

# ความสามารถในการดูดซับสีย้อมผ้ายีนส์และคุณสมบัติปอซโซลาน หลังดูดซับสีย้อมของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

เมตตา เพ็ญผลเจริญ

## Abstract

Penpolcharoen, M.

### Dye-adsorption capacity of bituminous fly ash and its pozzolanic property after used as dye-adsorbent

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(Suppl. 1) : 85-95

Bituminous fly ash, which is an industrial waste, was used as an adsorbent to remove dyestuff from the textile-dye wastewater. The batch kinetic and isotherm experiments of the synthetic wastewater were firstly conducted to determine the adsorption behavior and optimal conditions for adsorption. The optimal conditions were then applied to the actual textile-dye wastewater. Under the original conditions of fly ash and wastewater, the results indicated that the color could be removed up to 86.65% by 12 g of the fly ash /L of the wastewater within 30 min. Its adsorption was described by the Freundlich isotherm. The dye-adsorbed fly ash was further studied on its pozzolanic property in terms of compressive strength by using it as a partial substitute to Portland cement type I to produce mortar. The result revealed that the highest compressive strength was of the sample containing 10% by weight of the dye-adsorbed fly ash in replacement of cement. It possessed 215 kg/cm<sup>2</sup> at 28 days, which is 92.67% of the sample containing 10% by weight of the original

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok, 10530 Thailand.

Ph.D. (Chemical Engineering) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

E-mail: metta@civil.mut.ac.th

รับต้นฉบับ 11 มีนาคม 2547

รับลงพิมพ์ 16 พฤษภาคม 2547

fly ash in replacement of cement, or 83.33 of the cement mortar. For the environmental concern, leachabilities of lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu) and zinc (Zn) from all mortars were also carried out. No leaching of the heavy metals from any samples could be detected. Hence, the dye-adsorbed fly ash can be used as an environmental friendly construction material.

**Key words :** fly ash, adsorption, pozzolan, compressive strength, leachability, textile-dye wastewater

### บทคัดย่อ

เมตตา เพ็ญผลเจริญ

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมผ้ายีนส์และคุณสมบัติปอซโซลาน

หลังดูดซับสีย้อมของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

ว.สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(ฉบับพิเศษ 1) : 85-95

เถ้าถ่านหินบิทูมินัสซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมได้นำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีฟอกย้อมผ้ายีนส์ โดยในเบื้องต้นใช้น้ำสีสังเคราะห์ในการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสีและหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีของเถ้าถ่านหิน จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาใช้ทดลองกับน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมผ้ายีนส์ ผลการศึกษาพบว่าเถ้าถ่านหิน 12 กรัม/น้ำทิ้ง 1 ลิตรสามารถกำจัดสีได้ถึง 86.65% ในเวลา 30 นาที โดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพใด ๆ ของทั้งเถ้าถ่านหินและน้ำทิ้งสีก่อน โดยสมมูลของการดูดซับสีเป็นแบบ Freundlich Isotherm เมื่อนำเถ้าถ่านหินภายหลังดูดซับสีย้อมแล้วมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานโดยผลิตเป็นมอร์ตาร์พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อแทนที่ที่ 10% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 215 กก./ตร.ซม. ที่อายุบ่ม 28 วัน คิดเป็น 92.67% ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปกติแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนเดียวกัน หรือ 83.33% ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เมื่อศึกษาการชะล้างของโลหะหนักเป็นพิษที่มีอยู่ในสีย้อมผ้า ซึ่งได้แก่ ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) จากมอร์ตาร์พบว่าไม่มีโลหะละลายของโลหะหนักเหล่านี้เกิดขึ้น ดังนั้นมอร์ตาร์นี้จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตจำนวนมาก และในการฟอกย้อมแต่ละครั้งจะเกิดการสูญเสียสีย้อมไปประมาณ 50% เนื่องจากสีย้อมผ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นสีประเภทรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เกิดไฮโดรไลซิสกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำได้ดีกว่าของโมเลกุลสี (Pearce *et al.*, 2003) น้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีฟอกย้อม พบว่าทำการบำบัดได้ค่อนข้างยาก การใช้ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) ร่วมกับโคแอกกูเลชัน (coagulation) หรือโคแอกกูเลชันร่วมกับออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น พบว่ายังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่เนื่องจากสีฟอกย้อมย่อยสลายได้ยาก อีกทั้งยังพบว่าการลดลงของสีของน้ำทิ้งนั้น แท้จริงแล้วเกิดจากการดูดซับสีของจุลชีพ

ที่ใช้ในกระบวนการบำบัด (Grau, 1991) ปัจจุบันงานวิจัยทางด้านการบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้า นิยมใช้วิธีการดูดซับ (Karcher *et al.*, 2001; Al-Ghouti *et al.*, 2003) โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง (Voudrias *et al.*, 2002)

