๆ (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 กิโลเกรย์) ที่อัตราการเปล่งรังสีเท่ากับ 0.17 กิโลเกรย์ต่อนาที เพื่อหาปริมาณรังสีที่เหมาะสม หลังจากนั้นทำการล้างและอบแห้งแบบเดียวกับข้อ 2.2.1

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณการเกิดฟิล์ม

นำซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิคแอดโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชันมาวิเคราะห์ด้วยการเผาฟิล์มพอลิเมอร์ออก หาน้ำหนักที่หายไปจากการเผา โดยนำซิลิกา 1 กรัม ใส่ในถ้วยเซรามิกส์ (Crucible) นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักหลังจากการเผา และคำนวณโดยใช้การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปดังสมการที่ (1) นำค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปจากการเผาซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวเทียบกับปริมาณซิลิกาที่ใช้ทั้งหมดในการปรับปรุงผิว เพื่อหาปริมาณฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยหาปริมาณ

ฟิล์มที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (2) และหาร้อยละของการเกิดฟิล์มพอลิไอโซพรีน ดังสมการที่ (3)

$$A = \frac{(B - C) \times 100}{B} \quad (1)$$

$$E = \frac{A \times D}{100} \quad (2)$$

$$F = \frac{E \times 100}{G} \quad (3)$$

- A คือ % น้ำหนักที่หายไป
 B คือ น้ำหนักซิลิกาก่อนเผา
 C คือ น้ำหนักซิลิกาหลังเผา
 D คือ น้ำหนักซิลิกาในการทดลอง
 E คือ ปริมาณฟิล์ม
 F คือ %การเกิดฟิล์ม
 G คือ ปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้

2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิไอโซพรีนฟิล์ม ด้วย FT-IR

นำซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชันทั้งแบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาและฉายรังสีมาวิเคราะห์ด้วย FT-IR โดยเทคนิคการเตรียมสารตัวอย่างแบบ KBr Pellet แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนผิวซิลิกา เพื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและพอลิไอโซพรีนที่สังเคราะห์ขึ้น

2.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและปริมาณคาร์บอนบนผิวซิลิกาด้วย SEM

นำซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชันทั้งแบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาและฉายรังสี และซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านปรับปรุงผิว มาวิเคราะห์สภาพพื้นผิวและหาปริมาณคาร์บอนบนผิวซิลิกาด้วย SEM โดยการเตรียมซิลิกานบนแผ่นทองเหลืองเพื่อทำการเคลือบทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

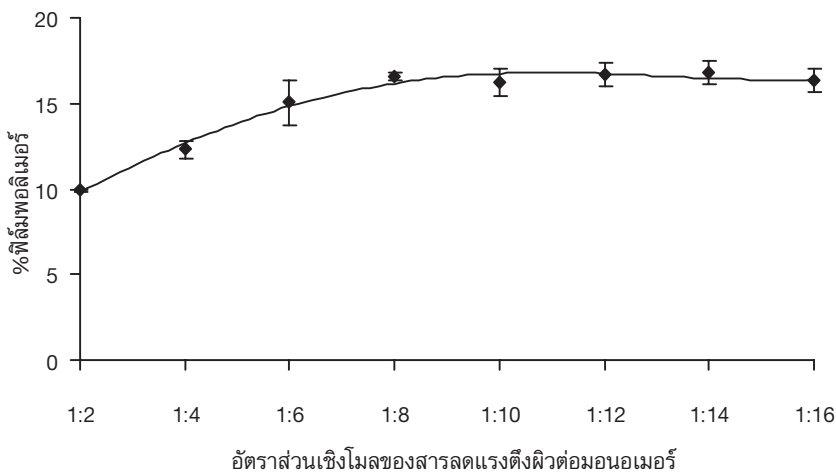
3. ผลการทดลอง

3.1 อัตราส่วนเชิงโมลที่เหมาะสมของ

CTAB:Isoprene ศึกษาด้วยระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยา

จากการศึกษาการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชัน ด้วยระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ CTAB:Isoprene ตามสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงในตารางที่ 1 แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาเพื่อหาปริมาณฟิล์มของพอลิไอโซพรีนที่เคลือบผิวซิลิกา โดยคำนวณจากน้ำหนักที่หายไป ดังสมการที่ (1) ถึง (3)

รูปที่ 2 แสดงผลการศึกษาผลของปริมาณไอโซพรีนมอนอเมอร์ที่มีต่อการสร้างฟิล์ม โดยใช้อัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อไอโซพรีนมอนอเมอร์ที่ 1:10 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการเกิดฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไอโซพรีนมอนอเมอร์ และจะเริ่มคงที่เมื่อใช้ไอโซพรีนตั้งแต่อัตราส่วนของ CTAB:Isoprene ที่ 1:8 แสดงว่าที่สภาวะนี้ทำให้การเกิดฟิล์มเริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ดังนั้นที่สภาวะ CTAB:Isoprene เท่ากับ 1:8 เป็นสภาวะที่เหมาะสม และในการศึกษาผลของปริมาณการรับรังสีแกมมา จะใช้สภาวะนี้เป็นสภาวะควบคุมในการศึกษา

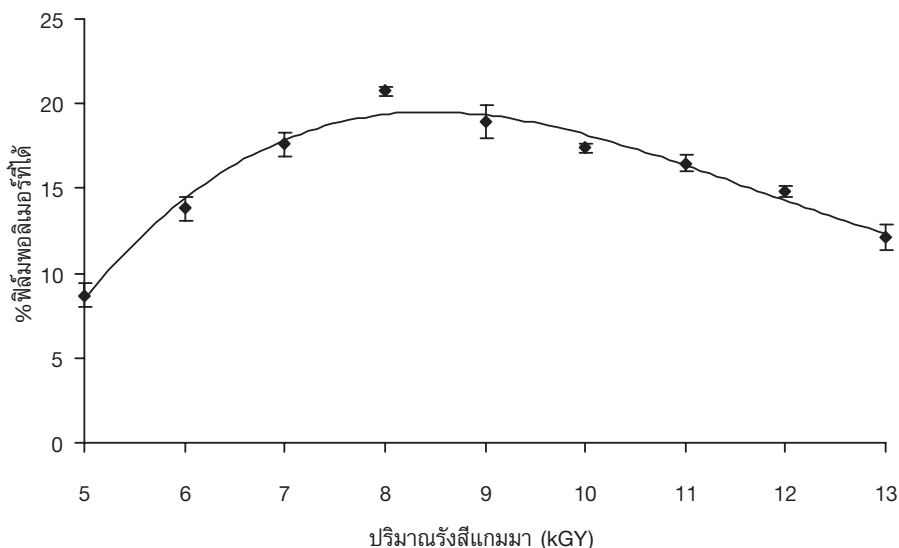


รูปที่ 2 ผลของอัตราส่วน CTAB:Isoprene ต่อการเกิดฟิล์ม จากการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชัน ในระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยา

3.2 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์

การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอร์โรเซชัน โดยการใช้รังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิด

ปฏิกิริยาทำการศึกษาภายใต้สภาวะควบคุมที่ CTAB:Isoprene เท่ากับ 1:8 และหาผลของปริมาณรังสีแกมมา ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 3



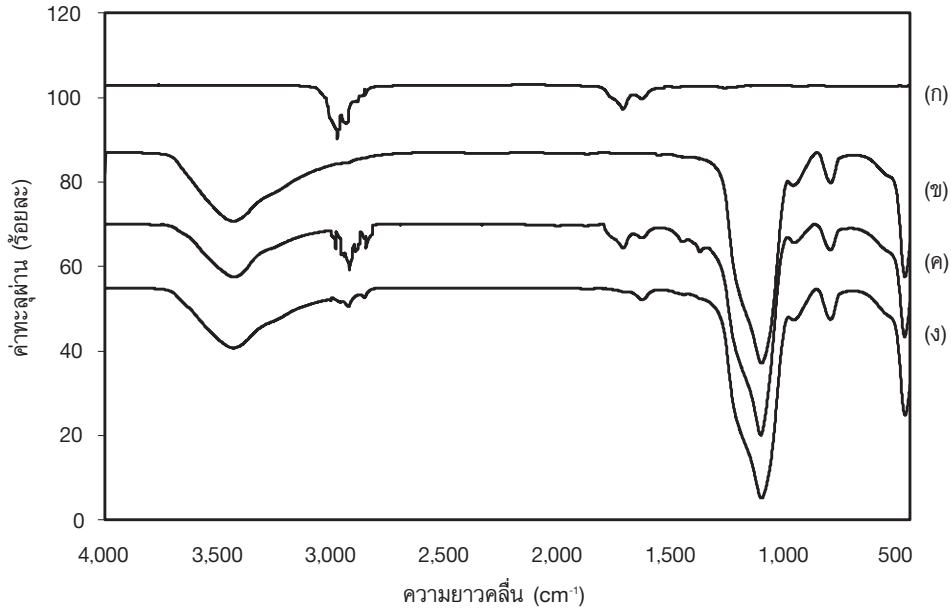
รูปที่ 3 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อการเกิดฟิล์ม จากการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอร์โรเซชัน ในระบบที่ใช้รังสี

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอร์โรเซชันโดยใช้รังสีแกมมาเป็นตัวเหนี่ยวนำ จะมีปริมาณการเกิดฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น จนถึงที่ปริมาณการรับรังสีที่ 8 กิโลเกรย์จะให้ค่าการสร้างฟิล์มสูงสุด และหลังจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีขึ้นจะทำให้ปริมาณฟิล์มลดลง เพราะที่ปริมาณรังสีสูงขึ้นการเกิดอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์ไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลในระบบมากขึ้น มีผลให้เกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาได้มากและเร็วขึ้น ทำให้ปริมาณการเกิดฟิล์มลดลง และปริมาณรังสีที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นที่ปริมาณรังสี

