การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน

นายกฤษณ์ จารุทะวัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2251-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF PALM – FIBER FLY ASH AND BAGASSE FLY ASH

AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT

Mr. Krit Jarutawai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2251-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน
โดย นายกฤษณ์ จารุทะวัย
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กฤษณ์ จารุทะวัย : การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน (UTILIZATION OF PALM – FIBER FLY ASH AND BAGASSE FLY ASH AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ 155 หน้า. ISBN 974-17-2251-6.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด คือ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนากำลังรับแรงอัด และใช้หลักการเลี้ยวเบนโดยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) เพื่อวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสท์ที่ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบลักษณะของน้ำชะจากเถ้าลอยทั้งสองชนิด ตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เพื่อยืนยันความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้ประโยชน์

ผลการทดสอบสมบัติของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย สรุปได้ว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ส่วนความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม......... ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา ......วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม....... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา....................................

ปีการศึกษา.............2545.................. ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม...............................

##4370213221 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : palm-fiber fly ash / bagasse fly ash / cement replacement / compressive strength

KRIT JARUTAWAI : UTILIZATION OF PALM-FIBER FLY ASH AND BAGASSE FLY ASH AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF.ORATHAI CHAVALPARIT, 155 pp. ISBN 974-17-2251-6.

The research was conducted to study the probability in utilization of palm-fiber fly ash and bagasse fly ash as partial cement replacement.materials. These two types of fly ash were used to replace cement for making fly ash – cement mortars. Physical properties, chemical compositions of the two types of fly ash and properties of cement mixed with each type of fly ash were under investigation, including water requirement, setting time and compressive strength. The development of hydration and pozzolanic reactions of each type of fly ash – cement paste was also conducted using X-ray diffraction (XRD) analysis. For safe environment, palm-fiber fly ash and bagasse fly ash were evaluated by performing the leachate extraction procedure described in the Notification of Ministry of Industry No.6 (1997)

The experimental results indicated that palm-fiber fly ash and bagasse fly ash could not be classified as a pozzolanic material according to ASTM C618 requirements. Both types of fly ash – cement mortars showed slightly lower compressive strengths and longer setting times as well as required more water to obtain normal consistency than the control. Palm-fiber fly ash – cement mortars can be used to directly replace portland cement up to 10 percent by weight with a 1:2.75 ratio of binder to sand and a water to binder ratio of 0.485. The 28-day unconfined compressive strength of this optimum mortar mix possessed satisfactory strength of about 85 percent of the control, while bagasse fly ash – cement mortars possessed about 50 percent. Finally, the amounts of all heavy metals in leachates of both palm-fiber and bagasse fly ash met the regulatory limits.

Department …….Environmental Engineering……	Student's signature ………………………..
Field of study …..Environmental Engineering……	Advisor's signature ………………………..
Academic year …………….2002………………….	Co-Advisor's signature……………………....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วง

ขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

ขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์บางส่วนและสถานที่ในการทำงานวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณบริษัททักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ที่อนุเคราะห์เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และขอบคุณบริษัทไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล จำกัด ที่อนุเคราะห์เถ้าลอยชานอ้อย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ขอบคุณบิดา มารดา และน้อง ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอบคุณพิเศษสำหรับคุณนารีรัตน์ พันธุ์มณี สำหรับทุกอย่างที่ช่วยเหลือมาตลอด

ท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ฌ
สารบัญรูป		ฑ
สัญลักษณ์และคำย่อ		ด
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	5
	2.2 การผลิตน้ำตาล	13
	2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	19
	2.4 เถ้าลอย	21
	2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน	25
	2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	27
บทที่ 3	แผนการดำเนินการวิจัย	30
	3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	30
	3.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	31
	3.3 การทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย	32
	3.4 การทดสอบลักษณะน้ำชะจากเถ้าลอย	37
	3.5 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น	38
	3.6 การวิเคราะห์ผลการวิจัย	38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล………………………………………………………………	39
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ…………………………………………………………………	39
4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย…………………………………………	52
4.3 ลักษณะน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย…………………………	70
4.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น………………………...	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ…………………………………………………………	74
5.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย………………………………………………………………	74
5.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย…………………………………………	75
5.3 ลักษณะน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย…………………………	76
5.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น……………………………	76
5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต…………………………………………………	77
รายการอ้างอิง………………………………………………………………………………………	78
บรรณานุกรม……………………………………………………………………………………….	81
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย……………………………………………...	83
ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ………………………………...	88
ภาคผนวก ค มาตรฐาน ASTM ………………………………………………………………	114
ภาคผนวก ง รูปการจัดการเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย……………………...	152
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์………………………………………………………………………..	155

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม................................ 7

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.................. 19

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.................................... 20

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.................. 20

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618-96.. 22

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.. 23

ตารางที่ 2.7 กำลังรับแรงอัดและปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์
และเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม.. 24

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการผสมเพื่อทำ มอร์ตาธรรมดา มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม
และมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
[W/(C+FLY ASH)] เท่ากับ 0.485.. 35

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาตามมาตรฐาน ASTM
C109-95 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1................................ 35

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอย
ลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.. 40

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอย
ชานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์
(ASTM C618-96).. 41

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์... 48

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์... 48

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอย
ชานอ้อย และเถ้าลอยลิกไนต์... 49

ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์ที่มีการแทนที่
ด้วยเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย...................................... 53

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆ ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ในปริมาณต่างๆ กัน.. 55
ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆ ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ในปริมาณต่างๆ กัน.. 55
ตารางที่ 4.9 ร้อยละกำลังแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มเมื่อเทียบกับ มอร์ตาธรรมดา.. 56
ตารางที่ 4.10 ร้อยละกำลังแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับ มอร์ตาธรรมดา.. 56
ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นของน้ำชะ ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย.......... 70
ตารางที่ 4.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม มอร์ตาผสม เถ้าลอยชานอ้อยและร้อยละกำลังแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่อายุการบ่ม 28 วัน.. 71
ตารางที่ 4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน......... 72
ตารางที่ 4.14 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.......................... 73
ตารางที่ ผ1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา (F00).. 84
ตารางที่ ผ2 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (P10).. 84
ตารางที่ ผ3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15).. 84
ตารางที่ ผ4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (P20).. 85
ตารางที่ ผ5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30).. 85
ตารางที่ ผ6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (P40).. 85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (B10)………………………………………………….. 86
ตารางที่ ผ8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B 15)……………………………………………….. 86
ตารางที่ ผ9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (B 20)……………………………………………….. 86
ตารางที่ ผ10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B 30)……………………………………………….. 87
ตารางที่ ผ11 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (B 40)……………………………………………….. 87
ตารางที่ ผ12 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 3 วัน…………………………………………………………... 89
ตารางที่ ผ13 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 7 วัน…………………………………………………………... 90
ตารางที่ ผ14 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 14 วัน………………………………………………………... 91
ตารางที่ ผ15 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 28 วัน………………………………………………………... 92
ตารางที่ ผ16 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 60 วัน………………………………………………………... 93
ตารางที่ ผ17 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย เส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 3 วัน……………… 94
ตารางที่ ผ18 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย เส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 7 วัน……………… 95
ตารางที่ ผ19 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย เส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 14 วัน…………..... 96
ตารางที่ ผ20 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย เส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 28 วัน…………….. 97

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ21 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 60 วัน…………….. 98
ตารางที่ ผ22 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 3 วัน……………..… 99
ตารางที่ ผ23 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 7 วัน………………. 100
ตารางที่ ผ24 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 14 วัน……………... 101
ตารางที่ ผ25 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 28 วัน……………... 102
ตารางที่ ผ26 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 60 วัน…………….. 103
ตารางที่ ผ27 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 3 วัน……………..…. 104
ตารางที่ ผ28 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 7 วัน…………..……. 105
ตารางที่ ผ29 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 14 วัน…………………. 106
ตารางที่ ผ30 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 28 วัน…………………. 107
ตารางที่ ผ31 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 60 วัน…………………. 108
ตารางที่ ผ32 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 3 วัน…………………. 109
ตารางที่ ผ33 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 7 วัน…………………… 110
ตารางที่ ผ34 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 14 วัน…………………. 111

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ35 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 28 วัน...................... 112

ตารางที่ ผ36 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 60 วัน...................... 113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน........ 9

รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง decanter 10

รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง separator........ 11

รูปที่ 2.4 การเผาเส้นใยปาล์มและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา........ 12

รูปที่ 2.5 แผนภูมิการผลิตน้ำตาล........ 16

รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตน้ำตาล........ 17

รูปที่ 2.7 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา........ 18

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย........ 31

รูปที่ 3.2 การดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัด........ 36

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม........ 42

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยชานอ้อย........ 43

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์........ 44

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยลิกไนต์........ 44

รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม........ 46

รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อย........ 46

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบของเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์........ 47

รูปที่ 4.8 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์........ 47

รูปที่ 4.9 ผล XRD ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม........ 50

รูปที่ 4.10 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อย........ 51

รูปที่ 4.11 ผล XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์........ 51

รูปที่ 4.12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มในปริมาณต่างๆ กัน........ 57

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณต่างๆ กัน........ 57
รูปที่ 4.14 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก...... 58
รูปที่ 4.15 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก...... 59
รูปที่ 4.16 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก...... 59
รูปที่ 4.17 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก...... 60
รูปที่ 4.18 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก...... 60
รูปที่ 4.19 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา........ 63
รูปที่ 4.20 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ........ 64
รูปที่ 4.21 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ........ 65
รูปที่ 4.22 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ........ 66
รูปที่ 4.23 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ........ 67
รูปที่ 4.24 ความเข้มของไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ที่ 29.44^{O} 2θ ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) และซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย (BXX) ในปริมาณต่างๆ........ 68
รูปที่ 4.25 ความเข้มของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ 18.08^{O} 2θ ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) และซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย (BXX) ในปริมาณต่างๆ........ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ผ1 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.. 153

รูปที่ ผ2 เส้นใยปาล์ม.. 153

รูปที่ ผ3 เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม.. 153

รูปที่ ผ4 กองชานอ้อยที่ได้จากการหีบ.. 154

รูปที่ ผ5 เถ้าลอยชานอ้อยที่นำไปถมในบ่อ... 154

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BXX	=	มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยหรือ ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย
C_2S	=	$2CaO.SiO_2$, ไดคัลเซียมซิลิเกต
C_3A	=	$3CaO.Al_2O_3$, ไตรคัลเซียมอลูมิเนต
C_3S	=	$3CaO.SiO_2$, ไตรคัลเซียมซิลิเกต
$Ca(OH)_2$	=	คัลเซียมไฮดรอกไซด์
C-S-H	=	คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท
CXX	=	มอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ
$d_{50\%}$	=	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
Fxx	=	มอร์ตาธรรมดาหรือซีเมนต์เพสท์ธรรมดา
LOI	=	Loss On Ignition
PXX	=	มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือ ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม
SEM	=	Scanning Electron Microscope
W/[C+FLY ASH]	=	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
XRD	=	X-Ray Diffraction Spectrometry
XRF	=	X-Ray Fluorescence Spectroscopy

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้น้ำมันปาล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการนำน้ำมันปาล์มไปใช้แทนน้ำมันพืชอื่นๆ ไขมันสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิง ทำให้อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในภาคใต้ของประเทศไทยรวมทั้งสิ้น 52 โรงงานและประมาณการว่ามีการใช้ทะลายปาล์มสดมากกว่า 3 ล้านตันต่อปีเพื่อเป็นวัตถุดิบในการสกัดน้ำมันปาล์ม

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มนอกจากจะมีน้ำเสียเกิดขึ้นแล้ว ยังมีวัสดุเศษเหลือในรูปของแข็ง ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยและกะลาปาล์ม โดยในส่วนของเส้นใยและกะลาปาล์มนั้นจะมีประมาณ 450,000 ตันต่อปี ซึ่งเส้นใยและกะลาปาล์มบางส่วนจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ภายหลังจากการเผาไหม้แล้วจะมีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 5 ดังนั้นประมาณได้ว่าจะมีเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นี้ประมาณ 20,000 ตันต่อปีและเนื่องจากเถ้าลอยนี้ไม่มีธาตุอาหารเพียงพอที่จะใช้เป็นปุ๋ยให้กับต้นปาล์มได้ จึงถูกนำไปกองทิ้งไว้เพื่อรอการนำไปทิ้งต่อไป

น้ำตาลนับเป็นสินค้าออกที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย นอกจากนี้อุตสาหกรรมน้ำตาลยังเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับอุตสาหกรรมอื่นๆ และภาคเกษตรกรรมอีกด้วย กล่าวคือ นอกจากน้ำตาลจะต้องอาศัยอ้อยซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบแล้ว น้ำตาลยังสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร ผลิตภัณฑ์นม น้ำหวาน น้ำอัดลม และผลิตภัณฑ์ยา ฯลฯ อีกด้วย ปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลในประเทศจำนวน 46 โรงงาน ซึ่งมีการใช้อ้อยในแต่ละปีการผลิตประมาณ 50 ล้านตัน

ในกรรมวิธีการผลิตน้ำตาล อ้อยจะถูกทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำเข้าเครื่องหีบเพื่อให้ได้น้ำอ้อยออกมา น้ำอ้อยนี้จะนำไปผ่านกระบวนการทำให้สะอาดและนำเข้าหม้อต้มระเหยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลต่อไป วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นคือ เศษอ้อยที่ผ่านการหีบแล้วหรือที่เรียกว่า ชานอ้อย ปริมาณชานอ้อยในปีการผลิตหนึ่งๆ ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย มีไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งประมาณร้อยละ 30 ของชานอ้อยเหล่านี้ จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานความร้อนกับหม้อต้มระเหยในโรงงานน้ำตาล ภายหลังจากการเผาไหม้

แล้วจะมีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 ดังนั้นประมาณได้ว่าจะมีเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นี้ประมาณ 60,000 ถึง 120,000 ตันต่อปี

ดังนั้นทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ไม่มีราคา เป็นภาระที่ต้องกำจัด อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อถูกลมพัด ซึ่งอาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและอาจเกิดผลร้ายต่อสุขภาพเกี่ยวกับทางเดินหายใจ หากหายใจเอาเถ้าลอยเหล่านี้เข้าไป ถ้าเราสามารถนำเถ้าลอยเหล่านี้ มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ก็จะเป็นการลดภาระในการกำจัดและได้ประโยชน์เพิ่มขึ้นในขอบข่ายของการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ และจากสมมติฐานที่ว่า เถ้าลอยมีขนาดเล็กมาก มีส่วนประกอบทางเคมีและการเกิดคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ธรรมชาติ ดังนั้นถ้าเราสามารถผสมเถ้าลอยลงไปในปูนซีเมนต์ เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของปูนซีเมนต์ และอาจให้คุณสมบัติในการใช้งานบางอย่างดีขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัดในระยะปลาย เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้ประโยชน์ ซึ่งทดสอบโดยใช้เถ้าลอยแต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา

2. เพื่อศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน รวมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้เถ้าลอยทั้งสองชนิดกับการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ในงานก่อสร้าง

3. เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย และเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) โดยใช้ X-Ray Diffraction

4. เพื่อศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้เส้นใยและกะลาปาล์มเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ ซึ่งใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยนำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี

เถ้าลอยชานอ้อย เป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ชานอ้อยเพื่อเป็นพลังงานงานความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยนำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาล บริษัทไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล จำกัด อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี

การวิจัยนี้แบ่งเป็น การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ คือ ส่วนประกอบทางเคมี ความละเอียด ความถ่วงจำเพาะและส่วนประกอบทางแร่ กับการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด คือ ความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาในการก่อตัว กำลังรับแรงอัด ร้อยละกำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา และ X-Ray Diffraction Spectrometry รวมทั้งทำการทดสอบลักษณะน้ำชะจากเถ้าลอยทั้งสองชนิด โดยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure)

ในการวิเคราะห์ผลการวิจัย จะเปรียบเทียบผลกระทบต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมด้วยเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับเถ้าลอยชานอ้อย รวมทั้งเปรียบเทียบผลการวิจัยที่ได้กับการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้จะศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสมบัติที่เปลี่ยนไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับเถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเมื่อผสมกับเถ้าลอยชานอ้อย และทราบสาเหตุของการพัฒนากำลัง โดยผลของ X-Ray Diffraction

2. ทำให้ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากซีเมนต์

3. ผลของการศึกษานี้จะเป็นส่วนช่วยส่งเสริมและสนับสนุน ให้มีการนำเอาเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือในโรงงาน มาใช้ประโยชน์ แทนที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2.1.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยมีกระบวนการผลิตต่างกัน 3 แบบ ประกอบด้วย กระบวนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐาน กระบวนการสกัดน้ำมันแบบทอดผลปาล์ม และกระบวนการสกัดน้ำมันแบบผสม โดยที่แบบมาตรฐานจะมีการใช้น้ำ ส่วนแบบทอดผลปาล์มและแบบผสมนั้นจะไม่มีการใช้น้ำ ซึ่งกระบวนการสกัดที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ในปริมาณมากและให้ผลผลิตในรูปน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพ คือกระบวนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับโรงงานขนาดใหญ่ ที่ใช้เงินลงทุนค่อนข้างสูง

ขั้นตอนของกระบวนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ

1.) การอบ – นึ่งผลปาล์ม

หลังจากที่ผลปาล์มสดได้ผ่านเครื่องชั่งน้ำหนักส่งขึ้นลานเทปาล์มแล้ว ปาล์มสดจะถูกบรรจุลงในกระบะบรรจุปาล์ม และทำการเคลื่อนกระบะจากลานเทเข้าหม้ออบนึ่งโดยใช้รางการอบ จะอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส ความดัน 40-60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลาประมาณ 45-60 นาที การอบผลปาล์มจะช่วยยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม ซึ่งทำให้น้ำมันปาล์มที่สกัดออกมามีคุณภาพต่ำ นอกจากนี้ไอน้ำยังทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มสะดวกต่อการย่อยและการหีบ ทั้งยังทำให้ขั้วหลุดออกจากทะลายได้ง่าย

2.) การนวดแยกทะลายจากผลปาล์ม

ผลปาล์มที่อบหรือนึ่งสุกแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องนวดแยกทะลายจากผลปาล์ม เพื่อนำเฉพาะผลปาล์มมาใช้สกัดน้ำมัน

3.) การกวนผลปาล์ม

ในขั้นตอนนี้ ผลปาล์มจะถูกส่งเข้าหม้อกวน ระหว่างการกวนจะมีการเพิ่มความร้อนด้วยไอน้ำในหม้อกวน เพื่อช่วยให้ส่วนที่เป็นน้ำมันหรือเนื้อเยื่อของผลปาล์มแยกออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดใน ง่ายต่อการหีบหรือบีบน้ำมันออกในขั้นตอนต่อไป

4.) การหีบหรือบีบน้ำมันจากผลปาล์ม

หลังจากผ่านการกวนจากหม้อกวนแล้ว ผลปาล์มจะถูกป้อนเข้าเครื่องบีบน้ำมันปาล์ม ซึ่งขั้นตอนนี้น้ำมันปาล์มจะถูกแยกออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกและส่วนที่เป็นเส้นใย น้ำมันปาล์มจะถูกส่งเข้าผ่านตะแกรงกรองน้ำมันเพื่อกรองเส้นใยและสิ่งเจือปนออก ก่อนนำไปผ่านกรรมวิธีกรองแยก ส่วนเส้นใยจะถูกแยกออกจากเมล็ดในปาล์มที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกและจะถูกส่งไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ เมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือก จะผ่านขั้นตอนการอบ กะเทาะและแยกเมล็ดในจากกะลาต่อไป

5.) การกรองแยกน้ำมันและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มที่ผ่านตะแกรงกรองน้ำมันจะถูกส่งขึ้นถังกรองแยก โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้น้ำมันร้อน จนน้ำมันลอยตัวอยู่ชั้นบนเหนือน้ำแล้วใช้กรวยดักเก็บน้ำมันส่วนบน น้ำมันที่ดักเก็บผ่านกรวยนี้จะผ่านเข้าเครื่องกลั่นน้ำมันให้บริสุทธิ์ เพื่อลดปริมาณความชื้นและสิ่งเจือปนเหลือเพียงประมาณร้อยละ 0.5 หลังจากนั้นน้ำมันปาล์มจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ขจัดความชื้นโดยใช้สุญญากาศ ดูดความชื้นและสิ่งเจือปนจนเหลือประมาณร้อยละ 0.1 น้ำมันปาล์มที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วเป็นน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพได้มาตรฐานและจะถูกส่งเข้าถังเก็บ เพื่อรอส่งออกจำหน่ายต่อไป

สำหรับน้ำตะกอน (sludge) หรือส่วนที่มีน้ำมันปาล์มผสมอยู่กับน้ำในผิวชั้นรองลงมา จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์แยกน้ำมันจากน้ำตะกอน โดยใช้อุปกรณ์ Sludge Separator หรือ Sludge Centrifuge เพื่อให้ได้น้ำมันส่วนนี้ผ่านเข้ากรรมวิธีกรองแยกหมุน หมุนเวียนกลับไปอีกครั้งหนึ่ง

6.) การอบ กะเทาะแยกเมล็ดในจากกะลา

กาก ซึ่งเป็นส่วนผสมของเส้นใยและเมล็ดในจากการหีบน้ำมันจากผลปาล์ม หลังจากเส้นใยถูกแยกออกจากเมล็ดในปาล์มที่ยังไม่กะเทาะเปลือก ส่งป้อนเข้าเตาหม้อไอน้ำแล้ว เมล็ดในปาล์มที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกนี้ จะถูกส่งเข้าไซโลอบเมล็ดในเพื่ออบให้เปลือกหรือกะลาแห้งและกรอบเพื่อให้การกระเทาะด้วยเครื่องกระเทาะเมล็ดในง่ายขึ้น ส่วนผสมของเมล็ดในและเปลือกหรือกะลาที่ได้จะใช้วิธีแยกออกจากกันโดยผ่านเครื่องไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone Separator) กะลาปาล์มจะถูกแยกไปเป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับหม้อไอน้ำ ส่วนเมล็ดในที่กะเทาะเปลือกแล้ว จะถูกส่งไปยังถังอบให้แห้ง ก่อนจะบรรจุกระสอบส่งจำหน่ายต่อไป

7.) การบีบน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ

หลังจากได้เมล็ดใน (Kernel) ที่อบแห้งแล้ว จะนำไปตีให้แตกด้วยเครื่องตีเมล็ดในแล้วบดด้วยเครื่องบดเมล็ดใน ก่อนนำเข้าเครื่องบีบเมล็ดใน กากของเมล็ดในที่ได้จากเครื่องบีบนี้นำไป

บรรจุกระสอบส่งขายเป็นอาหารสัตว์ ส่วนน้ำมันที่ได้จากเมล็ดในจะถูกนำไปกรองเพื่อทำความสะอาดด้วยเครื่องกรองน้ำมันเมล็ดใน ก่อนนำน้ำมันที่ได้เข้าถังเก็บเพื่อรอจำหน่าย ซึ่งเรียกว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ

สำหรับเทคโนโลยีของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำนั้นจะแบ่งเป็น 2 แบบย่อย คือ แบบที่ใช้เครื่อง decanter (รูปที่ 2.2) และแบบที่ใช้เครื่อง separator (รูปที่ 2.3)

2.1.2 <u>วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและการนำไปใช้ประโยชน์</u>

ปริมาณของวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ปริมาณวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม		
ทะลายปาล์มเปล่า	230	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด
เส้นใย	145	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด
กะลา	60	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด
กากตะกอน (เมื่อใช้เครื่อง decanter)	<30	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด
หากใช้กระบวนการสกัดแบบมาตรฐานที่ใช้เครื่อง Separator จะได้		
ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด	892	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด
หากใช้กระบวนการสกัดแบบมาตรฐานที่ใช้เครื่อง Decanter จะได้		
ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด	315	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด

ที่มา : สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540

สำหรับเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยและกะลาปาล์ม เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มนั้น จะเกิดขึ้นในปริมาณประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Joo–Hwa Tay and Kuan–Yeaw Show, 1996)

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือที่เป็นของแข็ง

1.) ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch)

ทะลายปาล์มเปล่าจัดเป็นวัสดุเศษเหลือที่มีปริมาณมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักทะลายปาล์มสด) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่

- ใช้เป็นวัสดุคลุมดินในสวนปาล์ม เพื่อลดการระเหยของน้ำและรักษาความชุ่มชื้นในดินและเป็นการเพิ่มแร่ธาตุให้แก่พืช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การนำขี้เถ้าจากทะลายปาล์มเปล่าซึ่งผ่านการแยกในเตาเผาไปใช้เป็นปุ๋ย
- ใช้ในการในการเพาะเห็ด
- ใช้เป็นวัตถุดิบในการทำวัสดุไส้ในของที่นั่ง ที่นอน

2.) เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)

เส้นใยปาล์มเป็นส่วนนอกของผลปาล์ม ความยาวโดยทั่วไปประมาณ 6.5 ถึง 75 มิลลิเมตร สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เส้นใยปาล์มเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ
- ใช้เป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์ซีเมนต์
- ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์

3.) กะลา (Shell)

กะลาเป็นวัสดุที่เหลือจากการกะเทาะเมล็ดในปาล์ม เพื่อให้เหลือเฉพาะส่วนของเมล็ดในสำหรับการนำไปสกัดน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่

- ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงควบคู่กับการใช้เส้นใยปาล์ม
- ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

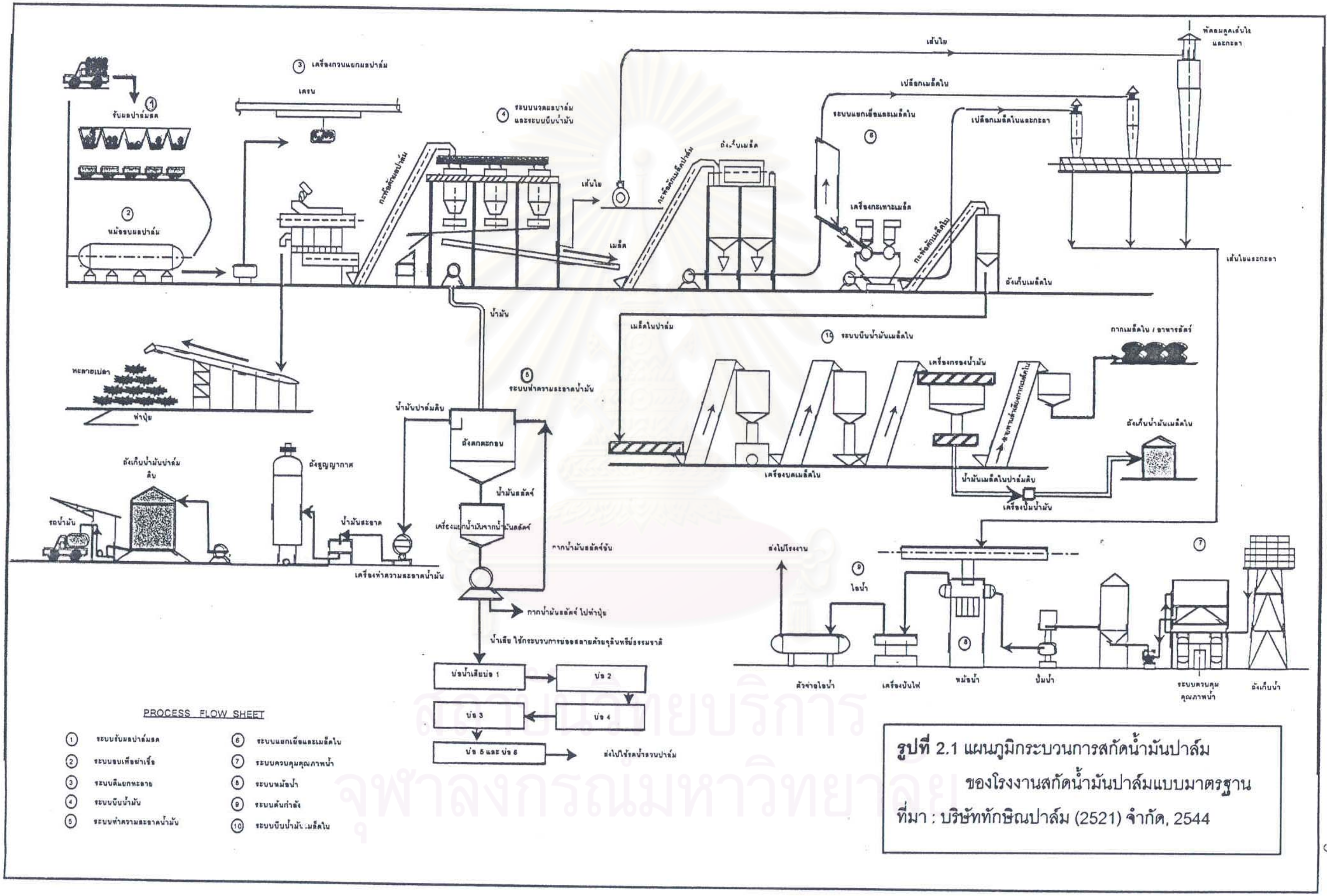
4.) กากตะกอน (Decanter Cake)

เป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานที่ใช้เครื่อง decanter ในการแยกน้ำมันปาล์ม ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่

- ใช้เป็นปุ๋ยให้กับต้นปาล์ม เพราะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่สำคัญ
- ใช้กากตะกอนผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา เป็นวัตถุดิบในการเพาะเห็ดนางฟ้า

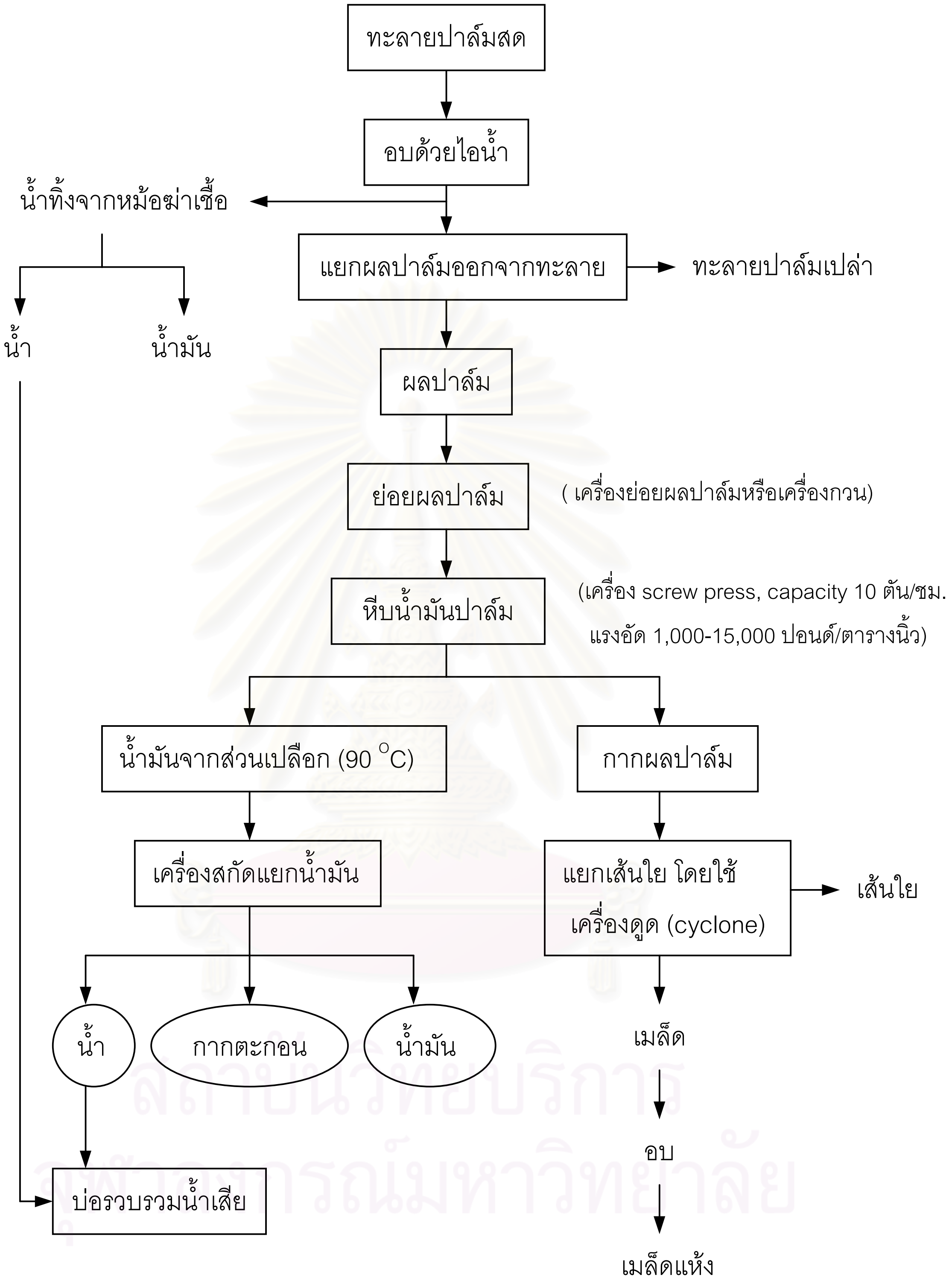
2.1.3 <u>การเผาเส้นใยปาล์มและการจัดการเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่เกิดขึ้น</u>