เถ้าถ่านหิน เป็นของเสียอุตสาหกรรมที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าถ่านหินชนิดบิทูมินัสจากจังหวัดระยอง จากข้อมูลของโรงงานในปี พ.ศ. 2546 พบว่ามีปริมาณถึง 50,000 ตัน จากงานวิจัยของ Voudrias และคณะ (2002) พบว่าเถ้าถ่านหินสามารถดูดซับสีย้อมชนิดรีแอคทีฟได้ นอกจากนั้น

เถาถ่านหินยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีตต่างๆ ได้ด้วยเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เพิ่มกำลังรับแรงอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Erdogdu and Türker, 1998; Isaiya *et al.*, 2003) ความทนทานต่อซัลเฟต (บุรฉัตร และ ณรงค์ศักดิ์, 2546; ปริญา และคณะ, 2546) ความทนทานต่อการกัด (อำนาจ, 2540; บุรฉัตร และ ณรงค์ศักดิ์, 2546) ความทนทานต่อความเค็ม (คลอไรด์) และการเกิดสนิม (สุวิมล และคณะ, 2546; Benjamin *et al.*, 2000) เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการทดลองนำเถาถ่านหินชนิดบิทูมินัสมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมผ้าฝ้ายแล้วนำเถาถ่านหินภายหลังการดูดซับสีแล้วไปทดลองใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตมอร์ตาร์ เนื่องจากพบว่าเถาถ่านหินชนิดนี้มีคุณสมบัติปอซโซลาน (เมตตา, 2546; ธีรทรัพย์ และคณะ, 2546) ด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้การบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมเป็นการกำจัดสีอย่างถาวรได้และยังเป็นการนำเถาถ่านหินมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าอีกด้วย

## วัตถุประสงค์และวิธีการศึกษา

### วัสดุที่ใช้

เถาถ่านหินนำมาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าในเขตจังหวัดระยองและนำมาใช้โดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพใดๆ ทั้งสิ้น เช่น ไม่มีการบดหรือคัดแยกขนาด ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเถาถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งได้แก่ การหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของอนุภาคโดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) การหาค่าความละเอียดด้วยวิธี Air Blaine permeability ตามมาตรฐาน ASTM C204 (1997) และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเถาถ่านหินบิทูมินัสด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF)

น้ำสีสังเคราะห์ได้รับอนุเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อมผ้าฝ้ายแห่งหนึ่ง ซึ่งผสมขึ้นเพื่อใช้ฟอกย้อมจริงด้วยความเข้มข้นของสี Benecion dyestuff 15 มก./ลิตร (สีกลุ่มรีแอคทีฟ) ส่วนน้ำทิ้ง นำมาจากน้ำทิ้งของโรงงาน

ฟอกย้อมผ้าฝ้ายสีแห่งเดียวกันนี้ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากบ่อปรับสภาพซึ่งเป็นบ่อน้ำทิ้งรวมและพักให้เศษหรือเส้นใยผ้าตกตะกอน ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสีสังเคราะห์และน้ำทิ้ง ซึ่งได้แก่ ค่า pH และค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่น้ำสีถูกดูดกลืนด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณสี

### การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของเถาถ่านหิน

เนื่องจากน้ำทิ้งสีย้อมมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ หลายชนิด งานศึกษาวิจัยนี้จึงใช้น้ำสีสังเคราะห์ในการศึกษารูปแบบของสมมูลการดูดซับสีของเถาถ่านหิน โดยทดลองหาปริมาณเถาถ่านหินที่เหมาะสมในการดูดซับสีน้ำสีสังเคราะห์ก่อน จากนั้นนำผลที่ได้มาศึกษาระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่สภาวะสมมูลของการดูดซับสี และศึกษารูปแบบของสมมูลการดูดซับสี (adsorption isotherm) ในการทดลองแต่ละครั้งใช้ชุดเครื่องมือจาร์เทสต์ (Jar Test) ซึ่งควบคุมความเร็วของการกวนสัมผัสให้คงที่ที่ 100 รอบ/นาที และทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง เมื่อสิ้นสุดการทดลองเถาถ่านหินจะถูกกรองออก ส่วนน้ำใสนำไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ในขั้นตอนต่อไปได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสีของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้าฝ้ายสี โดยใช้สภาวะต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาการดูดซับสีน้ำสีสังเคราะห์

### การศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถาถ่านหิน

มอร์ตาร์ (คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ) ทุกตัวอย่าง ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย คงที่ที่ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 12 (2532) และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ที่ 0.63 ซึ่งมีความสามารถเทได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 (1997) หล่อมอร์ตาร์ขนาด 5×5×5 ซม. โดยใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มในห้องชื้น 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกนำไปบ่มต่อในน้ำสะอาด และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ตามวิธี ASTM C109 (1997) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตัวอย่างที่ทุกอัตราส่วนที่และทุกอายุบ่มจะ

