



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก่อตัวเร็วผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต

โดยผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญชัย ฤทธิรุทธ และคณะ

มิถุนายน พ.ศ.2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0122

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก่อตัวเร็วผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต

### คณะผู้วิจัย

- |                                       |                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1.ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญชัย ฤทธิรุทธ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน<br>วิทยาเขตขอนแก่น |
| 2.นายพงษ์พันธุ์ เรืองพริ้ม            | เทศบาลตำบลพระลับ จังหวัดขอนแก่น                     |
| 3.นายสมพร ลีคงบับ                     | สำนักงานทางหลวงที่7 (ขอนแก่น)<br>กรมทางหลวง         |
| 4.ดร.พันธกานต์ แก้วอาษา               | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน<br>วิทยาเขตขอนแก่น |
| 5.นางยุพา เศรษฐชัยมงคล                | การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย                       |
| 6.นายธรรมรัตน์ จันทาจีน               | สภาอุตสาหกรรมจังหวัดขอนแก่น                         |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## Executive Summary

ถนนคอนกรีตถือเป็นถนนแบบ Rigid Pavement โดยปกติแล้วจะสามารถรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำจากล้อรถได้มากกว่าถนนลาดยาง (Flexible Pavement) หลายเท่า และยังมีคุณภาพการขับขี่มากกว่าอีกด้วย ถนนคอนกรีตในประเทศไทยนิยมก่อสร้างในบริเวณตัวเมืองหรือย่านชุมชน เฉพาะกรมทางหลวงมีถนนคอนกรีตภายใต้ความรับผิดชอบโดยประมาณไม่น้อยกว่า 5,500 กิโลเมตร ปริมาณถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบทรับผิดชอบไม่ต่ำกว่า 1,700 กิโลเมตร, นอกจากนี้ยังมีปริมาณถนนคอนกรีตกรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่น และถนนคอนกรีตในหมู่บ้านจัดสรรและโรงงานอีกเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ในปัจจุบันมีจำนวนรถมากถึง 38 ล้านคัน (กรมการขนส่งทางบก 2561) ส่งผลให้การใช้รถสัญจรมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่และระยะทางของถนนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของถนนยังส่งผลให้เกิดการบำรุงทางเพิ่มมากขึ้นตามมาด้วย ทั้งนี้จำนวนและน้ำหนักบรรทุกทุกของรถมีค่าสูงกว่าในอดีตจึงส่งผลให้เกิดการชำรุดของถนนมากขึ้น ส่งผลให้การซ่อมมีการดำเนินการอยู่ตลอดเวลา เป็นปัจจัยทำให้มีการใช้คอนกรีตเป็นจำนวนมาก และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการดำเนินงานสร้างและบำรุงทาง ผลเสียที่กระทบอย่างรุนแรงจากการสร้างหรือซ่อมถนนคอนกรีตในย่านชุมชน คือต้องมีการปิดการจราจรเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดปัญหาขึ้นหลายด้าน เช่น ส่งผลให้การจราจรติดขัด เกิดความเสียหายต่อสินค้าทางการเกษตร สิ้นเปลืองพลังงานและเสียเวลาในการเดินทางซึ่งไม่ก่อประโยชน์ใด เกิดอุบัติเหตุขณะซ่อมผิวจราจรได้ง่าย กระทบต่อการขนส่งไม่เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งหากเป็นการขนส่งผู้ได้รับอุบัติเหตุหรือผู้ป่วยอาจส่งผลถึงการสูญเสียชีวิตได้ ส่งผลต่อภาพลักษณ์ของประเทศในการท่องเที่ยว กระทบการตัดสินใจในการลงทุนจากการที่ระบบขนส่งไม่สามารถขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

จากปัญหาข้างต้นทำให้คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงการนำวัสดุประสานชนิดใหม่ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติเด่นหลายประการและเหมาะสมสำหรับงานผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เช่น มีระยะเวลาก่อตัวที่สามารถกำหนดได้ มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดี มีความทนทานต่อการขัดสี มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อจีโอโพลิเมอร์กับเหล็กเสริมดี ทนต่อความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี นอกจากนี้การนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมาใช้ยังเป็นการสร้างถนนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเนื่องจากการใช้พลังงานในการผลิตและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลายเท่าตัว ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกจากใช้พลังงานเชื้อเพลิงสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากยังต้องใช้ทรัพยากรหินปูนจากการระเบิดภูเขาหรือทำเหมือง แต่ในทางกลับกันจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถใช้วัสดุตั้งต้นจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเช่น เถ้าถ่านหินจากการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า เถ้าจากกระบวนการอุตสาหกรรมทางการเกษตร เถ้าจากกระบวนการอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้นซึ่งเถ้า

เหล่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีเป็นจำนวนมากในแต่ละปี นอกจากเป็นการได้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับใช้งานทดแทนคอนกรีตประเภทเดิมที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก การนำเอาเหลือทิ้งมาใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังเป็นการช่วยจัดการปัญหาของการจัดเก็บจัดทิ้งแล้วปล่อยให้ล้นลง จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาของการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์สามารถควบคุมได้จากอุณหภูมิและอัตราส่วนสารละลายที่ใช้ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาหรือข้อจำกัดของคอนกรีตคือ สมบัติที่ตัวคอนกรีตนั้นมีความเปราะสูง มีความยืดหยุ่นต่ำกว่าวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น เช่น ยางมะตอย ไม้ และ เหล็ก เป็นต้น ทำให้เมื่อรับแรงกระทำโดยเฉพาะการขัดสีหรือการกระแทกจะทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติหรือเกิดรอยแตกร้าวได้ง่ายส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต ทำให้ผิวถนนเกิดความลื่น ทั้งนี้หากน้ำสามารถซึมผ่านรอยร้าวไปยังชั้นดินใต้ผิวถนน คอนกรีตจะส่งผลให้เกิดเป็นโพรงทำให้ถนนเกิดความเสียหายเป็นอันมาก นอกจากนี้เนื่องจากการที่คอนกรีตมีได้เป็นวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีโพรงและช่องว่างอยู่ในเนื้อคอนกรีตประมาณร้อยละ 0.5-2 โดยปริมาตรและหากโพรงมีความต่อเนื่องกันส่งผลให้น้ำและอากาศสามารถซึมผ่านคอนกรีตได้และเมื่อน้ำและอากาศผ่านไปถึงเหล็กเสริมกันร้าว ส่งผลให้เหล็กกลายเป็นสนิมและเกิดการเพิ่มปริมาตรและทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น

วัสดุหนึ่งที่มีสมบัติสามารถนำไปปรับปรุงให้คอนกรีตมีสมบัติเปราะ ความยืดหยุ่นต่ำ ให้ดีขึ้นได้นั้นคือ วัสดุประเภทยาง โดยยางนั้นได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ เมื่อก้าวถึงยางพารา ประเทศไทยมีพื้นที่ในการปลูกยางพารา 23 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ 4.42 ล้านตันต่อปี ข้อมูลปี2560 มูลค่าประมาณ 280,000 ล้านบาท แต่อย่างไรก็ตามในอดีตยางพารานั้นมีราคาสูงทำให้มีเกษตรกรหันมาปลูกยางเป็นจำนวนมากทั่วทุกภาคของประเทศจนเกินความต้องการของตลาดทำให้ราคายางพาราตกต่ำ ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำยางพาราให้มากขึ้นจากเดิมที่ใช้ในประเทศเพียงร้อยละ 10 ของน้ำยางที่ผลิตได้ทั้งหมด ให้มีการใช้เป็นร้อยละ30 ของน้ำยางที่ผลิตได้ การนำยางพารามาใช้และการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราจึงเป็นแนวทางในการเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรและพัฒนาประเทศไทยอย่างยั่งยืน ซึ่งเป็นที่มาของการนำยางพารามาผสมในจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ผสมกับคอนกรีตนั้นเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้มากที่สุดในโลก จากข้อมูลสถิติพบว่าการผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทุกปีและเฉพาะปี2560 มีการผลิตปูนซีเมนต์รวมกันทั่วโลกเป็นจำนวน 4,000 ล้านตัน เพื่อใช้ในการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นงานขึ้นส่วนอาคารหรืองานผิวทางคอนกรีต ทั้งทวีปปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของโลกในปัจจุบัน

จากปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมางานวิจัยนี้จึงคิดค้นกระบวนการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก่อตัวเร็วผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต เพื่อเป็นต้นแบบถนนคอนกรีตที่สามารถนำน้ำยางพารามาผสมซึ่งเพิ่ม ความยืดหยุ่น ความคงทน ด้านทานการซึมผ่านของน้ำ ทั้งนี้เป็นการลด

ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิต รวมถึงได้ต้นแบบ ถนนที่ก่อตัวและสามารถเปิดผิวจราจรเพื่อให้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

โดยในกระบวนการวิจัย เริ่มจากการเตรียมวัสดุดังต่อไปนี้ เถ้าลอย ทราบ หิน น้ำยางพารา ขัน สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดย เถ้าลอยได้ทำการจัดส่งมาจาก อำเภอแม่เมาะและส่งไปตรวจสอบวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนคุณสมบัติพื้นฐาน ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ ทราบและหินจัดเตรียมโดยทำให้เป็นวัสดุผสมที่มีลักษณะอิมัลชันแห้ง น้ำยางพาราชั้นได้คุณสมบัติพื้นฐานจากบริษัทที่จัดส่งมา ในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง ได้ทำการใช้ วิธีการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังต่อไปนี้ อัตราส่วนอัตราส่วนของสารละลายต่อเถ้าลอย ในอัตราส่วน 0.62, 0.64 และ 0.66 ,ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5, 10, 12.5, 15 และ 17.5 โมลาร์ , อุณหภูมิที่ใช้บ่มตัวอย่าง ที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ,ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย ที่ 0, 0.50, 1.50, 2.50, และ 5.00 โดยน้ำหนัก และ ระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดขนาด 10x10x50 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

จากกระบวนการทางการวิจัย พบว่าสามารถผลิตต้นแบบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก่อตัวเร็ว ผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต ที่มีคุณสมบัติทางกลผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง กล่าวคือมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความสามารถในการรับแรง ดัดสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คุณสมบัติเมื่อเติมน้ำยางพาราชั้น พบว่าช่วยให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นตัวเพิ่มขึ้นและสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักจากการหดสัได้มากขึ้นส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความทนทานสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วจะสามารถกำหนดระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราได้ โดยสามารถปรับระยะเวลาการก่อตัวได้เร็วตั้งแต่ 10-100 นาที ทำให้สามารถปรับใช้ได้กับงานหลายประเภทมากขึ้น

หลังจากการทดสอบผลในห้องทดลองทำให้ได้สัดส่วนผสมและปัจจัยที่ต้องทำการควบคุม และนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราใช้ทดสอบบริเวณพื้นที่ เทศบาลตำบลพระลับ จังหวัดขอนแก่น พบว่าการใช้น้ำยางชั้นในปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักเถ้าลอย เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณยางแห้ง พบว่าถ้าพื้นคอนกรีตหนา 15 เซนติเมตร พื้นที่ตารางเมตร ใช้อย่างแห้ง 330 กรัม โดยเปรียบเทียบกับ ระยะทางพบว่า ถนนหน้ากว้าง 4.5 เมตร หนา 15 เซนติเมตร ใช้อย่างแห้ง 1,500 กิโลกรัม/กิโลเมตร

โดยกระบวนการในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา มิได้มีความแตกต่างจากกระบวนการในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อยู่ทั่วไป มีเพียง 2 ปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมคือระยะเวลาในการผสมในกรณีใช้สัดส่วนที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์ก่อตัวเร็วเพื่อใช้ในงานซ่อม และเปลี่ยนจากน้ำสะอาดเป็นสารละลายต่าง 2 ชนิด โดยต่อผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอยก่อนเพื่อให้เกิดการชะละลายและพร้อมทำปฏิกิริยา และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกับน้ำยางชั้นในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชันที่สมบูรณ์ใน นอกจากนี้พบว่าในกระบวนการเทจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา ขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวจะมีความชื้นเหลือสูงสามารถทำงานได้ง่ายมีลักษณะคล้ายคอนกรีตไหลเข้าแบบด้วยน้ำหนักตัวเองและไม่เกิดการแยกตัวเมื่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราถูกเทเข้าแบบทำการตกแต่งผิวหน้าเหมือนคอนกรีตทั่วไป แต่มีลักษณะสีทางกายภาพแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไปคือมีสีเข้มกว่า เนื่องจากสีที่ได้นั้นเกิดจากแหล่งวัสดุตั้งต้นคือเถ้าลอยซึ่งมีสีเข้มกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ทั่วไป แต่เมื่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราแข็งตัวและแห้งลักษณะของสีจะอ่อนลง และหลังจากการตกแต่งผิวถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเรียบร้อยแล้วใช้เวลาบ่ม 30 นาที ทดสอบโดยเปิดให้รถจักรยานยนต์ และรถยนต์กระบะ สัญจรได้โดยผิวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราไม่เกิดความเสียหาย ขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการวิจัยคือเก็บตัวอย่างที่ใช้ถนนเพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่า กำลังอัดที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง และหลังจากเทผ่านไปเป็นระยะเวลา 60 วันเข้าไปสำรวจลักษณะทางกายภาพของถนนพบว่าถนนยังคงอยู่ในสภาพดีโดยไม่พบความเสียหายใดหลังจากผ่านไป 60 วัน

สรุปผลจากการวิจัยนี้พบว่าสามารถสร้างต้นแบบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับงานซ่อมและสร้างโดยลดระยะเวลาการปิดการจราจรได้และได้ผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่มีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท งานวิจัยนี้หากมีการใช้งานเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางจะสามารถในหลายด้านระดับมหภาค โดยตอบโจทย์ด้านการเพิ่มการใช้ปริมาณน้ำยางพาราเป็นจำนวนมากและยังสามารถขยายผลไปใช้นอกเหนืองานถนนคอนกรีตยังสามารถประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตอื่นได้ การใช้งานเถ้าลอยแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ช่วยด้านสิ่งแวดล้อมถึง 4 ด้านได้แก่ ด้านที่1 ลดการทำลายแหล่งวัตถุดิบซึ่งได้จากธรรมชาติ ในการนำมาผลิตที่มีอยู่จำกัด ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ต่อสัตว์ป่า แหล่งน้ำ อากาศและมนุษย์ ด้านที่2 ลดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งปูนซีเมนต์1ตันจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์1ตัน ส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะเรือนกระจกซึ่งกระทบต่ออุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นและสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง ด้านที่3การใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัดในการนำมาผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้านที่4 เป็นแก้ปัญหาในการจัดการวัสดุเหลือทิ้ง

จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลกระทบอย่างรุนแรงกับคนในชุมชน สิ่งแวดล้อมทางอากาศ และพื้นที่ทิ้งที่มีอย่างจำกัด นอกจากนี้การที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราสามารถกำหนดระยะเวลาก่อตัวและเปิดช่องทางจราจรได้อย่างรวดเร็วส่งผลดีต่อภาคการขนส่งและการเดินทางได้เป็นอย่างมากทำให้ลดอัตราการสูญเสียและสิ้นเปลืองพลังงานจากการที่เปลี่ยนเส้นทางการเดินรถหรือต้องจอดรถในขณะที่กำลังซ่อมช่องทาง ช่วยลดอุบัติเหตุความเสียหายจากการชนเครื่องจักรหรือชนเครื่องกันทางขณะซ่อม ลดเวลาในการเดินทางไม่ให้เกิดอยู่บนถนนขณะซ่อมผิวทาง ทำให้ผู้ป่วยหรือผู้ประสบอุบัติเหตุมีโอกาสมีชีวิตรอดมากขึ้น ทำให้สังคมชุมชนมีความสุขในการใช้ชีวิต

### บทคัดย่อ

ผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเป็นผิวทางที่ผลิตเพื่อทดแทนการใช้ผิวทางคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงาน และส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ จนกลายเป็นปัญหาที่ต้องเร่งแก้ไขโดยใช้วัสดุทดแทนให้มากขึ้น เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้คุณสมบัติสูงกว่าคอนกรีตปกติ และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ให้มีสมบัติที่ดี นอกจากนี้ ความทนทานต่อการนำไปใช้งานเป็นคุณสมบัติสำคัญจำเป็นต้องศึกษาเพื่อนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำน้ำยางพาราซึ่งมีคุณสมบัติด้านการยึดหยุ่นดี และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานลดการกระแทกได้ดีมาผสมกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกล และการต้านทานต่อการขีดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

จากผลการศึกษาพบว่า การผสมน้ำยางพาราเข้าไปในระบบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แนวโน้มในการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง แต่พบว่าการผสมน้ำยางพาราเข้าไปในระบบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตร้อยละ 0.50 – 1.00 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดทุกช่วงอายุตัวอย่าง การใช้คุณสมบัติห้องในการบ่มส่งผลต่อการพัฒนากำลังที่ดีในทางกลับกันการบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงเป็นการเร่งกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นให้สูงขึ้น แต่ลดอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัด และยังพบว่าการใช้คุณสมบัติบ่ม 60 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มไม่เกิน 24 ชั่วโมงสามารถเร่งกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นให้สูงขึ้น และยังสามารถพัฒนากำลังในช่วงอายุปลายได้สูงถึง 465 กก./ตร.ซม. จากการศึกษาทำให้สามารถนำน้ำยางพาราขึ้นมาใช้ผสมวัสดุประเภทซีเมนต์ชนิดจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เพิ่มคุณสมบัติเชิงกลทางด้านต่าง ๆ เช่น การทนทานต่อการขีดสีสูงขึ้น กำลังรับแรงดัดสูงขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง ส่งผลให้ถนนคอนกรีตมีความคงทนต่อการใช้งานนานขึ้นและยังเป็นการนำยางพารามาใช้ได้ประมาณ 1,500 กิโลกรัมเนื้อยางแห้ง ต่อถนน 1 กิโลเมตร สำหรับถนนหนา 15 เซนติเมตรและกว้าง 5 เมตร

## ABSTRACT

Geopolymer concrete is a new binder material which used to alternate ordinary Portland cement concrete. The Portland cement production used natural resources as raw material and needed high energy to produce which affects to the atmosphere. The mechanical properties of geopolymer composite had to improve by heat curing temperature with appropriate curing time, which was different to Portland cement concrete. In addition, a durability of geopolymer composite also had to develop for many applications with high performances. Natural rubber latex is a material which is good in flexibility and high ability in energy absorption. This research aimed to study the effect of natural rubber latex on compressive strength and resistance to abrasion of fly ash based geopolymer concrete.

The result presented that, curing in room temperature had a significant enhanced compressive strength of geopolymer concrete. Conversely, at higher curing temperature, the compressive strength of geopolymer concrete improved higher at an early age but developed with a lower rate in long term. In addition, at curing temperature of 60°C with curing time no longer than 24 h, the compressive strength enhanced at early ages, and the specimens produced maximum compressive strength of 465 kg/cm<sup>2</sup> at standing time of 28 days. From this research, the rubber latex can be used to mix geopolymer-type cement materials. Thus, increasing of mechanical properties such as Higher abrasion resistance Higher bending strength and Reduced water absorption. As a result, the concrete pavement has a more extended repair and able to use about 1,500 kilograms of dry rubber to the concrete pavement 1 kilometer with 15 cm thickness and 5 meters wide.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ถนนคอนกรีตถือเป็นถนนแบบ Rigid Pavement โดยปกติแล้วจะสามารถรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำจากล้อรถได้มากกว่าถนนลาดยาง (Flexible Pavement) หลายเท่า และยังมีคุณภาพการขับขี่มากกว่าอีกด้วย ถนนคอนกรีตในประเทศไทยนิยมก่อสร้างในบริเวณตัวเมืองหรือย่านชุมชน เฉพาะกรมทางหลวงมีถนนคอนกรีตภายใต้ความรับผิดชอบโดยประมาณไม่น้อยกว่า 5,500 กิโลเมตร ปริมาณถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบทรับผิดชอบไม่ต่ำกว่า 1,700 กิโลเมตร, นอกจากนี้ยังมีปริมาณถนนคอนกรีตกรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่น และถนนคอนกรีตในหมู่บ้านจัดสรรและโรงงานอีกเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ในปัจจุบันมีจำนวนรถมากถึง 38 ล้านคัน(กรมการขนส่งทางบก2561) ส่งผลให้การใช้รถสัญจรมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่และระยะทางของถนนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของถนนยังส่งผลให้เกิดการบำรุงทางเพิ่มมากขึ้นตามมาด้วย ทั้งนี้จำนวนและน้ำหนักบรรทุกของรถมีค่าสูงกว่าในอดีตจึงส่งผลให้เกิดการชำรุดของถนนมากขึ้น ส่งผลให้การซ่อมมีการดำเนินการอยู่ตลอดเวลา เป็นปัจจัยทำให้มีการใช้คอนกรีตเป็นจำนวนมากและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการดำเนินงานสร้างและบำรุงทาง ผลเสียที่กระทบอย่างรุนแรงจากการสร้างหรือซ่อมถนนคอนกรีตในย่านชุมชน คือต้องมีการปิดการจราจรเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดปัญหาขึ้นหลายด้าน เช่น ส่งผลให้การจราจรติดขัด เกิดความเสียหายต่อสินค้าทางการเกษตร สิ้นเปลืองพลังงานและเสียเวลาในการเดินทางซึ่งไม่ก่อประโยชน์ใด เกิดอุบัติเหตุขณะซ่อมผิวจราจรได้ง่าย กระทบต่อการขนส่งไม่เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งหากเป็นการขนส่งผู้ได้รับอุบัติเหตุหรือผู้ป่วยอาจส่งผลถึงการสูญเสียชีวิตได้ ส่งผลต่อภาพลักษณ์ของประเทศในการท่องเที่ยว กระทบการตัดสินใจในการลงทุนจากการที่ระบบขนส่งไม่สามารถขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

จากปัญหาข้างต้นทำให้คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงการนำวัสดุประสานชนิดใหม่ที่เรียกว่า จีโพลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติเด่นหลายประการและเหมาะสมสำหรับงานผิวทางจีโพลิเมอร์คอนกรีต เช่น มีระยะเวลาก่อตัวที่สามารถกำหนดได้ มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดี มีความทนทานต่อการขัดสี มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อจีโพลิเมอร์กับเหล็กเสริมดี ทนต่อความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี นอกจากนี้การนำจีโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยมาใช้ยังเป็นการสร้างถนนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเนื่องจากการใช้พลังงานในการผลิตและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลายเท่าตัว ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกจากใช้พลังงานเชื้อเพลิงสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากถึง (Malhotra 2002) ยังต้องใช้ทรัพยากรหินปูนจากการระเบิดภูเขาหรือทำเหมือง แต่ในทางกลับกันจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถใช้วัสดุตั้งต้นจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเช่น แก้วฉนวนหินจากการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า แก้วจากกระบวนการอุตสาหกรรมทางการเกษตร แก้วจากกระบวนการอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้นซึ่งแก้วเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีเป็นจำนวนมากในแต่ละปี นอกจากเป็นการได้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับใช้งานทดแทนคอนกรีตประเภทเดิมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก การนำแก้วเหลือทิ้งมาใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังเป็นการช่วยจัดการปัญหาของการจัดเก็บจัดทิ้งแก้วลอยให้ลดลง จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาของการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์สามารถควบคุมได้จากอุณหภูมิและอัตราส่วนสารละลายที่ใช้ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจีโอโพลิเมอร์มีการหดตัวที่น้อยกว่าคอนกรีต แต่ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องทำการศึกษา (Dias and Thaumaturgo 2005; Alomayri, Shaikh et al. 2014; Ranjbar, Talebian et al. 2016) และเนื่องจากสารซีเมนต์มีความเป็นเซรามิกมีลักษณะแข็งแต่เปราะอาจก่อให้เกิดความเสียหายแบบฉับพลัน (Kuenzel C et al.2012; Zuhua Z et al 2009; Ridditirud C et.al 2011) จากแรงกระทำของยานพาหนะในลักษณะกระทำซ้ำได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต ทำให้ผิวถนนเกิดความลื่น ทั้งนี้หากน้ำสามารถซึมผ่านรอยร้าวไปยังชั้นดินใต้ผิวถนนคอนกรีตจะส่งผลให้เกิดเป็นโพรงทำให้ถนนเกิดความเสียหายเป็นอันมาก นอกจากนี้เนื่องจากการที่คอนกรีตมิได้เป็นวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีโพรงและช่องว่างอยู่ในเนื้อคอนกรีตประมาณร้อยละ 0.5-2 โดยปริมาตรและหากโพรงมีความต่อเนื่องกันส่งผลให้น้ำและอากาศสามารถซึมผ่านคอนกรีตได้และเมื่อน้ำและอากาศผ่านไปถึงเหล็กเสริมกันร้าว ส่งผลให้เหล็กกลายเป็นสนิมและเกิดการเพิ่มปริมาตรและทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น

วัสดุหนึ่งที่มีสมบัติสามารถนำไปปรับปรุงให้คอนกรีตมีสมบัติเปราะ ความยืดหยุ่นต่ำ ให้ดีขึ้นได้นั้นคือ วัสดุประเภทยาง จากงานวิจัยของ (Muhammad, Ismail et al. 2012) พบว่าการเพิ่มน้ำยางเข้าไปในระบบสามารถลดการดูดซึมน้ำในคอนกรีต (Ismail, Muhammad et al. 2009)ใช้สารอีลาสโตเมอร์ในงานคอนกรีตสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต มีความทนทานสูงขึ้นได้ และ(Fakhri and Saberi. K 2016) พบว่าการแทนที่เศษยางรถยนต์เก่าในมวลรวมละเอียดส่งผลให้คอนกรีตมีความยืดหยุ่นดี สามารถยืดอายุการใช้งานของผิวทางคอนกรีตได้ โดยยางนั้นได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เมื่อกล่าวถึงยางพาราประเทศไทยมีพื้นที่ในการปลูกยางพารา 23 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ

4.42 ล้านตันต่อปี ข้อมูลปี2560 มูลค่าประมาณ 280,000 ล้านบาท แต่อย่างไรก็ตามในอดีตยางพารานั้นมีราคาสูงทำให้มีเกษตรกรหันมาปลูกยางเป็นจำนวนมากทั่วทุกภาคของประเทศจนเกินความต้องการของตลาดทำให้ราคายางพาราทกต่ำ ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำยางพาราให้มากขึ้นจากเดิมที่ใช้ในประเทศเพียงร้อยละ 10 ของน้ำยางที่ผลิตได้ทั้งหมด ให้มีการใช้เป็นร้อยละ30 ของน้ำยางที่ผลิตได้ การนำยางพารามาใช้และการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราจึงเป็นแนวทางในการเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรและพัฒนาประเทศไทยอย่างยั่งยืน ซึ่งเป็นที่มาของการนำยางพารามาผสมในจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ผสมกับคอนกรีตนั้นเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้มากที่สุดในโลก จากข้อมูลสถิติพบว่าการผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทุกปีและเฉพาะปี2560 มีการผลิตปูนซีเมนต์รวมกันทั่วโลกเป็นจำนวน 4,000 ล้านตัน เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นงานชิ้นส่วนอาคารหรืองานผิวทางคอนกรีต ทั้งปีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของโลกในปัจจุบัน

จากปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมางานวิจัยนี้จึงคิดค้นกระบวนการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก่อตัวเร็วผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต เพื่อเป็นต้นแบบถนนคอนกรีตที่สามารถนำน้ำยางพารามาผสมซึ่งเพิ่ม ความยืดหยุ่น ความคงทน ด้านทานการซึมผ่านของน้ำ ทั้งนี้เป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิต รวมถึงได้ต้นแบบถนนที่ก่อตัวและสามารถเปิดผิวจราจรเพื่อให้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้มีความยืดหยุ่นทนทาน มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้เป็นผิวทางแทนการใช้คอนกรีตแบบเดิม และง่ายต่อการซ่อมแซม โดยผสมยางพาราธรรมชาติที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเข้าไปในระบบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตส่งผลให้คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเหมาะสมกับประเภทของงาน เพื่อควบคุมคุณสมบัติให้เหมาะสมกับงานผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยการเปลี่ยนแปลง ร้อยละของยางพารา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นผิวทางที่มีความยืดหยุ่น มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ต้นทุนต่ำ ช่วยส่งเสริมการเลือกใช้วัสดุรีไซเคิลเพิ่มขึ้นในการก่อสร้างถนนอย่างยั่งยืน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 พัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับงานซ่อมหรือสร้างถนนคอนกรีตให้ก่อตัวเร็วลดระยะเวลาการปิดการจราจร
- 1.2.2 สามารถผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติได้มาตรฐานของ ถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท

## 1.3 สมมติฐานของโครงการ

สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตห้ใช้ในงานผิวทางคอนกรีต และงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตได้

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยที่เหมาะสม, อัตราส่วนมวลรวมต่อเถ้าลอยที่เหมาะสม, ร้อยละการเติมน้ำ ยางพารา, ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์, อุณหภูมิบ่ม

1.4.2 ผลิตให้ได้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมยางพารามีคุณภาพด้านกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่ต่ำกว่า 32.5 Mpa และมีค่า Flexural strength ที่ 28 วันระหว่าง 3.0-5.0 Mpa ซึ่งเป็นขั้นต่ำตามมาตรฐานกรมทางหลวง

1.4.3 ทดสอบระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

1.4.4 ทดสอบค่าการต้านทานการขัดสี

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา ได้แก่

1.4.1 เถ้าที่ใช้เป็นเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ. ลำปาง

1.4.2 ทรายหยาบจาก จ.ขอนแก่น โดยควบคุมให้มีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในช่วง 2.4-3.0

1.4.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด (Sodium hydroxide)

1.4.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate)

1.4.5 น้ำกลั่นบริสุทธิ์สำหรับการทดลอง และน้ำประปาพัก1อาทิตย์ใช้สำหรับการก่อสร้าง

ถนน

1.4.6 น้ำยางพาราที่ใช้ในสัดส่วนผสมเป็นน้ำยางชั้น 60% มีปริมาณยางแห้งประมาณ 60% และมีค่าเป็นประจุลบ

1.4.7 หินย่อยขนาด 3/4"

## 1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

การทดสอบผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดโดยการทดสอบตัวอย่างขนาด 10×10×10 ซม. และขนาด 10×10×50 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด และทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ดังนี้

1.5.1 อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อทราย และหินเท่ากับ 1:2:4 ตามลำดับ

1.5.2 อัตราส่วนของสารละลายต่อเถ้าลอย ในอัตราส่วน 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.66

1.5.3 อัตราส่วนของสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 0.67

1.5.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8, 10, 12.5, และ 15 โมลาร์

1.5.5 ผลจากอุณหภูมิในการบ่มคือ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส

1.5.6 ผลของตัวอย่างโดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อายุ 7, และ 28 วัน

1.5.7 ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์ต้นแบบคอนกรีตก่อตัวเร็วผสมน้ำยางพาราสำหรับงานผิวทางคอนกรีต ที่มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบเดิม

1.6.2 วิธีการนำเอน้ำยางพารามาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อศึกษาสมบัติในงานผิวทางคอนกรีต และเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำยางพาราของประเทศในอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้านวัสดุซีเมนต์

1.6.3 กรมทางหลวงชนบท มีวัสดุทางเลือกที่มีมาตรฐานสำหรับใช้ในงานทาง

1.6.4 สามารถนำเอาวัสดุเหลือทิ้งประเภทเถ้าลอย มาบริหารจัดการใช้งานให้เกิดมูลค่าและเกิดประโยชน์สูงขึ้น

## บทที่ 2

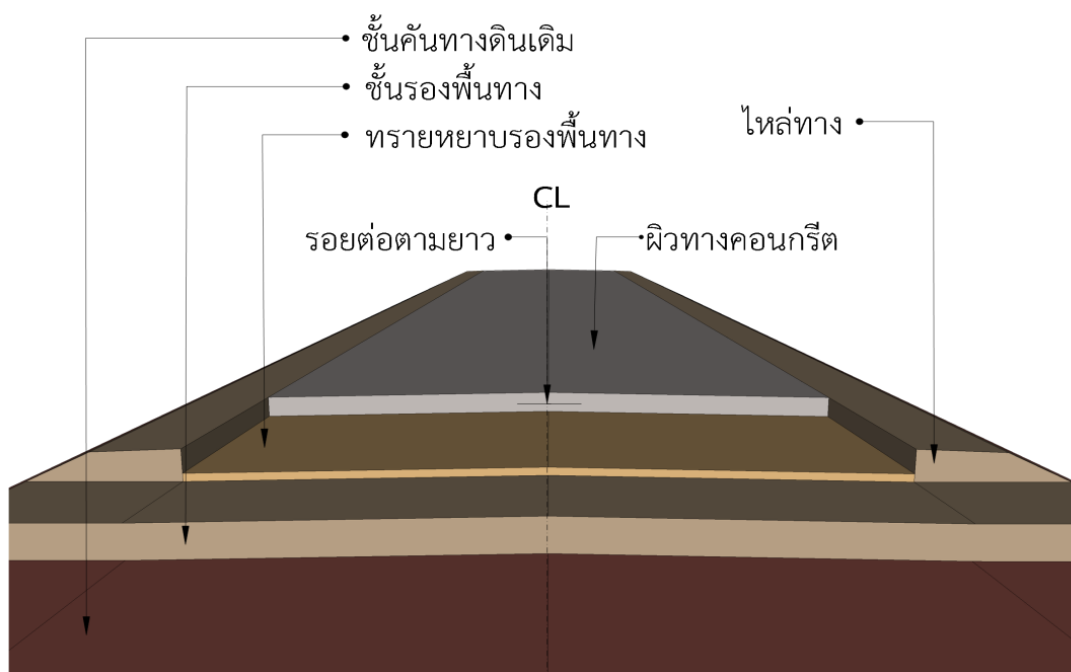
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตถือเป็นถนนแบบ Rigid Pavement โดยปกติแล้วจะสามารถรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักระทำได้มากกว่าถนนลาดยาง (Flexible Pavement) หลายเท่า และยังมีคุณภาพการขับขี่มากกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างถนนคอนกรีตต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าและต้องมีการบำรุงรักษาเป็นอย่างดีตลอดอายุการใช้งานถนนคอนกรีตในประเทศไทยนิยมก่อสร้างในบริเวณตัวเมืองหรือย่านชุมชน

##### 2.1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีรูปตัดขวาง (Typical Cross Section) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย



รูปที่ 2.1 รูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต

##### 2.1.2 ผิวทางคอนกรีต (Concrete Slab)

ทำจากคอนกรีต บางทีเรียกว่า พื้นทางคอนกรีต (Concrete Base) เนื่องจากเป็นชั้นทางหลักที่ทำหน้าที่รับแรงกระทำจากยานพาหนะ และถ่ายแรงลงสู่ชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมต่อไป นอกจากนี้ ผิวทางคอนกรีต ยังทำหน้าที่ให้คุณภาพการขับขี่ และ Skid Resistance อีกด้วย

### 2.1.3 รองพื้นทาง (Subbase)

บางครั้งมีผู้เรียกสับสนว่าเป็นชั้นพื้นทาง (Base) เพราะเป็นชั้นที่สองจากด้านบน ซึ่งจากที่กล่าวมาแล้วว่า ในถนนคอนกรีตนั้นชั้นคอนกรีตจะทำหน้าที่หลักในการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินเดิม จึงทำหน้าที่เป็นชั้นพื้นทางไปในตัว ชั้นวัสดุที่อยู่ใต้ชั้นคอนกรีตจึงเป็นส่วนประกอบของถนนคอนกรีตส่วนหนึ่งการเพิ่มความหนาของชั้นรองพื้นทางเพื่อเพิ่มกำลังของถนนคอนกรีตจะไม่ค่อยมีผลมากนัก อย่างไรก็ตามชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีตมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- (1) เป็น Working Platform สำหรับเครื่องจักรในการก่อสร้าง
- (2) เพื่อให้การรองรับแผ่นคอนกรีตมีความเรียบ, สมำเสมอ
- (3) ลดการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต
- (4) เพื่อป้องกันการเกิด Pumping บริเวณรอยต่อ

### 2.1.4 ชั้นดินเดิม (Subgrade)

ชั้นดินเดิม (Subgrade) คือ ดินเดิมหรือดินคันทาง (Embankment) ปกติแล้วในการออกแบบถนนคอนกรีตความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินเดิมจะวัดในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า  $k$  ซึ่งได้จากการทดสอบ Plate Bearing Test (ASTM) แต่อาจจะเทียบค่า  $k$  กับค่า CBR ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันมากกว่าก็ได้

### 2.1.5 ไหล่ทาง (Shoulder)

ทำหน้าที่ระบายน้ำออกจากผิวทาง (น้ำฝน) และเป็นที่จอดรถฉุกเฉินในการณีรถเสียหรือเป็นช่องจราจรสำหรับจักรยานและจักรยานยนต์ ไหล่ทางอาจทำด้วยแอสฟัลท์หรือคอนกรีต ซึ่งจะมีผลต่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางคอนกรีตด้วย

### 2.1.6 รอยต่อ (Joint)

ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีการทำรอยต่อบนผิวคอนกรีตเป็นช่วง ๆ ตามยาวและตามขวางของถนน แบ่งผิวคอนกรีตออกเป็นแผ่นๆ รอยต่อเหล่านี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเกิดรอยแตก (Crack) เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, ป้องกันการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต เมื่อคอนกรีตขยายตัวและเป็นรอยต่อเนื่องจากการหยุดพักงานก่อสร้าง แรงกระทำจะถ่ายจากแผ่นคอนกรีตแผ่นหนึ่งไปสู่อีก

แผ่นหนึ่งโดยเหล็กเดือย (Dowel Bar) และเหล็กยึด (Tie Bar) รายละเอียดเกี่ยวกับรอยต่อชนิดต่าง ๆ จะได้กล่าวต่อไป

## 2.2 โครงสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย

ถนนคอนกรีตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตประเภท JRPC ขนาดของแผ่นคอนกรีต กว้าง 3.50 เมตร ยาว 10.00 เมตร มีชั้นคอนกรีตหนา 23 - 25 ซม. ไหล่ทางมีทั้งที่เป็นแอสฟัลท์คอนกรีตและที่เป็นคอนกรีต โดยปกติจะมีชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นลูกรังหนา 15 ซม. และมีชั้นทรายหนา 10 ซม. อยู่ระหว่างแผ่นคอนกรีตกับชั้นลูกรังเพื่อป้องกันการเกิด Pumping

## 2.3 ชนิดของถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตแบ่งตามการเสริมเหล็กและรอยต่อสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

### 2.3.1 Joint Plain Concrete Pavement (JPCP)

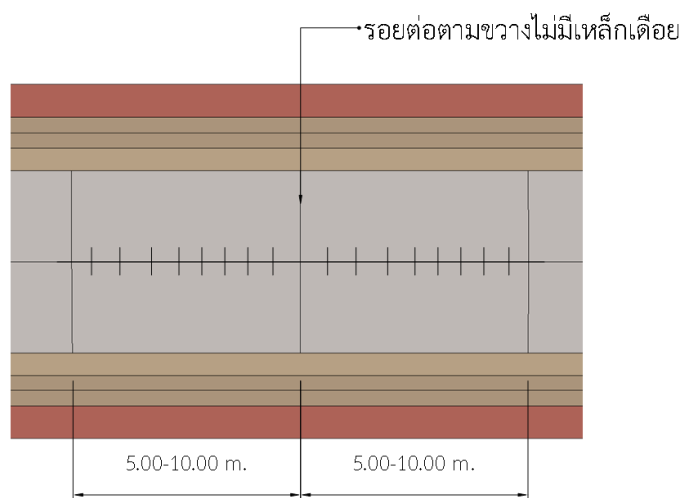
Joint Plain Concrete Pavement คือ ถนนคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมกันร้าว การถ่ายแรงบริเวณรอยต่อเกิดจากการขัดกันของมวลรวมของรอยแตกได้รอยต่อ แต่เพื่อให้การถ่ายแรงมีประสิทธิภาพจึงมักจะติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel) บริเวณรอยต่อด้วย ระยะระหว่างรอยต่อถึงรอยต่อจะมีระยะไม่มาก เนื่องจากไม่มีเหล็กเสริมกันร้าว โดยปกติจะมีระยะห่างประมาณ 4-6 เมตรในรูปที่ 2.2(ก)

### 2.3.2 Joint Plain Concrete Pavement (JPCP)

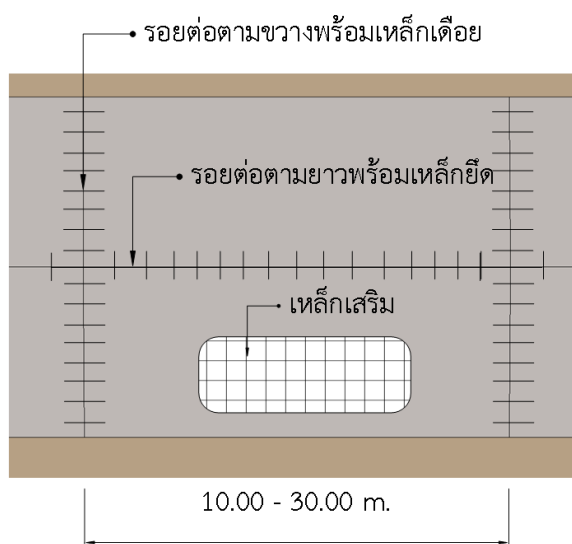
Joint Reinforced Concrete Pavement (JRPC) คือ ถนนคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กเสริมกันร้าวบริเวณผิวส่วนบนของชั้นคอนกรีตและมีเหล็กเดือยเพื่อการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อด้วย ถนนคอนกรีตชนิดนี้สามารถสร้างให้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อห่างกว่าชนิด JPCP ได้ เนื่องจากมีเหล็กเสริมกันร้าวป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตก โดยปกติถนนคอนกรีตชนิดนี้จะสร้างให้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อไม่เกิน 12 เมตร ในรูปที่ 2.2(ข)

### 2.3.3 Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

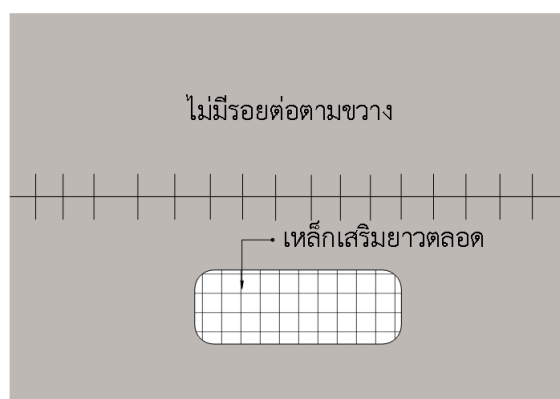
Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) คือ ถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างโดยไม่มีรอยต่อตามขวางเลย ทั้งนี้รอยแรกจะถูกป้องกันโดยเหล็กเสริมกันร้าวที่มีมากกว่าแบบ JRPC เหล็กเสริมกันร้าวนี้จะทำหน้าที่ยึดรอยแตกที่เกิดขึ้นเข้าด้วยกัน และทำหน้าที่ถ่ายแรงบริเวณรอยแตก ในรูปที่ 2.2(ค)



(ก) JPCP



(ข) JRCP



(ค) CRCP

รูปที่ 2.2 ชนิดของถนนคอนกรีต

## 2.4 การออกแบบโครงสร้างถนนคอนกรีตตามวิธีการของ Portland Cement Association (PCA)

Portland Cement Association (PCA) ได้พัฒนาและจัดทำคู่มือการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตมาตั้งแต่ปี 1951 และล่าสุดเป็นฉบับปี 1984 ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตที่ยอมรับกันทั่วโลก การออกแบบตามวิธีของ PCA ฉบับปี 1984 นั้น มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทางพื้นฐาน, การทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต ตลอดจนข้อมูลต่าง ๆ จากหลาย ๆ แหล่ง ตามวิธีการออกแบบของ PCA (1984) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนาของคอนกรีต ประกอบด้วย

### 2.4.1 ความแข็งแรงของดินเดิม

ความแข็งแรงของดินเดิมสำหรับการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตอยู่ในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า  $k$  ซึ่งสามารถวัดได้โดยการทดสอบ Plate Bearing Test ตามมาตรฐาน AASHTO T 235 โดยมีวิธีการโดยย่อคือการกระทำแรงแก่ดินผ่านแผ่นเหล็กรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 นิ้ว (762 มิลลิเมตร) ด้วยแรงกระทำคงที่ขนาดประมาณ 10 psi (69 kPa) แล้ววัดค่าการทรุดตัว (Deflection) ของดิน ค่า Modulus of Subgrade Reaction สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (1)$$

เมื่อ  $P$  = แรงกดที่กระทำต่อดิน (10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

$\Delta$  = ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น (นิ้ว)

ค่า  $k$  มีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้วต่อนิ้ว (Pound per square inch per inch) หรือจะเรียกว่าปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว (pound per cubic inch, pci) ก็ได้ค่า  $k$  นี้เปรียบได้กับค่าคงที่ของสปริง หรือค่าแรงดันที่จะทำให้ดินยุบลงไป 1 หน่วยความยาว ไม่ใช่ค่า Young's Modulus ( $E$ ) ของดิน การทดสอบ Plate Bearing Test อาจจะเสียเวลาและต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงอาจเทียบค่า  $k$  กับค่า CBR ซึ่งทดสอบได้ง่ายกว่า, เร็วกว่า และใช้ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าได้จาก chart ใน รูปที่ 2.3

ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทยจะประกอบด้วยชั้นรองพื้นทางเหนือชั้น Subgrade ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของชั้นรองพื้นทางที่เพิ่มขึ้นด้วย กล่าวคือ ค่า  $k$  ที่ใช้ออกแบบจะต้องเป็นค่ารวมของทั้งสองชั้น Portland Cement Association (1984) ได้แนะนำค่า  $k$  ที่เพิ่มขึ้นโดยประมาณเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นรองพื้นทาง โดยถ้าหากชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุที่ไม่มี

ความเชื่อมแน่น (Unbound) ค่า k สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 และถ้าหากชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นวัสดุที่มีความเชื่อมแน่น (Bound) เช่น ดินซีเมนต์ ค่า k สามารถหาได้จาก ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ค่า K ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางชนิด Unbound Material อยู่เหนือดิน Subgrade

| ค่า K ของ<br>Subgrade, pci | ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทาง, pci |        |        |         |
|----------------------------|----------------------------------|--------|--------|---------|
|                            | 4 นิ้ว                           | 6 นิ้ว | 9 นิ้ว | 12 นิ้ว |
| 50                         | 65                               | 75     | 85     | 110     |
| 100                        | 130                              | 140    | 160    | 190     |
| 200                        | 220                              | 230    | 270    | 320     |
| 300                        | 320                              | 330    | 370    | 430     |

ที่มา: การออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ, 2546

ตารางที่ 2.2 ค่า K ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางชนิด Bound Material อยู่เหนือดิน Subgrade

| ค่า K ของ<br>Subgrade, pci | ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทาง, pci |        |        |         |
|----------------------------|----------------------------------|--------|--------|---------|
|                            | 4 นิ้ว                           | 6 นิ้ว | 9 นิ้ว | 12 นิ้ว |
| 50                         | 170                              | 230    | 310    | 390     |
| 100                        | 280                              | 400    | 520    | 640     |
| 200                        | 470                              | 640    | 830    | -       |

ที่มา: การออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ, 2546

#### 2.4.2 ความแข็งแรงของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับการออกแบบคือ ค่า Flexural Strength ที่ 28 วัน โดยปกติค่าที่เหมาะสมสำหรับถนนคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 3.0 – 5.0 MPa อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจะควบคุมคุณสมบัติคอนกรีตที่ค่า Compressive Strength ซึ่งทดสอบได้สะดวกกว่า ตามมาตรฐานกรมทางหลวงคอนกรีตที่จะนำมาสร้างถนนคอนกรีตจะต้องมี Compressive Strength ที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 32.5 MPa

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength และค่า Flexural Strength เป็นไปตามสมการ

$$f_f = 0.75\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

เมื่อ  $f_f$  = Flexural Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน

$f_c'$  = Compressive Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน

### 2.4.3 ประเมินการจราจร

ใช้เฉพาะปริมาณการจราจรของรถหนักที่มี 6 ล้อขึ้นไปเท่านั้น ได้แก่ รถบรรทุกขนาดกลาง (Medium Truck) รถโดยสารขนาดใหญ่ (Heavy Bus) และรถบรรทุกขนาดใหญ่ (Heavy Truck) จำนวนและน้ำหนักของเพลาคาดว่าจะแล่นผ่านถนนในช่วงระยะเวลาการออกแบบประมาณจาก

(1) Average Daily Traffic (ADT) คือ ปริมาณการจราจรของพาหนะทุกชนิดเฉลี่ยต่อวันทั้งสองทิศทาง

(2) Average Daily Truck Traffic (ADTT) คือ ปริมาณของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันทั้งสองทิศทาง