เส้นใยปาล์มที่เกิดขึ้น จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งไปยังเตาเผาของหม้อไอน้ำเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณทะลายปาล์มสดที่โรงงานรับมาสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการเผาประมาณ 8 ชั่วโมงขึ้นไป ภายหลังจากการเผาจะมีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 5 โดยมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดคล้ายฝุ่น มีสีเทาดำ เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (Cyclone) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 8-500 ไมโครเมตร จากนั้นจะรวบรวมไว้ในบริเวณโรงงาน เพื่อรอการนำไปฝังกลบเมื่อมีปริมาณมาก ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.4



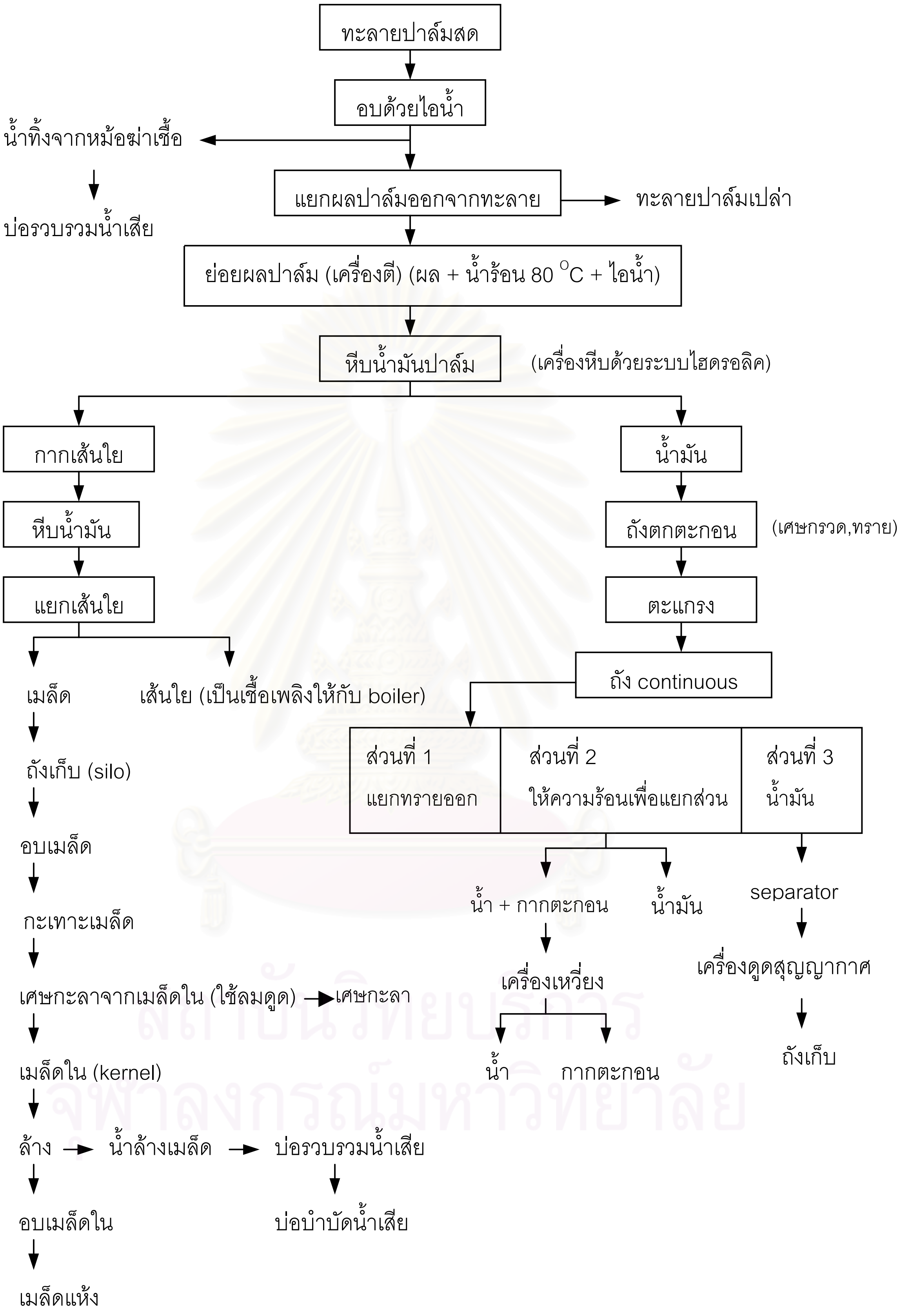
รูปที่ 2.1 แผนภูมิกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน

ที่มา : บริษัททักษิณปาล์ม (2521) จำกัด, 2544



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง decanter

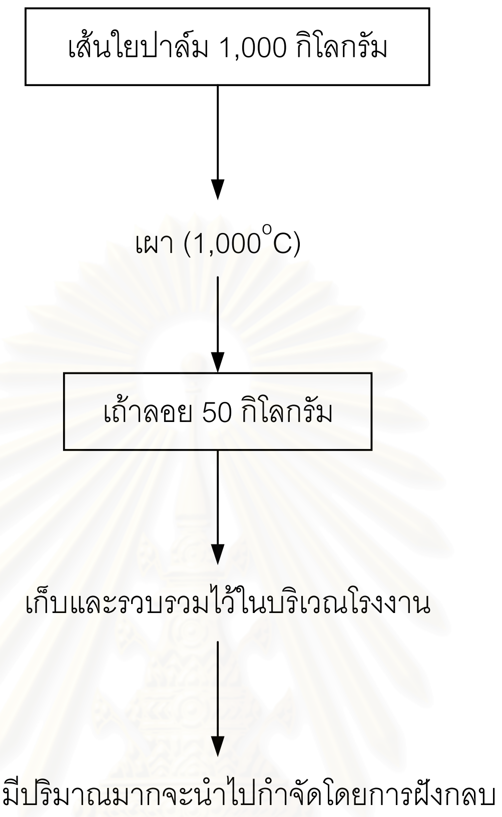
ที่มา : ดัดแปลงจาก สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11, 2543



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง separator

ที่มา : ดัดแปลงจาก สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11, 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 การเผาเส้นใยปาล์มและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การผลิตน้ำตาล

2.2.1 <u>กระบวนการผลิตน้ำตาล</u>

แผนภูมิโรงงานผลิตน้ำตาลแสดงในรูปที่ 2.5 และกระบวนการผลิตน้ำตาลแสดงใน รูปที่ 2.6 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.) การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกย่อยอ้อย (shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

2.) การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมาก ที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เยื่อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆได้

3.) การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ขุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่างอ่อน ดังนั้น จึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำน้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกโดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลางและปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวานกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนกากตะกอน (filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

4.) การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (syrup) ในหม้อสุดท้าย มีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อม หลังจากผ่าน

ตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสควิท (Massecuite) เมื่อทำให้แมสควิทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็งพร้อมที่จะนำไปแยกผลึกต่อไป

5.) การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสควิทที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆขนาด 400-600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดัง เพื่อการจำหน่ายต่อไป

2.2.2 <u>วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์</u>

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอนและเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

1.) กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียม อินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับชานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

2.) กากอ้อยหรือชานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ชานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี่ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก

- ใช้ทำเยื่อกระดาษ

- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้น โดยปริมาณชานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณชานอ้อยทั้งหมด ที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ชานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือชานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

3.) กากตะกอนอ้อย (Filter Cake)

เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล หลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและคัลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

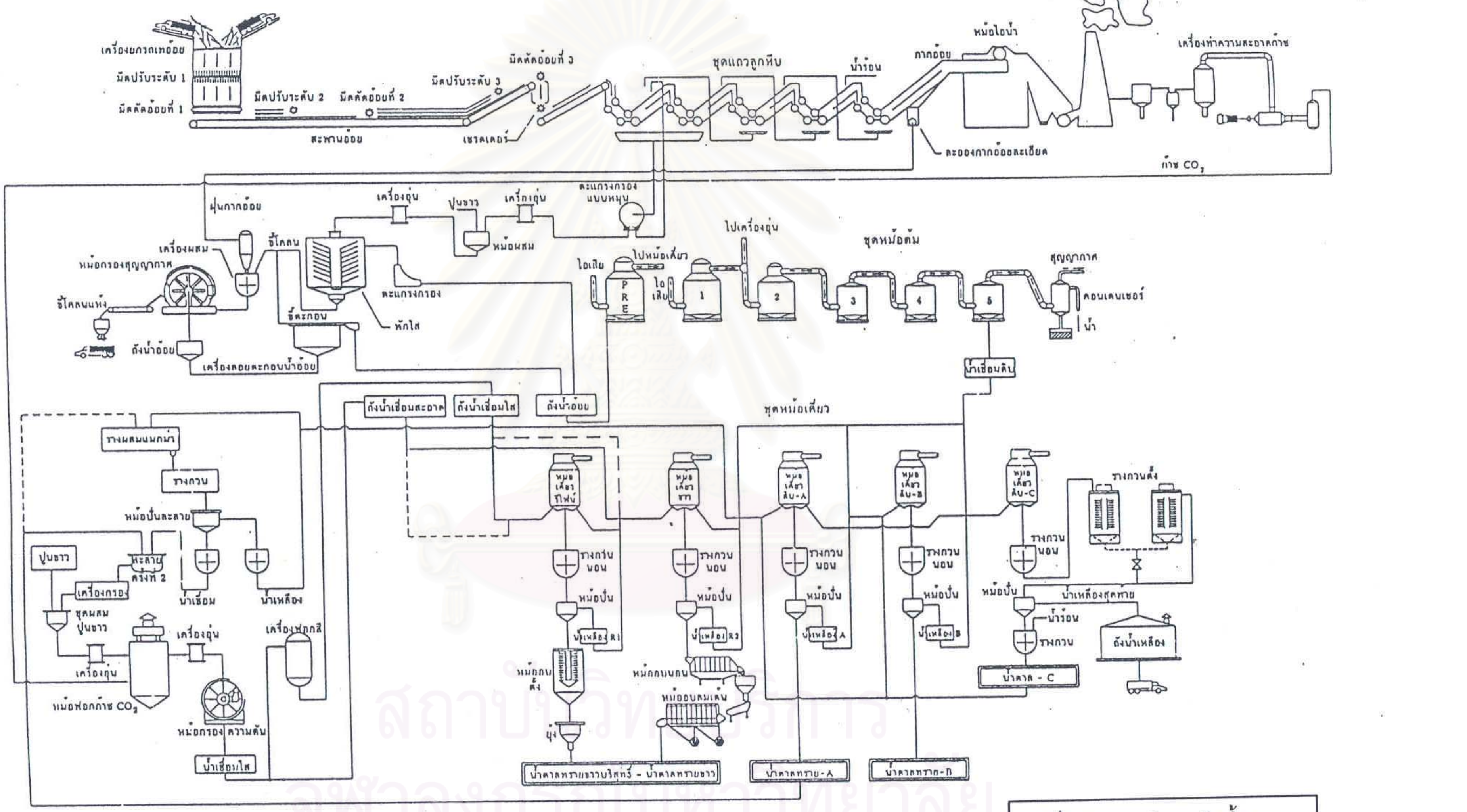
4.) เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse Fly Ash)

เถ้าลอยนี้ เกิดจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจาย จึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอย ให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง

2.2.3 <u>การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้น</u>

ชานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อย จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดเถ้าลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet Collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนเถ้าที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุก เพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้ ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.7

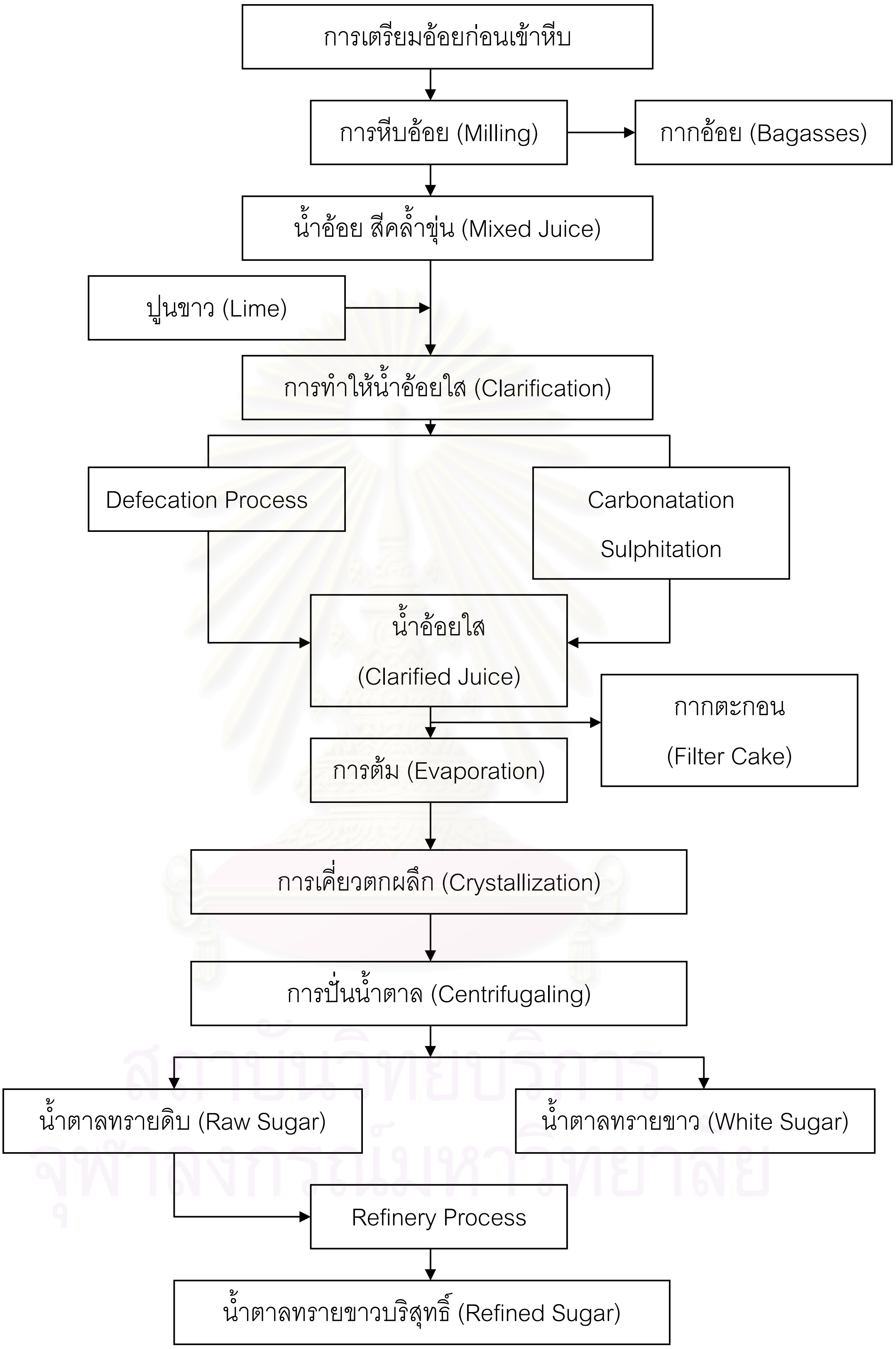
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 แผนภูมิการผลิตน้ำตาล

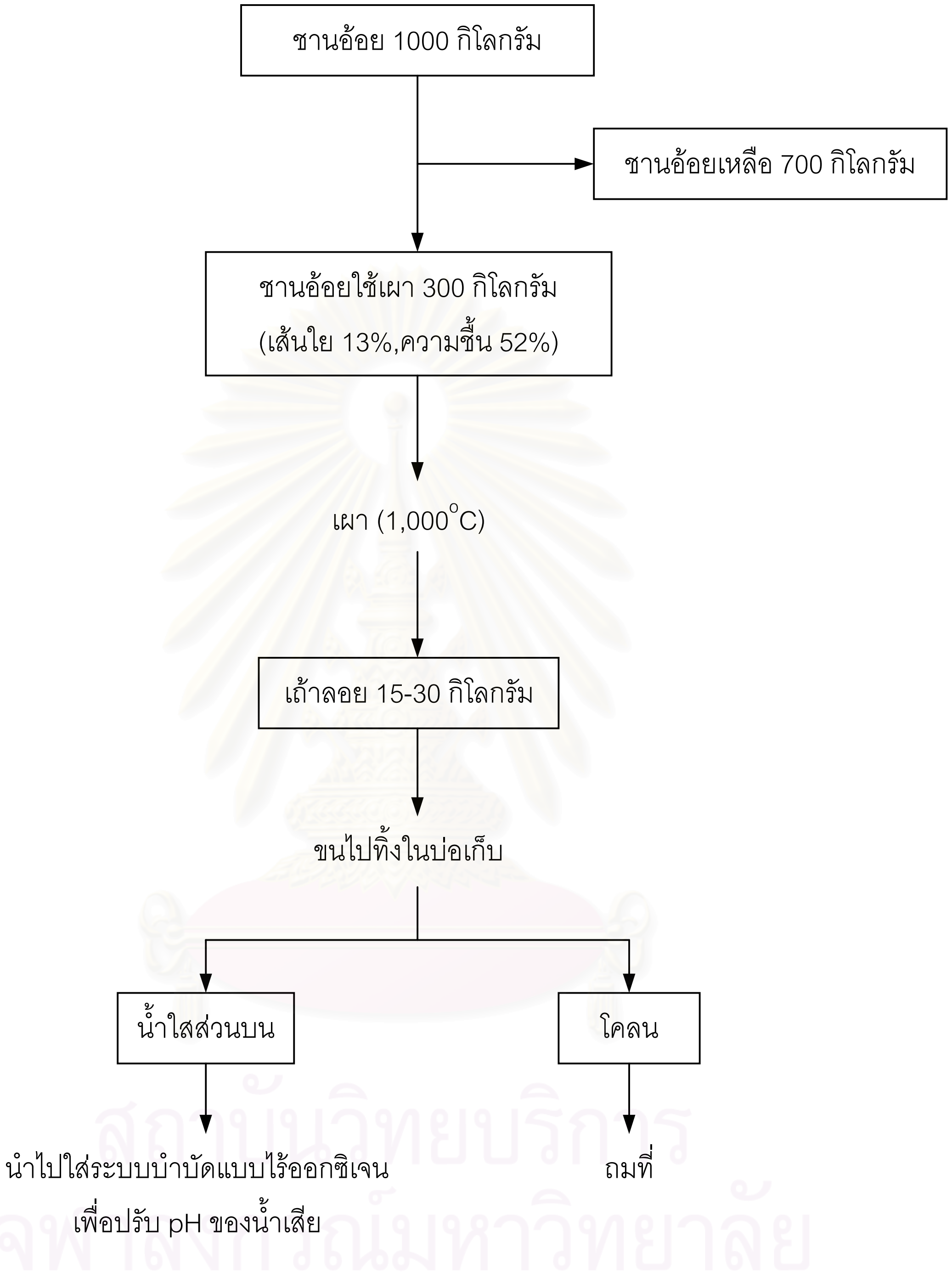
ที่มา : สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตน้ำตาล

ที่มา : ดัดแปลงจาก อัสวิทย์, 2540



รูปที่ 2.7 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตา (mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

2.3.1 <u>วัตถุดิบ</u>

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ให้ธาตุคัลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกาและอลูมิน่าเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

2.3.2 <u>องค์ประกอบทางเคมี</u>

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วย ออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 - 25
Al_2O_3	3 - 8
Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na_2O+K_2O	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 - 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรคัลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO.SiO_2$	C_3S	33-55
ไดคัลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Sillcate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S	15-35
ไตรคัลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	7-15
เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	5-10

2.3.3 <u>อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ตาหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาหรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X–Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสาน คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) คือ เถ้าส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ มีขนาดเล็กมาก และอาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆไป ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของเถ้าลอยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าลอยบางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) จึงมีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

หน่วยงานวิจัยหลายแห่งได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่น ในสหรัฐอเมริกามี American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นต้น นอกจากที่สหรัฐอเมริกาแล้ว ที่อังกฤษ แคนาดา เยอรมัน เนเธอร์แลนด์ ญี่ปุ่นและอีกหลายประเทศในโลก ล้วนมีมาตรฐานของตนเองในการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

2.4.1 <u>ส่วนประกอบทางเคมี</u>

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ

2.4.2 <u>คุณสมบัติทางกายภาพ</u>

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่สำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเผาไหม้และลักษณะการเผาไหม้ โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 จนถึง 0.15 มิลลิเมตร

2.4.3 <u>ประเภทของเถ้าลอย</u>

ตามมาตรฐาน ASTM C618 – 96 แบ่งประเภทของวัสดุผสมในคอนกรีตเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ ชั้นคุณภาพ N, F และ C โดยกำหนดองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618 - 96

คุณสมบัติ		ประเภทของวัสดุผสม		
		N	F	C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	%น้อยที่สุด	70.0	70.0	50.0
SO_3	%มากที่สุด	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น	%มากที่สุด	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	%มากที่สุด	10.0	6.0	6.0
Pozzolanic Index	%น้อยที่สุด	75.0	75.0	75.0

ชั้นคุณภาพ N คือ วัตถุดิบหรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่เป็นผง เช่น ดินบางชนิด หินชนวน หินหรือเถ้าภูเขาไฟ เป็นต้น ซึ่งหินและดินต้องผ่านกระบวนการแปรสภาพให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน

ชั้นคุณภาพ F คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ซึ่งเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic)

ชั้นคุณภาพ C คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นอกจากจะมีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic) แล้ว ยังมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) อีกด้วยและอาจจะมี CaO อยู่มากกว่าร้อยละ 10

2.4.4 <u>การใช้เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash) เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ในประเทศไทยมีการใช้ถ่านหินลิกไนต์ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่อำเภอ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่เกิดขึ้นถูกนำมาศึกษาและทดสอบเพื่อใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์ จนเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ในงานก่อสร้าง เช่น งานก่อสร้างเขื่อน งานทำถนนและงานก่อสร้างทั่วไป เป็นต้น

เนื่องจากการเกิดขึ้นของเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เหมือนกับการเกิดขึ้นของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล กล่าวคือ เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงเหมือนกัน ซึ่งเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คือ ถ่านหินลิกไนต์ ส่วนเชื้อเพลิงของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและโรงงานผลิตน้ำตาล คือ เส้นใยปาล์ม

และชานอ้อย ตามลำดับ ทำให้เกิดแนวคิดว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานซีเมนต์และคอนกรีตได้เหมือนกับเถ้าลอยลิกไนต์

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตัวอย่างที่ทดสอบ	เถ้าลอยลิกไนต์					เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ผู้วิจัย	ปริญญา ตัวอย่าง 1 (2528)	ปริญญา ตัวอย่าง 2 (2528)	อุดม (2532)	วาสนา (2538)	มนตรี (2543)	จักพล (2543)	ปริญญา (2528)
ส่วนประกอบทางเคมี (%)							
SiO_2	12.03	15.05	35.43	43.70	41.86	76.65	20.20
Al_2O_3	5.89	7.01	28.27	26.60	25.17	0.77	5.42
Fe_2O_3	17.33	19.37	14.57	12.30	12.84	2.26	2.92
CaO	39.46	32.99	11.92	8.80	9.59	5.83	63.82
K_2O	0.78	1.08	2.48	-	3.11	6.99	0.46
MgO	4.59	4.69	2.13	3.30	2.03	4.52	1.52
SO_3	11.46	14.00	2.35	1.40	1.28	0.44	2.55
L.O.I.	6.33	3.41	-	0.70	0.44	11.06	2.72
ความละเอียด	2,550 ซม.^{2}/กรัม	3,580 ซม.^{2}/กรัม	7 ไมโครเมตร	-	-	-	2,500 ซม.^{2}/กรัม
ความถ่วงจำเพาะ	2.90	3.00	2.56	2.47	-	-	3.12

หมายเหตุ 1.) "-" คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

2.) ปริญญา (2528) หาความละเอียดในรูปพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus)

3.) อุดม (2532) หาความละเอียดเป็นขนาดอนุภาค โดยใช้การส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope)

ที่มา : ดัดแปลงจาก ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (2528), อุดม หงษ์ประธานพร (2532), วาสนา สามห้วย (2538), มนตรี นิธิกุล (2543) จักพล กลั่นมั่นคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร(2543)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 กำลังรับแรงอัดและปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

ผู้วิจัย	ปริมาณการแทนที่	ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)							
			1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
อุดม	0%	0.560	157.0	230.0	273.0	313.0	350.0	380.0	392.0	429.0
ปริญญา ตย.1		0.535	-	204.6	277.1	-	366.8	-	444.6	484.4
ปริญญา ตย.2		0.535	-	204.6	277.1	-	366.8	-	444.6	484.4
จักพล		0.668	107.0	243.0	337.0	385.0	476.0	545.0	568.0	-
อุดม	10%	0.540	145.0	233.0	297.0	316.0	373.0	437.0	460.0	488.0
จักพล		0.775	80.0	152.0	206.0	215.0	318.0	351.0	369.0	-
อุดม	15%	0.535	137.0	235.0	265.0	292.0	366.0	405.0	436.0	442.0
อุดม	20%	0.535	140.0	201.0	247.0	308.0	343.0	401.0	453.0	482.0
ปริญญา ตย.1		0.513	-	187.8	265.7	-	389.4	-	454.0	528.3
ปริญญา ตย.2		0.513	-	175.9	224.0	-	386.2	-	465.6	553.5
จักพล		0.840	58.0	107.0	136.0	189.0	197.0	229.0	250.0	-
อุดม	30%	0.530	122.0	175.0	194.0	266.0	306.0	368.0	385.0	405.0
จักพล		0.945	38.0	63.0	101.0	110.0	132.0	180.0	192.0	-
อุดม	40%	0.520	100.0	166.0	196.0	222.0	308.0	351.0	369.0	388.0
ปริญญา ตย.1		0.499	-	80.3	120.9	-	263.5	-	411.6	441.8
ปริญญา ตย. 2		0.499	-	112.4	152.0	-	285.7	-	461.8	512.5
จักพล		0.965	28.0	53.0	72.0	79.0	90.0	131.0	135.0	-

หมายเหตุ 1.) อุดม, ปริญญา ตัวอย่าง 1 และปริญญา ตัวอย่าง 2 ทดสอบโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ จักพล ทดสอบโดยใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

2.) "-" คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

3.) อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 2.75

4.) ค่าการไหลแผ่ เท่ากับ 105-115 %

ที่มา : ดัดแปลงจาก ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (2528), อุดม หงษ์ประธานพร (2532), จักพล กลั่นมั่นคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร(2543)

ดังนั้นผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ จะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงสมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยเส้นใยปาล์มรวมทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากงานวิจัยที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะและเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมาทำการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และแสดงความข้นเหลวปกติหรือปริมาณน้ำที่ต้องการในการผสมมอร์ตาที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มในปริมาณต่างๆ รวมทั้งแสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มนั้นๆในตารางที่ 2.7

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าความต้องการน้ำมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคที่กลมละเอียดของเถ้าลอยลิกไนต์ทำให้มอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์อัดตัวแน่นได้ โดยไม่ต้องการน้ำมาก ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์นี้จะไปแทนที่ช่องว่างในส่วนผสมแทนน้ำ (อุดม หงษ์ประธานพร, 2532) ส่วนความต้องการน้ำของมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่ใหญ่ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มทำให้ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างในส่วนผสมได้และยังทำให้ส่วนผสมมีช่องว่างมากขึ้น ซึ่งน้ำจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างนั้น ทำให้ต้องการน้ำมากขึ้น (จักพล กลั่นมั่นคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, 2543) ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณต่างๆ จะลดลง โดยเฉพาะในช่วงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาธรรมดา แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจใกล้เคียงหรือมากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา หากผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งแตกต่างกับค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่มีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาธรรมดาทุกอายุการบ่ม เนื่องจากอนุภาคที่ใหญ่ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุปลายต่ำ

สำหรับระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เมื่อผสมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มในปริมาณต่างๆ พบว่า ระยะเวลาในการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะลดลงซึ่งเป็นการลดสารที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) อีกทั้งเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่เติมลงไปนั้นก็ยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุต้น

2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.5.1 <u>ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น</u> (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยมีสารตั้งต้นคือคัลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์และ

น้ำ (H_2O) เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่เรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (Cement Gel) ประกอบด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด ประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide; $Ca(OH)_2$) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพลสท์จะขึ้นอยู่กับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท เพราะมีปริมาณสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ มีผลึกหยาบ ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนในรูป สมการเคมี ได้ดังนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อเนื่องโดยที่คัลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจากคัลเซียมซิลิเกต ($CaO.SiO_2$) เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก หากมีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.5.2 <u>ปฏิกิริยาปอซโซลาน</u> (Pozzolanic Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นคือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2\,Al_2O_3.3H_2O$$

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีผลต่อการเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า จึงทำให้คอนกรีตซึ่งใช้เถ้าลอยบางชนิด (Class F) แทนที่ซีเมนต์บางส่วน มีสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าปกติ จึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าจึงทำให้เกิดการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นด้วย แต่ในกรณีของเถ้าลอยบางชนิด (Class C)

ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งในลักษณะเชื่อมประสาน (Cementitious) และปอซโซลาน (Pozzolanic) การพัฒนากำลังในช่วงต้นอาจไม่แตกต่างมากนัก (เมธี เวชารัตนา, 2535 อ้างถึงใน มนตรี นิธิกุล, 2542)

2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

การศึกษาที่ผ่านมาส่วนมากเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีต โดยในประเทศไทย คือ เถ้าลอยลิกไนต์ จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งจะศึกษาในเรื่องผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ที่เกิดจากปัจจัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยที่ผสมลงไป รวมทั้งผลของอุณหภูมิการบ่มและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอย ซึ่งรวบรวมได้ดังนี้

<u>ผลกระทบของขนาดเถ้าลอยและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด</u>

อุดม หงษ์ประธานพร (2532) ศึกษาถึงการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ โดยใช้เถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาอิฐในจังหวัดราชบุรี พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แต่ในอัตราการแทนที่ของเถ้าทั้งสองที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 20 จะให้การพัฒนากำลังในช่วงแรกต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงอายุหลังจะให้กำลังที่สูงกว่าและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอยกับเถ้าแกลบพบว่าเถ้าลอยให้การพัฒนากำลังดีกว่าเถ้าแกลบ เนื่องจากมีอนุภาคละเอียดกว่าซึ่งทราบได้จากภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope)

จักพล กลั่นมั่นคง และคณะ (2543) ได้ทำการศึกษาถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งใช้ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน 3 ตัวอย่าง คือ เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 28.4 โดยน้ำหนัก และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำโดยการร่อนเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนผ่านน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C430 และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตา โดยเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด ผลการศึกษาพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ถูกบดละเอียดมีศักยภาพที่จะพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บดนั้นไม่มีศักยภาพพอ โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่อายุ 7 และ 28 วัน ซึ่งพบว่าที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็น

ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก จะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 28.4 โดยน้ำหนัก

Nontananandh (1990 อ้างถึงใน วาสนา สามห้วย, 2538) ได้สรุปว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถสังเกตได้จากการลดลงของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ โดยใช้ X-Ray Diffraction เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจาก $Ca(OH)_2$ และเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสารประกอบ คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) เอททรินไกต์ (ettringite; $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) คัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) และคัลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เป็นสาเหตุของการพัฒนากำลังในคอนกรีต

