ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเถ้าถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์

Effect of Particle Size and Shape of Fly Ash on Porosity and Air Permeability of Paste

ธีรวัฒน์ สินศิริ[1], ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[2] และปริญญา จินดาประเสริฐ[3]

[1]อาจารย์ สำนักวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, [2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, [3]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ: บทความฉบับนี้ศึกษาผลกระทบความละเอียด และรูปร่างของเถ้าถ่านหิน ต่อความพรุน และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าระยอง ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกัน 3 ขนาด โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ทดสอบความพรุนโดยใช้ก๊าซฮีเลียมและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

ผลการทดสอบ พบว่าการแทนที่และความละเอียดเถ้าถ่านหินมีผลกระทบต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศในเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 40 ส่งผลให้ความพรุนของเพสต์เพิ่มขึ้นและเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ ทำให้ความพรุนลดลง ขณะที่การซึมผ่านอากาศในเพสต์ลดลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณและความละเอียดเพิ่มขึ้น ความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยองสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ เพราะเถ้าถ่านหินระยองมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีความพรุนสูง ในขณะที่เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีผิวเรียบและรูปร่างกลม รูปร่างกลมของเถ้าถ่านหินแม่เมาะกระจายตัวในเพสต์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินระยองที่มีรูปร่างเหลี่ยม และเถ้าถ่านหินระยองมีความเป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ABSTRACT: This paper presents experimental results on the effect of fineness and shape of fly ash on porosity and air permeability of hardened blended cement pastes. The water-to-binder ratio (W/B) of 0.35 was maintained for tested pastes. Fly ashes from 2 sources (Mae Moh power plant and Rayong power plant) with three different finenesses were used to replace Portland cement at the rates of 0, 20, and 40% by weight of binder. The porosity by helium gas and air permeability were determined at the ages of 28 and 90 days.

Test results indicated that the fineness and percent replacement of fly ash were important parameters affecting on the porosity and air permeability of paste. The porosity of fly ash pastes increased with the increase replacement of fly ash from 20% to 40%. Pastes containing finer fly ash had significantly lower porosity than that with coarser fly ash. The air permeability of fly ash pastes decreased as the percentage replacement and the fineness of fly ash increased. The development of porosity and air permeability of Rayong fly ash pastes were higher than those of Mae Moh fly ash paste. This is due to the shape of Rayong fly ash is the irregular and has high porosity while Mae Moh fly ash has smooth surface with spherical shape. The spherical shape of Mae Moh fly ash provided well distribution in the paste and therefore was convenient points with the paste for nucleation than the irregular shape of Rayong fly ash. The Rayong fly ash had higher content of crystalline than that of Mae Moh fly ash. This also resulted in lower pozzolanic reaction of Rayong fly ash as compared to Mae Moh fly ash at the same particle size.

คำหลัก: : ความละเอียด, รูปร่าง, เถ้าถ่านหิน, เพสต์, ความพรุน, การซึมผ่านของอากาศ

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างมานานแล้ว โดยพบได้จากสิ่งก่อสร้างทั่วไป เช่น ตึก บ้าน ถนน สะพาน เขื่อน เป็นต้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีของการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ให้ความสำคัญกับความทนทานมากขึ้น เพราะมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ปัญหาที่ทำให้ความคงทนคอนกรีตลดลง คือ การเกิดสนิมในเหล็ก, การกัดกร่อนจากซัลเฟต, สภาพแวดล้อมที่เป็นกรด, ปฏิกิริยาอัลคาไลกับมวลรวม, การแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน, การตกผลึกของเกลือ, การเกิดคาร์บอเนชั่น เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวข้างต้นพบว่ามีกลไกที่คล้ายกัน คือ เกิดจากการซึมผ่านของน้ำในรูปของตัวทำละลาย (น้ำทะเล, น้ำที่มีซัลเฟต, น้ำที่มีกรด ฯลฯ) หรือก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน) เข้ามาในโพรงหรือรูพรุนของโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นการป้องกันหรือลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ได้แก่ การออกแบบให้คอนกรีตมีการซึมผ่านต่ำ, บ่มคอนกรีตให้นานขึ้น, ปรับปรุงคุณภาพส่วนผสมหลักและส่วนผสมเพิ่ม, เคลือบผิวด้วยสารกันซึม เป็นต้น