สูงกว่า 8 กิโลเกรย์จึงมีผลทำให้ปริมาณฟิล์มลดลงไปเรื่อยๆ ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุดควรใช้ที่สภาวะของ CTAB:ไอโซพรีน เท่ากับ 1:8 คือ 8 กิโลเกรย์

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติฟิล์มพอลิไอโซพรีนด้วย FT-IR

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึง FT-IR spectra ของพื้นผิวของซิลิกาที่ได้จากการทดลองทั้งสองระบบ โดยเปรียบเทียบกับ FT-IR spectra ของพอลิไอโซพรีนสังเคราะห์ และซิลิกาที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว เพื่อเป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของฟิล์มที่เคลือบผิวซิลิกา



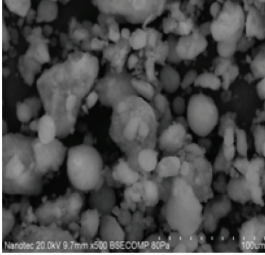
รูปที่ 4 สเปกตรัม FT-IR ของ ก) พอลิไอโซพรีนสังเคราะห์
 ข) ซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว
 ค) ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว ด้วยระบบรังสีแกมมา
 และ ง) ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยระบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา

รูปที่ 4 ก) แสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของ คาร์บอนพันธะคู่ (C=C) ที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,600\text{ cm}^{-1}$ และลักษณะเฉพาะของ CH_2 Stretching Vibration ที่ความยาวคลื่นประมาณ $2,700\text{-}2,900\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของพอลิไอโซพรีน ในขณะที่ซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวดังรูปที่ 4 ข) แสดงลักษณะเฉพาะที่ความยาวคลื่น $3,430\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) และ $1,100\text{-}1,200\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ซิลินอล (Si-O₂) และเมื่อพิจารณา ลักษณะเฉพาะของซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอดไมเซลลาร์พอลิเมอโรเซชันทั้งระบบที่ใช้ความร้อน (รูปที่ 4 ง) และรังสีแกมมา (รูปที่ 4 ค) ซึ่งให้ลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกัน ที่ความยาวคลื่น $1,600\text{ cm}^{-1}$ และ $2,700\text{-}2,900\text{ cm}^{-1}$ ที่

เป็นของพอลิไอโซพรีน และที่ความยาวคลื่น $3,430\text{ cm}^{-1}$ และ $1,100\text{-}1,200\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นของซิลิกา ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีฟิล์มของพอลิไอโซพรีนเคลือบบนผิวซิลิกา

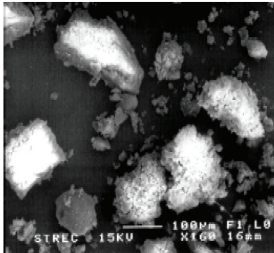
3.4 การศึกษาสภาพพื้นผิวและวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนด้วย SEM

การเปรียบเทียบสภาพพื้นผิวของซิลิกาที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคแอดไมเซลลาร์พอลิเมอโรเซชัน ทั้งที่ใช้ระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยา และรังสีแกมมาจากภาพ SEM พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนบนพื้นผิวด้วยเทคนิค EDS แสดงดังรูปที่ 5 โดยใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากสภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละระบบ



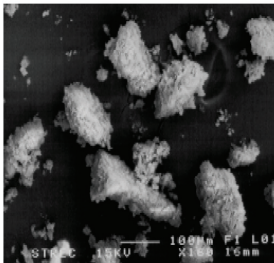
Element	Weight %
O E	54.88
Si E	45.12
Total	100.00

(ก)



Element	Weight %
C E	16.55
O E	49.16
Si E	34.29
Total	100.00

(ข)



Element	Weight %
C E	22.97
O E	38.47
Si E	38.56
Total	100.00

(ค)

รูปที่ 5 ภาพฉาย SEM และผลวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวด้วย EDS ของ

ก) ซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว

ข) ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยระบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ ค) ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยระบบที่ใช้รังสีแกมมา

ภาพ SEM ของซิลิกาเปรียบเทียบระหว่างที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอดไมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันทั้งสองระบบ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนว่า ซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิวจะมีลักษณะผิวที่ค่อนข้างเรียบ ในขณะที่ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวทั้งสองระบบจะมีลักษณะผิวของซิลิกาที่ขรุขระซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว และเมื่อ

พิจารณาถึงองค์ประกอบที่พื้นผิวของซิลิกาทั้งสองแบบพบว่าซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิวนั้นไม่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ แต่สำหรับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว นอกจากจะมี Si และ O เป็นส่วนประกอบแล้ว ยังมี C เป็นส่วนประกอบที่เพิ่มขึ้นมา โดยระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยามีร้อยละของคาร์บอนเท่ากับ 16.55 ในขณะที่ระบบรังสีมีร้อยละของคาร์บอนสูงถึง 22.97 ซึ่งผลของค่าร้อยละของคาร์บอนที่ได้นี้ สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มโดยการเผา

3.5 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และรังสีแกมมา

จากการศึกษาการเกิดฟิล์มจากการเผาและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอดไมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันทั้งที่ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาและรังสีแกมมา โดยเลือกตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนของ CTAB:isoprene เท่ากับ 1:8 ทั้งสองระบบ และฉายรังสีแกมมา 8 กิโลเกรย์สำหรับระบบใช้รังสีแกมมา พบว่าระบบที่ใช้รังสีแกมมาให้ปริมาณฟิล์มมากกว่าประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งให้ค่าเช่นเดียวกันจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี ดังผลที่สรุปให้เห็นในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลของการใช้ความร้อนและรังสีแกมมา

ระบบที่ใช้	% การสร้างฟิล์ม	% คาร์บอนบนผิว
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	38.81	16.55
รังสีแกมมา	53.91	22.97

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาการใช้รังสีแกมมา เพื่อปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอดไมเซลลาร์ พอลิเมอไรเซชันแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ที่สภาวะเดียวกันของอัตราส่วนของ CTAB:isoprene การใช้รังสีแกมมาสามารถสร้างฟิล์มพอลิไอโซพรีนได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยา แต่การใช้รังสีแกมมาต้องใช้ในปริมาณที่

เหมาะสม เพราะหากใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดการสลายตัวของฟิล์ม ทำให้ปริมาณฟิล์มลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ NN-B-22-m36-22-49-53 ได้รับความร่วมมือในการใช้เครื่องฉายรังสี จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ และได้รับการอนุเคราะห์ซิลิกาจากบริษัท โตกุยามา สยามซิลิกา จำกัด นอกจากนี้ยังได้รับทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ตามสัญญาสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) เลขที่ TG-55-21-49-056M แก่ นางสาวนริศรา อยู่ประเสริฐ

6. เอกสารอ้างอิง

1. Wu, J., Harwell, J.H., and O'Rear, E. A., 1987, "Two-dimensional Solvents: Kinetics of Styrene Polymerization in Admicelles at or Near Saturation", *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 91, pp. 623-634.
2. Thammathadanukul V., O'Haver, J.H., Harwell, J.H., Osuwan S., Na-Ranong, N and Waddell W. H., 1996, "Comparison of Rubber Reinforcement Using Various Surface Modified Silica", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, No. 1, pp. 1741-1750.
3. Nontasorn P., Chavadej P., Rangsunvigit P., O'Haver J.H., Chaisirimahamorakot S., and Na-Ranong N., 2005, "Admicellar Polymerization Modified Silica Via a Continuous Stirred Tank Reactor System: Comparative Properties of Rubber Compounding", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 108, pp. 213-218.
4. Kitiyanan, B., O'Haver, J.H., Harwell, J.H., and Osuwan, S., 1996, "Adsorbilization of Styrene and Isoprene into Cetyltrimethyl Ammonium Bromide Admicelle on Precipitated Silica", *Langmuir*, Vol. 12, pp. 2162-2168.
5. Waddell, W.H., O'Haver, J.H., Evans, L.R. and Harwell, J.H., 1995, "Organic Polymer-surface Modified Precipitated Silica", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 55, pp. 1627-1641.
6. O'Haver, J.H., Harwell, J.H., Waddell, W.H., and Snodgrass, L.J., 1996, "Polar Copolymer-surface-modified Precipitated Silica", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, No. 9, pp. 1427-1435.
7. Haroun, A. 2005, "Radiation Polymerization of Diethyl Fumarate", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 73, No. 1, pp. 61-63.
8. Cataldo, F., Ursini, O., and Lilla, E., 2006, "Radiation Induced Polymerization of Isoprene: A Spectroscopic Study", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, (in press).
9. Hayakawa, K., Kawase, K., and Matsuda, T., 1965, "Gamma-ray-induced Polymerization of Some Vinyltin Compounds", *Nature*, Vol. 206, pp. 1038 - 1039.
10. Cataldo, F., Ursinib, O., Lillab, E., and Angelinib, G., 2005, "Radiation-induced Polymerization and Grafting of β (-)-pinene on Silica Surface," *Radiation Physics and Chemistry*, (in press).
11. Yaodong, L., Wu, G., Long, D., Qi, M., and Zhu, Z., 2005, " ^{60}Co γ -irradiation Initiated Polymerization in Ionic Liquids - The Effect of Carbon-Chain Length of Monomer", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 236, pp. 443-448.

ตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลในดินเหนียว บวมตัวต่ำผสมซีเมนต์

วีรยา ฉิมอ้อย¹

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) คลองหลวง ปทุมธานี 12121

และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

รับเมื่อ 6 ตุลาคม 2551 ตอรับเมื่อ 22 มกราคม 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยหลักการทางเคมี โดยนำเสนอความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชีวมวลในดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบคือดินคาโอลินีท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปริมาณเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการแทนที่เท่ากับร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และหาค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การศึกษานี้พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน สำหรับเถ้าชีวมวลนี้และพบว่าตัวแปรหลักที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมที่ใช้, w_p/C^* ปริมาณส่วนผสมที่ใช้เท่ากับผลรวมของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม, C_i และปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า, C_e เมื่อ C_e คือผลคูณของตัวแปรประสิทธิภาพ (k) กับปริมาณเถ้าชีวมวล, F ที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเท่ากับ $k.F$ และตัวแปรประสิทธิภาพ (k) นี้หมายถึงความสามารถของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าตัวแปรประสิทธิภาพของการแทนที่ขึ้นกับอัตราส่วนการแทนที่และระยะเวลาบ่มโดยไม่มีขึ้นกับปริมาณส่วนผสมบวมตัวต่ำนี้ได้นำเสนอวิธีการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลสำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำโดยประยุกต์ใช้ตัวแปรประสิทธิภาพซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายเพื่อเป็นแนวทางช่วยในการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลกับดินที่มีการบวมตัวต่ำชนิดอื่นๆ ต่อไป

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

The Replacing Efficiency Factor of Biomass Ash for Cement Stabilized Low Swelling Clay

Weeraya Chim-oye ¹

Thammasart University, (Rangsit Center), Khong Luang, Pathum Thane 12120.

and Runglawan Rachan ²

Mahanakorn University, Nong Chok, Bangkok 10530.

Received 6 October 2008 ; accepted 22 January 2009

Abstract

This research studied the soil improvement with the concepts of chemical ground improvement technique on soft clay. The main objective of this study was to present the possibility of utilizing biomass ash to partially replace Type I Portland cement for stabilization of a low swelling clay. The kaolinitic soil and soft Bangkok clay in this study are represented the low swelling clay. Type I Portland cement was used as a main stabilizer and biomass ash was partially replaced with 10-40 % by weight of cement. The compressive strengths were investigated through unconfined compression test. For this experimental result, strength of the stabilized clay, the 20% biomass ash replacement produces the highest strength between 14 – 60 days of curing. It is found that the prime parameter controlling the strength of cement-biomass ash stabilized clay is the clay-water/blended cement ratio, w/C^* . The binder content of the blended cement, C^* is the summation of the input of cement, C_i and the equivalent cement, C_e . The C_e is determined based on the concept of an efficiency factor (k), which is adopted as a measure of the relative performance of supplementary cementing material compared with Type I Portland cement. The C_e is equivalent to $k.F$ where F is biomass ash content and k is efficiency factor. From the analysis, the value of k is dependent upon the replacement ratio and curing time, and irrespective of binder content and water content. A phenomenological model for assessing the strength development is introduced and verified. It can possibly be applied as a simple and rational tool for predicting the other blended cement stabilized low swelling clays.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพดินส่วนใหญ่จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อน ซึ่งในปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อนมีอยู่หลายวิธี การปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/Cementing agents) หรือวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method, DMM) เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ การออกแบบ Cement column จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement column เช่นเดียวกับการออกแบบงานคอนกรีต ต้องรู้คุณสมบัติของคอนกรีตซึ่งได้จากการออกแบบส่วนผสม (Mix design) เนื่องจากวัสดุต่างๆ ที่นำมาผสมคอนกรีตสามารถเลือกได้ แต่วัสดุที่จะนำมาทำ Cement column นั้น ไม่สามารถเลือกได้ เพราะเป็นการผสมในที่ และดินแต่ละที่ก็มีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องมีการทำ Trial mix กับทุกที่ เพื่อให้ได้กำลังตามต้องการ ดังนั้นการเลือกใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement column สำหรับดินเหนียวอ่อนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาณมากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง จำเป็นต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลานที่มีราคาต่ำ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอชโซลานในอัตราส่วนที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังอัดแล้วยังช่วยเพิ่มความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์ด้วยวัสดุปอชโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ แต่ถ้ามีการนำวัสดุเหลือใช้ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์มาช่วยทดแทนปูนซีเมนต์ดังกล่าวก็จะช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรที่เหลืออยู่น้อยได้อีกวิธีหนึ่ง นอกจากการใช้เถ้าลอยและปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังและเสถียรภาพของดินอ่อนแล้วยังสามารถช่วยในกระบวนการบำบัดของเสียอันตราย ซึ่งการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งเป็นอีกวิธีในการบำบัดของเสีย โดยอาศัยการยึดเชื่อมประสานทำให้ของ

เสียยึดติดกันเป็นก้อน (Solidification) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการปรับปรุงดินวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมทั้งในด้านงบประมาณและสิ่งแวดล้อม จากปัญหาและเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาการนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ในงานดินให้มากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องทราบศักยภาพของวัสดุแทนที่ (เถ้าลอย)

ทุกๆ ปีถ่านหิน (Coal) จำนวนมากที่ถูกเผาไหม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้า (Electric power plant) อาทิเช่น ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีการใช้ถ่านหินประมาณวันละ 40,000 ตัน ผลผลิตพลอยได้จากการเผาถ่านหินเหล่านี้ก็คือเถ้าลอย (Fly ash) ที่มากถึงวันละ 8,000 ตัน [1] และยังมีเถ้าอีกประเภทหนึ่งซึ่งได้จากการเผาไหม้วัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติซึ่งเรียกว่า เถ้าชีวมวล (Biomass ash) ซึ่งเถ้าเหล่านี้จัดเป็นขยะที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตและได้สร้างปัญหาในการหาวิธีทำลาย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและการแทนที่ในซีเมนต์ทำให้ราคาคอนกรีตถูกลง [2] แต่การนำไปใช้ในงานดินยังไม่เป็นที่นิยมอาจเนื่องมาจากการขาดแหล่งข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์นั่นเอง ในอดีตมีการวิจัยมากมายเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหิน การประยุกต์ใช้เถ้าลอยถ่านหินในงานวิศวกรรมเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย [3-12] จึงทำให้เถ้าลอยถ่านหินมีราคาที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวลในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวร่วมกับซีเมนต์ โดยจะเน้นศึกษาถึงการหาประสิทธิภาพของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลเพียงอย่างเดียวเนื่องจากเถ้าประเภทนี้ยังคงเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่มีมูลค่าและในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังกับเถ้าประเภทนี้โดยกำหนดประสิทธิภาพของการแทนที่ด้วยค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ (k -factor)

นอกจากประเภทของเถ้าแล้ว ชนิดของดิน (ระดับการบวมตัว) ก็เป็นอีกตัวแปรหลักที่ควบคุมการพัฒนา กำลังอัด Sridharan and Prakash [13-14] แบ่งดินเหนียวออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือดินเหนียวบวมตัว (Swelling

clay) และดินเหนียวไม่บวมตัว (Non-swelling clay) ซึ่งได้แก่ดินเหนียวเบนโทไนท์และดินเหนียวคาโอลิไนท์ ตามลำดับ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จะศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินไม่บวมตัวถึงดินบวมตัวต่ำเท่ากันที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ทั้งนี้เพราะดินในธรรมชาติส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการบวมตัวต่ำ อีกทั้งสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ จัดอยู่ในประเภทดินที่มีการบวมตัวต่ำ [15] โดยอาศัยหลักการของตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอชโซลาน [16] พร้อมนำเสนอวิธีการทำนายนากำลังอัด

2. วัสดุทดสอบ

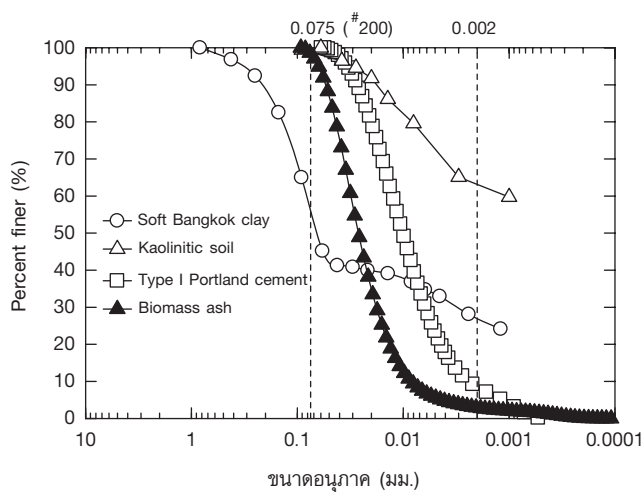
เพื่อเป็นการศึกษาถึงระดับการบวมตัวให้ครอบคลุมระดับการบวมตัวจากดินไม่มีการบวมตัวถึงดินบวมตัวต่ำในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ดินเหนียวสองชนิดคือ ดินคาโอลิไนท์ (ดินเหนียวไม่บวมตัว) และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (ดินเหนียวที่มีการบวมตัวต่ำ) ดินคาโอลิไนท์ มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 1.43 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 42.5 และ 33.5 ตามลำดับ

ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯเก็บจากบริเวณเขตลำลูกกา โครงการก่อสร้างถนนวงแหวนรอบนอกตะวันออก ที่ความลึก 3 - 4 เมตร จากผิวดิน มีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 80-90 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 103 และ 31.8 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 เถ้าชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเถ้าชีวมวลนี้ได้จากการเผาวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เปลือกไม้ ไม้บอร์ด ไม้ยูคาลิปตัสสับละเอียดและแกลบอัดเม็ด เถ้าชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ C และ F ตามมาตรฐานของ ASTM C 618 ได้ เถ้าชีวมวลนี้นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (เถ้าละเอียด) ขนาดอนุภาคของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบแสดงดังในตารางที่ 1 และการกระจายตัวดังในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบ

องค์ประกอบทางเคมี	ถ้ำชีวมวล	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	ดินคาโอลินท์	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
% 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
w_m , %	-	-	1.43	80 - 90
LL , %	-	-	42.5	103
PI , %	-	-	9	71.2
Specific Gravity	1.95	3.15	2.78	2.71
Compositional fuel formular of biomass ash				
rice husk	36%			
Bark	24%			
board wood	6%			
fined Eucalyptus wood	23%			
seed husk	11%			