Tay และ Show (1996) ศึกษาการนำเถ้าจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบการใช้เถ้าจากกะลาปาล์มและเส้นใย (Shell-Fiber Ash) กับเถ้าจากทะลายปาล์มเปล่า (Bunch Ash) แทนที่ซีเมนต์ แล้วทดสอบคุณสมบัติต่างๆของซีเมนต์และคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติในการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อผสมเถ้ามากขึ้น แต่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของเถ้าจากกะลาและเส้นใย จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ที่อายุการบ่ม 28 วัน

Frias และ Sanchez (1997) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (microstructure) ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยและปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่ออนุภาคและขนาดช่องว่างในโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่า ความละเอียดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกระทบกันของอนุภาคนานขึ้น เถ้าลอยบางอนุภาคอาจเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการกระทบ ทำให้อนุภาคหลังกระทบเสียลักษณะทรงกลม และยังพบว่า ความพรุนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นหลังจากอายุประมาณ 28 วัน และเพิ่มขึ้นตามอายุ กำลังของมอร์ตาลดลงแบบเส้นตรงเมื่อความพรุนรวมมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อส่วนผสมของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาจะลดลงในระยะต้น

<u>ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความทนทาน</u>

Maltais และ Marchand (1997) ศึกษาอุณหภูมิของการบ่มต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังของมอร์ตาผสมเถ้าลอย Class F ที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า 45 ไมโครเมตร ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ขนาดเถ้าลอยจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อายุช่วงแรกเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มมีผลต่อการลดกำลังอัดในระยะยาวของ

มอร์ตาธรรมดา แต่ไม่มีผลเชิงลบต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยในระยะยาว ในช่วงต้นโครงสร้างของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ของทั้งมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาธรรมดาไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่อายุน้อยกว่า 28 วัน อิทธิพลของเถ้าลอยต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ไม่ปรากฏชัดทุกอุณหภูมิการบ่มของเถ้าลอยทั้งสองชนิด แต่จะปรากฏชัดเจนขึ้นหลังจากอายุ 28 วัน ไปแล้ว นอกจากนั้นแล้ว เถ้าลอยที่ขนาดละเอียดกว่ามีผลต่อการเพิ่มความแน่นของโครงสร้างภายใน เนื่องจากปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และเอททรินไกต์ (Ettringite; $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) ที่เพิ่มขึ้น

Wangwichit (1997) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการต้านทานความซึมได้ของคลอไรด์ โดยวัดความลึกของการซึม โดยแบ่งอุณหภูมิการศึกษาเป็น 3 อุณหภูมิ คือ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่ามอร์ตาธรรมดามีความลึกในการซึมได้ของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยมีความลึกของความซึมลดลง การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (water to binder ratio) มีผลต่อการเพิ่มความลึกในการซึมได้ของคลอไรด์ในมอร์ตาทั้งสองชนิด แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยมีความลึกของความซึมมากกว่ามอร์ตาธรรมดา ส่วนที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส มอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยให้ผลดีต่อการต้านทานความซึมได้ของคลอไรด์ได้มากกว่า สำหรับผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ พบว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความลึกของซึมได้ในมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์สูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ความลึกของการซึมได้ในมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอย ค่อนข้างคงที่ทุกระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์

Weiping และ Brown (1997) ได้ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ และ $CaSO_4.2H_2O$ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแปรตามปริมาณการเติม $Ca(OH)_2$ หรือ $CaSO_4.2H_2O$ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ไตรคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรทและเอททรินไกต์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกันกับที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ และเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวต่ำ (low-lime ash) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะยังไม่เกิดในช่วงแรก แต่หากใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวสูง (high-lime ash) จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นมีผลในการเพิ่มสารเชื่อมประสานโดยตรง จากการศึกษาพบว่าระดับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ระดับอุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างช้าๆ แต่เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วและเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง 24 ชั่วโมงแรก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

บทที่ 3

แผนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ซึ่งผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C150-95a

3.1.2 เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้เส้นใยและกะลาปาล์ม เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยนำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัททักษิณปาล์ม (2521) จำกัด อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี

3.1.3 เถ้าลอยชานอ้อย

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ชานอ้อย เพื่อเป็นพลังงานความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยนำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาล บริษัทไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล จำกัด อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี

รูปแสดงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.4 ทราย

ทรายที่ใช้ผสมมอร์ตาเป็นทรายแม่น้ำ มีลักษณะเป็นทรายหยาบ เม็ดอนุภาคมีเหลี่ยมมุม ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C778-92a

3.1.5 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำประปา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

3.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

3.2.1 <u>ส่วนประกอบทางเคมี</u>

ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยทั้งสองชนิด ทดสอบหาโดยวิธีการวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy โดยเครื่อง Philips XRF Spectrometer Model 2400

3.2.2 <u>ความละเอียด</u>

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยทั้งสองชนิดจะหาใน 3 ลักษณะ คือ

1.) <u>ลักษณะอนุภาค</u>

ทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อดูรูปร่างและลักษณะผิวของอนุภาคว่าเป็นอย่างไร โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกยึดติดในแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเล็กๆ และฉาบผิวด้วยโลหะผสมระหว่างทองกับแพลเลเดียม (gold-palladium alloy)

2.) <u>การกระจายขนาด</u>

ทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Malvern Particle Size Analyzer Model Mastersizer 2000) ซึ่งสามารถวัดขนาดได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นผงแห้งและที่เป็นของเหลว โดยในการวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่เป็นผงแห้ง และเครื่องนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.02 ถึง 2000 ไมโครเมตร ทำการทดสอบเพื่อศึกษาว่า ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีการกระจายตัวอย่างไรและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($d_{50\%}$) เท่าไร

3.) <u>พื้นที่ผิวจำเพาะ</u>

ทดสอบโดยเครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C204-96 ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้มีหน่วยเป็น พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก

3.2.3 <u>ความถ่วงจำเพาะ</u>

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยทั้งสองชนิด หาโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าดตามมาตรฐาน ASTM C188-95

3.2.4 <u>ส่วนประกอบทางแร่ของเถ้าลอยทั้งสองชนิด</u>

เถ้าลอยทั้งสองชนิด จะถูกนำมาทดสอบโดยวิธีการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งจะแสดงผลในรูปผลึก (crystalline phases) ของตัวอย่างที่ทดสอบ

3.3 การทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เป็นตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งในการผสมนั้นจะใช้เถ้าลอยแต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ในปริมาณต่างๆกัน คือ ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ความข้นเหลวปกติ

ความข้นเหลวปกติเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม หรือคือปริมาณน้ำที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยต้องการเมื่อเปลี่ยนแปลงส่วนผสม ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187-86 โดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ประมาณ 500 กรัม มาผสมน้ำแล้วปั้นเป็นก้อนกลม จากนั้นทำการกดก้อนกลมนั้นลงไปในกรวยหัวตัดมาตรฐานและปาดผิวหน้าให้เรียบ แล้วนำไปวางไว้ใต้เข็มทดสอบไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จากนั้นจึงปล่อยเข็มมาตรฐานลงสู่ผิวหน้าซีเมนต์เพสท์ โดยกำหนดว่า ความข้นเหลวปกติ หมายถึง ปริมาณน้ำที่ใช้ ที่ทำให้เข็มมาตรฐานสามารถจมลงในซีเมนต์เพสท์จากผิวหน้าเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที

3.3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัว ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-92 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติ แล้วทำการทดสอบเหมือนวิธีการทดสอบความข้นเหลวปกติ ซึ่งการหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์ที่ภาวะความข้นเหลวปกตินี้ เป็นการศึกษาสมบัติของซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ ที่จะเริ่มก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานได้ โดยปกติจะแบ่งระยะเวลาการก่อตัวออกเป็น 2 ช่วง คือ เวลาก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) ซึ่งนับจากเวลาที่เริ่มผสม จนกระทั่งเข็มทดสอบไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จมลงในซีเมนต์เพสท์เป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) ซึ่งนับจากเวลาที่เริ่มผสม จนกระทั่งเข็มทดสอบไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสท์ เพียงแต่ปรากฏเป็นรอยของหัวเข็มเท่านั้น

3.3.3 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ซึ่งกำหนดว่า ตัวอย่างที่ทำการทดสอบต้องมีค่าการไหลแผ่ที่ร้อยละ 100-115 เพื่อให้ส่วนผสมอยู่ในภาวะปั้นได้ (plastic consistency) วิธีทดสอบจึงต้องแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+FLY ASH)] ในแต่ละส่วนผสม เพื่อให้มีค่าการไหลแผ่เดียวกัน แต่การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนั้นจะมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยและปฏิกิริยาที่เกิดในการผสม ดังนั้นในการทดสอบครั้งนี้ จะให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ซึ่งเหมือนกับการแปรเปลี่ยนค่าการไหลแผ่

การผสมจะใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เพื่อหล่อลูกบาศก์มอร์ตา ขนาด 50 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 0.485 ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ลูกบาศก์มอร์ตาที่ได้จะนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดหลังจากถูกบ่มเป็นเวลา 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนในการผสมเพื่อทำมอร์ตาผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด สรุปในตารางที่ 3.1

สำหรับการถอดแบบและบ่มลูกบาศก์มอร์ตานั้น จะทำการถอดแบบหลังจากการหล่อแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการบ่มต่อไปในน้ำปูน จนถึงอายุการบ่มที่จะทำการทดสอบ

จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในแต่ละปริมาณการแทนที่ ที่อายุการบ่มหนึ่งๆ ของเถ้าลอย จะมีจำนวน 3 ก้อนตัวอย่าง ดังนั้นในการใช้เถ้าลอยหนึ่งชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนและบ่มที่อายุการบ่มต่างๆ จะมีจำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 108 ก้อนตัวอย่าง สรุปแล้วในการทดสอบกำลังรับแรงอัดนี้ มีจำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 216 ก้อนตัวอย่าง

สำหรับเกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อน ลูกบาศก์มอร์ตามาตรฐาน จะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดในตารางที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการผสมเพื่อทำมอร์ตาธรรมดา มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+FLY ASH)] เท่ากับ 0.485

ชนิดของตัวอย่าง	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอย	สัดส่วนผสม โดยน้ำหนัก		
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าลอย	ทราย
มอร์ตาธรรมดา				
F00	0	1.00	0.00	2.75
มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม				
P10	10	0.90	0.10	2.75
P15	15	0.85	0.15	2.75
P20	20	0.80	0.20	2.75
P30	30	0.70	0.30	2.75
P40	40	0.60	0.40	2.75
มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย				
B10	10	0.90	0.10	2.75
B15	15	0.85	0.15	2.75
B20	20	0.80	0.20	2.75
B30	30	0.70	0.30	2.75
B40	40	0.60	0.40	2.75

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาตามมาตรฐาน ASTM C109-95 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ชัชวาลย์, 2539)

อายุและการบ่ม	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	85
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	150
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ	245

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 การดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัด : (ก) เครื่องผสมมอร์ตา (ข) แบบหล่อก้อนมอร์ตา (ค) ก้อนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย (สีดำ) และก้อนมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่หล่อแล้ว (ง) การบ่มก้อนมอร์ตาในน้ำปูน (จ) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.3.4 ร้อยละกำลังรับแรงอัด

ทำการหาเพื่อเทียบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด ต่อกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาธรรมดา

3.3.5 X-Ray Diffraction Spectrometry

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษากระบวนการและผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) นี้ ใช้ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย เพื่อขจัดการแทรกแซงของ Diffraction Peak จากทราย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยแต่ละชนิดในปริมาณร้อยละ 0, 15 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+FLY ASH)] เท่ากับ 0.485 จากนั้นบ่มเป็นระยะเวลา 3, 7, 14, 28 และ 60วัน ตามลำดับ จึงนำไปทดสอบ จำนวนตัวอย่างของการทดสอบนี้มีจำนวน 30 ตัวอย่าง โดยจะสนใจสารประกอบที่เพิ่มขึ้นและลดลง ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide; $Ca(OH)_2$) ไดคัลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate; C_2S) และไตรคัลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate; C_3S)

3.4 การทดสอบลักษณะน้ำชะจากเถ้าลอย

เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย จะถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะ ซึ่งได้จากวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) มีวิธีการดังนี้

1.) บดลูกบาศก์มอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

2.) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.) หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดด่างหรือค่าพีเอช (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

3.) เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

4.) กรองสารละลายจากการสกัด ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

สารสกัดที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปย่อยโดยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digester) เพื่อลดผลการแทรกแซงจากสารอินทรีย์และเพื่อเปลี่ยนรูปโลหะให้อยู่ในรูปที่สามารถตรวจพบได้ เมื่อวิเคราะห์โดยเครื่อง Inductively-Coupled Plasma (ICP) โดยเติมกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในสารสกัด 45 มิลลิลิตร ที่อยู่ในขวดสำหรับย่อย (digestion vessel) จากนั้นนำเข้าเครื่องไมโครเวฟเพื่อทำการย่อย โดยเครื่องจะให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 20 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการย่อย สารสกัดที่ถูกย่อยแล้วจะถูกปล่อยให้เย็นลง จนมีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่อไป

3.5 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ในการพิจารณาการนำไปใช้ประโยชน์ จะพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากการวิจัย เป็นแนวทางว่ามีแนวโน้มที่เหมาะกับการจะนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดใด ซึ่งจะประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำผลิตภัณฑ์นั้น

3.6 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ผลการวิจัย จะเปรียบเทียบผลกระทบต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมด้วยเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับเถ้าลอยชานอ้อย รวมทั้งเปรียบเทียบผลการวิจัยที่ได้กับการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนนั้น มีการศึกษาและทดสอบจนเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ เช่น เขื่อน อาคาร ฐานราก สะพาน เป็นต้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 <u>ส่วนประกอบทางเคมี</u>

ส่วนประกอบทางเคมีหาโดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy โดยตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยในรูปออกไซด์ รวมทั้งนำส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแสดงด้วยเพื่อเปรียบเทียบกัน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์ มีคัลเซียม (CaO) อยู่เพียงร้อยละ 8.00, 3.63 และ 11.92 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอยู่ถึงร้อยละ 63.82 โดยน้ำหนัก ซึ่งคัลเซียมนี้ จะทำปฏิกิริยาน้ำ (H_2O) ซึ่งก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) เกิดเป็นคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) โดยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) จะเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวขึ้น ดังนั้น เถ้าลอยทั้ง 3 ชนิดจึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) โดยมีอยู่ร้อยละ 59.16 และ 67.94 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับร้อยละ 62.25 และ 74.30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ซึ่งคือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เมื่อเปรียบเทียบผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) นี้ กับของเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.27 และ 28.54 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยมาก

ค่า LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 8.57 และ 16.16 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์

(ASTM C618-96) ที่กำหนดชั้นคุณภาพ F และ C ให้มี LOI มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดย LOI หรือคาร์บอนในเถ้าลอยนี้จะดูดน้ำเมื่อทำการผสมเพื่อทำมอร์ตา ทำให้น้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	เถ้าลอยชานอ้อย	เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
Na_2O	0.07	0.43	-	0.26
MgO	4.13	1.23	2.13	1.50
Al_2O_3	1.90	4.75	28.27	5.42
SiO_2	59.16	67.94	35.43	20.20
P_2O_5	4.74	1.55	-	-
SO_3	2.99	0.12	2.35	2.55
Cl	1.29	-	-	-
K_2O	7.64	2.19	2.48	0.46
CaO	8.00	3.63	11.92	63.82
TiO_2	0.08	0.22	0.38	-
MnO	0.13	0.14	0.11	-
Fe_2O_3	1.19	1.61	14.57	2.92
CuO	0.05	0.01	0.05	-
Rb	0.02	0.01	-	-
SrO	0.02	-	0.09	-
ZrO_2	0.02	0.01	-	-
ZnO	-	-	0.01	-
PbO	-	-	0.04	-
LOI	8.57	16.16	-	-
รวม	100.00	100.00	97.83	97.13

หมายเหตุ 1.) ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นข้อมูลจาก อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

2.) “-” คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) จะเห็นว่า ทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยไม่อาจจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดๆได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) และซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดไม่ตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96)

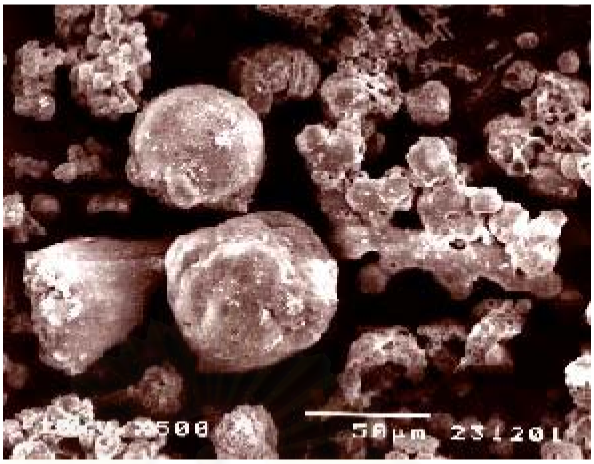
คุณสมบัติ		ชั้นคุณภาพ N	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C	เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	เถ้าลอยชานอ้อย
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	%ต่ำสุด	70.0	70.0	50.0	62.25	74.30
SO_3	%สูงสุด	4.0	5.0	5.0	2.99	0.12
ปริมาณความชื้น	%สูงสุด	3.0	3.0	3.0	1.92	2.15
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	%สูงสุด	10.0	6.0	6.0	8.57	16.16

4.1.2 <u>ความละเอียด</u>

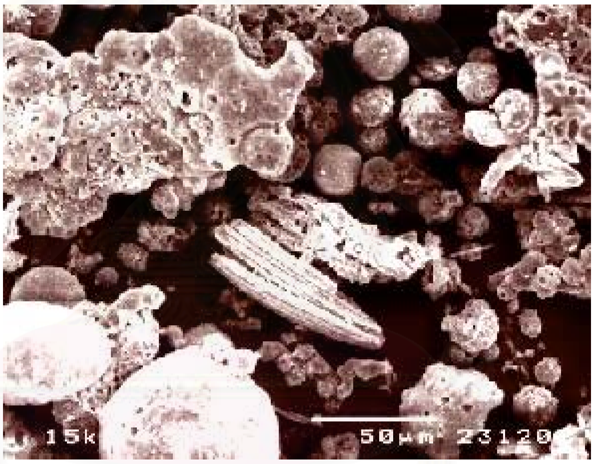
ความละเอียดของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะหาใน 3 ลักษณะ คือ พิจารณาลักษณะอนุภาค เพื่อดูรูปร่างและลักษณะผิวหน้าของอนุภาค พิจารณาการกระจายขนาด เพื่อศึกษาว่ามีการกระจายตัวอย่างไรและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($d_{50\%}$) เท่าไร และพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะ เพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุ

4.1.2.1 ลักษณะอนุภาค

ลักษณะอนุภาค ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) ซึ่งภาพถ่ายลักษณะอนุภาคเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) ส่วนของเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งใช้กำลังขยายที่ 750 เท่า แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าลอยลิกไนต์ แสดงในรูป 4.3 และ 4.4 ซึ่งใช้กำลังขยายที่ 2,000 และ 2,500 เท่า ตามลำดับ



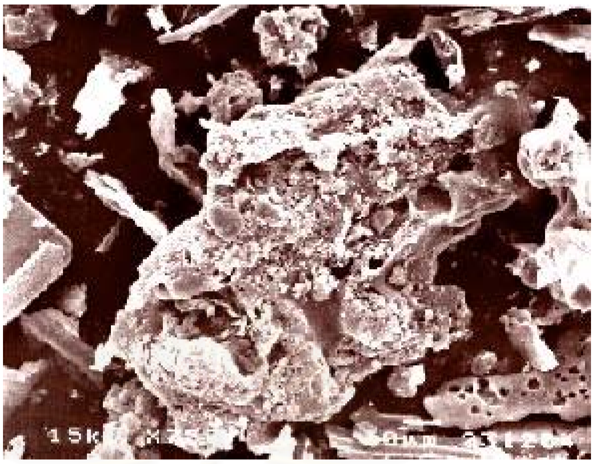
(ก) เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ที่กำลังขยาย 500 เท่า



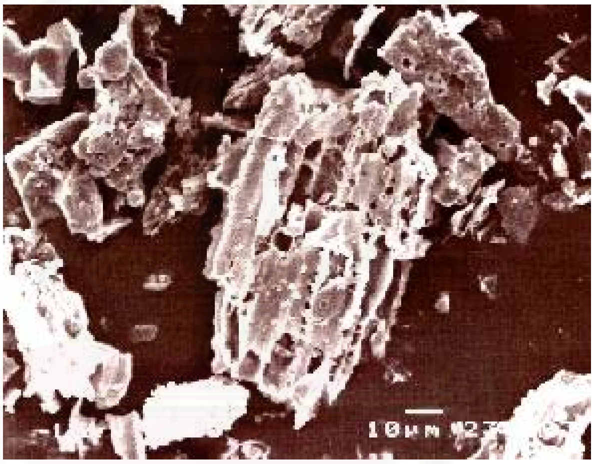
(ข) เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ที่กำลังขยาย 500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม



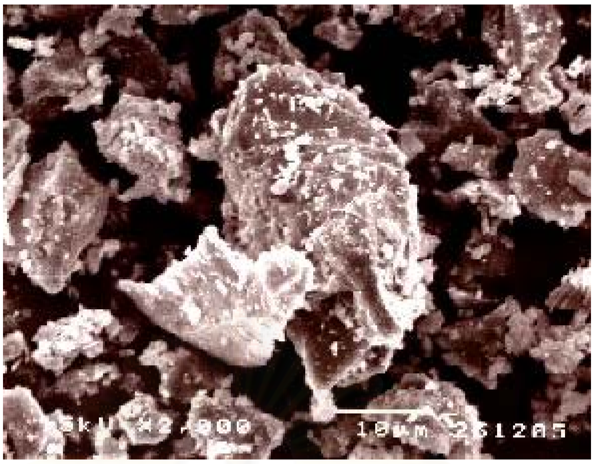
(ก) เถ้าลอยชานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า



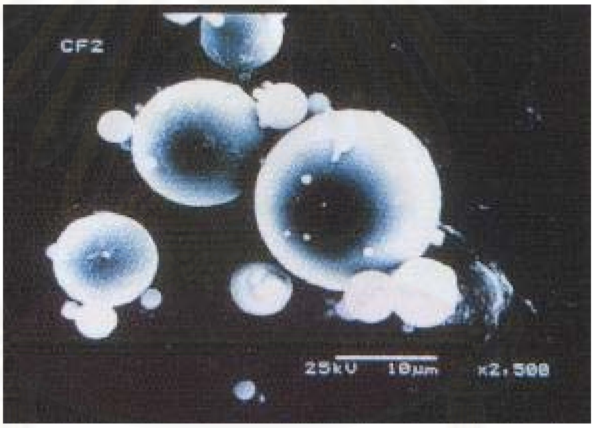
(ข) เถ้าลอยชานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยชานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเถ้าลอยลิกไนต์ ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2544)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

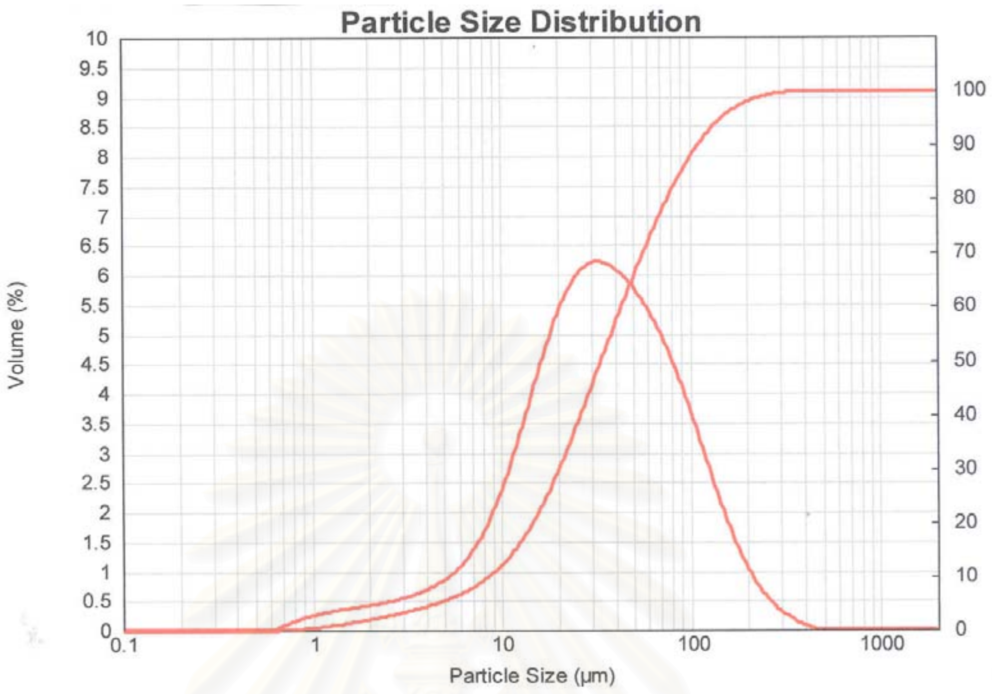
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มส่วนใหญ่มีลักษณะกลม มีรูเล็กๆที่ผิวอนุภาคจำนวนมาก และมีบางส่วนที่มีลักษณะเหมือนก้อนกลมที่จับตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ ซึ่งต่างจากลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย ในรูปที่ 4.2 ที่มีลักษณะอนุภาคเป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม มีรูปร่างไม่แน่นอน คือ มีลักษณะเป็นเศษเล็กๆ จนถึงเป็นก้อนอนุภาค และมีรูเล็กๆและโพรงที่ผิวอนุภาคเป็นจำนวนมากกว่าเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เมื่อเปรียบเทียบลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย กับลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ ในรูปที่ 4.4 พบว่ามีความแตกต่างกันมากพอสมควร โดยลักษณะทั่วๆไปของเถ้าลอยลิกไนต์ จะเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบ

ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยที่เห็นนั้น อาจเป็นผลจากลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาเผาและสภาพการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น สำหรับลักษณะอนุภาคที่กลมและผิวเรียบของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น จะเกิดเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นถึง 1,500 องศาเซลเซียส แต่หากอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลงมามาก ลักษณะอนุภาคก็จะไม่กลมอย่างสม่ำเสมอ (Wesche, 1991) ลักษณะอนุภาคที่เป็นทรงกลมผิวเรียบและเล็กละเอียดทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์จะทำหน้าที่เสมือนตัวหล่อลื่นระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุผสม ซึ่งมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ดังนั้นหากเถ้าลอยยิ่งมีรูปร่างกลมเป็นจำนวนมากและมีขนาดพอเหมาะก็จะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยนั้นมีคุณบัติในการใช้งานที่ดีขึ้น

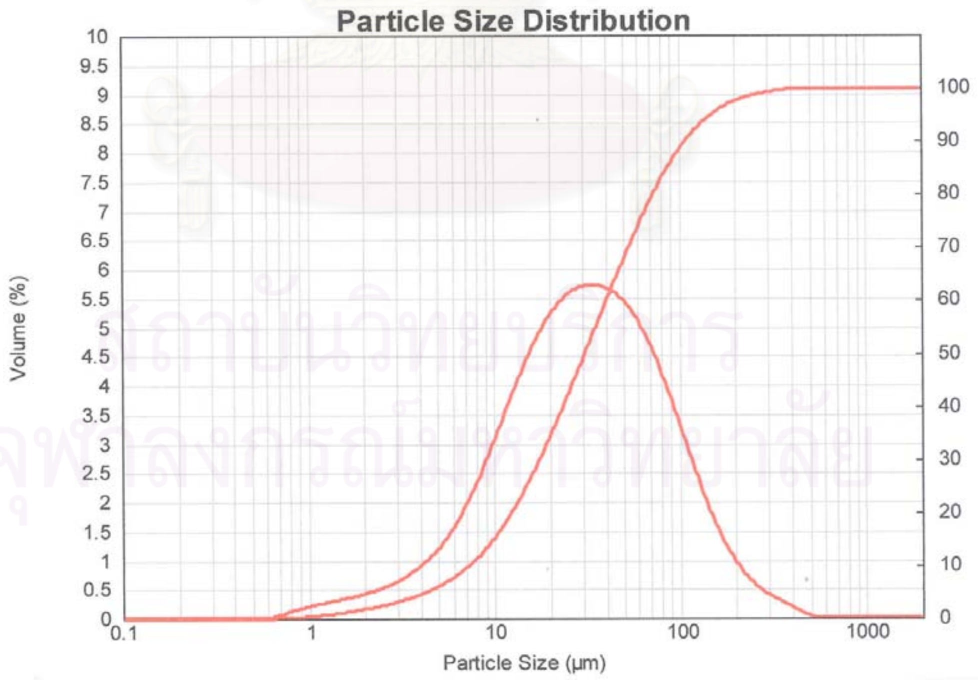
นอกจากนั้น สีของเถ้าลอยก็สามารถบอกได้อย่างคร่าวๆ ถึงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย คือ เถ้าลอยที่มีส่วนค่อนข้างดำ เป็นไปได้ที่จะมีปริมาณคาร์บอน หรือ ออกไซด์ของเหล็กอยู่สูง

4.1.2.2 การกระจายขนาดอนุภาค

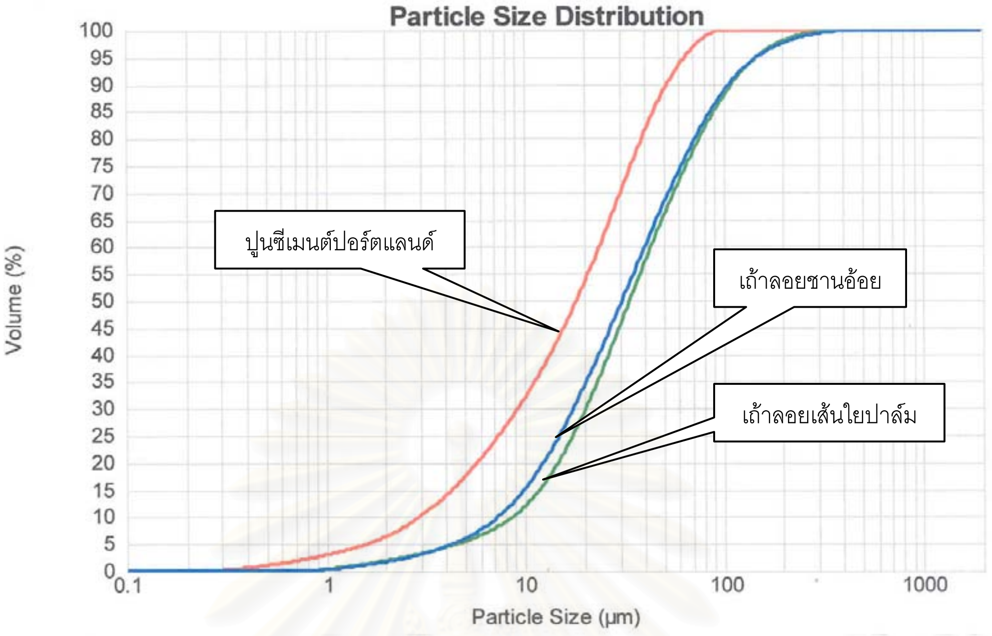
การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบของเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



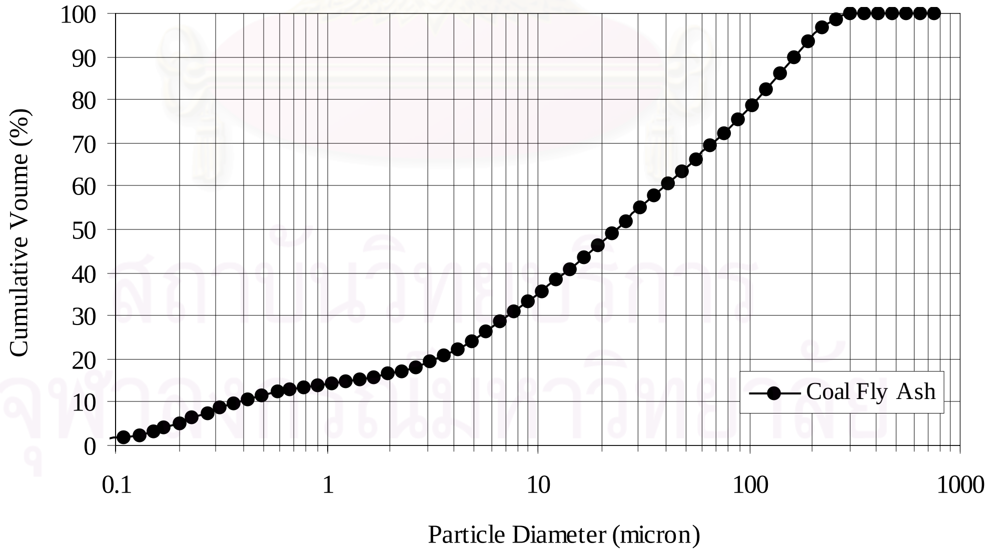
รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบของเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.8 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์