(3) การกระจายของน้ำหนักบรรทุกบนเพลารถบรรทุก

ข้อมูล ADT และ ADTT สามารถหาได้จากการสำรวจปริมาณการจราจร และ ADTT อาจแสดงในรูปของ ร้อยละของ ADT ได้ ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกที่จะวิ่งผ่านช่องจราจรออกแบบ (Design Lane) ในช่วงระยะเวลาออกแบบสามารถคำนวณจาก

$$\text{จำนวนรถบรรทุกที่ผ่าน Design Lane} = \text{ADT} \times \frac{\% \text{ADTT}}{100} \times \text{Lane Factor} \times \text{GF} \quad (3)$$

เมื่อ Lane Factor = อัตราส่วนของรถบรรทุกที่จะวิ่งผ่าน Design Lane ปริมาณได้จากตาราง

GF = Cumulative Growth Factor

$$\text{ADT} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

$r$  = อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถบรรทุกต่อปี (%)

$n$  = อายุการออกแบบ (ปี)

### 2.4.4 Axle Load Distribution

ปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบประกอบด้วยเพลาน้ำหนักแตกต่างกัน ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปริมาณของเพลาน้ำหนักของเพลาน้ำหนักต่าง ๆ ที่คาดว่าจะ

จะวิ่งผ่าน Design Lane ในช่วงเวลาที่ออกแบบ ข้อมูลนี้สามารถประมาณได้จากด้านข้างน้ำหนักบรรทุกทุกหรือจากการวัดน้ำหนักแบบ Weight – In-Motion

#### 2.4.5 Load Safety Factor

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่จะนำไปคูณกับน้ำหนักที่คาดว่าจะกระทำต่อถนนที่ประมาณได้ในขั้นตอนที่ผ่านมา ค่า Load Safety Factor ขึ้นอยู่กับความสำคัญของถนนที่จะออกแบบ PCA ได้แนะนำค่า Load Safety Factor ที่เหมาะสมกับถนนต่าง ๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า Load Safety Factor

| Load Safety Factor | ชนิดของถนน                                                                                                                                                                                            |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.2                | ถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงหลายช่องจราจรที่ต้องรองรับการจราจรรถหนักจำนวนมากโดยไม่มีการหยุดชะงัก และต้องการคุณภาพการบริการ (Serviceability) สูงตลอดอายุการใช้งานโดยเสียค่าบำรุงรักษาต่ำ |
| 1.1                | ถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway), ทางหลวงสายหลักที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนปานกลาง                                                                                                       |
| 1.0                | ถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนน้อย                                                                                                                                                      |

ที่มา: การออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต สำนักวิศวกรและตรวจสอบ, 2546

#### 2.4.6 อายุการออกแบบ

ถนนคอนกรีตอาจมีอายุยืนยาวถึง 40 ปี ถ้ามีการบำรุงรักษาที่ดีสม่ำเสมอ หรืออาจจะมีอายุการใช้งานต่ำกว่า 20 ปี ก็ได้หากมีการบรรทุกเกินน้ำหนักที่ได้คาดการณ์ไว้มาก อย่างไรก็ตามอายุการออกแบบของถนนคอนกรีตโดยปกติจะกำหนดที่ 20 ปี

#### 2.4.7 การออกแบบความหนาแน่นทางคอนกรีต

ถนนคอนกรีตมีสมมติฐานว่า มีรูปแบบความเสียหายใน 2 ลักษณะ คือ

(1) การเกิดความล้า (Fatigue) เนื่องจากการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต

(2) การเกิดการสึกกร่อน (Erosion) ของชั้นดินเดิมหรือชั้นรองพื้นทาง เนื่องจากการเกิดการแอ่นตัวเข้าไปเข้ามาของคอนกรีตบริเวณรอยต่อหรือรอยแตก

โดยหลักการแล้ว ผู้ออกแบบจะสมมติความหนาของชั้นทางคอนกรีตขึ้นมาก่อน รวมทั้งตัดสินใจว่าจะใช้ชั้นรองพื้นทางหรือมีไหล่ทางคอนกรีตหรือไม่ จากนั้นตรวจสอบว่าโครงสร้างถนนที่ออกแบบนั้นสามารถทนทานต่อน้ำหนักเพลลาที่เกิดจากปริมาณการจราจรทั้งหมดที่คาดการณ์ไว้ได้ โดย

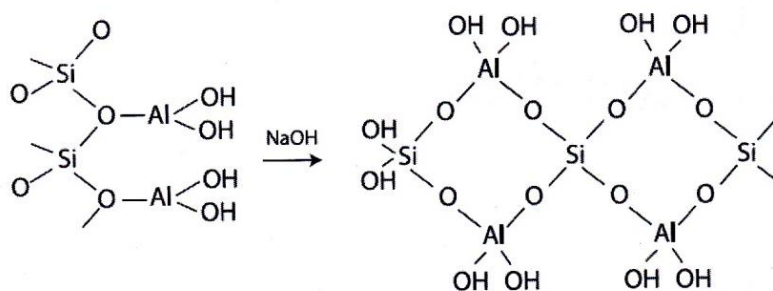
ไม่เกิดความเสียหายในทั้งสองลักษณะข้างต้น ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าโครงสร้างถนนเกิด Fatigue หรือ Erosion มากกว่า 100% ก็ทำการเพิ่มความหนาของคอนกรีตแล้วทำการตรวจสอบซ้ำ ความหนา คอนกรีตที่ยอมรับก็คือ ความหนาคอนกรีตที่ต่ำที่สุดที่เมื่อรับน้ำหนักกระทำจากปริมาณการจราจรที่ คาดการณ์ไว้แล้ว จะเกิดความเสียหายในลักษณะ Fatigue และ Erosion ไม่เกิน 100%

## 2.5 จีโอโพลิเมอร์

### 2.5.1 ประวัติและการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้มีการพัฒนามาเป็นระยะเวลามากกว่า 10 ปี เพื่อทดแทนการใช้งาน วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ และหันมาสนใจปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 1 ตัน เช่นกัน นอกจากนี้ วัสดุก่อสร้างจาก ปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตในบางสภาวะมีอายุการใช้งานสั้นและเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง เช่น ระบบท่อใต้ดินในเมืองดูไบที่สร้างแล้วเสร็จในปี ค.ศ. 1975 และต้องการการซ่อมแซมอย่างสมบูรณ์ในปี พ.ศ. 1986 หรือประมาณ 40% จองสะพานในสหรัฐอเมริกาจากจำนวน 600,000 สะพาน ประสบ ปัญหาเรื่องการกัดกร่อน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเป็นเงินมากถึง 50 พันล้านดอลลาร์ ปัญหา เรื่องความคงทนของวัสดุก่อสร้างจากปูนซีเมนต์อาจเกิดจากการหล่อ หรือการบ่มที่ไม่เหมาะสม แต่ สาเหตุหลักเกิดจากสมบัติของวัสดุ เช่น การมีน้ำหรือองค์ประกอบที่มีผลเสียต่อวัสดุ (Aggressive elements) ในส่วนผสม ทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นและปัญหาเรื่องการกัดกร่อน นอกจากนี้การมี สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ในปริมาณสูงในคอนกรีตทำให้เกิดการกัด กร่อนในสภาวะกรดได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุประสานใหม่เพื่อทดแทนการใช้งานซีเมนต์ และ วัสดุทางเลือกสำหรับงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นวัสดุประสานจากปฏิกิริยาอัลคาไล (Alkali-activated binder)

ในปี ค.ศ. 1972 Davidovits วิศวกรเคมีชาวฝรั่งเศส ได้พัฒนาวัสดุโพลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic polymer) โดยทำปฏิกิริยาระหว่างดินเกาไลน์หรือดินขาว (สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต) กับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ที่อุณหภูมิ 100 – 150 องศาเซลเซียส และเกิดปฏิกิริยาโพลิ คอนเดนเซชัน (Polycondensation) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

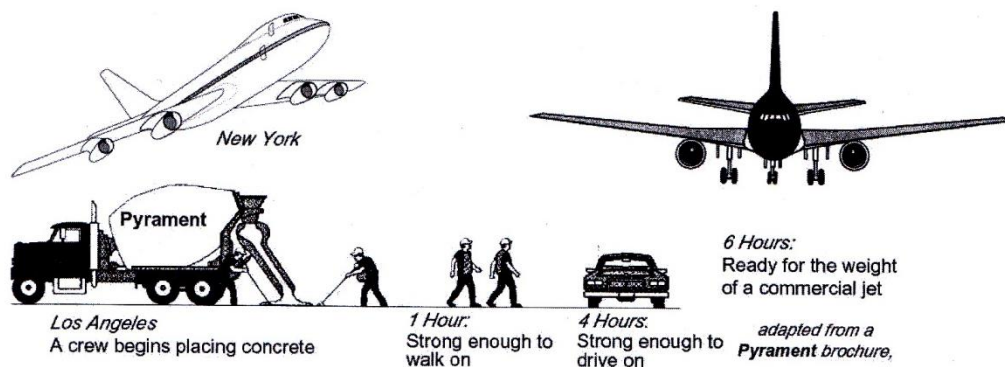


รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันของดินเกาสลิน ที่มา: (Davidovits, 1979)

ต่อมา Davidovits ได้พัฒนาวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตโครงสร้าง 3 มิติ จากสารที่มีความเป็น อสัณฐานเป็นสารกึ่งผลึก ในปี ค.ศ. 1979 จึงได้นิยามชื่อเป็นภาษาฝรั่งเศสว่า “Geopolymers” หรือภาษาอังกฤษว่า “Geopolymer” อ่านว่า “จีโอโพลิเมอร์” มีความหมายว่าโพลิเมอร์เชิงแร่ที่ได้จากวิธีเคมีธรณี (Geochemistry) หรือการสังเคราะห์ทางธรณี (Geosynthesis) เนื่องจากสังเคราะห์ครั้งแรกจากดินเกาสลิน

แนวความคิดการพัฒนามาตรฐานจีโอโพลิเมอร์เริ่มแรกมาจากการปรับกระบวนการผลิตที่ชาวโรมันและชาวอียิปต์ใช้ โดย Davidovits ได้เสนอว่าปิรามิดไม่ได้สร้างมาจากหินตามธรรมชาติแต่สร้างมาจากหินตามธรรมชาติแต่สร้างมาจากส่วนผสมที่มนุษย์ผลิตขึ้น ซึ่งเป็นส่วนผสมของหินปูนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกตและน้ำ เนื่องจากผลการวิเคราะห์หินปิรามิดไม่พบชั้นแคลเซียมที่เกิดจากการทับถมเหมือนกับในหินตามธรรมชาติ เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค XRD พบวัสดุประสานพวกผลึก  $\text{CaCO}_3$  เป็นส่วนใหญ่ รวมถึงวัสดุฐานที่ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตและซีโอไลต์ ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ในชั้นส่วนปิรามิด

การใช้งานจีโอโพลิเมอร์ครั้งแรกมีขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1973 -1976 โดยใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น แผ่นฉนวนทนไฟที่ใช้จีโอโพลิเมอร์เคลือบบนผิวไม้ทั้ง 2 ด้าน อย่างไรก็ตาม สมบัติของวัสดุยังไม่ดีเท่าที่ควร ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 -1980 ได้มีการพัฒนามาตรฐานจีโอโพลิเมอร์ชนิดของเหลวจากเมตาเกาสลิน (Metakaolin) หรือดินขาวเผา โดยใช้สารละลายอัลคาไลซิลิเกตเพื่อผลิตเป็นวัสดุทนไฟทดแทนสารเรซินอินทรีย์ ซึ่งพบว่าจีโอโพลิเมอร์ทนไฟได้ดี ในปี ค.ศ. 1984 ได้มีการพัฒนามาตรฐานผสมระหว่างจีโอโพลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้ผลิตภัณฑ์ชื่อ Pyrament ที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 80% และสารจีโอโพลิเมอร์ 20% และให้ค่ากำลังอัดช่วงต้นที่สูงอย่างรวดเร็วเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อมแซมลานบินคอนกรีตที่พร้อมรองรับการขึ้นลงของเครื่องบินภายในเวลา 4-6 ชั่วโมง ทางเดินในอุตสาหกรรมและถนนทางหลวง ซึ่งจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์สามารถให้ค่ากำลังอัด 20 เมกะปาสคาล ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตธรรมดาใช้เวลาหลายวัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การใช้งานจีโอโพลิเมอร์วัสดุสำหรับงานซ่อมแซมลานบินคอนกรีต

ในปี ค.ศ. 1987 ได้เริ่มมีการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม โดยในประเทศอุตสาหกรรมได้ผสมของเสียมีพิษ พกโลหะหนักและกากกัมมันตรังสี (Radioactive waste) ลงในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อกักเก็บของเสียดังกล่าวไม่ให้ถูกชะลงในสิ่งแวดล้อม และสามารถลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทางเทคโนโลยีคอนกรีตและวิธีหลีกให้เป็นแก้ว (Vitrification) ที่อุณหภูมิสูง

จีโอโพลิเมอร์ได้รับความสนใจมากขึ้นเมื่อมีประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีสาเหตุจากปรากฏการณ์เรือนกระจก และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สู่อากาศของอุตสาหกรรมต่างๆ โดยอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมต้นๆ ที่ผลิตก๊าซดังกล่าว จากการวิจัยของ Davidovits รายงานว่าวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์จากดินเกาส 1 ตัน ทำให้เกิดก๊าซ  $\text{CO}_2$  0.180 ตัน (จากการเผาเชื้อเพลิง) ในขณะที่การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ทำให้เกิดก๊าซ  $\text{CO}_2$  1 ตัน นั่นคือจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย 1 ตัน ปลดปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ประมาณ 9 เท่า

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น โดยการนำเถ้าทิ้งต่างๆ มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตนอกเหนือจากเถ้าเกาส เช่น แร่ธาตุพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าแกลบ โดยเถ้าลอยมีการนำมาศึกษาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีสมบัติปอซโซลานที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งมีส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐานในอนุภาค ส่วนที่เป็น อสัณฐานเป็นส่วนทำปฏิกิริยาเกิดเจลจีโอโพลิเมอร์เชื่อมส่วนที่เป็นผลึกที่ให้ง่ายแก่การอัดได้เป็นวัสดุแข็งผลึก โดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยให้กำลังอัดสูงในระยะเวลานานขึ้นและมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

### 2.5.2 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์

วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmentally friendly materials): การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุก 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ 1 ตันหรือ ประมาณ 5-8 % ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลก ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) และเป็นสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) จากการผลิตปูนซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์มีสมบัติคล้าย

วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ แต่มีปฏิกิริยาและโครงสร้างทางเคมีต่างกัน การผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการเผาหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ สารตั้งต้นมักเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีซิลิกาและอะลูมินาอสัณฐานเป็นองค์ประกอบ เช่น แก้วจากการเผาถ่านหิน (ทั้งแก้วลอยและแก้วกันตะ) แก้วเคลือบ และแก้วชีวมวล เป็นต้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากแก้วทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ และลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี

**ค่ากำลังอัด (Compressive strength) :** จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานพวกอะลูมิโนซิลิเกต ที่ให้สมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้นหากใช้ความร้อนเร่งปฏิกิริยา แม้ว่าจีโอโพลิเมอร์ต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบูรณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45-70 °C จีโอโพลิเมอร์สามารถใช้การผลิต เช่นเดียวกับคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) เช่น เสา คาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบัน คอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้จีโอโพลิเมอร์พัฒนากำลังช้า เมื่อเทียบกับการบ่มด้วยความร้อน สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศในเขตอากาศร้อน สามารถใช้ความร้อนช่วงเวลากลางวันบ่มจีโอโพลิเมอร์ได้

**ความคงทน (Durability) :** จีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยที่มีสัณฐานวิทยาแบบกิ่งผลึก และเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมีความคงทนในสารละลายกรดและเกลือมากกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มีปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมมากและจึงไม่คงทนต่อสารละลายกรด จีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมักประสบปัญหาการขยายตัวในสารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เนื่องจากการเกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) และเกิดสารประกอบสีขาวบริเวณผิวตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับสารละลายเกลือแมกนีเซียม ( $MgSO_4$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยมีความคงทนในสารละลายกรดและเบสได้ดีกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่แข็งแรง

สำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากแก้วเคลือบซึ่งมีปริมาณซิลิกาในส่วนผสมปริมาณมากมีความคงทนในสารละลายกรดต่ำ เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่มากเกินไปเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส ระหว่างการเตรียมจีโอโพลิเมอร์ได้สารประกอบโซเดียมซิลิเกต ซึ่งสามารถถูกชะละลายกรดได้เป็นกรดซิลิกิก (Silicic acid,  $H_4SiO_4$ ) ออกมาในสารละลายทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดังนั้นมักผสมแก้วลอยในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากแก้วเคลือบเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

**การตรึงของเสียที่มีพิษ (Toxi waste solidification) :** จีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการตรึงของเสียที่มีพิษ เนื่องจากโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) และเลขโคออร์ดิเนชันของอะลูมิเนียมมีความสามารถในการตรึงโลหะหนัก เช่น  $Cu(II)$ ,  $Cd(II)$ ,  $Cr(III)$ ,  $Pb(II)$  ได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรง สามารถกักเก็บของเสียทางเคมีพวกอออนโลหะ

หนักและกากนิวเคลียร์ไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยของเสียที่มีพิษถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของจีโอโพลิเมอร์

**การทนไฟ (Fire resistance) :** จีโอโพลิเมอร์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต จึงมีสมบัติในการต้านทานเพลิงไฟที่ดี โดยสมบัติดังกล่าวขึ้นกับสารตั้งต้นและสารละลายเบสที่ใช้ โดยจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความต้านทานความร้อนที่ดีกว่าการใช้สารละลายโปแตสเซียมซิลิเกต จีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนอะตอม Si:Al สูงกว่า 1.5 หรือมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ในส่วนผสมมากจะทนไฟได้ดี เมื่อทดสอบกับเปลวไฟอุณหภูมิประมาณ  $800-1000^\circ\text{C}$

### 2.5.3 การประยุกต์ใช้งานจีโอโพลิเมอร์

**งานซ่อมแซม (Repair work) :** งานซ่อมแซมเป็นงานที่ต้องการวัสดุซ่อมแซมที่ก่อตัวรวดเร็วและค่ากำลังอัดที่สูงในเวลาอันสั้น ซึ่งเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์มีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุซ่อมแซม ระยะเวลาการก่อตัวมีความจำเป็นขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน เช่นบริเวณริมแม่น้ำหรือชายฝั่งทะเลที่ต้องการก่อตัวที่เร็วของวัสดุ โดยการใช้สารผสมเพิ่มในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์สามารถหน่วง หรือเร่งการก่อตัวได้ นอกจากนี้ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างแท่งเหล็กและคอนกรีตเจาะรูได้ดีและถูกเสนอแนะสำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต

**อิฐจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer brick) :** จีโอโพลิเมอร์สามารถเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ให้กำลังที่สูงแม้ว่าไม่มีการบ่มร้อน มีความเสถียรในน้ำสามารถใช้ในงานไม่ต้องการการรับแรงมากได้ เช่นผนัง หรือทางเดินเท้า และมีความต้านทานความเย็น (Freezing) ในประเทศเขตร้อนได้

**จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) :** ประเทศออสเตรเลียเป็นประเทศหนึ่งที่ศึกษาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเริ่มมีการประยุกต์ใช้งานจริง โดยเมื่อเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2551 ได้มีการเทพื้นทางเดินจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตครั้งแรกขึ้นที่ Curtin University of Technology โดยการผสมในรถผสมปูนและเป็นการเทในที่ และมีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพตลอดทั้งปี ต่อมาในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2552 ทางเดินเท้าแห่งที่สองได้สร้างขึ้นที่เมือง Curtin โดยใช้วัสดุดิบท้องถิ่น โครงการนี้เป็นความร่วมมือระหว่าง Centre for Sustainable Resource Processing (CSRP), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) และ Curtin University of Technology ประเทศออสเตรเลีย

นอกจากนี้ยังมีการสร้างท่อน้ำทิ้ง (Sewer pipe) ที่ทนกรดที่รุนแรงจากจีโอโพลิเมอร์สำหรับใช้ในโครงการระบบโครงสร้างพื้นฐาน โครงการนี้เป็นความร่วมมือระหว่าง CSIRO และภาคอุตสาหกรรม คือ บริษัทผลิตท่อน้ำทิ้ง Rocla ประเทศออสเตรียดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การใช้งานจีโอโพลิเมอร์แบบต่าง (<http://infrastructure.milliken.com>)

## 2.6 เถ้าลอย

**เถ้าลอย (Fly ash)** เป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหิน เมื่อเผาถ่านหินที่บดให้มีขนาดเล็กในเตาเผา อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นทำให้แร่ธาตุในถ่านหินแปรสภาพอยู่ในรูปของออกไซด์ ส่วนที่เบาจะปลิวออกมากับก๊าซร้อนได้เถ้าลอย เถ้าส่วนที่หนักจะตกลงก้นเตา เรียกว่า เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีออกไซด์ของซิลิกอน (ซิลิกา) และออกไซด์ของอะลูมิเนียม (อะลูมินา) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งทั้งซิลิกาและอะลูมินามีสมบัติการเป็นสารปอซโซลาน อย่างไรก็ตามเถ้าลอยมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเถ้าก้นเตา เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่า จึงนิยมนำมาผสมซีเมนต์และเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

### 2.6.1 ชนิดถ่านหินและการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า

โดยทั่วไปชนิดของถ่านหินแบ่งตามคุณภาพพื้นฐาน คือค่าถ่านคงตัว สารระเหยและค่าความร้อน โดยแบ่งได้ 4 กลุ่มตามคุณภาพสูงไปสู่คุณภาพต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM D388 ดังนี้

1. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดเกิดการทับถมเป็นระยะเวลานาน แข็งมาก สีดำ ติดไฟยากหากอุณหภูมิไม่สูงพอ เมื่อติดไฟจะมีเปลวและควันน้อย ประกอบด้วยคาร์บอน 92 - 94% ให้ค่าความร้อนสูงกว่า 16,000 บีทียู/ปอนด์
  2. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินชั้นรองลงมาจากแอนทราไซต์ เมื่อติดไฟจะมีเปลวไฟสีเหลือง ปริมาณคาร์บอน 78 - 86% ให้ค่าความร้อน 10,500 - 16,000 บีทียู/ปอนด์
  3. ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) ให้ค่าความร้อน 8,300 - 11,500 บีทียู/ปอนด์
  4. ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำมีขี้เถ้ามาก มีความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำกว่า 8,300 บีทียู/ปอนด์ ถ่านหินที่เหมืองแม่เมาะจะเป็นถ่านหินกลุ่มนี้
- ส่วนระบบเผาถ่านหินบด สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ดังต่อไปนี้

1. ระบบเผาที่ความร้อนสูง ใช้อุณหภูมิเผาในเตาในระบบไซโคลน (Cyclone combustion) ประมาณ  $1,500 - 1,700^{\circ}\text{C}$  ถ้าถ่านหินจะหลอมละลายรวมกันเป็นก้อนเป็นเม็ดแก้วใสๆ ตกลงมาที่ก้นเตา ระบบนี้ได้เถ้าลอยปริมาณน้อย

2. ระบบเผาที่ความร้อนปานกลาง ใช้ระบบเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ  $1,000 - 1,400^{\circ}\text{C}$  ระบบนี้ต้องมีการดักจับก๊าซที่ดี เพื่อลดปริมาณก๊าซกำมะถันหรือซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sox) และก๊าซไนโตรเจนหรือไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) สู่อากาศสิ่งแวดล้อม เถ้าที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอยที่มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เหมาะสำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินที่แม่เมาะใช้ระบบเผานี้ รูปที่ 2.6 แสดงกองเถ้าลอยที่โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินแม่เมาะ



รูปที่ 2.6 กองเถ้าลอยจากระบบเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

3. ระบบเผาที่ความร้อนต่ำ ใช้ระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้เผาค่อนข้างต่ำประมาณ  $800 - 900^{\circ}\text{C}$  ถ่านหินที่บดจนมีขนาดเล็กมากผสมกับหินปูนและพ่นเข้าไปในเตาเผาพร้อมอากาศร้อน ถ่านหินและหินปูนที่พ่นเข้าไปจะแขวนลอยในคลื่นอากาศร้อน โดยมีลักษณะคล้ายของเหลวเดือด ขณะที่ถ่านหินเผาไหม้หินปูนจะทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำ ดักจับก๊าซกำมะถันที่เกิดขึ้นกระบวนการนี้สามารถลดปริมาณก๊าซกำมะถันที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้มากถึง 90% นอกจากนี้ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $1,000^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส จะลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนในระบบเผาได้ด้วย อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่ได้จากระบบนี้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่เผาไม่สูงมาก เถ้าลอยที่ได้นี้ยังสามารถนำมาใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่ากับเถ้าลอยที่ได้จากระบบเผาที่ความร้อนปานกลาง

เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมและซิลเฟอร์ ระบบการเผาแบบนี้เริ่มมีใช้มากในโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือ โรงงานต่างๆ ในชุมชน

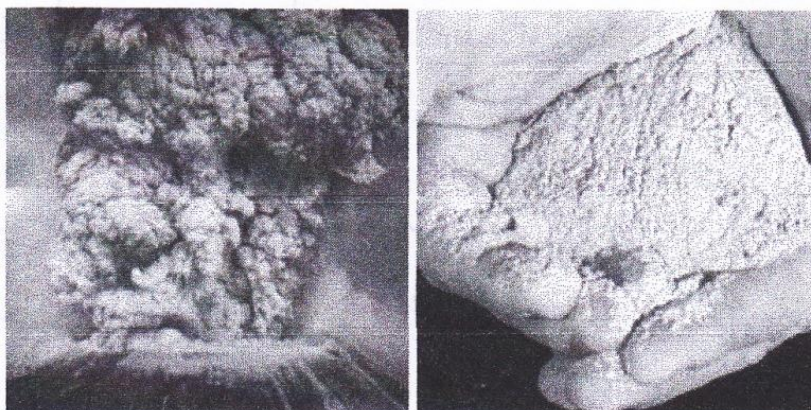
ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในปัจจุบันการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จึงนิยมใช้เถ้าลอยจากการเผา ถ่านหินแบบใช้ถ่านหินบด หรือ PCC เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเถ้าลอยชนิดนี้ปริมาณ 70-90% มีสมบัติที่เป็นสารปอซโซลาน ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยที่เผาแบบ PCC ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าและคงทนกว่าวัสดุที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ในอายุเท่ากัน และให้สมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุชนิดอื่นๆ เช่นดินขาวเผา สารปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีต แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ 3 ชนิด ได้แก่

ชนิด N คือสารปอซโซลานธรรมชาติ เช่น แร่ไดอะตอมไมต์ เถ้าภูเขาไฟหรือพูมิไซด์ รูปที่ 2.7 และดินหรือวัสดุที่ต้องการการเผาเพื่อให้ได้สมบัติให้ตรงตามข้อกำหนด เช่นดินขาวและดินดาน เป็นต้น

ชนิด F คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส และมีสมบัติตรงกับข้อกำหนด เถ้าลอยชนิดนี้มีสมบัติการเป็นสารปอซโซลาน

ชนิด C คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัส และมีสมบัติตรงกับข้อกำหนด เถ้าลอยชนิดนี้นอกจากมีสมบัติการเป็นปอซโซลานแล้ว ยังมีสมบัติการเป็นสารเชื่อมประสานอีกด้วย โดยเถ้าลอยชนิด C อาจมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงกว่า 10%

ตัวอย่างข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 แสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.7 เถ้าภูเขาไฟ ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีต

| ข้อกำหนดทางเคมี                                                                | ชนิด |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                                                | N    | F    | C    |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%) | 70.0 | 70.0 | 50.0 |
| $\text{SO}_3$ ไม่เกิน (%)                                                      | 4.0  | 5.0  | 5.0  |
| ความชื้น ไม่เกิน (%)                                                           | 3.0  | 3.0  | 3.0  |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกิน (%)                             | 10.0 | 6.0* | 6.0  |

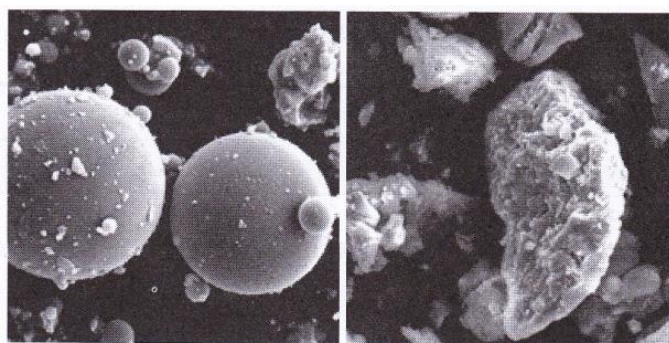
\*สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีค่า LOI สูงถึง 12% ได้หากมีผลการใช้งานหรือมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ยอมรับได้

### 2.6.2 สมบัติของเถ้าลอย

#### ก) ความละเอียดและขนาด

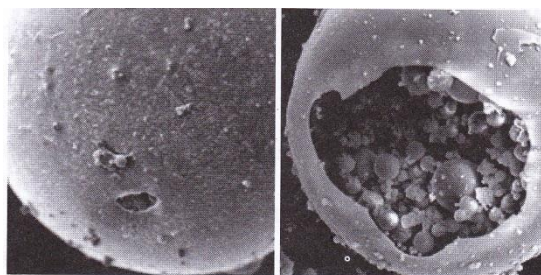
เถ้าลอยมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน เถ้าลอยแม่เมาะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน มีความละเอียดประมาณ 2,500-3,500 ตารางเซนติเมตร/กรัม รูปทรงกลมซึ่งเกิดจากการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง มีสถานะคล้ายแก้ว (Glassy phase) หรือมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) ทำให้ทำปฏิกิริยาได้ดี โดยส่วนที่เป็นอสัณฐานอยู่บริเวณผิวเถ้าลอย ส่วนที่เป็นผลึกอยู่บริเวณแกนกลาง เถ้าลอยยังประกอบด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในเรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) เกิดจากการกักก๊าซจากการเผาไหม้ภายในเถ้าลอย ส่วนเถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กภายในจะเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) ดังแสดงใน รูปที่ 2.8

ส่วนเถ้าลอยจากระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไชล์เบดจะมีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่เผาไม่สูงพอ และมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยแม่เมาะ ไม่เหมาะสมกับปูนซีเมนต์เนื่องจากปริมาณ  $\text{SO}_3$  สูงกว่า 5% เกินค่ามาตรฐาน ASTM กำหนด และทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ แต่เถ้าลอยชนิดนี้สามารถนำเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ แต่ต้องบดลดขนาดอนุภาคหรือผสมร่วมกับสารอื่น เช่น เถ้าลอยแม่เมาะ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หรือซิลิกาฟุ่ม เป็นต้น



ก) เถ้าลอยแม่เมาะ

ข) เถ้าลอย FBC



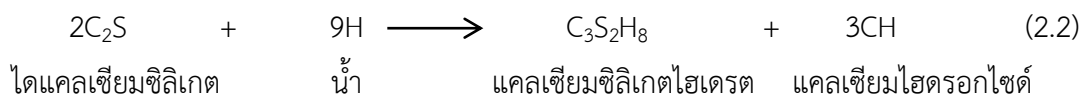
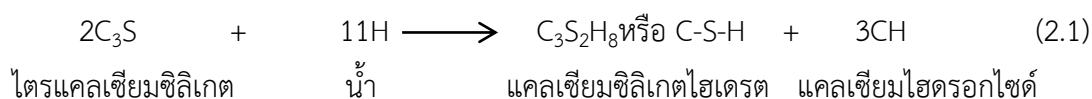
ค) ซีโนสเฟีย

ง) พลีโรสเฟีย

รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

### ข) ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องวิเคราะห์ โดยปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ เมื่อ C แทน  $\text{CaO}$  : S แทน  $\text{SiO}_2$  : H แทน  $\text{H}_2\text{O}$  : A แทน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ CH แทน  $\text{Ca(OH)}_2$  ดังแสดงในสมการ 2.1 และ 2.2

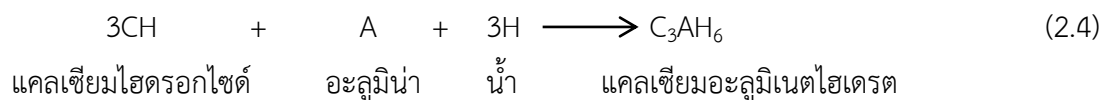


สมการที่ 2.1 และ 2.2 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยไตรแคลเซียมและไดแคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติให้ค่ากำลังอัดแก่คอนกรีตตามอายุการบ่มนอกจากนี้ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตได้เช่นกัน

อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือพอร์ตแลนด์ไซต์ (Portlandite) เป็นผลิตภัณฑ์รองเสมอ หากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมีปริมาณมากทำให้คอนกรีตความคงตัวต่ำ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานในคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.3



เช่นเดียวกัน หากอะลูมินาในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.4



ดังนั้น ถ้าลอยหรือวัสดุอื่นที่นำมาเป็นสารปอซโซลานควรนำมาตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีก่อน เพื่อให้ทราบปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในเถ้า ซึ่งโดยทั่วไปใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ควบคุมการหาการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (LOI) ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้า และวัสดุต่างๆที่ใช้เป็นสารปอซโซลานที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ตารางที่ 2.5 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี และค่า LOI ของตัวอย่างเถ้า และวัสดุต่างๆ

| องค์ประกอบ (%)                 | เถ้าลอย PCC | เถ้าลอย FBC | เถ้าแกลบดำ | ซิลิกาฟูม |
|--------------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 39.5        | 21.0        | 87.5       | 98.2      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.5        | 8.0         | 2.5        | -         |
| CaO                            | 17.3        | 42.2        | 0.8        | -         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.1        | 6.9         | 0.4        | -         |
| ออกไซด์อื่นๆ                   | 8.8         | 20.1        | 6.7        | 1.8       |
| LOI                            | 0.8         | 1.0         | 2.5        | -         |

ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

จากตารางที่ 2.5 พบว่าเถ้าลอย PCC เถ้าลอย FBC (เถ้าลอยจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด) เถ้าแกลบ และซิลิกาฟูมมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาสารปอซโซลาน อย่างไรก็ตาม ไม่นิยมนำเถ้าลอย FBC มาผสมกับคอนกรีตเนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และซิลเฟอร์ออกไซด์สูง ซึ่งเกิดจากการพ่นหินปูนไปจับก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ การมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และซิลเฟอร์ออกไซด์สูงทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงตัวและคงทนที่ต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะเป็นวิธีการเผาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถลดปริมาณ Sox และไม่มี NOx ในก๊าซที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

## 2.7 สารละลายอัลคาไล: Alkali activators

สารละลายอัลคาไล หรือสารละลายเบส (Alkali activators) จะใช้ในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์ โดยสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามองค์ประกอบทางเคมีคือ

1. เบสไฮดรอกไซด์ (Caustic alkalis) : MOH
2. ซิลิเกต (Silicates) :  $M_2O \cdot nSiO_2$

เบสไฮดรอกไซด์ ได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ส่วนซิลิเกต ได้แก่โซเดียมซิลิเกต ( $Na_2O \cdot nSiO_2$ ) ที่มีอยู่ในรูปของแข็งและสารละลาย เนื่องจากสารทั้งสองสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเบสไฮดรอกไซด์และซิลิเกตชนิดอื่น ในการผลิตพอลิเมอร์ต้องทำการละลายของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำก่อนให้อยู่ในรูปสารละลาย และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสม ในงานวิจัยนี้กล่าวเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต

### 2.7.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นสารเคมีของแข็งในรูปเม็ด (Bead) หรือแผ่นเกล็ด (Flake) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีมวลโมเลกุล 40 กรัม/โมล ใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของเกลือในการผลิต เมื่อนำมาใช้งานต้องละลายน้ำ มีฤทธิ์เป็นเบสแก่ คือสามารถแตกตัวให้อิออนโซเดียม ( $Na^+$ ) และอิออนไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ได้หมดดังแสดงในรูปที่ 2.10 ของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.12 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส ในการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำจะปลดปล่อยความร้อนจำนวนมาก ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายหรือปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ 20 องศาเซลเซียสน้ำมีความหนืดเท่ากับ 1.0 เซนติพอยส์ ในขณะที่สารละลาย 10% NaOH มีความหนืดเท่ากับ 1.72 เซนติพอยส์ และ 20% NaOH มีความหนืดเท่ากับ 4.5 เซนติพอยส์ ความหนืดจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดย 50% NaOH จะมีความหนาแน่น 1.53 g/ml ที่ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน ตารางที่ 2.6 ซึ่งความเข้มข้นอาจแสดงในหน่วย %w/w หรือโมลาร์(mol/L หรือ M) ซึ่งความเข้มข้นที่มักใช้ในการผสมพอลิเมอร์ คือ 5 M NaOH (ประมาณ 17%w/w) 10 M NaOH (ประมาณ 30%w/w) และ 15 M NaOH (ประมาณ 42%w/w)

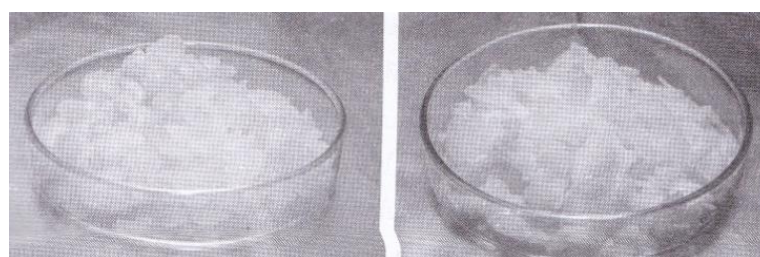
ตารางที่ 2.6 ความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 25 องศาเซลเซียส

| %w/w NaOH | ความหนาแน่น (g/ml) |
|-----------|--------------------|
| 0         | 0.9991             |
| 1         | 1.0106             |
| 2         | 1.0219             |
| 3         | 1.0331             |

|    |        |
|----|--------|
| 4  | 1.0443 |
| 5  | 1.0554 |
| 10 | 1.1111 |
| 15 | 1.1655 |
| 20 | 1.2219 |
| 30 | 1.3311 |
| 40 | 1.4339 |
| 50 | 1.5290 |

ที่มา: (อุปลักษณ์, 2560)

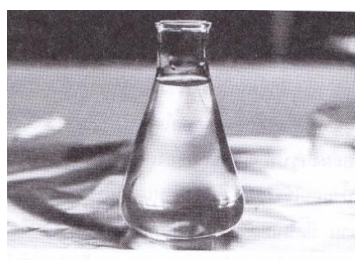
ในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแข็ง สามารถทำได้โดยเติมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำ (ห้ามเติมน้ำลงในกรดหรือเบส) คนสารละลายอย่างรวดเร็วอย่าให้ส่วนใดส่วนหนึ่งมีความเข้มข้นมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดไอสารละลายหรือเกิดการเดือดของสารละลายได้ ในการเตรียมสารละลาย ควรเตรียมในตู้ควันหรือที่อากาศถ่ายเท ผู้เตรียมต้องสวมถุงมือยางและหน้ากากอนามัยด้วยทุกครั้ง เมื่อสารละลายที่เตรียมเย็นตัวลง จึงค่อยเทเก็บในภาชนะที่เป็นพลาสติก หากเป็นภาชนะที่เป็นแก้วอาจเกิดการกัดเกลียวปากขวดและขวดแก้วได้โดยเฉพาะสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ตารางที่ 2.7 แสดงปริมาณของแข็ง NaOH ที่ใช้เตรียมสารละลายที่ปริมาตร 1 ลิตร



ชนิดเม็ด

ชนิดเกล็ด

รูปที่ 2.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ดและชนิดเกล็ด



รูปที่ 2.10 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

**ตารางที่ 2.7** ปริมาณของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับเตรียมเป็นสารละลาย โดยการเจือจางด้วยน้ำจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

| ความเข้มข้น (M) | ปริมาณของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (g) |
|-----------------|------------------------------------|
| 5               | 200                                |
| 8               | 320                                |
| 10              | 400                                |
| 12              | 480                                |
| 15              | 600                                |

ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ สารละลายเบสทำหน้าที่ชะลอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาจากสารปอซโซลาน โดยความสามารถในการชะล่อน้อยอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเบส สารละลายเบสที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เนื่องจากหาได้ง่าย และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นที่ใช้ในช่วง 5 - 15 โมลาร์ โดยการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง (12 – 15 M NaOH) จะทำให้เกิดซีโอไลต์ภายในจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งส่งผลต่อค่ากำลังอัดของตัวอย่างได้

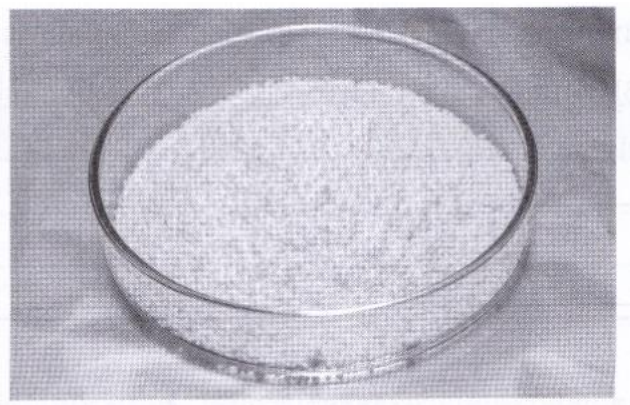
### 2.7.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต หรืออีกชื่อหนึ่งว่า น้ำแก้ว (Water glass) เป็นสารประกอบของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) และซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มีสถานะเป็นได้ทั้งของแข็ง เช่นก้อนและผง รูปที่ 2.11 และของเหลว รูปที่ 2.12 ในการใช้งานหากเป็นของแข็ง ต้องละลายน้ำก่อนใช้ โดยทั่วไปมักจำหน่ายในรูปของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน มีสมบัติเป็นเบส ลักษณะทั่วไปไม่มีสี หรือมีสีเทาอ่อน ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นอุตสาหกรรมผงซักฟอก สบู่ เซรามิก กระจก คอนกรีต เป็นต้น

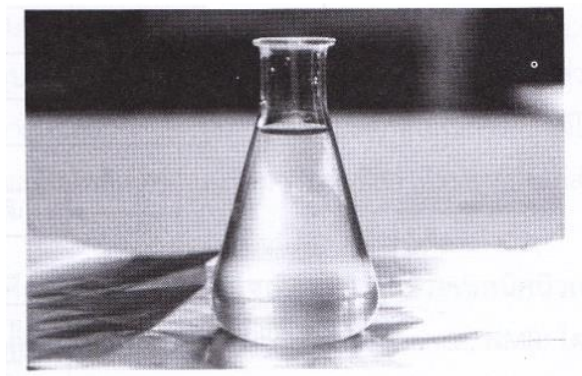
#### 2.7.2.1 กระบวนการผลิต

ขั้นตอนในการผลิตโซเดียมซิลิเกตมี 2-3 ขั้นตอน ขึ้นกับสมบัติที่ต้องการ

**ขั้นตอนที่ 1 การผลิตเศษแก้ว (Cullet) :** ทำโดยการหลอมโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จากทรายแก้วในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 1,100 – 1,200 °C เพื่อผลิตของแข็งอณูฐานในรูปเศษแก้วที่ประกอบด้วยของผสมของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$



รูปที่ 2.11 โซเดียมซิลิเกตของแข็ง

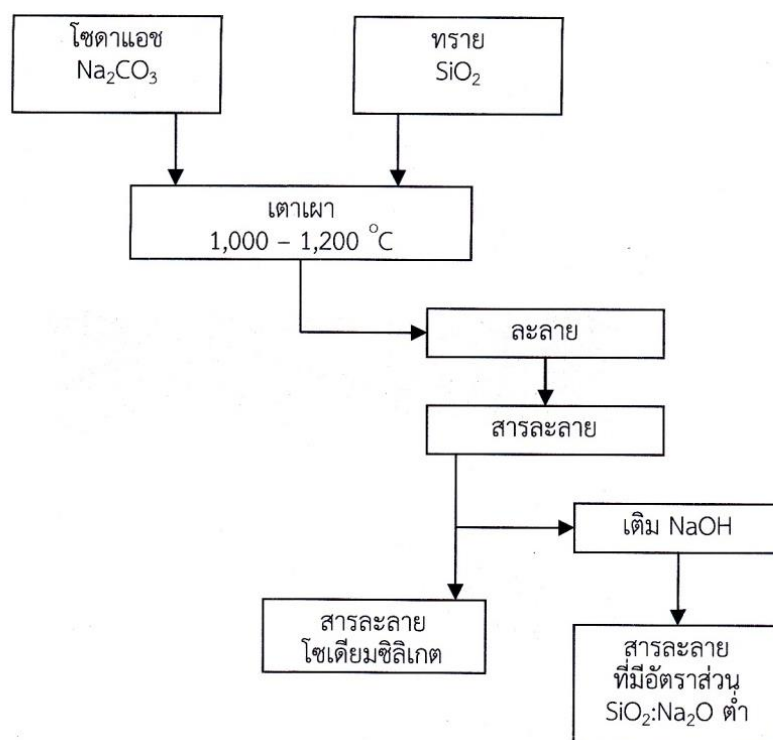


รูปที่ 2.12 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

**ขั้นตอนที่ 2 การเปลี่ยนเป็นน้ำแก้ว:** ป้อนเศษแก้วที่ผลิตได้จากขั้นตอนที่ 1 ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีน้ำ และป้อนไอน้ำเพื่อเพิ่มความดันแก่ถังทำให้เศษแก้วละลายได้มากขึ้น สารละลายที่ได้เรียกว่า “น้ำแก้ว” น้ำแก้วจะไหลผ่านท่อไปสู่ถังเก็บเพื่อรอการบรรจุและจัดจำหน่าย

**ขั้นตอนที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน:** สมบัติของน้ำแก้วจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  อัตราส่วนดังกล่าวสามารถปรับได้โดยการเติม  $\text{NaOH}$  รูปที่ 2.14 แสดงกระบวนการผลิตสารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกตจัดเป็นโพลิเมอร์ประเภทซิลิเกต ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization) ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนของอะตอมออกซิเจนที่ถูกใช้ร่วมกันใน  $\text{SiO}_4^{2-}$  ที่มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedra) ดังนั้นหากค่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  น้อย จะเกิดดัชนีการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันสูง ดังนั้นอัตราส่วนโดยมวล “ $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ” จึงมีผลต่อสมบัติและการใช้งานสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตสารละลายโซเดียมซิลิเกต

### 2.7.2.2 สมบัติ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า อัตราส่วนโดยมวล “ $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ” มีอิทธิพลต่อสมบัติและการใช้งานสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยอัตราส่วนที่สูงจะทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้นด้วย การแบ่งเกรดสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะแบ่งตามอัตราส่วนโดยมวลของ  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  และมีค่าระหว่าง 1:1.6 ถึง 1:3.75 ประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O}$  10 – 15% และ  $\text{SiO}_2$  28 – 33% ที่เหลือคือน้ำ การใช้งานสารละลายโซเดียมซิลิเกตแสดงใน ตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การใช้งานสารละลายโซเดียมซิลิเกต

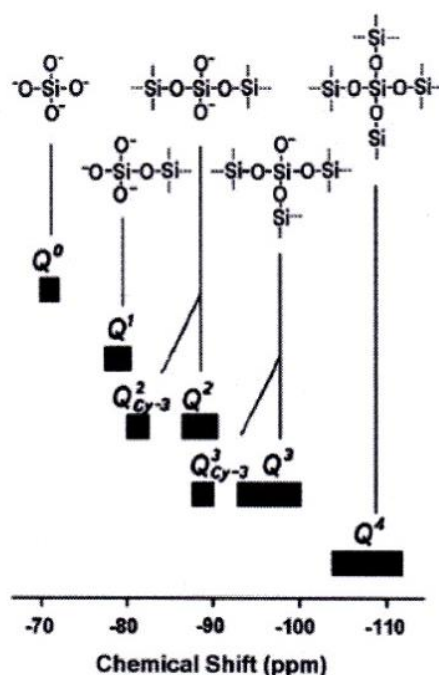
| ผลิตภัณฑ์           | อัตราส่วนโดยมวลของ $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ |
|---------------------|-------------------------------------------------------|
| สบู่และผงซักฟอก     | 1:2.0                                                 |
| ย้อมผ้า             | 1:2.4                                                 |
| กาว เตาหลอม เซรามิก | 1:3.3                                                 |

ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้มีการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตหลายอัตราส่วน เช่นงานวิจัยของ สมิตร์และคณะ ใช้ 15.36% และ  $\text{SiO}_2$  30% (อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 1.95$ ) หรือ  $\text{Na}_2\text{O}$  8.9% และ

$\text{SiO}_2$  28.7% (อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 3.3$ ) โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายหลักที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ช่วยในการก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์ และเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายน้ำแก่ส่วนผสม

