

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547 : 283-289)

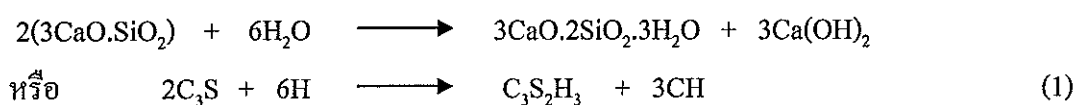
ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น

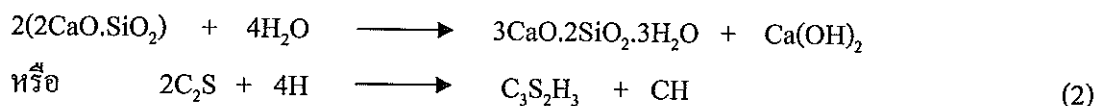
มาตรฐาน American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาค้นคว้าวิจัยว่าสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้และนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน โดยเถ้าถ่านหินจะมีออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน, อุณหภูมิการเผา, และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296) จึงได้แยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้น F และ ชั้น C โดยเถ้าถ่านหิน ชั้น F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่เหมือนกันของเถ้าถ่านหิน ชั้น F และ ชั้น C คือ กำหนดให้มีปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนัก มีค่าการการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI (Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก สำหรับ ชั้น C ส่วน ชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาร้อนผ่านน้ำด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต้องให้กำลังอัด ที่อายุ 7 หรือ 28 วันไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมด)

สำหรับ Sata, Jaturapitakkul และ Kiattikomol (2004 : 623-628) ได้ทำการศึกษาในเรื่องของการใช้ประโยชน์ของเถ้าปาล์มในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และการพัฒนาความร้อนของเถ้าปาล์ม ซึ่งก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดลองทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดเถ้าปาล์มให้มีขนาดอนุภาคลดลงจาก 62.5 ไมโครเมตร จนเหลือประมาณ 10 ไมโครเมตร ซึ่งช่วยลดปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ลดลงจากร้อยละ 41.2 เหลือ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และเถ้าปาล์มที่ยังไม่ผ่านการบดจะมีขนาดใหญ่ มีรูพรุนสูง ส่วนเถ้าปาล์มที่ผ่านการบดแล้วพบว่ามีการเรียงตัวที่แน่นขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มเล็กลงและรูพรุนก็ลดลงเช่นกัน ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะก็เพิ่มขึ้นจาก 1.97 เป็น 2.33 สำหรับการออกแบบคอนกรีตควบคุมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.28 โดยใช้สารลดน้ำพิเศษควบคุมค่าการยุบตัว หลังจากนั้นจึงนำเถ้าปาล์มบดไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดกับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลการศึกษาสรุปว่าการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มบดละเอียดในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในช่วงร้อยละ 103-111 ที่อายุ 28 วัน ในส่วนของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นก็มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และการเพิ่มขึ้นของอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มสามารถจะช่วยลดอุณหภูมิในการก่อตัวของคอนกรีตด้วย ดังนั้นเถ้าปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียด สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงได้

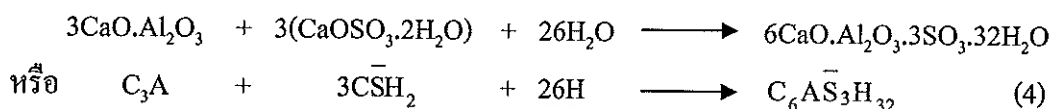
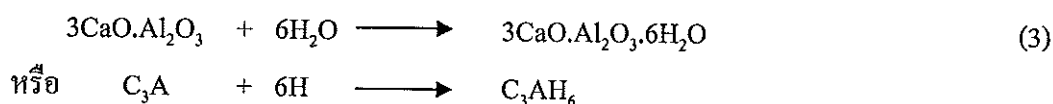
2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาปอซโซลาน (ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547 : 283-289)