เตรียมขึ้นอย่างละ 5 ก้อน Table 1 แสดงชื่อเรียกตัวอย่าง และส่วนผสมของแต่ละตัวอย่าง (สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกชื่อตัวอย่างมีดังนี้ STD หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (ไม่มีเถ้าถ่านหิน) และใช้เป็นมอร์ตาร์มาตรฐาน O หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปกติแทนที่ปูนซีเมนต์ และ D หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินหลังดูดซับซีแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนตัวเลขท้ายอักษร หมายถึง ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของเถ้าถ่านหินที่แทนที่ปูนซีเมนต์)

#### การศึกษาการชะล้างของโลหะหนักจากมอร์ตาร์

ตัวอย่างมอร์ตาร์ภายหลังทดสอบกำลังอัดแล้ว นำมาทดสอบการชะละลายของตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ซึ่งเป็นโลหะหนักเป็นพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้านี้ โดยนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสารที่สภาวะ pH 5 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 จากนั้นนำน้ำที่สกัดได้มาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยวิธี atomic absorption spectrometry (AAS)

#### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

#### คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทุมินัส

ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเถ้าถ่านหินด้วยภาพถ่ายขยายกำลังสูงแสดงใน Figure 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

เถ้าถ่านหินชนิดนี้มีขนาดเล็ก มีรูปร่างหลายแบบไม่แน่นอน และมีรูพรุนมาก (Figure 1: A) จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer พบว่า เถ้าถ่านหินมีขนาดเฉลี่ย 42.97 ไมโครเมตร และมีความละเอียด Air Blaine เท่ากับ 3,900 ตร.ซม./กรัม คุณสมบัติเหล่านี้ย่อมส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์แสดงใน Table 2 ซึ่งจะเห็นว่าเถ้าถ่านหินมีออกไซด์หลักคือ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ส่วนปูนซีเมนต์นั้นมีออกไซด์หลักคือแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

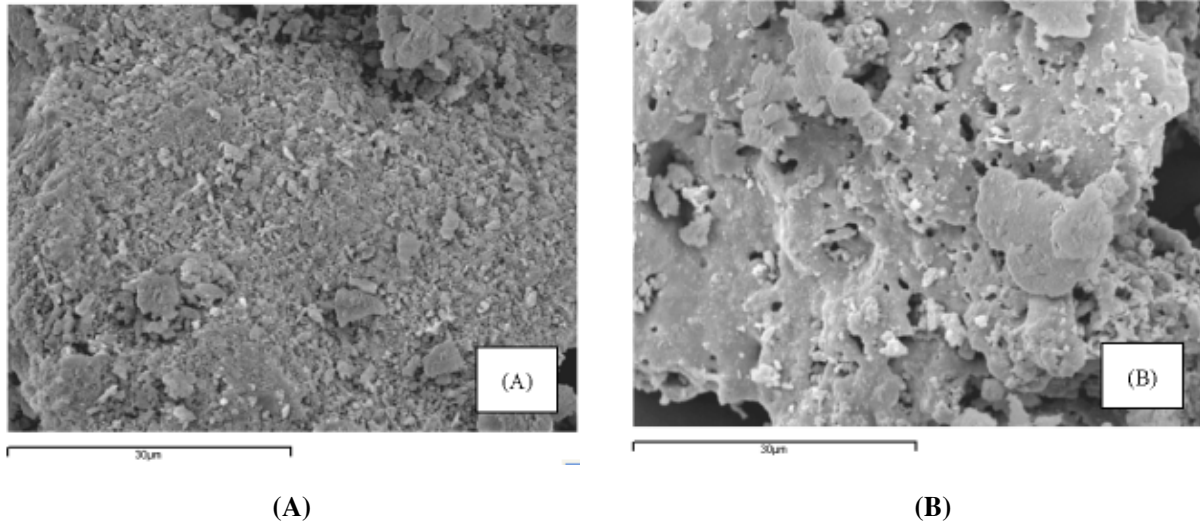
#### ลักษณะสมบัติของน้ำสีสังเคราะห์และน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้ายีนส์

น้ำสีสังเคราะห์มีลักษณะใส สีม่วงแดง มีค่า pH เท่ากับ 6.50 และค่าการดูดกลืนสี (absorbance) เท่ากับ 0.172 ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 539 นาโนเมตร ส่วนน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม พบว่ามีค่า pH ใกล้เคียงกันคือ 6.73 แต่ค่าการดูดกลืนสีเป็น 0.478 ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 522 นาโนเมตร ลักษณะน้ำทิ้งขุ่น และมีสีโทนน้ำตาลแดง

ค่าการดูดกลืนสีและค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่แตกต่างกันระหว่างน้ำสีสังเคราะห์และน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากในน้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของสารต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการย้อม รวมทั้งเศษผ้าและเส้นใยผ้าต่างๆ ซึ่ง

Table 1. Sample name and its composition.