ที่มา : Inthasaro (2002)

จากรูปที่แสดงจะเห็นว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีขนาดหยาบกว่าเถ้าลอยชานอ้อยเล็กน้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดละเอียดกว่าเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์ ที่แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002) จะเห็นว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีการกระจายอนุภาคที่กว้างกว่าเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด สำหรับขนาดอนุภาคที่ร้อยละโดยปริมาตรสะสมเท่ากับ 10, 50 และ 90 แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	$d_{10\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{50\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{90\%}$ (ไมโครเมตร)
เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	8.604	33.784	110.989
เถ้าลอยชานอ้อย	7.296	30.893	107.932
เถ้าลอยลิกไนต์	0.430	27.320	191.640
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.941	18.238	52.476

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

4.1.2.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ มีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานในการหาความละเอียด ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยเปรียบเทียบกับเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ หาโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM C204-96

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม.^{2}/กรัม)
เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	2,590
เถ้าลอยชานอ้อย	4,121
เถ้าลอยลิกไนต์	2,370
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,380

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) จะวัดระยะเวลาที่อากาศจำนวนหนึ่ง ไหลผ่านชั้นเถ้าลอยที่ถูกอัดแน่น ซึ่งอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนของเถ้าลอยชานอ้อยนั้น ทำให้ชั้นการอัดแน่นนั้นหลวมกว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยเส้นใยปาล์มซึ่งมีอนุภาคค่อนข้างกลม เป็นผลให้ความต้านทานอากาศที่ไหลผ่านชั้นการอัดแน่นนั้นของเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนอยู่มากของเถ้าลอยชานอ้อย ก็ยังทำให้อากาศไหลผ่านไปได้อย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยชานอ้อยจึงมีค่าสูง แม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฉะนั้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจึงอาจจะไม่สอดคล้องกับค่าความละเอียดของอนุภาคก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนและมีรูพรุนมาก ดังเช่นเถ้าลอยชานอ้อย แต่ค่าความพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ ก็เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการหา และเป็นวิธีที่ดีพอสมควรที่จะบอกได้อย่างคร่าวๆ ถึงคุณภาพหรือลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยหรือวัสดุละเอียดอื่นๆ ที่จะใช้ในซีเมนต์ รวมทั้งบอกลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์เพสท์เมื่อผสมวัสดุนั้น เช่น ความต้องการน้ำและความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

4.1.3 <u>ความถ่วงจำเพาะ</u>

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยหาโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าดตามมาตรฐาน ASTM C188-95 ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย รวมทั้งเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	2.05
เถ้าลอยชานอ้อย	1.85
เถ้าลอยลิกไนต์	2.56

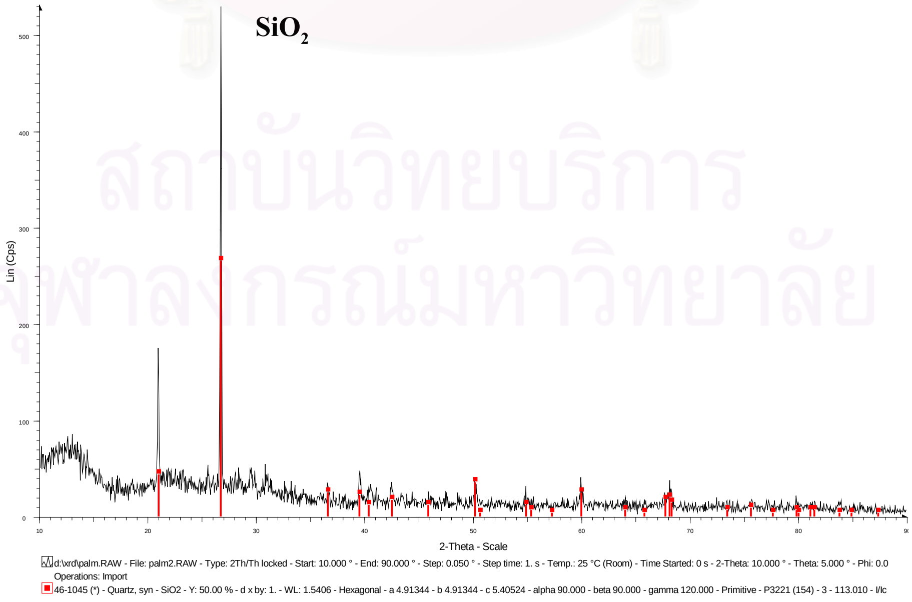
หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

จากตารางที่ 4.5 ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีในแต่ละวัสดุ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีแต่ละตัวนั้น จะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน พวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ได้แก่ คัลเซียม (CaO) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นส่วน

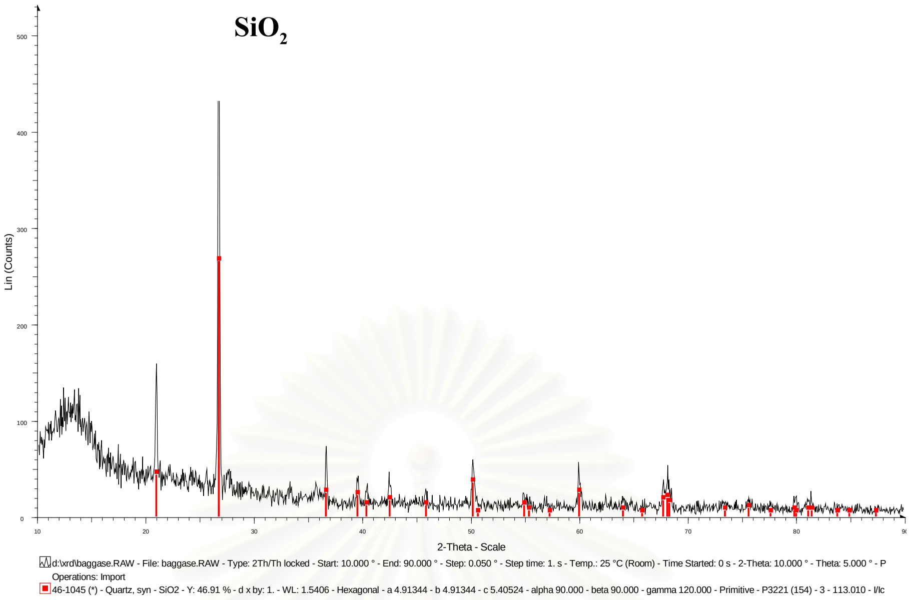
ประกอบที่มีอยู่มากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์ ส่วนพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับเถ้าลอยชานอ้อย ทำให้เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ นอกจากนี้ ความถ่วงจำเพาะยังขึ้นอยู่กับความพรุนของอนุภาค ซึ่งหากอนุภาคมีความพรุนสูง ค่าความถ่วงจำเพาะจะต่ำ

4.1.4 <u>ส่วนประกอบทางแร่</u>

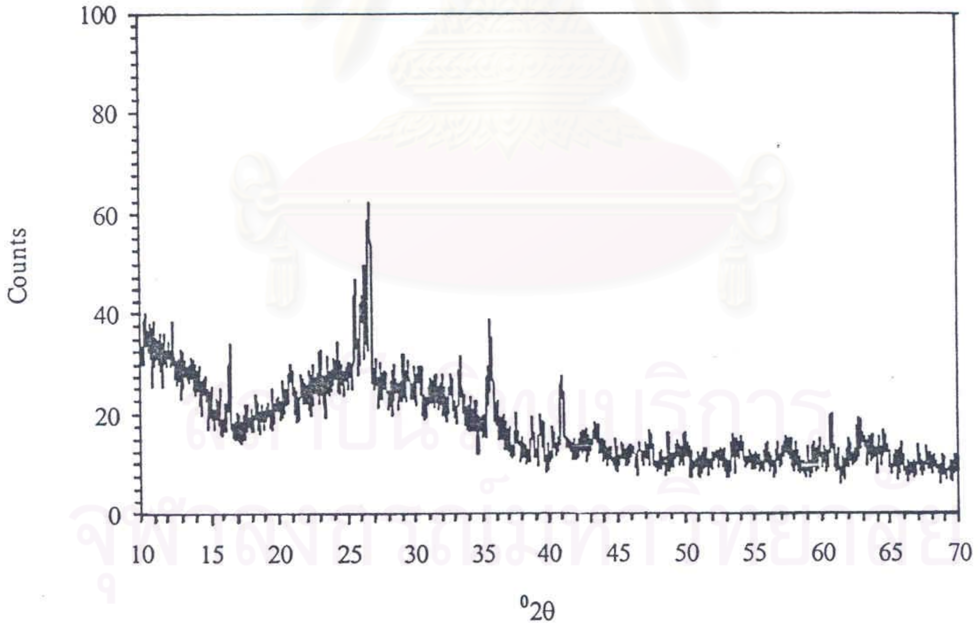
ส่วนประกอบทางแร่ซึ่งแสดงในรูปผลึก (crystalline phases) ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับเถ้าลอยชานอ้อย ที่วิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ สารประกอบตัวหลักที่พบมากของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งอยู่ในรูปควอทซ์ (Quartz) ซึ่งจากการศึกษาในอดีต พบว่า สารประกอบที่สำคัญของเถ้าลอยนั้นมี 3 ลักษณะที่สำคัญรวมกันอยู่ คือ ควอทซ์ (Quartz) กล๊าส (Glass) และ มูลไลต์ (Mullite) โดยมีเฉพาะกล๊าสเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดี แต่อีกสองลักษณะที่เหลือจะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้น้อย จากรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) ของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะที่ทำการศึกษาโดย Inthasaro (2002) จะเห็นว่า ส่วนประกอบหลักของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น อยู่ในรูปอสันฐาน (amorphous หรือ ในรูปกล๊าส) มีส่วนประกอบในรูปผลึกไม่มากนักที่ตรวจพบ ซึ่งเหมือนกับผลการวิจัยโดยผู้วิจัยก่อนหน้านี้หลายท่านที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเถ้าลอยลิกไนต์ การที่เถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนประกอบหลักในรูปกล๊าสซึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี ทำให้มีคุณสมบัติปอซโซลานเมื่อผสมในคอนกรีต เป็นเหตุให้เถ้าลอยลิกไนต์สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.9 ผล XRD ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.10 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.11 ผล XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์

ที่มา : Inthasaro (2002)

4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

4.2.1 ความข้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว

ความข้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ หาโดยการใช้ชุดทดสอบไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C187-86 และ ASTM C191-92 ตามลำดับ ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆกัน ซึ่งจะเห็นว่าทั้งปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายจะสูงขึ้น เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น

ปริมาณน้ำที่ต้องการมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น มีสาเหตุจากการที่เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีปริมาณคาร์บอนอยู่ค่อนข้างสูง ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำบางส่วนไปเมื่อผสม ทำให้มีความต้องการน้ำที่ความข้นเหลวปกติเพิ่มขึ้น โดยการใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ในซีเมนต์เพสท์จะมีความต้องการน้ำมากกว่าการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มเมื่อเปรียบเทียบที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนถึงร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าปริมาณคาร์บอนของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่มีเพียงร้อยละ 8.57 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ลักษณะของอนุภาคเถ้าลอยก็มีผลต่อความต้องการน้ำด้วย กล่าวคือ ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม ผิวไม่เรียบและมีรูโพรงที่มาก ซึ่งเป็นลักษณะของเถ้าลอยชานอ้อย จะสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่าอนุภาคที่ค่อนข้างกลม ซึ่งเป็นลักษณะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย เนื่องจากเป็นการลดสารประกอบที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ใช้ก็ยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุแรกๆ โดยการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มแทนที่ในซีเมนต์เพสท์ จะมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยชานอ้อย เมื่อเปรียบเทียบที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีความต้องการน้ำที่ความข้นเหลวปกติน้อยกว่า ดังนั้นน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะหมดเร็วกว่า จึงก่อตัวและแข็งตัวเร็วกว่า

ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณน้ำที่ต้องการ	ระยะเวลาการก่อตัว	
		ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
ซีเมนต์เพสท์ธรรมดา			
F00	0.262	73	255
ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม			
P10	0.301	100	265
P15	0.311	105	275
P20	0.322	112	290
P30	0.374	116	300
P40	0.406	123	320
ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย			
B10	0.349	104	280
B15	0.376	122	295
B20	0.415	128	305
B30	0.506	133	320
B40	0.604	148	340

หมายเหตุ : ปริมาณน้ำที่ต้องการ แสดงในรูปอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+FLY ASH)] ที่ความข้นเหลวปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 กำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนกำลังรับแรงอัด

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด จะทำการหล่อลูกบาศก์มอร์ตา ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 0.485 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม แสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.12 ส่วนกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13 สำหรับร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา แสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มทุกปริมาณการแทนที่ มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาที่อายุการบ่มเดียวกัน และเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดจะมีค่าต่ำลง ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 254 กก./ซม.^{2} ซึ่งผ่านตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.^{2} ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา คิดเป็นร้อยละ 84.7 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปริมาณการแทนที่ มีค่าต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มแทนที่ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 30 และ 40 ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าต่ำมาก ทุกปริมาณการแทนที่มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดา ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยทุกปริมาณการแทนที่ ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา เพียงประมาณร้อยละ 50 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปริมาณการแทนที่ มีค่าค่อนข้างต่ำ สาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าต่ำมาก เนื่องมาจากการที่เถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนอยู่สูงคือ ร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำที่ใช้ผสมขณะทำมอร์ตา ทำให้มีปริมาณน้ำที่จะใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง และตัวอย่างที่ผสมได้นั้นจะมีลักษณะ ร่วน แห้ง เกาะตัวกันได้ไม่ดี โดยเฉพาะเมื่อมีปริมาณการแทนที่สูงๆ

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มในปริมาณต่างๆกัน

ชนิดตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
F00	170	232	268	300	329	337
P10	130	176	218	254	279	286
P15	118	155	186	233	248	250
P20	107	145	180	208	226	229
P30	96	131	155	176	193	203
P40	93	129	154	164	180	185

หมายเหตุ : FXX คือ มอร์ตาธรรมดา

PXX คือ มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณต่างๆกัน

ชนิดตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
F00	170	232	268	300	329	337
B10	92	112	132	145	156	164
B15	87	115	119	128	138	143
B20	83	98	109	124	131	138
B30	75	88	103	121	126	127
B40	69	78	86	98	105	106

หมายเหตุ : FXX คือ มอร์ตาธรรมดา

BXX คือ มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย

ตารางที่ 4.9 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา

ชนิดตัวอย่าง	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
F00	100	100	100	100	100	100
P10	76.5	75.9	81.3	84.7	84.8	84.9
P15	64.9	66.8	69.4	77.7	75.4	74.2
P20	62.3	62.5	67.2	69.3	68.7	67.9
P30	56.5	56.5	57.8	58.7	58.7	60.2
P40	54.7	55.6	57.5	54.7	54.7	54.9

หมายเหตุ : FXX คือ มอร์ตาธรรมดา

PXX คือ มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

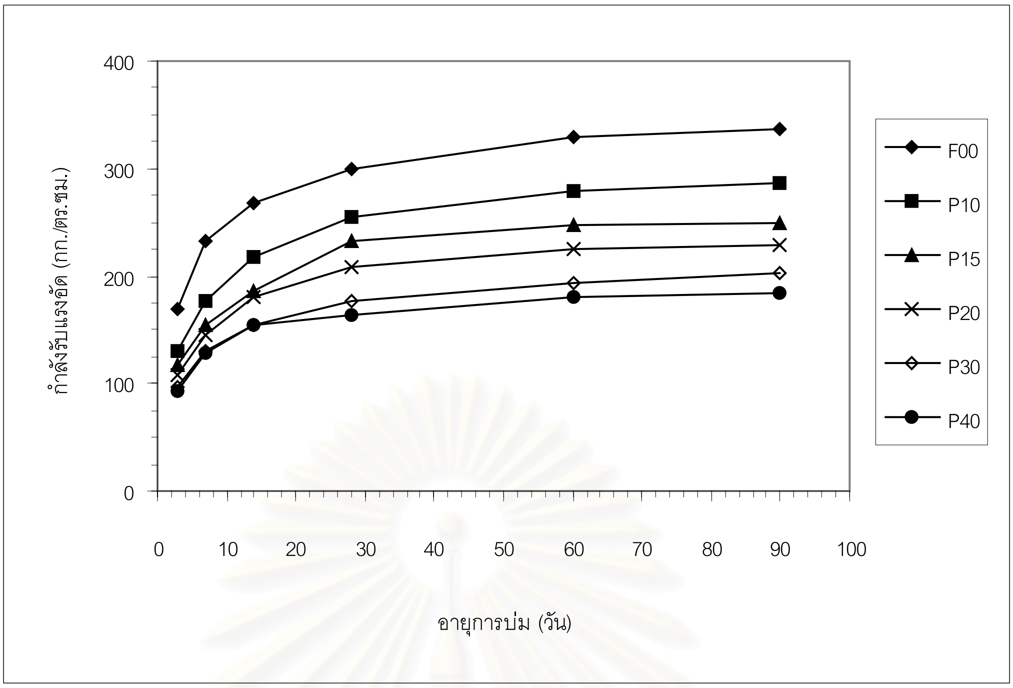
ตารางที่ 4.10 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา

ชนิดตัวอย่าง	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
F00	100	100	100	100	100	100
B10	54.1	48.3	49.3	48.3	47.4	48.7
B15	51.2	49.7	44.4	42.7	41.9	42.4
B20	48.8	42.2	40.7	41.3	39.8	40.9
B30	44.1	37.9	38.4	40.3	38.3	37.7
B40	40.6	33.6	32.1	32.7	31.9	31.5

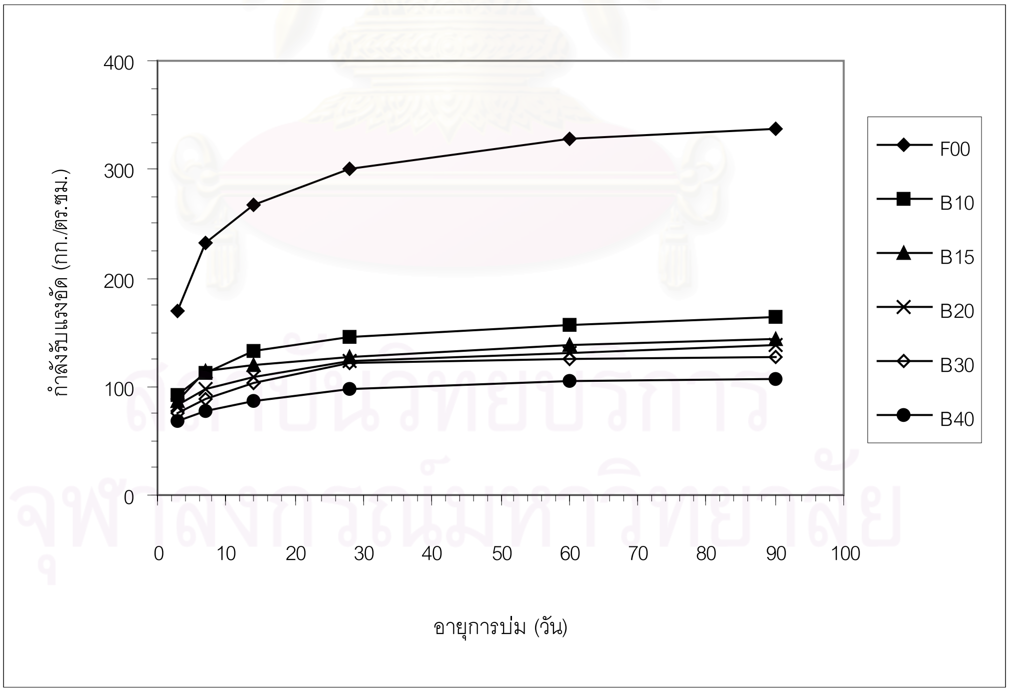
หมายเหตุ : FXX คือ มอร์ตาธรรมดา

BXX คือ มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

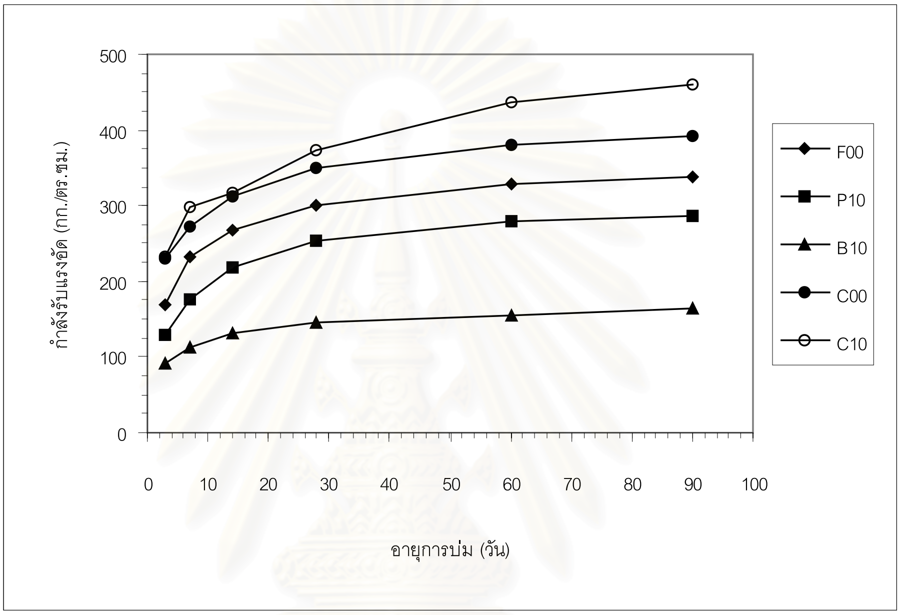


รูปที่ 4.12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณต่างๆ กัน

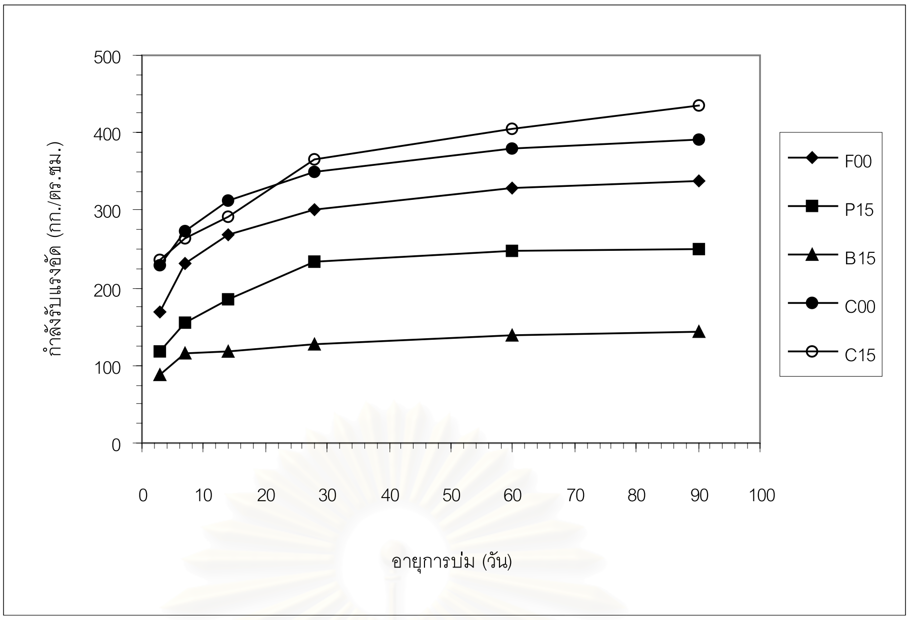
ในรูปที่ 4.14 ถึง 4.18 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่างมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์ (ใช้สัญลักษณ์ CXX) ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 30 และ 40 สำหรับผลของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์นั้น เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532) ซึ่งใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะมาทำการทดลองและแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ต้องการในแต่ละปริมาณการแทนที่ เพื่อรักษาสภาพการไหลแผ่ให้คงที่



รูปที่ 4.14 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX) และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

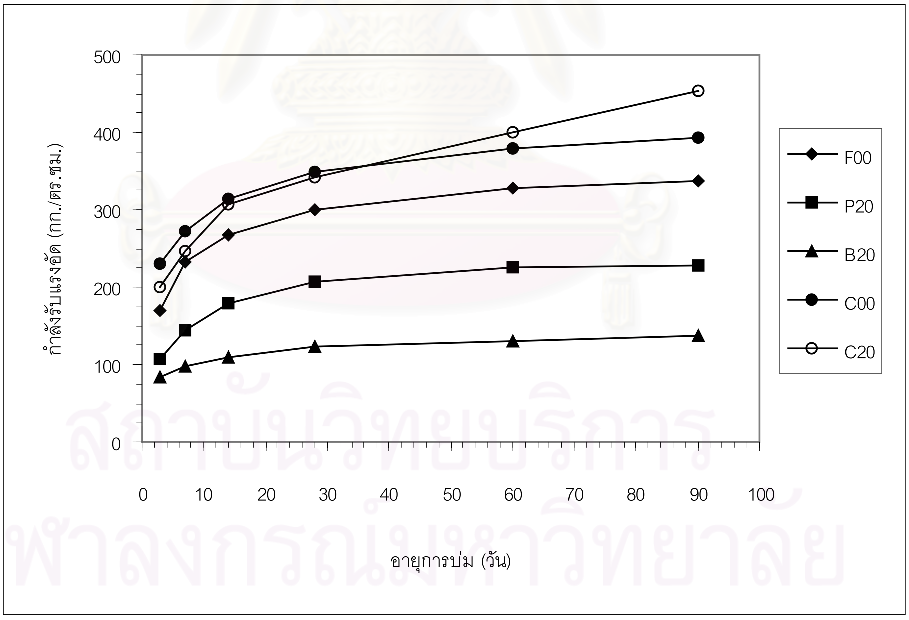
หมายเหตุ : การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



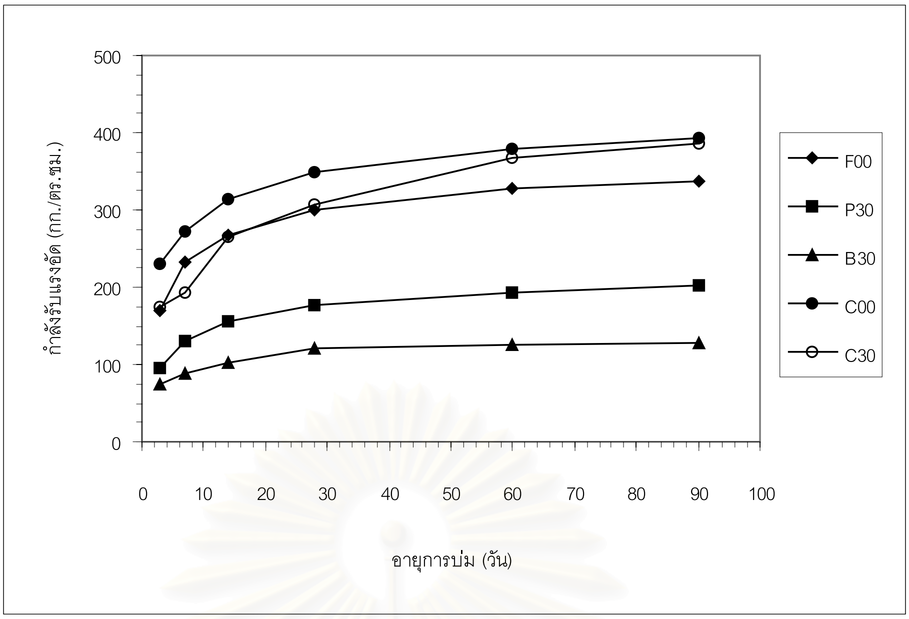
รูปที่ 4.15 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX) และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)



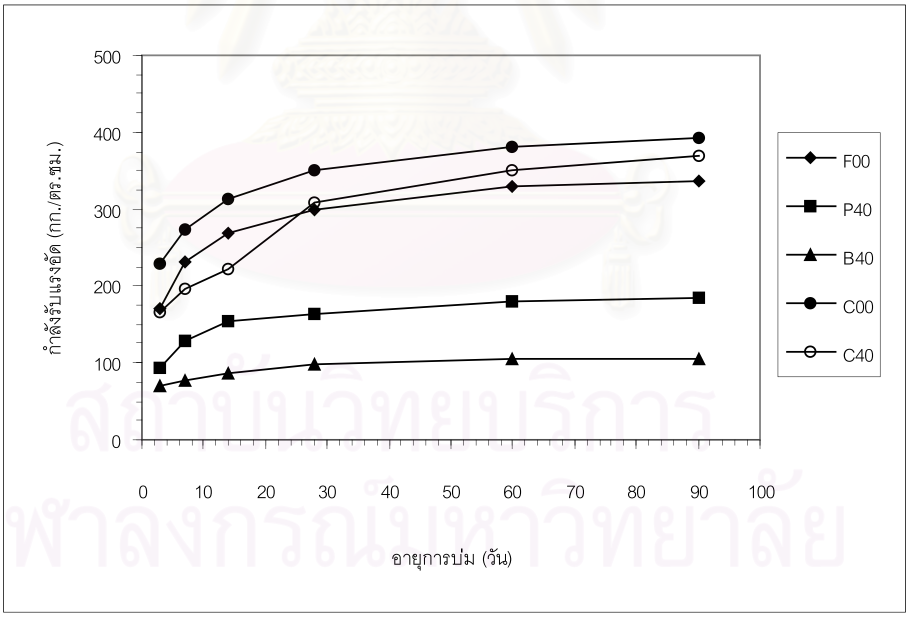
รูปที่ 4.16 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX)และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)



รูปที่ 4.17 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX) และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)



รูปที่ 4.18 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) เถ้าลอยชานอ้อย (BXX) และเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (CXX) เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

เมื่อพิจารณาการแทนที่ของเถ้าลอยที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เริ่มมีค่ามากกว่าของมอร์ตาธรรมดา (C00) ตั้งแต่ที่อายุการบ่ม 3 วัน ในขณะที่มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดา (F00) ทุกๆอายุการบ่ม ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.15 พบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์เริ่มมีค่ากำลังรับแรงสูงกว่ามอร์ตาธรรมดา (C00) สำหรับที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.16 พบว่า ตั้งแต่ที่อายุการบ่ม 60 วันเป็นต้นไป มอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาธรรมดา (C00) และเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัดก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าประมาณร้อยละ 112 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่อายุการบ่ม 180 วัน (อุดม หงษ์ประธานพร, 2532) ส่วนที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ มอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาทุกอายุการบ่ม

จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.18 จะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งสามชนิด พบว่า ปริมาณคาร์บอนมีค่าแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ปริมาณคาร์บอนของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าประมาณ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ส่วนของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 8.57 และ 16.16 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งคาร์บอนจะเป็นตัวดูดน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้มีกำลังรับแรงอัดต่ำลงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งน่าจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับเถ้าลอยชานอ้อย มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นตัวช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงอัดหากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า ทั้งๆที่เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) อยู่ถึงร้อยละ 59.16 และ 67.94 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ก็ยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบ XRD ของเถ้าลอยทั้งสองชนิด พบว่า ซิลิกา (SiO_2) ที่มีอยู่มากนั้นอยู่ในรูปของ ควอทซ์ (Quartz) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีได้น้อย