การนำปูนซีเมนต์มาผสมกับน้ำ (เพสต์) พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปเพสต์จะทำการก่อตัวและแข็งตัวจนสามารถรับกำลังอัดได้ แต่หากพิจารณาปฏิกริยาทางเคมีของเพสต์นั้น พบว่าปฏิกริยาที่ได้จากเพสต์คือปฏิกริยาไฮเดรชันซึ่งเกิดจากสารประกอบคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ผสมกับน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตทั้งสองมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันแตกต่างกันเพียงที่จำนวนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เท่านั้น ดังที่แสดงในสมการต่อไปนี้





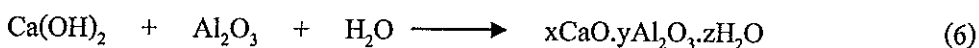
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 3 ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมอิฐเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะ C_3A จะทำปฏิกิริยากับอิออนของซัลเฟตได้ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตหรือเรียกกันทั่วไปว่าเอทริงไกต์ (Ettringite) ดังสมการที่ 4



ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาคคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยา

ไฮเดรชัน ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อยู่ในเม็ดานหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งสามารถเขียนแสดงสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ



โดยเรียกสมการที่ (5) และ (6) ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับค่า x , y และ z เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต (Helmuth, 1987 : 1-58) โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุตั้งแต่ 7 หรือ 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547 : 283-289)

2.3 เถ้าถ่าน

เถ้าถ่านเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน แต่เถ้าถ่านเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าถ่านจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนกว่าเถ้าถ่านหินมาก (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547 : 283-289) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่ามีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กอยู่ร้อยละ 46.02, 22.31 และ 10.64 ตามลำดับ พิจารณาผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก ของเถ้าถ่านพบว่ามียุทธรวมร้อยละ 78.97 มีปริมาณ SO_3 ร้อยละ 1.52 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI (Loss on Ignition) ร้อยละ 2.72 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถจัดเถ้าถ่านเข้าประเภทตาม American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296) เป็นเถ้าถ่านชนิด F และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านกับเถ้าถ่านหินจากแหล่งเดียวกันของงานวิจัยที่ผ่านมาของ Kiattikomol และคณะ (2001 : 335-343) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยและจากการศึกษาของ Tangtermsirikul (2002 : 169-177) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านที่เก็บตัวอย่างทั้งสองสัปดาห์เป็นเวลาสามเดือน มีค่าออกไซด์ของซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 45.24 ถึง 53.26 และมีออกไซด์ของอะลูมินาอยู่ในช่วงร้อยละ 18.43 ถึง 20.40 ส่วนออกไซด์ของเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.0 ถึง 7.86 ซึ่งเห็นได้ว่าองค์ประกอบเคมีของเถ้าถ่านมีค่าสม่ำเสมอ

สำหรับ Jaturapitakkul และ Cheerarot (2003 : 48-53) ได้พัฒนาคุณภาพเถ้าถ่านเพื่อใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนในรูปกำลังอัดของคอนกรีต โดยเถ้าถ่านจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยส่วนแรกจะใช้เป็นเถ้าถ่านที่ยังไม่ผ่านการบด ส่วนที่สองจะถูกนำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles จนมีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 25, 35 และ 45 เมกะปาสกาล สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านเถ้าถ่านบด ใช้เถ้าถ่านบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในทั้ง 3 ค่ากำลังอัดที่ออกแบบคอนกรีตควบคุม แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ผลการศึกษาสรุปว่าเถ้าถ่านบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนได้อย่างดี

สำหรับ Cheriaf, Rocha และ Pera (1999 : 1389-1391) ได้ทำการศึกษาสมบัติความเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนของเถ้าถ่านในด้านต่างๆ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าในประเทศบราซิล ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล สำหรับสมบัติทางกายภาพทำการศึกษาโดยใช้เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อพิจารณารูปร่างลักษณะของเถ้าถ่านที่ได้จากโรงไฟฟ้า และกระบวนการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ในช่วงของอายุทดสอบต่างๆ สำหรับสมบัติทางเคมีทำการทดสอบหาปริมาณร้อยละของออกไซด์ต่างๆ และใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD) เพื่อหาความ