หมายเหตุ : LL = Liquid Limit , PI = Plasticity Index, w_m = Initial water content



รูปที่ 1 การกระจายตัวของดินคาโอลินท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์และถ้ำชีวมวล

3. วิธีการทดสอบ

ดินตัวอย่างนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.0 ถึง 2.0 เท่าของค่าดัชนีเหลว เพื่อจำลองปริมาณน้ำที่สูงเนื่องจากการเทคนิคการผสมลิกดินซีเมนต์ถูกนำมาคำนวณประมาณ 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้นทำการเตรียมดินสำหรับทดสอบ กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Test) ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 ซม. และความสูงเท่ากับ 10 ซม. ทั้งนี้ทำการควบคุมหน่วยน้ำหนักของดินในแต่ละก้อนให้เท่ากันโดยทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 3 ก้อนตัวอย่าง สำหรับแต่ละ

ส่วนผสมและทำการบ่มตัวอย่างทั้งหมดในห้องบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน สำหรับการทดสอบดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลให้ผสมดินตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมทั้งหมดเหมือนกับดินซีเมนต์คือที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม, w_c/B เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลที่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในแบบหล่อขนาดเท่ากันและบ่มที่เวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน เท่ากัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-85 กำหนดอัตราการกดแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1 มม./นาที ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบแสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดการทดสอบ

Type of stabilization	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	w_c / C หรือ w_c / B	ปริมาณเถ้าชีวมวล (%)	ระยะเวลาบ่ม (วัน)
Type A	1- 2	2.5 - 7.5	0	7, 14, 28, 60
Type B	1- 2	2.5 - 7.5	10, 20, 30, 40	7, 14, 28, 60

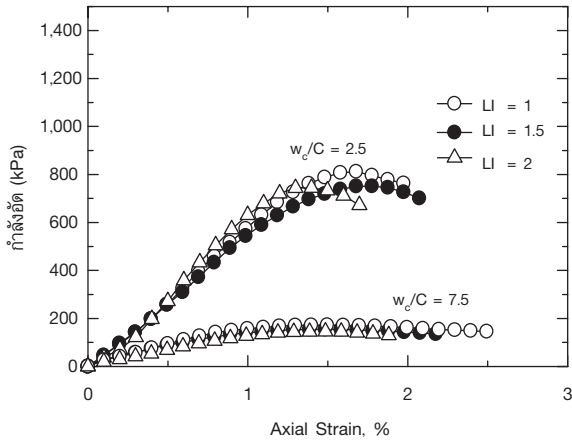
หมายเหตุ : Type A = ดินซีเมนต์ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ)

Type B = ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ)

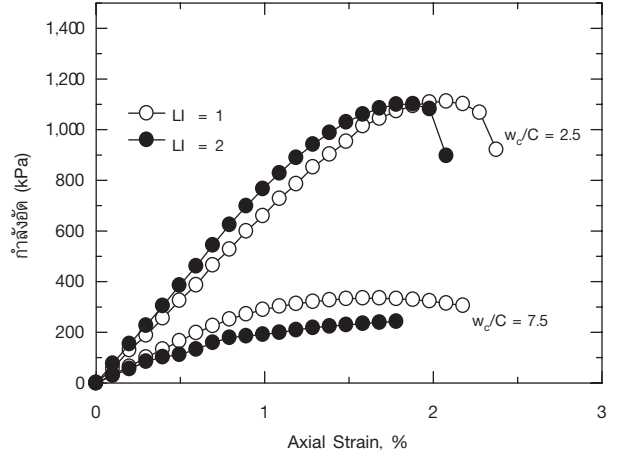
4. ผลทดสอบ

รูปที่ 2 ถึง 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันจะเห็นว่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (w_c/C) เดียวกัน ความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียด มีลักษณะเหมือนกันและค่ากำลังสูงสุดใกล้เคียงกันแม้ว่าดินจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ($LI = 1, 2$) ก็ตาม แสดงว่า

ในช่วงปริมาณความชื้นดังกล่าวตัวแปรหลักที่มีผลต่อกำลังของดินไม่มีการบวมตัวถึงบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ (w_c/C) เพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าจะมีช่วงปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่กว้างก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาในอดีต [17-18] และพบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วันจะให้ค่ากำลังที่สูงกว่าที่ระยะบ่ม 7 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ขึ้น

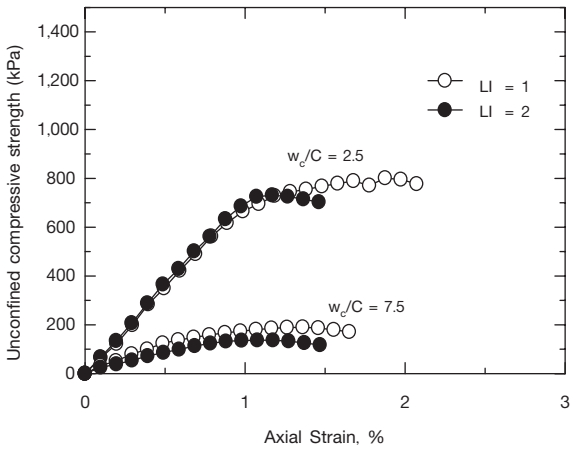


ก) 7 วัน

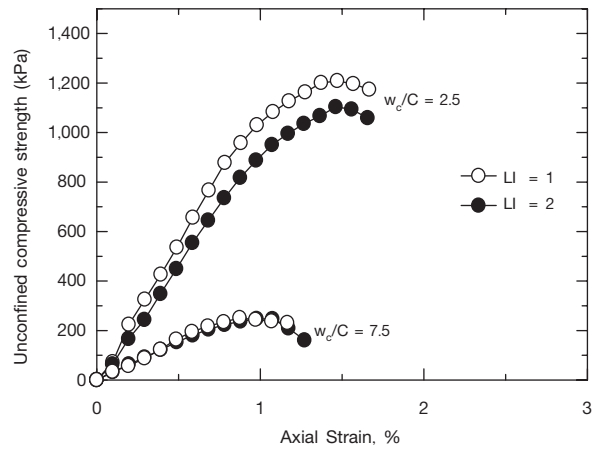


ข) 28 วัน

รูปที่ 2 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ผสมซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 และ 28 วัน

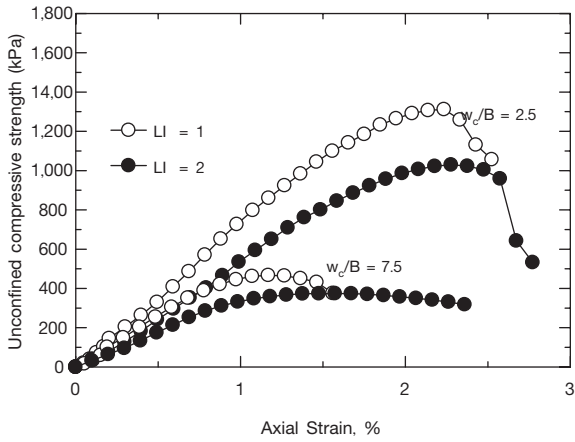


ก) 7 วัน

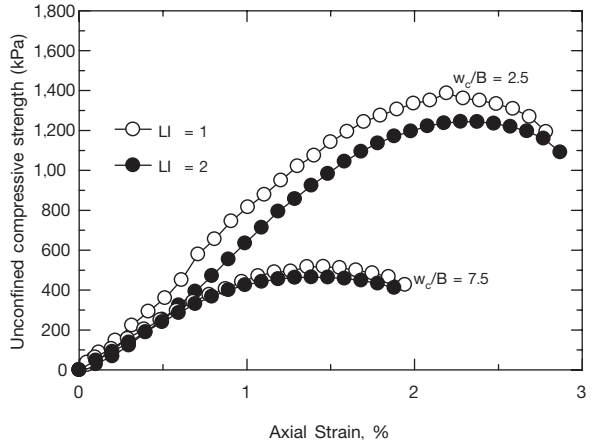


ข) 28 วัน

รูปที่ 3 ความเค้น - ความเครียดของดินคาโอลินที่ผสมซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 และ 28 วัน

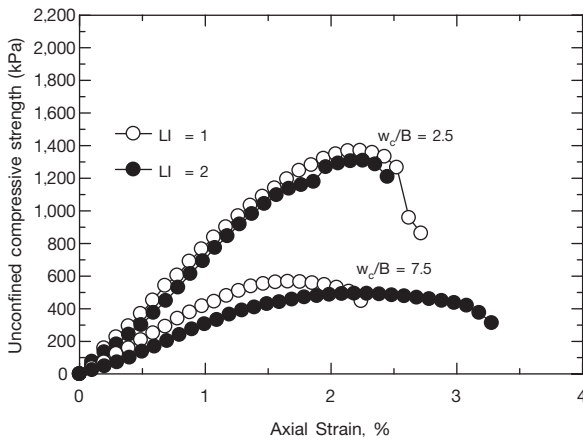


ก) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 90:10

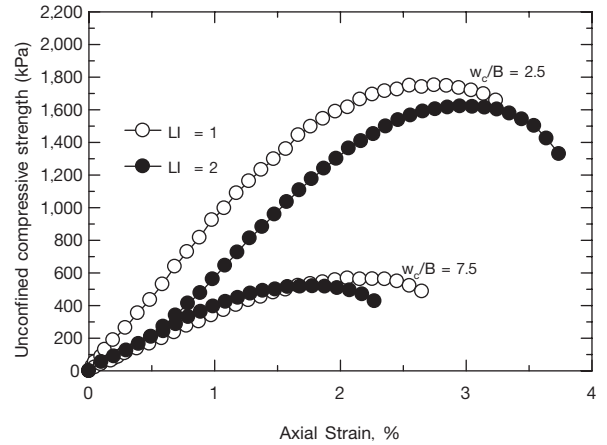


ข) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 70:30

รูปที่ 4 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์และทรายหยาบที่ระยะบ่ม 28 วัน