Sample	Binder (g)			Sand (g)	Water (g)
	Cement	Original Fly Ash	Dye-Adsorbed Fly Ash		
STD	56.0	-	-	154	35
O10	50.4	5.6	-	154	35
O20	44.8	11.2	-	154	35
O30	39.2	16.8	-	154	35
O40	33.6	22.4	-	154	35
O50	28.0	28.0	-	154	35
D10	50.4	-	5.6	154	35
D20	44.8	-	11.2	154	35
D30	39.2	-	16.8	154	35
D40	33.6	-	22.4	154	35
D50	28.0	-	28.0	154	35



**Figure 1. Size, shape and texture of the bituminous fly ash:  
(A) Original and (B) Dye-adsorbed.**

ล้วนมีผลต่อค่าการดูดกลืนสีทั้งสิ้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณสีที่มีอยู่ในน้ำทิ้งเริ่มต้นก่อนการทดลองได้

**ปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมในการดูดซับสีน้ำสีสังเคราะห์**  
จากการทดลองโดยใช้เถ้าถ่านหินปริมาณต่างๆ ในช่วง 0-20 กรัม/น้ำสีสังเคราะห์ 1 ลิตร และกวนด้วยความเร็วของการกวนสัมพันธ์ 100 รอบ/นาที เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้กับร้อยละการกำจัดสีดังใน Figure 2 ซึ่งพบว่า

ปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมคือ 12 กรัม/ลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึง 88.14% น้ำสีภายหลังการดูดซับนี้เมื่อสังเกตโดยการมองเห็น พบว่ามีลักษณะใส ไม่มีสี การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินมากกว่า 12 กรัม/ลิตร ถึงแม้จะช่วยให้การลดลงของสีเพิ่มสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพของการกำจัดสีต่อหน่วยตัวดูดซับมีค่าต่ำลงมากซึ่งไม่คุ้มค่าใช้จ่ายในการแยกเถ้าถ่านหินหลังการดูดซับสีออกจากน้ำทิ้ง

**Table 2. Chemical compositions of the bituminous fly ash and Portland cement type I (% by weight).**

Chemical Content	Bituminous Fly Ash	Portland Cement Type I
SiO <sub>2</sub>	38.65	20.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.69	5.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.90	3.10
CaO	18.08	64.99
MgO	2.43	0.91
Na <sub>2</sub> O	1.20	0.07
K <sub>2</sub> O	1.62	0.50
SO <sub>3</sub>	0.06	2.70
Others	1.45	1.38
Loss On Ignition (LOI)	5.92	0.10

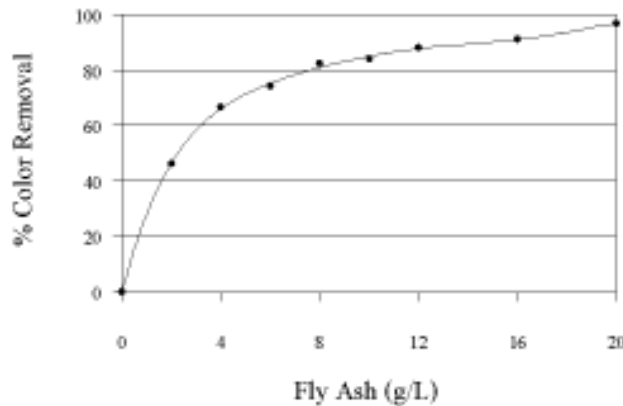


Figure 2. Effect of fly ash dosage on dye adsorption.

ระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับสี การทดลองนี้ใช้ปริมาณเถ้าถ่านหิน 12 กรัม/น้ำสีสังเคราะห์ 1 ลิตร และกวนที่ความเร็วของการกวนสัมผัส 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 0-60 นาที ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีกับร้อยละการกำจัดสีดังใน Figure 3 ซึ่งพบว่า การดูดซับสีของเถ้าถ่านหินจะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาเพียง 30 นาที และที่สภาวะนี้จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึง 88.06%

ไอโซเทอมของการดูดซับสี (Adsorption Isotherms) อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และสารถูกดูดซับ (adsorbent) สามารถอธิบาย

ได้ด้วยไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กรณีของสีฟอกย้อมมี 2 รูปแบบ ได้แก่ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm (Voudrias *et al.*, 2002; Aygun *et al.*, 2003) ดังสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (4)