เพื่อทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น ความทนทานดีขึ้น และลดการซึมผ่าน จำเป็นต้องลดรูพรุนในซีเมนต์เพสต์ การใช้วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) แทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยลดการซึมผ่านและความพรุนในซีเมนต์เพสต์ได้ กลไกของวัสดุปอซโซลานมี 2 ส่วนคือ ทำให้โครงสร้างรูพรุนในซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นผลให้ขนาดของรูพรุนในซีเมนต์เพสต์ลดลง และทำให้การซึมผ่านลดลงด้วย

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน คุณสมบัติของเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับชนิดถ่านหินและขั้นตอนการเผา ในปัจจุบันประเทศไทยมีเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปี นักวิจัยจำนวนมากศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ แต่มีนักวิจัยส่วนน้อยที่ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติโครงสร้างขนาดเล็กเช่น ปริมาณโพรงหรือความพรุน ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ในบทความนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อความพรุน และการซึมผ่านอากาศในซีเมนต์เพสต์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่ง คือเถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลมตันจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FM) และ เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีรูพรุน จากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (FR) นำเถ้าถ่านหินแต่ละแหล่งมาแยกให้มี 3 ระดับความละเอียดคือ เถ้าถ่านหินจากแหล่งผลิตโดยตรง (O, Original) และนำเถ้าถ่านหินมาปรับปรุงขนาดด้วยการคัดแยกขนาดด้วยลมให้มีความละเอียด 2 ระดับ คือ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียด (F, Fine) และละเอียดมาก (FF, Very Fine)

2.2 อัตราส่วนผสม

ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปทรงกระบอกขนาด 38 มม. x 50 มม. และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในน้ำ ทำการทดสอบความพรุนโดยใช้ก๊าซฮีเลียม และทดสอบการซึมผ่านอากาศตาม ASTM D4525 ที่อายุ 28 และ 90 วัน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี, องค์ประกอบแร่ธาตุ, ความละเอียดโดยวิธี Nitrogen Adsorption, การกระจายของอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Analyser, และถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

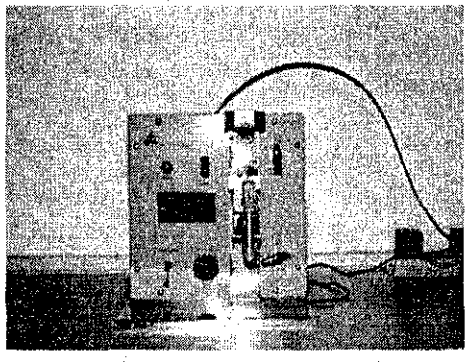
3.2 ทดสอบความพรุนโดยก๊าซฮีเลียม

รูปที่ 1 แสดงรูปเครื่องมือการทดสอบความพรุนโดยก๊าซฮีเลียม ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยา ขนาดโมเลกุลของก๊าซฮีเลียมสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ดีกว่าก๊าซอื่น ปริมาณความพรุนของตัวอย่างอธิบายด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ 3 ส่วน คือ ปริมาตรเนื้อแท้ (Grain Volume) ปริมาตรทั้งหมด

(Bulk Volume) และ ปริมาตรโพรง (Pore Volume) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

ปริมาตรโพรง = ปริมาตรทั้งหมด-ปริมาตรเนื้อแท้

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรโพรง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมด}} \times 100$$



รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบความพรุนโดยก๊าซฮีเลียม

3.3 ทดสอบการซึมผ่านอากาศ

เนื่องจากไม่มีมาตรฐานในการทดสอบการซึมผ่านอากาศของคอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการทดสอบครั้งนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D4525 ซึ่งเป็นการทดสอบการไหลผ่านอากาศของหินในงานปิโตรเลียม การทดสอบครั้งนี้ได้ใช้วิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้วัดการซึมผ่านอากาศในเพสต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับหิน

หล่อก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มม. สูง 50 มม. และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำถอดแบบออกที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบอายุการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน นำก้อนตัวอย่างไปตัดตามขวางบริเวณหัวและท้ายออกเท่าๆกัน โดยให้ก้อนตัวอย่างมีความสูง 38 มม. หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 7 วัน และนำก้อนตัวอย่างไปเก็บไว้ในโถแก้วที่ปิดสนิท มีซิลิก้าเจลคอยดูดความชื้น เป็นเวลา 3 วัน [1] ก่อนนำไปทดสอบการซึมผ่านอากาศ