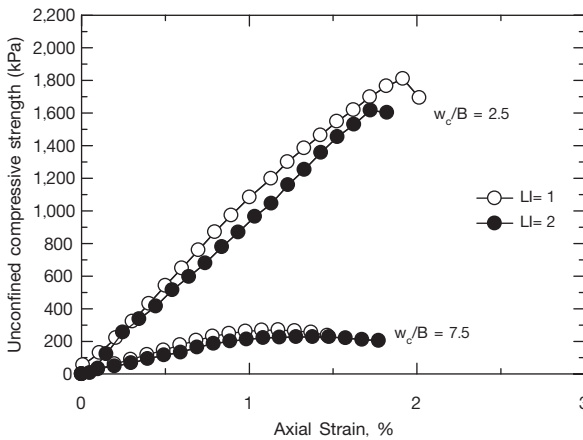


ก) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 90:10

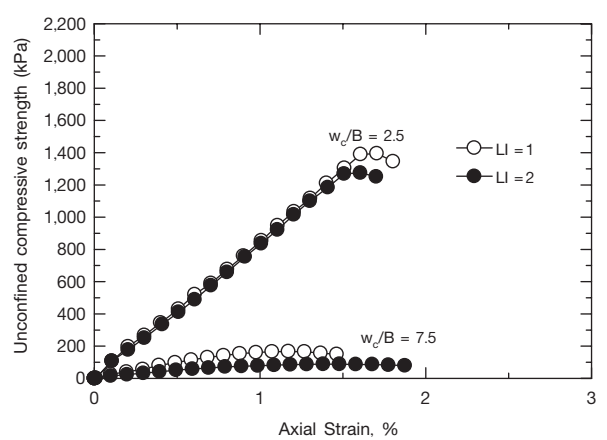


ข) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 70:30

รูปที่ 5 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์และทรายหยาบที่ระยะบ่ม 60 วัน

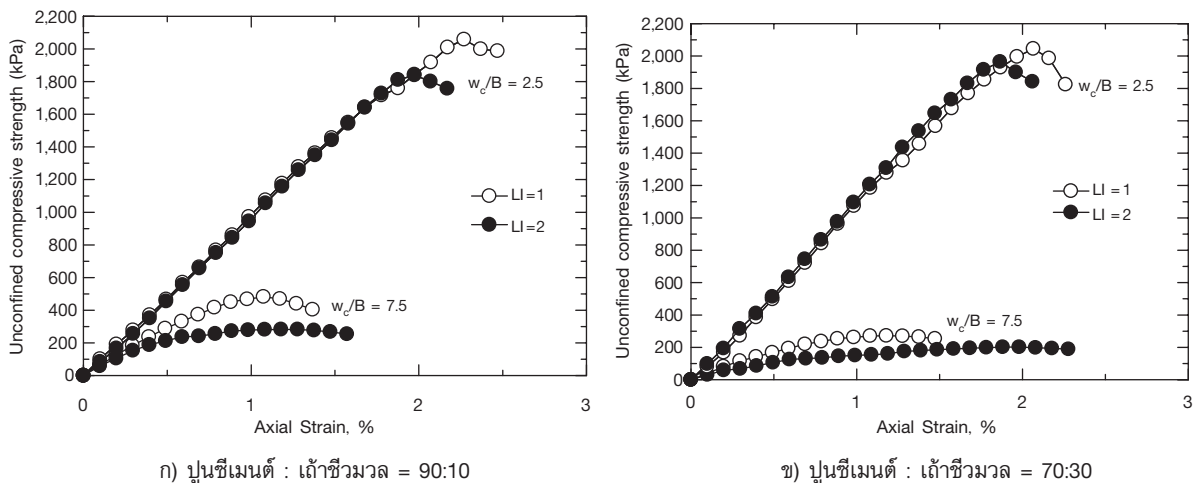


ก) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 90:10



ข) ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ = 70:30

รูปที่ 6 ความเค้น - ความเครียดของดินคาลิไนท์ผสมซีเมนต์และทรายหยาบที่ระยะบ่ม 28 วัน

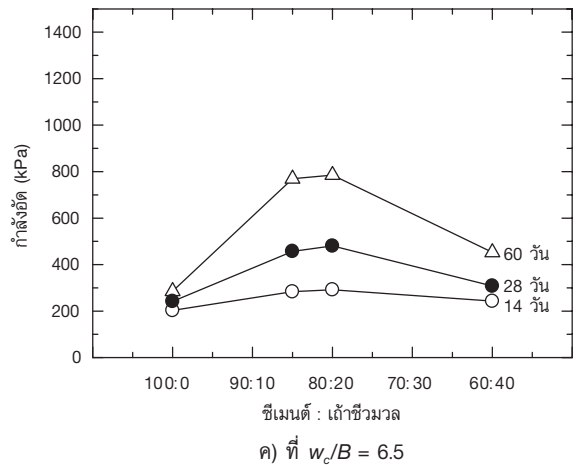
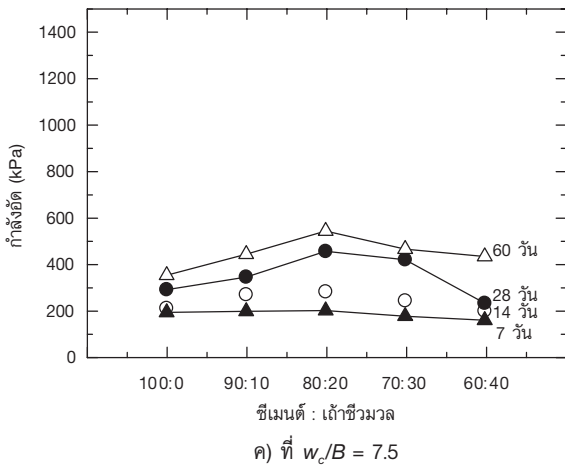
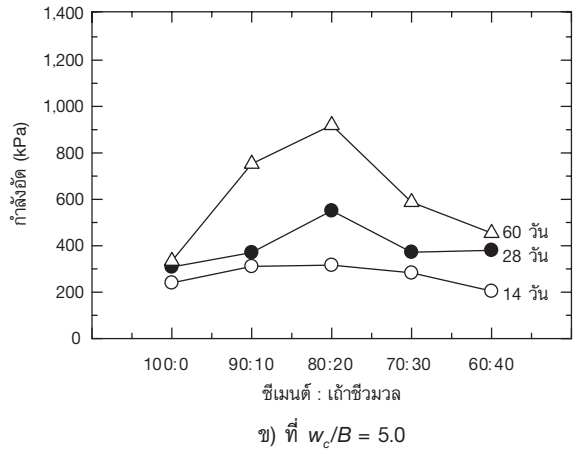
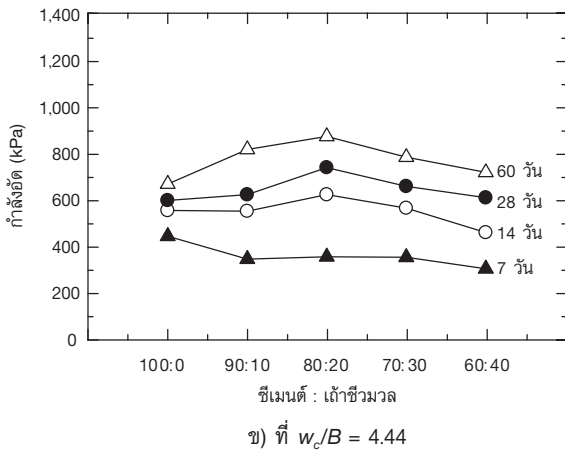
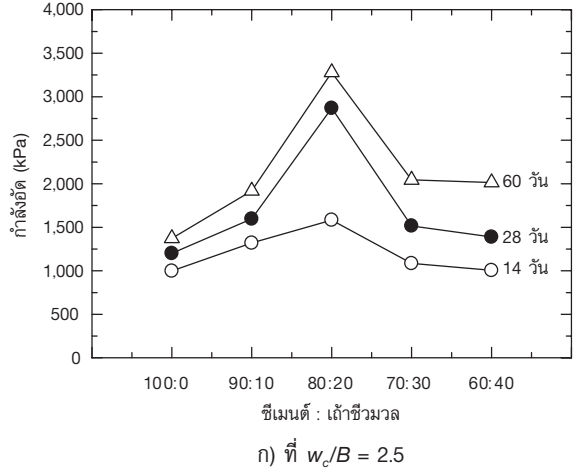
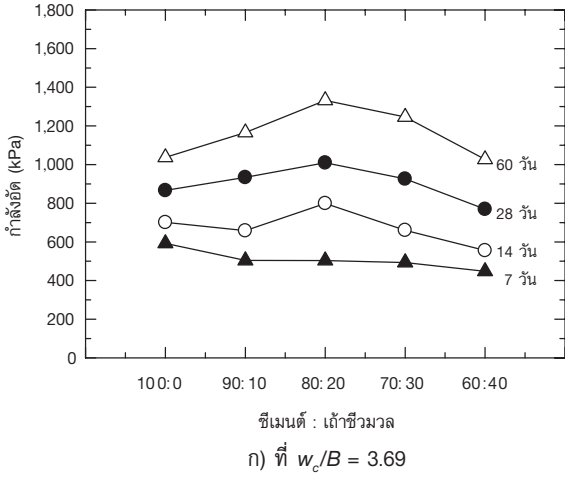


รูปที่ 7 ความเค้น - ความเครียดของดินค้ำโอลัโนทัผสมซีเมนต์และฝ้าัชัวมวลที่ระยะบ่ม 60 วัน