จากการศึกษาโครงสร้างของโซเดียมซิลิเกตด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป (Nuclear magnetic resonance, NMR) โดยใช้ของแข็ง คือ ซิลิกอน หรือ  $^{29}\text{Si}$ -NMR สามารถแบ่งหน่วยโครงสร้างของ  $\text{SiO}_4$  ได้ 7 ประเภท ประกอบด้วย  $\text{Q}^0$   $\text{Q}^1$   $\text{Q}^2_{\text{cy-3}}$   $\text{Q}^2_{\text{cy-3}}$   $\text{Q}^3$  และ  $\text{Q}^4$  โดยตัวยกบน Q แสดงถึงจำนวนการเชื่อมระหว่างอะตอม Si และอะตอมใกล้เคียงของ Si ด้วยพันธะ  $\text{Si-O-Si=}$  ส่วนสัญลักษณ์  $\text{Q}^2_{\text{cy-3}}$  และ  $\text{Q}^3_{\text{cy-3}}$  หมายถึงตัวกลาง (Intermediate) หรือหน่วยโครงสร้าง  $\text{SiO}_4$  แบบกึ่งในวงแหวน 6 เหลี่ยม รูปที่ 2.14 แสดงช่วงเรโซแนนซ์ของหน่วยโครงสร้างดังกล่าวในสารละลายซิลิเกต การเลื่อนทางเคมี (Chemical shift) ของหน่วยโครงสร้าง  $\text{Q}^0$  ถึง  $\text{Q}^4$  อยู่ในช่วง  $-70$  ถึง  $-110$  ppm (มีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน หรือ part per million) ซึ่งแสดงว่าแต่ละอะตอม Si ในหน่วยอะตอมมักเกิดการโคออร์ดิเนต (ใช้พันธะร่วมกัน) กับอะตอม O 4 ตัวเสมอ



รูปที่ 2.14 ช่วงของตำแหน่งการเลื่อนเชิงเคมี  $^{29}\text{Si}$  ของหน่วยโครงสร้างซิลิเกต

เมื่อเติม  $\text{NaOH}$  ลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกตทางอุตสาหกรรม ( $6.14 \text{ M Na}_{0.61}\text{Si}$ ) เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของ  $\text{SiO}_2$  คงที่ที่  $4 \text{ M}$  แต่แปรผันอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  ทำให้เกิดการกระจายตัวของหน่วยโครงสร้างหลังจัดเก็บในหลายสัปดาห์ได้ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลของอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  ต่อการหน่วยโครงสร้างในสารละลายซิลิเกต

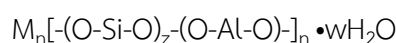
|                                | อัตราส่วน                          | ร้อยละของหน่วยโครงสร้าง (%) |       |                     |       |       |       |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|---------------------|-------|-------|-------|
|                                | $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ | $Q^0$                       | $Q^1$ | $Q^2_{\text{cy-3}}$ | $Q^2$ | $Q^3$ | $Q^4$ |
| 4M $\text{Na}_{0.61}\text{Si}$ | 3.28                               | 1                           | 7     | 0                   | 33    | 53    | 7     |
| 4M $\text{Na}_{1.5}\text{Si}$  |                                    | 12                          | 25    | 22                  | 16    | 6     | 0     |
| 4M $\text{Na}_2\text{Si}$      | 1.0                                | 20                          | 31    | 28                  | 13    | 0     | 0     |

ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

เมื่อทำการปรับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีหลายโมดูลัส (อัตราส่วนระหว่าง  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) ให้มีค่าโมดูลัสและความเข้มข้นของ  $\text{SiO}_2$  เดียวกันโดยการเติม  $\text{NaOH}$  และน้ำ จะได้เส้นกราฟปฏิกิริยาโมลิตเดตที่เหมือนกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดัชนีการควบแน่น (Condensation degree) ของซิลิเกตประจุลบ (Silicate anion) เหล่านี้คล้ายกัน โดยปริมาณ Si ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ปรับความเข้มข้นด้วย  $\text{NaOH}$  จะมีมากกว่าในสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมจากของแข็ง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (ชนิดแอนไฮไดรรัส หรือปราศจากโมเลกุลน้ำ) ประมาณ 10%

## 2.8 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization reaction)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานกึ่งผลึกที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมสารที่มีองค์ประกอบดังกล่าวกับเบสอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) โดยมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน จะได้จีโอโพลิเมอร์ที่สามารถก่อตัวเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกและแข็งตัว ทำให้รับแรงได้ดี



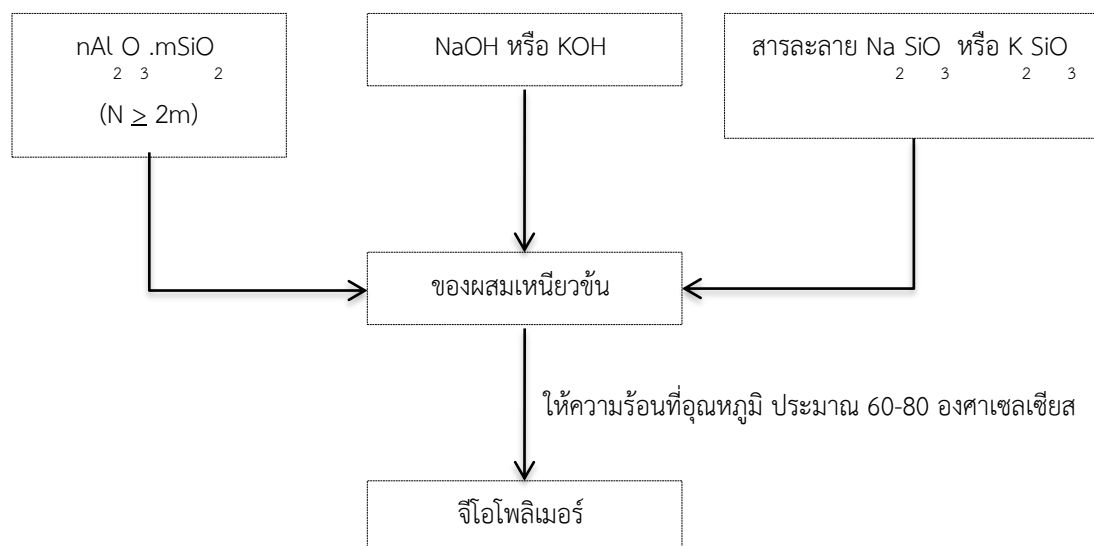
เมื่อ M คือโลหะอัลคาไล

n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่

z คือตัวเลข 1 2 หรือ 3

การทำปฏิกิริยาหลอมของ Si และ Al ใช้สารละลายเบส และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้แก้ลอกจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจากการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาในรูปอสัณฐานเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมแก้ลอกจากสารประกอบอัลคาไล และใช้ความร้อนในช่วง 60 – 80 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารประกอบอัลคาไล ได้แก่ สารอัล

คาไลซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) โดยแผนผังผลิตจีโอโพลิเมอร์ดังแสดง รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลผลิตที่ได้มีองค์ประกอบเคมีโครงสร้าง และสมบัติที่ต่างกัน การสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูง ความดัน และปริมาณสารละลายปริมาณมากกว่าจีโอโพลิเมอร์ ให้โครงสร้างซีโอไลต์ที่เป็นผลึกที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิปกติที่ไม่สูงมากทำให้ได้โครงสร้างแบบสัณฐานหรือกึ่งผลึก อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 150 – 180 องศาเซลเซียส ทำให้ได้โครงสร้างแบบผลึก โครงสร้างเสนอแนะของจีโอโพลิเมอร์ คือ โครงสร้างของบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$

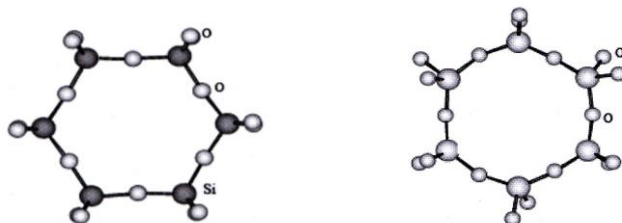
อัตราส่วนอะตอมของ Si : Al ในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อสมบัติและประสิทธิภาพการใช้งาน โดยอัตราส่วนระดับต่ำ (1/2 หรือ 3) ทำให้โครงสร้างเป็น 3 มิติและได้วัสดุที่แข็งแรง เหมาะสมกับงานซีเมนต์และคอนกรีต หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 เกิดโครงสร้าง 2 มิติและได้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น เหมาะสำหรับงานไฟเบอร์กลาสที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200 – 1,000 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม หากอัตราส่วนสูงกว่า 15 ทำให้ได้วัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายโพลิเมอร์ธรรมชาติสายตรงที่มีความยืดหยุ่นสูง เหมาะสำหรับเป็นสารประกอบไฟเบอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง (High performance fiber composites)

### 2.8.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแบบอสัณฐาน (Amorphous phase) และกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารซิลิกาและอะลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและสามารถชะออกมาจากผิวอนุภาคด้วยสารละลายเบสได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูง ได้สารประกอบที่ก่อตัวและรับแรงอัดได้ดี

Davidovits ได้เสนอว่าปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการชะละลายของวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตภายใต้สภาวะเบสแก่ ขั้นที่สองคือการเปลี่ยนตำแหน่งของกลุ่มอออนอิสระ และขั้นสุดท้าย คือการเกิดปฏิกิริยาเป็นสายโซ่โดยการกำจัดโมเลกุลน้ำออกมาหรือปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) อย่างไรก็ตาม แต่ละขั้นตอนประกอบด้วยหลายเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา (Pathway) เช่นขั้นตอนการชะละลายประกอบด้วย 8 เส้นทาง ตามหลักการเทอร์โมไดนามิกส์ แต่ละเส้นทางทำให้ได้กลุ่มอออนที่ต่างกัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้น หากเข้าใจในเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ทำให้เข้าใจในกลไกของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรือปฏิกิริยาอุกโซของจีโอโพลิเมอร์ได้ แต่จนถึงปัจจุบันยังไม่มีการอธิบายถึงกลไกของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ชัดเจน เนื่องจากอัตราการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เกิดเร็วมาก ทำให้ขั้นตอนทั้ง 3 ขั้นตอนเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ทำให้ศาสตร์ของทั้ง 3 ขั้นตอนเป็นแบบ Inter-dependent หรือเกิดแบบพึ่งพากัน ยากที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อแยกแต่ละกระบวนการ จึงทำให้มีการจำลองทางโมเลกุลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาเรื่องนี้

ในปี คศ. 2004 คณะวิจัยจากฮ่องกง ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองทางโมเลกุลการเกิดจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้แบบจำลองของโมเลกุลวงแหวน 6 เหลี่ยม 2 วง เป็นตัวแทนโครงสร้างทางเคมีของเมตาเกาสีน (วัตถุดิบหลักของจีโอโพลิเมอร์) เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ของกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงใน รูปที่ 2.16 เส้นทางการปฏิกิริยาการชะละลายของเมตาเกาสีนภายใต้สภาวะสารละลายเบสความเข้มข้นสูงยึดตามแบบจำลองของโมเลกุลวงแหวน 6 เหลี่ยม 2 วง สามารถแสดงเป็นลำดับ 8 ปฏิกิริยา โดยการใช้ทฤษฎีกลไกควอนตัม เคมีควอนตัม เคมีคำนวณและเทอร์โมไดนามิกส์ ดังต่อไปนี้



(a) วงแหวน 6 เหลี่ยมของเตตราไฮดรอน  $\text{SiO}_4$       (b) วงแหวน 6 เหลี่ยมของเตตราไฮดรอน  $\text{AlO}_4$

รูปที่ 2.16 โครงสร้างเชิงโมเลกุลแสดงแบบจำลองของเมตาเกาสีน ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

ตารางที่ 2.10 ความร้อนของปฏิกิริยาของโครงสร้างเชิงโมเลกุลวงแหวน 6 เหลี่ยมภายใต้สภาวะเบสความเข้มข้นสูง

(a) วงแหวน 6 เหลี่ยมของเตตระไฮดรอน  $\text{SiO}_4$

| หน่วยโครงสร้างโมเลกุล                                                                         | เอนทาลปีการก่อตัว | ค่าเอนทาลปีของปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล) |             |             |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                                                                               |                   | $\Delta E1$                           | $\Delta E2$ | $\Delta E3$ | $\Delta E4$ |
| $(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O}_6)$                                                          | -1491.45          | -5.49                                 | -12.12      | -36.23      | -19.23      |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_3$            | -1294.65          |                                       |             |             |             |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_2-\text{ONa}$ | -1385.43          |                                       |             |             |             |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_2-\text{OK}$  | -1370.88          |                                       |             |             |             |
| $\text{HO-Si}=(\text{ONa})_3$                                                                 | -500.94           |                                       |             |             |             |
| $\text{HO-Si}=(\text{OK})_3$                                                                  | -437.85           |                                       |             |             |             |
| $\text{NaOH}$                                                                                 | -119.30           |                                       |             |             |             |
| $\text{KOH}$                                                                                  | -104.14           |                                       |             |             |             |
| $\text{H}_2\text{O}$                                                                          | -59.25            |                                       |             |             |             |

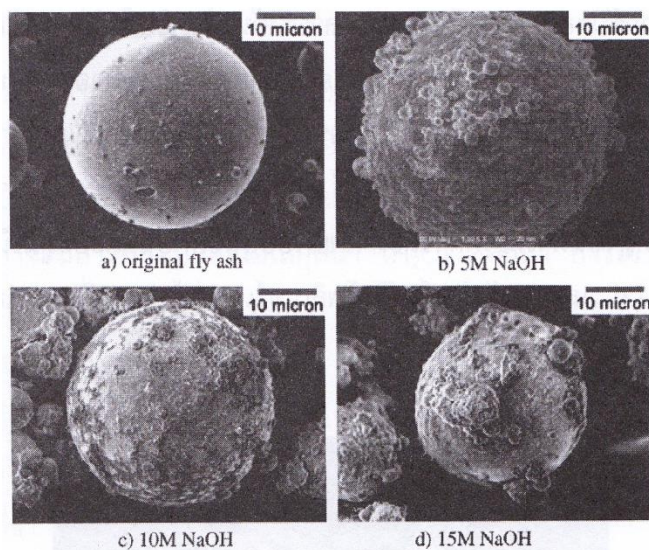
ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

(b) วงแหวน 6 เหลี่ยมของเตตระไฮดรอน  $\text{AlO}_4$

| หน่วยโครงสร้างโมเลกุล                                                                         | เอนทาลปีการก่อตัว | ค่าเอนทาลปีของปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล) |             |             |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                                                                               |                   | $\Delta E1$                           | $\Delta E2$ | $\Delta E3$ | $\Delta E4$ |
| $(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O}_6)$                                                          | -619.67           | -299.80                               | -245.79     | -302.69     | -235.04     |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_3$            | -776.45           |                                       |             |             |             |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_2-\text{ONa}$ | -839.39           |                                       |             |             |             |
| $(\text{OH})_3\text{Si}-(\text{Si}(\text{OH})_2\text{O})_3-\text{Si}(\text{OH})_2-\text{OK}$  | -810.59           |                                       |             |             |             |
| $\text{HO-Si}=(\text{ONa})_3$                                                                 | -441.66           |                                       |             |             |             |
| $\text{HO-Si}=(\text{OK})_3$                                                                  | -342.17           |                                       |             |             |             |
| $\text{NaOH}$                                                                                 | -119.30           |                                       |             |             |             |
| $\text{KOH}$                                                                                  | -104.14           |                                       |             |             |             |
| $\text{H}_2\text{O}$                                                                          | -59.25            |                                       |             |             |             |

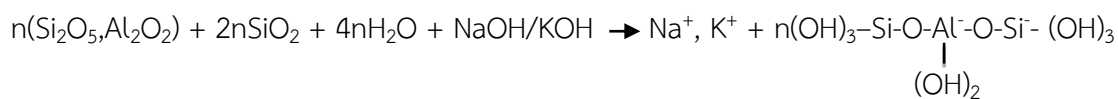
อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์อย่างง่าย ได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

**ขั้นตอนที่ 1 การชะละลาย (Dissolution):** ประกอบด้วยการแตกสลายพันธะโควาเลนต์ Si-O-Si และ Al-O-Si ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายอัลคาไลมีค่าสูง (มีความเป็นเบสมาก) โดยหน่วยอะตอมที่เกิดการแตกสลายจะก่อตัวในรูปคอลลอยด์ ก่อตัวเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ในเถ้าลอยจะถูกชะด้วยสารละลายเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซิลิกาและอลูมินาออสัญฐานบริเวณผิวอนุภาคชะออกมา สำหรับเถ้าลอยส่วนที่มีความเป็นออสัญฐานหรือแก้วจะอยู่บริเวณผิวนอก ส่วนที่เป็นผลึกจะอยู่บริเวณแกนกลาง ดังนั้น อีออนซิลิกอน อะลูมิเนียมและสารละลายเบสเกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของเถ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ที่แสดงผิวเถ้าลอยที่ถูกชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของเถ้า ความเข้มข้นสารละลายเบสที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการชะของอะตอมซิลิกอนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของเถ้ามากขึ้น อยู่ในรูปของอีออนหรืออะตอมที่มีประจุ



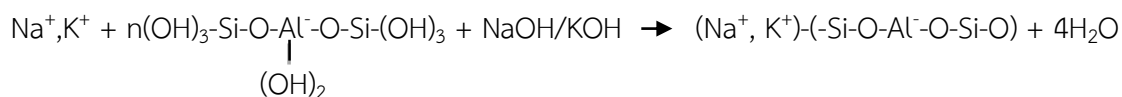
รูปที่ 2.17 ผิวของเถ้าลอยเมื่อถูกชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

**ขั้นตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization):** อีออนซิลิกอนและอลูมิเนียมที่ชะออกมาโดยสารละลายเบสเกิดการรวมตัวกับอีออนออกซิเจนอยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si O และ Al ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ดังกลไกที่เสนอโดย Hua และ Deventer ดังสมการดังต่อไปนี้



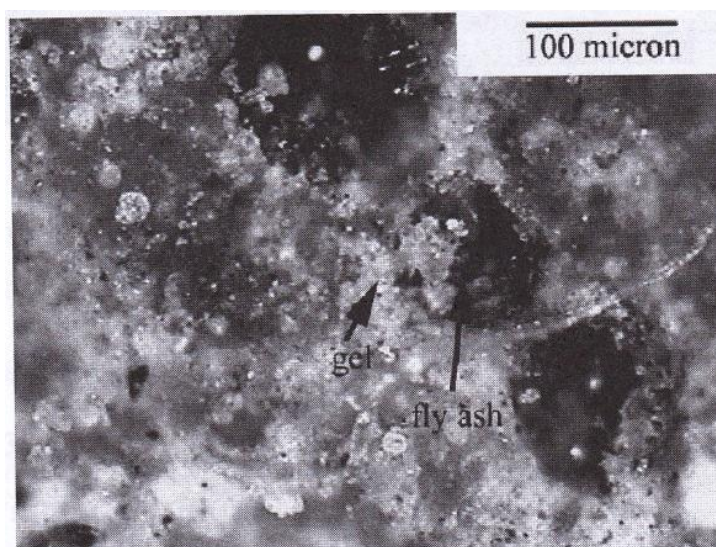
(Si-Al materials)

(Geopolymer precursor)



(Geopolymer backbone)

หลังจากขั้นตอนการชะที่ผิวอนุภาคสารตั้งต้นแล้ว อีออนซิลิกอนและอะลูมิเนียมแพร่ไปยังเฟสเจลทำให้ความเข้มข้นของอีออนทั้งสองบริเวณที่ผิวอนุภาคลดลง การชะบริเวณผิวอนุภาคจึงดำเนินต่อไปมากขึ้นตามหลักสมดุล ระยะเวลาและความเร็วรอบในการชะจึงเป็นปัจจัยสำคัญในขั้นตอนการแพร่ (Diffusion step) ระยะเวลาและความเร็วรอบในการชะที่สูงขึ้นทำให้เกิดการละลายของอีออนซิลิกอนและอะลูมิเนียมบริเวณผิวออกมามากขึ้น และรวมตัวกันเป็นจีโอโพลิเมอร์เจลต่อไป รูปที่ 2.18 แสดงการก่อรูปของจีโอโพลิเมอร์เจลบริเวณผิวเถ้าลอย

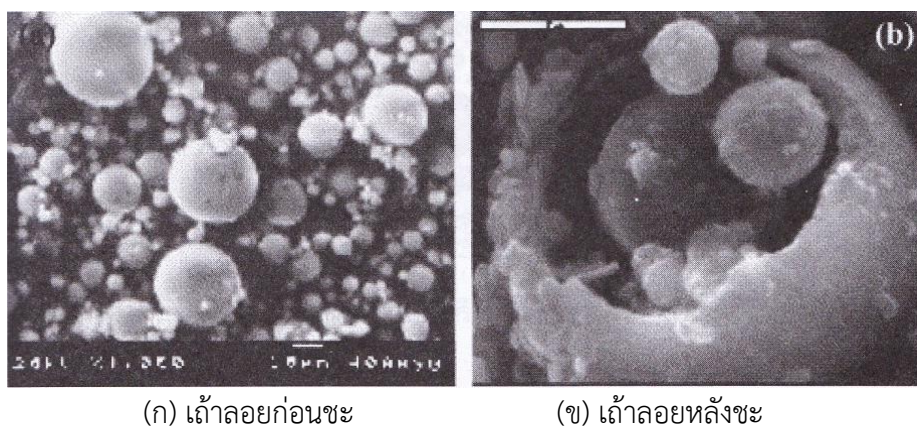


รูปที่ 2.18 การก่อรูปของจีโอโพลิเมอร์เจล ที่เถ้า: (อุบลลักษณ์, 2560)

ในกรณีที่เถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมต่ำ การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จะช้า การเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อนทำให้สมบัติด้านกำลังดีขึ้น หากเถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมสูง จีโอโพลิเมอร์สามารถก่อตัวได้ดีที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายในสภาวะเบส การพัฒนากำลังจะเหมือนกับคอนกรีต คือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม

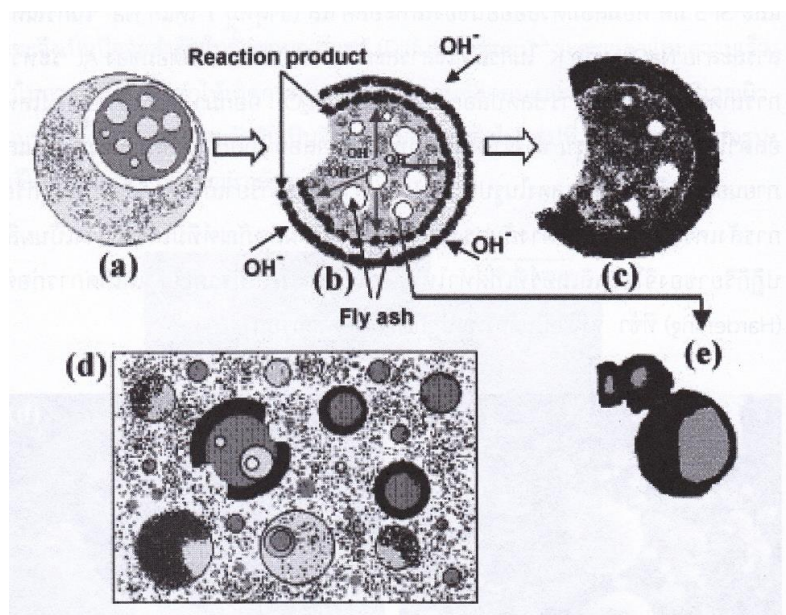
### 2.8.2 โครงสร้างของโพรง

เมื่อเถ้าลอยทำปฏิกิริยาการสลายเบสเกิดจีโอโพลิเมอร์ของโครงสร้าง Al และ Si 3 มิติ ห่อหุ้มด้วยไอออนของโลหะอัลคาไล (ธาตุหมู่ 1 ได้แก่  $\text{Na}^+$  ในกรณีที่ใช้สารละลาย NaOH และ  $\text{K}^+$  ในกรณีที่ใช้สารละลาย KOH) บริเวณอะตอมของ Al ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะมีการปลดปล่อยโมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ออกมา การเข้าชนของโลหะอัลคาไลทำให้เกิดรูพรุน หรือเปิดโพรงอนุภาคเถ้าลอย เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ภายในและภายนอกผิวเถ้าลอย ดังแสดงใน รูปที่ 2.20 การเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยคล้ายกับปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ต่างกันที่ซีโอไลต์ให้ผลิตภัณฑ์โครงสร้างที่เป็นผลึก ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการละลายที่รวดเร็ว แต่เกิดการก่อตัว (Hardening) ที่ช้า จึงจำเป็นต้องเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน



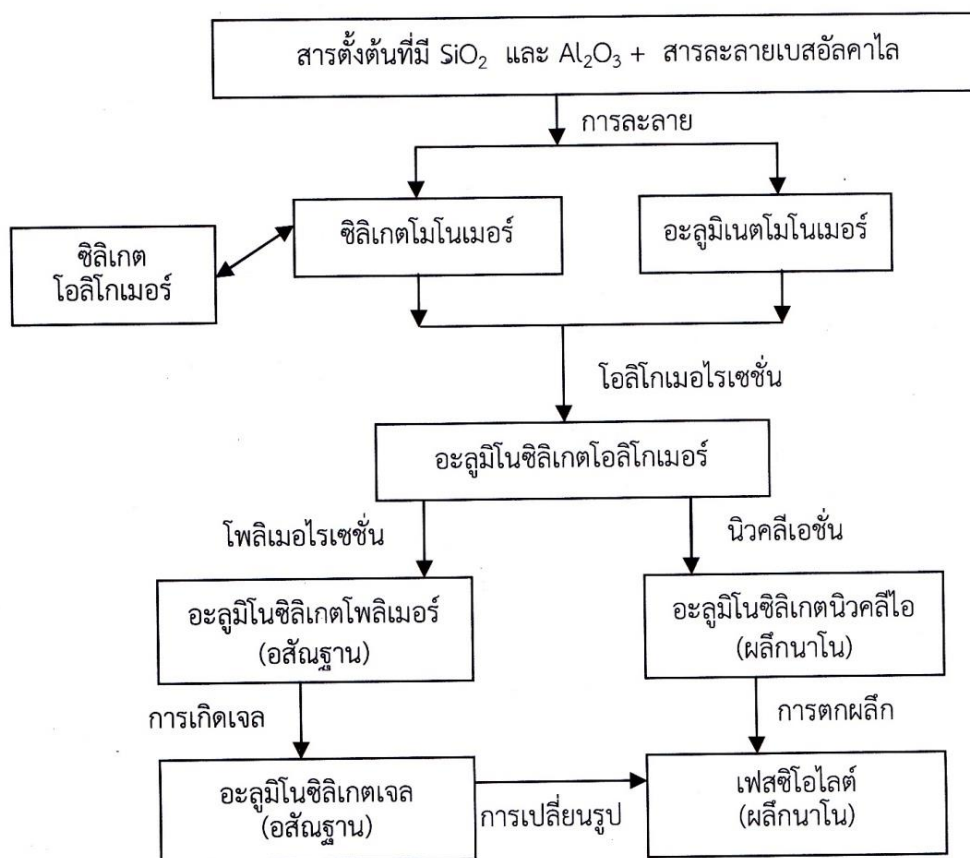
รูปที่ 2.19 โครงสร้างโพรงของจีโอโพลิเมอร์ที่ถูกชะด้วย 8M NaOH ที่ 85 °C ที่มา: (อุบลลักษณ์, 2560)

รูปที่ 2.20 แบบจำลองการเกิดโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยเมื่อชะด้วยสารละลายเบส โดยเบสจะเข้าทำปฏิกิริยาบริเวณผิวเถ้าลอย รูปที่ 2.20a เกิดโพรงและขยายให้โพรงใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.20 ขั้นตอน b และ c พบเถ้าลอยขนาดเล็กเข้าไปในโพรงหรือเถ้าลอยภายในโพรงพวกฟลิโรสเพีย เกิดปฏิกิริยาภายในด้วย เกิดผลิตภัณฑ์ทั้งภายในและภายนอกเปลือกเถ้าลอย ทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีเนื้อแน่น เกิดรูพรุนน้อย



รูปที่ 2.20 แบบจำลองการเกิดโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยเมื่อชะด้วยสารละลายเบส ที่มา: (อุบล  
ลักษณ์, 2560)

นอกจากนี้ ยังพบว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์อาจทำให้เกิดซีโอด์ไลต์ขึ้นได้ผ่าน  
การเกิดนิวเคลียส หรือปฏิกิริยานิวคลีเอชัน และเกิดการตกผลึกเป็นซีโอด์ไลต์ได้หากไม่มีการควบคุมการ  
เกิดปฏิกิริยาหรือใช้ส่วนผสมไม่เหมาะสม และจีโอโพลิเมอร์หรือเจลอะลูมิเนียมซิลิเกตสามารถเปลี่ยนรูป  
เป็นซีโอด์ไลต์ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในแผนผังการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดซีโอไลต์ (อุบลรัตน์, 2560)

## 2.9 น้ำยางพารา

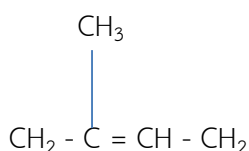
น้ำยาง (latex) มาจากภาษาละติน หมายถึง ของเหลว (liquid) หรือของไหล (fluid) ในบางครั้งก็มีการให้ความหมายว่าเป็นของเหลวหรือของไหลที่มีลักษณะคล้ายน้ำนม (milky) โดยเฉพาะของไหลที่มีส่วนประกอบของน้ำ ในระยะเวลา 10 ปี ก่อนศตวรรษที่ 19 นักพฤกษศาสตร์ ให้ความหมายของน้ำยางว่าเป็นน้ำจากเนื้อเยื่อพืชที่มีลักษณะคล้ายน้ำนม สีขาว ต่อมากลางศตวรรษที่ 19 น้ำยางจึงเป็นคำที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยาง

ความหมายของน้ำยางทางด้านวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยี เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ดังนั้น น้ำยางธรรมชาติที่ได้จาก ต้นยางพารา *Hevea brasiliensis* จึงเป็นสารพอลิเมอร์ของอนุภาคยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกระจายตัวอยู่ในตัวกลางน้ำ

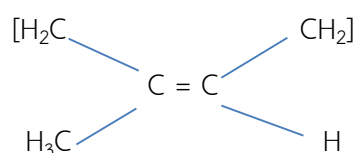
### 2.9.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

น้ำยางจากต้นยางพารา ขณะที่ยังสดจะมีสีขาว หรือ สีครีม สามารถไหลได้เองโดยอิสระ มีความหนืดประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์ (centipoises) ความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm<sup>3</sup>) และ ค่าความเป็นกรดต่าง(pH) 6.5 - 7.0 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลมหรือรูปลูกแพร์ ขนาด 0.05 - 5 ไมโครเมตร

น้ำยางสด เป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในของเหลวที่เรียกว่า ซีรัม (serum) อนุภาคยางดังกล่าว เป็นสารพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีชื่อทางเคมีว่า 1, 4 - พอลิไอโซพรีน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบซิส (cis - 1, 4 - polyisoprene) ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (isoprene) ซึ่งมีคาร์บอน (carbon, C) 5 อะตอม กับ ไฮโดรเจน (hydrogen, H) 8 อะตอม ต่อกันจำนวนมากเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว (วิภาวี พัฒนกุล, 2554)



ไอโซพรีน (isoprene)



พอลิไอโซพรีน (cis - 1, 4 - Polyisoprene)

รูปที่ 2.22 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน ทมา: (วิภาวี พัฒนกุล, 2554)

### 2.9.2 ส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีน ที่เชื่อมต่อกันประมาณ 2000 - 5000 หน่วย ต่อ 1 โมเลกุล
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างๆ หลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ เอนไซม์ และสารประกอบ ไนโตรเจน เป็นต้น

สัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด(คู่มือการตรวจปริมาณยางคงเหลือ, 2560)

| ส่วนประกอบ                                                | สัดส่วน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ส่วนที่เป็นเนื้อยางและไม่ใช่น้ำยาง) | 36                          |
| สารจำพวกโปรตีน                                            | 1 - 1.5                     |
| สารจำพวกเรซิน                                             | 1 - 2.5                     |
| น้ำตาล                                                    | 1                           |
| น้ำ (ปริมาณที่รวมกับสารอื่น แล้วเป็น 100)                 |                             |

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางสด จะมีส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 33% กับส่วนที่ไม่ใช่ยาง (non rubber) 3% แต่เมื่อปั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นแล้ว ส่วนที่ไม่ใช่ยางจะลดลงเหลือประมาณ 1% - 2% ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและการปรับเครื่องปั่น ความแปรปรวนของสารต่างๆ ในน้ำยางขึ้นกับ พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง

### 2.9.3 การรักษาสภาพน้ำยางสด

น้ำยางสดสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ เนื่องจากปัจจัย 2 ประการ คือ

1. ส่วนประกอบของโปรตีนที่ดูดซับอยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคน้ำยาง หรือโปรตีน เป็นชั้นห่อหุ้ม (hydrated protein envelop) อนุภาคน้ำยางไว้ จึงมีความสำคัญ ต่อสถานะความคงตัวของของเหลวของน้ำยางเพราะโปรตีนจะป้องกันการรวมตัวของ อนุภาคน้ำยาง ถ้ามีการสูญเสีย (dehydrated) ในชั้นของโปรตีนที่ห่ออนุภาคน้ำยาง ซึ่งอาจเกิดจากการเติมแอลกอฮอล์หรือ สารบางอย่างลงในน้ำยาง ทำให้อนุภาคน้ำยางมารวมตัว เป็นก้อนยาง (coagulum) น้ำยางก็จะสูญเสียความคงตัวไม่เป็นของเหลว
2. ประจุลบที่อยู่รอบๆ อนุภาคน้ำยางซึ่งก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคน้ำยาง ช่วยรักษาสถานการณ์กระจายตัวของอนุภาคน้ำยางด้วย ทำให้น้ำยางยังเป็นของเหลวอยู่ได้ ถ้าเกิดผลกระทบกระเทือนที่ทำให้ประจุไฟฟ้าลดลง อนุภาคน้ำยางก็จะรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำยางขนาดใหญ่ ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคน้ำยางค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเกิดเป็นก้อนยาง (coagulum) น้ำยางก็จะเสียสภาพการเป็นของเหลว

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดยางมีสถานะเป็นกลางและมีสารประกอบน้ำตาล ที่เป็นอาหารของแบคทีเรีย และ ยีสต์ ที่อยู่ในอากาศ เมื่อน้ำยางสดไหลออกจากต้นยาง แบคทีเรียในอากาศจะปะปนกับน้ำยางบนรอยกรีดยาง เปลือกต้นยาง และในถ้วยรับน้ำยาง ทำให้น้ำตาลเปลี่ยนเป็นสารที่เป็นกรดซึ่งไปทำลายชั้นโปรตีนที่ห่ออนุภาคน้ำยาง ทำให้น้ำยางเสียสภาพการเป็นของเหลว น้ำยางจะหนืดขึ้น และจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งชาวบ้านเรียกว่า เม็ดพริก มีกลิ่นเหม็นบูดเน่าภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง การเสียสภาพแบบนี้ เรียกว่า การจับตัวที่เกิดเองตามธรรมชาติ (natural or spontaneous coagulation) การจับตัวของยางจะช้าเร็วเพียงใดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิความคงตัวของน้ำยางพันธุ์ยาง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางสดที่ได้อยู่ในสภาพของเหลวไม่จับเป็นก้อนจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสด และต้องเลือกสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสดให้เหมาะสมสำหรับการนำน้ำยางสดไปแปรรูปเป็นยางดิบชนิดต่างๆ

#### 2.9.4 สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสด

สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติ ดังนี้

1. มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์
2. ควรมีประสิทธิภาพเป็นต่างเพื่อส่งเสริมสถานะแขวนลอยให้น้ำยาง
3. ทำให้อนุมูลโลหะหนักไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา เพราะอนุมูลเหล่านี้จะส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์
4. สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ที่ช่วยการเจริญของจุลินทรีย์
5. ไม่เป็นพิษต่อคนและต่อคุณภาพของยางก้ำจัดได้ง่ายและก้ำจัดได้สะดวก

#### 2.9.5 น้ำยางข้น

น้ำยางสดจากต้นยางพารา มีองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ ปริมาณเนื้อยางแห้งซึ่งมีประมาณ 25%- 45% และ ส่วนที่เป็นสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางประมาณ 5% ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่เป็นน้ำ เมื่อมีการนำน้ำยางสดไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในโรงงานซึ่งค่อนข้างอยู่ไกลจากสวนยางพารา ทำให้เกิดความไม่สะดวกและไม่เป็นการประหยัดในการขนส่งน้ำยางสดไปยังโรงงาน นอกจากนี้สารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยางอาจมีผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่ดี ดังนั้น จึงมีการผลิตน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ

#### 2.9.6 สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสดเพื่อทำน้ำยางข้น

1. แอมโมเนียช่วยขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ลงปะปนในน้ำยาง ปริมาณแอมโมเนียที่ใช้ อย่างน้อยต้องพอสำหรับการรักษาสภาพน้ำยางไว้ได้ 1 วัน ในทางปฏิบัติมักใช้แอมโมเนียในปริมาณ 0.3% - 0.7% ต่อน้ำหนักน้ำยาง
2. การใช้แอมโมเนียร่วมกับสารช่วย การใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวไม่สามารถป้องกันการเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหย ที่เกิดจากการเจริญของแบคทีเรียในน้ำยาง การใช้สารช่วยร่วมกับแอมโมเนียจะป้องกันการเพิ่มจำนวนของกรดได้ดีกว่าการใช้แอมโมเนียตามลำพัง
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) สามารถทำลายแบคทีเรียในน้ำยางได้ โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.05% กับ แอมโมเนีย 0.3% ต่อน้ำหนักน้ำยาง สามารถยับยั้งการเพิ่มปริมาณของกรดได้นานถึง 2 สัปดาห์ หรืออาจใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับเตตระเมทิลไธยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulfide, TMTD) ในอัตราส่วนเท่าๆ กัน เป็นสารช่วยร่วมกับแอมโมเนีย ในอัตรา 0.025% ต่อน้ำหนักน้ำยาง กับ แอมโมเนีย 0.2 - 0.350% ต่อน้ำหนักน้ำยาง จะรักษาน้ำยางสดที่มีจำนวนกรดไขมันระเหยต่ำกว่า 0.02 ได้นานถึง 10 วัน

4. ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc diethyl dithiocarbamate, ZDC) ใช้ซิงค์ไดอัลคิลไดไธโอคาร์บาเมต 0.01% ร่วมกับ แอมโมเนีย 0.3% สามารถรักษาสภาพน้ำยางได้เกิน 2 อาทิตย์

### 2.9.7 การผลิตน้ำยางข้น มี 4 วิธี คือ

1. การระเหยน้ำ (evaporation) วิธีนี้ต้องมีการเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (stabilizer) เช่น potassium soap ในถังน้ำยาง แล้วให้ความร้อนรอบๆ ถัง เมื่อน้ำระเหยไปน้ำยางข้นที่ได้ จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% caustic potash 1.5% และสารที่ทำให้น้ำยางคงตัวกับโปรตีนประมาณ 13.5% วิธีนี้เหมาะกับการขนย้ายน้ำยางไปในระยะทางไกล และเหมาะกับการนำไปผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ต้องใส่สารเพิ่ม (filler) จำนวนมาก เช่น การผลิตกาว

2. การทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีนี้มีการเติมสารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น sodium alginate, locust bean gum, dum karaya, gum tragacanth เป็นต้น ทำให้เกิดครีมจะพอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น และลอยมาที่ผิว น้ำยางน้ำยางข้นที่ได้มีความบริสุทธิ์ และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านวิธีการทำให้เกิดครีมหลายๆ ครั้ง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเวลา

3. วิธีนี้แยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากส่วนที่เป็นน้ำ คือ ซีรัม โดยใช้เครื่องปั่นแยก น้ำยางข้นที่ได้มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางการค้า

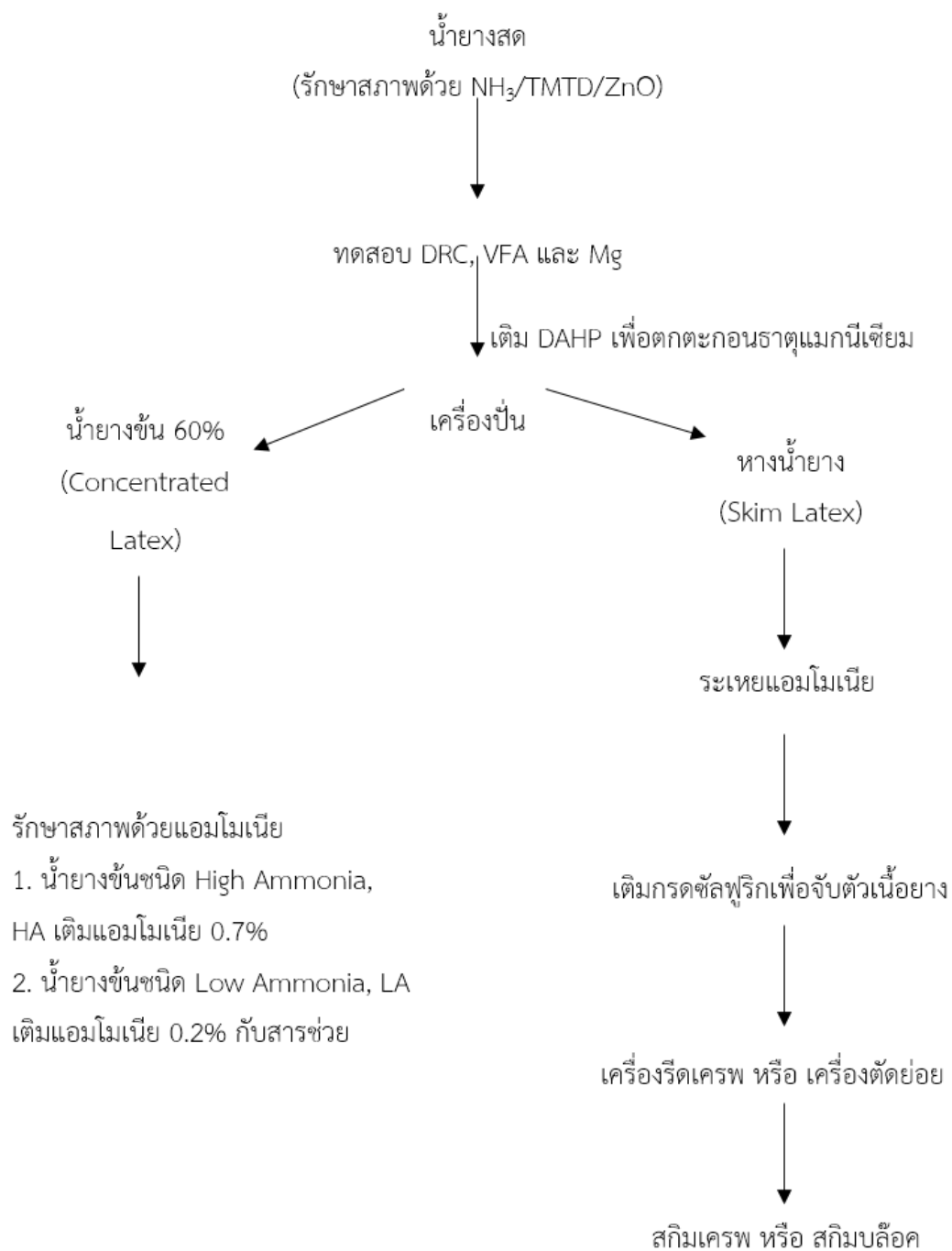
4. การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation) วิธีนี้ใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของซีรัม โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่เติมสารช่วยให้น้ำยางคงตัวไว้แล้วเนื่องจากอนุภาคยางมีประจุลบหุ้มอยู่ จึงค่อยๆ เคลื่อนไปรวมที่ขั้วบวกและลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวของน้ำยาง แต่วิธีนี้ไม่สะดวกและลงทุนสูง

### 2.9.8 การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่น

การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่น ตามรูปที่ 4 มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

#### 1. การรวบรวมน้ำยางสด

โรงงานผลิตน้ำยางข้นรวบรวมน้ำยางสดจากแหล่งต่างๆ โดยโรงงานมีการตั้งจุดรับซื้อน้ำยางหรือ ชาวสวนยางบางรายอาจขนน้ำยางสดมาส่งที่โรงงานโดยตรง น้ำยางสดที่รวบรวมได้จะถ่วงลงถังรวมสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและปฏิบัติ คือ การรักษาความสะอาด และ การใช้สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางที่ถูกต้องและพอเพียง ควรนำน้ำยางสดเข้ากระบวนการผลิตให้เร็วที่สุด เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี



รูปที่ 2.23 การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการปั่น และการผลิตยางสกิมจากหางน้ำยาง (วิภาวี พัฒนกุล, 2554)

## 2. การตรวจสอบน้ำยางสด

เก็บตัวอย่างน้ำยางสดในถังรวมมาตรวจสอบ ปริมาณเนื้อยางแห้ง ปริมาณ กรดไขมันระเหย และ ปริมาณธาตุแมกนีเซียม เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับปรับสมบัติน้ำยางสดให้เหมาะสม โดยปกติน้ำยางสดที่จะนำไปปั่นเป็นน้ำยางข้นควรมีปริมาณธาตุแมกนีเซียม 50 ส่วนต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำยาง 1 ล้านส่วน (50 ppm on total solid) เพราะธาตุแมกนีเซียมจะทำให้ น้ำยางสูญเสียความคงตัวต่อเครื่องกล ดังนั้นถ้าน้ำยางสดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเกิน 50 ppm ในทางปฏิบัติโรงงานจะมีการเติมสารเคมี ไดแอมโมเนียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate, DAHP) เพื่อให้ DAHP จับธาตุแมกนีเซียมและตกตะกอนในลักษณะของตะกอน (sludge) ซึ่งใช้เวลาอย่างน้อย 1 วัน

## 3. การปั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้น

ไขน้ำยางจากถังเก็บไปปั่นแยกส่วนที่เป็นน้ำออกด้วยเครื่องปั่น น้ำยางที่ได้จากเครื่องปั่นส่วนหนึ่ง คือ น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลพลอยได้ คือ หางน้ำยาง (skimlatex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่ประมาณ 8% จะถูกนำไปผลิตเป็นยางสกิม

## 4. การรักษาสภาพน้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ได้ต้องมีการรักษาสภาพน้ำยาง โดยส่วนใหญ่มีการเติมแอมโมเนีย เพราะแอมโมเนียเป็นตัวทำลายแบคทีเรีย ระบบการรักษาสภาพน้ำยางข้นด้วยแอมโมเนียมี 2 ระบบ คือ

1. ระบบที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7% ต่อน้ำหนักน้ำยาง เรียกว่า น้ำยางข้นชนิดนี้ว่า HA (High Ammonia)

2. ระบบที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียน้อย ประมาณ 0.2% ต่อน้ำหนักน้ำยาง และมีการใช้สารช่วยบางชนิดร่วมด้วย เช่น เตตระเมทิลไธยูเรมไดซัลไฟด์ ร่วมกับ ซิงค์ออกไซด์ (Tetramethyl Thiuram Disulphide/Zinc Oxide, TMTD/ZnO) เรียกว่าน้ำยางข้นชนิดนี้ว่า LA (Low Ammonia)

### 2.9.9 สมบัติน้ำยางข้น

วิธีการทดสอบสมบัติน้ำยางข้น โดยทั่วไปจะอิงตามมาตรฐานการทดสอบขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Organization for Standardization, ISO) คือ ISO 2004 - 2000 ระบุสมบัติที่ต้องทดสอบและขีดจำกัดของน้ำยางข้นที่ผลิตจากวิธีการปั่นสมบัติที่ระบุคุณภาพของน้ำยางข้นที่ผลิตได้ คือ

1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids Content, TSC) เป็นปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางรวมกับสารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำซึ่งจะคงเหลือเป็นฟิล์มยาง ภายหลังจากการทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิทดสอบและบรรยากาศที่เหมาะสม

2. ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content) เป็นปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยาง ซึ่งได้จากการทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดอะซิติก ภายใต้การควบคุมสภาพการจับตัวอย่างแน่นอน

3. ความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นปริมาณด่างอิสระทั้งหมดในน้ำยาง แสดงเป็นปริมาณแอมโมเนีย เพราะส่วนใหญ่จะรักษาสภาพน้ำยางด้วยแอมโมเนีย

4. เวลาความคงตัวของเครื่องมือกล (Mechanical Stability Time, MST) เป็นเวลาที่ บ่งถึงความเสถียรของน้ำยางต่ออิทธิพลทางกล คือ การปั่นกวนน้ำยางภายใต้สถานะที่ควบคุม เมื่อน้ำยางเสียความคงตัว อนุภาคยางจะเริ่มเกาะ หรือ จับตัวกันเป็นเม็ด

5. จำนวนกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid Number, VFA No.) เป็นปริมาณของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นโดยการไฮโดรไลซิสของคาร์โบไฮเดรตในซีรัมของน้ำยาง ประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดพรอพิโอนิก เป็นส่วนใหญ่ ปริมาณของกรดไขมันระเหยในน้ำยางแสดงเป็นจำนวนกรดไขมันระเหย ซึ่งหมายถึงจำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กรดไขมันระเหยทั้งหมดในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม เป็นกลาง

6. ปริมาณทองแดง (Copper Content) เป็นธาตุทองแดงที่อยู่ในส่วนที่ไม่ใช่ยางในน้ำยาง มีผลต่อความคงตัวของน้ำยาง เนื่องจากธาตุทองแดงเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโมเลกุลยาง

7. ปริมาณแมงกานีส (Manganese Content) เป็นธาตุแมงกานีสที่อยู่ในส่วนที่ไม่ใช่ยางในน้ำยาง มีผลต่อความคงตัวของน้ำยาง เนื่องจากธาตุแมงกานีสเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในโมเลกุลยาง

8. จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide Number, KOH No.) เป็นจำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สมมูลย์พอดีกับอนุมูลของกรดทั้งหมดที่รวมกับแอมโมเนียในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม นั่นคือ จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวระบุปริมาณของสบู่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของกรดทั้งหมดกับแอมโมเนีย

9. ปริมาณก้อนยางจับตัว (Coagulum content) เป็นปริมาณของสารที่ตกค้างอยู่บนตัวกรองสเตนเลส ขนาดความกว้างของช่อง 180 + 15 ไมโครเมตร สารเหล่านี้ประกอบด้วย เศษยางจับตัว และสารอื่นๆ ที่เจือปนในน้ำยาง

10. ปริมาณตะกอน (Sludge content) เป็นสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่ยางจะตกตะกอนลงก้นภาชนะเมื่อมีการปั่นกวนน้ำยาง สิ่งเจือปนดังกล่าวประกอบด้วยสิ่งสกปรกพวกฝุ่นทราย เปลือกไม้ และแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

## 2.10 มวลรวม

ทั้งมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นอย่างมาก เพราะในส่วนผสมของคอนกรีตจะประกอบไปด้วยมวลรวมประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาตรทั้งหมด โดยมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อยกระจายอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความทนทาน ลดการขยายและหดตัวของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความเสถียรของปริมาตรมากขึ้น คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ความแข็งแรง ความสะอาด ขนาดคละ รูปร่างและลักษณะผิว ความชื้น และการดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ และหน่วยน้ำหนัก

### 2.10.1 ความแข็งแรง

กำลังของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับกำลังของมอร์ตาร์และมวลรวม กำลังรับแรงอัดของหินที่ดีต้องสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มากๆ ส่วนใหญ่กำลังรับแรงอัดของหินที่นำมาใช้มีค่าระหว่าง 700 ถึง 3000 กก./ตร.ซม. การวัดความแข็งแรงของมวลรวมที่นิยมวัดได้แก่ การทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนด้วยเครื่องลอสแองเจลลิส ตามมาตรฐาน ASTM C131

### 2.10.2 ความสะอาด

มวลรวมสำหรับผสมคอนกรีตจะต้องสะอาดจะต้องปราศจากสิ่งที่เป็นอันตราย ได้แก่ สารเจือปน วัสดุละเอียด และอนุภาคที่ไม่คงตัว

### 2.10.3 สารเจือปน

สารเจือปนที่ติดมากับมวลรวมส่วนมากจะเป็นสารอินทรีย์จำพวกกรดแทนนิก ซึ่งมาจากเศษซากพืชที่เน่าและสลายตัว ซึ่งจะพบในมวลรวมละเอียดมากกว่ามวลรวมหยาบ การทดสอบอินทรีย์สารในมวลรวมละเอียดทำได้ตามมาตรฐาน ASTM C40

### 2.10.4 วัสดุละเอียด

วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน หรือวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เช่น ดินเหนียว ทรายแป้ง หรือฝุ่นของหิน วัสดุเหล่านี้จะทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำมากขึ้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง นอกจากนั้นการที่วัสดุเหล่านี้เกาะตามผิวของมวลรวมจะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับเพสต์ลดลง

### 2.10.5 อนุภาคที่ไม่คงตัว

อนุภาคที่ไม่คงตัว คืออนุภาคที่มีน้ำหนักเบา เช่น หินดินดาน ก้อนดินเหนียว เศษไม้ ถ่านหิน อนุภาคที่มีน้ำหนักเบาสามารถทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ เนื่องจากอนุภาคบางชนิด เช่น ถ่านหิน เมื่อได้รับความชื้นจะขยายตัว ทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้เนื่องจากความสะอาดของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C33 จึงได้กำหนดปริมาณสารอันตรายสูงสุดในมวลรวมดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารอันตรายสูงสุดในมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33

| ชนิดของสารอันตราย                   | มวลรวมหยาบ |        | มวลรวมละเอียด |        |
|-------------------------------------|------------|--------|---------------|--------|
|                                     | งานเฉพาะ*  | ทั่วไป | งานเฉพาะ      | ทั่วไป |
| ก้อนดินเหนียวและอนุภาคที่แตกหักง่าย | 3.0        | 5.0    | 3.0           | 3.0    |
| ถ่านหิน                             | 0.5        | 0.5    | 0.5           | 1.0    |
| หินเชิร์ต                           | 5.0        | 5.0    | -             | -      |
| อนุภาคนขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200  | 1.0        | 1.0    | 3.0           | 5.0    |

### 2.10.6 ขนาดคละ

มวลรวมหยาบ คือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องของตะแกรงเบอร์ 4 ส่วนมวลรวมละเอียดคือ มวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องของตะแกรงเบอร์ 4 ขนาดคละที่ดีจะต้องเป็นมวลรวมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ลดหลั่นกันไป ไม่ควรมีการข้ามขนาด การเลือกใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถลดปริมาณเพสต์ และลดความต้องการน้ำได้ทำให้คอนกรีตมีกำลังดีขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเพสต์เท่าเดิม แต่ต้องระวังเรื่องการใช้มวลรวมขนาดใหญ่เกินไปอาจทำให้เนื้อคอนกรีตมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้กำลังลดลงได้ การที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดคละที่ดีจะสามารถลดความต้องการเพสต์ทำให้คอนกรีตเกาะตัวกันดีไม่แยกตัว ทำให้เทเข้าแบบง่าย ทำให้แน่นง่าย การปาดหน้าแต่งผิวง่าย และยังประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย

### 2.10.7 รูปร่างและลักษณะผิว

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ เช่น ถ้ามวลรวมมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม จะทำให้ความสามารถในการเทต่ำลง เพราะมวลรวมจะเกิดการขัดกัน ส่วนมวลรวมที่มีลักษณะมน และผิวเรียบ จะมีความต้องการเพสต์น้อย และมีการขัดกันระหว่างมวลรวมต่ำ ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น แต่รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมที่มีผิวหยาบจะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ ทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

### 2.10.8 ความชื้นและการดูดซึมน้ำ

เนื้อของมวลรวมมีช่องว่างเล็กๆ ที่น้ำสามารถไหลเข้า ออกได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม มวลรวมจึงสามารถดูดน้ำได้ ความสามารถในการดูดซึมน้ำมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต มวลรวมที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงจะทำให้คอนกรีตสดมีสภาพแห้ง ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ต่ำลง และหากมวลรวมมีความชื้นสูงเกินไป จะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงเกินกว่าที่ออกแบบไว้ ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

### 2.10.9 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น ความถ่วงจำเพาะที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ค่า คือ

- 1) ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ (Absolute specific gravity)
- 2) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)
- 3) ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)

ปริมาตรสำหรับนำมาคิดความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ เป็นปริมาตรของเนื้อมวลรวมเท่านั้น ในการหาความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์จึงต้องบดมวลรวมให้ละเอียด ถ้ารวมปริมาตรของโพรงที่น้ำซึมผ่านได้มาคำนวณ ความถ่วงจำเพาะที่ได้จะเป็นความถ่วงจำเพาะปรากฏ และถ้าคิดปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงทั้งหมด ความถ่วงจำเพาะที่ได้จะเป็นความถ่วงจำเพาะรวม สำหรับการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลหยาบและมวลรวมละเอียดมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C127 และ ASTM C128 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมทั่วไปที่ใช้กันทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 2.7

#### 2.10.10 หน่วยน้ำหนัก

หน่วยน้ำหนัก คือ น้ำหนักของมวลรวมที่บรรจุเต็มภาชนะต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างระหว่างมวลรวมที่มวลรวมน้ำหนักหนึ่งๆ จะบรรจุลงได้ ใช้ในการเปลี่ยนน้ำหนักของมวลรวมให้เป็นปริมาตรในการคำนวณปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

สำหรับมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตโดยทั่วไปมีหน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่นระหว่าง 1,450 ถึง 1,750 กก./ม.3 โดยขึ้นอยู่กับการกระจายขนาด รูปร่างขนาดของมวลรวม รายละเอียดของวิธีการทดสอบมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C29

### 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. Ohama (1995) ศึกษาผลของสภาวะการบ่มที่เป็นประโยชน์สำหรับสารซีเมนต์และคอนกรีตที่มีการปรับสภาพด้วยน้ำยาง เนื่องจากสารซีเมนต์และคอนกรีตทั่วไป และน้ำยางชั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นความแข็งแรงของสารซีเมนต์ หรือคอนกรีตสามารถจะมีการพัฒนาภายใต้สภาวะเปียก เช่น การแช่น้ำ และการใช้ความชุ่มชื้นสูง ซึ่งการพัฒนาความแข็งแรงของน้ำยางต้องการพัฒนาภายใต้สภาวะแห้ง เห็นได้ชัดว่าความแข็งแรงที่เหมาะสมในการปรับสภาพของมอดาร์และคอนกรีตจะได้จากการให้ความชุ่มชื้นของปูนซีเมนต์ภายใต้สภาวะเปียกที่อายุดัน ๆ ตามด้วยสภาวะแห้ง เพื่อส่งเสริมการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์เนื่องจากการรวมกันของอนุภาคโพลิเมอร์ในน้ำยาง

Y. Ohama (1987) ได้อธิบายการก่อตัวของคอนกรีตผสมน้ำยางไว้ว่า น้ำยางที่ใช้ผสมจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Emulsion) โดยอนุภาคของโพลิเมอร์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำยางเหลว ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางเข้ากับคอนกรีตแล้ว มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ 1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ และ 2) ปฏิกิริยาการก่อตัวเป็นฟิล์มที่เกิดจากอนุภาคของโพลิเมอร์มารวมตัวกัน(Coalesce) ซึ่งการก่อ

ตัวของชั้นฟิล์มเสมือนเป็นเนื้อเดียวกันกับคอนกรีต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานหรือตัวยึด (Binder) ระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกันเป็นคอนกรีต

**Mansour Fakhri and Farshad Saberi (2016)** ศึกษาการใช้เศษยางรถยนต์รีไซเคิลในงานผิวทางคอนกรีตบดอัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาคือการหาคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตบดอัด รวมทั้งหน่วยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดและดัด และความสามารถในการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง โดยใช้อนุภาคของยางมาใช้แทนมวลรวมละเอียดทรายที่ 0, 5%, 10% และ 35% และใช้ซิลิกาฟุ่มแทนปูนซีเมนต์ใน 8 ส่วนผสม ขึ้นรูปให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้คอนกรีตอัดแทนการใช้เครื่องสั่น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้นเมื่อผสมยาง 5% และ 10% โดยไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม และ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยผสมซิลิกาฟุ่ม แต่การผสมเศษยางในส่วนผสมอื่นส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง พบว่ากำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นสำหรับตัวอย่างที่มีการเพิ่มเศษยางเป็น 5 % โดยไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม แม้ว่ากำลังรับแรงดัดในส่วนผสมอื่นจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการแทนที่ทรายโดยใช้เศษยางช่วยลดการดูดซึมน้ำและชัดเจนยิ่งขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่ม

**Bala Muhammada, Mohammad Ismail (2011)** ศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนจากสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อความแข็งแรง และความทนทานของคอนกรีต งานวิจัยนี้รายงานผลการทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพของยางธรรมชาติที่ปรับปรุงใหม่เพื่อปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดและเป็นซัลเฟต โดยใช้เทคนิคการบ่มในกรดซัลฟิวริก 5% ( $H_2SO_4$ ) และโซเดียมซัลเฟต 2.5% ( $Na_2SO_4$ ) อัตราส่วนน้ำยางชั้นต่อน้ำ มีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 20% โดยใช้ SEM นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความสามารถในการซึมผ่านซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีที่กระทำต่อคอนกรีต โดยการทดสอบการดูดซึมน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมปริมาณน้ำยางที่เหมาะสมเข้ากับคอนกรีตมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการกัดกร่อน  $H_2SO_4$  และ  $Na_2SO_4$  ยกตัวอย่าง เช่นการใช้  $Na_2SO_4$  เพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณ 86.2% ภายในระยะเวลา 84 วัน อย่างไรก็ตามจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างมากสำหรับตัวอย่างที่มีน้ำยางในตัวอย่างที่ได้รับการปรับปรุงภายใต้  $H_2SO_4$  แสดงให้เห็นว่ามีการกัดกร่อนโดยสารที่เป็นกรดในสารไฮโดรคาร์บอน

**Bala Muhammada, Mohammad Ismail, Muhammad Aamer Rafique Bhutta and Zaiton Abdul-Majid (2011)** ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตโดยการผสมสารโพลีเมอร์เข้ากับคอนกรีต บทความนี้รายงานผลการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของสารที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำยางธรรมชาติต่อความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติ โดยเลือกสายพันธุ์ยางพาราจำนวน 6 ชนิด เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต และทำการบ่มเพื่อให้ซีเมนต์มีความแข็งแรงด้วยความชื้น

และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยน้ำยางตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยน้ำยางที่มีสารไฮโดรคาร์บอนสูงโดยเฉพาะกรดไขมัน และสังกะสีส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยพบว่าการสูญเสียความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 12.4% เมื่อคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางที่มีปริมาณกรดไขมัน และสังกะสี อย่างไรก็ตามยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตปกติ 2% และ 4%

**ประชุม (2551)** พบว่าเมื่อผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่กำลังอัด กำลังดัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว และอัตราการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมากเมื่อใส่ปริมาณน้ำยางชั้นเพียงเล็กน้อยแต่กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่น้ำยางชั้นในปริมาณที่สูงขึ้น แสดงว่าการใส่น้ำยางชั้นที่เหมาะสมสามารถนำไปพัฒนาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีสมบัติความทึบน้ำสูงได้ต่อไป

สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาการนำยางธรรมชาติมาใช้นำพัฒนางานคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเทคนิคการผสมน้ำยางในคอนกรีตอย่างเหมาะสม โดยพิจารณาถึงความสามารถเทได้ และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมน้ำยางในสัดส่วน  $P/C = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  ตามลำดับ ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์:ทราย: หิน เป็น 1: 2: 4 โดยน้ำหนัก บ่มความชื้น 7 วันตามด้วยบ่มแห้งในอากาศที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า น้ำยางผสมกับคอนกรีตได้ด้วยการผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ สัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ด้านความสามารถเทได้พบว่า คอนกรีตจะยุบตัวแบบฮวบทั้งหมด ในด้านกำลังพบว่า คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการวิบัติจะมีเส้นใยขนาดเล็กสีขาวยืดรั้งไว้ สำหรับกำลังรับแรงดัดพบว่าลดลงประมาณร้อยละ 10 ในแต่ละค่า  $P/C$  ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 14 และ 28 วัน ที่  $P/C = 0.15$  และ  $0.20$  กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติเนื่องจากอนุภาคน้ำยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม ที่แข็งแรงขึ้น จากผลการวิจัย เสนอแนะให้เลือกใช้ที่  $W/C = 0.4$  และ  $P/C = 0.15$  ซึ่งจะได้กำลังรับแรงดัดมากกว่า 30 กก./ชม.2 ที่อายุบ่มแห้ง 14 วัน ขึ้นไป อย่างไรก็ตามยังไม่เหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัด แต่อาจเหมาะกับงานซ่อมแซม เนื่องจากการยืดเหนียวของน้ำยาง จะมีประโยชน์ในการเป็นตัวประสานกับคอนกรีตเดิม ทั้งนี้จึงควรศึกษาหาวิธีการพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตเพิ่มเติมเพื่อจะได้นำไปใช้งานในด้านอื่นเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งควรศึกษาในด้านของคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนอีกด้วยว่าเหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่

**ปริญญา จินดาประเสริฐ, ณัฏกิจ ชาริรัตน์ และ วราภรณ์คุณาวานากิจ (2548)** ศึกษาเบื้องต้นของการสังเคราะห์อีโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ สารอีโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินา ในรูปอสัณฐาน โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จากการทดสอบพบว่าสามารถสังเคราะห์สารอีโพลิเมอร์จากเถ้า

ลอยแม่เมาะได้ โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่า ความละเอียดของถ้ำลอย ชนิดและความเข้มข้นของต่าง ปริมาณสารลดน้ำพิษ และเวลาในการบ่มมีผลต่อกำลังของจีโอโพลีเมอร์

**วิเชียร ขาสี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555)** ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วนซิลิกา และอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) เติร์มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

**ธนากร ภูเงินขำ และ ธีรวัฒน์ ลินสิริ(2554)** ศึกษาความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมท์ โดยการแทนที่ไดอะตอมไมท์ในถ้ำลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก และศึกษาการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน เท่ากับ 0.5, 1.0, 15, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ ร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75, และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบการไหลผ่านของมอร์ตาร์ และกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5-2.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และยังพบว่า การเพิ่มน้ำสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงาน แต่กำลังรับแรงอัดจะลดลง อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มในการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการบ่ม แต่ในช่วงอายุปลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่ไดอะตอมไมท์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 และ 80 มีความเหมาะสมในการให้กำลังอัด และการไหลผ่านที่ดี

**Menglim Hoy, Suksun Horpibulsuk, Runglawan Rachan, Avirut Chinkulkijniwat, Arul Arulrajah(2016)** ศึกษาความแข็งแรง และการชะล้างของสารละลายในผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล และวัสดุผิวทางจีโอพอลิเมอร์แอสฟัลต์จากถ้ำลอย พบว่าเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วน  $NaOH/Na_2SiO_3 = 100:0$  ก่อให้เกิด

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันต่ำ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของจีโอโพลิเมอร์แอสฟัลต์รีไซเคิลกับเถ้าลอย ตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วน  $\text{NaOH} / \text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่างๆที่ผสมจีโอโพลิเมอร์แอสฟัลต์รีไซเคิลกับเถ้าลอยสามารถพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติมสาร  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่มีซิลิกาที่ละลายได้สูงเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมิเนียมที่ได้จากเถ้าลอย และผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล โดยมีแคลเซียมอิสระจากเถ้าลอย และจึงเกิดเป็นเจลของ N-A-S-H และผลิตภัณฑ์ของ C-A-S-H ส่งผลให้ที่อายุ 7 วัน ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของจีโอโพลิเมอร์แอสฟัลต์รีไซเคิลกับเถ้าลอยเพิ่มขึ้นด้วยการลดอัตราส่วน  $\text{NaOH} / \text{Na}_2\text{SiO}_3$  ผลการทดสอบ TCLP แสดงให้เห็นว่าการชะละลายไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับตัวอย่างที่ใช้ผิวทางจีโอโพลิเมอร์แอสฟัลต์รีไซเคิลกับเถ้าลอยในการก่อสร้างถนน เนื่องจากการยึดเกาะในจีโอโพลิเมอร์ช่วยลดการชะล้างของโลหะหนักในผิวทางจีโอโพลิเมอร์แอสฟัลต์รีไซเคิลกับเถ้าลอยผลจากการวิจัยนี้จะช่วยส่งเสริมการเลือกใช้วัสดุรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นในการก่อสร้างถนนอย่างยั่งยืน

**A. Ferná'ndez-Jime'nez, A. Palomo\*, M. Criado (2004)** ศึกษากลุ่มตัวอย่างเถ้าลอยแบบอัลคาไลที่บ่มด้วยความร้อน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเครื่องมือสำหรับการติดตามการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเมทริกซ์ซีเมนต์ที่สร้างขึ้นเป็นผลมาจากการชะละลายเถ้าลอยแบบอัลคาไล นอกจากนี้รูปทรงกลมของเถ้าลอยช่วยในการกำหนดรูปแบบแนวคิดง่าย ๆ ที่สามารถอธิบายกระบวนการการชะละลายอัลคาไลของเถ้าในรูปแบบของขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอและถูกควบคุมโดยการละลายในระยะแรกของปฏิกิริยาและด้วยกลไกการแพร่กระจายหลังจากนั้น อัตราการกระตุ้นปฏิกิริยาและองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การกระจายขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบแร่ของเถ้าลอยเริ่มต้น ชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้น จากการทดสอบพบว่าระดับการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8 โมลาร์เทียบกับเวลาในการบ่มด้วยอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส โดยระดับการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกับเวลา และยังพบว่าการเกิดปฏิกิริยาจะสูงเป็นพิเศษในช่วงแรกของการบ่มด้วยความร้อน

**Xueying (2013)** กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย Class C มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วจนกระทั่งอายุตัวอย่าง 7 วันการพัฒนา กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย Class F ผสมกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  พบว่ามีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดค่อยๆเพิ่มขึ้นจะถึงอายุ 28 วัน การบ่มด้วยไอน้ำ 60 องศาเซลเซียส 24 ชม. การบ่มด้วยไอน้ำ 60 องศาเซลเซียส 6 ชม. พบว่ามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส แต่พบว่ามีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่าประเภทที่บ่มด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการบ่มด้วยความร้อนในตู้อบ 60 องศาเซลเซียส 24 ชม. มีกำลังรับแรงอัดที่ 3 วันสูงกว่าในการบ่มทุกประเภทแต่กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น

Mo Bing-hui, He Zhu, Cui Xue-min, He Yan, Gong Si-yu(2014) ศึกษาผลกระทบของการบ่มที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (อยู่ในช่วง 20 ถึง 100 ° C) โดยใช้ระบบการต้านทานการนำไฟฟ้าในกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันในการวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการก่อตัวโดยใช้ชุดทดสอบของไวแคตโดยสามารถอธิบายได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มมีต่อการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ดินขาวเผา นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ด้วย ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งการละลายโพลิเมอร์ในกระบวนการย่อยสลายของปฏิกิริยา อุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์ อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดที่มีความสามารถรับแรงอัดได้สูงถึง 97.95 MPa จากการบ่ม 7 วัน

Ali A. Aliabdo a, Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty a, Hazem A. Salem (2016) บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอย, ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ระยะเวลาและอุณหภูมิการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยโดยทำการทดสอบการรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น การดูดซึมน้ำ และการวิเคราะห์ความร้อน (TGA) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปการเติมปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทั้งหมด ยกเว้นความสามารถในการใช้งานได้ การเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์การใช้สารละลายที่พักไว้ 30 นาทีมีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้สารละลายที่พักไว้ 24 ชั่วโมง สมบัติของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ ได้รับผลกระทบอย่างมากจากวิธีการบ่ม

Rashidah Mohamed Hamidi\*, Zakaria Man and Khairun Azizi Azizli (2016) ศึกษาความเข้มข้นของ NaOH ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย การสังเคราะห์เมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตและสารกระตุ้นอัลคาไลเป็นวัสดุเริ่มต้นหลัก ซึ่งก่อนหน้านี้การใช้เถ้าลอย ตะกรันหรือดินขาวและมักจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ตามลำดับ บทความนี้จะอธิบายถึงผลกระทบของความเข้มข้นของ NaOH ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย นำตัวอย่างไปบ่มด้วยอุณหภูมิการบ่มคงที่ (60 องศาเซลเซียส) และเวลาในการบ่ม (1 วัน) อิทธิพลของความเข้มข้นของ NaOH ในช่วง 4 ถึง 18 M ทำการศึกษาโดยใช้ (FTIR) สำหรับการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกล้อง (SEM) เพื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกำหนดสมบัติเชิงกล ดำเนินการโดย Universal Testing Machine (UTM) จากผลที่ได้รับจากความเข้มข้น NaOH ที่เหมาะสม (12 M) ที่จีโอโพลิเมอร์ มีคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด

Zeng-Qiang Shi and D.D.L.Chung (1997) ศึกษาปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดสีของมอร์ตาร์ ความสามารถในการทนต่อการกัดสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มน้ำยาง 20% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และปรับปรุงโดยใช้เส้นใยคาร์บอนสั้น 0.27 % โดยปริมาตร ปัจจัยทั้งสอง

เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นโดยการเติมซิลิกาฟุ่ม 15% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เนื่องจากโมดูลัสยืดตัวเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าสำหรับมอร์ตาร์ที่มีซิลิกาฟุ่มกับน้ำยาง แต่จะแย่งสำหรับมอร์ตาร์ที่มีซิลิกาฟุ่มกับน้ำยางและใส่เส้นใยคาร์บอน

**Mohammad Ismail, Bala Muhammad and Nur Aiza Mohamad(2009)** ศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนจากสารเคมี บทความนี้รายงานผลการศึกษาเพื่อประเมินผลกระทบของน้ำยางธรรมชาติต่อความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และความชื้นในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และการใช้น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นในการศึกษาครั้งนี้ปริมาณน้ำยางมีค่าตั้งแต่ 0-5% และอัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำ 0 - 10% โดยทำการทดสอบความต้านทานต่อสารเคมีและการดูดซึมน้ำตามลำดับ ใช้สารโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 2.5% ในการทดสอบแทนการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนจากโซเดียมซัลเฟต( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และการดูดซึมน้ำความชื้นได้รับผลกระทบอย่างมากจากปริมาณน้ำยางที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม โดยพบว่าความสามารถในการต้านทานสูงสุดต่อการซึมผ่านของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  คือ อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำ 1.5% ขณะที่การดูดซึมน้ำต่ำสุด คือ อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำ 5% ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสำคัญของการใช้ปริมาณน้ำยางขึ้นที่เหมาะสมในกระบวนการแปรสภาพของคอนกรีตทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนจากซัลเฟตและการซึมน้ำ การเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติลงในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการโจมตีของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และเพิ่มขีดความสามารถในการลดน้ำ สามารถใช้อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำ 1.5% ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการป้องกันการซึมผ่านของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) โดยยังคงความแข็งแรงสูงสุดไว้ได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตสูงกว่าความแข็งแรงสามารถเพิ่มอัตราส่วนของน้ำยางต่อน้ำที่สูงขึ้นได้เนื่องจากเป็นการลดค่าความแข็งแรง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำ 5% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงสุดสำหรับคอนกรีต

**Santiago Alonso, Angel Palomo(2000)**ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากดินขาวเผาที่เกิดปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ ในสภาวะที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยการกระตุ้นด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1: 1 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์แตกต่างกัน คือ 5, 10, 12, 15 และ 18 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลาช่วง 24 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีด้วยเทคนิค (XRD, FTIR และ nuclear magnetic resonance (NMR))เมื่อความเข้มข้นในการกระตุ้น คือ 5 โมลาร์ หรือน้อยกว่านั้น พบว่าดินขาวเผามีผลผลิตจากปฏิกิริยารองที่สำคัญคือ เจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C - S - H)ถ้าความเข้มข้นของสารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 10 โมลาร์ หรือสูงกว่าการสลายตัวของดินขาวเผาจะเร็วมากและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาหลักคือ อลูมิโนซิลิเกตที่มีสมรรถนะทางกลสูง

Alexandre Silva de Vargas a , Denise C.C. Dal Molin b , Antônio C.F. Vilela c , Felipe José da Silva d , Bruno Pavão e , Hugo Veitf (2011) มีวัตถุประสงค์ในการผลิตเมทริกซ์แบบหนาแน่นซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่สามารถนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาจากการใช้โพลิเมอร์จากเถ้าลอยแบบอัลคาไลโดยศึกษาตัวแปร 3 ตัวแปรคืออัตราส่วนของโมเลกุล  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  (N/S 0.20, N/S 0.30 และ N/S 0.40); ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50, 65 และ 80 องศาเซลเซียส ทดสอบที่อายุ 1, 7, 28, 91 และ 180 วัน การศึกษานี้ได้เตรียมเถ้าลอยแบบอัลคาไล เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM / EDS) และสมบัติทางจุลภาคด้วยการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ได้รับการประเมินตามสมรรถนะทางกล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนโมเลกุลของ N/S มีบทบาทสำคัญในลักษณะทางกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์มอดาร์ ที่พบว่าอัตราส่วน N/S เท่ากับ 0.40 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด

Pre De Silva , Kwesi Sagoe-Crenstil (2006) ได้ทำการศึกษาวิวัฒนาการของเฟสและการพัฒนาแบบจุลภาคของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่กระตุ้นปฏิกิริยาของดินขาวเผาด้วยสารอัลคาไล โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบของระยะเวลา และผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น กำลังรับแรงอัด อัตราส่วนระหว่างโมเลกุลของสารผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  [2.50-5.01] และ  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Na}_2\text{O}$  [0.60-1.70] ตามลำดับ โดยทำการบ่มอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 เดือน ทำการวิเคราะห์เป็นระยะ ๆ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM พบว่าเฟส Na-Al-Si เป็นรูปอสัณฐานในช่วงแรกจะค่อยๆเปลี่ยนไปเป็นเฟสผลึกด้วยการบ่มเป็นเวลานาน ปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เริ่มแรกสารผสมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงผลึก รูปสัณฐาน ในบางส่วนของสารผสมที่มีการศึกษาโครงสร้างของซีโอไลต์พบว่าผลึกที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ chabazite, faujasite, zeolite A และ zeolite P ในกรณีนี้ส่วนใหญ่จะได้รับการพัฒนาบ่มเป็นเวลานานความสัมพันธ์บางอย่างที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดโดยมีการเปลี่ยนแปลงเฟสตรงกัน ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการพัฒนาขั้นตอนการเกิดผลึกหลังจากการบ่มเป็นเวลานานส่งผลให้แนวโน้มในการพัฒนากำลังต่ำ

M . NADARAJAH AND UPALI G. FERNANDO (1976) พบว่าคุณสมบัติของคอนกรีตลดลงเมื่อผสมกับน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารที่ไม่ใช่ยางและน้ำตาลโดยเฉพาะที่พบในซีรัมน้ำยางข้น สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้สามารถลดลงได้โดยการหมუნเหวี่ยงและต่อต้านการเจือจางด้วยน้ำและการกักเก็บ อัตราส่วนของยางต่อนูนซีเมนต์ (1: 1 ปอนด์) โดยสามารถใช้กับน้ำยางพาราได้ถึง 0.10% สำหรับน้ำยางที่ผ่านการเหวี่ยง และไม่เกิน 0.20% สำหรับน้ำยางข้นโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งส่งผลดีกับคุณสมบัติบางอย่าง แต่จะเห็นได้ชัดว่าการเติมน้ำยางส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะและความแข็งแรงของการรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาพบว่าในน้ำยางข้นร้อยละ 10 เปอร์เซนต์ของปูนซีเมนต์จะให้ความแข็งแรงได้ไม่สูงมากนัก

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินโครงการ

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.1.1 ทราย

การเตรียมทราย นำทรายไปล้างแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 200 ให้อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง

##### 3.1.2 หินย่อย

การเตรียมหิน นำหินไปล้างแล้วร่อนเอาส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ให้อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง

##### 3.1.3 แก้วลอย

เป็นแก้วเหลือทิ้งจากถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง โดยมีลักษณะเป็นผงสีเทา อนุภาคมีลักษณะกลม

##### 3.1.4 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้มี 2 ชนิด คือ

(1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้น 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ ตัวอย่างการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ด 400 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

(2) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O}_2$  ร้อยละ 9.50,  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 9.00 และน้ำ ร้อยละ 61.50 โดยมวล

##### 3.1.4 น้ำยาฟารานซ์รักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.2.1 แบบหล่อ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

##### 3.2.1 แบบหล่อ ขนาด 10x10x50 เซนติเมตร

##### 3.2.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ $110 \pm 5$ องศาเซลเซียส

##### 3.2.4 เครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.1 กรัม

##### 3.2.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

##### 3.2.6 เครื่องทดสอบการต้านทานการขัดสี

##### 3.2.7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

##### 3.2.5 เครื่องทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

### 3.3 แผนการทดสอบ

โครงการนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดของเม็ดลอย ทำการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นของมวลรวมละเอียดละเอียด และมวลรวมหยาบ

#### 3.3.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

ทดสอบหาองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD) และ Scanning electron microscope (SEM) ตามลำดับ วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ และประกอบของเม็ดลอยด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

#### 3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

การทดสอบกำลังรับแรงอัดขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดขนาด 10x10x50 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล และระยะเวลาการก่อตัว ดังนี้

(1) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอัตราส่วนของสารละลายต่อเม็ดลอย ในอัตราส่วน 0.62, 0.64, 0.66

(2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5, 10, 12.5, 15 และ 17.5 โมลาร์

(3) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ไข่มตัวอย่าง ที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส

(4) ผลจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยาพาราต่อเม็ดลอย ที่ 0, 0.50, 1.50, 2.50, และ 5.00 โดยน้ำหนัก

(5) ผลจากการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด(ทราย)

ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด(ทราย) ตามมาตรฐาน ASTM C 128-97 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate

#### 3.4.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ(หินย่อย)

ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ(หินย่อย) ตามมาตรฐาน ASTM C 127-88 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate

### 3.4.3 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด(ทราย) และมวลรวมหยาบ(หินย่อย)

การทดสอบหาขนาดของดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเม็ดดินและการกระจายส่วนละเอียดของดิน โดยใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ASTM C 136-96a Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates<sup>1</sup>

### 3.4.4 การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ (หิน)

การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ เพื่อหาร้อยละของการสูญเสียจากการขัดสี และการกระแทกจากลูกเหล็ก มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ASTM C 131-96 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine

### 3.4.6 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักหิน

ทดสอบหน่วยน้ำหนักหินตามมาตรฐาน ASTM C 29/C 29M-97 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate<sup>1</sup> ซึ่งวิธีการทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการกำหนดความหนาแน่น (bulk unit) ของมวลรวมในสถานะที่กระทุ้งแน่น หรือหลวมและช่องว่างที่คำนวณได้ระหว่างอนุภาคในมวลรวมละเอียดหยาบหรือผสมตามค่าความละเอียดเดียวกัน วิธีการทดสอบนี้ใช้ได้กับมวลรวมไม่เกิน 5 นิ้ว [125 มม.] เป็นขนาดสูงสุดที่ระบุ

### 3.4.5 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยทดสอบโดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิแอร์ ตามมาตรฐาน ASTM C188-84 Standard test methods for Hydraulic Cement ซึ่งหลักการคำนวณใช้การแทนที่ของเหลว ความถ่วงจำเพาะคำนวณได้จากน้ำหนักของสารซีเมนต์หารด้วยปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกสารซีเมนต์แทนที่ ซึ่งจะได้เป็นค่าความหนาแน่นของสารซีเมนต์หารด้วยความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ

## 3.5 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลาย วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-99 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance โดยระยะเวลาการก่อตัวต้น และปลาย เมื่อการต้านทานการทะลุทะลวงของมอร์ตาร์ได้เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

### 3.6 การทดสอบลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี

#### 3.6.1 X-Ray Diffraction Analysis (XRD)

เครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยังผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาลักษณะของตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

#### 3.6.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, ทางแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง XRF 1 เครื่อง XRF โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ Wavelength Dispersive XRF (WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF) สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในหลายลักษณะ ทั้งของแข็ง, ผง, ตัวอย่างที่ขึ้นรูปแล้ว หรือ ตัวอย่างที่เป็นของเหลว ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้ Standard ในการทดสอบ

#### 3.6.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) สามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาคหรือความผิดปกติของอุปกรณ์ขนาดเล็กๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานทางด้านชีววิทยา ฯลฯ นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยใน

การศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุง และพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต งานวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ งานแก้ไขปัญหาอุตสาหกรรม และงานควบคุมคุณภาพของวัสดุได้

### 3.7 ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ความทนทานต่อการขัดสี และระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 3.7.1 การทดสอบหากลำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การต้านทานการขัดสี และระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 100x100x100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 100x100x500 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย ที่ 0.62, 0.64 และ 0.66 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 น้ำยางพาราต่อเถ้าลอยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัวต้น และปลายตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-99 พร้อมหล่อตัวอย่างแล้วปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำมาวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

#### 3.7.2 การทดสอบหากลำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การต้านทานการขัดสี และระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 100x100x100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 100x100x500 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย ที่ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.5, 10, 12.5, 15 และ 17.5 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 น้ำยางพาราต่อเถ้าลอยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัวต้น และปลายตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-99 พร้อมหล่อตัวอย่างแล้วปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำมาวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

### 3.7.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัด การต้านทานการขีดสี และกำลังรับแรงดัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 100x100x100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 100x100x500 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย ที่ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 น้ำยาพาราต่อเถ้าลอยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัวต้น และปลายตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-99 พร้อมหล่อตัวอย่างแล้วปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาบ่ม หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำมาวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

### 3.7.4 การทดสอบหากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การต้านทานการขีดสี และระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยาพาราต่อเถ้าลอย

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 100x100x100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 100x100x500 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย ที่ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 น้ำยาพาราต่อเถ้าลอยร้อยละ 0, 0.50, 1.00, 1.50, 2.50, และ 5.00 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัวต้น และปลายตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-99 พร้อมหล่อตัวอย่างแล้วปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำมาวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

### 3.7.5 การทดสอบหากำลังรับแรงอัด การต้านทานการขีดสี และกำลังรับแรงดัด เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 100x100x100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 100x100x500 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย ที่ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 น้ำยาพาราต่อเถ้าลอยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างแล้วปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ

40 และ 60 องศาเซลเซียสนาน 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำมาวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ BS 1881-118:198 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

|          | Mole             |                                |                   |                  |       | Weigh(Kg) for m <sup>3</sup> |              |                   |         |              |      |            |                                  |       |
|----------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------|------------------------------|--------------|-------------------|---------|--------------|------|------------|----------------------------------|-------|
|          | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O | CaO   | Solid:Liquid                 | Latex:Cement | Dry Rubber:Cement | Fly ash | Latex Rubber | Sand | Coarse Agg | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | NaOH  |
| L/A0.60  | 0.535            | 0.100                          | 0.178             | 2.363            | 0.499 | 16.720                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 88.8                             | 133.2 |
| L/A0.62  | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.200                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| L/A0.64  | 0.542            | 0.100                          | 0.190             | 2.521            | 0.499 | 15.710                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 94.72                            | 142.1 |
| L/A0.66  | 0.546            | 0.100                          | 0.195             | 2.600            | 0.499 | 15.250                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 97.68                            | 146.5 |
| NH8      | 0.538            | 0.100                          | 0.161             | 2.523            | 0.499 | 15.670                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| NH10     | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| NH12.5   | 0.538            | 0.100                          | 0.211             | 2.348            | 0.499 | 16.880                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| NH15     | 0.538            | 0.100                          | 0.237             | 2.259            | 0.499 | 17.580                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R0.0    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R0.5    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.453            | 0.499 | 16.260                       | 0.005        | 0.003             | 370     | 1.850        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R1.0    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R1.5    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.475            | 0.499 | 16.130                       | 0.015        | 0.009             | 370     | 5.550        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R2.5    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.497            | 0.499 | 16.000                       | 0.025        | 0.015             | 370     | 9.250        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| %R5.0    | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.552            | 0.499 | 15.690                       | 0.050        | 0.030             | 370     | 18.500       | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 25T      | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 40T      | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 60T      | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 80T      | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 1HR40T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 3HR40T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 6HR40T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 12HR40T  | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 24HR40T  | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 1HR60T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 3HR60T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 6HR60T   | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 12HR60T  | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 24HR60T  | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.464            | 0.499 | 16.200                       | 0.010        | 0.006             | 370     | 3.700        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 0.33NSNH | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 0.67NSNH | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 1.00NSNH | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 1.50NSNH | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |
| 3.00NSNH | 0.538            | 0.100                          | 0.184             | 2.442            | 0.499 | 16.330                       | 0.000        | 0.000             | 370     | 0.000        | 740  | 1480       | 91.76                            | 137.6 |

### 3.8 วิธีการเตรียมน้ำยาง เตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ

การเตรียมน้ำยางเนื่องจากน้ำยางข้นสามารถกระจายตัวได้เป็นอย่างดีในสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อให้การกระจายตัวในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นไปอย่างทั่วถึง ให้ทำการแบ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตออกเป็น 2 ส่วนเท่ากัน โดยหนึ่งส่วนให้ดำเนินการผสมกับน้ำยางข้นและใช้แท่งแก้วคนสารคนเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 นาทีเพื่อให้ น้ำยางข้นกระจายตัวและเข้ากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตก่อนผสมในขั้นตอน สำหรับการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการชั่งน้ำหนักวัสดุและสารละลายตามสัดส่วนที่ออกแบบ ขั้นตอนแรก ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 5 นาที ทั้งนี้เพื่อให้สารละลายต่างเข้มข้นสูงไปชะละลาย องค์ประกอบทางเคมี คือ อลูมินาและซิลิกาในเถ้าลอยให้ละลายออกมาเพื่อพร้อมทำปฏิกิริยาต่อไป หลังจากนั้นเติมมวลรวมละเอียด(ทราย)ในเครื่องผสมผสม และผสมต่อไปอีก 3 นาทีให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ผสมกับน้ำยางพาราจนเข้ากันดีแล้วลงไปผสมอีก 3 นาทีจนกระทั่งตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน สุดท้ายเติมมวลรวมหยาบ

(หิน)จะได้ตัวอย่างที่สามารถเทได้ หลังจากนั้นเทเข้าแบบขนาด 100x100x100 มม. และ 100x100x500 มม.สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และBS 1881-118:198 ตามลำดับ ปล่อยให้เซตตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกห่ออาหารเพื่อป้องกันการสูญเสียไน้ระหว่างการบ่ม ขั้นตอนสุดท้าย นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 25-28 องศาเซลเซียส จนถึงระยะเวลาทดสอบที่ 7 และ28 วัน

### 3.8.1 ขั้นตอนการผสมและการทดสอบ ดังแสดงในรูปดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงการเตรียมวัสดุผสม (ซึ่งน้ำหนักตามอัตราส่วนผสม)



รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )  
(ซึ่งน้ำหนักตามอัตราส่วนผสม)



รูปที่ 3.3 แสดงการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอย (เป็นเวลาเวลา 5 นาที)



รูปที่ 3.4 แสดงการผสมมวลรวมละเอียด (ผสมเป็นเวลา 3 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน)



รูปที่ 3.5 แสดงการผสมมวลรวมหยาบ (ผสมเป็นเวลา 3 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน)



รูปที่ 3.6 แสดงการเติมสารโซเดียมซิลิเกตที่ผสมกับน้ำยางพารา  
(ผสมเป็นเวลา 3 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน)



รูปที่ 3.7 แสดงการนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่แบบเพื่อทดสอบกำลังรับแรงดัด



รูปที่ 3.8 แสดงการนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่แบบเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดและการขีดสี



รูปที่ 3.9 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง UTM.



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยเครื่อง UTM.