Langmuir Isotherm:

$$C_s = x/m = (abC_e)/(1+bC_e) \quad (1)$$

หรือ  $C_e/C_s = (1/ab) + (C_e/a) \quad (2)$

Freundlich Isotherm:

$$C_s = x/m = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

หรือ  $\ln C_s = \ln K_F + (1/n) \ln C_e \quad (4)$

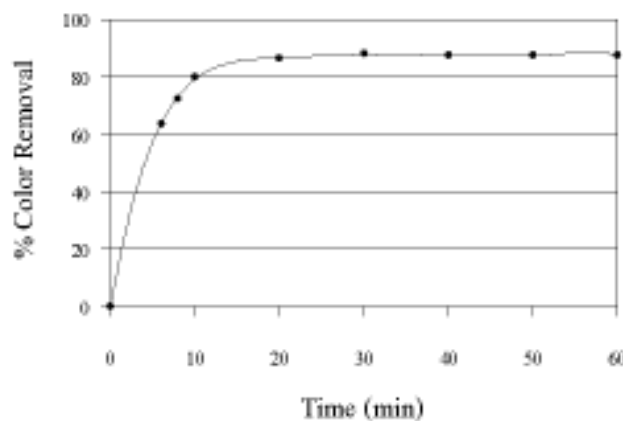


Figure 3. Kinetic of color removal by 12 g/L of the fly ash.

- เมื่อ  $C_s$  คือ มวลของสีที่ถูกดูดซับต่อมวลของเถ้าถ่านหิน
- $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่ในน้ำสี ณ สภาวะสมดุล, มก./ลิตร
- $x$  คือ มวลของสีที่ถูกดูดซับโดยเถ้าถ่านหิน, มก.
- $m$  คือ มวลของเถ้าถ่านหิน, มก.
- $a$  คือ ค่าคงที่
- $b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอิ่มตัว, ลิตร/มก.
- $K_F$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของ Freundlich
- $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง

Langmuir isotherm เป็นรูปแบบของการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวแบบเอกพันธ์

(homogeneous surface) ของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่วน Freundlich isotherm นั้นเป็นรูปแบบของการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) คือนอกจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีอันตรกิริยากับผิวของตัวดูดซับแล้ว ยังมีอันตรกิริยากันเองระหว่างโมเลกุลในชั้นถัดไปด้วย จึงทำให้จำนวนชั้นของการดูดซับได้ไม่จำกัดหรืออาจเกิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มาซ้อนทับกัน อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ เป็นเหตุให้พลังงานที่แหล่งพันธะ (binding sites) มีค่าแตกต่างกัน (Aygün *et al.*, 2003)

ข้อมูลจากการทดลองเมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2) และ (4) ได้กราฟดังใน Figures 4 และ 5 ตามลำดับ

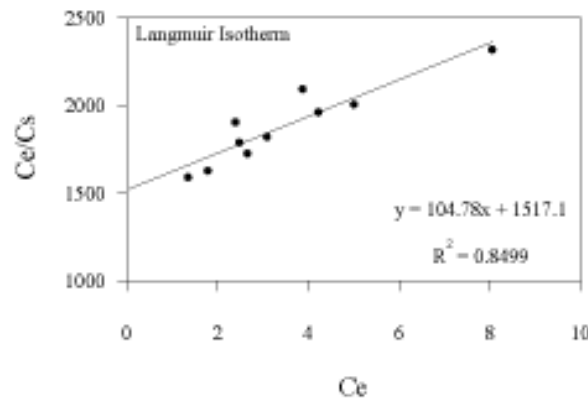


Figure 4. Adsorption isotherm of the dye on the fly ash by Langmuir model.

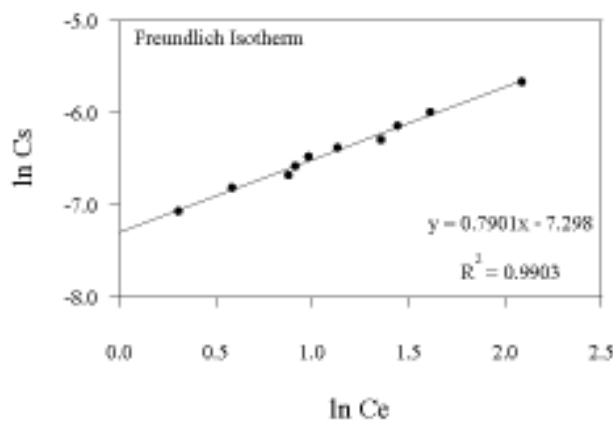


Figure 5. Adsorption isotherm of the dye on the fly ash by Freundlich model.