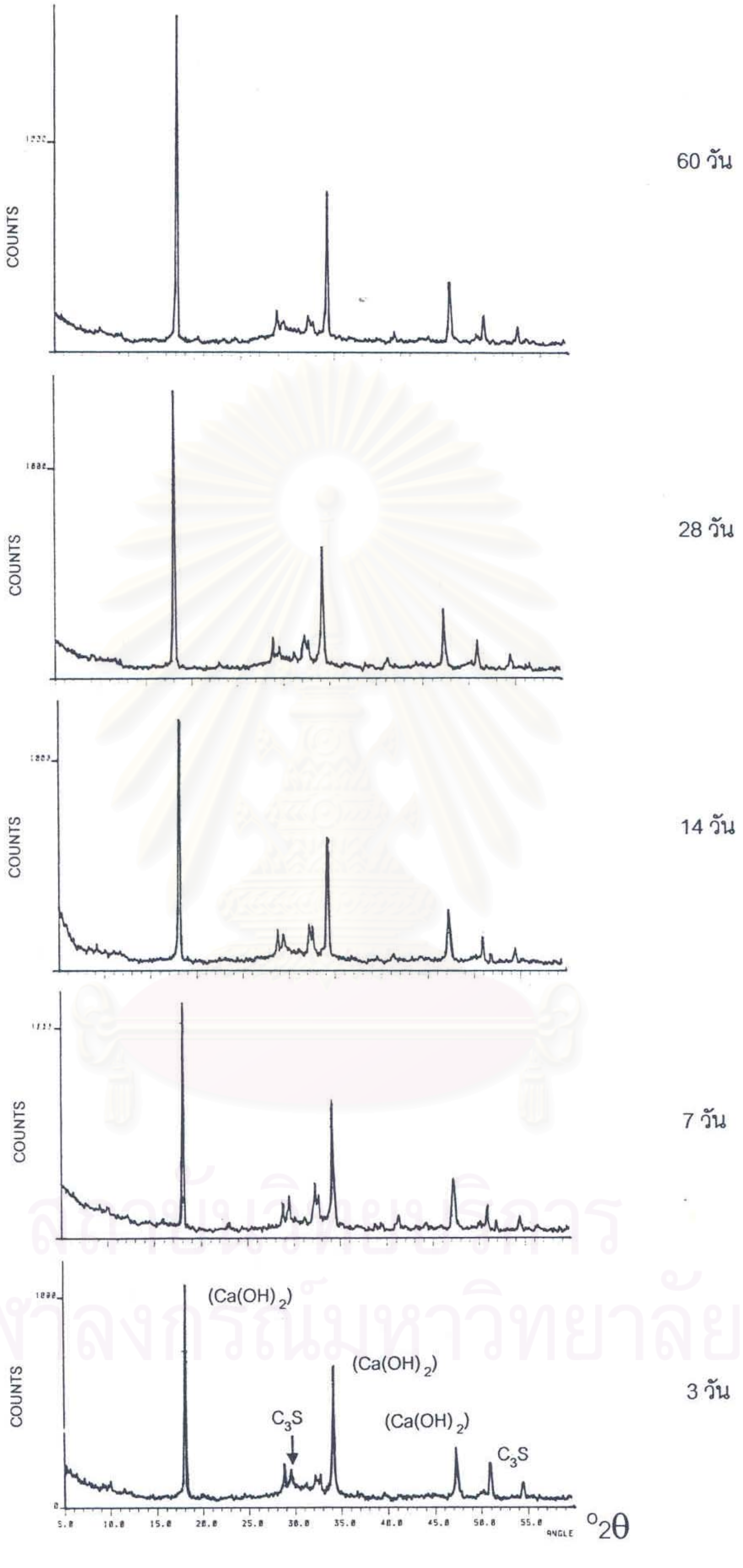
จากผลที่ได้ทั้งหมด พบว่า คาร์บอนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาต่ำ เนื่องจากในการวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดคงที่ คือ 0.485 ซึ่งไม่ได้แปรเปลี่ยนปริมาณน้ำเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น นอกจากจะเป็นการลดสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดแล้ว ก็ยังทำให้มีการดูดน้ำในส่วนผสม

ไปมากขึ้น เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลง ซึ่งหากมีการแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแล้ว ผลการวิจัยที่ได้อาจแตกต่างไป นอกจากนี้ จากผลที่ได้ยังทำให้เกิดแนวคิดได้ว่า หากมีการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงโดยไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ผลที่ได้อาจแตกต่างกันไม่มากหากลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม

4.2.4 X-Ray Diffraction Spectrometry

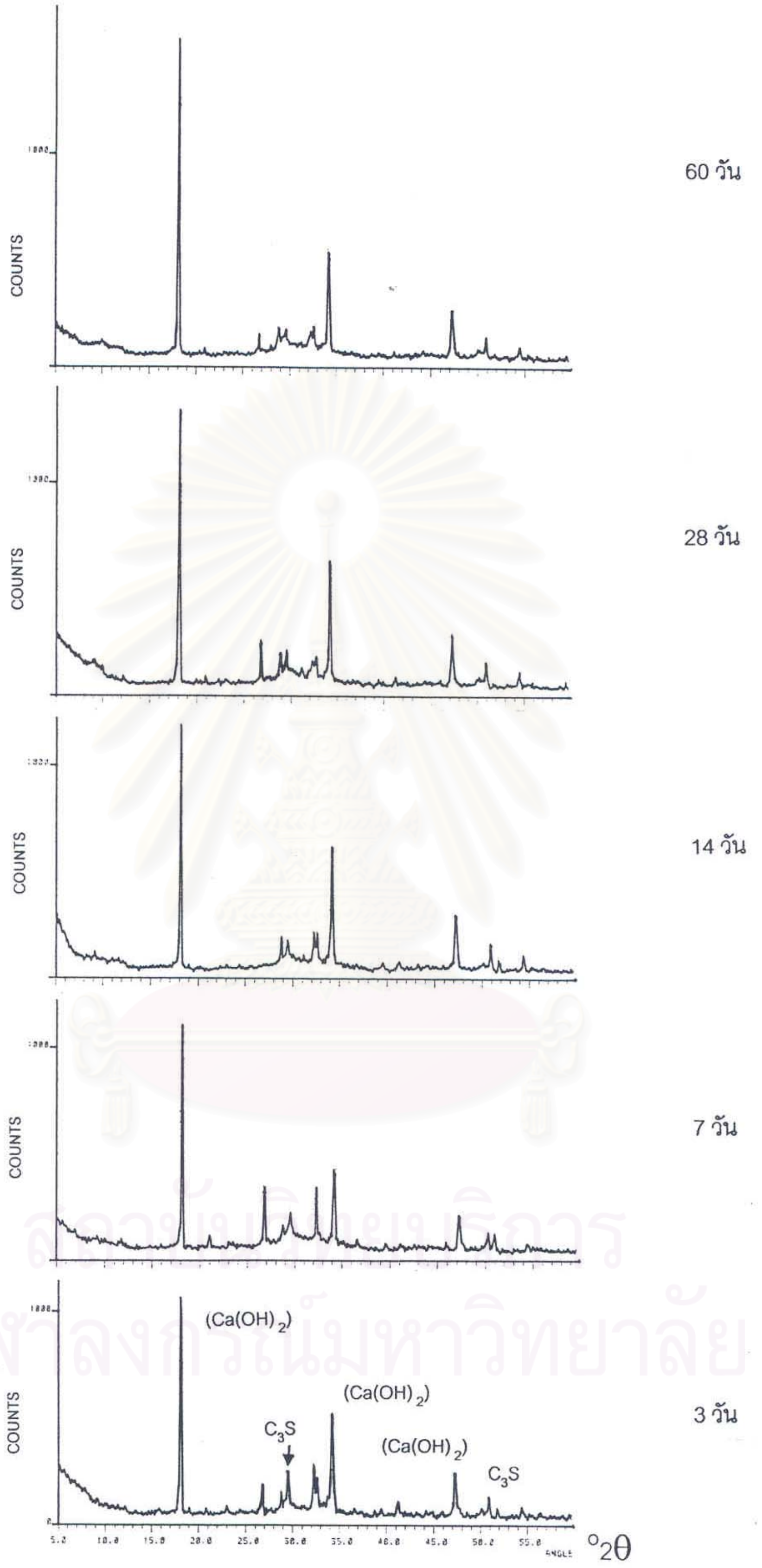
ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เกิดจากคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และ อลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเถ้าลอย แล้วเกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองนี้ไม่ได้เกิดขึ้นโดยแยกกันอย่างอิสระ ดังนั้นสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในเถ้าลอยจึงอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างผลึกในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น นอกจากนี้ ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ยังขึ้นอยู่กับไอออนของคัลเซียม ความเป็นด่าง ซัลเฟต ซิลิเกต และอลูมิเนต ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวที่มาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย เนื่องจากสิ่งเหล่านี้เป็นเรื่องที่ซับซ้อน การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดย X-Ray Diffraction (XRD) จึงถูกนำมาใช้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.19 ถึง 4.23 แสดงผลของ X-ray diffractograms ของสารประกอบในซีเมนต์เพสท์ธรรมดา ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 30 ซึ่งซีเมนต์เพสท์เหล่านี้จะนำมาทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน หลังจากผสมในสัดส่วนเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด จากรูปที่แสดง จะเห็นได้ว่า สารประกอบหลักที่พบคือ ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) สำหรับไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) มีค่า Diffraction peak ที่สังเกตได้อย่างชัดเจนที่ $29.44^{\circ}2\theta$ และ $50.84^{\circ}2\theta$ ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) คือที่ $18.08^{\circ}\ 2\theta$ และ $34.16^{\circ}2\theta$ สำหรับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-H-S) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ไม่พบ Diffraction peak ซึ่งเป็นเพราะ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งจะไม่แสดง Diffraction peak

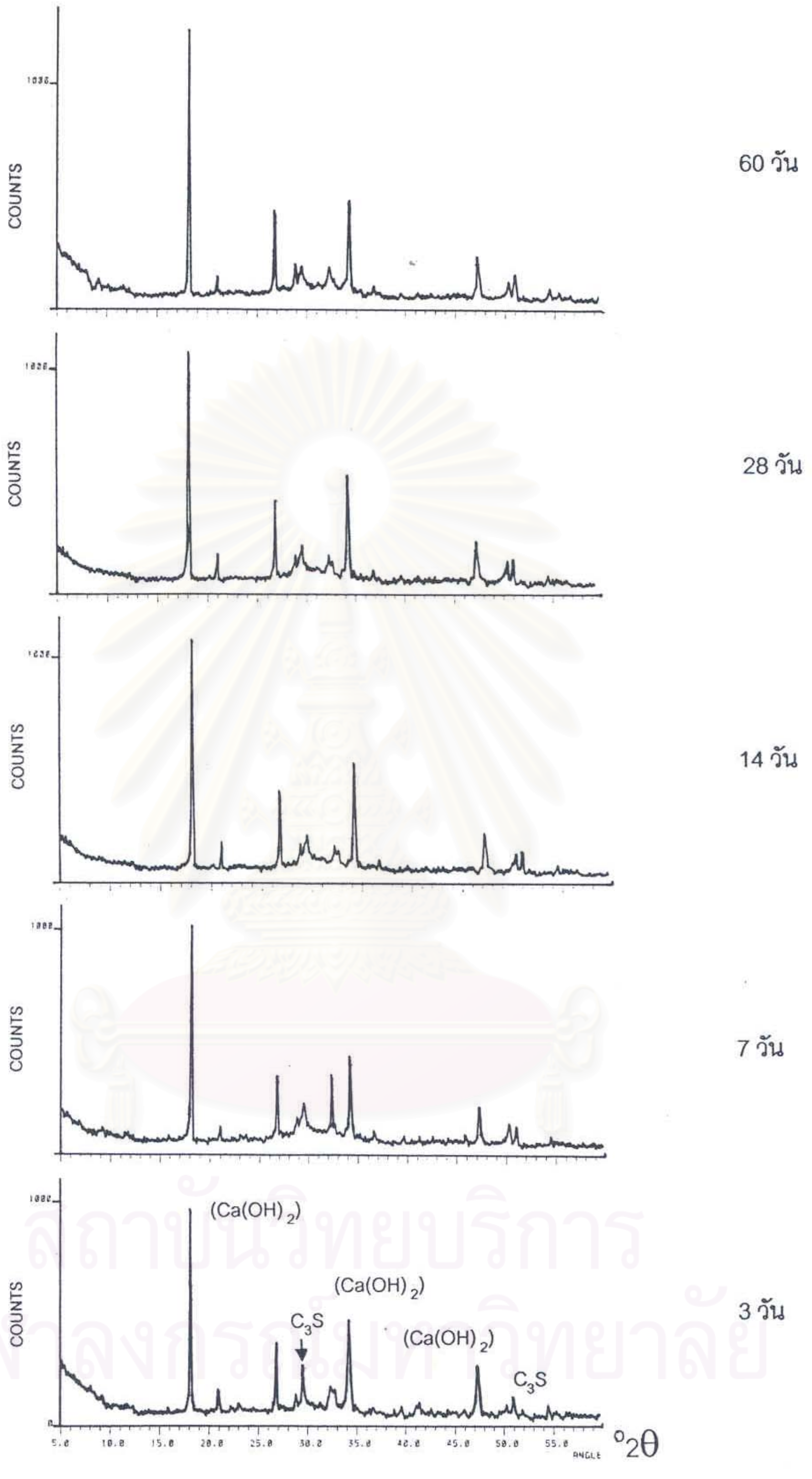


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

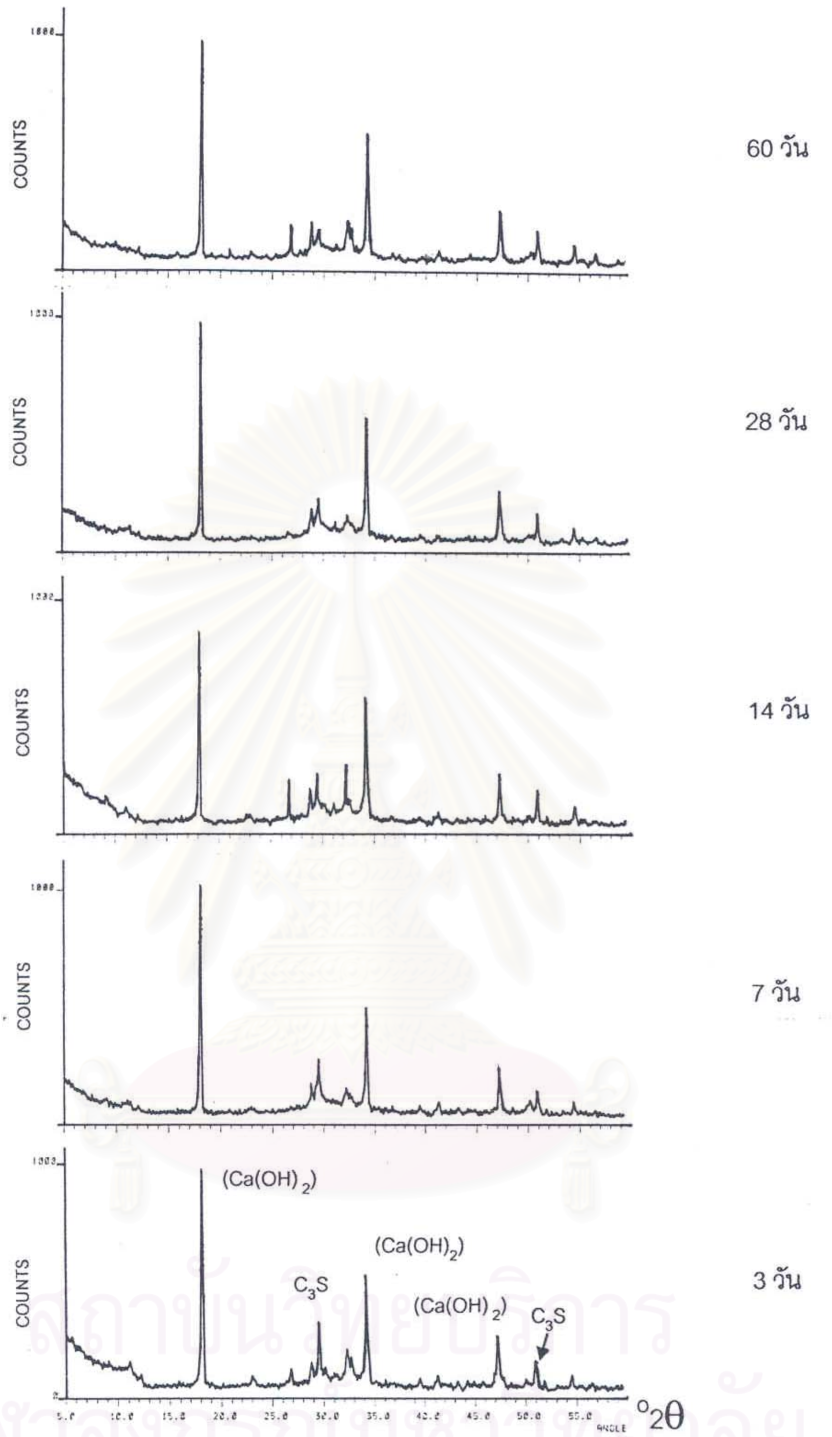
รูปที่ 4.19 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา ที่อายุการบ่มต่างๆ



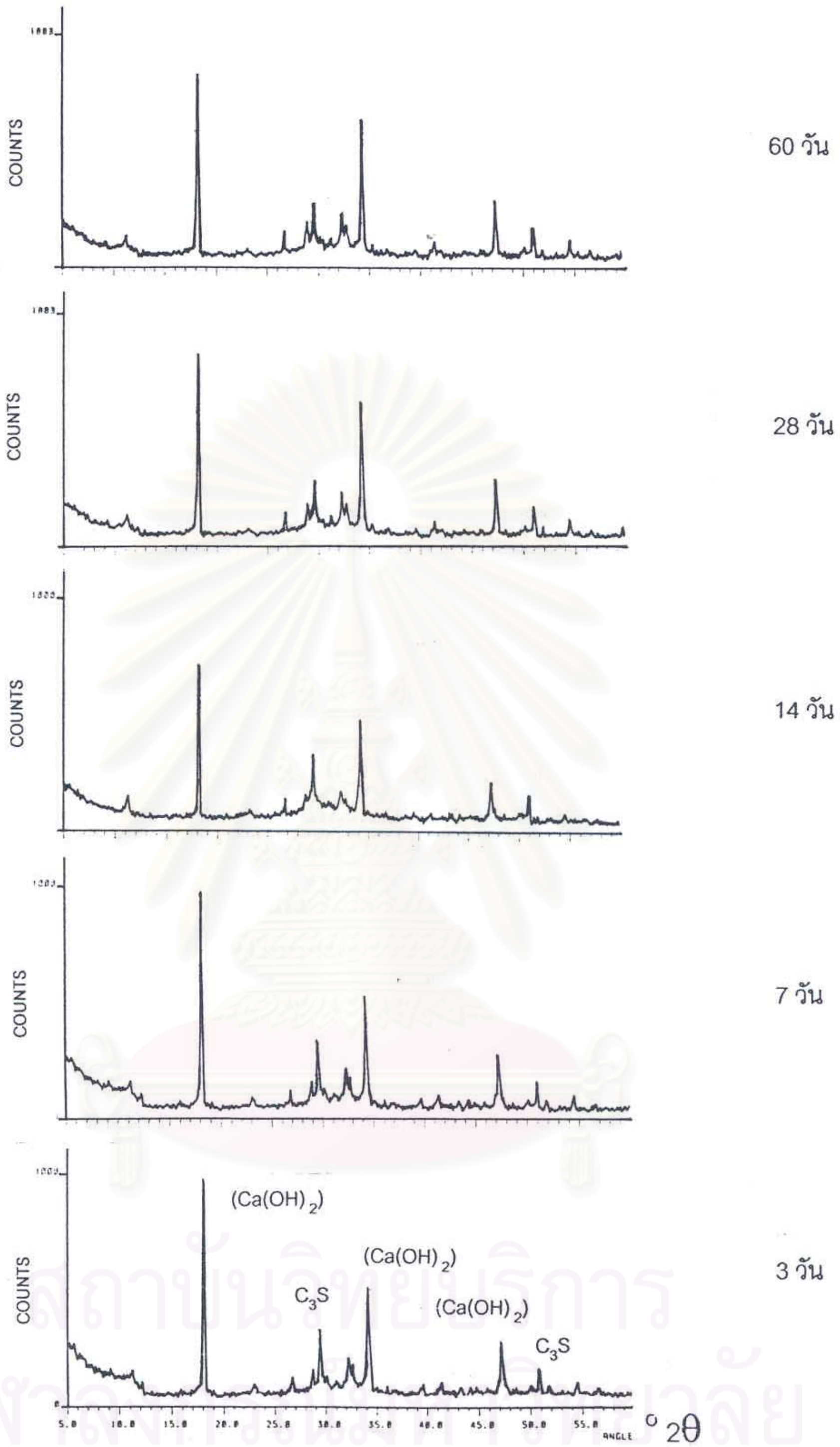
รูปที่ 4.20 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.21 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ



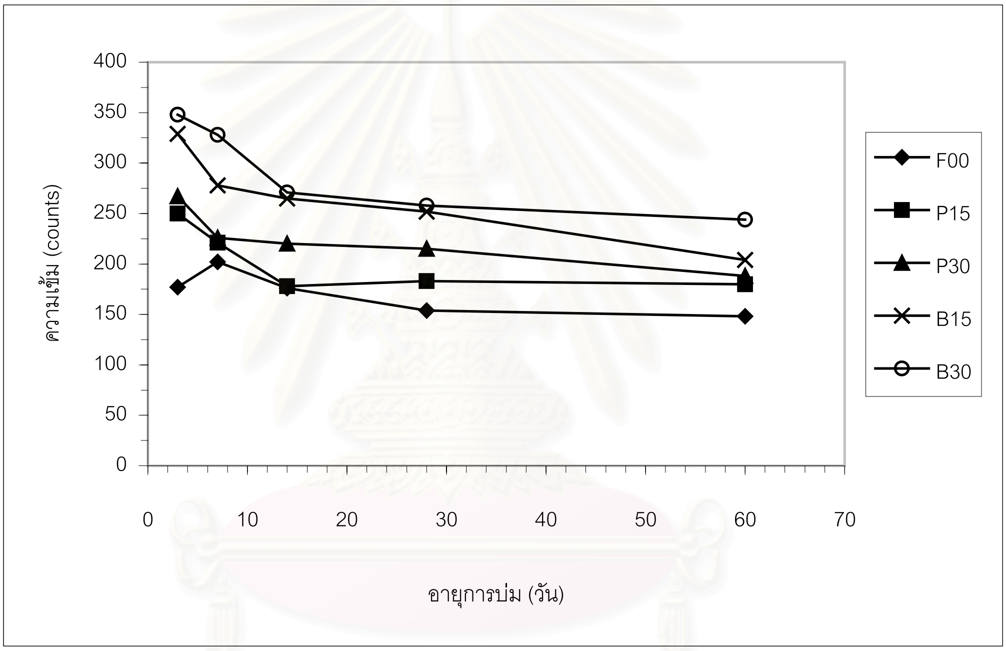
รูปที่ 4.22 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ



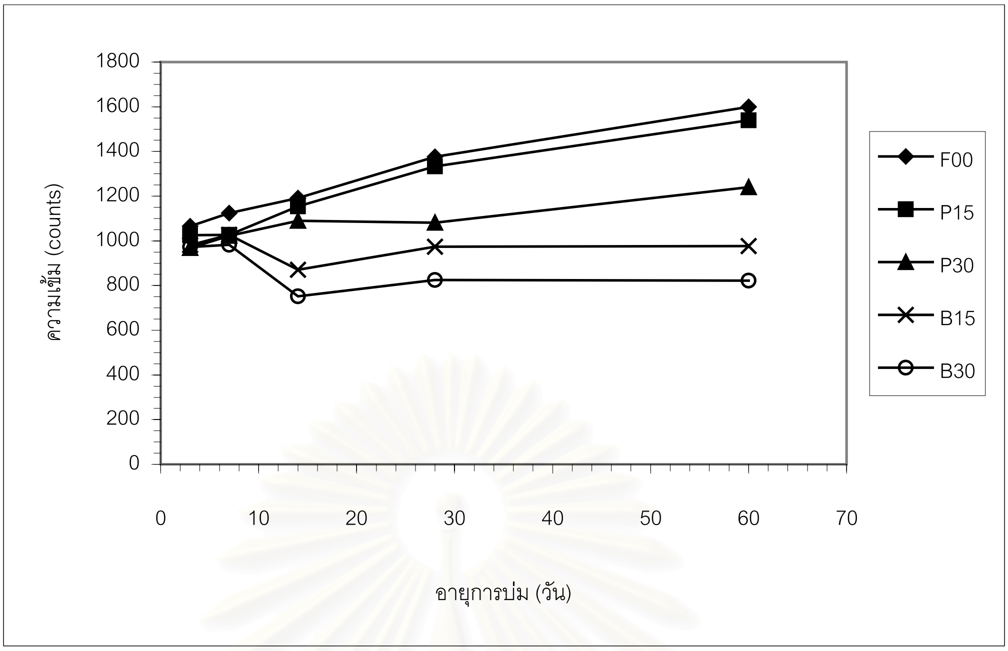
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.23 ผล XRD ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มต่างๆ

การพิจารณาถึงการลดลงของสารประกอบเริ่มต้นในซีเมนต์เพสท์และการเพิ่มขึ้นของสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้รู้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร จาก X-Ray Diffractograms พบว่า ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบตัวหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าความเข้มสูงสุดที่ Diffraction peak ที่ 29.44° 2θ ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีค่าความเข้มสูงสุดที่ Diffraction peak ที่ 18.08° 2θ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสารประกอบทั้งสองชนิดนี้กับระยะเวลาในการบ่ม แสดงในรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ความเข้มของไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ที่ 29.44° 2θ ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) และซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย (BXX) ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.25 ความเข้มของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ 18.08^{O} 2θ ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม (PXX) และซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย (BXX) ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่า ความเข้มข้นของไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) มีค่าต่ำกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย ทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยทุกอายุการบ่ม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า ความเข้มของไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีแนวโน้มค่อยๆ ต่ำลง เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งต่ำกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย จากที่กล่าวมานี้ สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในซีเมนต์เพสท์ธรรมดาถูกใช้ไปในปริมาณมากกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย ตามลำดับ และการผสมเถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้สารที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสท์ช้าลง

คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) นอกจากจะเป็นตัวชี้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไรแล้ว ยังเป็นตัวบ่งชี้อย่างคร่าวๆ ถึงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอย ในรูปที่ 4.25 จะเห็นว่า ความเข้มของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) มีค่าสูงกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย ทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยทุกอายุการบ่ม เมื่อ

เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มกับในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า ค่าความเข้มของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีแนวโน้มค่อยๆ สูงขึ้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งมากกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย

4.3 ลักษณะน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งได้จากวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) แสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณโลหะหนักทุกชนิดในน้ำชะจากเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้น ทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย จึงสามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ โดยไม่ผิดกฎหมาย

ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นของน้ำชะ ของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

ชนิดโลหะหนัก	เกณฑ์กำหนด (มก./ล.)	ความเข้มข้นของน้ำชะ (มก./ล.)	
		เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	เถ้าลอยชานอ้อย
Ag	5	<0.007	<0.007
As	5	<0.05	<0.05
Ba	100	0.078	0.100
Cd	1	<0.005	<0.005
Cr	5	<0.007	<0.007
Hg	2	<0.03	<0.03
Pb	5	<0.05	<0.05
Se	1	<0.09	<0.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

จากค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่ได้จากการวิจัย ดังสรุปในตารางที่ 4.13 จะเห็นว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังเช่น การนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานซีเมนต์ที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก เช่น คอนกรีตบล็อก ซึ่งมีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้ที่ 25 กก./ซม.^{2} หรืออาจใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) และการปรับเสถียร (Stabilization) ซึ่งคาดว่าจะสามารถแทนที่ได้ในปริมาณมาก เนื่องจาก มีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้เพียง 3.5 กก./ซม.^{2} แต่ทั้งนี้ต้องทำการวิจัยในการทำผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยใช้เถ้าลอยแต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก่อน การพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาในงานวิจัยนี้เป็นเพียงแนวทางเท่านั้น เพราะอาจมีสัดส่วนผสมต่างกับผลิตภัณฑ์ต่างๆที่จะทำขึ้น ทำให้ผลที่ได้อาจแตกต่างไป สำหรับเถ้าลอยชานอ้อยอาจไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานซีเมนต์เพราะมีสีดำ ซึ่งอาจเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยชานอ้อยผสมอยู่นั้นไม่เป็นที่ยอมรับ ทำให้อาจใช้ได้เฉพาะในการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) และการปรับเสถียร (Stabilization) ในหัวข้อนี้จะทำการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำคอนกรีตบล็อก โดยมีเถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 4.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย และร้อยละกำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ปริมาณการแทนที่ (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})		ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)	
	มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย	มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย
0	300	300	100	100
10	254	145	84.7	48.3
15	233	128	77.7	42.7
20	208	124	69.3	41.3
30	176	121	58.7	40.3
40	164	98	54.7	32.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนกับการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสม สำหรับอัตราส่วนผสมของวัสดุในการทำคอนกรีตบล็อก ใช้อัตราส่วน วัสดุประสาน : ทราย : น้ำ เท่ากับ 1 : 2.75 : 0.485 (วัสดุประสาน เมื่อมีเถ้าลอยแทนที่ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เถ้าลอย เท่ากับ 9 : 1)

จากตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 จะเห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เท่ากับ 6.00 บาท เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และเท่ากับ 5.45, 5.18, 4.90, 4.36 และ 3.81 บาท เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในการคิดค่าใช้จ่ายนี้ไม่ได้รวมค่าขนส่งเถ้าลอยไปยังสถานที่ผลิตคอนกรีตบล็อก ค่าแรงของคนงานหรือค่าเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต และไม่ได้รวมถึงการหักค่าใช้จ่ายในการจัดการเถ้าลอย หากไม่ได้เอามาใช้ประโยชน์

ทั้งนี้ในการเลือกว่าจะใช้ปริมาณการแทนที่เท่าไรนั้น ต้องพิจารณาถึงสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล็อกที่ได้จากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณต่างๆ โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัด ว่าเป็นอย่างไร เปรียบเทียบกับราคาต่อก้อนแล้วคุ้มค่าหรือไม่ ซึ่งต้องทำการหล่อก้อนคอนกรีตบล็อกแล้วทดสอบ โดยอาจต้องปรับส่วนผสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติเป็นที่พอใจ ในราคาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน

วัสดุที่ใช้				คอนกรีตบล็อกธรรมดา	
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท/หน่วย)	น้ำหนัก/หน่วย (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	135 บาท/ถุง	50 กก.	2.7	2.025	5.47
ทราย	250 บาท/ลบ.ม.	2,650 กก.	0.094	5.569	0.52
น้ำ	10 บาท/หน่วย	1,000 กก.	0.01	0.982	0.01
เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม	-	-	-	-	-
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	**6.00**

ตารางที่ 4.14 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ส่วนประกอบ	คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 10		คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 15		คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 20		คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 30		คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 40	
	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1.823	4.92	1.721	4.65	1.620	4.37	1.418	3.83	1.215	3.28
ทราย	5.569	0.52	5.569	0.52	5.569	0.52	5.569	0.52	5.569	0.52
น้ำ	0.982	0.01	0.982	0.01	0.982	0.01	0.982	0.01	0.982	0.01
เถ้าลอย	0.203	-	0.304	-	0.405	-	0.608	-	0.810	-
รวมค่าใช้จ่าย	-	**5.45**	-	**5.18**	-	**4.90**	-	**4.36**	-	**3.81**

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งได้ศึกษาถึงสมบัติพื้นฐานของวัสดุ คือ สมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิด รวมถึงผลที่ได้จากการใช้เถ้าลอยแต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในมอร์ตา และเพื่อให้แน่ใจเกี่ยวกับความปลอดภัยในการนำเถ้าลอยนี้มาใช้ประโยชน์ จึงวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยทั้งสองชนิด โดยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ผลสรุปที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

5.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 59.16 และ 67.94 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนคัลเซียม (CaO) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) มีอยู่ในปริมาณต่ำ สำหรับเถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในปริมาณสูงมาก คือ ร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 8.57 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618) พบว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) และซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดไม่ตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

สำหรับลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยนั้น พบว่าเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมีขนาดหยาบกว่าเถ้าลอยชานอ้อยเล็กน้อย และเถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเทียบกับขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มส่วนใหญ่มีลักษณะกลมและมีรูเล็กๆ ที่ผิวอนุภาค มีบางส่วนมีลักษณะเหมือนก้อนกลมที่จับตัวกัน ส่วนของเถ้าลอยชานอ้อยมีลักษณะอนุภาคเป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีรูโพรงที่ผิวอนุภาคเป็นจำนวนมากกว่าเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

ในการศึกษาเรื่องความข้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว พบว่า ทั้งซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาทุกปริมาณการแทนที่ สำหรับมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มที่ปริมาณการแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 254 กก./ซม.^{2} ซึ่งผ่านตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.^{2} และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดาคิดเป็นร้อยละ 84.7 ส่วนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำมาก มีค่ากำลังรับแรงอัดในทุกปริมาณการแทนที่ ที่อายุการบ่ม 28 วัน ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา เพียงประมาณร้อยละ 50 ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่สูงในเถ้าลอยชานอ้อยจะดูดน้ำที่ใช้ผสม ทำให้ปริมาณน้ำที่จะใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงกำลังรับแรงอัดที่จะต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ที่ปริมาณการแทนที่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ปริมาณคาร์บอนของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าสูงกว่าของเถ้าลอยลิกไนต์ นอกจากนี้ การที่ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย อยู่ในรูปควอทซ์ (Quartz) ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย ซึ่งทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าต่ำ

จากผลที่ได้ พบว่า คาร์บอนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาต่ำ และเนื่องจากในการวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดคงที่ คือ 0.485 ซึ่งไม่ได้แปรเปลี่ยนปริมาณน้ำเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น นอกจากจะเป็นการลดสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดแล้ว ก็ยังทำให้มีการดูดน้ำในส่วนผสมไปมากขึ้น เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลง ซึ่งหากมีการแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแล้ว ผลการวิจัยที่ได้อาจแตกต่างไป

สารประกอบตัวหลักในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่พบจากการทดสอบโดย XRD คือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งจากการศึกษาการลดลงของไตรคัลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารประกอบเริ่มต้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และการเพิ่มขึ้นของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น พบว่า ปริมาณไตรคัลเซียมซิลิเกตถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในซีเมนต์เพสท์ธรรมดามากกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมากกว่าซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ตามลำดับ ส่วนปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซดในซีเมนต์เพสท์ธรรมดา มีค่ามากกว่าในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมากกว่าซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการวิจัย

5.3 ลักษณะน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

ปริมาณโลหะหนักทุกชนิดในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย อยู่ในเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด ดังนั้น ทั้งเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย จึงสามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ โดยถูกกฎหมาย

5.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาผลของกำลังรับแรงอัด พบว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น การนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตบล็อก หรืออาจใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) และการปรับเสถียร (Stabilization) ซึ่งควรทำการวิจัยในการทำผลิตภัณฑ์นั้นๆ ก่อนที่จะนำมาใช้จริง เพราะค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการหล่อก้อนมอร์ตาในงานวิจัยนี้ย่อมต่างจากผลิตภัณฑ์ที่จะทำขึ้น โดยต้องพิจารณาถึงสมบัติในการใช้งานในด้านต่างๆ ที่เกิดจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัด เปรียบเทียบกับราคาค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนการผลิต ให้เหมาะสมคุ้มค่าที่สุด สำหรับเถ้าลอยชานอ้อยนั้น อาจไม่เหมาะที่จะใช้ในงานซีเมนต์ เพราะมีสีดำ ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับ

5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1) ควรศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยผสมลงไป เช่น ความสามารถในการทำงานได้ ความทนทาน ความสามารถในการซึมน้ำได้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ความต้านทานในการรับแรงอัดและรับแรงดึงของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งอาจจะให้ผลที่ต่างจากการใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยผสมมอร์ตา ของงานวิจัยนี้

2) ควรเสริมคุณสมบัติของเถ้าลอยทั้งสองชนิดเพื่อให้เหมาะกับงานคอนกรีต เช่น บดเถ้าลอยให้ละเอียดขึ้น หรือเติมสารใดๆ ที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานที่ดีขึ้น

3) ถึงแม้ว่าจากผลการวิจัยในครั้งนี้ เถ้าลอยชานอ้อยจะให้ค่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ต่ำและมอร์ตาที่ได้มีสีดำ ซึ่งอาจไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งาน ก็ควรศึกษาการนำเถ้าลอยชานอ้อยไปใช้ในทางอื่น เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อยที่มีรูโพรงที่ผิวมากและมีปริมาณคาร์บอนอยู่สูงนั้น อาจจะเป็นประโยชน์ในด้านอื่นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จักพล กลั่นมั่นคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร. 2543. การศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สถาบันวิจัยพลังงาน. 2541. รายงานการศึกษาเรื่องการใช้และประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค).