รูปที่ 3.11 แสดงการทดสอบความทนทานต่อการขัดสี

### 3.9 สำรวจและก่อสร้างถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การเตรียมตัวเพื่อดำเนินการเทถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา มีกระบวนการดังต่อไปนี้

3.9.1 ติดต่อประสานงานกับทางกรมการปกครองส่วนท้องถิ่น เพื่อขออนุญาตเข้าดำเนินการสำรวจพื้นที่ที่จะเป็นตัวอย่างในการเทถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

3.9.2 ออกสำรวจพื้นที่หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการสร้างถนน โดยคำนึงถึงสี่ประการคือ พื้นที่ต้องได้ใช้ประโยชน์ มีรถสัญจร มีขนาดกว้างไม่เกิน 6 เมตร และเป็นพื้นที่ที่สามารถปิดถนนได้โดยประชาชนสามารถเลี่ยงไปใช้ทางอื่นสัญจรได้ก่อน

3.9.3 ดำเนินระบุพื้นที่ ทำการสำรวจบันทึกข้อมูลขนาดพื้นที่ นำพื้นที่มาออกแบบโดยใช้มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทซึ่งมีรูปแบบมาตรฐานในการก่อสร้างเป็นตัวกำหนด นำมาใช้กับขนาดถนนที่สำรวจ

3.9.4 เตรียมความพร้อมของวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการผสม เนื่องจากเครื่องมือที่ผู้วิจัยมีคือ โม่ผสมปูนขนาดปูนซีเมนต์ 50 กิโลกรัม จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งสามารถผสมและเทถนนได้ประมาณครั้งละ 0.18 ลูกบาศก์เมตร วางแผนในการผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้คอนกรีตมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด

3.9.5 ดำเนินการประชุมวางแผนงานในการเตรียมงาน โดยแบ่งการประชุมออกเป็น 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ประชุมกับหัวหน้าทีมผู้วิจัย ประชุมครั้งที่ 2 ประชุมกับทุกคนและทุกฝ่ายเพื่อเตรียมความพร้อมในการดำเนินการ

3.9.6 รื้อถอนถนนและทำการปรับพื้นที่เดิม ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการเทถนนคอนกรีตซึ่งมีความหนา 15 เซนติเมตร

3.9.7 เตรียมพื้นที่เท โดยปูด้วยทรายปรับระดับและทำการบดอัดให้แน่น ทำการประกอบแบบไม้ ผูกเหล็กเสริมกันราว

3.9.8 ทำการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา ทำการเทและเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราในห้องทดลองต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

#### 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

##### 4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

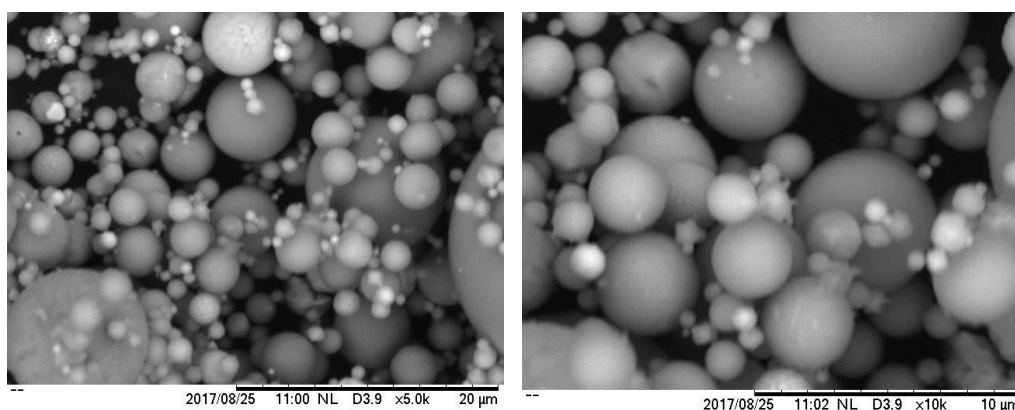
ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.42

##### 4.1.2 ร้อยละความละเอียดเถ้าลอยที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325

ผลการทดสอบความละเอียดเถ้าลอยค้ำตะแกรงเบอร์ 325 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 43.60

##### 4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย

ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย

##### 4.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ผลการทดสอบวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบปริมาณธาตุของเถ้าลอย

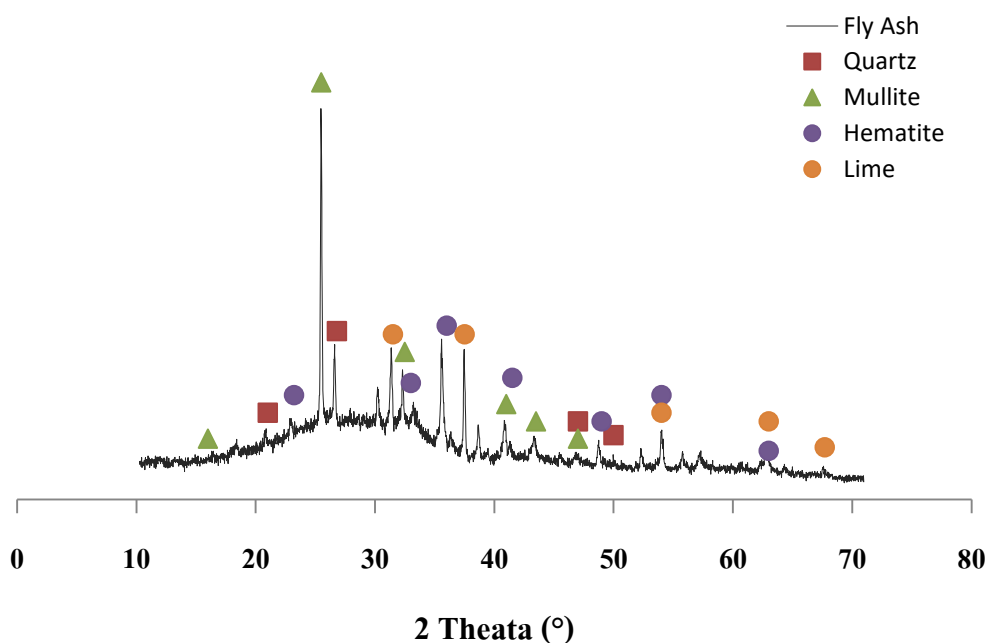
| รายการที่ | รายการทดสอบ                    | ผลการทดสอบ                                                           | วิธีการทดสอบ/<br>เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ                                                       |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                | ชื่อตัวอย่าง : เถ้าลอย (Fly Ash)<br>ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ผงสีเทา |                                                                                              |
| 1         | CaO                            | 27.93                                                                | Application Omnian<br>/<br>Wavelength<br>Dispersive<br>X-ray Fluorescence<br>Model AXIOS MAX |
| 2         | SiO <sub>2</sub>               | 25.22                                                                |                                                                                              |
| 3         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.06                                                                |                                                                                              |
| 4         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.21                                                                |                                                                                              |
| 5         | SO <sub>3</sub>                | 7.64                                                                 |                                                                                              |
| 6         | K <sub>2</sub> O               | 3.21                                                                 |                                                                                              |
| 7         | MgO                            | 0.99                                                                 |                                                                                              |
| 8         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.71                                                                 |                                                                                              |
| 9         | TiO <sub>2</sub>               | 0.68                                                                 |                                                                                              |
| 10        | Na <sub>2</sub> O              | 0.48                                                                 |                                                                                              |
| 11        | MnO                            | 0.19                                                                 |                                                                                              |
| 12        | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.02                                                                 |                                                                                              |
| 13        | CL                             | 0.02                                                                 |                                                                                              |

The results are reported based on 100% normalization of oxide compounds

#### 4.1.5 โครงสร้างผลึกของเถ้าลอย

ผลการทดสอบโครงสร้างผลึกของเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD)

ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 X-Ray Diffraction Analysis (XRD) pattern of fly ash

Q =quartz (JCPDS file no. 33-1161) 2Theata 21.0, 26.8, 47.0, 50.0, 55.0,

L =Lime(JCPDS file no. 00-002-1088) 2Theata 31.5, 37.5, 54.0, 63.0, 67.7

M =Mullite (JCPDS Card #15-0776) 2Theata 16.0, 25.5, 32.5, 34.5, 40.0, 41.0, 43.5, 47.0,

H =Hematite (JCPDS data: PDF number 39-1346) 2Theata 33.0, 23.2, 36.0, 49.0, 41.5, 54.0, 63.0, 71.5, 75.5

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ของเถ้าลอยซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก ได้แก่ ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ , Q) ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , F) มัลไลต์ (Mullite, M) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ , C) และส่วนที่อยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งไม่มีความเป็นผลึกอยู่ในรูปของแก้ว (glassy phase) ในช่วงมุม 2Theata 20-40 องศา ทำให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายได้ดี เนื่องจากมีปริมาณความเป็นอสัณฐานที่สูงขึ้น โดยพบว่าแร่ควอตซ์ (quartz) ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  มี Si 46.7% และ O 53.3% ไม่หลอมละลายในกระบวนแร่ทั้งหลาย ไม่ละลายง่าย ละลายได้ในกรดเกลือ

ปูนขาว ไลม์ (lime) มีชื่อเรียกทางเคมีว่า แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) และมีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CaO}$  ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยปกติแล้วจะผลิตแคลเซียมออกไซด์,  $\text{CaO}$  จากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน

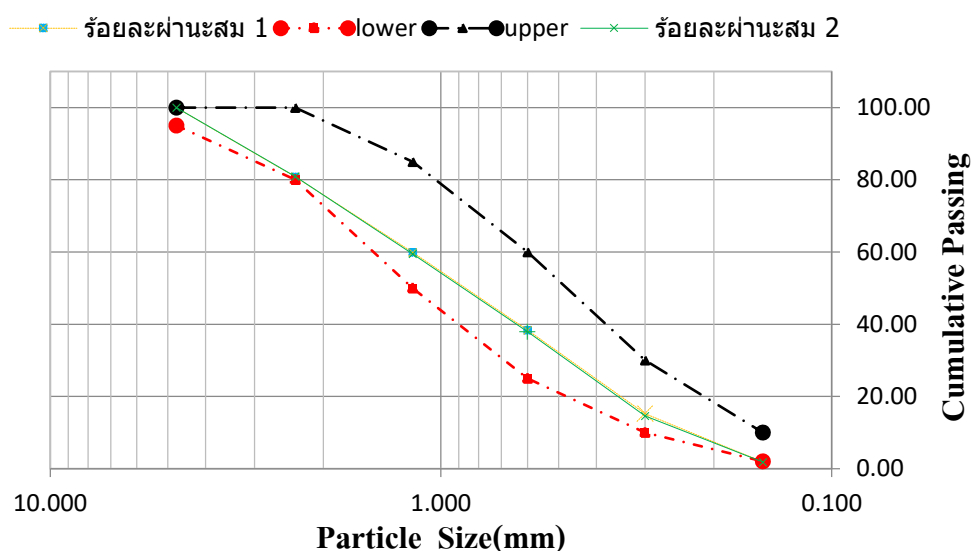
มัลไลต์ (Mullite) มีความทนทานต่อแรงกดเป็นเวลานานๆ ได้สูง มีความทนทานต่อสารเคมีสูง มีการนำความร้อนต่ำ มัลไลต์เป็นเซรามิกที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี และ

มีการขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากบรรยากาศในเตาหลอมได้ดี ทนทานต่อการขัดสี การใช้ประโยชน์เนื่องจากมีลไลต์ทนอุณหภูมิสูง และทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี จึงนิยมนำมาผลิต หรือใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟ

เฮมาไทท์ หรือแร่เหล็กแดง (Hematite) สูตรเคมี  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มี Fe 70% ละลายได้ช้า ๆ ในกรดเกลือเข้มข้น

#### 4.1.6 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด (ทราย)

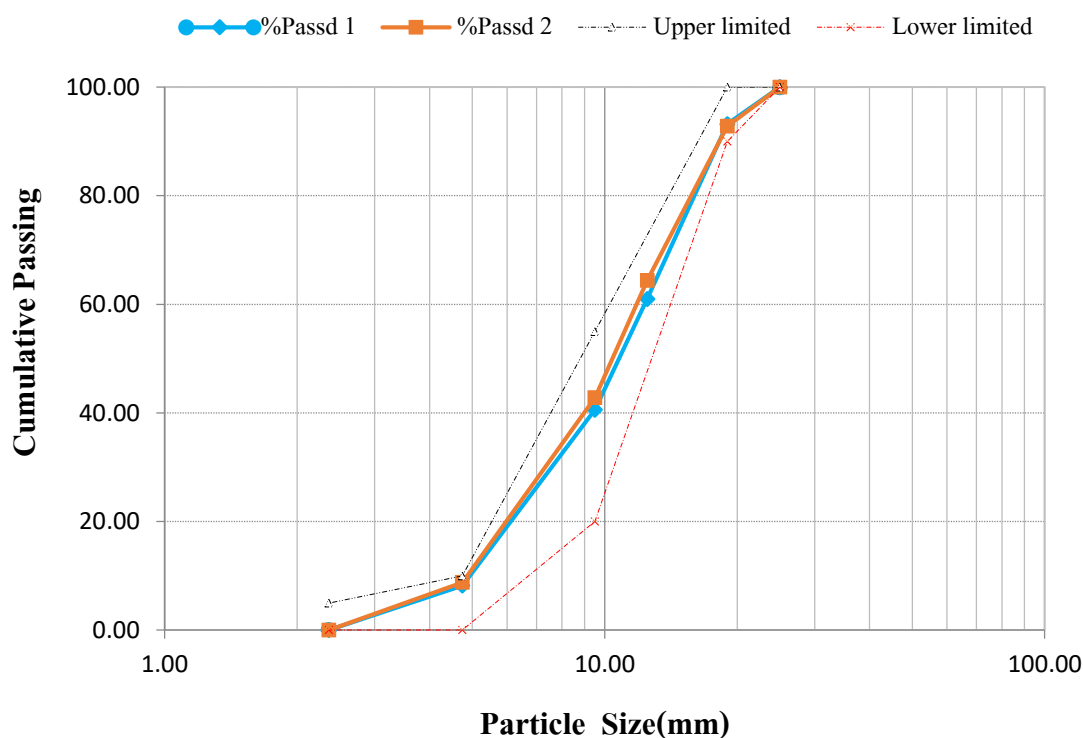
ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.61 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.12 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผ่าน สะสมกับขนาดของตะแกรงดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผ่านสะสมกับขนาดของตะแกรง

#### 4.1.7 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ (หิน)

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ มีค่าเฉลี่ยค่าเท่ากับ 2.70 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.26 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผ่าน สะสมกับขนาดของตะแกรงดังแสดงในรูปที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 แสดงสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผ่านสะสมกับขนาดของตะแกรง

#### 4.1.8 หน่วยน้ำหนักมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบกระทุ้งแน่น

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบกระทุ้งแน่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,729 กก./ลบ.ม. และ 1,523 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ

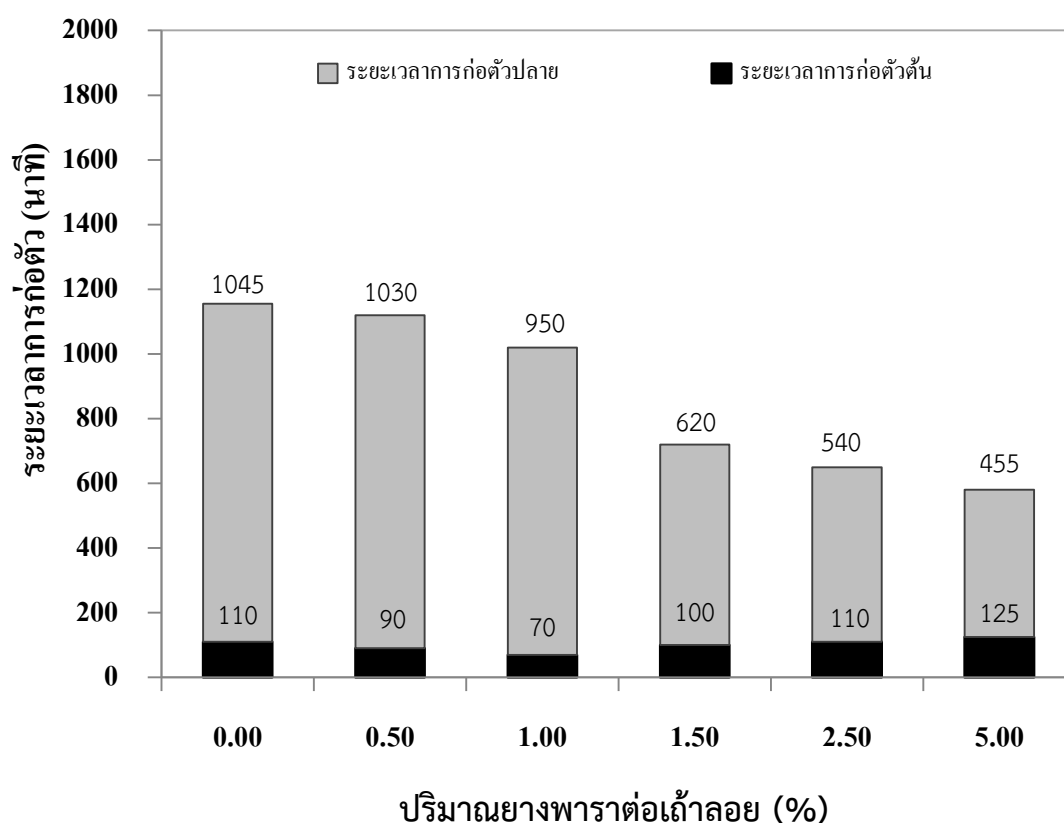
#### 4.1.9 การทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ (หิน)

ผลการทดสอบการทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการสูญเสียจากการขัดสีของมวลรวมหยาบ 25.6 (น้อยกว่าร้อยละ 45)

## 4.2 การทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลายของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

### 4.2.1 ทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลายของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ผสมตัวอย่างจากนั้นนำไปทดสอบตาม ASTM C403/C403M-99 ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.5



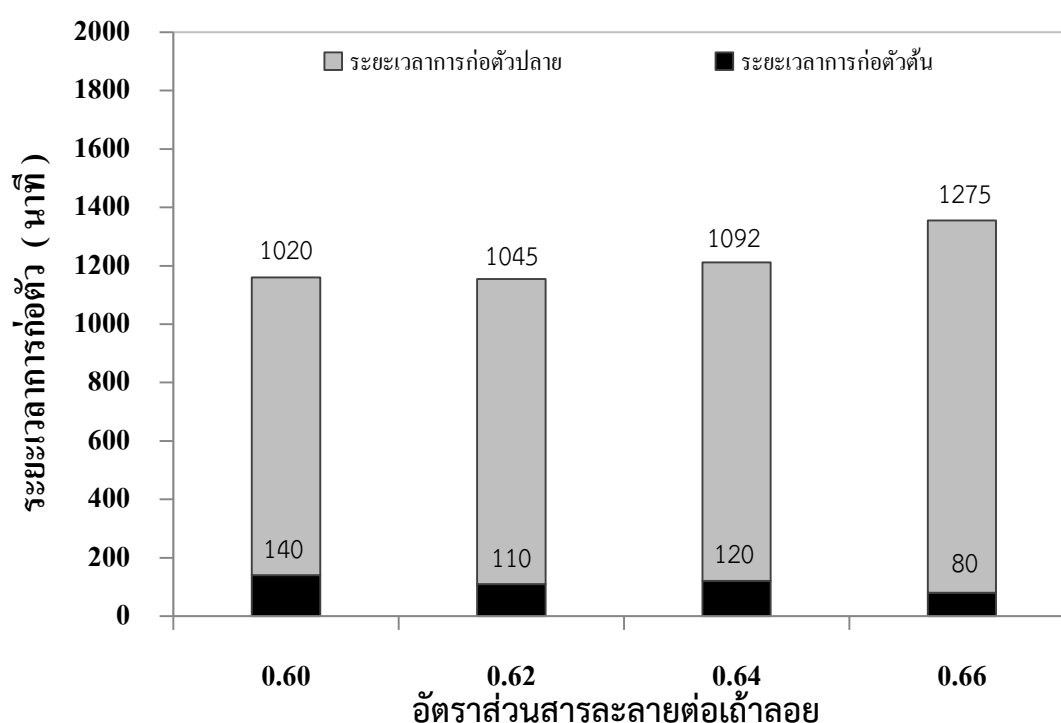
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มน้ำยางพาราเข้าไปในระบบของจีโอโพลิเมอร์จะส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลง เนื่องจากน้ำยางเป็นวัสดุที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาก่อตัวเหมือนจีโอโพลิเมอร์แต่ใช้การระเหย และขีดกันของอนุภาคยางเนื่องจากเมื่อผสมน้ำยางพาราในปริมาณมากเกินไปจะทำให้สารแอมโมเนียเหลวที่ผสมในน้ำยางเพื่อรักษาเสถียรภาพน้ำยางส่งผลให้ใน

ระหว่างขั้นตอนการผสมจะทำให้แอมโมเนียระเหยตัวออกอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณของเหลวในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลงตามไปด้วย (ประชุม คำพุ่ม, 2550)

#### 4.2.2 ทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวต้น และระยะเวลาก่อตัวปลายของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมือปรับค่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.66 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยทดสอบตาม ASTM C403/C403M-99 ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.6



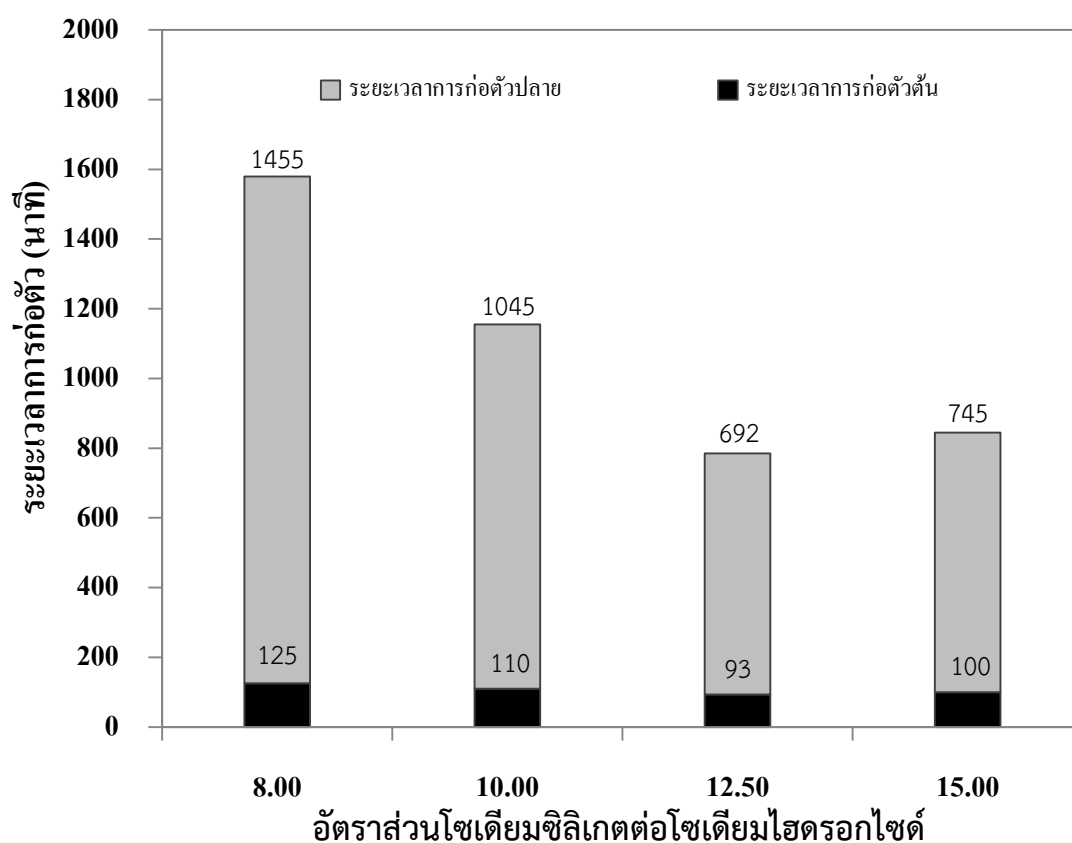
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.6 พบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวไม่มากนัก โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของของเหลวที่มากขึ้น เมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60 มีระยะเวลาในการก่อตัวต้น 140 นาที มีระยะเวลาในการก่อตัวปลาย 1020 นาที คิดเป็น 17 ชั่วโมงเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.66 มีระยะเวลาในการก่อตัวต้น 80 นาที มีระยะเวลาในการก่อตัวปลาย 1275 นาที หรือ 21.25 ชั่วโมง

การเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายต่อแก้วลอยยังเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการก่อตัว เนื่องจาก การเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุประสานจะทำให้ความสามารถในการชะละลายแคลเซียม ไฮดรอกไซด์จากวัสดุตั้งต้นลดลง (Hardjito et al., 2005; Rattanasak and Chindaprasirt, 2009)

#### 4.2.3 ทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวต้น และระยะเวลายกตัวปลายของผิวทางจีโอโพลิ เมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยทดสอบตาม ASTM C403/C403M-99 ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.7



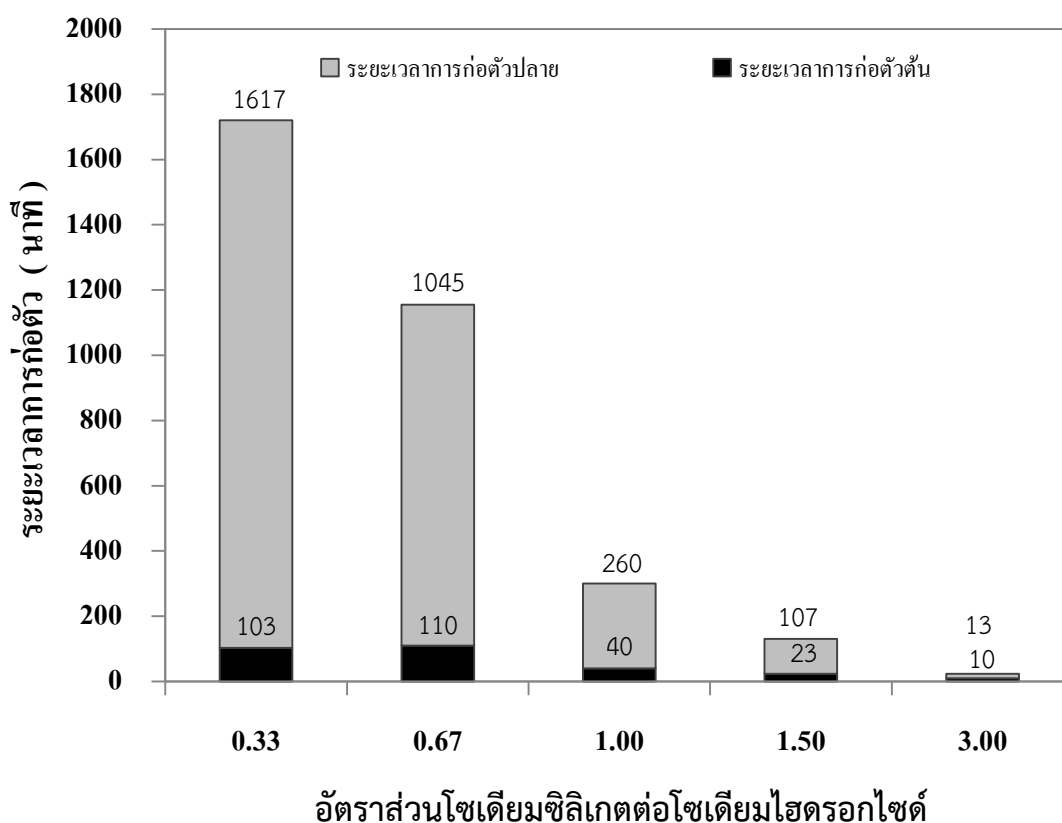
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวต้น และ ระยะเวลายกตัวปลายเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ระยะเวลาในการก่อตัวต้นทั้งหมดมีค่า 90- 125 นาที ยังพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮ

ดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวปลายลดลงเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ลักษณะทางกายภาพภายนอกของถ้ำลอยที่ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหนียวมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นการเพิ่มความหนืด และความเหนียวให้กับระบบของจีโอโพลิเมอร์

#### 4.2.4 ทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวต้น และระยะเวลาก่อตัวปลายของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อถ้ำลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 3.00, 1.50, 1.00, 0.67, 0.33 โดยทดสอบตาม ASTM C403/C403M-99 ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.8



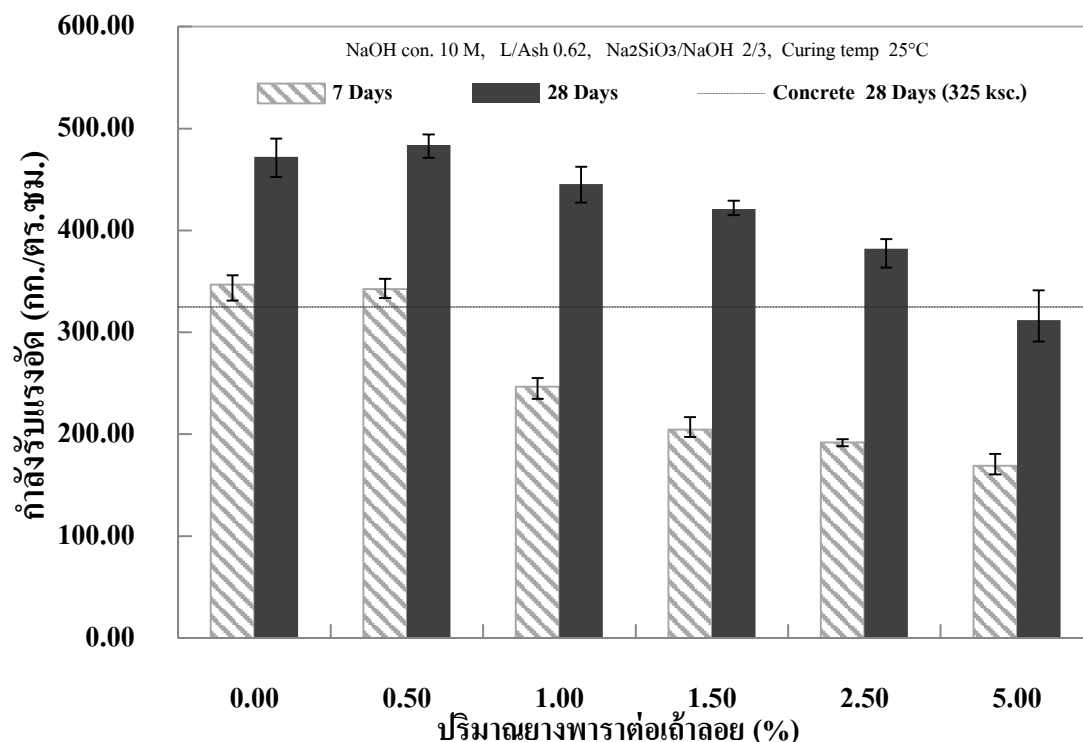
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาก่อตัวกับอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัว โดยพบว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเร็วขึ้น ซึ่งอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.33 ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวต้น 1 ชั่วโมง 43 นาที และมีระยะเวลาในการก่อตัวปลาย 26 ชั่วโมง 57 นาที แต่เมื่ออัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเร็วขึ้นเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3.00 ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวต้นเพียง 10 นาที และใช้ระยะเวลาในการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นอีกเพียง 3 นาที เนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูงซึ่งมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 27.93 ซึ่งมีปริมาณเพียงพอสำหรับการตกผลึก และเกิดปฏิกิริยาตอบสนองต่อรูปแบบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ calcium aluminate hydrate (CAH) ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลง (Alonso S, Palomo A.2011; Chindaprasit P et al.2012) ดังนั้นเวลาในการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จึงสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ (Rattanasak et al.2011)

#### 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

##### 4.3.1 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของแรงอัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่าร้อยละของน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นแกะแบบห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.9

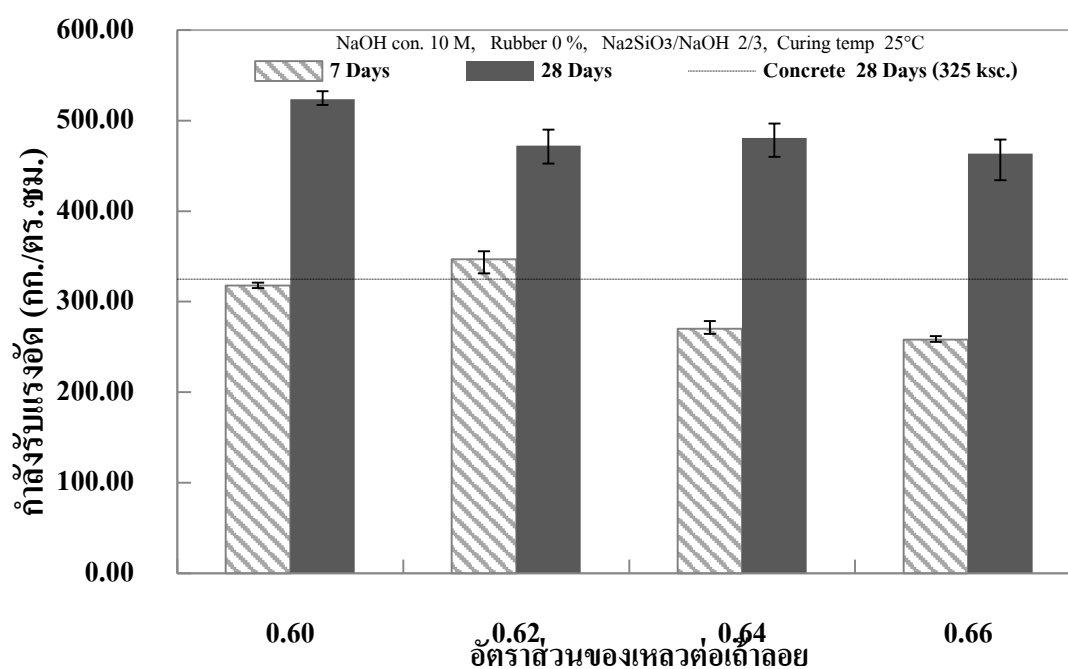


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณร้อยละยางพาราต่อเถ้าลอยมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับการเพิ่มปริมาณน้ำยา ยิ่งเพิ่มปริมาณน้ำยางพารามากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใส่วัสดุประเภท Elastomer (Y. Ohama 1995; V. Ramakrishnan et al. 1992) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เนื้อยางมีความเป็นวัสดุยืดหยุ่นไม่สามารถรับแรงอัดได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากน้ำยางพาราไม่มีคุณสมบัติในการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเหมือนวัสดุประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือจีโอโพลิเมอร์ ยังมีปริมาณการแทนที่มากเท่าใดจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำยางในช่วงร้อยละ 0.5 - 2.5 โดยน้ำหนักเถ้าลอยส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 325 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม.309/2544) ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานในงานผิวทางคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท และยังพบว่าการเติมปริมาณน้ำยางร้อยละ 0.5 ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วันมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 325 กก./ตร.ซม. ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

#### 4.3.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของแรงอัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.66 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.10



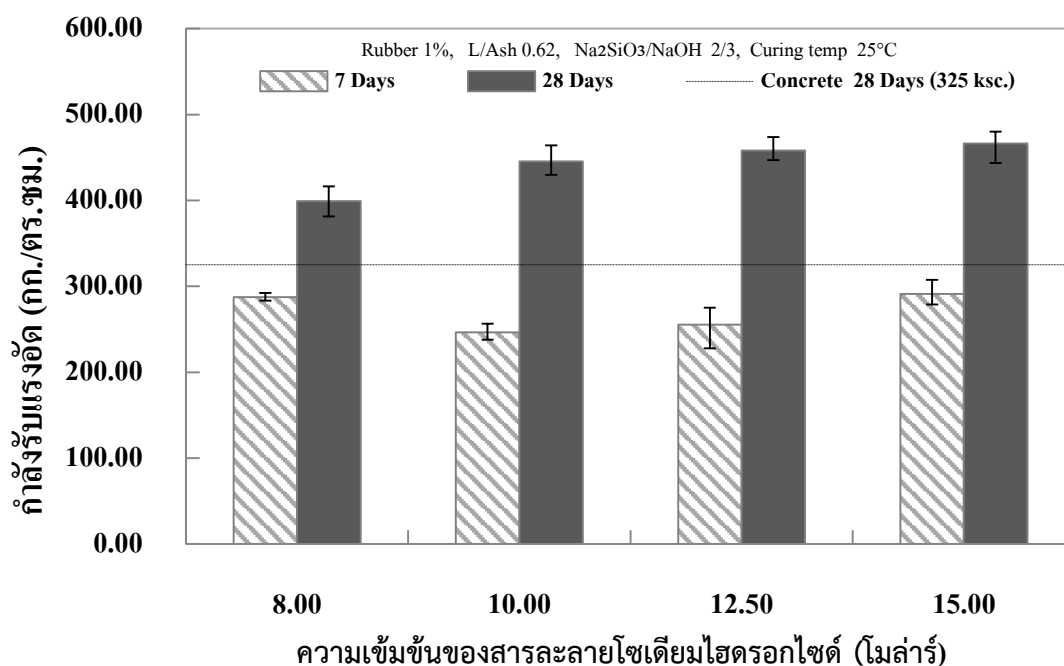
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงทุกช่วงอายุ (Cheng, Lin et al. 2015) และยังพบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.66 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำที่สุดทุกช่วงอายุ เนื่องจากปริมาณของสารละลายที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเกิดการระเหยออกจากระบบส่งผลให้เนื้อของเมทริกซ์มีความพรุนมากขึ้น (Alawode and Idowu 2011; Pavithra, Srinivasula Reddy et al. 2016) และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยสูงขึ้นปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ต่ำลง (Riditirud, Chindaprasirt and Pimraksa, 2011) และยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 325 กก./ตร.ซม. (มาตรฐาน ทรม.)

309/2544) ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานในงานผิวทางคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท ทุกอัตราส่วน อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 จีโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วันมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 325 กก./ตร.ซม.

#### 4.3.3 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของแรงอัดของผิวทางจีโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.11



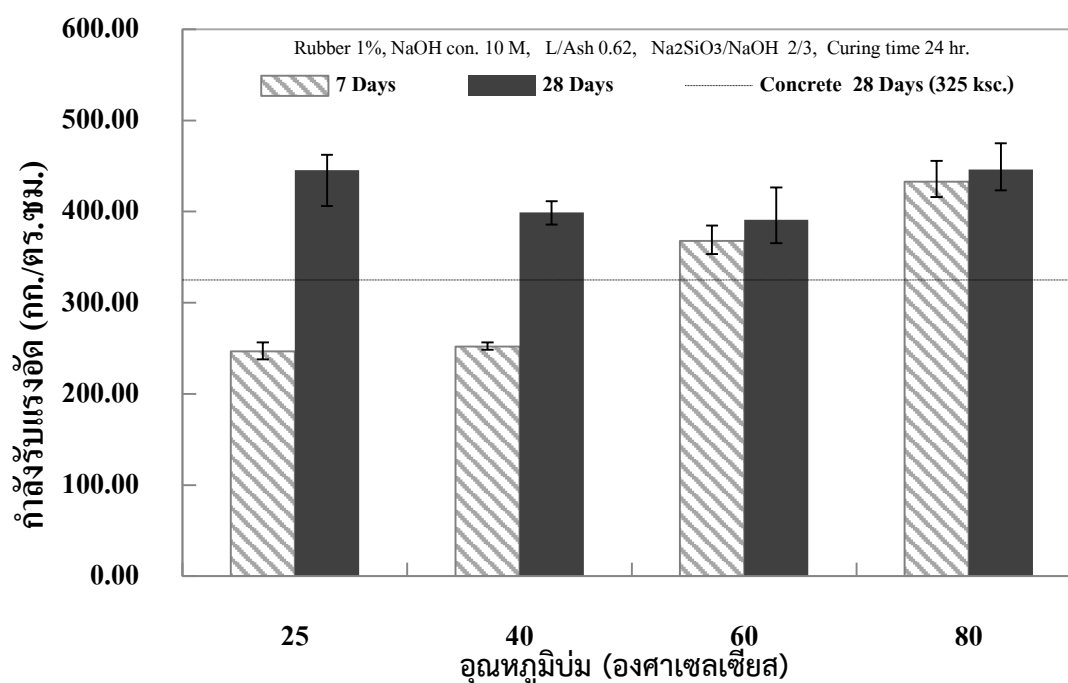
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.11 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุตั้งแต่การพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำช่วงอายุปลายซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Fernández-Jiménez, Palomo et al. 2005) แสดงให้เห็นถึงค่าของระดับการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยที่ถูกชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์

พบว่าเกิดการเกิดปฏิกิริยาจะสูงเป็นพิเศษในช่วงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 8 โมลาร์ พบว่าการพัฒนากำลังในช่วงอายุต้นต่ำแต่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลายที่สูงขึ้นเนื่องจากไอออนของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นสามารถชะละลายซิลิกา และอลูมินาในแก้วลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่องส่งผลให้โครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกตยึดเหนี่ยวกันแน่นขึ้นกำลังรับแรงอัดจึงเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุปลาย (Olivia and Nikraz 2012; Hamidi, Man et al. 2016)

#### 4.3.4 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของแรงอัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อุณหภูมิบ่ม จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.12

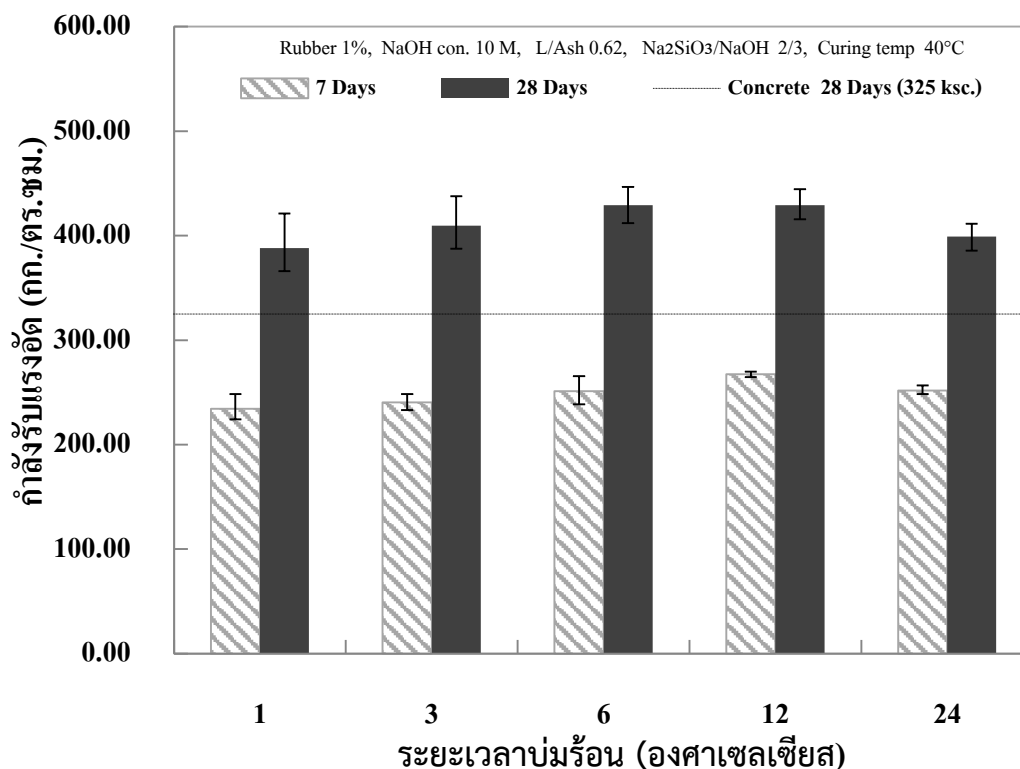


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.12 พบว่าอุณหภูมิในการบ่มสามารถเร่งการทำปฏิกิริยา (Huseien, Mirza et al. 2016) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่า 325 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม. 309/2544) ทุกอุณหภูมิบ่มที่อายุ 28 วัน และยังพบว่า การบ่มด้วยอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลายต่ำลง เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มเป็นการเร่งกระบวนการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจนสมบูรณ์ในช่วงอายุต้น ส่งผลให้การพัฒนากำลังระหว่างช่วงอายุน้อยลง (Usha, Nair et al. 2016) ซึ่งแตกต่างจากการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราด้วยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงอายุต้น แต่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง โดยสอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับผลการทดสอบตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อนสูง(Al-Majidi, Lampropoulos et al. 2016)

#### 4.3.5 การทดสอบหาลำลังรับแรงอัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 40 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.13



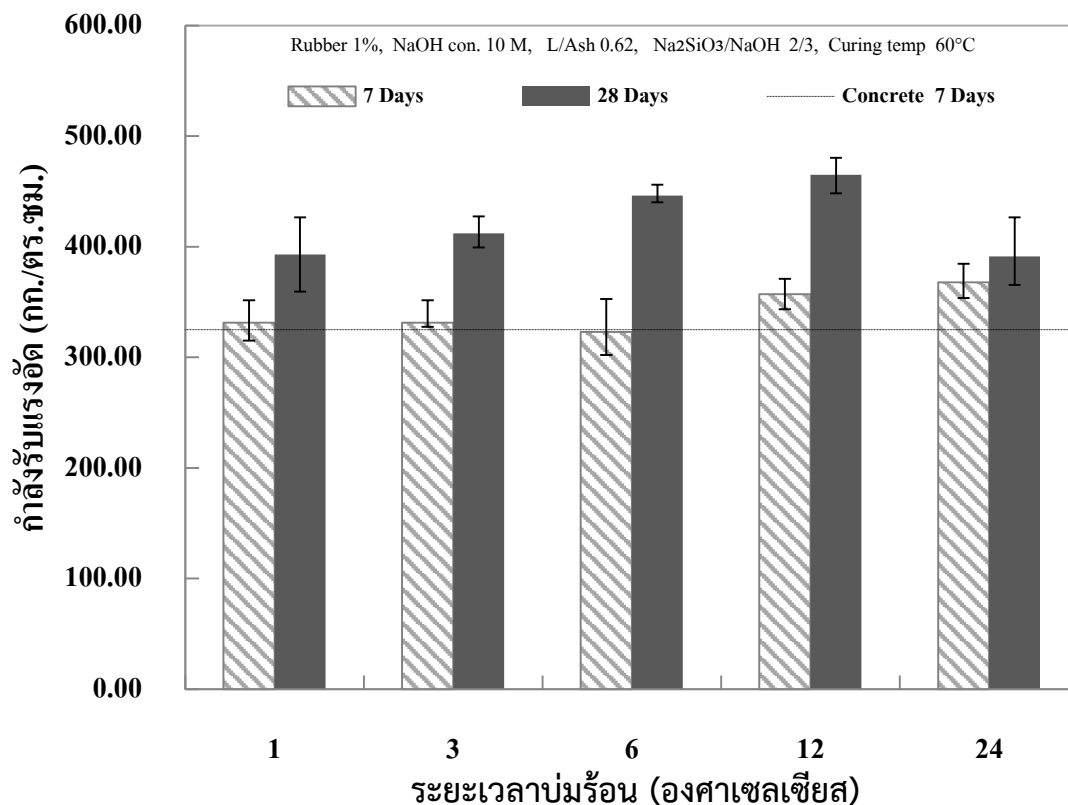
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.13 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่า 325 กก./ตร.ซม. (มาตรฐาน ทรม.309/2544) ทุกระยะเวลาบ่มที่อายุ 28 วัน และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้นนานเกินไปส่งผลให้ตัวอย่างสูญเสียความชื้นในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากการทำปฏิกิริยาอีโพลิเมอร์ไรเซชันต้องมีความชื้นที่เพียงพอเพื่อที่จะพัฒนาความแข็งแรง (Bakria, Kamarudin et al. 2011)

#### 4.3.6 การทดสอบหาลังรับแรงอัดของผิวทางอีโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดย

จะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.14



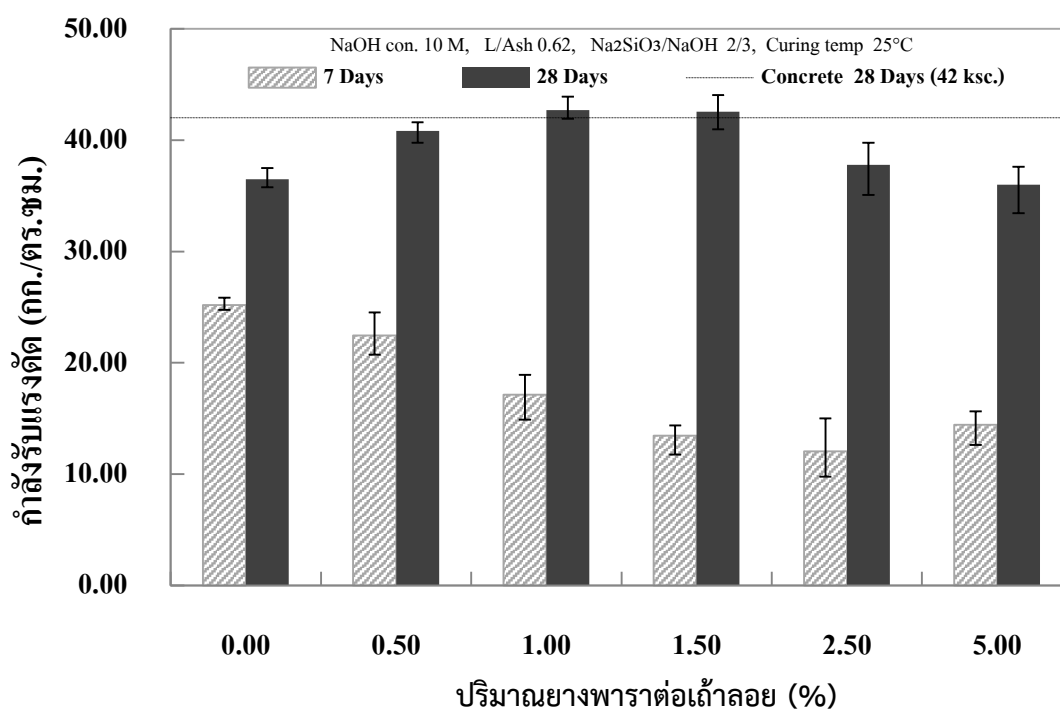
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.14 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม สามารถเร่งให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันให้อยู่ในช่วง 325 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม.30912544) และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้นมากเกินไปส่งผลให้ตัวอย่างสูญเสียความชื้นในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันต้องมีความชื้นเพื่อที่จะพัฒนาความแข็งแรง (Bakria, Kamarudin et al. 2011) อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยารพาราที่อายุ 28 วันมีค่ามากกว่า 325 กก./ตร.ซม.ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานในงานผิวทางคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบททุกระยะเวลาบ่ม

#### 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

##### 4.4.1 ทดสอบกำลังรับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่าร้อยละของน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงหลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นแกะแบบห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.15



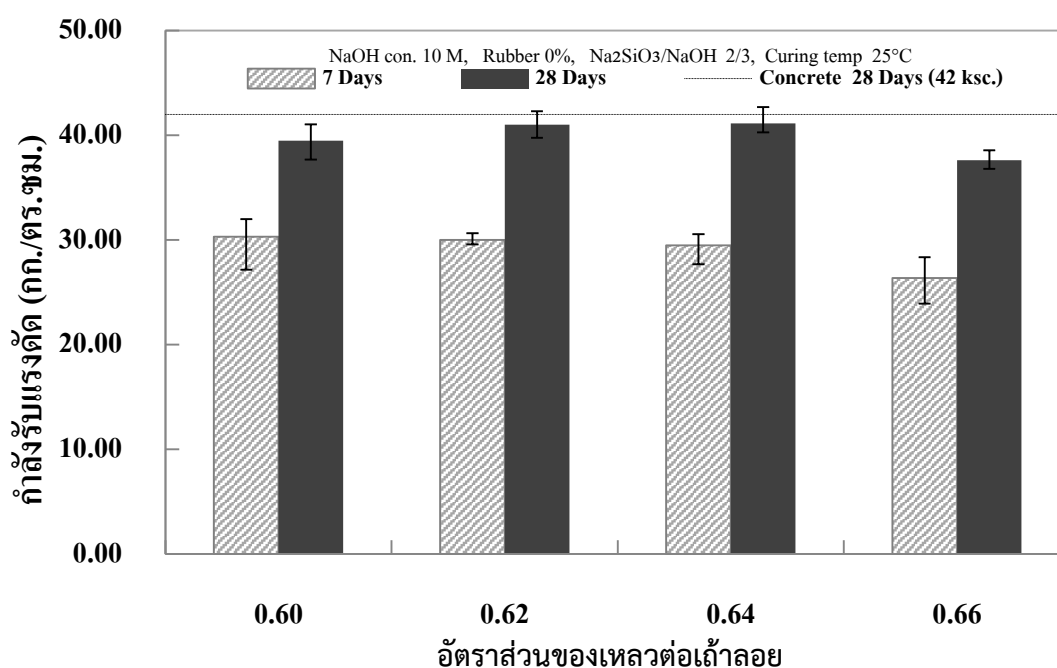
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละของน้ำยางพาราต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.15 พบว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของน้ำยางในจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณที่มากเกินไปมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงดัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างอายุ 7 วัน ส่งผลทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการรับกำลังรับแรงดัดได้ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ใส่น้ำยาง เนื่องจากการพัฒนาความแข็งแรงของโพลิเมอร์ฟิล์มอาศัยสภาวะแห้งจากการรวมตัวกันของอนุภาคโพลิเมอร์ในน้ำยาง (Y. Ohama, 1995) กลายเป็นโพลิเมอร์ฟิล์มที่สามารถรับแรงดึงได้ อย่างไรก็ตามความชื้นภายในตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ส่งผลให้การรวมตัวกันของอนุภาคโพลิเมอร์ที่จะพัฒนาเป็นโพลิเมอร์ฟิล์มซึ่งเป็นตัวส่งเสริมให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดที่ดียังไม่สามารถเกิดขึ้นได้

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เกิดการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องตามอายุที่เพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์กลายเป็นตัวหลักสำคัญทำงานร่วมกันกับโพลิเมอร์ฟิล์มส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันยางซึ่งเมื่อโมเลกุลชิดกันสุดแล้วจะไม่มี การพัฒนากำลังต่ออีก กลายเป็นส่วนในการลดทอนกำลังของจีโอโพลิเมอร์จากปริมาณยางที่มากเกินไป เนื่องจากหน่วยแรงดัดเกินความสามารถในการรับแรงของโพลิเมอร์ฟิล์ม

#### 4.4.1 ทดสอบกำลังรับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่า อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.66 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.16