เป็นแก้วของเถ้ากั้นเตา ส่วนสมบัติทางกลทำการทดสอบโดยนำเถ้ากั้นเตาไปบดโดยใช้เวลาในการบดตั้งแต่ 1 ถึง 6 ชั่วโมง แล้วนำเถ้ากั้นเตาที่ผ่านการบดในเวลาต่างๆ ไปหล่อและทดสอบกำลังอัดเพื่อหาดัชนีกำลังตามอายุทดสอบ ผลการศึกษาสรุปว่าเถ้ากั้นเตาจากโรงไฟฟ้าในประเทศบราซิลอยู่ในชั้น F ของเถ้าถ่านหิน และที่อายุ 14 วัน การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นของเถ้ากั้นเตามีค่าน้อยมาก แต่เพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน เป็นต้นไป การบดโดยใช้เวลาบด 6 ชั่วโมง สามารถเพิ่มดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน ได้ถึงร้อยละ 27 ดังนั้นเถ้ากั้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าในประเทศบราซิล สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

ส่วน Nisnevich (1997 : 56-60) ได้ทำการศึกษาโดยการนำเถ้ากั้นเตาไปปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลเบา หลังจากทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเถ้ากั้นเตา โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และปริมาณร้อยละข้างตรงแรงแรงมาตรฐานที่มีช่องเปิดแตกต่างกัน 9 ขนาด เพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตมวลเบา หลังจากนั้นนำตัวอย่างของคอนกรีตมวลเบาที่ได้ไปทำการทดสอบหาปริมาณของโพรงอากาศ ความหนาแน่น และกำลังอัดของคอนกรีต ผลการศึกษาสรุปว่าการนำเถ้ากั้นเตาไปปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาช่วยให้มีปริมาณของโพรงอากาศเพิ่มขึ้นเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อย และยังทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานควบคู่ไปกับปูนซีเมนต์หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นเถ้ากั้นเตาสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาได้เป็นอย่างดี

สำหรับ Kaewmanee และ Tangtermsirikul (2549 : 104-108) ได้ศึกษาการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต เมื่อออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 21, 35 และ 50 เมกะปาสคาล โดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน หลังจากนั้นแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากั้นเตาในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมีผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีตจึงต้องปรับปรุงด้วยการใช้สารลดน้ำพิเศษในการควบคุมค่าการยุบตัว โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานสามารถใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผสมเถ้าถ่านหินสามารถใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดได้สูงที่สุดคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ไกรวุฒิ ต้นตุงามย์ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2548 : 68-73) ได้ทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีอนุภาคแตกต่างกัน 3 ขนาด โดยปรับปรุงคุณภาพของเถ้ากั้นเตาด้วยการบดจนมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35, 20-15 และ น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วจึงนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อหล่อมอร์ตาร์แล้วทดสอบกำลังอัด โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดในมอร์ตาร์สามารถหาได้จากร้อยละผลต่างของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากั้นเตา

บดละเอียดกับมอร์ตาร์ทที่ผสมทรายบดละเอียดซึ่งเป็นวัสดุเนื้อที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้ากั้นเตา จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าเถ้ากั้นบดละเอียดขนาดใหญ่ ประมาณ 2 เท่าที่อายุ 60 วันขึ้นไป

วันชัย ยอดสุใจ และ ทรงศักดิ์ จันทร์แสนตอ (2549 : 145-148) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์บดลือกมลเบาแบบกระจายฟองอากาศอบไอน้ำ โดยใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1505-2541) พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถทำให้ชิ้นส่วนตัวอย่างมีค่าหน่วยน้ำหนัก ค่าความต้านทานแรงอัด ค่าการดูดกลืนน้ำและอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นสังเกตได้ว่ามีการศึกษาการนำเถ้ากั้นเตามาใช้งานในหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเถ้ากั้นเตาสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ แต่ยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วงอายุทดสอบที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถพิจารณาพฤติกรรมของการพัฒนากำลังอัดในแต่ละช่วงได้อย่างถูกต้องชัดเจนยิ่งขึ้น