ทิพยรัตน์ หาญสืบสาย. 2544. เถ้าลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

บริษัททักษิณปาล์ม (2521) จำกัด. 2544. Process Flow – Sheet. (ม.ป.ท.)

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร. 2528. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มนตรี นิธิกุล. 2542 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะกับอุณหภูมิที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เมธี เวชารัตนา. 2535. Utilization of Fly Ash in Concrete. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. อ้างถึงใน มนตรี นิธิกุล. ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะกับอุณหภูมิที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

วาสนา สามห้วย. 2538 การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัสวิทย์ ปัทมะเวณุ. 2540. ตามรอยน้ำตาล. กรุงเทพฯ : ที.พี.พริ้นท์.

อุดม หงษ์ประธานพร. 2532. การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. กรุงเทพฯ : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). C109-95, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 69-73.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Specification for Portland Cement. C150-95a, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 130-134.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement . C187-86, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 156-157.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. C188-95, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 158-159.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needles. C191-92, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 160-162.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. C204-96, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 163-169.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete. C311-96a, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 184-190.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Concrete. C618-96, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 293-295.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Specification for Standard Sand. C778-92a, Annual Book of ASTM Standards. 04.01 Section 4 : 337-339.

Frias, M., and De Fojas, M.I. Sanchez. 1997. Microstructural Atterations in Fly Ash Mortars : Study on Phenomena Affecting particle and Pore Size. Cement and Concrete Research 27 : 619-628.

Inthasaro, P. 2002. Utilization of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as a Partial Cement Replacement. Master's Thesis, Inter-Departmental Program in Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.

Maltais, Y., and Marchard, J. 1997. Influence of Curing Temperature o Cement Hydration and Mechanical Strength Development of Fly Ash Mortars. Cement and Concrete Research 27 : 1009-1020.

Nontananandh, S. 1990. Industrial Waste Utilization as Construction Materials by Chemical Stabilization. Doctoral dissertation, Department of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto. อ้างถึงใน วาสนา สามห้วย. การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.

Tay, J. H., and Show, K. Y. 1996. Utilization of Ashes from Oil-Palm Wastes as a Cement Replacement Material. Water Science and Technology 34:185-192.

Wangwichit, K. 1997. Comparative Study on Mortar Containing Fly Ash from Southeast Asia and Japan in Relation to Strength and Durability. Master's Thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo.

Weiping, M., and Brown, P.W. 1997. Hydrothermal Reaction of Fly Ash with $Ca(OH)_2$ and $CaSO_4.2H_2O$. Cement and Concrete Research 27 : 1237-1248.

Wesche, K., ed. 1991. Fly Ash in Concrete : Properties and Performance. Great Britain : Chapman & Hall.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. 2520. รายงานข้อศึกษาเรื่องน้ำตาล. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.

ปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, สำนักงาน. สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11. 2543. รายงานการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากโรงงานน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและกระบี่. (ม.ป.ท.)

ปรีชา สุริยพันธ์. 2523. ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากอ้อย. อ้อย, หน้า 242 – 254. กรุงเทพฯ : งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองแผนงาน กรมวิชาการเกษตร.

ปรีชา สุริยพันธ์ และ สมเกียรติ พัฒนาเมธีกูร. 2523. การผลิตน้ำตาลจากอ้อย. อ้อย, หน้า 211 – 228. กรุงเทพฯ : งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองแผนงาน กรมวิชาการเกษตร.

ประเทือง โชคประเสริฐ. 2542. การเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิศาล มโนลีหกุล และ นิจธร ยมนา. 2521. น้ำตาล. เอกสารวิชาการธนาคารกสิกรไทย ปีที่ 1 ฉบับที่ 2. กรุงเทพฯ : มาร์เก็ทติ้งมีเดีย.

วรรณนภา ตุรงค์สมบูรณ์. 2538. รูปแบบการจัดการคุณภาพการผลิตน้ำตาลทรายดิบของโรงงานน้ำตาลทราย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศักดิ์ศิลป์ โชติกุล, วินาภรณ์ กุฎีรัตน์ และ กิจจารักษ์ วงษ์กุดเลาะ. 2541. เอกสารทางวิชาการเรื่องปาล์มน้ำมัน. กรุงเทพฯ : กองส่งเสริมพืชไร่นา กรมส่งเสริมการเกษตร.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. อุตสาหกรรมน้ำตาลไทย. (ม.ป.ท.)

ภาษาอังกฤษ

Fraay, A.L.A., Bigen, J.M., and De Hann, Y.M. 1989. The Reaction of Fly Ash in Concrete. Cement and Concrete Research 19 : 235-246.

Halstead, W.J. 1994. Improved Concrete Quality with Combinations of Fly Ash and Silica Fume. J. of the American Concrete Institute 91 : 587-594.

Helmuth, R. 1987. Fly Ash in Cement and Concrete. Illinois : Portland Cement Association.

Hussin, M.W., and Abdul Awal, A.S.M. 1999. Influence of Palm Oil Fuel Ash on Sulfate Resistance of Mortar and Concrete. In V.M. Malhotra (ed.), Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolan in Concrete, Proceeding Sixth CANMET/ACI International Conference, Bangkok, 1998, PP. 417-429. United States of America : ACI.

Lane, R.O., and Best, J.F. 1982. Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. Concrete International 4 : 81-92.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา มอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา (F00)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	168.38	174.52	167.12	170.00
7	234.62	228.12	232.11	231.62
14	273.47	265.38	265.64	268.16
28	292.14	294.64	314.45	300.41
60	332.59	334.52	320.47	329.19
90	343.12	346.61	322.80	337.51

ตารางที่ ผ2 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (P10)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	127.45	125.31	137.48	130.08
7	174.23	184.91	170.24	176.46
14	212.56	220.45	220.56	217.86
28	248.16	273.28	239.67	253.70
60	284.55	274.12	277.56	278.74
90	285.42	300.61	272.58	286.20

ตารางที่ ผ3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	123.95	110.45	120.84	118.41
7	164.41	156.38	143.25	154.68
14	182.79	196.23	180.46	186.49
28	218.38	246.25	230.64	231.76
60	250.48	251.36	240.69	247.51
90	254.64	252.38	244.12	250.38

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (P20)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	107.65	104.38	108.25	106.76
7	141.53	148.38	146.21	145.37
14	175.87	185.23	178.24	179.78
28	210.00	204.68	207.96	207.55
60	224.69	225.45	229.24	226.46
90	235.25	221.56	229.29	228.70

ตารางที่ ผ5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	95.45	92.36	101.23	96.35
7	123.48	136.89	132.44	130.94
14	159.44	152.45	152.38	154.76
28	174.65	183.95	170.21	176.27
60	188.69	195.38	195.45	193.17
90	206.25	203.78	198.55	202.86

ตารางที่ ผ6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (P40)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	98.45	87.45	92.64	92.85
7	128.53	134.47	125.22	129.41
14	155.26	158.48	148.21	153.98
28	165.43	172.12	155.54	164.36
60	186.64	180.25	172.65	179.85
90	185.25	188.56	180.34	184.72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (B10)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	89.24	93.56	92.15	91.65
7	113.25	114.64	109.58	112.49
14	128.73	136.91	130.54	132.06
28	146.44	141.24	147.12	144.93
60	154.68	157.34	155.24	155.75
90	162.54	167.35	163.38	164.42

ตารางที่ ผ8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	83.14	90.38	86.54	86.68
7	110.22	114.59	118.92	114.58
14	123.13	121.23	113.56	119.31
28	132.45	124.38	127.34	128.06
60	140.66	135.24	137.48	137.79
90	147.45	138.78	144.23	143.49

ตารางที่ ผ9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (P20)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	85.45	80.27	83.69	83.14
7	97.86	102.45	94.34	98.22
14	115.59	102.31	108.74	108.88
28	129.27	120.52	122.34	124.04
60	136.15	126.56	130.78	131.16
90	143.62	136.17	135.42	138.40

ตารางที่ ผ10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	69.32	75.38	79.46	74.72
7	93.63	84.58	86.23	88.15
14	102.44	105.36	100.98	102.93
28	120.38	123.69	120.34	121.47
60	128.54	125.52	124.46	126.17
90	130.24	125.82	123.76	126.61

ตารางที่ ผ11 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (B40)

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3	68.89	66.51	71.52	68.97
7	83.56	74.32	76.45	78.11
14	88.44	83.67	85.12	85.74
28	96.29	95.34	102.47	98.03
60	102.25	105.69	107.13	105.02
90	106.37	110.95	101.86	106.39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ12 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 3 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.96	8.873	128	12
18.04	4.913	1065	100
28.68	3.110	200	19
29.44	3.031	177	17
31.08	2.875	119	11
32.12	2.784	147	14
32.60	2.744	156	15
34.12	2.626	668	63
36.64	2.451	78	7
37.16	2.417	68	6
39.44	2.283	68	6
47.12	1.927	282	26
50.16	1.817	84	8
50.84	1.794	210	20
54.40	1.685	117	11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ13 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1124	100
23.00	3.864	75	7
28.66	3.110	163	15
29.44	3.031	202	18
31.08	2.875	106	9
32.24	2.774	267	24
32.64	2.741	203	18
34.12	2.626	660	59
38.68	2.326	69	6
39.36	2.287	73	6
41.24	2.187	112	10
47.16	1.926	272	24
50.84	1.794	163	15
51.72	1.766	85	8
54.36	1.686	104	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ14 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 14 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.08	9.731	127	11
18.08	4.902	1192	100
28.72	3.106	196	16
29.40	3.035	176	15
32.16	2.781	212	18
32.56	2.748	214	18
34.12	2.626	633	53
39.52	2.278	71	6
41.24	2.187	84	7
47.12	1.927	294	25
50.80	1.796	165	14
51.68	1.767	80	7
54.40	1.685	110	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ15 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.08	9.731	117	9
18.08	4.902	1376	100
23.04	3.857	76	6
28.76	3.102	192	14
29.44	3.031	154	11
31.08	2.875	123	9
32.16	2.781	202	15
32.64	2.741	183	13
34.16	2.623	621	45
41.28	2.185	94	7
47.20	1.924	313	23
50.84	1.794	184	13
54.40	1.685	116	6
56.44	1.629	72	5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ16 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา (F00) ที่อายุการบ่ม 60 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.12	4.892	1600	100
28.76	3.102	204	13
29.48	3.027	148	9
32.16	2.781	172	11
32.64	2.741	147	9
34.16	2.623	768	48
41.28	2.185	104	7
47.20	1.924	337	21
50.04	1.821	93	6
50.84	1.794	177	11
54.44	1.684	126	8
55.44	1.656	70	4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ17 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 3 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1025	100
26.72	3.334	186	18
28.76	3.102	153	15
29.44	3.031	250	24
32.24	2.774	283	28
32.64	2.741	220	21
34.16	2.623	525	51
36.64	2.451	76	7
39.44	2.283	82	8
41.28	2.185	106	10
47.16	1.926	251	24
50.20	1.816	81	8
50.84	1.794	137	13
51.76	1.765	79	8
54.36	1.666	86	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ18 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1027	100
20.92	4.243	124	12
26.68	3.338	356	35
28.76	3.102	166	16
29.44	3.031	221	22
32.20	2.778	346	34
34.12	2.626	434	42
36.60	2.453	106	10
45.84	1.978	91	9
47.16	1.926	219	21
50.20	1.816	140	14
50.88	1.793	126	12
54.44	1.684	83	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ19 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 14 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1154	100
28.72	3.106	140	12
29.44	3.031	178	15
32.16	2.781	180	16
32.56	2.744	120	10
34.12	2.626	631	55
39.52	2.410	173	15
41.24	2.187	102	9
47.12	1.927	315	27
50.80	1.794	130	11
51.68	1.819	178	15
54.40	1.686	92	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ20 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
12.20	7.249	91	7
18.08	4.902	1333	100
20.92	4.243	95	7
26.68	3.338	258	19
28.72	3.106	197	15
29.52	3.023	183	14
31.12	2.872	130	10
32.24	2.774	166	12
32.60	2.744	190	14
34.16	2.623	632	47
41.24	2.187	89	7
47.20	1.924	284	21
50.16	1.817	94	7
50.84	1.794	166	12
54.40	1.685	111	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ21 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (P15) ที่อายุการบ่ม 60 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.96	8.873	128	8
18.08	4.902	1540	100
26.68	3.338	157	10
28.72	3.106	179	12
29.52	3.023	180	12
32.28	2.771	166	11
32.56	2.748	193	13
34.12	2.626	547	36
47.12	1.927	265	17
50.84	1.794	147	10
54.36	1.686	102	7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ22 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 3 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
15.76	5.618	84	9
18.12	4.892	968	100
20.92	4.243	158	16
23.04	3.857	101	10
26.72	3.334	373	39
28.76	3.102	142	15
29.48	3.027	267	28
32.32	2.768	175	18
32.68	2.738	167	17
34.16	2.623	473	49
34.32	2.611	256	26
36.56	2.456	82	8
38.72	2.324	76	8
39.52	2.278	89	9
41.00	2.199	87	9
41.32	2.183	110	11
45.04	2.011	64	7
45.88	1.976	76	8
47.20	1.924	261	27
50.24	1.814	98	10
50.84	1.794	128	13
51.80	1.763	71	7
54.40	1.685	91	9

ตารางที่ ผ23 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2θ (^{o})	D (^{o}A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1022	100
20.92	4.243	140	14
26.72	3.334	364	36
28.72	3.106	158	15
29.44	3.031	226	22
32.20	2.778	162	16
34.12	2.626	458	45
36.60	2.453	76	7
45.92	1.978	65	6
47.16	1.926	247	24
50.20	1.816	102	10
50.84	1.794	82	8
54.44	1.684	94	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ24 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 14 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.12	9.689	139	13
18.12	4.892	1090	100
20.92	4.243	147	13
26.72	3.334	314	29
28.76	3.102	182	17
29.48	3.027	220	20
31.16	2.868	127	12
32.20	2.778	185	17
32.64	2.741	182	17
34.16	2.623	544	50
36.72	2.445	98	9
39.64	2.272	87	8
41.24	2.187	96	9
47.16	1.926	267	24
50.20	1.816	108	10
50.84	1.794	159	15
54.40	1.685	101	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ25 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.08	4.902	1081	100
20.92	4.243	180	17
26.72	3.334	413	38
28.72	3.106	175	16
29.44	3.031	215	20
32.20	2.778	173	16
32.60	2.744	151	14
34.12	2.626	531	49
36.68	2.448	104	10
47.12	1.927	222	21
49.92	1.825	90	8
50.20	1.816	137	13
50.84	1.794	149	14
54.40	1.685	85	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ26 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (P30) ที่อายุการบ่ม 60 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.20	9.605	131	11
18.12	4.892	1240	100
20.92	4.243	147	12
26.72	3.334	437	35
28.76	3.102	201	16
29.52	3.023	188	15
32.24	2.774	187	15
34.16	2.623	486	39
36.68	2.448	103	8
47.16	1.926	239	19
50.24	1.814	124	10
50.84	1.794	150	12
54.40	1.685	96	8
55.36	1.658	76	6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ27 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 3 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.08	9.731	159	16
11.12	7.950	156	16
12.16	7.272	103	10
18.12	4.892	981	100
19.04	4.657	70	7
23.00	3.864	97	10
26.76	3.329	126	13
28.76	3.102	151	15
29.48	3.027	329	34
30.12	2.965	130	13
31.16	2.868	103	10
32.24	2.774	203	21
32.64	2.741	175	18
34.16	2.623	528	54
35.12	2.553	77	8
36.04	2.490	76	8
39.56	2.276	87	9
41.32	2.183	97	10
43.24	2.091	73	7
44.20	2.047	76	8
45.84	1.978	71	7
47.16	1.926	273	28
50.04	1.821	82	8
50.88	1.793	157	16
51.72	1.766	73	7
54.44	1.684	94	10
56.60	1.625	64	7

ตารางที่ ผ28 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
18.04	4.913	1027	100
28.68	3.110	167	16
29.24	3.052	179	17
29.40	3.035	278	27
32.16	2.781	154	15
32.52	2.751	133	13
34.08	2.629	496	48
39.40	2.285	85	8
41.24	2.187	99	10
47.12	1.927	236	23
50.12	1.819	100	10
50.80	1.796	145	14
54.36	1.686	97	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ29 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 14 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.16	9.646	163	19
11.08	7.979	115	13
12.20	7.249	82	9
18.08	4.902	870	100
25.72	3.461	74	9
26.72	3.334	218	25
28.04	3.180	88	10
28.76	3.102	185	21
29.44	3.031	265	30
31.08	2.675	131	15
32.24	2.774	298	34
32.60	2.744	152	17
34.16	2.623	586	67
41.20	2.189	96	11
44.12	2.051	73	8
45.52	1.991	66	8
45.76	1.981	72	8
47.16	1.926	258	30
50.16	1.817	81	9
50.84	1.794	187	21
51.72	1.766	75	9
53.08	1.724	57	7
54.40	1.685	113	13
55.44	1.656	63	7
58.04	1.588	52	6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ30 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
11.20	7.894	112	11
18.08	4.902	974	100
26.60	3.348	86	9
28.72	3.106	188	19
29.40	3.035	252	26
31.04	2.879	135	14
32.16	2.781	157	16
34.12	2.626	573	59
39.40	2.285	78	8
41.12	2.193	77	8
47.12	1.927	261	27
50.84	1.794	172	18
54.36	1.686	109	11
56.52	1.627	66	7
59.48	1.553	61	6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ31 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (B15) ที่อายุการบ่ม 60 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
11.12	7.950	135	14
18.12	4.892	976	100
23.04	3.857	82	8
26.64	3.343	150	15
28.80	3.097	178	18
29.24	3.052	157	16
29.48	3.027	204	21
31.04	2.879	131	13
32.24	2.774	227	23
32.64	2.741	186	19
34.16	2.623	625	64
35.24	2.545	92	9
41.28	2.185	110	11
47.20	1.924	289	30
50.08	1.820	85	9
50.88	1.793	174	18
51.72	1.766	82	8
54.40	1.685	112	11
55.24	1.661	70	7
56.40	1.630	73	7
59.40	1.555	78	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ32 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 3 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.16	9.646	158	16
11.24	7.866	160	16
12.20	7.249	90	9
18.12	4.892	972	100
23.04	3.857	100	10
26.68	3.338	134	14
28.76	3.102	138	14
29.48	3.027	348	36
32.24	2.774	272	28
32.64	2.741	224	23
34.16	2.623	403	41
34.48	2.599	172	18
39.44	2.283	91	9
41.28	2.185	112	12
45.88	1.978	76	8
47.16	1.926	232	24
50.84	1.794	123	13
54.40	1.685	100	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ33 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
9.20	9.605	127	13
11.16	7.922	163	17
12.20	7.249	90	9
18.08	4.902	982	100
23.20	3.831	97	10
26.68	3.338	157	16
28.72	3.106	183	19
29.44	3.031	328	33
32.20	2.778	181	18
32.60	2.744	165	17
34.12	2.626	575	59
41.24	2.187	95	10
47.16	1.926	245	25
50.84	1.794	147	15
54.40	1.685	100	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ34 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 14 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
11.20	7.894	143	19
18.04	4.913	752	100
20.80	4.267	75	10
23.08	3.850	90	12
26.64	3.343	139	18
28.68	3.110	148	20
29.40	3.035	271	36
32.24	2.774	171	23
32.60	2.744	138	18
34.12	2.626	481	64
34.36	2.608	180	24
36.68	2.448	83	11
39.44	2.283	82	11
41.20	2.189	78	10
47.12	1.927	206	27
50.16	1.817	85	11
50.84	1.794	149	20
54.44	1.684	75	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ35 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
11.12	7.950	148	18
18.12	4.892	825	100
23.08	3.850	96	12
26.64	3.343	172	21
28.68	3.110	184	22
29.48	3.027	258	31
31.04	2.879	120	15
32.24	2.774	252	31
32.64	2.741	190	23
34.12	2.623	687	83
35.24	2.545	91	11
41.20	2.189	98	12
47.12	1.924	270	33
50.88	1.817	92	11
51.40	1.685	192	23
55.24	1.684	74	9
56.40	1.630	80	10
59.40	1.532	72	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ36 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction ของซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (B30) ที่อายุการบ่ม 60 วัน

2θ (°)	D (°A)	I (counts)	I/I_o
11.20	7.894	137	17
18.04	4.913	822	100
23.04	3.857	80	10
26.64	3.434	165	20
28.80	3.097	172	21
29.40	3.035	244	30
31.04	2.879	150	18
32.24	2.774	248	30
32.60	2.744	176	21
34.36	2.608	671	82
35.24	2.545	82	10
41.28	2.185	105	13
47.20	1.927	282	34
50.16	1.793	81	10
51.72	1.766	178	22
55.44	1.661	69	8
56.84	1.794	71	9
59.40	1.555	69	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

มาตรฐาน ASTM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Designation: C 109/C 109M – 95

Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)[1]

This standard is issued under the fixed designation C 109/C 109M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the compressive strength of hydraulic cement mortars, using 2-in. or [50-mm] cube specimens.

NOTE 1—Test Method C 349 provides an alternative procedure for this determination (not to be used for acceptance tests).

1.2 This test method covers the application of the test using either inch-pound or SI units. The values stated in either system shall be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 230 Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement[2]

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency[2]

C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)[2]

C 511 Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes[2]

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials[3]

C 778 Specification for Standard Sand[2]

C 1005 Specification for Weights and Weighing Devices for Use in Physical Testing of Hydraulic Cements[2]

3. Summary of Test Method

3.1 The mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass. Portland or air-entraining portland cements are mixed at specified water/cement ratios. Water content for other cements is that sufficient to obtain a flow of 110 ± 5 in 25 drops of the flow table. Two-inch or [50-mm] test cubes are compacted by tamping in two layers. The cubes are cured one day in the molds and stripped and immersed in lime water until tested.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a means of determining the compressive strength of hydraulic cement and other mortars and results may be used to determine compliance with specifications. Further, this test method is referenced by numerous other specifications and test methods. Caution must be exercised in using the results of this test method to predict the strength of concretes.

5. Apparatus

5.1 *Weights and Weighing Devices*, shall conform to the requirements of Specification C 1005. The weighing device shall be evaluated for precision and bias at a total load of 2000 g.

5.2 *Glass Graduates*, of suitable capacities (preferably large enough to measure the mixing water in a single operation) to deliver the indicated volume at 20°C. The permissible variation shall be ±2 mL. These graduates shall be subdivided to at least 5 mL, except that the graduation lines may be omitted for the lowest 10 mL for a 250-mL graduate and for the lowest 25 mL of a 500-mL graduate. The main graduation lines shall be circles and shall be numbered. The least graduations shall extend at least one seventh of the way around, and intermediate graduations shall extend at least one fifth of the way around.

5.3 *Specimen Molds*, for the 2-in. or [50-mm] cube specimens shall be tight fitting. The molds shall have not more than three cube compartments and shall be separable into not more than two parts. The parts of the molds when assembled shall be positively held together. The molds shall be made of hard metal not attacked by the cement mortar. For new molds the Rockwell hardness number of the metal shall be not less than 55 HRB. The sides of the molds shall be sufficiently rigid to prevent spreading or warping. The interior faces of the molds shall be plane surfaces and shall conform to the tolerances of Table 1.

5.4 *Mixer, Bowl and Paddle*, an electrically driven mechanical mixer of the type equipped with paddle and mixing bowl, as specified in Practice C 305.

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.

Current edition approved March 15, 1995. Published July 1995. Originally published as C 109 – 34 T. Last previous edition C 109 – 94a.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

TABLE 1 Permissible Variations of Specimen Molds

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. ± 0.005	2 in. ± 0.02	[50 mm ± 0.13 mm]	[50 mm ± 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to − 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to − 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm to − 0.13 mm]	[50 mm ÷ 0.25 mm to − 0.38 mm]
Angle between adjacent faces[A]	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°

[A] Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

5.5 *Flow Table and Flow Mold*, conforming to the requirements of Specification C 230.

5.6 *Tamper*, a nonabsorptive, nonabrasive, nonbrittle material such as a rubber compound having a Shore A durometer hardness of 80 ± 10 or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392°F or [200°C], shall have a cross section of about ½ by 1 in. or [13 by 25 mm] and a convenient length of about 5 to 6 in. or [120 to 150 mm]. The tamping face shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

5.7 *Trowel*, having a steel blade 4 to 6 in. [100 to 150 mm] in length, with straight edges.

5.8 *Moist Cabinet or Room*, conforming to the requirements of Specification C 511.

5.9 *Testing Machine*, either the hydraulic or the screw type, with sufficient opening between the upper bearing surface and the lower bearing surface of the machine to permit the use of verifying apparatus. The load applied to the test specimen shall be indicated with an accuracy of ±1.0 %. If the load applied by the compression machine is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that can be read to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 2). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment that is easily accessible from the outside of the dial case, and with a suitable device that at all times until reset, will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

5.9.1 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 2—As close as can be read is considered 1/50 in. or [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of the scale interval is about as close as can reasonably be read when the spacing on the load indicating mechanism is between 1/25 in. or [1 mm] and 1/16 in. or [1.6 mm]. When the spacing is between 1/16 in. or [1.6 mm] and 1/8 in. or [3.2 mm], one third of the scale interval can be read with reasonable certainty. When the spacing is 1/8 in. or [3.2 mm] or more, one fourth of the scale interval can be read with reasonable certainty.

5.9.2 The upper bearing shall be a spherically seated, hardened metal block firmly attached at the center of the upper head of the machine. The center of the sphere shall lie at the center of the surface of the block in contact with the specimen. The block shall be closely held in its spherical seat, but shall be free to tilt in any direction. The diagonal or diameter (Note 3) of the bearing surface shall be only slightly greater than the diagonal of the face of the 2-in. or [50-mm] cube in order to facilitate accurate centering of the specimen. A hardened metal bearing block shall be used beneath the specimen to minimize wear of the lower platen of the machine. The bearing block surfaces intended for contact with the specimen shall have a Rockwell hardness number not less than 60 HRC. These surfaces shall not depart from plane surfaces by more than 0.0005 in. or [0.013 mm] when the blocks are new and shall be maintained within a permissible variation of 0.001 in. or [0.025 mm].

NOTE 3—A diameter of 3⅛ in. or [79.4 mm], is satisfactory, provided that the lower bearing block has a diameter slightly greater than the diagonal of the face of the 2-in. or [50-mm] cube but not more than 2.9 in. or [74 mm], and is centered with respect to the upper bearing block and held in position by suitable means.

6. Materials

6.1 *Graded Standard Sand:*

6.1.1 The sand (Note 4) used for making test specimens shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification C 778.

NOTE 4—*Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

7. Temperature and Humidity

7.1 *Temperature*—The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry materials, molds, base plates, and mixing bowl, shall be maintained between 68 and 81.5°F or [20 and 27.5°C]. The temperature of the mixing water, moist closet or moist room, and water in the storage tank shall be set at 73.4°F or [23°C] and shall not vary from

this temperature by more than ±3°F or [±1.7°C].

7.2 *Humidity*—The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50 %. The moist closet or moist room shall conform to the requirements of Specification C 511.

8. Test Specimens

8.1 Make two or three specimens from a batch of mortar for each period of test or test age.

9. Preparation of Specimen Molds

9.1 Apply a thin coating of release agent to the interior faces of the mold and non-absorptive base plates. Apply oils and greases using an impregnated cloth or other suitable means. Wipe the mold faces and the base plate with a cloth as necessary to remove any excess release agent and to achieve a thin, even coating on the interior surfaces. When using an aerosol lubricant, spray the release agent directly onto the mold faces and base plate from a distance of 6 to 8 in. or [150 to 200 mm] to achieve complete coverage. After spraying, wipe the surface with a cloth as necessary to remove any excess aerosol lubricant. The residue coating should be just sufficient to allow a distinct finger print to remain following light finger pressure (Note 5).

9.2 Seal the surfaces where the halves of the mold join by applying a coating of light cup grease such as petrolatum. The amount should be sufficient to extrude slightly when the two halves are tightened together. Remove any excess grease with a cloth.

9.3 After placing the mold on its base plate (and attaching, if clamp-type) carefully remove with a dry cloth any excess oil or grease from the surface of the mold and the base plate to which watertight sealant is to be applied. As a sealant, use paraffin, microcrystalline wax, or a mixture of three parts paraffin to five parts rosin by mass. Liquify the sealant by heating between 230 and 248°F or [110 and 120°C]. Effect a watertight seal by applying the liquefied sealant at the outside contact lines between the mold and its base plate.

NOTE 5—Because aerosol lubricants evaporate, molds should be checked for a sufficient coating of lubricant immediately prior to use. If an extended period of time has elapsed since treatment, retreatment may be necessary.