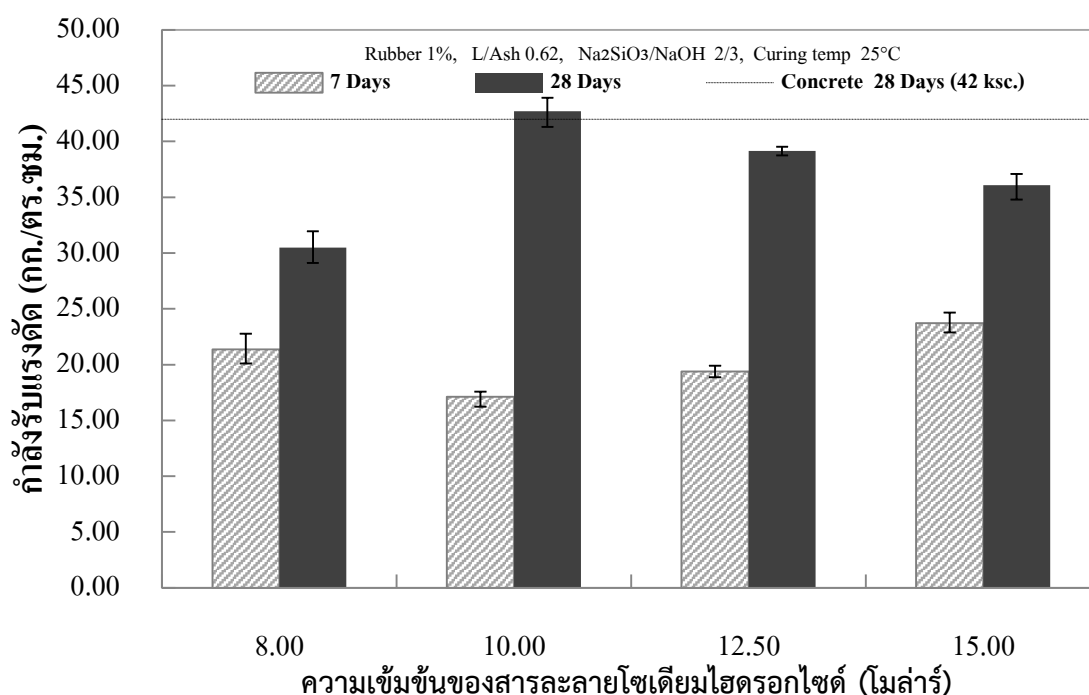
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน สารละลายต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.16 พบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนักเนื้อตัวอย่างมีความสามารถในการทำงานได้ดีต่ำ เมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงทุกช่วงอายุ (Cheng, Lin et al. 2015) สอดคล้องกับงานวิจัยของ

(Alawode and Idowu 2011; Pavithra, Srinivasula Reddy et al. 2016) เนื่องจากปริมาณของสารละลายที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาหายออกจากระบบส่งผลให้เนื้อของเมทริกซ์มีความพรุนมากขึ้น ซึ่งอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย 0.62 เหมาะสมในการทำงานไม่ส่งผลเสียต่อการพัฒนากำลังรับแรงดัด และเป็นการประหยัดสารละลายเป็นการลดต้นทุนการผลิต

#### 4.4.2 ทดสอบกำลังรับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.17



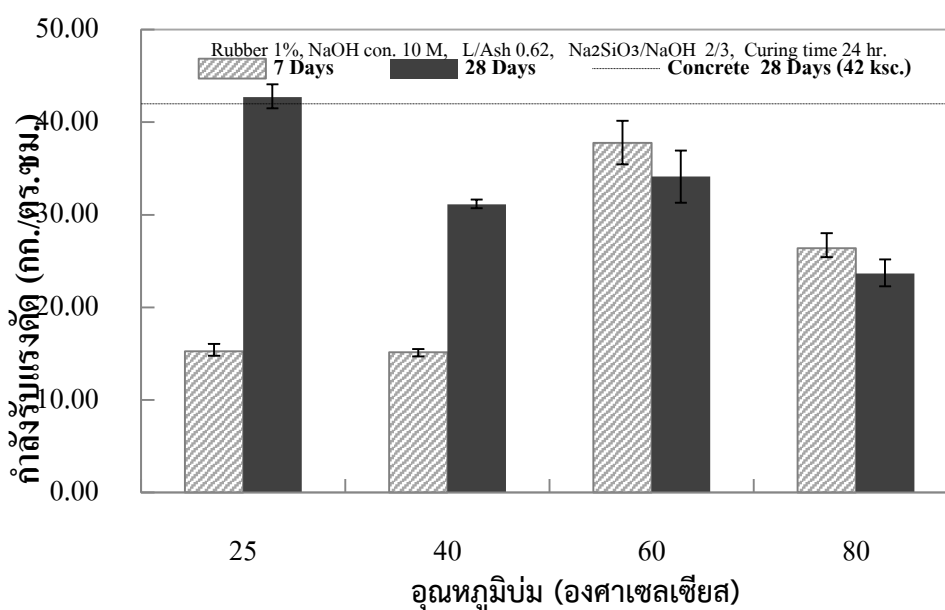
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.17 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดสูงในช่วงอายุตั้งแต่การพัฒนากำลังรับแรงดัดต่ำในช่วงอายุปลายซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Fernández-Jiménez, Palomo et al. 2005) ผลการศึกษา

แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาจะสูงเป็นพิเศษในช่วงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 8 โมลาร์ พบว่าการพัฒนากำลังในช่วงอายุต้นต่ำ แต่มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นแต่แนวโน้มของกำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นตรงกันข้ามกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นเกินความสามารถที่โพลิเมอร์ฟิล์มจะช่วยต้านทานแรงดัดที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า 42 กก./ตร.ซม. (มาตรฐาน ทรม. 309/2554) ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานในงานผิวทางคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท

#### 4.4.3 ทดสอบกำลังรับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมือเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อุณหภูมิบ่ม จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.18

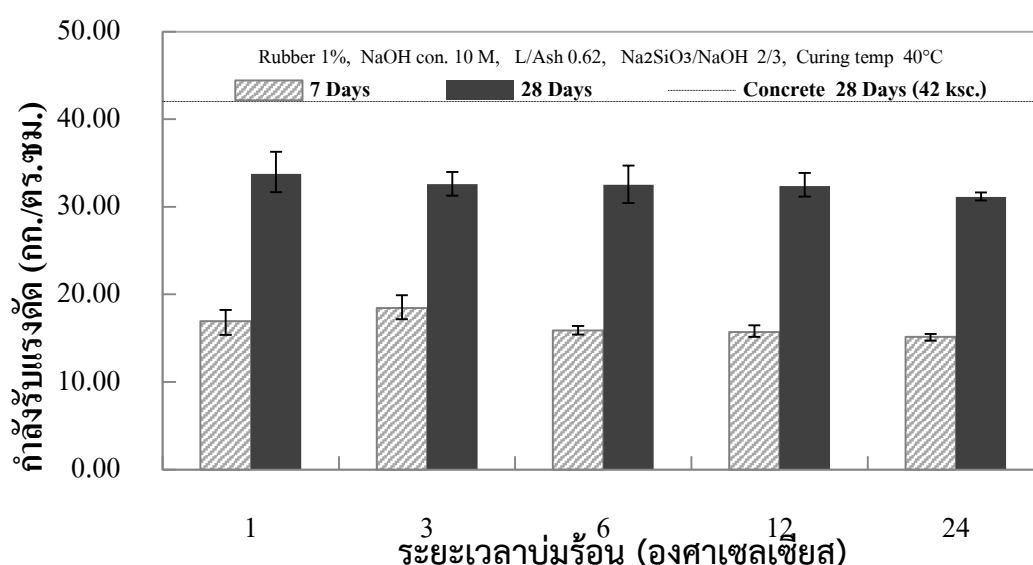


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.18 พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าตรงข้ามกับกำลังรับแรงอัด เนื่องจากอุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวเร่งการทำปฏิกิริยา (Huseien, Mirza et al. 2016) เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบของจีโอโพลิเมอร์นั้นจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลของธาตุต่างๆ ที่ถูกชะละลายทำให้โมเลกุลของธาตุเหล่านั้นมีโอกาสชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยา geopolymerization เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น โดยพบว่าที่อายุ 7 วันกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงกว่า 325 กก./ตร.ซม. โดยการบ่มตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งกำลังรับแรงอัดที่สูงจะส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความแข็งแรงแต่เปราะขึ้น เนื่องจากความต้านทานหน่วยแรงอัดที่มากขึ้นจนเกินความสามารถของโพลิเมอร์ฟิล์มที่จะช่วยในการต้านทานแรงดึงจากหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นไม่สามารถช่วยต้านทานได้

#### 4.4.5 การทดสอบหาลังรับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมือเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 40 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.19

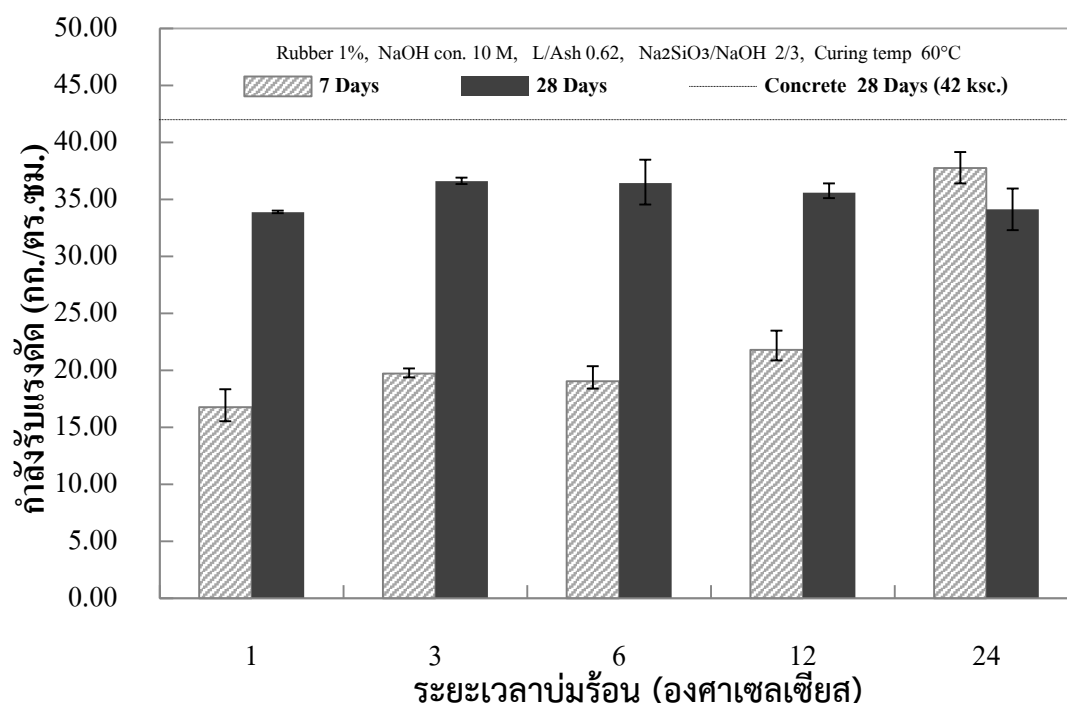


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 40 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.19 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าน้อยกว่า 42 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม. 309/2554) ทุกระยะเวลาบ่ม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากความแข็งแรงแต่เปราะขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ความต้านทานหน่วยแรงอัดที่มากขึ้นจนเกินความสามารถของโพลิเมอร์ฟิล์มที่จะช่วยในการต้านทานแรงดึงจากหน่วยแรงดัดไม่สามารถช่วยต้านทานได้

#### 4.4.5 การทดสอบหาลำไส้รับดัดของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมือเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.20



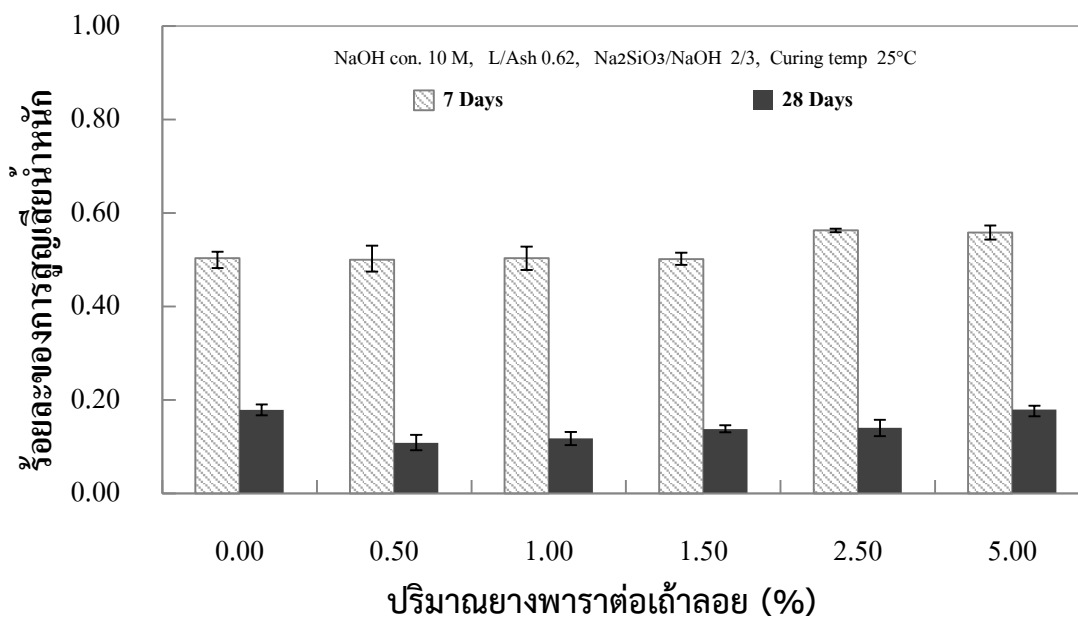
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 60 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.20 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าน้อยกว่า 42 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม. 309/2554) ทุกระยะเวลาบ่ม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากความแข็งแรงแต่เปราะขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ความต้านทานหน่วยแรงอัดที่มากขึ้นจนเกินความสามารถของโพลิเมอร์ฟิล์มที่จะช่วยในการต้านทานแรงดึงจากหน่วยแรงดัดไม่สามารถช่วยต้านทานได้โดยมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกันกับการบ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

#### 4.5 การทดสอบการต้านทานการกัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

##### 4.5.1 ทดสอบการต้านทานการกัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา เมื่อปรับค่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ร้อยละน้ำยางพาราต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงหลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นแกะแบบห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.21

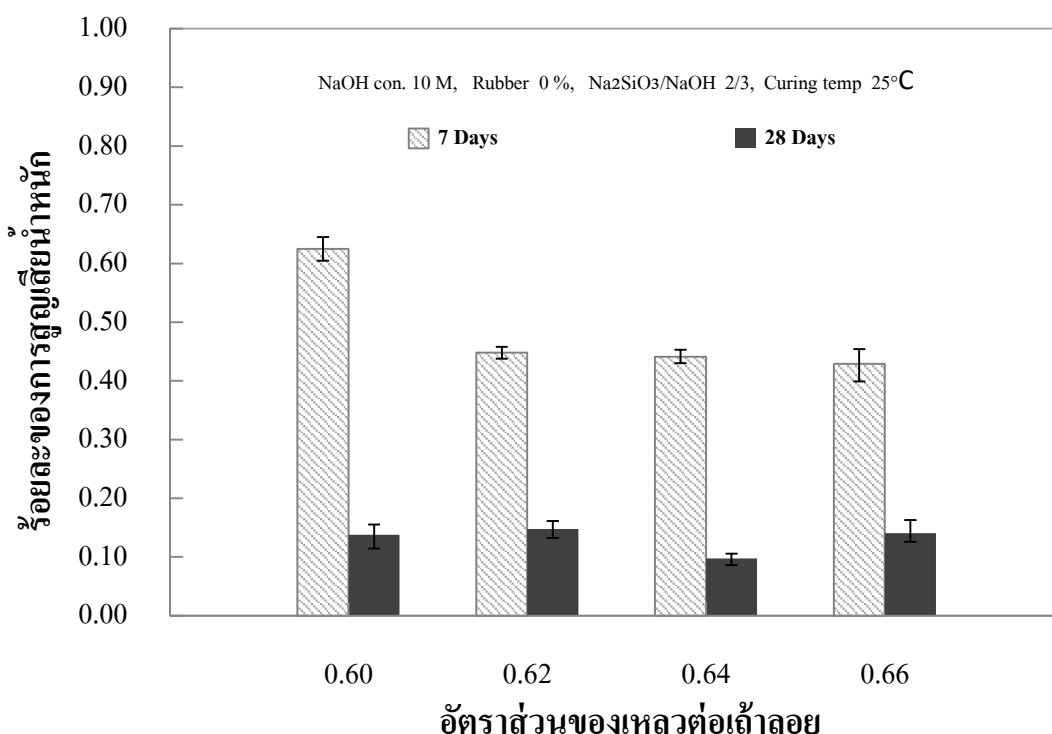


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.21 พบว่าการเพิ่มยางในทุกปริมาณโดยบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้อง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้สูงขึ้นได้เนื่องจากยางเข้าไปเพิ่มการยึดเหนี่ยวให้แก่จีโอโพลิเมอร์มากขึ้น และสามารถดูดซับพลังงานงานจากการกระแทกได้ดีทำให้ตัวอย่างจึงต้านทานการสูญเสียน้ำหนักให้สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมยางพาราในระบบ นอกจากนี้ในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เพิ่มน้ำยางพารา 0.50% จะมีความต้านทานต่อการขีดสีมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Zeng-Qiang Shi and D.D.L.Chung 1997) พบว่าการการความสามารถในการทนต่อขีดสีของคอนกรีตดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มน้ำยางโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

#### 4.5.2 ทดสอบการต้านทานการขีดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.66 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.22

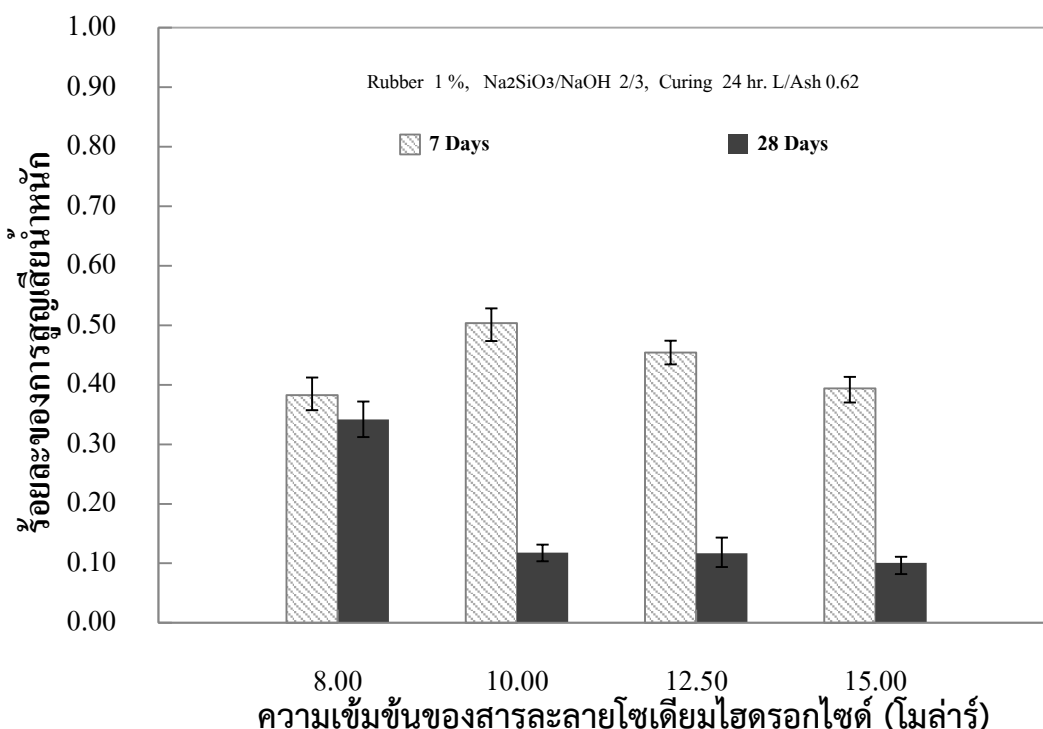


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.22 พบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยสูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักลดลงเป็นผลที่เนื่องมาจากปริมาณสารละลายมีปริมาณเพิ่มขึ้นสามารถชะละลายแร่ซิลิกาและแร่ลูมินาในเถ้าลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้มากกว่าจึงเกิดการยึดเหนี่ยวภายในเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราได้ดีกว่า(Olivia and Nikraz 2012) และเนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบที่เนื้อของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยตรงความพรุนจึงไม่ส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียน้ำหนักเท่ากับการรับกำลังอัด

#### 4.5.2 ทดสอบการต้านทานการกัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.23

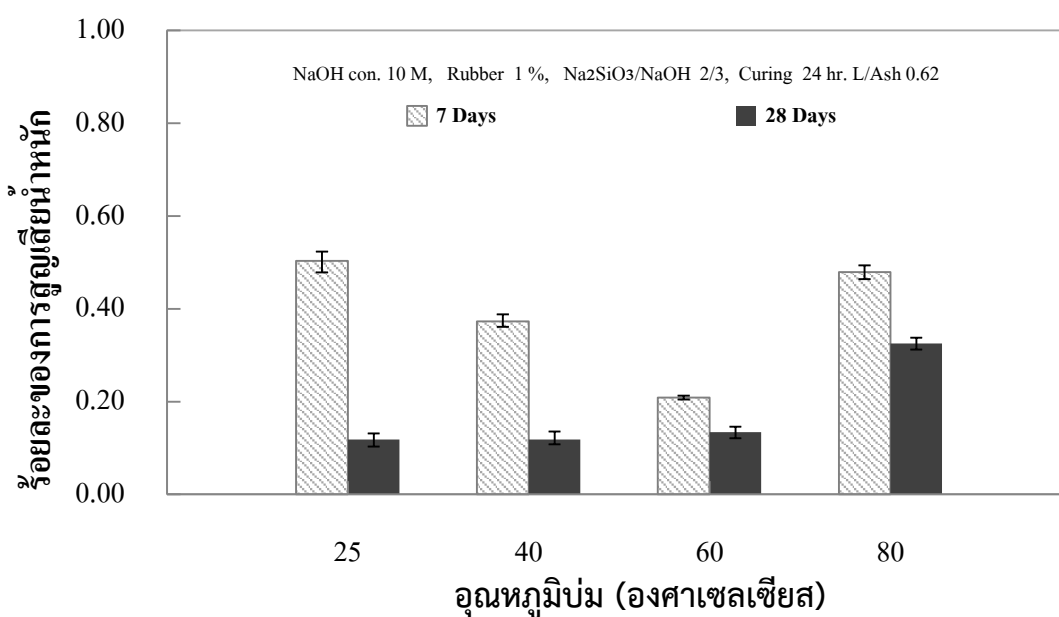


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักสูง และยังพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักลดลง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 8 โมลาร์ ที่อายุ 28 วันมีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีลดลง และสูญเสียอย่างชัดเจนเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ซึ่งเป็นผลที่เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะละลายองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่องมากกว่าจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อตัวอย่างมีอายุเพิ่มขึ้น(Olivia and Nikraz 2012)

#### 4.5.3 ทดสอบการต้านทานการขัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อุณหภูมิบ่ม จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ความเข้มข้น นำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.24

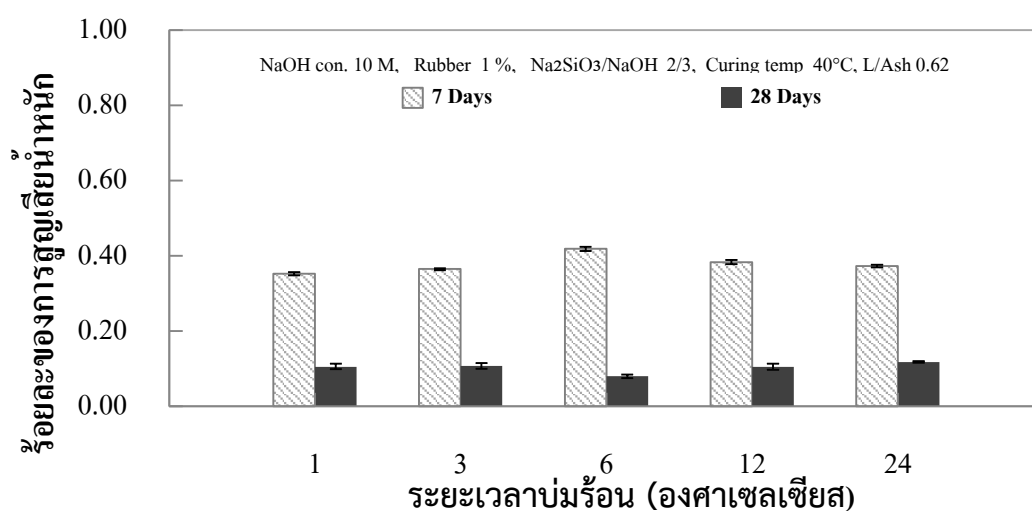


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

จากผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 4.24 พบว่าอุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้นสามารถเร่งการทำปฏิกิริยาส่งผลให้การทนทานต่อการขัดสีเพิ่มมากขึ้นในช่วงอายุต้น แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การต้านทานต่อการขัดสีในช่วงอายุปลายต่ำลง (Bakria, Kamarudin et al. 2011) เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการสูญเสียความชื้นมากเกินไป ทำให้เกิดการแตกร้าว (Bakharev, 2005; Perera, Uchida, Vance and Finnie, 2007) ส่งผลให้ส่งผลร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราด้วยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีในช่วงอายุต้นมาก แต่การเกิดปฏิกิริยาเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้ความร้อนบ่มส่งผลให้การยึดประสานระหว่างมวลเกิดขึ้นดีกว่า และยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงอายุปลายให้ค่าต้านทานการขัดสีดีกว่ามากเมื่อเทียบกับการบ่มด้วยความร้อนถึง 80 องศาเซลเซียส ในช่วงอายุปลาย (Al-Majidi, Lampropoulos et al. 2016)

#### 4.5.4 การทดสอบการต้านทานการขัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 40 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.25

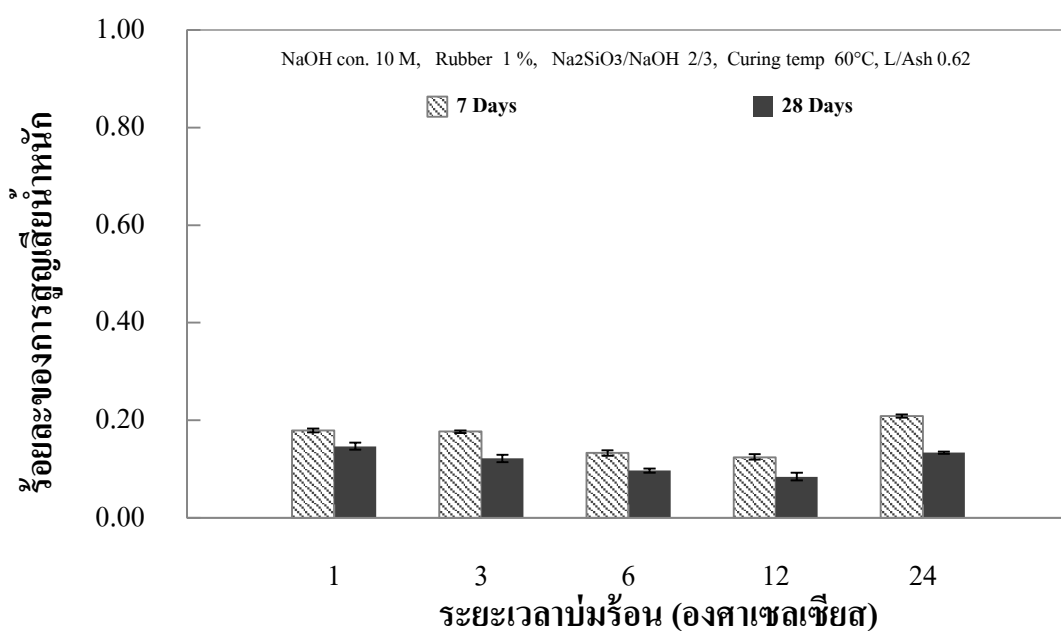


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มพบว่าที่อายุ 7 วัน ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจนถึง 6 ชั่วโมง แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมากกว่า 6 ชั่วโมงเป็นการเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้นส่งผลให้ปฏิกิริยา geopolymerization เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้นการสูญเสียน้ำหนักจึงน้อยลง การต้านทานต่อการขัดสีจึงลดลงไปด้วย (Bakria, Kamarudin et al. 2011) และยังพบว่าที่อายุ 28 วันการเพิ่มระยะเวลาบ่มมากขึ้น สามารถทำให้กำลังของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นได้แต่ไม่มากนัก (Swanepoel and Strydom, 2002; Hardjito, Wallah, Sumajouw and Rangan, 2004; Chindaprasirt, Chareerat, Hatanaka and Cao, 2011) และยังมีข้อเสียเช่น การสิ้นเปลืองพลังงาน

#### 4.5.5 การทดสอบการต้านทานการขัดสีของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.62 โดยจะปล่อยให้ตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นถอดแบบแล้วห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนจะทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ ที่ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม หลังจากนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.26



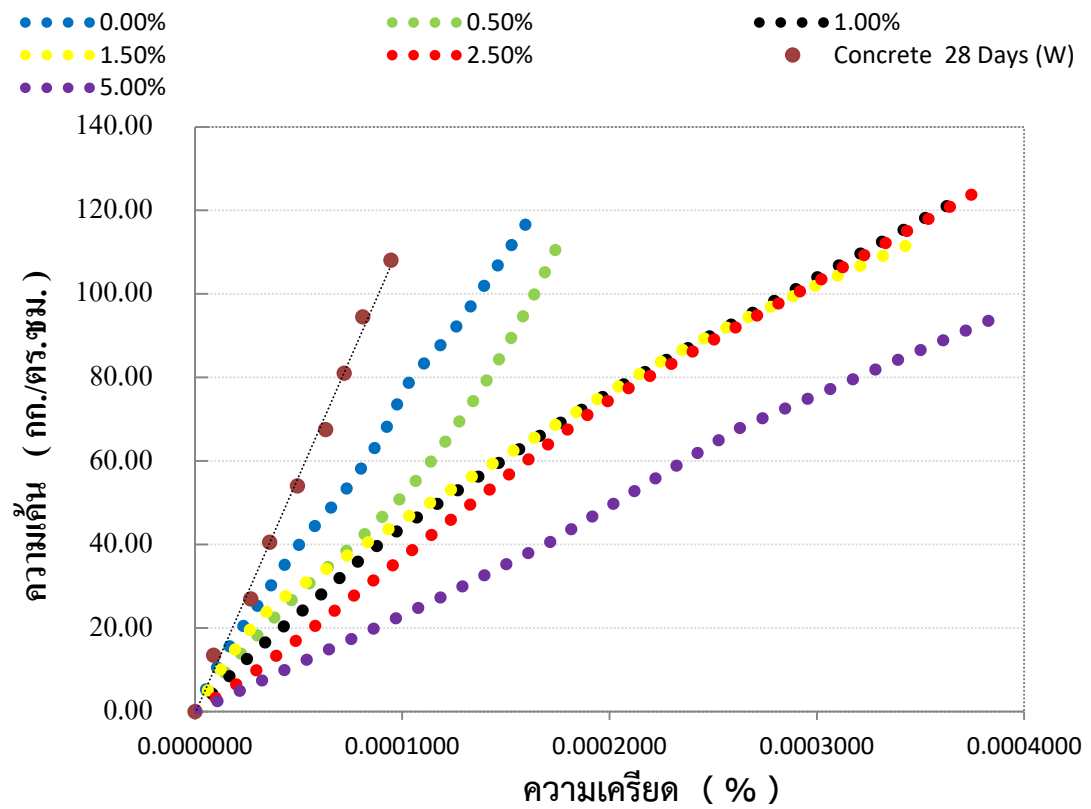
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม พบว่าระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และยังพบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ส่งผลให้การต้านทานต่อการขีดสีสูงสุดกล่าวคือมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดทุกช่วงอายุ แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการสูญเสียความชื้นมากเกินไป ทำให้เกิดการแตกร้าว (Bakharev, 2005; Perera, Uchida, Vance and Finnie, 2007) ส่งผลให้คุณสมบัติที่ดีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง

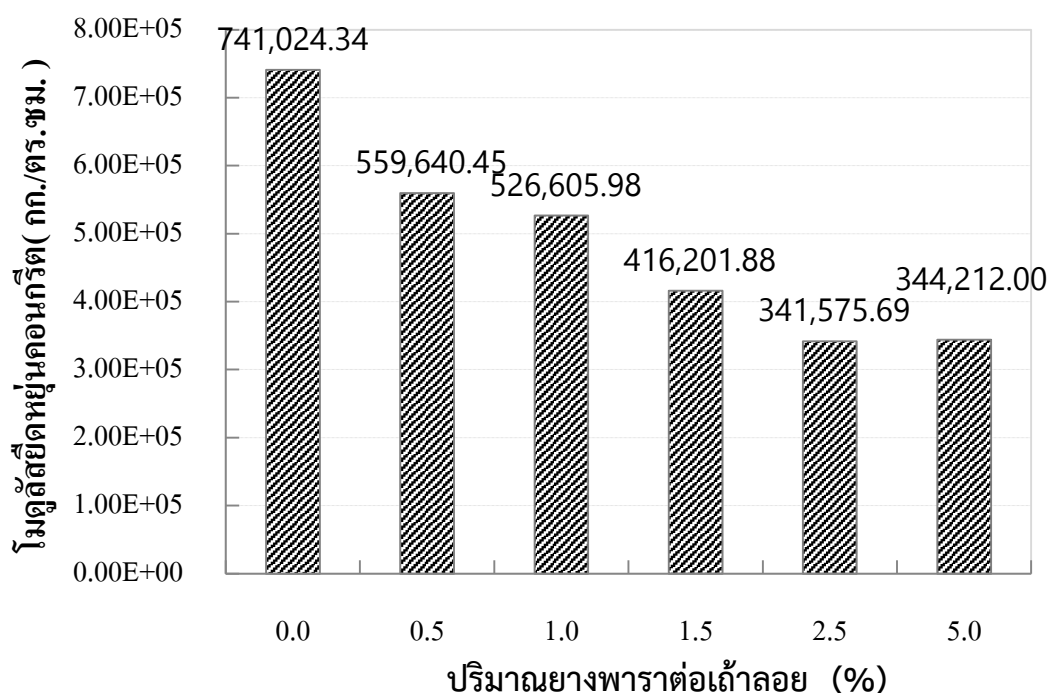
#### 4.6 การทดสอบค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

##### 4.6.1 ทดสอบยังโมดูลัสยืดหยุ่นของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับค่าร้อยละน้ำยางพาราต่อแกลลวย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อแกลลวยเท่ากับ 0.62 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ร้อยละน้ำยางพาราต่อแกลลวยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก โดยจะปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเทเข้าแบบแล้ว จากนั้นแกะแบบห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร โดยจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน แล้วนำมาบ่มที่ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.27 และ 4.28



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยาทางพาราต่อเถ้า  
ลอย



**รูปที่ 4.28** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อแก้วลอย

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าการเพิ่มน้ำยางพาราจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในช่วง 1.0% แต่ไม่เกิน 2.5% จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถรับความเค้นอัด และความเคลียดได้มากขึ้น และยังพบว่าการเพิ่มน้ำยางพาราในระบบส่งผลให้ค่ายังโมดูลัสของคอนกรีตลดลง

#### 4.7 ผลการก่อสร้างถนนต้นแบบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

4.6.1 การติดต่อประสานงานกับทางกรมการปกครองส่วนท้องถิ่น เพื่อขออนุญาตเข้าดำเนินการสำรวจพื้นที่ที่จะเป็นตัวอย่างในการถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา พบว่าทางวิศวกรของ อบต.พระลับ และผู้ใหญ่บ้าน ได้อำนวยความสะดวกและช่วยกำหนดตำแหน่ง ได้ตรงกับพื้นที่ที่ต้องการสร้าง โดยถนนมีความกว้าง 4 เมตร เป็นพื้นที่ที่มีการสัญจรของรถโดยหลัก 2 ประเภทคือรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ และสามารถปิดพื้นที่ถนนเพื่อทำการศึกษาวิจัยได้ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ประสานงานกับวิศวกรของอบต. คนในพื้นที่ และผู้ใหญ่บ้าน ตำบลพระลับ จังหวัดขอนแก่น

4.6.2 ทีมงานผู้วิจัยดำเนินระบุพื้นที่ ทำการสำรวจบันทึกข้อมูลขนาดพื้นที่ นำพื้นที่มาออกแบบโดยใช้มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทซึ่งมีรูปแบบมาตรฐานในการก่อสร้างเป็นตัวกำหนดนำมาใช้กับขนาดถนนที่สำรวจ ดังแสดงในรูปที่4.30



รูปที่ 4.30 ขณะทำการสำรวจขนาดและระดับของพื้นที่

4.6.3 การรื้อถอนถนนและการปรับพื้นที่เดิม สามารถทำได้อย่างลำบากเนื่องจากดินเดิมมีความแข็งสูง ไม่สามารถดำเนินการด้วยแรงคนให้เสร็จตามเวลาได้ต้อง นำเครื่องจักรช่วยในการปรับ

พื้นที่ ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการเทถนนคอนกรีตซึ่งมีความหนา 15 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 พื้นดินเดิมมีความแข็งสูงจึงต้องใช้เครื่องจักรช่วยในการปรับระดับ

4.6.4 ลักษณะการเตรียมพื้นที่เท โดยปูด้วยทรายปรับระดับและทำการบดอัดให้แน่น ทำการประกอบแบบไม้ ผูกเหล็กเสริมกันราว สามารถดำเนินการได้ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ลักษณะการเตรียมพื้นและแบบก่อนการดำเนินการเทจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4.6.5 ให้กระบวนการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราต้องใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมและเทรวมถึงปาดหน้าปรับผิวในเสร็จภายในระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราในขณะทำการผสมนั้นมีความชื้นเหลือสูงเมื่อเทออกจากโม่จะสามารถไหลเข้าแบบด้วยน้ำหนักตัวเองได้เป็นอย่างดี การทำงานจึงง่ายกว่าคอนกรีตทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.33 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าอุณหภูมิระหว่างวันในการทำการทดสอบมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเป็นอย่างมาก โดยผู้วิจัยได้ทำการผสมและเทถนนในช่วงระยะเวลา 10.00-17.00 น. ในแต่ละวัน ช่วงเดือน เมษายน พบว่ามีอุณหภูมิที่วัดได้อยู่ระหว่าง 37-48 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารามีระยะเวลาการก่อตัวลดลง



รูปที่ 4.33 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารามีลักษณะความชื้นเหลือสูงเข้าแบบได้

หลังจากเทและปรับผิวหน้าของถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา แล้วดำเนินการคลุมด้วยพลาสติกใสป้องกันการการระเหยของความชื้น ซึ่งอาจทำให้ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเกิดการแตกร้าวได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ปิดผิวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราด้วยพลาสติกใสป้องกันการสูญเสียความชื้น

4.6.6 การทดสอบทางกายภาพโดยการเปิดเส้นทางจราจรหลังเทช่วงสุดท้ายผ่านไปเป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราสามารถรับน้ำหนักของรถยนต์ กระบะได้โดยไม่เกิดการยุบตัวของผิวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ทดสอบผิวถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราหลังการเทช่องสุดท้ายเสร็จเป็นระยะเวลา 30 นาที

และจากการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราพบว่า กำลังของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อายุ 28 วันมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรสอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการและสูงกว่าที่มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทได้กำหนดไว้

และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้านราคาในการก่อสร้างเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปพบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยามีราคาต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยคอนกรีตทั่วไปนั้นมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นต้นทุนหลัก แต่เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์นั้นจำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นหลักในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน แต่อย่างไรก็ตามการที่ราคาสูงขึ้นแต่จีโอโพลิเมอร์นั้นมีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้านและยังมีระยะเวลาก่อตัวที่สั้นกว่าคอนกรีตทั่วไปทำให้ลดระยะเวลาในการปิดช่องทางจราจรได้อย่างมากส่งผลต่อหลายด้านเช่น ความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน ลดการเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และนอกจากนี้ยังเป็นการนำเอาเถ้าลอยซึ่งเป็นปัญหาด้านมลพิษมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยามีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการซ่อมถนนมากกว่าการสร้างถนน หากวิเคราะห์ให้มีมิติของด้านราคา วัสดุซ่อมถนนคอนกรีตจะมีราคาที่สูงกว่าคอนกรีตในการก่อสร้างทั่วไป ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยามีราคาเปรียบเทียบไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบราคาต้นทุนคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยามีพาราซัน

| ลำดับ | รายการวัสดุ       | คอนกรีตทั่วไป |           | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต |           |
|-------|-------------------|---------------|-----------|----------------------|-----------|
|       |                   | ปริมาณ(กก.)   | ราคา(บาท) | ปริมาณ(กก.)          | ราคา(บาท) |
| 1     | ปูนซีเมนต์        | 350           | 882       | -                    | -         |
| 2     | หิน               | 1,037         | 195       | 921                  | 359       |
| 3     | ทราย              | 741           | 425       | 921                  | 230       |
| 4     | เถ้าลอย           | -             | -         | 263                  | -         |
| 5     | น้ำยามีพาราซัน    | -             | -         | 2.6                  | 105       |
| 6     | โซเดียมซิลิเกต    | -             | -         | 63                   | 1,705     |
| 7     | โซเดียมไฮดรอกไซด์ | -             | -         | 38                   | 947       |
|       | รวม               | 2,128         | 1,501     | 2,209                | 3,346     |

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

###### (1) แก้วลอย

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของแก้วลอย ตามมาตรฐาน ASTM C188-84 มีค่าเท่ากับ 2.42 ผลการทดสอบร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C430 มีค่าเท่ากับ 43.59 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของแก้วลอยด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) แสดงให้เห็นว่าแก้วลอยมีลักษณะกลม ผิวเรียบ มีขนาดแตกต่างกัน

###### (2) มวลรวมละเอียด (ทราย)

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียด(ทราย) ตามมาตรฐาน ASTM C 128-97 มีค่าเท่ากับ 2.61 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.12 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 136-96a เท่ากับ 3.05 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,729 กก./ลบ.ม.