นำก้อนตัวอย่างไปใส่ในเซลทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 และนำไปประกอบเข้ากับเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านอากาศ แสดงในรูปที่ 3 การหาค่าการซึมผ่านอากาศ หาได้จากหลักการของดาร์ซีในสมการที่ 1 โดยการวัดการไหลของอากาศผ่านก้อนตัวอย่างเทียบกับเวลา ใช้ความดันอากาศ 3 ค่า คือ 0.15, 2, 3 เมกกะปาสคาล

$$K = \frac{2Q_e P_e \mu L}{\langle (P_i)^2 - (P_e)^2 \rangle A} \quad (1)$$

K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอากาศ, ม^2 (10^2 ดาร์ซี)

Q_e = อัตราการไหลออกของอากาศ, ม^3/วินาที

P_e = แรงดันอากาศที่ไหลออก, ปาสคาล

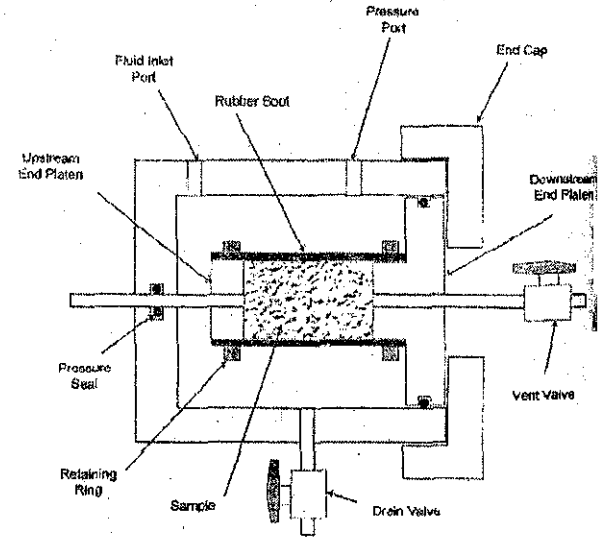
L = ความยาวของก้อนตัวอย่าง, ม

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง, ม^2

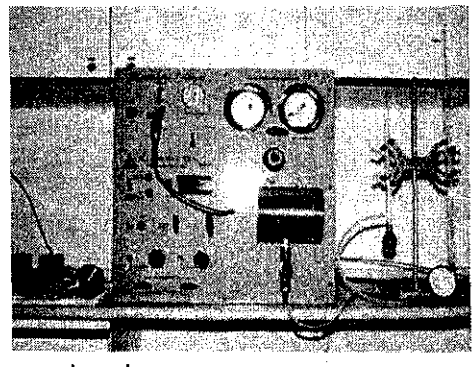
P_i = แรงดันอากาศที่ไหลเข้า, ปาสคาล

μ = ความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิทดสอบ, ปาสคาล.วิ

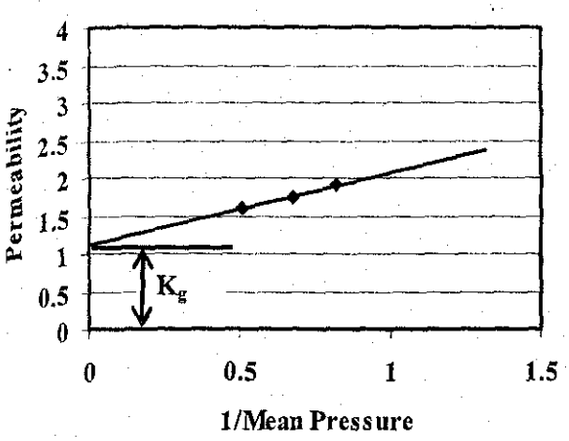
การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอากาศที่แท้จริง หาได การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านอากาศ และส่วนกลับ ความดันเฉลี่ย ($1/P_m$, เมื่อ $P_m = (P_i+P_{atm})/2$) ค่า สัมประสิทธิ์ ซึมผ่านอากาศที่แท้จริงคือ ค่า b จากสมการ $K = a(1/P_m)$ [2, 3, 4, 5, และ 6] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 เซลทดสอบค่าการซึมผ่านอากาศ



รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านอากาศ



รูปที่ 4 แสดงการหาค่าการซึมผ่านอากาศที่แท้จริง

I. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

I.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ และตารางที่ 2 ป็นคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ จากตารางที่ 1 เถ้าถ่านหิน ทั้ง 2 แหล่งเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตาม ASTM C 618 ความ ะเอียดที่วัดโดยวิธี Nitrogen Adsorption ของเถ้าถ่านหินที่แยก นาด CFM และ FFM มีค่าเท่ากับ 2,120 และ 3,150 m^2/กก ามลำดับ ในขณะที่ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการ ยกละเอียด OFM และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่า ป็น 1,650 และ 1,315 m^2/กก ตามลำดับ เถ้าถ่านหินจากระยอง FR, CFR, และ FFR มีค่าความละเอียดเท่ากับ 8,220, 11,195 ละ 13,240 m^2/กก ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของวัสดุประสาน พบว่าหลังจาก ารแยกเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น เถ้าถ่านหินแม่เมาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 18.6 ไมโครเมตรเป็น 6.4 และ 2.2 มโครเมตร ในขณะที่เถ้าถ่านหินระยอง OFR, CFR และ FFR ขนาดอนุภาคเท่ากับ 14.1, 6.9, และ 2.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ กษณะผิวของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด วนมากมีรูปร่างกลม มีบางอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ถึง 150 -มครอน โดยผิวของขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะไม่เรียบ มีรูปร่าง ม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 6ก ขณะที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการ ยกขนาดมีรูปร่างกลมมน ผิวเรียบ ดังในรูปที่ 6ข และ 6ค ามลำดับ ในขณะที่เถ้าถ่านหินระยองมีรูปร่างไม่แน่นอน มี ลี่ยมมุมและมีรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 7ก, ข, และ ค. ตามลำดับ

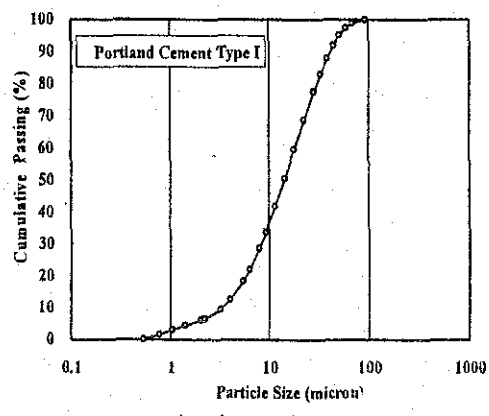
รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซเรย์ (X-ay Diffraction) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่าน นแม่เมาะและเถ้าถ่านหินระยอง ผลการทดลองพบว่า XRD ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเฉพาะส่วนที่เป็นผลึก ของ C_3S, C_2S, C_3A, และ C_4AF ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อม ประสาน ดังแสดงในรูปที่ 8ก ในขณะที่รูปที่ 8ข และ 8ค แสดงผล XRD ของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ และเถ้าถ่านหินระยอง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าส่วนประกอบที่เป็นผลึกของ เถ้าถ่านหิน คือ Quartz (SiO_2), Mullite ($AL_6Si_2O_{13}$), และ Hematite (Fe_2O_3) ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยา โดยเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีจุด ยอดของผลึกต่างๆไม่ชัดเจน ส่วนจุดยอดของผลึกจากเถ้าถ่าน หินระยองมีความชัดเจน และพบว่าเถ้าถ่านหินระยองมีความเป็น ผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ เมื่อพิจารณาผลความละเอียดของ เถ้าถ่านหิน พบว่าจุดยอดของผลึกต่างๆระหว่างเถ้าถ่านหินที่ ไม่ได้แยกขนาดและเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด มีความ แตกต่างกันไม่มากนัก จากการศึกษาปริมาณส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) ของ Chindaprasirt และ คณะ [7] พบว่าปริมาณ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีประมาณร้อย ละ 85-90 สูงกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ซึ่งมีค่าประมาณ ร้อยละ 70-75 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Berry และ คณะ [8] พบว่าปริมาณ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น เมื่อเถ้าถ่าน หินมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

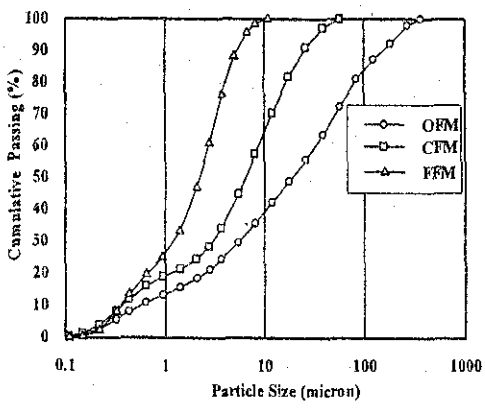
Chemical Composition (%)	Cement Type I	Fly Ash	
		Mae Moh (M)	Rayong (R)
SiO_2	20.9	45.69	45.24
Al_2O_3	4.76	24.59	28.25
Fe_2O_3	3.41	11.26	2.43
CaO	65.41	12.15	11.80
MgO	1.25	2.87	0.74
SO_3	2.71	1.57	3.63
Na_2O	0.24	0.07	0.66
K_2O	0.35	2.66	0.47
LOI	0.96	1.23	2.96