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯและดินค้ำโอลัโนทัผสมซีเมนต์และฝ้าัชัวมวลจะเห็นว้ ความสัมพันธ์ระยหว่างความเค้น - ความเครียดมีลักษณะคล้ายกับดินซีเมนต์ คือที่ระยะเวลาบ่มใด ๆ แม้ดินตัวอย่างจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ($LI = 1, 2$) แต่เมื่ออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม, w_c/B เท่ากันแล้ว ดินซีเมนต์ผสมฝ้าัชัวมวลจะมีค้ำกำลังอัดสูงสุดใกล้เคียงกันดังในรูปที่ 4 ถึง 7 และพบว่าที่ระยะเวลา 60 วัน ดินซีเมนต์ผสมฝ้าัชัวมวลให้ค้ำกำลังอัดสูงที่สุดและสูงกว่าที่ระยะบ่ม 28 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และจะเห็นว้ ดินซีเมนต์ฝ้าัชัวมวลที่มี w_c/B ที่ต่ำกว้จะให้ค้ำกำลังที่สูงกว้ ดังนั้นตัวแปรที่ควบคุมค้ำกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมฝ้าัชัวมวลคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม นอกจากตัวแปรอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมและระยะเวลาบ่มจะ

เป็นตัวควบคุมค้ำกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมฝ้าัชัวมวลแล้ว และจากงานวิจัยในอดีต [19-20] พบว้ อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝ้าัลยก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณา

รูปที่ 8 และ 9 แสดงความสัมพันธ์ของค้ำกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนซีเมนต์ต่อฝ้าัชัวมวล ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้หนักของปูนซีเมนต์พบว้ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมหนึ่ง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 14-60 วัน อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มีค้ำกำลังอัดของดินซีเมนต์ฝ้าัชัวมวลสูงที่สุดและมีแนวโน้มที่จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝ้าัชัวมวล และพบว่าฝ้าัชัวมวลจะเข้ามามีบทบาทในการเพิ่มค้ำกำลังมากขึ้นตามอายุบ่มที่สูงขึ้น (14-60 วัน) โดยเฉพาะอายุบ่มที่มากกว่า 28 วัน แสดงให้เห็นว้ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค้ำกำลังอัดของดินซีเมนต์ฝ้าัชัวมวลคืออายุบ่มและอัตราส่วนซีเมนต์ต่อฝ้าัชัวมวล



รูปที่ 8 กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

รูปที่ 9 กำลังอัดของดินคาโอลิโนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

5. การวิเคราะห์ผลทดสอบด้านกำลังอัด

Horpibulsuk และคณะ [21] ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใดๆ โดยอาศัยสมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio hypothesis) ซึ่งเสนอโดย Miura และคณะ [18] สมมติฐานน้ำในดินต่อซีเมนต์กล่าวว่า “กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียวคืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C)” รูปที่ 10 แสดงการพัฒนา กำลังอัดของดินบวมตัวต่ำ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ) พบว่าดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ ในความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในฟังก์ชันกำลัง (Power function) ดังสมการที่ 1

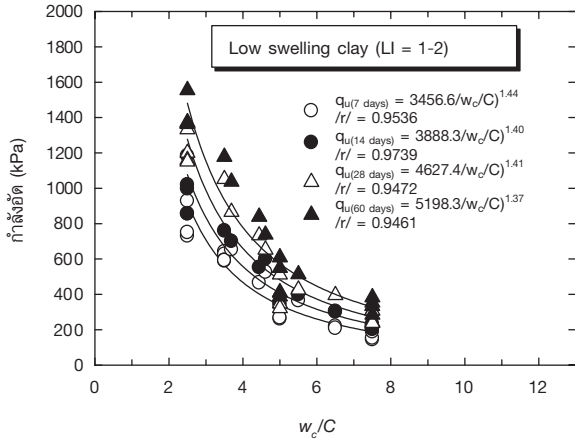
$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C}\right)^B} \quad (1)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน B จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัดค่า B ยิ่งมาก การเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากตาม สำหรับดินชนิดหนึ่งผสมซีเมนต์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัด จะแปรผันอย่างมากกับประเภทของปูนซีเมนต์ [21] แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ดังนั้น B จึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับดินทุกชนิด

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่า B มีค่าใกล้เคียงกันและจากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ B ประมาณคงที่และมีค่าเท่ากับ 1.40 สำหรับดินบวมตัวต่ำ และที่ระยะเวลาหนึ่งๆ มีพารามิเตอร์ A คงที่ ด้วยเหตุนี้เอง อัตราส่วนกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวต่ำสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A / (w_c/C)_1^{1.40}}{A / (w_c/C)_2^{1.40}} \right] = \left[\frac{(w_c/C)_2}{(w_c/C)_1} \right]^{1.40} \quad (2)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังและอัตราส่วนความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้เมื่อทราบกำลังอัดที่อัตราส่วนการผสมหนึ่งๆ ($w_c/C = 2.5 - 7.5$) ที่ช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งข้อจำกัดของความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นคือไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของ ดินซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีสถานการณ์ที่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้นในดิน และอายุบ่ม แสดงได้ดังรูปที่ 11 กล่าวคืองานวิจัยนี้ได้รวบรวมงานวิจัยในอดีต [22-23] มา ร่วมวิเคราะห์กับงานวิจัยนี้พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ของดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงบนสเกลล็อกกาลีทิมของเวลาและมีแนวความลาดชันของการพัฒนากำลังอยู่ในแนวความลาดชันที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้คืออิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นค่าอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์กับระยะเวลาบ่มจึงควรจะมีค่าคงที่สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันของดินทุกชนิด งานวิจัยนี้เลือกใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นวันอ้างอิงและได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาใดๆ ต่อระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน บนเส้นความสัมพันธ์เอกภาพกับเวลา (q_D/q_{28}) ได้ดังในรูปที่ 11 ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9041

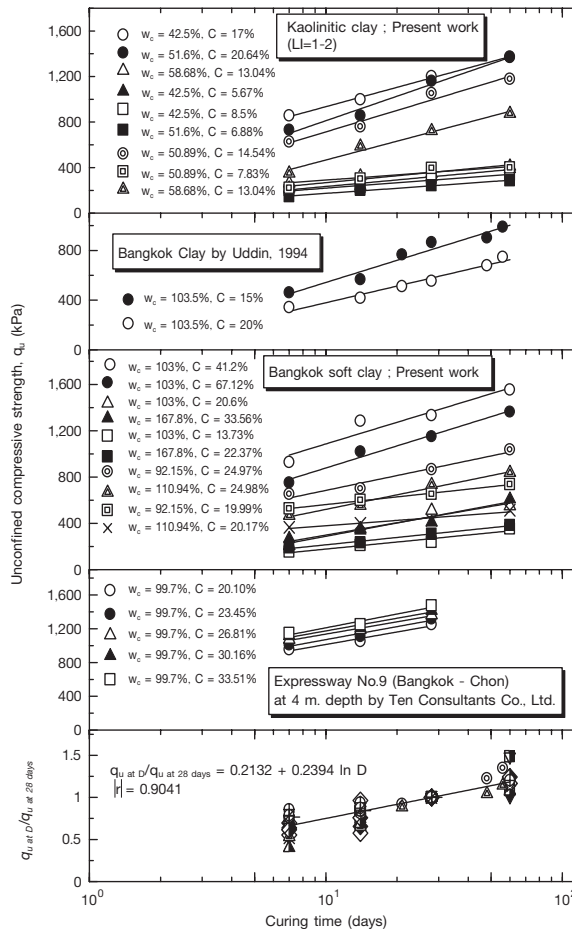


รูปที่ 10 การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวรวมตัวต่ำ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวกรุงเทพ) ผสมซีเมนต์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้น ในดินต่อซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ

พิจารณาจากสมการที่ (2) และความสัมพันธ์ของอัตราการพัฒนากำลังกับเวลาบนเส้นความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลัง ระยะเวลาการบ่มในช่วงที่ w_c/C มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 7.5 ได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D} \right]^{1.40} (0.2132 + 0.2394 \ln D) \quad (3)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากอายุบ่ม D วัน $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์และอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์กับอายุบ่ม

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายกำลังอัดดินซีเมนต์ อาศัยสมการที่ (3) โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังตารางที่ 3 เลือกผลทดสอบของกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ w_c/C หนึ่งๆ ที่อายุบ่ม 28 วันเป็นค่าอ้างอิงดังในตารางที่ 4 และ 5 จากนั้นสามารถคำนวณหา กำลังอัดที่วันใดๆ และที่ w_c/C ใดๆ ที่ต้องการได้ซึ่งแสดงผลการทำนายของกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) กับผลการทดสอบจริงดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับ

งานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน3) อำเภอบางพลี - อำเภอธัญบุรี [24] และตารางที่ 5 สำหรับดินเหนียวของประเทศญี่ปุ่นโดย Kawasaki, และคณะ [25] จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ Mean Absolute Percent Error เท่ากับร้อยละ 12.45 และ 13.98 ตามลำดับซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวญี่ปุ่น

Location	Sand content (%)	w_n (%)	LL (%)	PL (%)	Humus content (%)	pH	Remark
Bangkok	-	120	80 - 91.5	25 - 29.6	-	-	[24]
Chiba	44	61.0	55.8	24.0	0.34	6.6	[25]
Tokyo	1	99.6	90.5	35.2	0.39	1	[25]
Osaka	5	113.0	95.0	29.9	0.37	7.5	[25]
Hiroshima	3	136.3	121.0	36.1	0.54	7.3	[25]
Kangawa	16	109.7	91.0	31.5	0.71	6.7	[25]
Aichi	5	99.3	83.4	23.4	0.60	7.4	[25]

ตารางที่ 4 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w_c %	w_c/C	q_{ul} kPa[24]	q_{up} kPa	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ %
7	24.12	122.62	5.08	631	648	2.64
14	24.12	122.62	5.08	758	806	6.32
28	24.12	122.62	5.08	1,053	964	8.44
7	25.50	124.00	4.86	703	689	1.97
14	25.50	124.00	4.86	874	858	1.88
28	25.50	124.00	4.86	1,121	1,026	8.48
7	27.57	126.06	4.57	793	751	5.29
14	27.57	126.06	4.57	920	935	1.59
28	27.57	126.06	4.57	1,175	1,118	4.84
7	22.03	108.33	4.92	565	678	20.07
14	22.03	108.33	4.92	722	844	16.92
28	22.03	108.33	4.92	999	Ref.	1.09
7	23.29	109.59	4.71	634	721	13.80
14	23.29	109.59	4.71	773	898	16.14