###### (3) มวลรวมหยาบ (หิน)

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบ(หิน) ตามมาตรฐาน ASTM C 127-88 มีค่าเท่ากับ 2.70 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.26 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 136-96a เท่ากับ 7.94 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบกระทุ้งแน่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,523 กก./ลบ.ม. ผลการทดสอบการทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ มีค่าเฉลี่ยร้อยละการสูญเสียจากการขัดสีของมวลรวมหยาบ 25.6 (น้อยกว่าร้อยละ 45)

##### 5.1.2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำ

###### ยางพารา

(1) เมื่อเติมน้ำยางพารา และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพิ่มลงไปในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลง โดยสามารถควบคุมระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราชั้นให้อยู่ในช่วง 10- 1000นาที่ ได้ซึ่ง สามารถลดระยะเวลาการก่อตัวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C403 ที่พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 250 – 400 นาที่ ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีช่วงระยะเวลาที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้มากกว่า

(2) ปริมาณการเติมน้ำยาง 1.0 - 1.5% จะช่วยให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุ 28 วันส่งผลตัวอย่างมีกำลังรับดัดมากกว่า 42 กก./ตร.ซม.(มาตรฐาน ทรม. 309/2554) แต่เมื่อปริมาณ

การเพิ่มน้ำยามีค่าสูงเกิน 1.5% จะเป็นตัวลดทอนกำลังตัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้ต่ำลง และยังพบว่าการใช้ความร้อนในการบ่มส่งผลเสียต่อกำลังรับตัดซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่า 42 กก./ตร.ซม. (มาตรฐาน ทรม. 309/2554) ทุกกรณี การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10 โมลลาร์เป็นการลดทอนการพัฒนา กำลังรับแรงตัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอายุ 28 วัน

(3) การเพิ่มน้ำยารพาราในทุกปริมาณไม่ส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และไม่เป็นการลดทอนการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แนะนำกรณีจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปกติให้ใช้ 8 โมลลาร์ สำหรับกรณีต้องการกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 450 กก./ตร.ซม. ให้ใช้ 10 โมลลาร์ เมื่อเทียบกับการบ่มด้วยความร้อนซึ่งสามารถเร่งกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ แต่การใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนเกินความจำเป็นจะส่งไปส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัด

(4) การเพิ่มน้ำยารพาราในทุกปริมาณโดยบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้อง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสูญเสียน้ำหนักจากการซัดสีให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากยางเข้าไปเพิ่มการยึดเหนี่ยวให้แก่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้น และสามารถดูดซับพลังงานงานจากการกระแทกได้ดี ทำให้ตัวอย่างจึงมีประสิทธิภาพการต้านทานการสูญเสียน้ำหนักให้สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับตัวอย่างที่ไม่ผสมยางพาราในระบบ นอกจากนี้ในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เพิ่มน้ำยารพาราชั้น 1% จะมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องกับการสูญเสียน้ำหนักกล่าวคือความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอุณหภูมิปกติ ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง ซึ่งผกผันกับการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยความร้อน

(5) การเพิ่มน้ำยารพาราจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในช่วง 1.0% แต่ไม่เกิน 2.5% พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถรับความเค้นอัด และความเคียดได้มากขึ้น และยังพบว่า การเพิ่มน้ำยารพาราในระบบส่งผลให้คอนกรีตมีความยืดหยุ่นได้มากขึ้นหรือรับพลังงานได้สูงขึ้นจากค่ายังโมดูลัสของคอนกรีต

(6) การนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไปใช้ในงานผิวจราจรแบบคอนกรีตตาม (มาตรฐาน มทข. 231-2545) ในกรณีที่ต้องการใช้งานผิวจราจรแบบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 325 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 7 วัน มีระยะเวลาในการทำงานที่เหมาะสมร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำ สามารถก่อสร้างได้โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.67, ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลลาร์, อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย 0.62, ปริมาณน้ำยางต่อเถ้าลอยร้อยละ 0.50 โดยบ่มด้วยอุณหภูมิปกติ

หากต้องการพิจารณาแบบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 325 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน มีระยะเวลาในการทำงานที่เหมาะสมร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำ เนื่องจากกรมทางหลวงชนบท ไม่ได้กำหนดกำลังรับแรงดัดจึงนำค่ากำลังรับแรงดัดไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง พบว่า ถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดสูงกว่า 42 กก./ตร.ซม. เมื่อเทียบกับ มาตรฐาน ทล.-ม. 309/2554 มีความสามารถในการต้านทานความเค้น และความเคียดได้มากขึ้น สามารถก่อสร้างได้ โดยใช้อัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.67, ความเข้มข้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์, อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย 0.62, ปริมาณน้ำยางต่อ เถ้าลอยร้อยละ 1.50 โดยไม่ต้องทำการบ่มด้วยความร้อนซึ่งจะส่งผลเสียต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นการประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนในการก่อสร้าง

(7) ในกระบวนการก่อสร้างถนน มีผลของอุณหภูมิภายนอกซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ และเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของผิวทางจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการก่อตัวที่รวดเร็วตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

(8) ในการก่อสร้างถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหน้ากว้าง 4.5 เมตร หนา 15 เซนติเมตร ใช้ ยางแห้ง 1,500 กิโลกรัม/กิโลเมตร หรือหากเปรียบเทียบเป็นปริมาณน้ำยางแห้งต่อตารางเมตร พบว่ามีการใช้ยางแห้งประมาณ 330 กรัม/ตารางเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การผสมน้ำยางพาราให้ผสมน้ำยางพาราชั้นกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตก่อนเพื่อให้ น้ำยางพารากระจายในเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้อย่างสม่ำเสมอ

5.2.2 การศึกษาเรื่องของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ควรมี การศึกษาเพิ่มเติมโดยช่วงของอุณหภูมิที่ควรทำการศึกษาอยู่ระหว่าง 25 – 55 องศาเซลเซียสซึ่ง เหมาะกับสภาพหน้างานของประเทศไทย

## เอกสารอ้างอิง

- Khamput, P. **"Using of Medium Ammonia Concentrated Latex mixed in Lightweight Mortar"** The Journal of Industrial Technology, Vol. 4, No. 2, July - December, 2008
- Chindaprasirt, P., T. Chareerat, et al. (2007). **"Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer."** Cement and Concrete Composites **29**(3): 224-229.
- Davidovits, J. (1994). **"Geopolymer: Man-made rock geosynthesis and resulting development of very early high strength cement."** Materials (16(2&3)): 91-139.
- Davidovits, J. Geopolymers and geopolymer new materials. J Therm Anal 1989;35:429-44.
- Duxson P et al. Geopolymer technology: the current state of the art. J Mater Sci 2007;42:2917-33.
- van Jaarsveld JGS, van Deventer JSJ, Lorenzen L. The potential use of geopolymer materials to immobilize toxic metals: Part 1. Theory and applications. Mineral Eng 1999;10:659-69.
- Komnitsas K, Zaharaki D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. Miner Eng 2007;20:1261-77.
- Cheng TW, Chiu JP. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. Miner Eng 2003;16:205-10.
- Dias, D. P. and C. Thaumaturgo (2005). **"Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers."** Cement and Concrete Composites 27(1): 49-54.
- Alomayri, T., F. U. A. Shaikh, et al. (2014). **"Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites."** Composites Part B: Engineering 60: 36-42.
- Ranjbar, N., S. Talebian, et al. (2016). **"Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites."** Composites Science and Technology 122: 73-81.
- Kuenzel C, Vandeperre LJ, Donatello S, Boccaccini AR, Cheeseman C. **Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in Metakaolin-Based Geopolymers.** Journal of the American Ceramic Society. 2012;95(10):3270-7.
- Zuhua Z, Xiao Y, Huajun Z, Yue C. **Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer.** Applied Clay Science. 2009;43(2):218-23.
- Ridtirud C, Chindaprasirt P, Pimraksa K. **Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers.** Int J Miner Metall Mater. 2011;18(1):100-4.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Disfani, M. M., A. Arulrajah, et al. (2012). "Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications." *Journal of Cleaner Production* **20**(1): 170-179.
- Donrak, J., R. Rachan, et al. (2016). "Improvement of marginal lateritic soil using Melamine Debris replacement for sustainable engineering fill materials." *Journal of Cleaner Production* **134**: 515-522.
- Fakhri, M. and F. Saberi. K (2016). "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement." *Journal of Cleaner Production* **129**: 521-530.
- Ismail, M., B. Muhammad, et al. (2009). *Durability Performance of Natural Rubber Latex Modified Concrete*.
- Malhotra, M. (2002). *Sustainable development and concrete technology*. ACI Concrete Internationnal. Introduction. **24**: 7-22.
- Moreno, F., M. C. Rubio, et al. (2012). "The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage." *Construction and Building Materials* **26**(1): 466-474.
- Muhammad, B., M. Ismail, et al. (2012). "Influence of non-hydrocarbon substances on the compressive strength of natural rubber latex-modified concrete." *Construction and Building Materials* **27**(1): 241-246.
- Nimwinya, E., W. Arjharn, et al. (2016). "A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer." *Journal of Cleaner Production* **119**: 128-134.
- Poon, C. S. and D. Chan (2006). "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base." *Construction and Building Materials* **20**(8): 578-585.
- Tam, V. W. Y. (2009). "Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries." *Journal of Cleaner Production* **17**(7): 688-702.
- Xueying Li, Zheng Wang, Zhenzhen Jiao. "Influence of Curing on the Strength Development of Calcium-Containing Geopolymer Mortar." *Materials*. 2013; 6: 5069-5076.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, ASTM C 128-97 <http://www.astm.org>, 1999
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C 127-88 <http://www.astm.org>, 1999
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates<sup>1</sup>, ASTM C 136-96a <http://www.astm.org>, 1999
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM C 131-96 <http://www.astm.org>, 1999
- American Society for Testing and Materials, Standard test methods for Hydraulic Cement, ASTM C188-84 <http://www.astm.org>, 1999
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, ASTM C403/C403M-99 <http://www.astm.org>, 1999
- British Standard, Testing Concrete Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes. BS 1881a:116 <https://www.scribd.com>, 1983a.
- British Standard, Testing Concrete. Method for Determination of Flexural Strength. BS 1881b:118 <https://www.scribd.com>, 1983b.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบวัสดุ

# 1. ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่นของมวลรวมหยาบ

| ขนาดของถัง 9 ลิตร                                             | 1      | 2      |
|---------------------------------------------------------------|--------|--------|
| น้ำหนักของถัง, (กก.)                                          | 9.5    | 9.5    |
| น้ำหนักถัง+น้ำหนักน้ำ, (กก.)                                  | 18.7   | 18.7   |
| น้ำหนักน้ำ, (กก.)                                             | 9.2    | 9.2    |
| ปริมาตรถัง, (ลบ.ม.)                                           | 0.0092 | 0.0092 |
| น้ำหนักถัง+น้ำหนักหิน, (กก.)                                  | 23.5   | 23.6   |
| น้ำหนักหิน, (กก.)                                             | 14.0   | 14.1   |
| ความหนาแน่นน้ำอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส, (กก./ม <sup>3</sup> ) | 996.2  | 996.2  |
| หน่วยน้ำหนักแห้งแบบกระทุ้งแน่น, (กก./ม <sup>3</sup> )         | 1520   | 1524   |
| หน่วยน้ำหนักแห้งแบบกระทุ้งแน่นเฉลี่ย, (กก./ม <sup>3</sup> )   | 1523   |        |

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

|                                           | 1      | 2      | เฉลี่ย |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|
| น้ำหนักวัสดุที่สภาพอบแห้ง, (กรัม)         | 2992.5 | 2991.8 |        |
| น้ำหนักวัสดุที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง, (กรัม) | 3000.0 | 3000.0 |        |
| น้ำหนักวัสดุในน้ำ, (กรัม)                 | 1891.0 | 1889.4 |        |
| ความถ่วงจำเพาะรวม (แห้ง)                  | 2.70   | 2.69   | 2.70   |
| ความถ่วงจำเพาะปรากฏ                       | 2.72   | 2.71   | 2.72   |
| ความถ่วงจำเพาะรวม (อิ่มตัวผิวแห้ง)        | 2.71   | 2.70   | 2.70   |
| เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ                   | 0.25   | 0.27   | 0.26   |

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบการสึกกร่อน (Los angeles) ของมวลรวมหยาบ

|                                                 | 1    | 2    | เฉลี่ย |
|-------------------------------------------------|------|------|--------|
| จำนวนลูกเหล็ก, (ลูก)                            | 11   | 11   |        |
| น้ำหนักตัวอย่าง, (กรัม)                         | 5000 | 5000 |        |
| น้ำหนักตัวอย่างค้างตะแกรง # 12 หลังล้าง, (กรัม) | 3580 | 3860 |        |
| เปอร์เซ็นต์การสึกกร่อนหลังล้าง                  | 28.4 | 22.8 | 25.6   |

## 2. ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่นของมวลรวมละเอียด (ทรายบก)

| ขนาดของถัง 2 ลิตร                                             | 1      | 2      |
|---------------------------------------------------------------|--------|--------|
| น้ำหนักของถัง, (กก.)                                          | 4.4    | 4.4    |
| น้ำหนักถัง+น้ำหนักน้ำ, (กก.)                                  | 7.2    | 7.2    |
| น้ำหนักน้ำ, (กก.)                                             | 2.8    | 2.8    |
| ปริมาตรถัง, (ลบ.ม.)                                           | 0.0028 | 0.0028 |
| น้ำหนักถัง+น้ำหนักทราย, (กก.)                                 | 9.3    | 9.3    |
| น้ำหนักทราย, (กก.)                                            | 4.8    | 4.8    |
| ความหนาแน่นน้ำอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส, (กก./ม <sup>3</sup> ) | 996.2  | 996.2  |
| หน่วยน้ำหนักแห้งแบบกระทุ้งแน่น, (กก./ม <sup>3</sup> )         | 1,729  | 1,729  |
| หน่วยน้ำหนักแห้งแบบกระทุ้งแน่นเฉลี่ย, (กก./ม <sup>3</sup> )   | 1,729  |        |

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ทรายบก)

| Flask No.                                              | 1     | 2     | เฉลี่ย |
|--------------------------------------------------------|-------|-------|--------|
| ปริมาตร flask (ซม <sup>3</sup> )                       | 500.0 | 500.0 |        |
| น้ำหนัก flask + น้ำถึงขีดบอกปริมาตร (กรัม)             | 651.3 | 655.7 |        |
| น้ำหนักทราย S.S.D.                                     | 500.0 | 500.0 |        |
| น้ำหนัก flask + ทราย S.S.D.+น้ำถึงขีดบอกปริมาตร (กรัม) | 959.4 | 963.9 |        |
| น้ำหนักทรายที่อบแห้ง (กรัม)                            | 494.4 | 494.5 |        |
| ความถ่วงจำเพาะรวมแห้ง                                  | 2.58  | 2.58  | 2.58   |
| ความถ่วงจำเพาะปรากฏ                                    | 2.65  | 2.65  | 2.65   |
| ความถ่วงจำเพาะรวม (S.S.D.)                             | 2.61  | 2.61  | 2.61   |
| เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ                                | 1.13  | 1.11  | 1.12   |

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบขนาดคละทรายบก (1)

| ตะแกรง<br>เบอร์                | น้ำหนัก<br>ตะแกรง<br>(กรัม) | น้ำหนัก<br>ตะแกรง +<br>ตัวอย่าง<br>(กรัม) | น้ำหนัก<br>ค้างตะแกรง<br>(กรัม) | %ค้าง<br>ตะแกรง | %ค้าง<br>สะสม |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------|
| 4                              | 781.6                       | 781.6                                     | 0.0                             | 0.00            | 0.00          |
| 8                              | 697.5                       | 792.7                                     | 95.2                            | 19.04           | 19.04         |
| 16                             | 670.1                       | 777.5                                     | 107.4                           | 21.48           | 40.52         |
| 30                             | 580.3                       | 688.1                                     | 107.8                           | 21.56           | 62.08         |
| 50                             | 566.3                       | 683.0                                     | 116.7                           | 23.34           | 85.42         |
| 100                            | 522.2                       | 586.0                                     | 63.8                            | 12.76           | 98.18         |
| 200                            | 473.3                       | 481.9                                     | 8.6                             | 1.72            | 99.90         |
| Pan                            | 490.4                       | 490.9                                     | 0.5                             | 0.10            | 100.00        |
| Total                          |                             |                                           | 500.0                           | 100.00          |               |
| โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 |                             |                                           |                                 |                 |               |

ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบขนาดคละทรายบก (2)

| ตะแกรง<br>เบอร์                | น้ำหนัก<br>ตะแกรง<br>(กรัม) | น้ำหนัก<br>ตะแกรง +<br>ตัวอย่าง<br>(กรัม) | น้ำหนัก<br>ค้างตะแกรง<br>(กรัม) | %ค้าง<br>ตะแกรง | %ค้าง<br>สะสม |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------|
| 4                              | 781.6                       | 781.6                                     | 0.0                             | 0.00            | 0.00          |
| 8                              | 697.5                       | 793.4                                     | 95.9                            | 19.18           | 19.18         |
| 16                             | 670.1                       | 774.7                                     | 104.6                           | 20.92           | 40.10         |
| 30                             | 580.3                       | 687.8                                     | 107.5                           | 21.50           | 61.60         |
| 50                             | 566.3                       | 682.0                                     | 115.7                           | 23.14           | 84.74         |
| 100                            | 522.2                       | 589.4                                     | 67.2                            | 13.44           | 98.18         |
| 200                            | 473.3                       | 482.4                                     | 9.1                             | 1.82            | 100.00        |
| Pan                            | 490.4                       | 490.4                                     | 0.0                             | 0.00            | 100.00        |
| Total                          |                             |                                           | 500.0                           | 100.00          |               |
| โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.04 |                             |                                           |                                 |                 |               |

### 3. ผลการทดสอบเถ้าลอย

ตารางที่ ก-8 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

| ตัวอย่าง | น้ำหนัก<br>(กรัม) | ปริมาตรก่อน<br>เติม<br>(ซม. <sup>3</sup> ) | ปริมาตร<br>หลังเติม<br>(ซม. <sup>3</sup> ) | ปริมาตร<br>เถ้าลอย<br>(ซม. <sup>3</sup> ) | ความ<br>หนาแน่น<br>(กรัม/ซม. <sup>3</sup> ) | ความ<br>ถ่วงจำเพาะ |
|----------|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|
| 1        | 49.6              | 0.3                                        | 20.8                                       | 20.5                                      | 2.420                                       | 2.42               |
| 2        | 49.1              | 0.1                                        | 20.4                                       | 20.3                                      | 2.419                                       | 2.42               |
| เฉลี่ย   |                   |                                            |                                            |                                           |                                             | 2.42               |

ตารางที่ ก-9 ผลการทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

| ตัวอย่าง | น้ำหนักเถ้าลอย<br>(กรัม) | น้ำหนักค้ำตะแกรง 325<br>(กรัม) | %ค้ำตะแกรง 325 | เฉลี่ย |
|----------|--------------------------|--------------------------------|----------------|--------|
| 1        | 100.000                  | 43.764                         | 43.76          | 43.59  |
| 2        | 100.000                  | 43.421                         | 43.42          |        |

ตารางที่ ก-10 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray diffraction ของเถ้าลอย

| องค์ประกอบเคมี                 | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|--------------------------------|------------------|
| CaO                            | 27.93            |
| SiO <sub>2</sub>               | 25.22            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.06            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.21            |
| SO <sub>3</sub>                | 7.64             |
| K <sub>2</sub> O               | 3.21             |
| MgO                            | 0.99             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.71             |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.68             |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.48             |
| MnO                            | 0.19             |

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

**ตารางที่ ข-1** ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  
สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

| ตัวแปร | ระยะเวลาก่อตัว     | เวลา (นาที) |
|--------|--------------------|-------------|
| 0.33   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 103         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1617        |
| 0.67   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 110         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1045        |
| 1.00   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 40          |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 260         |
| 1.50   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 23          |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 107         |
| 3.00   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 10          |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 13          |

**ตารางที่ ข-2** ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  
สารละลายต่อเถ้าลอย

| ตัวแปร | ระยะเวลาก่อตัว     | เวลา (นาที) |
|--------|--------------------|-------------|
| 0.60   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 140         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1020        |
| 0.62   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 110         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1045        |
| 0.64   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 120         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1092        |
| 0.66   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 80          |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1275        |

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

| ตัวแปร | ระยะเวลาก่อตัว     | เวลา (นาที) |
|--------|--------------------|-------------|
| 8 M    | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 125         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1455        |
| 10 M   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 110         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 1045        |
| 12.5 M | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 93          |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 692         |
| 15 M   | ระยะเวลาก่อตัวต้น  | 100         |
|        | ระยะเวลาก่อตัวปลาย | 745         |

ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบสมบัติทางกลจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

**ตารางที่ ค-1** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -   |
| 0.60  | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2465.6          | 321.0                    | 317.9                     | 3.1        | 2.8 |
|       | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2454.2          | 315.1                    |                           |            |     |
|       | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2455.8          | 317.6                    |                           |            |     |
| 0.62  | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2465.2          | 312.0                    | 314.5                     | 1.3        | 2.4 |
|       | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2443.4          | 315.6                    |                           |            |     |
|       | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2455.6          | 315.8                    |                           |            |     |
| 0.64  | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2440.1          | 264.2                    | 270.1                     | 8.4        | 5.8 |
|       | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2438.3          | 267.5                    |                           |            |     |
|       | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2416.5          | 278.5                    |                           |            |     |
| 0.66  | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2425.2          | 256.8                    | 258.0                     | 3.8        | 2.5 |
|       | 9.9        | 10.0 | 10.1 | 2426.4          | 261.8                    |                           |            |     |
|       | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2427.3          | 255.5                    |                           |            |     |

**ตารางที่ ค-2** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|------|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -    |
| 0.60  | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2447.2          | 521.3                    | 523.6                     | 8.7        | 6.4  |
|       | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2437.0          | 532.3                    |                           |            |      |
|       | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2437.0          | 517.2                    |                           |            |      |
| 0.62  | 10.1       | 10.0 | 10.4 | 2442.9          | 547.6                    | 501.5                     | 16.1       | 15.7 |
|       | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2427.7          | 491.1                    |                           |            |      |
|       | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2423.8          | 465.8                    |                           |            |      |

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 0.64  | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2399.7  | 460.1        | 480.9        | 15.7       | 20.8 |
|       | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2399.7  | 496.6        |              |            |      |
|       | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2422.7  | 485.9        |              |            |      |
| 0.66  | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2418.3  | 434.0        | 271.0        | 15.7       | 29.3 |
|       | 10.0       | 9.9  | 10.0 | 2388.3  | 477.0        |              |            |      |
|       | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2392.4  | 479.1        |              |            |      |

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|--------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|        | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 8 M    | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2429.6  | 292.5        | 287.4        | 5.1        | 4.0  |
|        | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2399.7  | 283.3        |              |            |      |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2418.3  | 286.4        |              |            |      |
| 10 M   | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2485.2  | 237.8        | 246.6        | 9.9        | 8.8  |
|        | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2463.1  | 245.4        |              |            |      |
|        | 10.2       | 10.1 | 10.1 | 2510.3  | 256.5        |              |            |      |
| 12.5 M | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2439.5  | 275.3        | 255.3        | 20.0       | 27.4 |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2453.2  | 262.7        |              |            |      |
|        | 10.0       | 10.1 | 9.9  | 2441.6  | 227.9        |              |            |      |
| 15 M   | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2452.7  | 307.5        | 291.1        | 16.4       | 12.2 |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2440.5  | 286.9        |              |            |      |
|        | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2441.0  | 278.9        |              |            |      |

**ตารางที่ ค-4** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |      |
|--------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|------|
|        | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -    |
| 8 M    | 10.1       | 10.0 | 9.9  | 2380.4          | 404.1                    | 399.3                     | 4.8        | 6.2  |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2394.8          | 400.7                    |                           |            |      |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2394.2          | 393.1                    |                           |            |      |
| 10 M   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2460.7          | 427.4                    | 445.4                     | 17.1       | 18.0 |
|        | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2475.4          | 446.3                    |                           |            |      |
|        | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2466.9          | 462.5                    |                           |            |      |
| 12.5 M | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2411.6          | 442.8                    | 458.2                     | 18.9       | 15.4 |
|        | 10.0       | 10.0 | 11.0 | 2396.2          | 477.1                    |                           |            |      |
|        | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2445.5          | 454.7                    |                           |            |      |
| 15 M   | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2414.5          | 455.0                    | 466.3                     | 15.7       | 11.3 |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2435.5          | 482.0                    |                           |            |      |
|        | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2434.4          | 461.9                    |                           |            |      |

**ตารางที่ ค-5** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -   |
| 25   | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2485.2          | 237.8                    | 246.6                     | 9.9        | 8.8 |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2463.1          | 245.4                    |                           |            |     |
|      | 10.2       | 10.1 | 10.1 | 2510.3          | 256.5                    |                           |            |     |
| 40   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2400.1          | 248.3                    | 251.8                     | 4.8        | 3.5 |
|      | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2414.7          | 250.5                    |                           |            |     |
|      | 9.9        | 10.0 | 10.0 | 2371.9          | 256.6                    |                           |            |     |

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 60   | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2428.3  | 384.7        | 367.9        | 16.8       | 14.4 |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2403.1  | 353.5        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2420.1  | 365.4        |              |            |      |
| 80   | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2398.2  | 455.6        | 432.8        | 22.8       | 16.7 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2402.6  | 416.1        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2390.8  | 426.6        |              |            |      |

ตารางที่ ค-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 25   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2460.7  | 427.4        | 445.4        | 17.1       | 18.0 |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2475.4  | 446.3        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2466.9  | 462.5        |              |            |      |
| 40   | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2369.1  | 360.0        | 399.2        | 3.0        | 39.2 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2416.8  | 435.5        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2412.9  | 402.1        |              |            |      |
| 60   | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2402.4  | 426.5        | 391.2        | 35.4       | 29.2 |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2400.0  | 362.0        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2413.8  | 385.0        |              |            |      |
| 80   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2415.4  | 474.9        | 446.1        | 28.8       | 25.6 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2398.5  | 442.9        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2406.1  | 420.5        |              |            |      |

**ตารางที่ ค-7** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 1    | 10.1       | 9.9  | 10.0 | 2418.2  | 224.2        | 234.4        | 14.1       | 10.2 |
|      | 10.0       | 9.9  | 10.0 | 2416.1  | 248.4        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2412.3  | 230.5        |              |            |      |
| 3    | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2424.1  | 233.1        | 240.5        | 7.9        | 7.5  |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2420.7  | 240.2        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2429.0  | 248.4        |              |            |      |
| 6    | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2453.6  | 265.7        | 251.2        | 14.5       | 12.4 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2417.2  | 238.7        |              |            |      |
|      | 9.9        | 10.1 | 10.0 | 2428.1  | 249.1        |              |            |      |
| 12   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2422.9  | 264.5        | 267.3        | 2.5        | 2.8  |
|      | 9.9        | 10.1 | 10.1 | 2426.9  | 269.7        |              |            |      |
|      | 10.0       | 9.9  | 10.0 | 2424.5  | 267.6        |              |            |      |
| 24   | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2400.1  | 248.3        | 251.8        | 4.8        | 3.5  |
|      | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2414.7  | 250.5        |              |            |      |
|      | 9.9        | 10.0 | 10.0 | 2371.9  | 256.6        |              |            |      |

**ตารางที่ ค-8** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 1    | 9.9        | 10.1 | 10.0 | 2402.4  | 376.7        | 388.0        | 33.1       | 21.8 |
|      | 10.0       | 9.9  | 10.0 | 2398.4  | 421.1        |              |            |      |
|      | 9.9        | 10.1 | 10.0 | 2397.6  | 366.2        |              |            |      |

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 3    | 9.9        | 10.0 | 10.0 | 2408.0  | 437.8        | 409.4        | 28.4       | 21.9 |
|      | 10.0       | 10.1 | 9.9  | 2384.4  | 403.0        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2376.6  | 387.5        |              |            |      |
| 6    | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2397.4  | 412.1        | 429.3        | 17.3       | 17.3 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2421.6  | 446.6        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2403.6  | 429.3        |              |            |      |
| 12   | 9.9        | 10.0 | 10.0 | 2394.8  | 427.0        | 429.0        | 15.3       | 13.3 |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2408.6  | 444.4        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2393.3  | 415.7        |              |            |      |
| 24   | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2369.1  | 360.0        | 399.2        | 36.3       | 39.2 |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2416.8  | 435.5        |              |            |      |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2412.9  | 402.1        |              |            |      |

ตารางที่ ค-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (ก.)    | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -    |
| 1    | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2438.4  | 310.5        | 316.0        | 13.0       | 5.5  |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2472.9  | 329.0        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2467.9  | 308.5        |              |            |      |
| 3    | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2438.4  | 315.0        | 331.4        | 20.1       | 3.7  |
|      | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2472.9  | 351.6        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2467.9  | 327.7        |              |            |      |
| 6    | 10.1       | 10.2 | 10.1 | 2486.8  | 302.0        | 322.9        | 29.8       | 20.9 |
|      | 10.0       | 10.2 | 10.1 | 2444.3  | 314.0        |              |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2444.3  | 352.7        |              |            |      |

|    |      |      |      |        |       |       |      |      |
|----|------|------|------|--------|-------|-------|------|------|
| 12 | 10.0 | 10.1 | 10.0 | 2413.1 | 324.6 | 357.0 | 34.1 | 32.4 |
|    | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 2469.4 | 355.3 |       |      |      |
|    | 10.1 | 10.2 | 10.1 | 2477.3 | 391.1 |       |      |      |
| 24 | 10.0 | 10.0 | 10.1 | 2428.3 | 384.7 | 367.8 | 16.8 | 14.4 |
|    | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 2403.1 | 353.5 |       |      |      |
|    | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 2420.1 | 365.4 |       |      |      |

**ตารางที่ ค-10** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม(บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |      |
|------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|------|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -    |
| 1    | 10.1       | 9.9  | 10.2 | 2417.4          | 373.3                    | 392.9                     | 33.7       | 19.6 |
|      | 10.1       | 10.3 | 10.1 | 2446.8          | 426.6                    |                           |            |      |
|      | 10.2       | 10.0 | 10.1 | 2376.1          | 378.7                    |                           |            |      |
| 3    | 9.9        | 10.0 | 10.1 | 2416.6          | 378.6                    | 412.2                     | 33.7       | 33.5 |
|      | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2440.7          | 445.9                    |                           |            |      |
|      | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2422.9          | 412.0                    |                           |            |      |
| 6    | 10.2       | 10.1 | 10.1 | 2461.6          | 443.8                    | 446.2                     | 15.1       | 12.7 |
|      | 10.2       | 10.0 | 10.1 | 2447.9          | 433.5                    |                           |            |      |
|      | 10.2       | 10.0 | 10.1 | 2450.8          | 461.4                    |                           |            |      |
| 12   | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2430.1          | 458.9                    | 465.0                     | 9.7        | 6.1  |
|      | 10.2       | 10.0 | 10.0 | 2459.6          | 474.7                    |                           |            |      |
|      | 10.3       | 10.0 | 10.1 | 2439.8          | 461.4                    |                           |            |      |
| 24   | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2402.4          | 426.5                    | 391.2                     | 35.4       | 29.2 |
|      | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2400.0          | 362.0                    |                           |            |      |
|      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2413.8          | 385.0                    |                           |            |      |

ตารางที่ ค-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยาฟาราต่อถ้ำลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |      |
|----------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|------|
|          | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -    |
| 0        | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2439.0          | 321.3                    | 346.8                     | 10.0       | 10.0 |
|          | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2429.6          | 367.2                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.1 | 10.0 | 2438.4          | 352.1                    |                           |            |      |
| 0.5      | 9.9        | 10.1 | 10.0 | 2446.9          | 354.2                    | 342.5                     | 9.0        | 15.7 |
|          | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2435.8          | 337.5                    |                           |            |      |
|          | 9.9        | 9.9  | 10.0 | 2431.6          | 335.8                    |                           |            |      |
| 1.0      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2485.2          | 237.8                    | 246.6                     | 9.9        | 8.8  |
|          | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2463.1          | 245.4                    |                           |            |      |
|          | 10.2       | 10.1 | 10.1 | 2510.3          | 256.5                    |                           |            |      |
| 1.5      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2461.9          | 212.9                    | 204.5                     | 8.5        | 11.8 |
|          | 10.0       | 10.0 | 10.1 | 2564.3          | 192.6                    |                           |            |      |
|          | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2483.4          | 207.8                    |                           |            |      |
| 2.5      | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2457.6          | 204.3                    | 191.9                     | 12.4       | 7.3  |
|          | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2462.4          | 184.6                    |                           |            |      |
|          | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2438.4          | 186.7                    |                           |            |      |
| 5.0      | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2426.9          | 165.5                    | 169.1                     | 3.3        | 3.6  |
|          | 10.1       | 10.0 | 10.1 | 2433.6          | 172.4                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2413.4          | 169.4                    |                           |            |      |

ตารางที่ ค-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อ  
เปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อแฉะลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62,  
Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(ก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |      |
|----------|------------|------|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------|------|
|          | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                 |                          |                           | +          | -    |
| 0        | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2414.9          | 477.1                    | 472.4                     | 17.8       | 19.9 |
|          | 9.9        | 10.0 | 10.0 | 2414.9          | 462.3                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2425.4          | 477.7                    |                           |            |      |
| 0.5      | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2452.5          | 476.1                    | 483.9                     | 10.3       | 12.6 |
|          | 9.8        | 10.0 | 10.0 | 2415.7          | 486.0                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.0 | 10.0 | 2452.0          | 489.8                    |                           |            |      |
| 1.0      | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2460.7          | 427.4                    | 445.4                     | 17.1       | 18.0 |
|          | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2475.4          | 446.3                    |                           |            |      |
|          | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2466.9          | 462.5                    |                           |            |      |
| 1.5      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2463.8          | 418.5                    | 420.9                     | 8.3        | 5.9  |
|          | 10.1       | 10.0 | 10.0 | 2462.7          | 415.0                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.2 | 10.0 | 2473.6          | 429.2                    |                           |            |      |
| 2.5      | 10.1       | 10.1 | 10.1 | 2452.8          | 391.4                    | 382.0                     | 9.4        | 18.4 |
|          | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2439.7          | 391.0                    |                           |            |      |
|          | 10.0       | 10.1 | 10.1 | 2449.9          | 363.7                    |                           |            |      |
| 5.0      | 10.0       | 10.2 | 10.0 | 2417.7          | 290.8                    | 312.0                     | 29.3       | 21.2 |
|          | 10.2       | 10.0 | 10.0 | 2435.4          | 303.9                    |                           |            |      |
|          | 10.1       | 10.1 | 10.0 | 2422.7          | 341.3                    |                           |            |      |

**ตารางที่ ค-13** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(กก.) | กำลังดัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|------------|------|------|------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                  |                          |                           | +          | -   |
| 0.60  | 10.4       | 49.9 | 10.4 | 12.8             | 32.0                     | 30.3                      | 1.7        | 3.2 |
|       | 10.4       | 50.2 | 10.4 | 12.9             | 27.2                     |                           |            |     |
|       | 10.5       | 50.1 | 10.3 | 13.1             | 31.8                     |                           |            |     |
| 0.62  | 10.2       | 50.2 | 10.1 | 12.4             | 24.8                     | 25.2                      | 0.7        | 0.4 |
|       | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.5             | 25.9                     |                           |            |     |
|       | 10.1       | 50.1 | 10.2 | 12.4             | 25.0                     |                           |            |     |
| 0.64  | 10.3       | 50.1 | 10.4 | 12.8             | 30.3                     | 29.5                      | 1.0        | 1.8 |
|       | 10.3       | 50.1 | 10.4 | 12.8             | 27.7                     |                           |            |     |
|       | 10.3       | 50.2 | 10.4 | 12.9             | 30.5                     |                           |            |     |
| 0.66  | 10.2       | 50.0 | 10.4 | 12.8             | 25.4                     | 26.4                      | 3.4        | 2.4 |
|       | 10.0       | 50.1 | 10.5 | 12.7             | 29.8                     |                           |            |     |
|       | 10.2       | 50.1 | 10.4 | 12.8             | 23.9                     |                           |            |     |

**ตารางที่ ค-14** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(กก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|------------|------|------|------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                  |                          |                           | +          | -   |
| 0.60  | 10.5       | 50.1 | 10.4 | 13.2             | 37.7                     | 39.5                      | 1.6        | 1.8 |
|       | 10.6       | 50.0 | 10.6 | 13.8             | 39.7                     |                           |            |     |
|       | 10.4       | 50.0 | 10.3 | 12.8             | 41.0                     |                           |            |     |
| 0.62  | 9.9        | 50.1 | 11.0 | 12.2             | 39.6                     | 36.5                      | 4.1        | 7.3 |
|       | 10.0       | 50.1 | 12.5 | 12.5             | 29.2                     |                           |            |     |
|       | 10.0       | 50.1 | 11.1 | 12.4             | 40.6                     |                           |            |     |

| L/ash | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|       | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 0.64  | 10.1       | 50.0 | 10.3 | 12.7    | 42.7         | 41.1         | 1.6        | 0.9 |
|       | 10.3       | 50.1 | 10.3 | 12.8    | 40.4         |              |            |     |
|       | 10.2       | 50.2 | 10.3 | 12.7    | 40.3         |              |            |     |
| 0.66  | 10.1       | 50.1 | 10.4 | 12.5    | 36.5         | 37.6         | 0.9        | 1.1 |
|       | 10.0       | 50.1 | 10.3 | 12.6    | 37.8         |              |            |     |
|       | 9.0        | 50.1 | 10.4 | 12.7    | 38.6         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-15** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังดัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|--------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|        | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 8 M    | 10.4       | 50.1 | 10.7 | 12.9    | 20.9         | 21.4         | 3.8        | 3.3 |
|        | 10.4       | 50.0 | 10.6 | 12.7    | 18.1         |              |            |     |
|        | 10.0       | 50.1 | 10.5 | 12.6    | 25.2         |              |            |     |
| 10 M   | 10.0       | 50.2 | 10.4 | 12.3    | 18.9         | 18.5         | 0.5        | 0.9 |
|        | 10.0       | 50.1 | 10.4 | 12.3    | 17.6         |              |            |     |
|        | 10.0       | 50.1 | 10.3 | 12.3    | 18.9         |              |            |     |
| 12.5 M | 10.3       | 50.0 | 10.7 | 12.8    | 18.4         | 19.4         | 0.5        | 1.0 |
|        | 10.4       | 50.1 | 10.6 | 13.0    | 19.9         |              |            |     |
|        | 10.1       | 50.0 | 10.4 | 12.8    | 19.8         |              |            |     |
| 15 M   | 10.0       | 50.1 | 10.7 | 12.8    | 23.6         | 23.7         | 0.9        | 0.8 |
|        | 10.5       | 50.1 | 10.5 | 13.0    | 22.9         |              |            |     |
|        | 10.1       | 50.0 | 10.6 | 12.8    | 24.7         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-16** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(กก.) | กำลังดัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|--------|------------|------|------|------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|        | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                  |                          |                           | +          | -   |
| 8 M    | 10.2       | 50.0 | 10.5 | 12.9             | 30.4                     | 30.5                      | 1.4        | 1.4 |
|        | 10.1       | 50.0 | 10.5 | 12.5             | 29.1                     |                           |            |     |
|        | 10.0       | 50.0 | 10.4 | 12.4             | 32.0                     |                           |            |     |
| 10 M   | 9.9        | 50.1 | 10.1 | 12.4             | 39.9                     | 42.7                      | 3.6        | 2.8 |
|        | 10.3       | 50.1 | 10.1 | 12.5             | 41.9                     |                           |            |     |
|        | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.2             | 46.3                     |                           |            |     |
| 12.5 M | 10.5       | 50.0 | 10.4 | 12.9             | 42.0                     | 39.2                      | 0.4        | 3.2 |
|        | 10.3       | 50.0 | 10.6 | 13.2             | 39.5                     |                           |            |     |
|        | 10.2       | 50.0 | 10.3 | 12.8             | 36.0                     |                           |            |     |
| 15 M   | 10.3       | 50.1 | 10.5 | 13.1             | 32.5                     | 36.1                      | 3.1        | 3.6 |
|        | 10.6       | 50.0 | 10.6 | 12.8             | 39.2                     |                           |            |     |
|        | 10.3       | 50.0 | 10.5 | 13.0             | 36.6                     |                           |            |     |

**ตารางที่ ค-17** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก<br>(กก.) | กำลังอัด<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่าเฉลี่ย<br>(กก./ตร.ซม.) | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  |                  |                          |                           | +          | -   |
| 25   | 10.0       | 50.2 | 10.4 | 12.3             | 14.9                     | 15.2                      | 0.8        | 0.5 |
|      | 10.0       | 50.1 | 10.4 | 12.3             | 14.8                     |                           |            |     |
|      | 10.0       | 50.1 | 10.3 | 12.3             | 16.1                     |                           |            |     |
| 40   | 10.2       | 50.0 | 10.8 | 13.1             | 15.5                     | 15.1                      | 0.4        | 0.4 |
|      | 10.5       | 50.1 | 10.6 | 13.1             | 14.7                     |                           |            |     |
|      | 10.4       | 50.1 | 10.5 | 13.0             | 15.2                     |                           |            |     |

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 60   | 10.5       | 50.1 | 10.4 | 13.1    | 34.6         | 37.8         | 2.4        | 3.1 |
|      | 10.5       | 50.3 | 10.5 | 12.9    | 40.2         |              |            |     |
|      | 10.4       | 50.2 | 10.3 | 13.2    | 38.5         |              |            |     |
| 80   | 10.6       | 50.1 | 10.5 | 13.0    | 25.4         | 26.4         | 1.6        | 1.0 |
|      | 10.7       | 50.2 | 10.3 | 13.0    | 28.0         |              |            |     |
|      | 10.4       | 50.0 | 10.4 | 12.8    | 25.8         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-18** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 25   | 9.9        | 50.1 | 10.1 | 12.4    | 39.9         | 42.7         | 3.6        | 2.8 |
|      | 10.3       | 50.1 | 10.1 | 12.5    | 41.9         |              |            |     |
|      | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.2    | 46.3         |              |            |     |
| 40   | 10.6       | 50.0 | 10.5 | 13.2    | 31.0         | 31.1         | 0.1        | 0.1 |
|      | 10.2       | 50.2 | 10.6 | 12.9    | 31.1         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.1 | 10.3 | 13.1    | 31.2         |              |            |     |
| 60   | 10.5       | 50.0 | 10.7 | 13.1    | 34.1         | 34.1         | 2.8        | 2.8 |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.5 | 12.9    | 36.9         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.6 | 13.0    | 31.3         |              |            |     |
| 80   | 10.3       | 50.0 | 10.2 | 12.6    | 26.2         | 23.7         | 3.4        | 5.9 |
|      | 10.6       | 50.0 | 10.1 | 12.7    | 17.8         |              |            |     |
|      | 10.2       | 50.1 | 10.1 | 12.9    | 27.1         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-19** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังอัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 1    | 10.5       | 50.2 | 10.5 | 13.4    | 15.4         | 16.9         | 2.1        | 1.5 |
|      | 10.1       | 50.1 | 10.9 | 13.4    | 16.4         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.1 | 10.7 | 13.3    | 19.0         |              |            |     |
| 3    | 10.6       | 50.0 | 10.4 | 13.3    | 17.2         | 18.4         | 1.5        | 1.3 |
|      | 10.3       | 50.1 | 10.7 | 13.2    | 19.9         |              |            |     |
|      | 10.7       | 50.1 | 10.6 | 13.6    | 18.3         |              |            |     |
| 6    | 10.8       | 50.0 | 10.5 | 13.4    | 15.8         | 15.9         | 0.5        | 0.4 |
|      | 10.7       | 50.0 | 10.4 | 13.3    | 16.4         |              |            |     |
|      | 10.8       | 50.0 | 10.3 | 13.2    | 15.4         |              |            |     |
| 12   | 10.7       | 50.0 | 10.6 | 13.4    | 16.5         | 15.7         | 0.7        | 0.5 |
|      | 11.0       | 50.0 | 10.5 | 13.3    | 15.5         |              |            |     |
|      | 11.1       | 50.0 | 10.3 | 13.2    | 15.2         |              |            |     |
| 24   | 10.2       | 50.0 | 10.8 | 13.1    | 15.5         | 15.1         | 0.4        | 0.4 |
|      | 10.5       | 50.1 | 10.6 | 13.1    | 14.7         |              |            |     |
|      | 10.4       | 50.1 | 10.5 | 13.0    | 15.2         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-20** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังดัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 1    | 10.5       | 50.0 | 10.7 | 11.4    | 36.9         | 33.8         | 3.1        | 3.2 |
|      | 10.2       | 50.0 | 10.6 | 13.1    | 30.6         |              |            |     |
|      | 10.3       | 50.0 | 10.4 | 13.2    | 33.9         |              |            |     |

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังตัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 3    | 10.5       | 50.0 | 10.5 | 13.4    | 40.1         | 32.6         | 7.5        | 5.3 |
|      | 10.4       | 50.0 | 10.8 | 13.3    | 30.3         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.6 | 13.0    | 27.3         |              |            |     |
| 6    | 10.9       | 50.0 | 10.6 | 13.6    | 27.9         | 32.5         | 4.2        | 4.6 |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.6 | 13.4    | 36.7         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.4 | 13.3    | 32.9         |              |            |     |
| 12   | 10.5       | 50.0 | 10.8 | 13.4    | 28.8         | 32.4         | 2.8        | 3.6 |
|      | 10.3       | 50.0 | 10.6 | 13.2    | 35.2         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.4 | 12.5    | 33.1         |              |            |     |
| 24   | 10.6       | 50.0 | 10.5 | 13.2    | 31.0         | 31.1         | 0.1        | 0.1 |
|      | 10.2       | 50.2 | 10.6 | 12.9    | 31.1         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.1 | 10.3 | 13.1    | 31.2         |              |            |     |

ตารางที่ ค-21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังตัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 1    | 10.6       | 50.0 | 10.7 | 13.2    | 15.6         | 16.8         | 1.6        | 1.2 |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.7 | 13.5    | 18.4         |              |            |     |
|      | 10.3       | 50.0 | 10.3 | 13.3    | 16.4         |              |            |     |
| 3    | 10.3       | 50.0 | 10.4 | 13.0    | 19.4         | 19.7         | 0.5        | 0.3 |
|      | 10.6       | 50.0 | 10.3 | 13.3    | 20.2         |              |            |     |
|      | 10.2       | 50.0 | 11.0 | 14.0    | 19.6         |              |            |     |
| 6    | 10.5       | 50.0 | 10.5 | 13.0    | 18.4         | 19.1         | 1.3        | 0.7 |
|      | 10.6       | 50.0 | 10.3 | 13.2    | 20.4         |              |            |     |
|      | 10.7       | 50.0 | 10.3 | 13.2    | 18.4         |              |            |     |

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังตัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 12   | 10.4       | 50.0 | 10.5 | 13.1    | 20.9         | 21.8         | 1.7        | 0.9 |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.3 | 13.2    | 23.5         |              |            |     |
|      | 10.3       | 50.0 | 10.7 | 13.3    | 21.0         |              |            |     |
| 24   | 10.5       | 50.1 | 10.4 | 13.1    | 34.6         | 37.8         | 2.4        | 3.1 |
|      | 10.5       | 50.3 | 10.5 | 12.9    | 40.2         |              |            |     |
|      | 10.4       | 50.2 | 10.3 | 13.2    | 38.5         |              |            |     |

**ตารางที่ ค-22** ผลการทดสอบกำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม(บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังตัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|      | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 1    | 10.4       | 50.1 | 10.5 | 13.1    | 34.0         | 33.9         | 0.1        | 0.1 |
|      | 10.4       | 50.0 | 10.5 | 12.9    | 33.9         |              |            |     |
|      | 10.3       | 50.1 | 10.6 | 13.0    | 33.8         |              |            |     |
| 3    | 10.4       | 50.1 | 10.6 | 13.2    | 36.9         | 36.6         | 0.3        | 0.3 |
|      | 10.2       | 50.1 | 10.7 | 13.0    | 36.3         |              |            |     |
|      | 10.6       | 50.1 | 10.6 | 13.4    | 36.6         |              |            |     |
| 6    | 10.6       | 50.1 | 10.6 | 13.3    | 34.6         | 36.4         | 2.1        | 1.9 |
|      | 10.4       | 50.0 | 10.5 | 13.2    | 38.5         |              |            |     |
|      | 10.2       | 50.0 | 10.7 | 13.1    | 36.3         |              |            |     |
| 12   | 10.2       | 50.0 | 10.7 | 12.9    | 35.1         | 35.6         | 0.8        | 0.5 |
|      | 10.3       | 50.0 | 10.6 | 13.1    | 35.3         |              |            |     |
|      | 10.1       | 50.0 | 10.6 | 12.8    | 36.4         |              |            |     |
| 24   | 10.5       | 50.0 | 10.7 | 13.1    | 34.1         | 34.12        | 2.8        | 2.8 |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.5 | 12.9    | 36.9         |              |            |     |
|      | 10.5       | 50.0 | 10.6 | 13.0    | 31.3         |              |            |     |

ตารางที่ ค-23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยาฟาราต่อถั่วลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังดัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|----------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|          | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 0        | 10.2       | 50.2 | 10.1 | 12.4    | 24.8         | 25.2         | 0.7        | 0.4 |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.5    | 25.9         |              |            |     |
|          | 10.1       | 50.1 | 10.2 | 12.4    | 25.0         |              |            |     |
| 0.5      | 10.1       | 50.1 | 10.1 | 12.4    | 20.7         | 22.4         | 2.1        | 1.7 |
|          | 10.2       | 49.0 | 10.2 | 12.6    | 22.1         |              |            |     |
|          | 10.2       | 50.1 | 10.1 | 12.5    | 24.5         |              |            |     |
| 1.0      | 10.0       | 50.2 | 10.4 | 12.3    | 14.9         | 17.1         | 1.8        | 2.2 |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.4 | 12.3    | 17.6         |              |            |     |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.3 | 12.3    | 18.9         |              |            |     |
| 1.5      | 10.4       | 50.2 | 10.3 | 12.9    | 14.4         | 13.5         | 0.9        | 1.7 |
|          | 10.2       | 50.2 | 10.3 | 12.5    | 14.2         |              |            |     |
|          | 10.2       | 50.1 | 10.3 | 12.4    | 11.8         |              |            |     |
| 2.5      | 10.2       | 50.1 | 10.3 | 12.5    | 9.8          | 12.0         | 3.0        | 2.3 |
|          | 10.2       | 50.2 | 10.3 | 12.4    | 11.3         |              |            |     |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.2    | 15.0         |              |            |     |
| 5.0      | 10.3       | 50.1 | 10.3 | 12.6    | 12.6         | 14.4         | 1.2        | 1.8 |
|          | 10.2       | 50.1 | 10.4 | 12.6    | 15.0         |              |            |     |
|          | 10.3       | 50.1 | 10.1 | 12.2    | 15.7         |              |            |     |

ตารางที่ ค-24 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อ  
เปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อแฉะลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) Liquid/Ash 0.62,  
Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | ขนาด (ซม.) |      |      | น้ำหนัก | กำลังดัด     | ค่าเฉลี่ย    | ค่ามาตรฐาน |     |
|----------|------------|------|------|---------|--------------|--------------|------------|-----|
|          | กว้าง      | ยาว  | สูง  | (กก.)   | (กก./ตร.ซม.) | (กก./ตร.ซม.) | +          | -   |
| 0        | 9.9        | 50.1 | 11.0 | 12.2    | 39.6         | 36.5         | 4.1        | 7.3 |
|          | 10.0       | 50.1 | 12.5 | 12.5    | 29.2         |              |            |     |
|          | 10.0       | 50.1 | 11.1 | 12.4    | 40.6         |              |            |     |
| 0.5      | 10.1       | 50.0 | 10.2 | 12.3    | 41.1         | 40.8         | 0.8        | 1.1 |
|          | 10.3       | 50.0 | 10.1 | 12.5    | 39.8         |              |            |     |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.2    | 41.6         |              |            |     |
| 1.0      | 9.9        | 50.1 | 10.1 | 12.4    | 39.9         | 42.7         | 3.6        | 0.8 |
|          | 10.3       | 50.1 | 10.1 | 12.5    | 41.9         |              |            |     |
|          | 10.0       | 50.1 | 10.2 | 12.2    | 46.3         |              |            |     |
| 1.5      | 10.0       | 50.2 | 10.3 | 12.3    | 45.9         | 42.6         | 3.4        | 1.6 |
|          | 10.2       | 50.2 | 10.4 | 12.8    | 41.0         |              |            |     |
|          | 10.1       | 50.2 | 10.2 | 12.4    | 40.8         |              |            |     |
| 2.5      | 10.2       | 50.1 | 10.2 | 12.4    | 35.8         | 37.8         | 4.7        | 2.7 |
|          | 10.0       | 50.3 | 10.3 | 12.2    | 42.5         |              |            |     |
|          | 10.4       | 50.2 | 10.4 | 12.7    | 35.1         |              |            |     |
| 5.0      | 10.3       | 50.3 | 10.3 | 12.5    | 37.6         | 36.0         | 1.6        | 2.6 |
|          | 10.3       | 50.3 | 10.4 | 12.7    | 33.4         |              |            |     |
|          | 10.3       | 50.2 | 10.3 | 12.5    | 37.0         |              |            |     |

ตารางที่ ค-25 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 0.60  | 2436.40              | 2424.30              | 0.497                 | 0.62      | 0.2        | 0.1 |
|       | 2424.30              | 2403.30              | 0.866                 |           |            |     |
|       | 2403.30              | 2391.00              | 0.512                 |           |            |     |
| 0.62  | 2436.70              | 2425.70              | 0.451                 | 0.45      | 0.1        | 0.1 |
|       | 2425.70              | 2413.30              | 0.511                 |           |            |     |
|       | 2413.30              | 2404.10              | 0.381                 |           |            |     |
| 0.64  | 2436.90              | 2425.50              | 0.468                 | 0.44      | 0.0        | 0.1 |
|       | 2425.50              | 2414.00              | 0.474                 |           |            |     |
|       | 2414.00              | 2404.80              | 0.381                 |           |            |     |
| 0.66  | 2433.20              | 2419.50              | 0.563                 | 0.43      | 0.1        | 0.1 |
|       | 2419.50              | 2410.30              | 0.380                 |           |            |     |
|       | 2410.30              | 2402.00              | 0.344                 |           |            |     |

ตารางที่ ค-26 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) NaOH con. 10 M, Ns/NaOH 0.67, Rubber 0%

| L/ash | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 0.60  | 2432.29              | 2429.51              | 0.114                 | 0.14      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2429.51              | 2426.03              | 0.143                 |           |            |     |
|       | 2426.03              | 2422.26              | 0.155                 |           |            |     |
| 0.62  | 2434.45              | 2430.82              | 0.149                 | 0.15      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2430.82              | 2427.96              | 0.118                 |           |            |     |
|       | 2427.96              | 2423.69              | 0.176                 |           |            |     |

| L/ash | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 0.64  | 2433.68              | 2431.11              | 0.106                 | 0.10      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2431.11              | 2429.02              | 0.086                 |           |            |     |
|       | 2429.02              | 2426.58              | 0.100                 |           |            |     |
| 0.66  | 2409.97              | 2406.04              | 0.163                 | 0.14      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2406.04              | 2403.01              | 0.126                 |           |            |     |
|       | 2403.01              | 2399.83              | 0.132                 |           |            |     |