NOTE 6—*Watertight Molds*—The mixture of paraffin and rosin specified for sealing the joints between molds and base plates may be found difficult to remove when molds are being cleaned. Use of straight paraffin is permissible if a watertight joint is secured, but due to the low strength of paraffin it should be used only when the mold is not held to the base plate by the paraffin alone. A watertight joint may be secured with paraffin alone by slightly warming the mold and base plate before brushing the joint. Molds so treated should be allowed to return to the specified temperature before use.

10. Procedure

10.1 *Composition of Mortars:*

10.1.1 The proportions of materials for the standard mortar shall be one part of cement to 2.75 parts of graded standard sand by weight. Use a water-cement ratio of 0.485 for all portland cements and 0.460 for all air-entraining portland cements. The amount of mixing water for other than portland and air-entraining portland cements shall be such as to produce a flow of 110 ± 5 as determined in accordance with 10.3 and shall be expressed as weight percent of cement.

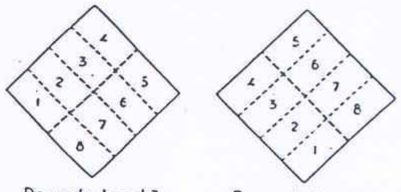


FIG. 1 Order of Tamping in Molding of Test Specimens

10.1.2 The quantities of materials to be mixed at one time in the batch of mortar for making six and nine test specimens shall be as follows:

	Number of Specimens 6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 ± 5)	...	...

10.2 *Preparation of Mortar:*

10.2.1 Mechanically mix in accordance with the procedure given in Practice C 305.

10.3 *Determination of Flow:*

10.3.1 Carefully wipe the flow-table top clean and dry, and place the flow mold at the center. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] in thickness in the mold and tamp 20 times with the tamper. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the mold. Then fill the mold with mortar and tamp as specified for the first layer. Cut off the mortar to a plane surface, flush with the top of the mold, by drawing the straight edge of a trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion across the top of the mold. Wipe the table top clean and dry, being especially careful to remove any water from around the edge of the flow mold. Lift the mold away from the mortar 1 min after completing the mixing operation. Immediately, drop the table through a height of ½ in. or [13 mm] 25 times in 15 s. Using the calipers, determine the flow by measuring the diameters of the mortar along the lines scribed in the table top, adding the four readings. The total of the four readings from the calipers equals the percent increase of the original diameter of the mortar.

10.3.2 For portland and air-entraining portland cements, merely record the flow.

10.3.3 In the case of cements other than portland or air-entraining portland cements, make trial mortars with varying percentages of water until the specified flow is obtained. Make each trial with fresh mortar.

10.4 *Molding Test Specimens:*

10.4.1 Immediately following completion of the flow test, return the mortar from the flow table to the mixing bowl. Quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl and then remix the entire batch 15 s at medium speed. Upon completion of mixing, the mixing paddle shall be shaken to remove excess mortar into the mixing bowl.

10.4.2 When a duplicate batch is to be made immediately for additional specimens, the flow test may be omitted and the mortar allowed to stand in the mixing bowl 90 s without covering. During the last 15 s of this interval, quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl. Then remix for 15 s at medium speed.

10.4.3 Start molding the specimens within a total elapsed time of not more than 2 min and 30 s after completion of the original mixing of the mortar batch. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] (approximately one half of the depth of the mold) in all of the cube compartments. Tamp the mortar in each cube compartment 32 times in about 10 s in 4 rounds, each round to be at right angles to the other and consisting of eight adjoining strokes over the surface of the specimen, as illustrated in Fig. 1. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the molds. The 4 rounds of tamping (32 strokes) of the mortar shall be completed in one cube before going to the next. When the tamping of the first layer in all of the cube compartments is completed, fill the compartments with the remaining mortar and then tamp as specified for the first layer. During tamping of the second layer bring in the mortar forced out onto the tops of the molds after each round of tamping by means of the gloved fingers and the tamper upon completion of each round and before starting the next round of tamping. On completion of the tamping, the tops of all cubes should extend slightly above the tops of the molds. Bring in the mortar that has been forced out onto the tops of the molds with a trowel and smooth off the cubes by drawing the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) once across the top of each cube at right angles to the length of the mold. Then, for the purpose of leveling the mortar and making the mortar that protrudes above the top of the mold of more uniform thickness, draw the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) lightly once along the length of the mold. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straight edge of the trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion over the length of the mold.

10.5 *Storage of Test Specimens*—Immediately upon completion of molding, place the test specimens in the moist closet or moist room. Keep all test specimens, immediately after molding, in the molds on the base plates in the moist closet or moist room from 20 to 24 h with their upper surfaces exposed to the moist air but protected from dripping water. If the specimens are removed from the molds before 24 h, keep them on the shelves of the moist closet or moist room until they are 24-h old, and then immerse the specimens, except those for the 24-h test, in saturated lime water in storage tanks constructed of noncorroding materials. Keep the storage water clean by changing as required.

10.6 *Determination of Compressive Strength:*

10.6.1 Test the specimens immediately after their removal from the moist closet in the case of 24-h specimens, and from storage water in the case of all other specimens. All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible tolerance prescribed as follows:

TABLE 2 Precision

	Test Age, Days	Coefficient of Variation 1s %[A]	Acceptable Range of Test Results d2s %[A]
Portland Cements			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.6	10.2
Av		3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	7	6.4	18.1
Av		6.6	18.7
Blended Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.8	10.7
	28	3.4	9.6
Av		3.8	10.7
Multi-lab	3	7.8	22.1
	7	7.6	21.5
	28	7.4	20.9
Av		7.6	21.5
Masonry Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	28	7.5	21.2
Av		7.7	21.8
Multi-lab	7	11.8	33.4
	28	12.0	33.9
Av		11.9	33.7

[A] These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C 670.

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	±½ h
3 days	±1 h
7 days	±3 h
28 days	±12 h

If more than one specimen at a time is removed from the moist closet for the 24-h tests, keep these specimens covered with a damp cloth until time of testing. If more than one specimen at a time is removed from the storage water for testing, keep these specimens in water at a temperature of 73.4 ± 3°F or [23 ± 1.7°C] and of sufficient depth to completely immerse each specimen until time of testing.

10.6.2 Wipe each specimen to a surface-dry condition, and remove any loose sand grains or incrustations from the faces that will be in contact with the bearing blocks of the testing machine. Check these faces by applying a straightedge (Note 7). If there is appreciable curvature, grind the face or faces to plane surfaces or discard the specimen. A periodic check of the cross-sectional area of the specimens should be made.

NOTE 7—*Specimen Faces*—Results much lower than the true strength will be obtained by loading faces of the cube specimen that are not truly plane surfaces. Therefore, it is essential that specimen molds be kept scrupulously clean, as otherwise, large irregularities in the surfaces will occur. Instruments for cleaning molds should always be softer than the metal in the molds to prevent wear. In case grinding specimen faces is necessary, it can be accomplished best by rubbing the specimen on a sheet of fine emery paper or cloth glued to a plane surface, using only a moderate pressure. Such grinding is tedious for more than a few thousandths of an inch (hundredths of a millimetre); where more than this is found necessary, it is recommended that the specimen be discarded.

10.6.3 Apply the load to specimen faces that were in contact with the true plane surfaces of the mold. Carefully place the specimen in the testing machine below the center of the upper bearing block. Prior to the testing of each cube, it shall be ascertained that the sperically seated block is free to tilt. Use no cushioning or bedding materials. An initial loading up to one half of the expected maximum loads for specimens having expected maximum loads of more than 3000 lbf or [15 kN] may be applied at any convenient rate. Apply no initial loading to specimens having expected maximum loads of less than 3000 lbf or [15 kN]. Adjust the rate of load application so that the remainder of the load (or the entire load in the case of expected maximum loads of less than 3000 lbf or [15 kN]) is applied, without interruption, to failure at such a rate that the maximum load will be reached in not less than 20 nor more than 80 s from start of loading. Make no adjustment in the controls of the testing machine while a specimen is yielding before failure.

NOTE 8—It is advisable to apply only a very light coating of a good quality, light mineral oil to the spherical seat of the upper platen.

11. Calculation

11.1 Record the total maximum load indicated by the testing machine, and calculate the compressive strength as follows:

$$fm = P/A$$

where:
fm = compressive strength in psi or [MPa],
P = total maximum load in lbf or [N], and
A = area of loaded surface in^2 or [mm^2].
Either 2-in. or [50-mm] cube specimens may be used for the determination of compressive strength, whether inch-pound or SI units are used. However, consistent units for load and area must be used to calculate strength in the units selected. If the cross-sectional area of a specimen varies more than 1.5 % from the nominal, use the actual area for the calculation of the compressive strength. The compressive strength of all acceptable test specimens (see Section 12) made from the same sample and tested at the same period shall be averaged and reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

12. Report

12.1 Report the flow to the nearest 1 % and the water used to the nearest 0.1 %. Average compressive strength of all specimens from the same sample shall be reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

13. Faulty Specimens and Retests

13.1 In determining the compressive strength, do not consider specimens that are manifestly faulty.

13.2 The maximum permissible range between specimens from the same mortar batch, at the same test age is 8.7 % of the average when three cubes represent a test age and 7.6 % when two cubes represent a test age (Note 9).

NOTE 9—The probability of exceeding these ranges is 1 in 100 when the within-batch coefficient of variation is 2.1 %. The 2.1 % is an average for laboratories participating in the portland cement and masonry cement reference sample programs of the Cement and Concrete Reference Laboratory.

13.3 If the range of three specimens exceeds the maximum in 13.2, discard the result which differs most from the average and check the range of the remaining two specimens. Make a retest of the sample if less than two specimens remain after disgarding faulty specimens or disgarding tests that fail to comply with the maximum permissible range of two specimens.

NOTE 10—Reliable strength results depend upon careful observance of all of the specified requirements and procedures. Erratic results at a given test period indicate that some of the requirements and procedures have not been carefully observed: for example, those covering the testing of the specimens as prescribed in 10.6.2 and 10.6.3. Improper centering of specimens resulting in oblique fractures or lateral movement of one of the heads of the testing machine during loading will cause lower strength results.

14. Precision and Bias

14.1 *Precision*—The precision statements for this test method are listed in Table 2 and are based on results from the Cement and Concrete Reference Laboratory Reference Sample Program. They are developed from data where a test result is the average of compressive strength tests of three cubes molded from a single batch of mortar and tested at the same age. A significant change in precision will not be noted when a test result is the average of two cubes rather than three.

14.2 These precision statements are applicable to mortars made with cements mixed, and tested at the ages as noted. The appropriate limits are likely, somewhat larger for tests at younger ages and slightly smaller for tests at older ages.

14.3 *Bias*—The procedure in this test method has no bias because the value of compressive strength is defined in terms of the test method.

15. Keywords

15.1 compressive strength; hydraulic cement mortar; hydraulic cement strength; mortar strength; strength

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

Designation: C 150 – 95a

Standard Specification for Portland Cement[1]

This standard is issued under the fixed designation C 150; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers eight types of portland cement, as follows (see Note 1):

1.1.1 *Type I*—For use when the special properties specified for any other type are not required.

1.1.2 *Type IA*—Air-entraining cement for the same uses as Type I, where air-entrainment is desired.

1.1.3 *Type II*—For general use, more especially when moderate sulfate resistance or moderate heat of hydration is desired.

1.1.4 *Type IIA*—Air-entraining cement for the same uses as Type II, where air-entrainment is desired.

1.1.5 *Type III*—For use when high early strength is desired.

1.1.6 *Type IIIA*—Air-entraining cement for the same use as Type III, where air-entrainment is desired.

1.1.7 *Type IV*—For use when a low heat of hydration is desired.

1.1.8 *Type V*—For use when high sulfate resistance is desired.

1.2 When both SI and inch-pound units are present, the SI units are the standard. The inch-pound units are approximations listed for information only.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 33 Specification for Concrete Aggregates[2]

C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)[3]

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement[3]

C 115 Test Method for Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter[3]

C 151 Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement[3]

C 183 Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement[3]

C 185 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar[3]

C 186 Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement[3]

C 191 Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle[3]

C 204 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus[3]

C 226 Specification for Air-Entraining Additions for Use in the Manufacture of Air-Entraining Portland Cement[3]

C 266 Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Paste by Gillmore Needles[3]

C 451 Test Method for Early Stiffening of Hydraulic Cement (Paste Method)[3]

C 452 Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate[3]

C 465 Specification for Processing Additions for Use in the Manufacture of Hydraulic Cements[3]

C 563 Test Method for Optimum SO_3 in Hydraulic Cement Using 24-h Compressive Strength[3]

C 1038 Test Method for Expansion of Portland Cement Mortar Bars Stored in Water[3]

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *portland cement*—a hydraulic cement produced by pulverizing clinker consisting essentially of hydraulic calcium silicates, usually containing one or more of the forms of calcium sulfate as an interground addition.

3.1.2 *air-entraining portland cement*—a hydraulic cement produced by pulverizing clinker consisting essentially of hydraulic calcium silicates, usually containing one or more of the forms of calcium sulfate as an interground addition, and with which there has been interground an air-entraining addition.

4. Ordering Information

4.1 Orders for material under this specification shall include the following:

4.1.1 This specification number and date,

4.1.2 Type or types allowable. If no type is specified, Type I shall be supplied,

4.1.3 Any optional chemical requirements from Table 2, if desired,

4.1.4 Type of setting-time test required, Vicat or Gillmore. If not specified, the Vicat shall be used,

4.1.5 Any optional physical requirements from Table 4, if desired.

NOTE 1—Attention is called to the fact that cements conforming to the requirements for all types may not be carried in stock in some areas.

---

[1] This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.10 on Portland Cement.

Current edition approved Dec. 10, 1995. Published March 1996. Originally published as C 150 – 40 T. Last previous edition C 150 – 95.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

TABLE 1 Standard Chemical Requirements

Cement Type[A]	I and IA	II and IIA	III and IIIA	IV	V
Silicon dioxide (SiO_2), min, %	...	20.0	...	...	...
Aluminum oxide (Al_2O_3), max, %	...	6.0	...	...	...
Ferric oxide (Fe_2O_3), max, %	...	6.0	...	6.5	...
Magnesium oxide (MgO), max, %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Sulfur trioxide (SO_3),[B] max, %					
When (C_3A)[C] is 8 % or less	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
When (C_3A)[C] is more than 8 %	3.5	[D]	4.5	[D]	[D]
Loss on ignition, max, %	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Insoluble residue, max, %	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Tricalcium silicate (C_3S),[C] max, %	...	...	...	35[E]	...
Dicalcium silicate (C_2S),[C] min, %	...	...	...	40[E]	...
Tricalcium aluminate (C_3A)[C] max, %	...	8	15	7[E]	5[F]
Tetracalcium aluminoferrite plus twice the tricalcium aluminate[C] ($C_4AF + 2(C_3A)$), or solid solution ($C_4AF + C_2F$), as applicable, max, %	...	...	...	...	25[F]

[A] See Note 1.

[B] There are cases where optimum SO_3 (using Test Method C 563) for a particular cement is close to or in excess of the limit in this specification. In such cases where properties of a cement can be improved by exceeding the SO_3 limits stated in this table, it is permissible to exceed the values in the table, provided it has been demonstrated by Test Method C 1038 that the cement with the increased SO_3 will not develop expansion in water exceeding 0.020 % at 14 days. When the manufacturer supplies cement under this provision, he shall, upon request, supply supporting data to the purchaser.

[C] The expressing of chemical limitations by means of calculated assumed compounds does not necessarily mean that the oxides are actually or entirely present as such compounds.

When expressing compounds, C = CaO, S = SiO_2, A = Al_2O_3, F = Fe_2O_3. For example, $C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$.

Titanium dioxide and phosphorus pentoxide (TiO_2 and P_2O_5) shall be included with the Al_2O_3 content. The value historically and traditionally used for Al_2O_3 in calculating potential compounds for specification purposes is the ammonium hydroxide group minus ferric oxide ($R_2O_3 - Fe_2O_3$) as obtained by classical wet chemical methods. This procedure includes as Al_2O_3 the TiO_2, P_2O_5, and other trace oxides which precipitate with the ammonium hydroxide group in the classical wet chemical methods. Many modern instrumental methods of cement analysis determine aluminum or aluminum oxide directly without the minor and trace oxides included by the classical method. Consequently, for consistency and to provide comparability with historic data and among various analytical methods, when calculating potential compounds for specification purposes, those using methods which determine Al or Al_2O_3 directly should add to the determined Al_2O_3 mass quantities of P_2O_5, TiO_2, and any other oxide except Fe_2O_3 which would precipitate with the ammonium hydroxide group when analyzed by the classical method and which is present in an amount of 0.05 mass % or greater. The mass percent of minor or trace oxides to be added to Al_2O_3 by those using direct methods may be obtained by actual analysis of those oxides in the sample being tested or estimated from historical data on those oxides on cements from the same source, provided that the estimated values are identified as such.

When the ratio of percentages of aluminum oxide to ferric oxide is 0.64 or more, the percentages of tricalcium silicate, dicalcium silicate, tricalcium aluminate, and tetracalcium aluminoferrite shall be calculated from the chemical analysis as follows:

Tricalcium silicate = $(4.071 \times \%\ CaO) - (7.600 \times \%\ SiO_2) - (6.718 \times \%\ Al_2O_3) - (1.430 \times \%\ Fe_2O_3) - (2.852 \times \%\ SO_3)$

Dicalcium silicate = $(2.867 \times \%\ SiO_2) - (0.7544 \times \%\ C_3S)$

Tricalcium aluminate = $(2.650 \times \%\ Al_2O_3) - (1.692 \times \%\ Fe_2O_3)$

Tetracalcium aluminoferrite = $3.043 \times \%\ Fe_2O_3$

When the alumina-ferric oxide ratio is less than 0.64, a calcium aluminoferrite solid solution (expressed as $ss(C_4AF + C_2F)$) is formed. Contents of this solid solution and of tricalcium silicate shall be calculated by the following formulas:

$ss(C_4AF + C_2F) = (2.100 \times \%\ Al_2O_3) + (1.702 \times \%\ Fe_2O_3)$

Tricalcium silicate = $(4.071 \times \%\ CaO) - (7.600 \times \%\ SiO_2) - (4.479 \times \%\ Al_2O_3) - (2.859 \times \%\ Fe_2O_3) - (2.852 \times \%\ SO_3)$.

No tricalcium aluminate will be present in cements of this composition. Dicalcium silicate shall be calculated as previously shown.

In the calculation of all compounds the oxides determined to the nearest 0.1 % shall be used.

All values calculated as described in this note shall be reported to the nearest 1 %.

[D] Not applicable.

[E] Does not apply when the heat of hydration limit in Table 4 is specified.

[F] Does not apply when the sulfate resistance limit in Table 4 is specified.

In advance of specifying the use of other than Type I cement, it should be determined whether the proposed type of cement is or can be made available.

5. Additions

5.1 The cement covered by this specification shall contain no addition except as follows:

5.1.1 Water or calcium sulfate, or both, may be added in amounts such that the limits shown in Table 1 for sulfur trioxide and loss-on-ignition shall not be exceeded.

5.1.2 At the option of the manufacturer, processing additions may be used in the manufacture of the cement, provided such materials in the amounts used have been shown to meet the requirements of Specification C 465.

5.1.3 Air-entraining portland cement shall contain an interground addition conforming to the requirements of Specification C 226.

6. Chemical Composition

6.1 Portland cement of each of the eight types shown in Section 1 shall conform to the respective standard chemical requirements prescribed in Table 1. In addition, optional chemical requirements are shown in Table 2.

7. Physical Properties

7.1 Portland cement of each of the eight types shown in Section 1 shall conform to the respective standard physical requirements prescribed in Table 3. In addition, optional physical requirements are shown in Table 4.

8. Sampling

8.1 When the purchaser desires that the cement be sampled and tested to verify compliance with this specification, sampling and testing should be performed in accordance with Practice C 183.

8.2 Practice C 183 is not designed for manufacturing quality control and are not required for manufacturer's certification.

9. Test Methods

9.1 Determine the applicable properties enumerated in

TABLE 2 Optional Chemical Requirements[A]

Cement Type	I and IA	II and IIA	III and IIIA	IV	V	Remarks
Tricalcium aluminate (C_3A),[B] max, %	...	...	8	...	...	for moderate sulfate resistance
Tricalcium aluminate (C_3A),[B] max, %	...	...	5	...	...	for high sulfate resistance
Sum of tricalcium silicate and tricalcium aluminate,[B] max, %	...	58[C]	...	...	...	for moderate heat of hydration
Equivalent Alkalies (Na_2O + 0.658K_2O), max, %	0.60[D]	0.60[D]	0.60[D]	0.60[D]	0.60[D]	low-alkali cement

[A] These optional requirements apply only if specifically requested. Availability should be verified. See Note 1.

[B] The expressing of chemical limitations by means of calculated assumed compounds does not necessarily mean that the oxides are actually or entirely present as such compounds.

When expressing compounds, C = CaO, S = SiO_2, A = Al_2O_3, F = Fe_2O_3. For example, C_3A = $3CaO \cdot Al_2O_3$.

Titanium dioxide and phosphorus pentoxide (TiO_2 and P_2O_5) shall be included with the Al_2O_3 content. The value historically and traditionally used for Al_2O_3 in calculating potential compounds for specification purposes is the ammonium hydroxide group minus ferric oxide ($R_2O_3 - Fe_2O_3$) as obtained by classical wet chemical methods. This procedure includes as Al_2O_3 the TiO_2, P_2O_5, and other trace oxides which precipitate with the ammonium hydroxide group in the classical wet chemical methods. Many modern instrumental methods of cement analysis determine aluminum or aluminum oxide directly without the minor and trace oxides included by the classical method. Consequently, for consistency and to provide comparability with historic data and among various analytical methods, when calculating potential compounds for specification purposes, those using methods which determine Al or Al_2O_3 directly should add to the determined Al_2O_3 mass quantities of P_2O_5, TiO_2, and any other oxide except Fe_2O_3 which would precipitate with the ammonium hydroxide group when analyzed by the classical method and which is present in an amount of 0.05 mass % or greater. The mass percent of minor or trace oxides to be added to Al_2O_3 by those using direct methods may be obtained by actual analysis of those oxides in the sample being tested or estimated from historical data on those oxides on cements from the same source, provided that the estimated values are identified as such.

When the ratio of percentages of aluminum oxide to ferric oxide is 0.64 or more, the percentages of tricalcium silicate, dicalcium silicate, tricalcium aluminate, and tetracalcium aluminoferrite shall be calculated from the chemical analysis as follows:

Tricalcium silicate = (4.071 × % CaO) − (7.600 × % SiO_2) − (6.718 × % Al_2O_3) − (1.430 × % Fe_2O_3) − (2.852 × % SO_3)

Dicalcium silicate = (2.867 × % SiO_2) − (0.7544 × % C_3S)

Tricalcium aluminate = (2.650 × % Al_2O_3) − (1.692 × % Fe_2O_3)

Tetracalcium aluminoferrite = 3.043 × % Fe_2O_3

When the alumina-ferric oxide ratio is less than 0.64, a calcium aluminoferrite solid solution (expressed as ss ($C_4AF + C_2F$)) is formed. Contents of this solid solution and of tricalcium silicate shall be calculated by the following formulas:

ss($C_4AF + C_2F$) = (2.100 × % Al_2O_3) + (1.702 × % Fe_2O_3)

Tricalcium silicate = (4.071 × % CaO) − (7.600 × % SiO_2) − (4.479 × % Al_2O_3) − (2.859 × % Fe_2O_3) − (2.852 × % SO_3).

No tricalcium aluminate will be present in cements of this composition. Dicalcium silicate shall be calculated as previously shown.

In the calculation of all compounds the oxides determined to the nearest 0.1 % shall be used.

All values calculated as described in this note shall be reported to the nearest 1 %.

[C] The optional limit for heat of hydration in Table 4 shall not be requested when this optional limit is requested.

[D] This limit may be specified when the cement is to be used in concrete with aggregates that may be deleteriously reactive. Reference should be made to Specification C 33 for suitable criteria of deleterious reactivity.

this specification in accordance with the following test methods:

9.1.1 *Air Content of Mortar*—Test Method C 185.

9.1.2 *Chemical Analysis*—Test Methods C 114.

9.1.3 *Strength*—Test Method C 109.

9.1.4 *False Set*—Test Method C 451.

9.1.5 *Fineness by Air Permeability*—Test Method C 204.

9.1.6 *Fineness by Turbidimeter*—Test Method C 115.

9.1.7 *Heat of Hydration*—Test Method C 186.

9.1.8 *Autoclave Expansion*—Test Method C 151.

9.1.9 *Time of Setting by Gillmore Needles*—Test Method C 266.

9.1.10 *Time of Setting by Vicat Needles*—Test Method C 191.

9.1.11 *Sulfate Resistance*—Test Method C 452 (sulfate expansion).

9.1.12 *Calcium Sulfate (expansion of) Mortar*—Test Method C 1038.

9.1.13 *Optimum SO_3*—Test Method C 563.

10. Inspection

10.1 Inspection of the material shall be made as agreed upon between the purchaser and the seller as part of the purchase contract.

11. Rejection

11.1 The cement may be rejected if it fails to meet any of the requirements of this specification.

11.2 Cement remaining in bulk storage at the mill, prior to shipment, for more than 6 months, or cement in bags in local storage in the hands of a vendor for more than 3 months, after completion of tests, may be retested before use and may be rejected if it fails to conform to any of the requirements of this specification.

11.3 Packages shall identify the mass contained as net weight. Packages more than 2 % below the weight marked thereon may be rejected; and if the average weight of packages in any shipment, as shown by weighing 50 packages taken at random, is less than that marked on the packages, the entire shipment may be rejected.

12. Manufacturer's Statement

12.1 At the request of the purchaser, the manufacturer shall state in writing the nature, amount, and identity of the air-entraining agent used, and of any processing addition that may have been used, and also, if requested, shall supply test data showing compliance of such air-entraining addition with the provisions of Specification C 226, and of any such processing addition with Specification C 465.

13. Packaging and Package Marking

13.1 When the cement is delivered in packages, the words "Portland Cement," the type of cement, the name and brand of the manufacturer, and the mass of the cement contained therein shall be plainly marked on each package. When the cement is an air-entraining type, the words "air-entraining" shall be plainly marked on each package. Similar information shall be provided in the shipping documents accompanying the shipment of packaged or bulk cement. All

TABLE 3 Standard Physical Requirements

Cement Type[A]	I	IA	II	IIA	III	IIIA	IV	V
Air content of mortar,[B] volume %:								
max	12	22	12	22	12	22	12	12
min	. . .	16	. . .	16	. . .	16	. . .	. . .
Fineness,[C] specific surface, m²/kg (alternative methods):								
Turbidimeter test, min	160	160	160	160	. . .	. . .	160	160
Air permeability test, min	280	280	280	280	. . .	. . .	280	280
Autoclave expansion, max, %	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Strength, not less than the values shown for the ages indicated as follows:[D]								
Compressive strength, MPa (psi):								
1 day	. . .	. . .	. . .	. . .	12.0 (1740)	10.0 (1450)	. . .	. . .
3 days	12.0 (1740)	10.0 (1450)	10.0 (1450) 7.0[F] (1020)[F]	8.0 (1160) 6.0[F] (870)[F]	24.0 (3480)	19.0 (2760)	. . .	8.0 (1160)
7 days	19.0 (2760)	16.0 (2320)	17.0 (2470) 12.0[F] (1740)[F]	14.0 (2030) 9.0[F] (1310)[F]	. . .	. . .	7.0 (1020)	15.0 (2180)
28 days	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	17.0 (2470)	21.0 (3050)
Time of setting (alternative methods):[E]								
Gillmore test:								
Initial set, min, not less than	60	60	60	60	60	60	60	60
Final set, min, not more than	600	600	600	600	600	600	600	600
Vicat test:[G]								
Time of setting, min, not less than	45	45	45	45	45	45	45	45
Time of setting, min, not more than	375	375	375	375	375	375	375	375

[A] See Note 1.
[B] Compliance with the requirements of this specification does not necessarily ensure that the desired air content will be obtained in concrete.
[C] Either of the two alternative fineness methods may be used at the option of the testing laboratory. However, when the sample fails to meet the requirements of the air-permeability test, the turbidimeter test shall be used, and the requirements in this table for the turbidimetric method shall govern.
[D] The strength at any specified test age shall be not less than that attained at any previous specified test age.
[E] The purchaser should specify the type of setting-time test required. In case he does not so specify, the requirements of the Vicat test only shall govern.
[F] When the optional heat of hydration or the chemical limit on the sum of the tricalcium silicate and tricalcium aluminate is specified.
[G] The time of setting is that described as initial setting time in Test Method C 191.

TABLE 4 Optional Physical Requirements[A]

Cement Type	I	IA	II	IIA	III	IIIA	IV	V
False set, final penetration, min, %	50	50	50	50	50	50	50	50
Heat of hydration:								
7 days, max, kJ/kg (cal/g)	. . .	. . .	290 (70)[B]	290 (70)[B]	. . .	. . .	250 (60)[C]	. . .
28 days, max, kJ/kg (cal/g)	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	290 (70)[C]	. . .
Strength, not less than the values shown:								
Compressive strength, MPa (psi)								
28 days	28.0 (4060)	22.0 (3190)	28.0 (4060) 22.0[B] (3190)[B]	22.0 (3190) 18.0[B] (2610)[B]	. . .	. . .	. . .	. . .
Sulfate resistance,[D] 14 days, max, % expansion	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	0.040

[A] These optional requirements apply only if specifically requested. Availability should be verified. See Note 1.
[B] The optional limit for the sum of the tricalcium silicate and tricalcium aluminate in Table 2 shall not be requested when this optional limit is requested. These strength requirements apply when either heat of hydration or the sum of tricalcium silicate and tricalcium aluminate requirements are requested.
[C] When the heat of hydration limit is specified, it shall be instead of the limits of C3S, C2S, and C3A listed in Table 1.
[D] When the sulfate resistance is specified, it shall be instead of the limits of C_3A and $C_4AF + 2\ C_3A$ listed in Table 1.

packages shall be in good condition at the time of inspection.

NOTE 2—With the change to SI units, it is desirable to establish a standard SI package for portland cements. To that end 40 kg (88.18 lb) provides a convenient, even-numbered mass reasonably similar to the traditional 94-lb (42.6384-kg) package.

14. Storage

14.1 The cement shall be stored in such a manner as to permit easy access for proper inspection and identification of each shipment, and in a suitable weather-tight building that will protect the cement from dampness and minimize warehouse set.

15. Manufacturer's Certification

15.1 Upon request of the purchaser in the contract or order, a manufacturer's report shall be furnished at the time of shipment stating the results of tests made on samples of the material taken during production or transfer and certifying that the cement conforms to applicable requirements of this specification.

16. Keywords

16.1 hydraulic cement; portland cement; specification

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Designation: C 187 – 86 (Reapproved 1991)$^{\epsilon 1}$

American Association State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T 129

Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement[1]

This standard is issued under the fixed designation C 187; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

$^{\epsilon 1}$ NOTE—Section 9, Keywords, was added editorially in September 1991.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the normal consistency of hydraulic cement.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency[2]

C 490 Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete[2]

C 1005 Specification for Weights and Weighing Devices for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements[2]

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods[3]

3. Significance and Use

3.1 This test method is intended to be used to determine the amount of water required to prepare hydraulic cement pastes for testing.

4. Apparatus

4.1 *Weights and Weighing Devices*—The weights and weighing devices shall conform to the requirements of Specification C 1005. The weighing device shall be evaluated for precision and accuracy at a total load of 1000 g.

4.2 *Glass Graduates*, 200 or 250-mL capacity, and conforming to the requirements of Practice C 490.

4.3 *Vicat Apparatus*—The Vicat apparatus shall consist of a frame *A* (Fig. 1) bearing a movable rod *B*, weighing 300 g, one end *C*, the plunger end, being 10 mm in diameter for a distance of at least 50 mm, and the other end having a removable needle *D*, 1 mm in diameter and 50 mm in length. The rod *B* is reversible, and can be held in any desired position by a set screw *E*, and has an adjustable indicator *F*, which moves over a scale (graduated in millimetres) attached to the frame *A*. The paste is held in a rigid conical ring *G*, resting on a plane nonabsorptive square base plate *H*, about 100 mm on each side. The rod *B* shall be made of stainless steel having a hardness of not less than 35 HRC (Note), and shall be straight with the plunger end which is perpendicular to the rod axis. The ring shall be made of a noncorroding, nonabsorbent material, and shall have an inside diameter of 70 mm at the base and 60 mm at the top, and a height of 40 mm. In addition to the above, the Vicat apparatus shall conform to the following requirements:

Weight of movable rod	300 ± 0.5 g (0.661 lb ± 8 grains)
Diameter of plunger end of rod	10 ± 0.05 mm (0.394 ± 0.002 in.)
Diameter of needle	1 ± 0.05 mm (0.039 ± 0.002 in.)
Inside diameter of ring at bottom	70 ± 3 mm (2.75 ± 0.12 in.)
Inside diameter of ring at top	60 ± 3 mm (2.36 ± 0.12 in.)
Height of ring	40 ± 1 mm (1.57 ± 0.04 in.)
Graduated scale	The graduated scale, when compared with a standard scale accurate to within 0.1 mm at all points, shall not show a deviation at any point greater than 0.25 mm.