ตารางที่ 4 (ต่อ) การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w _c %	w _c /C	q _{ult} kPa[24]	q _{up} kPa	$\frac{ q_{up} - q_{ult} }{q_{ult}} \times 100$ %
28	23.29	109.59	4.71	1119	1074	4.01
7	25.18	111.48	4.43	668	786	17.62
14	25.18	111.48	4.43	918	978	6.50
28	25.18	111.48	4.43	1,236	1,170	5.37
7	18.80	89.60	4.77	552	709	28.39
14	18.80	89.60	4.77	658	882	34.03
28	18.80	89.60	4.77	807	1,055	30.75
7	19.87	90.67	4.56	638	753	18.09
14	19.87	90.67	4.56	775	937	20.97
28	19.87	90.67	4.56	940	1,122	19.32
7	21.48	92.28	4.30	705	820	16.29
14	21.48	92.28	4.30	900	1,020	13.35
28	21.48	92.28	4.30	1,090	1,220	11.97
Mean Absolute Percent Error, MAPE						12.45 %

ตารางที่ 5 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวญี่ปุ่นผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w _c %	w _c /C	q _{ult} kPa[25]	q _{up} kPa	$\frac{ q_{up} - q_{ult} }{q_{ult}} \times 100$ %
Aichi clay LL = 90.5%, PL = 35.2%						
7	20.0	99.3	5.0	925	831	10.16
28	20.0	99.3	5.0	1889	1237	34.50
60	20.0	99.3	5.0	2506	1460	41.72
7	30.0	99.3	3.3	1079	1466	35.87
28	30.0	99.3	3.3	2159	Ref.	1.09
60	30.0	99.3	3.3	2872	2577	10.29
Tokyo LL = 90.5%, PL = 35.2%						
7	10.0	61.0	6.1	1473	1078	26.82
28	10.0	61.0	6.1	2063	1605	22.22
60	10.0	61.0	6.1	2400	1894	21.07
7	20.0	61.0	3.1	2042	2845	39.30
28	20.0	61.0	3.1	4189	Ref.	1.09
60	20.0	61.0	3.1	5157	4999	3.06

ตารางที่ 5 (ต่อ) การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวญี่ปุ่นผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w _c %	w _c /C	q _{ul} kPa[25]	q _{up} kPa	$\frac{q_{up} - q_{ul}}{q_{ul}} \times 100$ %
Chiba clay LL = 55.8%, PL = 24%						
7	20.0	56.7	2.8	810	1001	23.67
28	20.0	56.7	2.8	1465	1491	1.80
60	20.0	56.7	2.8	1754	1760	0.37
7	10.0	56.7	5.7	347	380	9.39
28	10.0	56.7	5.7	559	Ref.	1.09
60	10.0	56.7	5.7	771	667	13.48
Osaka clay LL = 95%, PL = 29.9%						
7	20	113.5	5.68	901	760	15.58
28	20	113.5	5.68	1707	1132	33.66
60	20	113.5	5.68	2052	1337	34.86
7	30	113.5	3.78	1036	1342	29.52
28	30	113.5	3.78	1976	Ref.	1.09
60	30	113.5	3.78	2513	2358	6.16
Hiroshima clay LL = 121%, PL = 36.1%						
7	20	136.3	6.82	1745	1521	12.82
28	20	136.3	6.82	2436	2265	7.03
60	20	136.3	6.82	2877	2673	7.08
7	30	136.3	4.54	2589	2684	3.65
28	30	136.3	4.54	3952	Ref.	1.09
60	30	136.3	4.54	4508	4716	4.62
Kanagawa clay LL = 91%, PL = 31.5%						
7	20	109.7	5.49	2384	1943	18.51
28	20	109.7	5.49	3120	2892	7.30
60	20	109.7	5.49	3560	3414	4.10
7	30	109.7	3.66	3623	3427	5.41
28	30	109.7	3.66	5047	Ref.	1.09
60	30	109.7	3.66	5340	6023	12.79
Mean Absolute Percent Error, MAPE						13.98 %

Rachan, R. และคณะ [19] ได้ทำการพิจารณากำลั งอัดของดินซีเมนต์กับส่วนกลับของปริมาณความชื้นในดิน ต่อปริมาณซีเมนต์, C/w_c ที่ระยะเวลาบ่มหนึ่งๆ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (4)

$$q_u = A \left(\frac{C}{w_c} \right) + E \quad (4)$$

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

ในกรณีของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลงานศึกษาวิจัยได้ประยุกต์กรอบความคิดข้างต้นและหลักการของการใช้ตัวแปรประสิทธิภาพของวัสดุปอชโซลาน [19] มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยงานวิจัยได้กำหนดปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าคือ C_e เมื่อปริมาณซีเมนต์เทียบเท่านี้มีค่าดังสมการที่ (5)

$$C_e = k.F \quad (5)$$

เมื่อ C_e คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพและ F คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%) ดังนั้นปริมาณส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และเถ้าชีวมวล (Binder content) จึงเกิดจากผลรวมของปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม, C_i และปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าที่เกิดจากการใส่เถ้าชีวมวลเข้าไปแทนที่, C_e ความสัมพันธ์ของการพัฒนา กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสมการที่ (4) จึงถูกประยุกต์ สำหรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลได้ดังสมการที่ (6)

$$q_u = A \left(\frac{C_i + k.F}{w_c} \right) + E \quad (6.1)$$

$$q_u = A \left(\frac{C_i}{w_c} \right) + A_2 \left(\frac{F}{w_c} \right) + E \quad (6.2)$$

เมื่อ A และ A_2 คือค่าคงที่ได้จากการทำ multi linear regression และตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่าเท่ากับ $\frac{A_2}{A}$

ในกรณีที่ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงความสามารถของวัสดุปอชโซลานที่อัตราส่วนการแทนที่นี้มีค่าเทียบเท่าความสามารถของปูนซีเมนต์ 100 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 12 แสดงผลของค่าตัวแปรประสิทธิภาพของดินคาโอไลไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าที่ระยะบ่มมากกว่า 28 ของเถ้าชีวมวลนี้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k สูงที่สุดและพบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ ค่าตัวแปร k จะมีค่าเพิ่มขึ้นในความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับระยะเวลาบ่มในสเกลล็อกกาลีทึมเช่นเดียวกันทั้งในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินคาโอไลไนท์และพบว่าแนวความลาดชันของการพัฒนาตัวแปรประสิทธิภาพ k กับเวลานั้นจะมีแนวความลาดชันที่ใกล้เคียงกันทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาหลักเดียวกันแต่ในกรณีของดินคาโอไลไนท์ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวความลาดชันแตกต่างจากผลทดสอบส่วนอื่นๆ อาจเป็นเพราะความคลาดเคลื่อนของการทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน แต่ทั้งนี้อัตราการพัฒนาของตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันใดๆ เทียบต่อค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันหนึ่งๆ ควรมีค่าคงที่สำหรับเถ้าชนิดเดียวกันของดินทุกชนิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาหลักเดียวกัน ดังนั้นทำการ Normalized k-factor กับเวลาโดยใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นตัวอ้างอิง โดยพิจารณาอัตราการพัฒนาของตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลนี้ในดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำ (ดินคาโอไลไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ตามลำดับ) ดังในรูปที่ 13 และได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9453

$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4284 \ln D = 0.455 \quad (7)$$

เมื่อ k_D คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก D วัน, k_{28} คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก 28 วัน และ D คือระยะเวลาบ่ม (วัน)

สามารถประยุกต์ใช้สมการที่ (7) เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลนี้ที่เวลาใดๆ (7 - 60 วัน) และอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ (10 - 40%) ได้และสามารถทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลได้โดยประยุกต์จากสมการที่ (3) ได้ดังความสัมพันธ์ที่นำเสนอตั้งสมการ

ต่อไปนี่

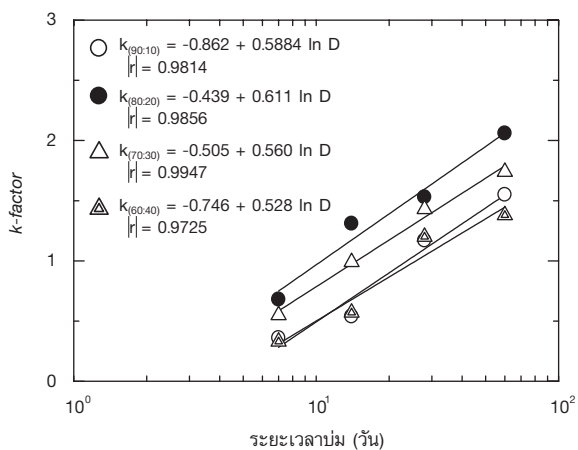
$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C^*)D}}{q_{(w_c/C^*)28}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C^*)}{(w_c/C^*)_{28}} \right]^{1.40} (0.2132 + 0.2394 \ln D) \quad (8)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C^*)D}$ คือกำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ทำนายได้ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม (w_c/C^*) ที่วัน D วัน และ $q_{(w_c/C^*)_{28}}$ คือกำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อ