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

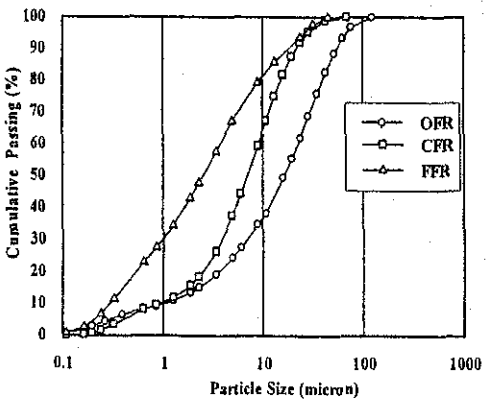
Sample	Median Particle Size (Micron)	Surface Area (m^2/kg) (Nitrogen Adsorption)
PC I	14.1	1,315
OFM	18.6	1,650
CFM	6.4	2,120
FFM	2.2	3,150
OFR	14.1	8,220
CFR	6.9	11,195
FFR	2.3	13,240



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I

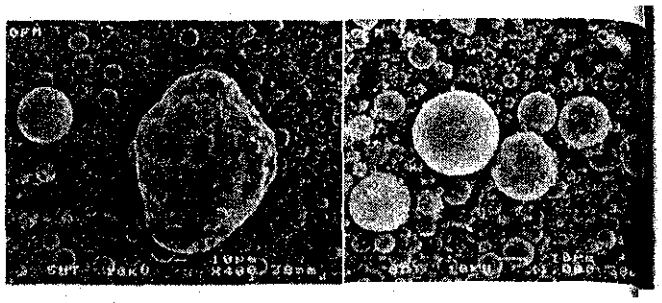


ข) เถ้าถ่านหินแม่เมาะ

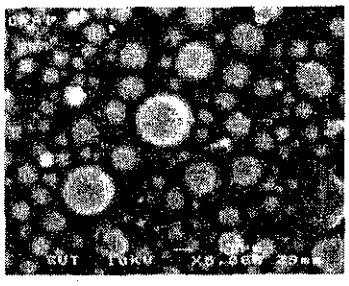


ค) เถ้าถ่านหินระยอง

รูปที่ 5 การกระจายอนุภาคของวัสดุ

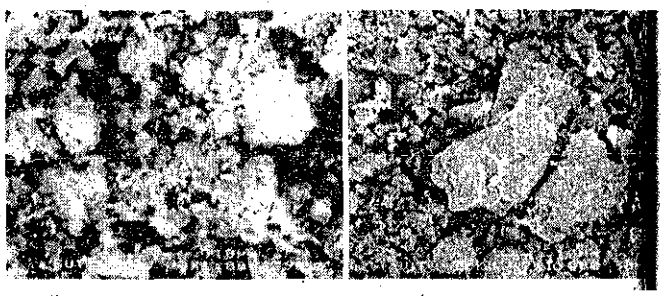


ก) เถ้าถ่านหิน OFM ข) เถ้าถ่านหิน CFM

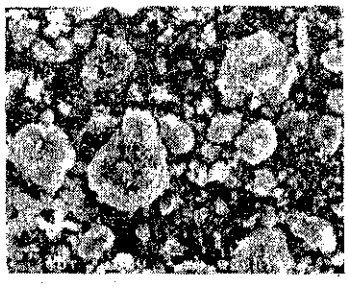


ค) เถ้าถ่านหิน FFM

รูปที่ 6 ภาพขยายเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

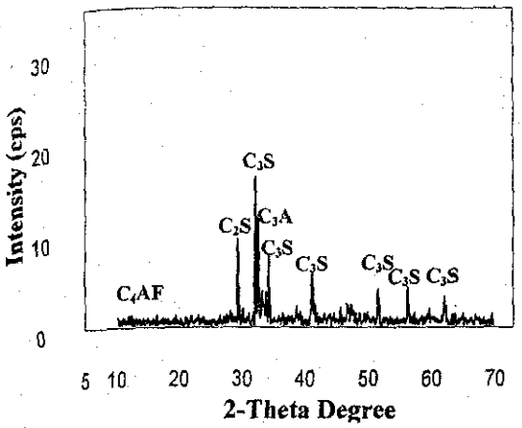


ก) เถ้าถ่านหิน OFR ข) เถ้าถ่านหิน CFR

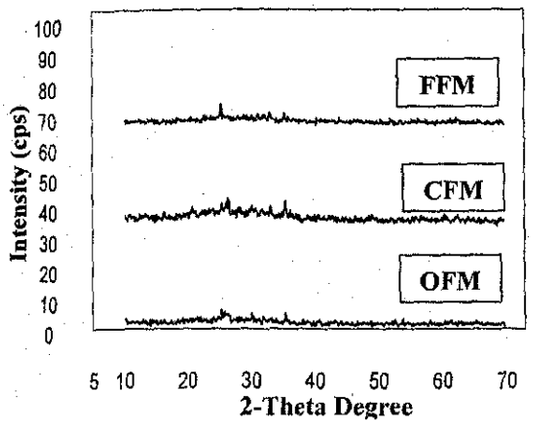


ค) เถ้าถ่านหิน FFR

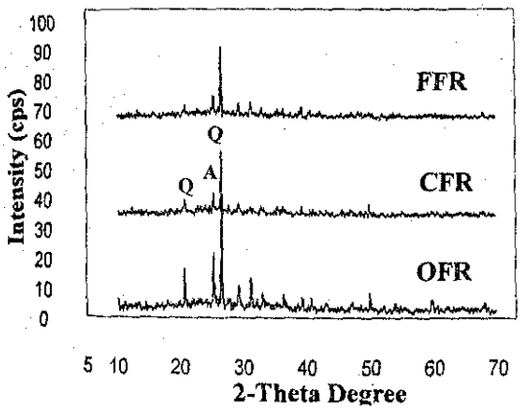
รูปที่ 7 ภาพขยายเถ้าถ่านหินระยอง



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) เถ้าถ่านหินแม่เมาะ



ค) เถ้าถ่านหินระยอง

รูปที่ 8 การหักเหของรังสีเอ็กซเรย์ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหินแม่เมาะ และเถ้าถ่านหินระยอง

4.2 ความพรุนโดยก๊าซฮีเลียมของเพสต์

ผลการทดสอบความพรุนของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน แสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ความพรุนของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ ตัวอย่างเช่น เพสต์ OFM20 ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 26.0 และ 23.0 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ CFM20 และ FFM20 มีค่าความพรุนร้อยละ 25.1, 20.0 และ 21.2, 19.8 ตามลำดับ (รูปที่ 9) โดยซีเมนต์เพสต์มีความพรุนเท่ากับร้อยละ 24.5 และ 23.5 ตามลำดับที่อายุ 28 และ 90 วัน

พิจารณาความพรุนของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยองในรูปที่ 10 พบว่า ความพรุนของเพสต์มีแนวโน้มเหมือนกับเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ คือ ความพรุนลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านที่เล็กในเพสต์ ถ้าเปรียบเทียบความพรุนของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะกับเถ้าถ่านหินระยอง พบว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีความพรุนต่ำกว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยอง เนื่องจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีรูปร่างกลมตันเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่เถ้าถ่านหินระยองมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีความพรุนสูง ทำให้เถ้าถ่านหินแม่เมาะอุดช่องว่าง และกระจายตัวในเพสต์ได้ดี และความเป็นผลึกต่ำ ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดดี

4.3 การซึมผ่านอากาศของเพสต์

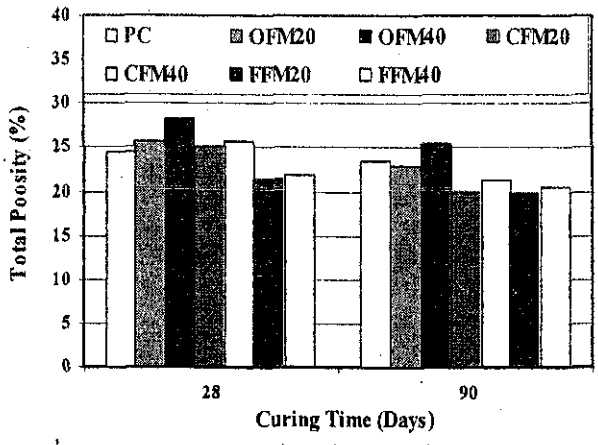
การซึมผ่านอากาศของเพสต์ที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงไว้ในรูป 11 และ 12 ตามลำดับ พบว่าการซึมผ่านอากาศของเพสต์ทั้งหมดลดลง เมื่ออายุของเพสต์เพิ่มขึ้น เพราะช่องว่างคาปิลลารีลดลง ส่งผลให้การซึมผ่านอากาศลดลงด้วย

พิจารณาเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในเพสต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการซึมผ่านลดลง และเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็ก มีค่าการซึมผ่านอากาศของเพสต์ต่ำกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ยกตัวอย่างเช่น การซึมผ่านอากาศของเพสต์ OFM20 และ OFM40 ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 0.54 x 10^{-16} และ 0.48 x 10^{-16} ม^2 ในขณะที่เพสต์ CFM20 และCFM40 มีค่าเท่ากับ 0.49 x 10^{-16} และ 0.38 x 10^{-16} ม^2 เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กลงคือ เพสต์ FFM20 และ FFM40 พบว่าค่าการซึมผ่านอากาศมีค่าลดลงเป็น 0.41 x 10^{-16} และ 0.31 x 10^{-16} ม^2 ตามลำดับ ค่าการซึมผ่านที่ลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็ก เนื่องมาจากเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก มีการกระจายตัวได้ดีในเพสต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดี นอกจากนี้ยังช่วยอุดช่องว่างและทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบ ทำให้เพสต์มีโครงสร้างสม่ำเสมอและแน่นขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านอากาศต่ำลงด้วย

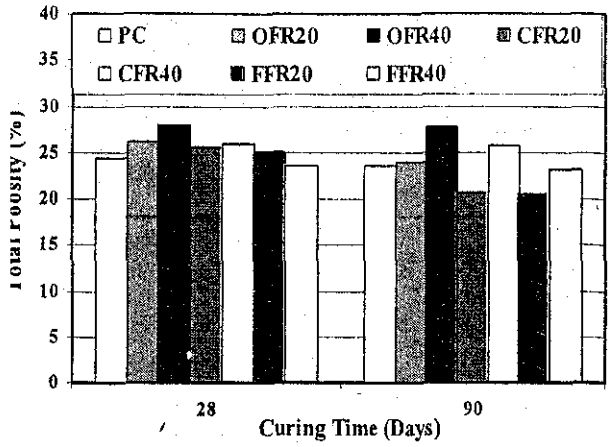
สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากระยอง พบว่าการซึมผ่านอากาศมีแนวโน้มเหมือนกับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ

กล่าวคือ การซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ และเมื่อเปรียบเทียบเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ และระยอง พบว่าการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยอง มีค่าสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ยกตัวอย่างเช่น ที่อายุ 90 วัน เพสต์ OFR20, CFR20, และ FFR20 มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 0.74 x 10^{-16}, 0.70 x 10^{-16}, และ 0.69 x 10^{-16} m^2 ในขณะที่เพสต์ OFM20, CFM20, และ FFM20 มีค่าเท่ากับเท่ากับ 0.54 x 10^{-16}, 0.48 x 10^{-16}, และ 0.41 x 10^{-16} m^2 ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าถ่านหินระยองมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีความพรุนสูง ความเป็นผลึกสูงทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ส่งผลให้ความพรุนของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยองมีค่าสูง ทำให้การซึมผ่านสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

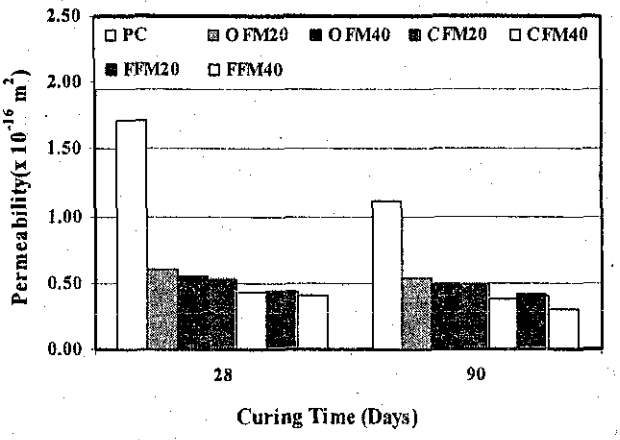
จากการศึกษาขนาดโพรงโดยเฉลี่ยโดยใช้วิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) ของ Chindaprasirt และ คณะ [9] พบว่า ขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ ขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ลดลงด้วย เมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทำให้ความพรุนมากขึ้น แต่ขนาดโดยเฉลี่ยของโพรงมีขนาดเล็กลง เนื่องจากขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กและปริมาณโพรงที่มาก การซึมผ่านอากาศใช้เวลานานขึ้น ทำให้ค่าการซึมผ่านอากาศลดลง