จากค่า  $R^2$  (linear regression) ของกราฟทั้งสอง จะเห็นได้ว่าการดูดซับของเถ้าถ่านหินมีสมมูลของการดูดซับเป็นแบบ Freundlich เพราะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด พฤติกรรมการดูดซับแบบนี้พบทั่วไปเมื่อการดูดซับนั้นเกิดขึ้นในวัฏภาคน้ำ (aqueous phase) โดยที่ตัวดูดซับมีสถานะเป็นของแข็งและสารถูกดูดซับเป็นชนิดละลายน้ำได้ จากกราฟใน Figure 5 ค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.7901 หรือ  $n$  เท่ากับ 1.27 ค่า  $n$  มากกว่า 1 หมายความว่า การดูดซับนั้นเป็นแบบหลายชั้นจริง

### ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้าฝ้ายสี

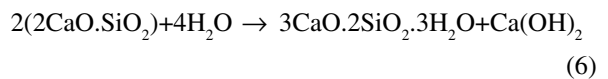
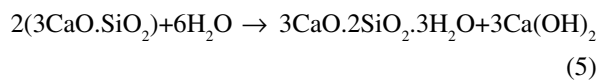
เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะขุ่นจากสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม ทำให้ตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุดของค่าการดูดกลืนสีแตกต่างไปจากของน้ำสีสังเคราะห์ที่ตั้งได้กล่าวแล้วในหัวข้อข้างต้น การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับสีของเถ้าถ่านหินจึงทำการวิเคราะห์จากร้อยละของการลดลงของค่าการดูดกลืนสีโดยตรง (ไม่ได้อ่านจากเส้นตรงมาตรฐาน (standard curve) ระหว่างปริมาณสีกับค่าการดูดกลืนสี) ซึ่งพบว่าที่ความเร็วของการกวนล้มผัสดู 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที เถ้าถ่านหิน 12 กรัม/ลิตร สามารถดูดซับสีของน้ำทิ้งได้ถึง 86.65% น้ำทิ้งที่ได้ภายหลังจากการดูดซับ ยังคงมีลักษณะขุ่นและมีสีแดงเรื่อๆ อยู่บ้าง ถึงแม้จะได้ทดลองใส่เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้นแล้วก็ตาม

### กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทุกตัวอย่างแสดงไว้ใน Figure 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินทุกตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าของ STD ที่ทุกอายุบ่ม และมีค่าแปรตามปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากันพบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินหลังดูดซับสีย้อม (ชุด D) มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปกติ (ชุด O) ทุกตัวอย่างที่ทุกอายุบ่ม (ยกเว้น D40 ที่อายุ 14 วัน) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า STD มีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างสมบูรณ์เมื่ออายุ 56 วัน คือมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 299 เป็น 301 กก./ตร.ซม. ในช่วงอายุ 56 ถึง 90 วัน ในขณะที่

ตัวอย่างที่มีเถ้าถ่านหินทั้งชุด D และชุด O ยังคงมีการพัฒนากำลังอัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นภายหลัง 56 วัน

แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3CaO.SiO_2$  หรือ  $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2CaO.SiO_2$  หรือ  $C_2S$ ) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$  หรือ C-S-H) ดังสมการปฏิกิริยาที่ (5) และ (6) ตามลำดับ (ชัชวาลย์, 2536; Neville, 1995) เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหิน (เรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน”) ได้ C-S-H เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถพัฒนากำลังอัดได้ในระยะยาว (ชัชวาลย์, 2536; Neville, 1995) พฤติกรรมนี้ก็พบในงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานอื่นๆ เช่น เถ้าหนักและเถ้าลอยลิกไนต์ (วิศวะ, 2539; เรืองรุชดี และ ชัย, 2543) เถ้าฟางข้าว (วิยะดา และคณะ, 2542) และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (ชัย และคณะ, 2545) เป็นต้น



การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินต้องอาศัยปริมาณ  $Ca(OH)_2$  จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นสำคัญ เพราะในเถ้าถ่านหินมี CaO เพียง 18.08% เท่านั้น (ดู Table 2) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินย่อมทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำลง งานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้สารปอซโซลานซึ่งมีปริมาณ CaO ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ก็พบว่ามอร์ตาร์มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันนี้ (วิศวะ, 2539; ศรารุณี และบุรฉัตร, 2543; เรืองรุชดี และชัย, 2543; Demirboga, 2002)

จาก Figure 1 จะเห็นได้ชัดเจนว่า เถ้าถ่านหิน D มีลักษณะถูกเคลือบด้วยโมเลกุลสีย้อมที่ผิวนอก (Figure 1: B) ทำให้อุณหภูมิของเถ้าถ่านหินมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการ