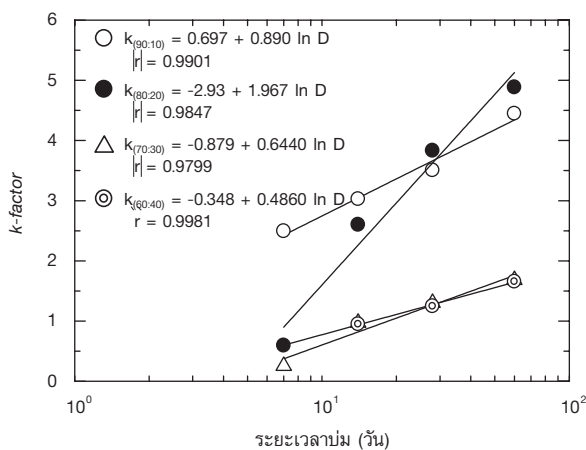
ปริมาณส่วนผสม (w_c/C^*) ที่ระยะบ่มที่ 28 วันซึ่งเป็นวันอ้างอิงและ C^* คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า ซึ่งมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$C^* = C_i + kF \quad (9)$$

เมื่อ k คือตัวแปรประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม C_i คือปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม (%) และ F คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%)

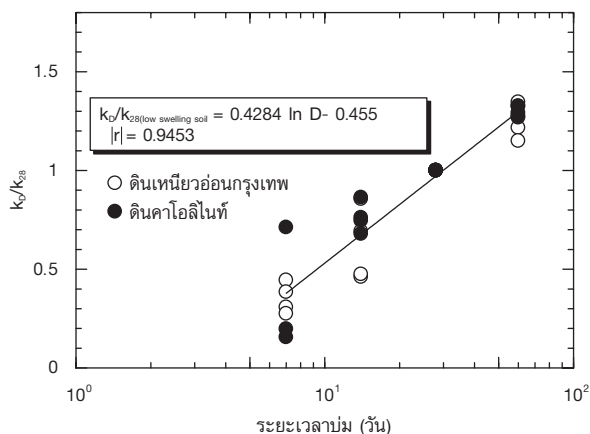


ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ข) ดินคาโอลิไนท์

รูปที่ 12 ตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลกับเวลาของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนาประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลกับเวลาของดินบวมตัวต่ำและการ Normalization

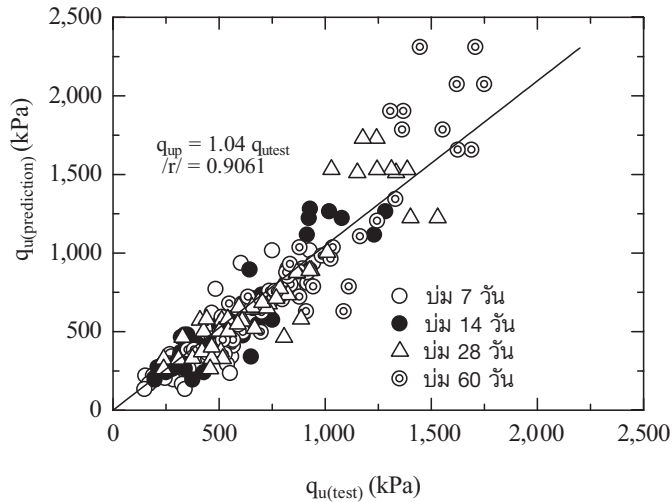
ทำการตรวจสอบวิธีและแนวทางที่นำเสนอในการหา กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลซึ่งอาศัยสมการที่ (8) และ หลักการหาค่าตัวแปรประสิทธิภาพ (k) ของเถ้าชีวมวลนี้ โดยงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลจากการทดสอบหากำลังอัดของ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นข้อมูลพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 6 จากข้อมูล พื้นฐานของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณ เถ้าชีวมวลและกำลังอัดที่เกิดขึ้นที่แต่ละอัตราส่วนการแทน ที่ของเถ้าชีวมวล สามารถนำไปหาค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ใน สมการที่ (6.2) โดยหลักการวิเคราะห์เชิงเส้นแบบถดถอย หลายตัวแปร (Multi - linear regression analysis) ได้ ค่าดังในตารางที่ 6 สำหรับดินซีเมนต์ ($F = 0$) จะมีค่าตัว

แปรประสิทธิภาพ k เท่ากับ 1 เพราะเป็นความสามารถเต็มที 100 เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ ในสมการที่ (7) จะได้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันใดๆ ของแต่ละอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ งานวิจัยนี้กำหนด กำลังอัดของดินซีเมนต์ (C:F = 100:0) ที่อายุบ่ม 28 วัน และที่ w_c/C^* เท่ากับ 3.69 เป็นกำลังอัดอ้างอิง ($q_{(w_c/C^*),28}$) เพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังอัดที่ได้จากการทำนายโดย อาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (8) และ (9) แสดงผล ของกำลังที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก การทำนายดังในรูปที่ 14 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิด ขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9061

ตารางที่ 6 กำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน
(LL = 92.15% and PL = 42.5%)

C:F	Time, days	w_c %	C_i %	F %	k -factor	w_c/C^*	q_{ul} kPa
100:0	28	92.15	25.00	0	1.00	3.69	867 ^A
	28	110.94	25.00	0	1.00	4.44	734
90:10	28	92.15	22.50	2.50	1.13	3.64	934
	28	110.94	22.50	2.50	1.13	4.38	684
80:20	28	92.15	20.00	5.00	1.55	3.32	1010
	28	110.94	20.00	5.00	1.55	4.00	786
70:30	28	92.15	17.50	7.50	1.06	3.62	926
	28	110.94	17.50	7.50	1.06	4.36	704
60:40	28	92.15	15.00	10.00	0.67	4.25	769
	28	110.94	15.00	10.00	0.67	5.11	587

หมายเหตุ 1. C:F = ปริมาณซีเมนต์:ปริมาณเถ้าชีวมวล ในหน่วยเปอร์เซ็นต์
 2. ^A = ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันซึ่งเป็นค่าอ้างอิง ($q_{(w_c/C^*),28}$)
 3. ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k หาจาก multi-linear regression analysis



รูปที่ 14 การทำนายกำลังอัดและกำลังอัดในท้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่างๆ

6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้กล่าวถึงตัวแปรควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลและนำเสนอค่าตัวแปรประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับดินที่ไม่มีกรวมตัวถึงบวมตัวต่ำ ประเด็นสำคัญของการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ปัจจัยควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลคือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณส่วนผสม ระยะเวลาบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล
2. ตัวแปรประสิทธิภาพ k จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณส่วนผสมเพราะที่อายุบ่มหนึ่งของอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ เมื่อทำการผสมวัสดุผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะให้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพเพียงค่าเดียวสำหรับวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งๆ ซึ่งหลักการใช้ตัวแปรประสิทธิภาพ k สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณแผ่นดินปี 2552 เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. <URL: <http://maemoh.egat.com/index.php?content=sara&topic=2>>
2. Ferguson, G. 1993, "Use of self-commenting fly ash as a soil stabilizing agent", *Geotechnical special publication*, No. 36, ASCE New York, N.Y.
3. Owens, PL. 1979, "Fly ash and its usage in concrete", *Concrete, the Journal of Concrete Society*, Vol. 13, pp. 21-26.
4. Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P. 1994, "Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface", *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 1, pp. 30-39.
5. Ollivier, J.P. and Massat, M. 1996, "The effect of the transition zone on transfer properties of concrete", *J.C. Maso ed, RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 118-131.

6. Mindess, S. 1996, "Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone", *J.C .Maso ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 48-63.
7. Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. 1996, "Microhardness testing of cementations materials", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 4, pp. 48-57.
8. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichkorn, A., and Kuchorn, T. 1999, "Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and Type III", *Proceedings of 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Kochi, Japan.
9. Chindapasirt, P., Ruangsiriyaku, S., Cao, H.T., and Bucea, L. 2001, "Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics, strength and drying shrinkage development of blended cement mortars", *Proceedings of 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, pp. 6.
10. Yang, C.C. and Su, J.K. 2002, "Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar", *Cement and Concrete research*, Vol. 32, pp. 1559-1565.
11. Chindapasirt, P, Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V. 2004, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1087-1092.
12. Thumasujarit, K., and Tangtermsirikul, S. 2004, "Bleeding model for fly ash concrete", *Proceedings of 9th National Convention on Civil Engineering*, pp. MAT184-MAT189.
13. Sridharan, A., and Prakash, K. 1999a, "Influence of clay mineralogy and pore-medium chemistry on clay sediment formation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 5, pp. 961-966.
14. Sridharan, A., and Prakash, K. 1999b, "Mechanisms controlling the undrained shear strength behaviour of clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 6, pp. 1030-1038.
15. Rachan, R., and Horpibulsuk, S. 2006, "Effect of chemistry and mineralogy on geotechnical properties of Bangkok clay", *Proc. International Symposium on Lowland Technology*, Saga, Japan, 14- 16, September, pp. 25--30.
16. Papadakis V.G. and Tsimas. S. 2002, "Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1525-1532.
17. Horpibulsuk, S., and Miura, N. 2001, "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays", *Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, Istanbul, Turkey, Vol. 3, pp. 1759-1762.
18. Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. 2001, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content", *Soils and Foundations*, Vol. 41, No.5, pp. 33-45.
19. Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S. 2008, "Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay", *Lowland Technology International Journal. (Tentatively accepted for publication)*
20. สุขสันต์ หอพิบูลสุข รุ่งลาวัลย์ ราชัน คิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2549, "โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย", สัมมนาวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.
21. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. 2003, "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 4, pp. 439-444.

22. Uddin, K. 1994, "Strength and Deformation Behaviour of Cement Treated Bangkok Clay", Doctoral Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

23. กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2547 รายงานผลทดสอบกำลังของ Cement Column โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษเส้นกรุงเทพ - ชลบุรี โดยบริษัท Ten Consultants Co., Ltd.

24. กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2550 รายงานผลทดสอบกำลังของ Cement Column โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก เส้นบางพลี-อัญบุรี โดยบริษัท Ten Consultants Co., Ltd.

25. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Sukuzi, Y. and Honjo, Y. 1981, "Deep mixing method using cement hardening agent", Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.721-724.