ตารางที่ ค-27 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|        | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 8 M    | 2396.80              | 2385.60              | 0.467                 | 0.38      | 0.1        | 0.1 |
|        | 2385.60              | 2376.30              | 0.390                 |           |            |     |
|        | 2376.30              | 2369.40              | 0.290                 |           |            |     |
| 10 M   | 2448.80              | 2437.60              | 0.457                 | 0.50      | 0.1        | 0.0 |
|        | 2437.60              | 2425.50              | 0.496                 |           |            |     |
|        | 2425.50              | 2412.00              | 0.557                 |           |            |     |
| 12.5 M | 2425.70              | 2413.00              | 0.524                 | 0.45      | 0.1        | 0.1 |
|        | 2413.00              | 2403.70              | 0.385                 |           |            |     |
|        | 2403.70              | 2392.80              | 0.453                 |           |            |     |
| 15 M   | 2412.70              | 2403.10              | 0.398                 | 0.39      | 0.0        | 0.0 |
|        | 2403.10              | 2394.20              | 0.370                 |           |            |     |
|        | 2394.20              | 2384.30              | 0.413                 |           |            |     |

ตารางที่ ค-28 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%

| NaOH.  | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|        | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 8 M    | 2376.30              | 2366.30              | 0.421                 | 0.34      | 0.1        | 0.1 |
|        | 2366.30              | 2361.28              | 0.212                 |           |            |     |
|        | 2361.28              | 2352.00              | 0.393                 |           |            |     |
| 10 M   | 2402.19              | 2399.32              | 0.119                 | 0.12      | 0.0        | 0.0 |
|        | 2399.32              | 2396.84              | 0.103                 |           |            |     |
|        | 2396.84              | 2393.69              | 0.131                 |           |            |     |
| 12.5 M | 2389.19              | 2385.77              | 0.143                 | 0.12      | 0.0        | 0.0 |
|        | 2385.77              | 2383.06              | 0.114                 |           |            |     |
|        | 2383.06              | 2380.83              | 0.094                 |           |            |     |
| 15 M   | 2415.94              | 2413.26              | 0.111                 | 0.10      | 0.0        | 0.0 |
|        | 2413.26              | 2411.28              | 0.082                 |           |            |     |
|        | 2411.28              | 2408.63              | 0.110                 |           |            |     |

ตารางที่ ค-29 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 25    | 2448.80              | 2437.60              | 0.457                 | 0.50      | 0.1        | 0.0 |
|       | 2437.60              | 2425.50              | 0.496                 |           |            |     |
|       | 2425.50              | 2412.00              | 0.557                 |           |            |     |
| 40    | 2413.50              | 2403.10              | 0.431                 | 0.37      | 0.1        | 0.1 |
|       | 2403.10              | 2395.80              | 0.304                 |           |            |     |
|       | 2395.80              | 2386.60              | 0.384                 |           |            |     |

| Temp. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 60    | 2401.30              | 2396.3               | 0.208                 | 0.21      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2396.30              | 2391.3               | 0.209                 |           |            |     |
|       | 2391.30              | 2386.3               | 0.209                 |           |            |     |
| 80    | 2385.50              | 2375.2               | 0.432                 | 0.48      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2374.90              | 2363.3               | 0.488                 |           |            |     |
|       | 2363.30              | 2351.1               | 0.516                 |           |            |     |

ตารางที่ ค-30 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มนาน 24 ชั่วโมง Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Temp. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |     |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -   |
| 25    | 2402.19              | 2399.32              | 0.119                 | 0.12      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2399.32              | 2396.84              | 0.103                 |           |            |     |
|       | 2396.84              | 2393.69              | 0.131                 |           |            |     |
| 40    | 2386.29              | 2383.72              | 0.108                 | 0.12      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2383.72              | 2380.49              | 0.136                 |           |            |     |
|       | 2380.49              | 2377.85              | 0.111                 |           |            |     |
| 60    | 2443.88              | 2441.40              | 0.101                 | 0.13      | 0.0        | 0.0 |
|       | 2441.40              | 2437.33              | 0.167                 |           |            |     |
|       | 2431.88              | 2428.63              | 0.134                 |           |            |     |
| 80    | 2404.88              | 2394.55              | 0.430                 | 0.33      | 0.1        | 0.1 |
|       | 2391.05              | 2386.17              | 0.204                 |           |            |     |
|       | 2386.17              | 2378.00              | 0.342                 |           |            |     |

**ตารางที่ ค-31** ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -    |
| 1     | 2422.28              | 2412.89              | 0.388                 | 0.35      | 0.03       | 0.03 |
|       | 2412.89              | 2405.16              | 0.320                 |           |            |      |
|       | 2405.16              | 2396.74              | 0.350                 |           |            |      |
| 3     | 2418.79              | 2409.05              | 0.403                 | 0.37      | 0.04       | 0.03 |
|       | 2409.05              | 2401.05              | 0.332                 |           |            |      |
|       | 2401.05              | 2392.40              | 0.360                 |           |            |      |
| 6     | 2422.39              | 2412.86              | 0.393                 | 0.42      | 0.06       | 0.03 |
|       | 2412.86              | 2401.37              | 0.476                 |           |            |      |
|       | 2401.37              | 2392.05              | 0.388                 |           |            |      |
| 12    | 2431.45              | 2421.07              | 0.427                 | 0.38      | 0.04       | 0.04 |
|       | 2421.07              | 2412.00              | 0.375                 |           |            |      |
|       | 2412.00              | 2403.62              | 0.347                 |           |            |      |
| 24    | 2413.50              | 2403.10              | 0.431                 | 0.37      | 0.06       | 0.07 |
|       | 2403.10              | 2395.80              | 0.304                 |           |            |      |
|       | 2395.80              | 2386.60              | 0.384                 |           |            |      |

ตารางที่ ค-32 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -    |
| 1     | 2417.65              | 2414.67              | 0.123                 | 0.11      | 0.02       | 0.02 |
|       | 2414.67              | 2412.65              | 0.084                 |           |            |      |
|       | 2412.65              | 2410.03              | 0.109                 |           |            |      |
| 3     | 2414.41              | 2412.75              | 0.069                 | 0.11      | 0.04       | 0.04 |
|       | 2412.75              | 2409.14              | 0.150                 |           |            |      |
|       | 2409.14              | 2406.62              | 0.105                 |           |            |      |
| 6     | 2418.03              | 2416.13              | 0.079                 | 0.08      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2416.13              | 2414.46              | 0.069                 |           |            |      |
|       | 2414.46              | 2412.21              | 0.093                 |           |            |      |
| 12    | 2410.77              | 2407.49              | 0.136                 | 0.10      | 0.03       | 0.02 |
|       | 2407.49              | 2405.48              | 0.083                 |           |            |      |
|       | 2405.48              | 2403.19              | 0.095                 |           |            |      |
| 24    | 2386.29              | 2383.72              | 0.108                 | 0.12      | 0.02       | 0.01 |
|       | 2383.72              | 2380.49              | 0.136                 |           |            |      |
|       | 2380.49              | 2377.85              | 0.111                 |           |            |      |

ตารางที่ ค-33 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม (บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -    |
| 1     | 2393.26              | 2389.40              | 0.161                 | 0.18      | 0.02       | 0.02 |
|       | 2389.40              | 2385.26              | 0.173                 |           |            |      |
|       | 2385.26              | 2380.57              | 0.197                 |           |            |      |
| 3     | 2381.73              | 2377.71              | 0.169                 | 0.18      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2377.71              | 2373.18              | 0.191                 |           |            |      |
|       | 2373.18              | 2368.93              | 0.179                 |           |            |      |
| 6     | 2398.54              | 2396.09              | 0.102                 | 0.13      | 0.02       | 0.03 |
|       | 2396.09              | 2392.57              | 0.147                 |           |            |      |
|       | 2392.57              | 2388.94              | 0.152                 |           |            |      |
| 12    | 2420.16              | 2417.21              | 0.122                 | 0.12      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2417.21              | 2413.87              | 0.138                 |           |            |      |
|       | 2413.87              | 2411.14              | 0.113                 |           |            |      |
| 24    | 2401.30              | 2396.30              | 0.208                 | 0.21      | 0.00       | 0.03 |
|       | 2396.30              | 2391.30              | 0.209                 |           |            |      |
|       | 2391.30              | 2386.30              | 0.209                 |           |            |      |

ตารางที่ ค-34 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม(บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)Liquid/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, Rubber 1%, NaOH Con. 10 M

| Time. | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ | การสูญเสีย<br>น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------|
|       | (ก.)                 | (ก.)                 | (%)                   | (%)       | +          | -    |
| 1     | 2404.73              | 2401.79              | 0.122                 | 0.12      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2401.79              | 2399.05              | 0.114                 |           |            |      |
|       | 2399.05              | 2395.95              | 0.129                 |           |            |      |
| 3     | 2368.98              | 2365.19              | 0.160                 | 0.15      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2365.19              | 2361.88              | 0.140                 |           |            |      |
|       | 2361.88              | 2358.58              | 0.140                 |           |            |      |
| 6     | 2371.53              | 2368.92              | 0.110                 | 0.10      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2368.92              | 2366.82              | 0.089                 |           |            |      |
|       | 2366.82              | 2364.60              | 0.094                 |           |            |      |
| 12    | 2389.79              | 2387.96              | 0.077                 | 0.08      | 0.01       | 0.01 |
|       | 2387.96              | 2385.88              | 0.087                 |           |            |      |
|       | 2385.88              | 2383.78              | 0.088                 |           |            |      |
| 24    | 2443.88              | 2441.40              | 0.101                 | 0.13      | 0.03       | 0.03 |
|       | 2441.40              | 2437.33              | 0.167                 |           |            |      |
|       | 2431.88              | 2428.63              | 0.134                 |           |            |      |

ตารางที่ ค-35 ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อแกลลวย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | น้ำหนักก่อนทดสอบ | น้ำหนักหลังทดสอบ | การสูญเสีย น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|----------|------------------|------------------|--------------------|-----------|------------|------|
|          | (ก.)             | (ก.)             | (%)                | (%)       | +          | -    |
| 0.0      | 2427.50          | 2415.80          | 0.482              | 0.50      | 0.01       | 0.02 |
|          | 2415.80          | 2403.30          | 0.517              |           |            |      |
|          | 2403.30          | 2391.00          | 0.512              |           |            |      |
| 0.5      | 2413.70          | 2400.10          | 0.563              | 0.52      | 0.04       | 0.04 |
|          | 2448.80          | 2437.10          | 0.478              |           |            |      |
|          | 2426.30          | 2413.70          | 0.519              |           |            |      |
| 1.0      | 2448.80          | 2437.60          | 0.457              | 0.50      | 0.05       | 0.05 |
|          | 2437.60          | 2425.50          | 0.496              |           |            |      |
|          | 2425.50          | 2412.00          | 0.557              |           |            |      |
| 1.5      | 2433.40          | 2422.80          | 0.486              | 0.52      | 0.07       | 0.04 |
|          | 2422.80          | 2411.30          | 0.475              |           |            |      |
|          | 2411.30          | 2397.00          | 0.593              |           |            |      |
| 2.5      | 2427.60          | 2413.90          | 0.564              | 0.56      | 0.00       | 0.00 |
|          | 2413.90          | 2400.40          | 0.559              |           |            |      |
|          | 2400.40          | 2386.80          | 0.567              |           |            |      |
| 5.0      | 2401.30          | 2387.90          | 0.558              | 0.56      | 0.03       | 0.00 |
|          | 2387.90          | 2374.00          | 0.582              |           |            |      |
|          | 2374.00          | 2360.00          | 0.590              |           |            |      |

**ตารางที่ ค-36** ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำยางพาราต่อแกลลวย (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) L/Ash 0.62, Ns/NaOH 0.67, NaOH Con. 10 M

| % Rubber | น้ำหนักก่อนทดสอบ | น้ำหนักหลังทดสอบ | การสูญเสีย น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย | ค่ามาตรฐาน |      |
|----------|------------------|------------------|--------------------|-----------|------------|------|
|          | (ก.)             | (ก.)             | (%)                | (%)       | +          | -    |
| 0.0      | 2428.77          | 2425.59          | 0.131              | 0.18      | 0.01       | 0.05 |
|          | 2425.59          | 2421.52          | 0.168              |           |            |      |
|          | 2421.52          | 2416.91          | 0.190              |           |            |      |
| 0.5      | 2413.57          | 2410.55          | 0.125              | 0.11      | 0.01       | 0.02 |
|          | 2410.55          | 2407.95          | 0.108              |           |            |      |
|          | 2407.95          | 2405.72          | 0.093              |           |            |      |
| 1.0      | 2402.19          | 2399.32          | 0.119              | 0.12      | 0.01       | 0.01 |
|          | 2399.32          | 2396.84          | 0.103              |           |            |      |
|          | 2396.84          | 2393.69          | 0.131              |           |            |      |
| 1.5      | 2389.55          | 2386.42          | 0.131              | 0.14      | 0.00       | 0.01 |
|          | 2386.42          | 2383.16          | 0.137              |           |            |      |
|          | 2383.16          | 2379.69          | 0.146              |           |            |      |
| 2.5      | 2402.82          | 2399.44          | 0.141              | 0.14      | 0.01       | 0.02 |
|          | 2399.44          | 2396.50          | 0.123              |           |            |      |
|          | 2396.50          | 2392.73          | 0.157              |           |            |      |
| 5.0      | 2376.45          | 2372.18          | 0.180              | 0.18      | 0.00       | 0.01 |
|          | 2372.18          | 2368.27          | 0.165              |           |            |      |
|          | 2368.27          | 2363.82          | 0.188              |           |            |      |

ตารางที่ ค-37 สรุปผลการทดลอง

|          | ก่อดั้วต้น<br>นาที่ | ก่อดั้วปลาย<br>นาที่ | กำลังรับแรงอัด<br>กก./ตร.ซม. |            | กำลังรับแรงดัด<br>กก./ตร.ซม. |           | การต้านทานการขีดสี<br>(%) |       |
|----------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------|------------------------------|-----------|---------------------------|-------|
|          |                     |                      | 7วัน                         | 28วัน      | 7วัน                         | 28วัน     | 7วัน                      | 28วัน |
| L/A0.60  | 140                 | 1020                 | 318                          | <b>524</b> | 30                           | 40        | 0.62                      | 0.14  |
| L/A0.62  | 110                 | 1045                 | 315                          | <b>502</b> | 25                           | 37        | 0.45                      | 0.15  |
| L/A0.64  | 120                 | 1092                 | 270                          | <b>481</b> | 30                           | 41        | 0.44                      | 0.1   |
| L/A0.66  | 80                  | 1275                 | 258                          | 271        | 26                           | 38        | 0.43                      | 0.14  |
| NH8      | 125                 | 1455                 | 287                          | <b>399</b> | 21                           | 31        | 0.38                      | 0.34  |
| NH10     | 110                 | 1045                 | 247                          | <b>445</b> | 19                           | <b>43</b> | 0.5                       | 0.12  |
| NH12.5   | 93                  | 692                  | 255                          | <b>458</b> | 19                           | 39        | 0.45                      | 0.12  |
| NH15     | 100                 | 745                  | 291                          | <b>466</b> | 24                           | 36        | 0.39                      | 0.1   |
| %R0.0    | 110                 | 1045                 | 347                          | <b>472</b> | 25                           | 37        | 0.5                       | 0.18  |
| %R0.5    | 90                  | 1030                 | 343                          | <b>484</b> | 22                           | 41        | 0.52                      | 0.11  |
| %R1.0    | 70                  | 950                  | 247                          | <b>445</b> | 17                           | <b>43</b> | 0.5                       | 0.12  |
| %R1.5    | 100                 | 620                  | 205                          | <b>421</b> | 14                           | <b>43</b> | 0.52                      | 0.14  |
| %R2.5    | 110                 | 540                  | 192                          | <b>382</b> | 12                           | 38        | 0.56                      | 0.14  |
| %R5.0    | 125                 | 455                  | 169                          | 312        | 14                           | 36        | 0.56                      | 0.18  |
| 25T      | -                   | -                    | 247                          | <b>445</b> | 15                           | <b>43</b> | 0.5                       | 0.12  |
| 40T      | -                   | -                    | 252                          | <b>399</b> | 15                           | 31        | 0.37                      | 0.12  |
| 60T      | -                   | -                    | 368                          | <b>391</b> | 38                           | 34        | 0.21                      | 0.13  |
| 80T      | -                   | -                    | 433                          | <b>446</b> | 16                           | 24        | 0.48                      | 0.33  |
| 1HR40T   | -                   | -                    | 234                          | <b>388</b> | 17                           | 34        | 0.35                      | 0.11  |
| 3HR40T   | -                   | -                    | 241                          | <b>409</b> | 18                           | 33        | 0.37                      | 0.11  |
| 6HR40T   | -                   | -                    | 251                          | <b>429</b> | 16                           | 33        | 0.42                      | 0.08  |
| 12HR40T  | -                   | -                    | 267                          | <b>429</b> | 16                           | 32        | 0.38                      | 0.1   |
| 24HR40T  | -                   | -                    | 251                          | <b>399</b> | 15                           | 31        | 0.37                      | 0.12  |
| 1HR60T   | -                   | -                    | 316                          | <b>393</b> | 17                           | 34        | 0.18                      | 0.12  |
| 3HR60T   | -                   | -                    | 331                          | <b>412</b> | 20                           | 37        | 0.18                      | 0.15  |
| 6HR60T   | -                   | -                    | 323                          | <b>446</b> | 19                           | 36        | 0.13                      | 0.1   |
| 12HR60T  | -                   | -                    | 357                          | <b>465</b> | 22                           | 36        | 0.12                      | 0.08  |
| 24HR60T  | -                   | -                    | 368                          | <b>391</b> | 38                           | 34        | 0.21                      | 0.13  |
| 0.33NSNH | 103                 | 1617                 | -                            | -          | -                            | -         | -                         | -     |
| 0.67NSNH | 110                 | 1045                 | -                            | -          | -                            | -         | -                         | -     |
| 1.00NSNH | 40                  | 260                  | -                            | -          | -                            | -         | -                         | -     |
| 1.50NSNH | 23                  | 107                  | -                            | -          | -                            | -         | -                         | -     |
| 3.00NSNH | 10                  | 13                   | -                            | -          | -                            | -         | -                         | -     |

หมายเหตุ ตัวเลขที่เป็นตัวหนา คือมีค่าสูงกว่า มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท กำหนดไว้

ภาคผนวก ง  
บทความสำหรับเผยแพร่

ปัจจัยในการบ่มที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

## Effect of Curing on Compressive Strength and Abrasion Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Mixed with Natural Rubber Latex

ชัยสิทธิ์ ทรัพย์สิน<sup>1</sup> (Chaiyasit Sapsin)<sup>1</sup>

Veasna Lam<sup>2</sup> (Veasna Lam)<sup>2</sup>

เจริญชัย ฤทธิรุทร<sup>3\*</sup> (Charoenchai Ridditirud)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น diwe23@hotmail.com

<sup>2</sup>นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น lamveasna@gmail.com

<sup>3\*</sup>อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น Charoenchai.ri@rmuti.ac.th

**บทคัดย่อ :** จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุที่ผลิตเพื่อทดแทนการใช้คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงาน และส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ จนกลายเป็นปัญหาที่ต้องเร่งแก้ไขโดยใช้วัสดุทดแทนให้มากขึ้น เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตปกติ และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ให้มีสมบัติที่ดี นอกจากนี้ ความทนทานต่อการนำไปใช้งานเป็นคุณสมบัติสำคัญ จำเป็นต้องศึกษาเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำน้ำยางพาราซึ่งมีคุณสมบัติด้านการยึดหยุ่นดี และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานลดการกระแทกได้ดีมาผสมกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ศึกษาปัจจัยในการบ่มที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด และการต้านทานต่อการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา

จากผลการศึกษาพบว่า การใช้อุณหภูมิห้องในการบ่มส่งผลต่อการพัฒนากำลังที่ดีในทางกลับกันการบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงเป็นการเร่งกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นให้สูงขึ้น แต่ลดอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัด และยังพบว่า การใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่มไม่เกิน 24 ชั่วโมงสามารถเร่งกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นให้สูงขึ้น และยังสามารถพัฒนากำลังต่อในช่วงอายุปลายได้สูงถึง 465 กก./ตร.ซม.

**ABSTRACT:** Geopolymer concrete is a new binder material which used to alternate ordinary Portland cement concrete. The Portland cement production uses natural resources as raw material and needed high energy to produce which affects the atmosphere. The mechanical properties of geopolymer composite had to improve by heat curing temperature with appropriate curing time, which was different to Portland cement concrete. In addition, durability of geopolymer composite also had to develop for many applications with high performances. Natural rubber latex is a material which is good for flexibility and high ability in energy absorption. This research aimed to study the effect of natural rubber latex on compressive strength and resistance to abrasion of fly ash based geopolymer concrete.

The result presented that, curing at room temperature had the significant enhanced compressive strength of geopolymer concrete. Conversely, at higher curing temperature, the compressive strength of geopolymer concrete improved higher at an early age but developed with a lower rate in the long term. Also, at curing temperature of 60°C with curing time no longer than 24 h, the compressive strength enhanced at early ages, and the specimens produced maximum compressive strength of 465 kg/cm<sup>2</sup> at standing time of 28 days.

**KEYWORDS:** Compressive strength, Abrasion, Geopolymer concrete, Rubber latex

## 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุพื้นฐานในอุตสาหกรรมก่อสร้างทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้ว และประเทศที่กำลังพัฒนา ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุหลักสำหรับเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมในเนื้อคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความแข็งแรง รับแรงอัดได้ และมีความทนทานต่อการสึกกร่อนจากการถูกใช้งาน เป็นผลให้มีการระเบิดภูเขาหรือชุดเหมืองหินปูนนำไปสู่การทำลายทรัพยากรทางธรรมชาติอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้วัสดุหลักในการผลิตคอนกรีตตามความต้องการ และการพัฒนาของประเทศ เนื่องจากการล้าสมัยวัสดุตั้งต้นในการผลิตมาย้อย บด และเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า 1,450-1,650 องศาเซลเซียส จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงตลอดกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้ 1 ตันเช่นกัน[1] เป็นหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ปัจจุบันมีการค้นคว้าหาวัสดุทางเลือกใหม่ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งช่วยลดการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้เทคนิคทางเศรษฐศาสตร์แบบใหม่ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงและนำไปสู่การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ และยั่งยืนมากขึ้น [2] โดยยุทธศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และเป็นที่ต้องการของทุกภาคอุตสาหกรรมคือการลดต้นทุนโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการใช้วัสดุรีไซเคิล หรือเศษวัสดุเหลือทิ้งมาทดแทนการใช้วัสดุจากธรรมชาติในงานโครงสร้างพื้นฐาน เช่นทางเท้า และเขื่อน [3] โดยใช้เศษเมลามีน[4] มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล [5, 6] กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และเถ้าลอย [7] และยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถใช้เถ้าลอยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามาสังเคราะห์เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับใช้งานคอนกรีตได้โดยอาศัยหลักการทำปฏิกิริยาอัลคาไล ผลิตเป็นคอนกรีตเรียกว่า "จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต" สำหรับใช้ในงานคอนกรีต และซ่อมแซมคอนกรีต เช่น การใช้จีโอโพลิเมอร์สำหรับซ่อมแซมลานจอดเครื่องบิน [8]

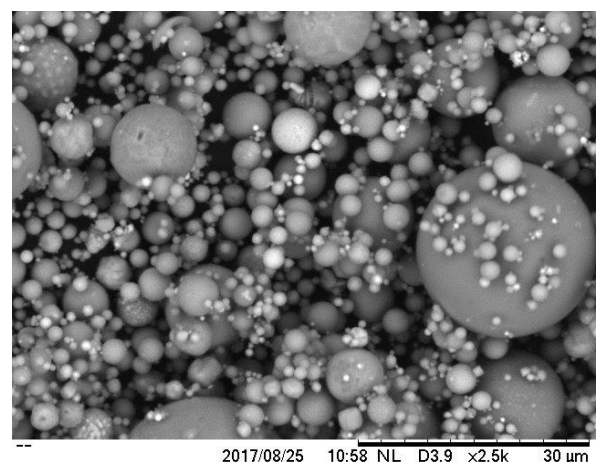
อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีข้อดี และข้อด้อยที่ต้องศึกษาและพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่นมีความแข็งแรง แต่เปราะ จากงานวิจัยของ [9] พบว่าการเพิ่มน้ำยาเข้าไปในระบบสามารถลดการดูดซึมน้ำ

น้ำในคอนกรีตได้ และพบว่าการแทนที่เศษยางรถยนต์เก่าในมวลรวมละเอียดส่งผลให้คอนกรีตมีความยืดหยุ่นดี สามารถยืดอายุการใช้งานของผิวทางคอนกรีตได้ [10] งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษา และพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยาพาราเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อหาสมบัติที่ดี และเหมาะสมการนำไปใช้งานในแต่ละประเภท งานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด และการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่เหมาะสม สำหรับการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประเภทของงานได้คอนกรีตที่มีความยืดหยุ่น มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

## 2. วิธีการทดสอบ

### 2.1 วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เถ้าลอยจากโรงผลิตพลังงานไฟฟ้าจากถ่านหินอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเป็นเถ้าลอยชนิด Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 และจากภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM.) แสดงให้เห็นเถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน [11] ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพขยายเถ้าลอย 3,000 เท่า ด้วยเครื่อง SEM.

เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ 2.42 มวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.12 มวลรวมหยาบหีน้อย เบอร์ 3/4 นิ้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.94 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.26 หน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นเท่ากับ 1,523

กก./ลบ.ม. ใช้สารละลายต่าง 2 ชนิด ชนิดแรกคือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) โดยมีองค์ประกอบดังนี้  $\text{Na}_2\text{O}$  8.9 %,  $\text{SiO}_2$  28.7 % และ  $\text{H}_2\text{O}$  62.5 % ชนิดที่สองคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เตรียมโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ดทำละลายด้วยน้ำให้ได้ความเข้มข้น 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ ทิ้งให้เย็น 24 ชั่วโมง ก่อนใช้งาน น้ำยารพาราที่ใช้เป็นน้ำยารพาราชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia, HA) ซึ่งมีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ

| องค์ประกอบเคมี          | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|-------------------------|------------------|
| CaO                     | 27.93            |
| $\text{SiO}_2$          | 25.22            |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 22.06            |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 10.21            |
| $\text{SO}_3$           | 7.64             |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 3.21             |
| MgO                     | 0.99             |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.71             |
| $\text{TiO}_2$          | 0.68             |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0.48             |
| MnO                     | 0.19             |

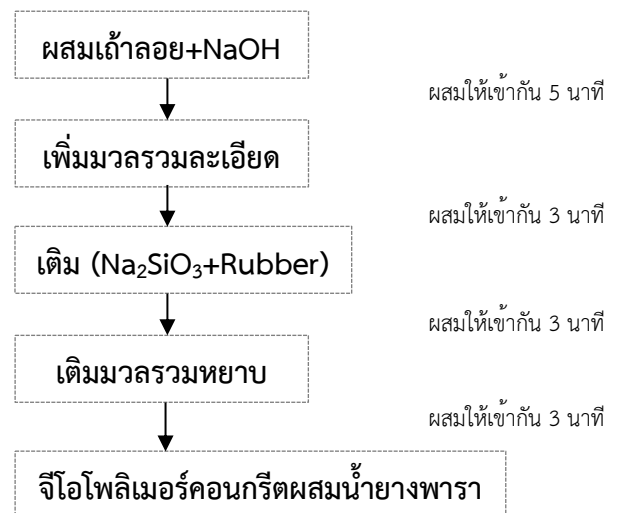
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำยารพารา

| Property                            | Value       |
|-------------------------------------|-------------|
| Total solid content                 | 62.05       |
| Dry rubber content                  | 60.35       |
| Non rubber content                  | 1.70        |
| pH                                  | 10.10       |
| Volatile fatty acid number (VFA)    | 0.041       |
| Mechanical stability time (sec)     | 685         |
| Ammonia content ( $\text{NH}_3\%$ ) | 0.50        |
| Color                               | Milky white |

## 2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างและสัดส่วนผสม

การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการชั่งน้ำหนักของวัสดุและสารละลายดังสัดส่วนดังต่อไปนี้ ใช้สารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60, 0.62, 0.64, และ 0.66 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เท่ากับ 0.67 การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2 เริ่มจากผสมเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 5 นาที ทั้งนี้เพื่อให้สารละลายต่างเข้มข้นสูงไปชะละลาย องค์ประกอบทางเคมีคือ อลูมินา และซิลิกาในเถ้าลอยให้ละลายออกมาเพื่อพร้อมทำปฏิกิริยาต่อไป หลังจากนั้นเติมมวลรวมละเอียด(ทรายหยาบ)ลงในเครื่องผสมแล้วผสมต่อไปอีก 3 นาที ให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ผสมกับน้ำยารพาราลงไปผสมอีก 3 นาที สุดท้ายเติมมวลรวมหยาบ (หิน 3/4 นิ้ว) ผสมอีก 3 นาที นำไปเข้าแบบหล่อเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด และการต้านทานการกัดสี ขนาด 100X100X100 มม. ตามมาตรฐาน BS 1881-116:1983 และ ASTM C944 ตามลำดับ ทิ้งในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงก่อน นำตัวอย่างเข้าบ่มด้วยอุณหภูมิ 25, 40, 60, และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม ดังนี้ 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อบ่มตัวอย่างได้ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำตัวอย่างเก็บไว้ที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เพื่อรอทดสอบกำลังรับแรงอัดและการต้านทานการกัดสี ที่อายุ 7 และ 28 วัน

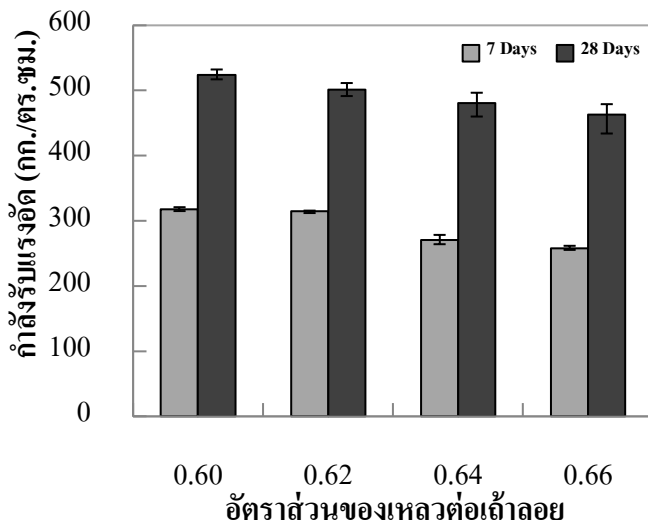


ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยารพารา

## 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

3.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยารพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

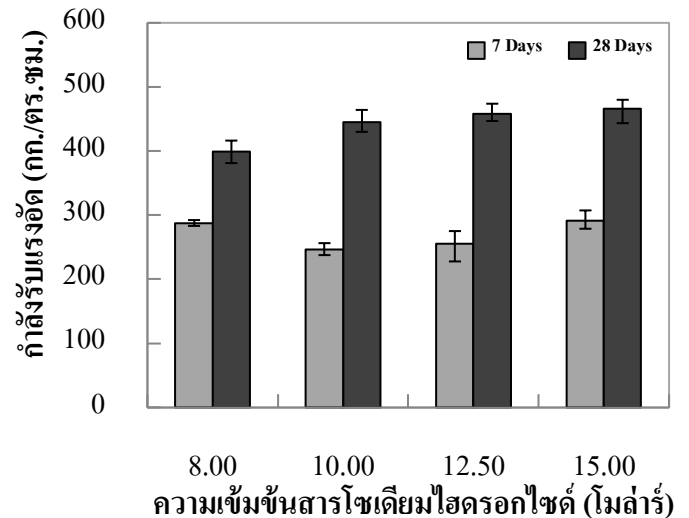
จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 3 พบว่า อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงที่สุดทุกช่วงอายุตัวอย่าง เมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงทุกช่วงอายุ และยังพบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.66 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำที่สุดทุกช่วงอายุ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [12, 13] ซึ่งแนวโน้มในการลดลงของกำลังรับแรงอัดคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป



ภาพที่ 3 กำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

3.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

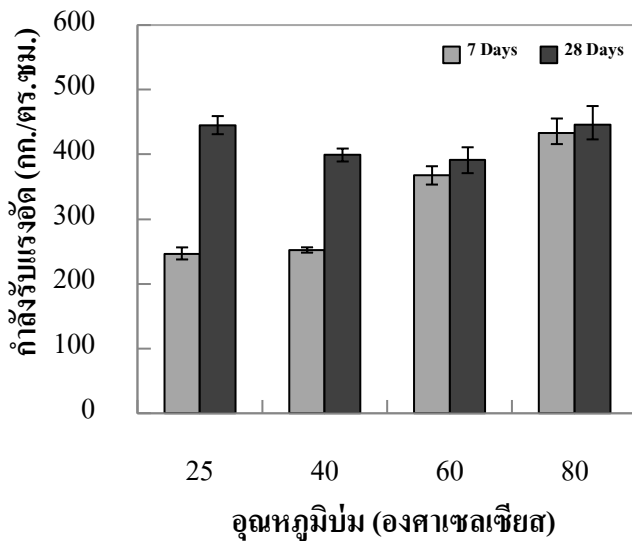
จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลายต่ำลง เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มเป็นการเร่งกระบวนการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นในช่วงอายุต้น และลดการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นอายุปลาย ส่งผลให้การพัฒนากำลังระหว่างช่วงอายุน้อยลง[17] ซึ่งแตกต่างจากการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราด้วยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงอายุต้น แต่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าผลการศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบความร้อนสูง [18]



ภาพที่ 4 กำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่มที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

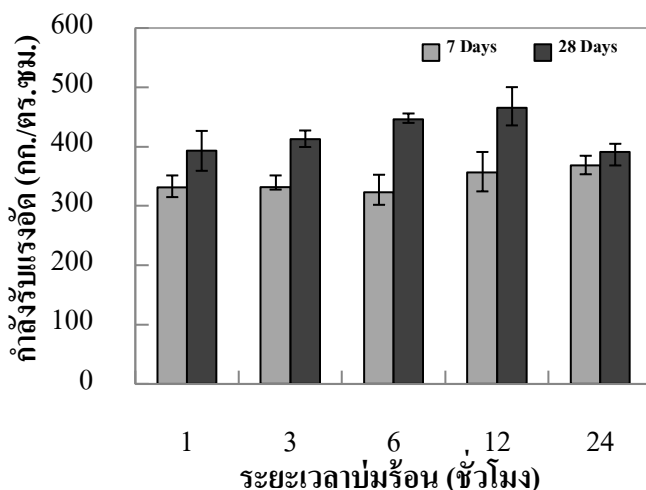
จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 5 พบว่าอุณหภูมิในการบ่มสามารถเร่งการทำปฏิกิริยา[16] ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงในช่วงอายุต้น แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลายต่ำลง เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มเป็นการเร่งกระบวนการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นในช่วงอายุต้น และลดการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นอายุปลาย ส่งผลให้การพัฒนากำลังระหว่างช่วงอายุน้อยลง[17] ซึ่งแตกต่างจากการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราด้วยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงอายุต้น แต่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าผลการศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบความร้อนสูง [18]



ภาพที่ 5 กำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่ม

3.4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

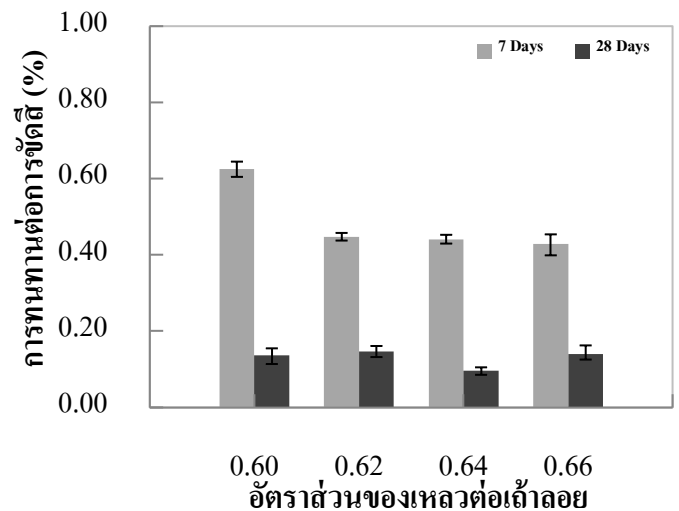
จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 6 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่า 300 กก./ตร.ซม.และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้นมากเกินไปส่งผลให้ตัวอย่างสูญเสียความชื้นในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันต้องมีความชื้นเพื่อที่จะพัฒนาความแข็งแรง[19]



ภาพที่ 6 กำลังรับแรงอัดกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม

3.5 การต้านทานการกัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยอายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 7 พบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยสูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียจากการถูกกัดสีลดลง เป็นผลที่เนื่องมาจากการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2/3 คือปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเป็นด่างสูงสามารถชะละลายแร่ซิลิกาและแร่ลูมินาในแก้วลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้มากกว่าจึงสามารถยึดเหนี่ยวเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราได้ดีกว่า[15]

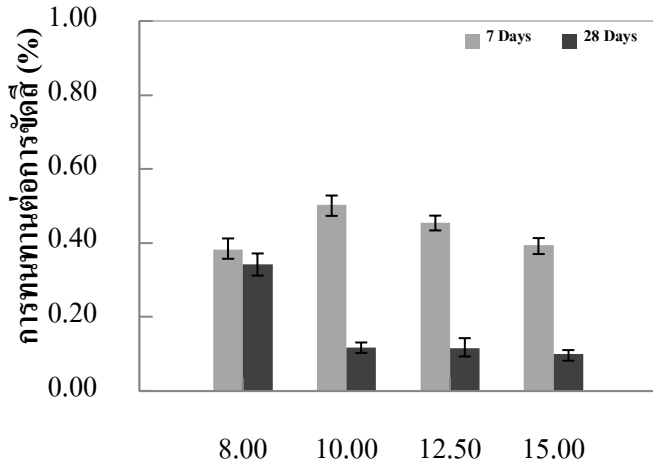


ภาพที่ 7 การต้านทานการกัดสีกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอย

3.6 การต้านทานการกัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบดังที่แสดงในภาพที่ 8 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ส่งผลให้การสูญเสียจากการกัดสีต่ำในอายุต้น และยังพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสูญเสียจากการกัดสีมากกว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 8 โมลาร์ มีแนวโน้มการสูญเสียจากการกัดสีต่ำลง และสูญเสียน้อยลงอย่างชัดเจนเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ซึ่งเป็นผลที่เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮ

ดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะละลายองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่องมากกว่าจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อตัวอย่างมีอายุเพิ่มขึ้น[15]

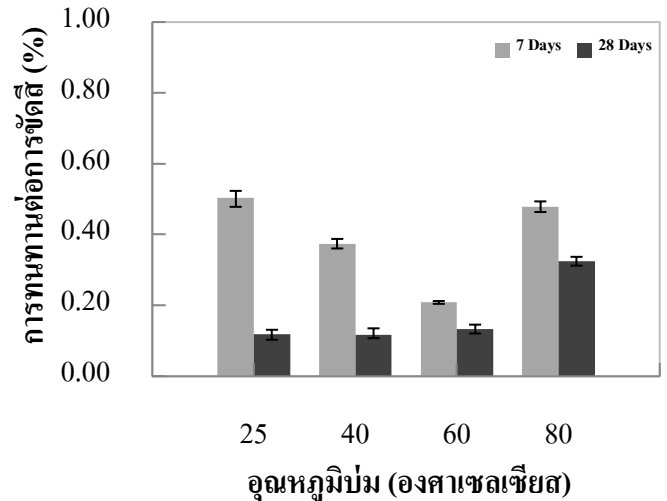


ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

ภาพที่ 8 การต้านทานการหดตัวกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่

3.7 การต้านทานการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการบ่มที่ 25, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

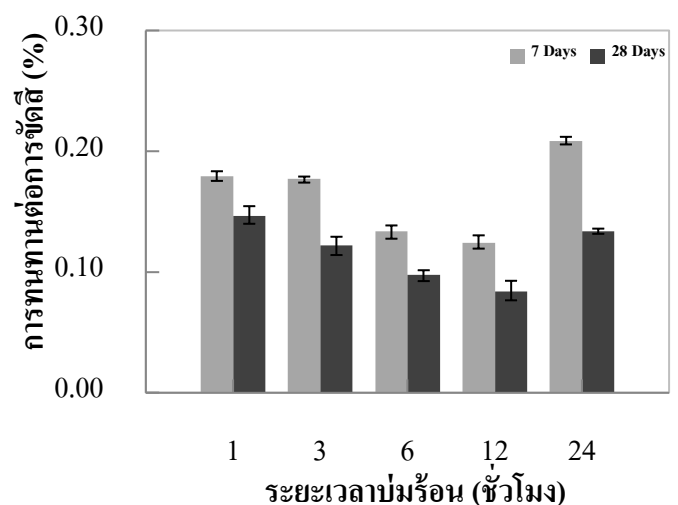
จากผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 9 พบว่าอุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้นสามารถเร่งการทำปฏิกิริยาส่งผลให้การทนทานต่อการหดตัวเพิ่มมากขึ้นในช่วงอายุต้น แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้การต้านทานต่อการหดตัวในช่วงอายุปลายต่ำลง [19] เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มเป็นการเร่งกระบวนการในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นในช่วงอายุต้น แต่การเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะจบลงอย่างรวดเร็วจึงส่งผลให้การพัฒนากำลังระหว่างช่วงอายุต้นไปหาช่วงอายุปลายน้อยลง ซึ่งแตกต่างจากการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราด้วยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ค่าการสูญเสียจากการหดตัวในช่วงอายุต้นมาก แต่การเกิดปฏิกิริยาเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้ความร้อนบ่มส่งผลให้การยึดประสานระหว่างมวลเกิดขึ้นดีกว่า และยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงอายุปลายให้ค่าต้านทานการหดตัวดีกว่ามากเมื่อเทียบกับการบ่มด้วยความร้อนถึง 80 องศาเซลเซียส ในช่วงอายุปลาย [18]



การต้านทานการหดตัวกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ส่งผลให้การต้านทานต่อการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่การบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเป็นการเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้นนานเกินไปส่งผลให้การทำปฏิกิริยาในช่วงอายุปลายทำได้น้อยลง การต้านทานต่อการหดตัวจึงลดลงไปด้วย [19]



ภาพที่ 10 การต้านทานการหดตัวกับอายุตัวอย่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่ม

### 3. สรุปและวิจารณ์ผล

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการต้านทานการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราพบว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.62 เหมาะสมต่อความสามารถในการทำงาน มีกำลังรับแรงอัดที่สูง ไม่ใช่สารละลายในปริมาณที่มาก หากต้องการกำลังรับแรงอัดที่สูงในช่วงอายุต้นควรใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ แต่หากต้องการกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นที่ไม่สูงมากนัก และมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่สูงในช่วงอายุปลายสามารถเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ไม่ควรใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 15 โมลาร์ เพราะเป็นการสิ้นเปลืองมากเกินไป

หากต้องการใช้งานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังสูงในช่วงอายุ 7 วัน ควรบ่มเร่งปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลาไม่เกิน 12 ชั่วโมง จึงไม่ส่งผลเสียต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต หรือต้องการใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่มีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องมีกำลังรับแรงอัด และการต้านทานต่อการขัดสีสูง สามารถผลิตได้โดยไม่ต้องบ่มด้วยความร้อน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทุนแผนพัฒนาศักยภาพบัณฑิตวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2561

ขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

#### เอกสารอ้างอิง

1. Malhotra, M., *Sustainable development and concrete technology.*, in *ACI Concrete International*, Introduction, Editor 2002. p. 7-22.
2. Moreno, F., M.C. Rubio, and M.J. Martinez-Echevarria, *The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage.* Construction and Building Materials, 2012. 26(1): p. 466-474.
3. Disfani, M.M., et al., *Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications.* Journal of Cleaner Production, 2012. 20(1): p. 170-179.
4. Donrak, J., et al., *Improvement of marginal lateritic soil using Melamine Debris replacement for sustainable engineering fill materials.* Journal of Cleaner Production, 2016. 134: p. 515-522.
5. Poon, C.S. and D. Chan, *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base.* Construction and Building Materials, 2006. 20(8): p. 578-585.
6. Tam, V.W.Y., *Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries.* Journal of Cleaner Production, 2009. 17(7): p. 688-702.
7. Nimwinya, E., et al., *A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer.* Journal of Cleaner Production, 2016. 119: p. 128-134.
8. Davidovits, J., *Geopolymer: Man-made rock geosynthesis and resulting development of very early high strength cement.* Materials 1994(16(2&3)): p. 91-139.
9. Muhammad, B., et al., *Influence of non-hydrocarbon substances on the compressive strength of natural rubber latex-modified concrete.* Construction and Building Materials, 2012. 27(1): p. 241-246.
10. Fakhri, M. and F. Saberi. K, *The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement.* Journal of Cleaner Production, 2016. 129: p. 521-530.
11. Fernández-Jiménez, A., A. Palomo, and M. Criado, *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model.* Cement and Concrete Research, 2005. 35(6): p. 1204-1209.
12. Alawode, O. and O.I. Idowu, *Effects of water-cement ratios on the compressive strength and workability of concrete and lateritic concrete mixes.* Pac. J. Sci. Technol., 2011. 12(2): p. 99-105.

13. Pavithra, P., et al., *A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash*. Journal of Cleaner Production, 2016. **133**: p. 117-125.
14. Hamidi, R.M., Z. Man, and K.A. Azizli, *Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer*. Procedia Engineering, 2016. **148**: p. 189-193.
15. Olivia, M. and H. Nikraz, *Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method*. Materials & Design (1980-2015), 2012. **36**: p. 191-198.
16. Huseien, G.F., et al., *Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash*. Construction and Building Materials, 2016. **125**: p. 1229-1240.
17. Usha, S., D.G. Nair, and S. Vishnudas, *Feasibility Study of Geopolymer Binder from Terracotta Roof Tile Waste*. Procedia Technology, 2016. **25**: p. 186-193.
18. Al-Majidi, M.H., et al., *Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications*. Construction and Building Materials, 2016. **120**: p. 198-211.
19. Bakria, A.M.M.A., et al., *The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers*. Physics Procedia, 2011. **22**: p. 286-291.

ภาคผนวก จ

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

ได้ทำพิธีมอบต้นแบบพื้นผิวถนนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพาราก่อตัวเร็ว ให้แก่พื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลพระลับ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เพื่อใช้งาน



## ภาคผนวก จ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ  
ตลอดโครงการ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

ตลอดโครงการ

|   | วัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้                                                               | กิจกรรมที่ดำเนินการมา                                                                                                                                                       |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | พัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับงานซ่อมหรือสร้างถนนคอนกรีตให้ก่อตัวเร็วลดระยะเวลาการปิดการจราจร | ได้อัตราส่วนผสมสำหรับผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับงานซ่อมหรือสร้างถนนคอนกรีตให้ก่อตัวเร็ว                                                                              |
| 2 | สามารถผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติได้มาตรฐานของ ถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท     | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีคุณสมบัติได้มาตรฐานถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท                                                                                                        |
| 3 | ศึกษาวิเคราะห์ปัญหา ทบทวนวรรณกรรม                                                              | ได้ทราบถึงข้อมูลและแนวทางในการทำงานวิจัยและปัญหาที่ผ่านมา                                                                                                                   |
| 4 | ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุตั้งต้น                                                         | ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นของวัสดุตั้งต้น                                                                                                                             |
| 5 | ออกแบบการทดลองและเตรียมตัวอย่าง                                                                | ได้สัดส่วนผสมและผสมตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบ                                                                                                                                    |
| 6 | ทดสอบคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                     | ได้ผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                                                             |
| 7 | วิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล                                                             | ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมน้ำยางพารา                                                                                            |
| 8 | สำรวจพื้นที่ที่เหมาะสมในการดำเนินงาน                                                           | ติดต่อวิศวกรขององค์การบริหารส่วนตำบล เข้าปรึกษาผู้ใหญ่บ้าน และสอบถามความต้องการใช้ทางของคนในพื้นที่ ได้พื้นที่ที่เหมาะสมในการดำเนินการ อยู่บริเวณ ตำบลพระลับ จังหวัดขอนแก่น |
| 9 | วิเคราะห์ปัญหาในพื้นที่และออกแบบสัดส่วนผสมสำหรับใช้ในงานจริง                                   | เมื่อวิเคราะห์จากพื้นที่จริงแล้วจึงสรุปสูตรสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในพื้นที่จริง ในมิติของการทำงานได้ และคุณสมบัติที่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท            |

|    |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 | ดำเนินการทดสอบเทคนิคน้ำงานจริง | <p>ทราบถึงขั้นตอนในการดำเนินงานจริงว่าควรดำเนินการอย่างไร ซึ่งในกระบวนการนํานํานจริง มีความแตกต่างทางด้านสภาพอากาศ สภาพเครื่องมือในการดำเนินการ และก่อนลงมือทำงานต้องมีการรื้อถอนถนนเดิมและปรับสภาพดินก่อนดำเนินการ จากผลการดำเนินงานผู้วิจัยสามารถปรับการทำงานจากในห้องทดลองมาใช้ในการทำงานจริงได้ ซึ่งมีขั้นตอนที่แตกต่างกันบางส่วน</p> |
|----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|