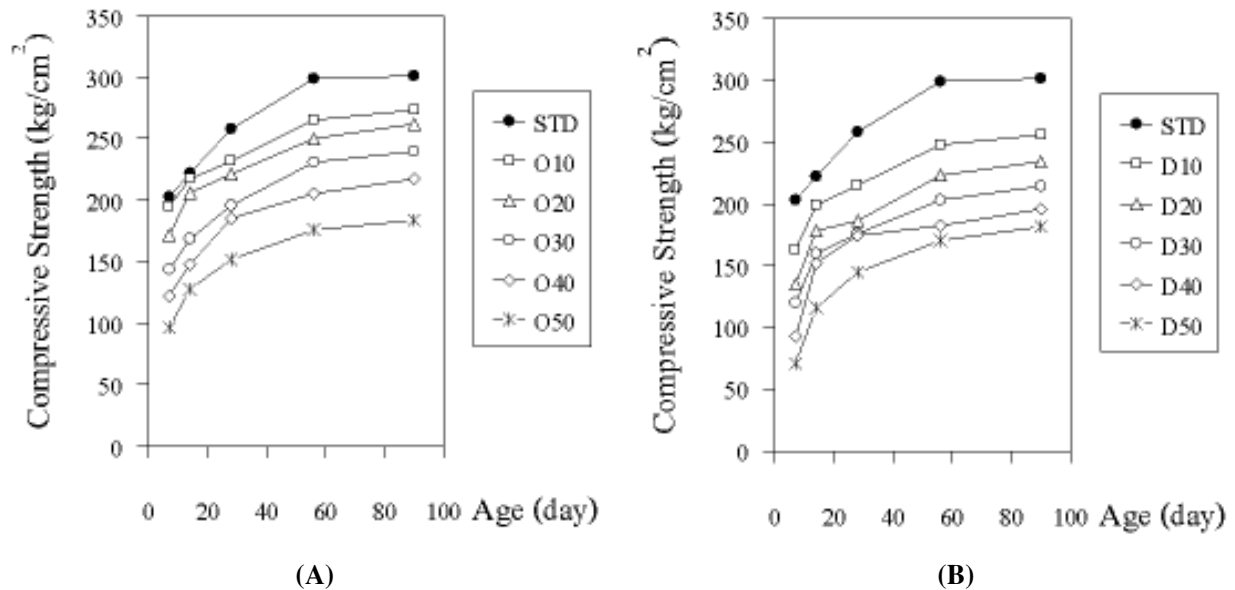


Figure 6. Compressive strength of the sample at various ages and fly ash contents when replacing cement with: (A) the original fly ash and (B) the dye-adsorbed fly ash.

ทำปฏิกิริยาเคมีได้น้อยลง การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดช้ากว่าของเถ้าถ่านหิน O นี่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มอร์ตาร์ชุด D โดยทั่วไปมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ชุด O อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของทั้งสองถือว่าไม่แตกต่างกันนัก สำหรับมอร์ตาร์ชุด D พบว่าตัวอย่าง D10 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและมีค่าเท่ากับ 163, 199, 215, 248 และ 256 กก./ตร.ซม. ที่อายุบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ คิดเป็น 80.30, 89.64, 83.33, 82.94 และ 85.05% ของ STD ตามลำดับ หรือ 83.59, 91.71, 92.67, 93.58 และ 93.77% ของตัวอย่าง O10 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง D10 กับ O10 ได้ค่าสูงขึ้นตามอายุบ่มนั้น (กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ตัวอย่าง D10 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นไปได้ใกล้เคียงกับตัวอย่าง O10 เมื่อบ่มนานขึ้น) อาจเป็นไปได้ว่า ความเป็นต่างจาก  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้คอนกรีตมีค่า pH ประมาณ 12.5 นั้น ไปช่วยละลายกลุ่มโมเลกุลสีย้อมที่เคลือบอยู่บนผิวของอนุภาคเถ้าถ่านหินออกไป เพราะสีย้อมชนิดรีแอคทีฟเกิดไฮโดรไลซิสกับหมู่ไฮดรอกซิลได้ดี

(Pearce *et al.*, 2003) ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินในตัวอย่าง D10 เกิดได้มากขึ้นตามอายุบ่ม

#### ปริมาณการชะล้างของโลหะหนักจากมอร์ตาร์

ลักษณะน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้านี้มีโลหะหนักเป็นพิษ ได้แก่ Pb, Cr, Cu และ Zn ดังนั้นหากมีการนำมอร์ตาร์ชนิด D ไปใช้งานจริงก็ควรมีการศึกษาการชะล้างของโลหะหนักเหล่านี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

จากผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากมอร์ตาร์ชุด D ทุกตัวอย่าง ไม่พบโลหะหนักเหล่านี้ในน้ำสกัด ดังนั้นมอร์ตาร์เหล่านี้จึงสามารถนำมาใช้งานได้จริง

#### บทสรุป

เถ้าถ่านหินบิทูมินัสสามารถใช้ในการกำจัดสีน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมผ้ายีนส์ได้ถึง 86.65% โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของทั้งเถ้าถ่านหินและน้ำทิ้งก่อน โดยพฤติกรรมดูดซับสีมีรูปแบบเป็น Freundlich isotherm