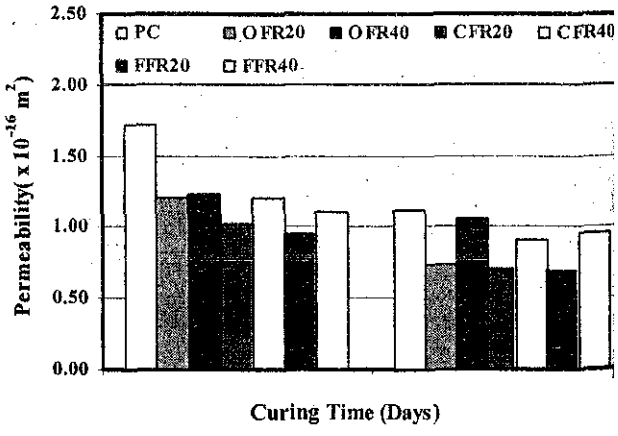
รูปที่ 9 ความพรุนของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่อายุ 28 และ 90 วัน



รูปที่ 10 ความพรุนของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินระยอ
ที่อายุ 28 และ 90 วัน



รูปที่ 11 การซึมผ่านอากาศของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมเถ้าถ่า
แม่เมาะที่อายุ 28 และ 90 วัน



รูปที่ 12 การซึมผ่านอากาศของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมเถ้า
หินระยองที่อายุ 28 และ 90 วัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาเพสต์ของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 40 ในเพสต์ ทำให้ความพรุนสูงขึ้น แต่การซึมผ่านอากาศต่ำลง
2. การแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กลง ทำให้ความพรุนของเพสต์ต่ำลง เมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีผลทำให้การซึมผ่านอากาศต่ำลงด้วย
3. เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินระยองมีความพรุนและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการอุดมศึกษาภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์ สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาภายในประเทศ ตามความต้องการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Koller, J.J., 1989, "The Determination of the Permeability of Concrete to Oxygen by the Cembureau Method-a Recommentation", *Materials and Structure*, Vol. 22, pp. 225-230.

[2] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Batis, G., Meletiou, C., Kasselouri, V., Kakali, G., Sakellariou, A., Paulakis, G. and Pseimidas, C., 1999, "The Effect of Clinker and Limestone Quality on the Gas Permeability, Water Absorption and Pore Structure of Limestone Cement and Concrete ", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 2, pp. 139-146.

[3] Tsivilis, S., Tsantilas, J., Kakali, G., Chaniotakis, E. and Sakellariou, A. 2003 "The Permeability of Portland Limestone Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1465-1471.

[4] Abbas, A., Carcasses, M. and Ollivier, J.P., 1999, "Gas Permeability of Concrete in Relation to its Degree of Saturation", Materials and Structures, Vol. 32, pp. 3-8.

[5] Carcasses, M., Abbas, A., Ollivier, T.-P. and Verdier, J., 2002, "An Optimised Precondition Procedure for Gas Permeability Measurement", *Materials and Structure*, 2002, Vol. 35, pp. 22-27.

[6] Dhir, R. K., Hewlett, P. C. and Chan, Y. N., 1989, "Near Surface Characteristics of Concrete: Intrinsic Permeability", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 41(147), pp. 87-97.

[7] Chindaprasirt, P., Ruangsiriyakul, S., Cao, H. T. and Bucea, L., 2001, "Influence of Mae Moh Fly Ash Fineness on Characteristics, Strength and Drying Shrinkage Development of Blended Cement Mortars", *Proceedings of the Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, 5-7 December, Paper No. 1191, p.6.

[8] Beery, E.E., Hemmings, R.T., Langley, W.S. and Carette, G.G., "Beneficiated Fly ash: Hydration, Microstructure, and Strength Development in Portland Cement Systems", In: V.M. Malhotra (Ed.), Third CANMET/ACI, *Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (SP-114)*, Detroit, 1989, pp. 241-273.

[9] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 425-428.

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อ ธีรวัฒน์ สินศิริ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000
โทร. 0-4422-4220-1, โทรสาร 0-4422-4220,
E-mail: sinsiri@sut.ac.th