เถาถ่านหินภายหลังดูดซับซีเมนต์แล้วยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อผลิตมอร์ตาร์ได้ด้วย โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดแปรตามปริมาณปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นยังพบว่ามอร์ตาร์เหล่านี้ไม่มีการชะละลายของโลหะหนักเป็นพิษอีกด้วย ดังนั้นมอร์ตาร์นี้จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

#### เอกสารอ้างอิง

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2536. คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC).
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงษ์พา และสุรพันธ์ สุคันธปรีย์. 2545. การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ตุลาคม 2545: MAT-163-MAT-172.
- ธีรทรัพย์ รัตนภาส, วันทยาวัช วงศ์ทองแก้ว, อนเนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. 2546. ผลกระทบของเถาถ่านหินจากหลายแหล่งผลิตต่อกำลังอัดของคอนกรีต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, กาญจนบุรี, 14-16 พฤษภาคม 2546: 109-116.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มากุล. 2546. ความทนทานของซีเมนต์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1, กาญจนบุรี, 14-16 พฤษภาคม 2546: 65-74.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535. เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 114 ตอนพิเศษ 106ง, 13 พฤศจิกายน 2540.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี, สมศักดิ์ พันชมภู และ อาภา สธนเสาวภาคย์. 2546. การศึกษาความต้านทานสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1, กาญจนบุรี, 14-16 พฤษภาคม 2546: 164-167.
- มอก.15 เล่ม 12. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์: วิธีทดสอบการต้านแรงอัดของ

- มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- เมตตา เพ็ญผลเจริญ. 2546. การใช้ประโยชน์จากทรายเถาถ่านหินบิโทมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อผลิตเป็นมอร์ตาร์, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 14(4): 6-13.
- เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2543. การใช้เถาถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลาน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, พฤษภาคม 2543: MAT-13-MAT-18.
- วิยะดา ศรีคำอ่อน, อัญชลี ทิพย์อักษร, จตุพร สัมพันธ์เวชกุล, พิเชษฐ์ น้อยมณี, อารัง เปรมปรีย์ และบุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2542. คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, มีนาคม 2542: MAT-159-MAT-164.
- วิศวะ จักรไพศาล. 2539. ผลกระทบของซีเมนต์เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศราววุฒิ บุษบงศ์ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2543. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมตะกรันเถ้าถลุงที่ไม่ผ่านการบด. ว. สนง. คณะกก. วิจัย ช., 32(1): 53-71.
- สุวิมล สัจจวาณิชย์, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, ไพศาล ลีลาเลอเกียรติ, สุรเชษฐ์ จึงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ. 2546. การป้องกันสนิมในโครงสร้างสัมผัสน้ำเค็มด้วยเถ้าลอย. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1, กาญจนบุรี, 14-16 พฤษภาคม 2546: 176-182.
- อำนาจ เลิศประเสริฐวงศ์. 2540. บทบาทของเถาถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคต่างกันต่อการต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกในมอร์ตาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Al-Ghouti, M.A., Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J. and Ahmad, M.N. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth, J. Environ. Management, 69: 229-238.

- ASTM C109/C109M-95. 1997. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50 mm cube specimens). Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, Vol.04.01: Cement; Lime; Gypsum.
- ASTM C204. 1997. Standard test method for fineness of hydraulic cement by air permeability apparatus. Annual Book of American Society for Testing and Material (ASTM) Standards, Vol.04.01: Cement; Lime; Gypsum.
- Aygun, A., Yeniso-y-Karakas, S. and Duman, I. 2003. Production of granular activated carbon fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties, *Microporous and Mesoporous Materials*, 66: 189-195.
- Benjamin, S.E., Khalid, F.A. and Khan, R.A. 2000. Performance of steel in ordinary Portland, fly ash and slag cement mortars during the hydration period, *J. Mat. Proc. Technol.*, 103: 383-388.
- Demirboga, R. 2002. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and Buildings*, 1469: 1-4.
- Erdogdu, K. and Türker, P. 1998. Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars, *Cem. Concr. Res.*, 28: 1217-1222.
- Grau, P. 1991. Textile industry wastewater treatment, *Wat. Sci. Technol.*, 24: 97-103.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R. 2003. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, *Cem. Concr. Comp.* 25: 69-76.
- Karcher, S., Kornmuller, A. and Jekel, M. 2001. Screening of commercial sorbents for the removal of reactive dyes, *Dyes and Pigments*, 51: 111-125.
- Neville, A.M. 1995. *Properties of Concrete*, 4<sup>th</sup> Ed., Addison Wesley Longman Ltd., Essex, England.
- Pearce, C.I., Lloyd, J.R. and Guthrie, J.T. 2003. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review, *Dyes and Pigments*, 58: 179-196.
- Voudrias, E., Fytianos, K. and Bozani, E. 2002. Sorption-desorption isotherms of dyes from aqueous solutions and wastewaters with different sorbent materials, *Global Nest: the Int. J.*, 4: 75-83.