NOTE—The requirement that the rod be made of stainless steel shall apply only to new Vicat apparatus or replacement rods and not to equipment in use which meets the other requirements of this test method.

5. Temperature and Humidity

5.1 The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry cement, molds, and base plates shall be maintained between 20 and 27.5°C (68 and 81.5°F). The temperature of the mixing water shall not vary from 23°C (73.4°F) by more than ±1.7°C (±3°F).

5.2 The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50 %.

6. Procedure

6.1 *Preparation of Cement Paste*—Mix 650 g of cement with a measured quantity of clean water following the procedure prescribed in Section 6 of Practice C 305.

6.2 *Molding Test Specimen*—Quickly form the cement paste, prepared as described in 6.1, into the approximate shape of a ball with gloved hands. Then toss six times through a free path of about 6 in. (150 mm) from one hand to another so as to produce a nearly spherical mass that may be easily inserted into the Vicat ring with a minimum amount of additional manipulation. Press the ball, resting in the palm of one hand, into the larger end of the conical ring *G*, Fig. 1, held in the other hand, completely filling the ring with paste. Remove the excess at the larger end by a single

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.22 on Workability.
Current edition approved March 27, 1986. Published May 1986. Originally published as C 187 – 44. Last previous edition C 187 – 86$^{\epsilon 1}$.

[2] *Annual book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

[3] *Annual book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

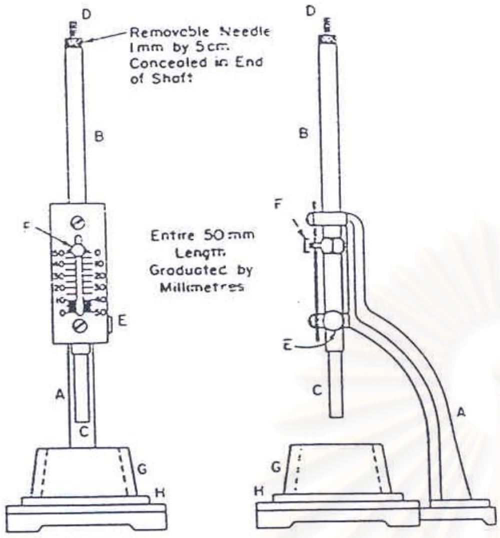


FIG. 1 Vicat Apparatus

movement of the palm of the hand. Place the ring on its larger end on the base plate *H*, and slice off the excess paste at the smaller end at the top of the ring by a single oblique stroke of a sharp-edged trowel held at a slight angle with the top of the ring, and smooth the top, if necessary, with a few light touches of the pointed end of the trowel. During these operations of cutting and smoothing, take care not to compress the paste.

6.3 *Consistency Determination*—Center the paste confined in the ring, resting on the plate, under the rod *B*, Fig. 1, the plunger end *C* of which shall be brought in contact with the surface of the paste, and tighten the set-screw *E*. Then set the movable indicator *F* to the upper zero mark of the scale, or take an initial reading, and release the rod immediately. This must not exceed 30 s after completion of mixing. The apparatus shall be free of all vibrations during the test. The paste shall be of normal consistency when the rod settles to a point 10 ± 1 mm below the original surface in 30 s after being released. Make trial pastes with varying percentages of water until the normal consistency is obtained. Make each trial with fresh cement.

7. Calculation

7.1 Calculate the amount of water required for normal consistency to the nearest 0.1 % and report it to the nearest 0.5 % of the weight of the dry cement.

8. Precision and Bias

8.1 The single operator-instrument precision has been found to be 0.25(1S), and the multilaboratory precision has been found to be 0.35(1S) as defined in Practice E 177; therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator in a laboratory should agree within 0.7 percentage point, and test results between two laboratories should agree with 1.0 percentage point 95 % of the time.

9. Keywords

9.1 consistency of hydraulic cement; normal consistency

For additional useful information on details of cement test methods, reference may be made to the "Manual of Cement Testing," which appears in the *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Designation: C 188 – 95

American Association State Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T 133

Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement[1]

This standard is issued under the fixed designation C 188; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the density of hydraulic cement. Its particular usefulness is in connection with the design and control of concrete mixtures.

1.2 The density of hydraulic cement is defined as the mass of a unit volume of the solids.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement[2]

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials[3]

3. Apparatus

3.1 *Le Chatelier flask*—The standard flask which is circular in cross section with shape and dimensions conforming essentially to Fig. 1 (Note 1). The requirements in regard to tolerance, inscription and length, spacing, and uniformity of graduation will be rigidly observed. There shall be a space of at least 10 mm between the highest graduation mark and the lowest point of grinding for the glass stopper.

3.1.1 The material of construction shall be best quality glass, transparent and free of striae. The glass shall be chemically resistant and shall have small thermal hysteresis. The flasks shall be thoroughly annealed before being graduated. They shall be of sufficient thickness to ensure reasonable resistance to breakage.

3.1.2 The neck shall be graduated from 0 to 1 mL and from 18 to 24 mL in 0.1-mL graduations. The error of any indicated capacity shall not be greater than 0.05 mL.

3.1.3 Each flask shall bear a permanent identification number and the stopper, if not interchangeably ground, shall bear the same number. Interchangeable ground-glass parts shall be marked on both members with the standard-taper symbol, ₸, followed by the size designation. The standard temperature shall be indicated, and the unit of capacity shall be shown by the letters "mL" placed above the highest graduation mark.

3.2 Kerosine, free of water, or naphtha, having a density greater than 0.73 g/mL at 23 ± 2° C shall be used in the density determination.

3.3 The use of alternative equipment or methods for determining density is permitted provided that a single operator can obtain results within ± 0.03 Mg/m^3 of the results obtained using the flask method.

NOTE 1—The design is intended to ensure complete drainage of the flask when emptied, and stability of standing on a level surface, as well as accuracy and precision of reading.

4. Procedure

4.1 Determine the density of cement on the material as received, unless otherwise specified. If the density determination on a loss-free sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in section 16.1 of Test Methods C 114.

4.2 Fill the flask (Note 2) with either of the liquids specified in 3.2 to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Dry the inside of the flask above the level of the liquid, if necessary, after pouring. Record the first reading after the flask has been immersed in the water bath (Note 3) in accordance with 4.4.

NOTE 2—It is advisable to use a rubber pad on the table top when filling or rolling the flask.

NOTE 3—Before the cement has been added to the flask, a loose-fitting, lead-ring weight around the stem of the flask will be helpful in holding the flask in an upright position in the water bath, or the flask may be held in the water bath by a buret clamp.

4.3 Introduce a quantity of cement, weighed to the nearest 0.05 g, (about 64 g for portland cement) in small increments at the same temperature as the liquid (Note 2). Take care to avoid splashing and see that the cement does not adhere to the inside of the flask above the liquid. A vibrating apparatus may be used to accelerate the introduction of the cement into the flask and to prevent the cement from sticking to the neck. After all the cement has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position (Note 2), or gently whirl it in a horizontal circle, so as to free the cement from air until no further air bubbles rise to the surface of the liquid. If a proper amount of cement has been added, the level of the liquid will be in its final position at some point of the upper series of graduations. Take the final

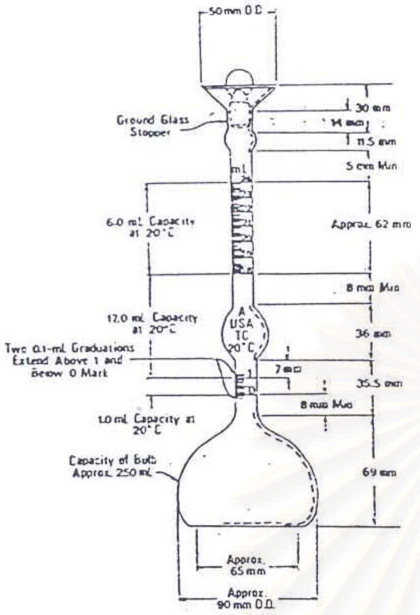
---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement, and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.

Current edition approved Sept. 10, 1995. Published November 1995. Originally published as C 188 – 44. Last previous edition C 188 – 89(1995)ε1.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.



NOTE—Variations of a few millimetres in such dimensions as total height of flask, diameter of base, etc., are to be expected and will not be considered sufficient cause for rejection. The dimensions of the flask shown in Fig. 1 apply only to new flasks and not to flasks in use which meet the other requirements of this test method.

FIG. 1 Le Chatelier Flask for Density Test

reading after the flask has been immersed in the water bath in accordance with 4.4.

4.4 Immerse the flask in a constant-temperature water bath for sufficient periods of time in order to avoid flask-temperature variations greater than 0.2°C between the initial and the final readings.

5. Calculation

5.1 The difference between the first and the final readings represents the volume of liquid displaced by the mass of cement used in the test.

5.2 Calculate the cement density, ρ, as follows:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \text{mass of cement, g/displaced volume, cm}^3$$

NOTE 4—The displaced volume in millilitres is numerically equal to the displaced volume in cubic centimetres.

NOTE 5—Density in megagrams per cubic metre (Mg/m^3) is numerically equal to grams per cubic centimetre (g/cm^3). Calculate the cement density, ρ, to three decimal places and round to the nearest 0.01 Mg/m^3.

NOTE 6—In connection with proportioning and control of concrete mixtures, density may be more usefully expressed as specific gravity, the latter being a dimensionless number. Calculate the specific gravity as follows: Sp gr = cement density/water density at 4°C (at 4°C the density of water is 1 Mg/m^3(1g/cm^3)).

6. Precision and Bias

6.1 The single-operator standard deviation for portland cements has been found to be 0.012.[4] Therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 0.03.[4]

6.2 The multilaboratory standard deviation for portland cements has been found to be 0.037.[4] Therefore, the results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same cement should not differ by more than 0.10.[4]

6.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

7. Keywords

7.1 density; hydraulic cement; specific gravity

[4] These numbers represent the 1s and d2s limits described in Practice C 670.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

Designation: C 191 – 92

American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T 131

Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle[1]

This standard is issued under the fixed designation C 191; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This method covers determination of the time of setting of hydraulic cement by means of the Vicat needle.

NOTE—For the method for determining time of setting by Gillmore needles, see Test Method C 266.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific precautionary statements see 6.3.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 187 Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement[2]

C 266 Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles[2]

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency[2]

C 490 Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete[2]

3. Apparatus

3.1 *Scales*—The scales shall conform to the following requirements: On scales in use the permissible variation at a load of 9.8 N shall be ± 0.01 N. The permissible variation on new scales shall be one half of this value. The sensibility reciprocal[3] shall be not greater than twice the permissible variation.

3.2 *Weights*—The permissible variations on weights in use in weighing the cement shall be as prescribed in Table 1. The permissible variations on new weights shall be one half of the values in Table 1.

3.3 *Glass Graduates*, 200 or 250-mL capacity, and conforming to the requirements of Specification C 490.

3.4 *Vicat Apparatus*—The Vicat apparatus shall consist of a frame, *A*, Fig. 1, bearing a movable rod, *B*, weighing 300 g, one end, *C*, the plunger end, being 10 mm in diameter for a distance of at least 50 mm and the other end having a removable steel needle, *D*, 1 mm in diameter and 50 mm in length. The rod *B* is reversible, and can be held in any desired position by a set screw, *E*, and has an adjustable indicator, *F*, which moves over a scale (graduated in millimetres) attached to the frame, *A*. The paste is held in a conical ring, *G*, resting on a glass plate, *H*, about 100 mm square. The ring shall be made of a noncorroding, nonabsorbing material, and shall have an inside diameter of 70 mm at the base and 60 mm at the top and a height of 40 mm. In addition to the above, the Vicat apparatus shall conform to the following requirements:

Weight of plunger	300 ± 0.5 g (0.661 lb ± 8 grains)
Diameter of larger end of plunger	10 ± 0.05 mm (0.394 ± 0.002 in.)
Diameter of needle	1 ± 0.05 mm (0.039 ± 0.002 in.)
Inside diameter of ring at bottom	70 ± 3 mm (2.75 ± 0.12 in.)
Inside diameter of ring at top	60 ± 3 mm (2.36 ± 0.12 in.)
Height of ring	40 ± 1 mm (1.57 ± 0.04 in.)
Graduated scale	The graduated scale, when compared with a standard scale accurate to within 0.1 mm at all points, shall not show a deviation at any point greater than 0.25 mm.

4. Temperature and Humidity

4.1 The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry cement, molds, and base plates shall be maintained between 20 and 27.5°C (68 and 81.5°F). The temperature of the mixing water and of the moist closet or moist room shall not vary from 23°C (73.4°F) by more than ± 1.7°C (3°F).

4.2 The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50 %. The moist closet or moist room shall be so constructed as to provide storage facilities for test specimens at a relative humidity of not less than 90 %.

5. Preparation of Cement Paste[4]

5.1 Mix 650 g of cement with the percentage of mixing water required for normal consistency following the procedure described in Practice C 305. Distilled water is preferable and shall be used for all referee or cooperative tests.

5.2 The test specimen used for the determination of normal consistency may be used for the additional determination of time of setting by Vicat needle following the procedure described in 6.2.

6. Procedure

6.1 *Molding Test Specimen*—Quickly form the cement

[1] This method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.30 on Time of Set.

Current edition approved March 15, 1992. Published May 1992. Originally published as C 191 – 44. Last previous edition C 191 – 82.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

[3] Generally, defined, the sensibility reciprocal is the change in load required to change the position of rest of the indicating element or elements of a nonautomatic-indicating scale a definite amount at any load. For more complete definition, see "Specifications, Tolerances, and Regulations for Commercial Weighing and Measuring Devices," *Handbook H 44*, National Bureau of Standards, September 1949, pp. 92 and 93.

[4] See Test Method C 187.

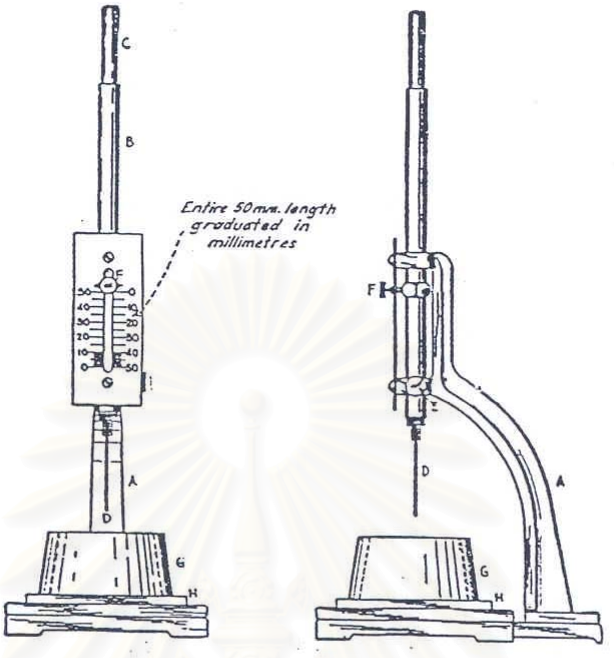


FIG. 1 Vicat Apparatus

TABLE 1 Permissible Variations on Weights

Weight, g	Permissible Variations on Weights in Use, plus or minus, g
500	0.18
300	0.15
250	0.13
200	0.10
100	0.07
50	0.04
20	0.02
10	0.02
5	0.01
2	0.01
1	0.01

paste, prepared as described in Section 5, into a ball with the gloved hands and toss six times from one hand to the other, maintaining the hands about 6 in. (152 mm) apart. Press the ball, resting in the palm of the hand, into the larger end of the conical ring, *G*, Fig. 1, held in the other hand, completely filling the ring with paste. Remove the excess at the larger end by a single movement of the palm of the hand. Place the ring on its larger end on a glass plate, *H*, and slice off the excess paste at the smaller end at the top of the ring by a single oblique stroke of a sharpedged trowel held at a slight angle with the top of the ring. Smooth the top of the specimen, if necessary, with one or two light touches of the pointed end of the trowel. During the operation of cutting and smoothing, take care not to compress the paste. Immediately after molding, place the test specimen in the moist closet or moist room and allow it to remain there except when determinations of time of setting are being made. The specimen shall remain in the conical mold, supported by the glass plate, *H*, throughout the test period. A time of set specimen and an autoclave bar may be made from the same batch.

6.2 *Time of Setting Determination*—Allow the time of setting specimen to remain in the moist cabinet for 30 min after molding without being disturbed. Determine the penetration of the 1-mm needle at this time and every 15 min thereafter (every 10 min for Type III cements) until a penetration of 25 mm or less is obtained. For the penetration test, lower the needle *D* of the rod *B* until it rests on the surface of the cement paste. Tighten the set screw, *E*, and set the indicator, *F*, at the upper end of the scale, or take an initial reading. Release the rod quickly by releasing the set screw, *E*, and allow the needle to settle for 30 s; then take the reading to determine the penetration. (If the paste is obviously quite soft on the early readings, the fall of the rod may be retarded to avoid bending the 1-mm needle, but the rod shall be released only by the set screw when actual determinations for the setting time are made.) No penetration test shall be made closer than ¼ in. (6.4 mm) from any previous penetration and no penetration test shall be made closer than ⅜ in. (9.5 mm) from the inside of the mold. Record the results of all penetration tests and, by interpolation, determine the time when a penetration of 25 mm is obtained. This is the initial setting time. The final setting time is when the needle does not sink visibly into the paste.

6.3 *Precautions*—All the apparatus shall be free from vibration during the penetration test. Take care to keep the 1-mm needle straight, and the needle must be kept clean as the collection of cement on the sides of the needle may retard

the penetration, while cement on the point may increase the penetration. The time of setting is affected not only by the percentage and the temperature of the water used and the amount of kneading the paste received, but also by the temperature and humidity of the air, and its determination is therefore only approximate.

7. Precision and Bias

7.1 *Precision:*

7.1.1 The single-operator (within-laboratory) standard deviation has been found to be 12 min for the initial time of setting, throughout the range of 49 to 202 min, and 20 min for the final time of settings throughout the range of 185 to 312 min. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on Vicat initial time of setting of similar paste should not differ from each other by more than 34 min and on Vicat final time of setting of similar pastes should not differ from each other by more than 56 min.

7.1.2 The multilaboratory (between-laboratory) standard deviation has been found to be 16 min for the initial time of setting throughout the range of 49 to 207 min, and 43 min for the final time of setting throughout the range of 185 to 312 min. Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on Vicat initial time of setting of similar pastes should not differ from each other by more than 45 min, and on Vicat final time of setting of similar pastes should not differ from each other by more than 122 min.

7.2 *Bias*—Since there are no accepted reference materials suitable for determining the bias for the procedure in this test method, no statement on bias is presented.

For additional useful information on details of cement test methods, reference may be made to the "Manual of Cement Testing," which appears in the *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Designation: C 204 – 96

American Association State Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T 153

Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus[1]

This standard is issued under the fixed designation C 204; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the fineness of hydraulic cement, using the Blaine air permeability apparatus, in terms of the specific surface expressed as total surface area in square centimetres per gram, or square metres per kilogram, of cement. Although the test method may be, and has been, used for the determination of the measures of fineness of various other materials, it should be understood that, in general, relative rather than absolute fineness values are obtained.

1.1.1 This test method is known to work well for portland cements. However, the user should exercise judgement in determining its suitability with regard to fineness measurements of cements with densities, or porosities that differ from those assigned to Standard Reference Material No. 114.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standard:*

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials[2]

2.2 *Other Documents:*

UU-P-236 Federal Specification for Paper; Filtering[3]

No. 114 National Institute of Standards and Technology Standard Reference Material[4]

3. Apparatus

3.1 *Nature of Apparatus*—The Blaine air permeability apparatus consists essentially of a means of drawing a definite quantity of air through a prepared bed of cement of definite porosity. The number and size of the pores in a prepared bed of definite porosity is a function of the size of the particles and determines the rate of airflow through the bed. The apparatus, illustrated in Fig. 1, shall consist specifically of the parts described in 3.2 to 3.8.

3.2 *Permeability Cell*—The permeability cell shall consist of a rigid cylinder 12.70 ± 0.10 mm in inside diameter, constructed of austenitic stainless steel. The interior of the cell shall have a finish of 0.81 μm (32 μin.). The top of the cell shall be at right angles to the principal axis of the cell. The lower portion of the cell must be able to form an airtight fit with the upper end of the manometer, so that there is no air leakage between the contacting surfaces. A ledge ½ to 1 mm in width shall be an integral part of the cell or be firmly fixed in the cell 55 ± 10 mm from the top of the cell for support of the perforated metal disk. The top of the permeability cell shall be fitted with a protruding collar to facilitate the removal of the cell from the manometer.

NOTE 1—AISI Type 303 stainless steel (UNS designation S30300) has been found to be suitable for the construction of the permeability cell and the plunger.

3.3 *Disk*—The disk shall be constructed of noncorroding metal and shall be 0.9 ± 0.1 mm in thickness, perforated with 30 to 40 holes 1 mm in diameter equally distributed over its area. The disk shall fit the inside of the cell snugly. The center portion of one side of the disk shall be marked or inscribed in a legible manner so as to permit the operator always to place that side downwards when inserting it into the cell. The marking or inscription shall not extend into any of the holes, nor touch their peripheries, nor extend into that area of the disk that rests on the cell ledge.

3.4 *Plunger*—The plunger shall be constructed of austenitic stainless steel and shall fit into the cell with a clearance of not more than 0.1 mm. The bottom of the plunger shall sharply meet the lateral surfaces and shall be at right angles to the principal axis. An air vent shall be provided by means of a flat 3.0 ± 0.3 mm wide on one side of the plunger. The top of the plunger shall be provided with a collar such that when the plunger is placed in the cell and the collar brought in contact with the top of the cell, the distance between the bottom of the plunger and the top of the perforated disk shall be 15 ± 1 mm.

3.5 *Filter Paper*—The filter paper shall be medium retentive, corresponding to Type 1, Grade B, as prescribed in Federal Specification for Paper; Filtering (UU-P-236). The filter paper disks shall be circular, with smooth edges, and shall have the same diameter (Note 2) as the inside of the cell.

NOTE 2—Filter paper disks that are too small may leave part of the sample adhering to the inner wall of the cell above the top disk. When too large in diameter, the disks have a tendency to buckle and cause erratic results.

3.6 *Manometer*—The U-tube manometer shall be constructed according to the design indicated in Fig. 1, using nominal 9-mm outside diameter, standard-wall, glass tubing.

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.
Current edition approved Jan. 10, 1996. Published March 1996. Originally published as C 204 – 46 T. Last previous edition C 204 – 95.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

[3] Available from Standardization Documents Order Desk, Bldg. 4, Section D, 700 Robbins Ave., Phila., PA 19111-5094, Attn: NPODS.

[4] Available from National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

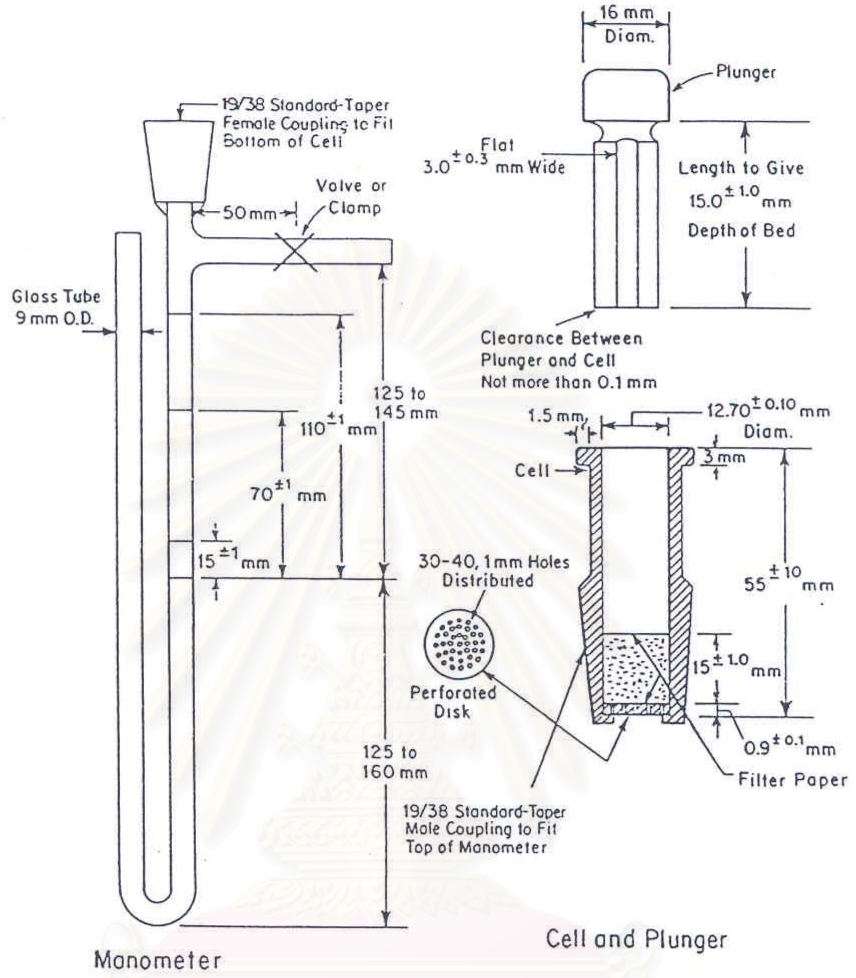


FIG. 1 Blaine Air Permeability Apparatus

The top of one arm of the manometer shall form an airtight connection with the permeability cell. The manometer arm connected to the permeability cell shall have a line etched around the tube at 125 to 145 mm below the top side outlet and also others at distances of 15 ± 1 mm, 70 ± 1 mm, and 110 ± 1 mm above that line. A side outlet shall be provided at 250 to 305 mm above the bottom of the manometer for use in the evacuation of the manometer arm connected to the permeability cell. A positive airtight valve or clamp shall be provided on the side outlet not more than 50 mm from the manometer arm. The manometer shall be mounted firmly and in such a manner that the arms are vertical.

3.7 *Manometer Liquid*—The manometer shall be filled to the midpoint with a nonvolatile, nonhygroscopic liquid of low viscosity and density, such as dibutyl phthalate (dibutyl 1,2-benzene-dicarboxylate) or a light grade of mineral oil.

3.8 *Timer*—The timer shall have a positive starting and stopping mechanism and shall be capable of being read to the nearest 0.5 s or less. The timer shall be accurate to 0.5 s or less for time intervals up to 60 s, and to 1 % or less for time intervals of 60 to 300 s.

4. Calibration of Apparatus

4.1 *Sample*—The calibration of the air permeability apparatus shall be made using the current lot of NIST Standard Reference Material No. 114. The sample shall be at room temperature when tested.

4.2 *Bulk Volume of Compacted Bed of Powder*—Determine the bulk volume of the compacted bed of powder by the mercury displacement method as follows:

4.2.1 Place two filter paper disks in the permeability cell, pressing down the edges, using a rod having a diameter

TABLE 1 Density of Mercury, Viscosity of Air (η), and $\sqrt{\eta}$ at Given Temperatures

Room Temperature, °C	Density of Mercury, Mg/m³	Viscosity of Air, η µPa·s	$\sqrt{\eta}$
16	13.56	17.88	4.23
18	13.55	17.96	4.24
20	13.55	18.06	4.25
22	13.54	18.18	4.26
24	13.54	18.26	4.28
26	13.53	18.37	4.29
28	13.53	18.47	4.30
30	13.52	18.57	4.31
32	13.52	18.67	4.32
34	13.51	18.76	4.33

slightly smaller than that of the cell, until the filter disks are flat on the perforated metal disk; then fill the cell with mercury, ACS reagent grade or better, removing any air bubbles adhering to the wall of the cell. Use tongs when handling the cell. If the cell is made of material that will amalgamate with mercury, the interior of the cell shall be protected by a very thin film of oil just prior to adding the mercury. Level the mercury with the top of the cell by lightly pressing a small glass plate against the mercury surface until the glass is flush to the surface of the mercury and rim of the cell, being sure that no bubble or void exists between the mercury surface and the glass plate. Remove the mercury from the cell, weigh, and record the weight of the mercury. Remove one of the filter disks from the cell. Using a trial quantity of 2.80 g of cement (Note 3) compress the cement (Note 4) in accordance with 4.5 with one filter disk above and one below the sample. Into the unfilled space at the top of the cell, add mercury, remove entrapped air, and level off the top as before. Remove the mercury from the cell, weigh, and record the weight of the mercury.

4.2.2 Calculate the bulk volume occupied by the cement to the nearest 0.005 cm³ as follows:

$$V = (W_A - W_B)/D \quad (1)$$

where:

V = bulk volume of cement, cm³,

W_A = grams of mercury required to fill the cell, no cement being in the cell,

W_B = grams of mercury required to fill the portion of the cell not occupied by the prepared bed of cement in the cell, and

D = density of mercury at the temperature of test, Mg/m³ (see Table 1).

4.2.3 Make at least two determinations of bulk volume of cement, using separate compactions for each determination. The bulk volume value used for subsequent calculations shall be the average of two values agreeing within ±0.005 cm³. Note the temperature in the vicinity of the cell and record at the beginning and end of the determination.

NOTE 3—It is not necessary to use the standard sample for the bulk volume determination.

NOTE 4—The prepared bed of cement shall be firm. If too loose or if the cement cannot be compressed to the desired volume, adjust the trial quantity of cement used.

4.3 *Preparation of Sample*—Enclose the contents of a vial of the standard cement sample in a jar, approximately 120 cm³ (4 oz), and shake vigorously for 2 min to fluff the cement and break up lumps or agglomerates. Allow the jar to stand unopened for a further 2 min, then remove the lid and stir gently to distribute throughout the sample the fine fraction that has settled on the surface after fluffing.

4.4 *Weight of Sample*—The weight of the standard sample used for the calibration test shall be that required to produce a bed of cement having a porosity of 0.500 ± 0.005, and shall be calculated as follows:

$$W = \rho V(1 - \epsilon) \quad (2)$$

where:

W = grams of sample required,

ρ = density of test sample (for portland cement a value of 3.15 Mg/m³ or 3.15 g/cm³ shall be used),

V = bulk volume of bed of cement, cm³, as determined in accordance with 4.2, and

ϵ = desired porosity of bed of cement (0.500 ± 0.005) (Note 5).

NOTE 5—The porosity is the ratio of volume of voids in a bed of cement to the total or bulk volume of the bed, V.

4.5 *Preparation of Bed of Cement*—Seat the perforated disk on the ledge in the permeability cell, inscribed or marked face down. Place a filter paper disk on the metal disk and press the edges down with a rod having a diameter slightly smaller than that of the cell. Weigh to the nearest 0.001 g the quantity of cement determined in accordance with 4.4 and place in the cell. Tap the side of the cell lightly in order to level the bed of cement. Place a filter paper disk on top of the cement and compress the cement with the plunger until the plunger collar is in contact with the top of the cell. Slowly withdraw the plunger a short distance, rotate about 90°, repress, and then slowly withdraw. Use of fresh paper filter disks is required for each determination.

4.6 *Permeability Test:*

4.6.1 Attach the permeability cell to the manometer tube, making certain that an airtight connection is obtained (Note 6) and taking care not to jar or disturb the prepared bed of cement.

4.6.2 Slowly evacuate the air in the one arm of the manometer U-tube until the liquid reaches the top mark, and then close the valve tightly. Start the timer when the bottom of the meniscus of the manometer liquid reaches the second (next to the top) mark and stop when the bottom of the meniscus of liquid reaches the third (next to the bottom) mark. Note the time interval measured and record in seconds. Note the temperature of test and record in degrees Celsius.

4.6.3 In the calibration of the instrument, make at least three determinations of the time of flow on each of three separately prepared beds of the standard sample (Note 7). The calibration shall be made by the same operator who makes the fineness determination.

NOTE 6—A little stopcock grease should be applied to the standard taper connection. The efficiency of the connection can be determined by attaching the cell to the manometer, stoppering it, partially evacuating the one arm of the manometer, then closing the valve. Any continuous drop in pressure indicates a leak in the system.

NOTE 7—The sample may be refluffed and reused for preparation of the test bed, provided that it is kept dry and all tests are made within 4 h of the opening of the sample.

4.7 *Recalibration*—The apparatus shall be recalibrated (Note 8):

4.7.1 At periodic intervals, the duration of which shall not exceed 2½ years, to correct for possible wear on the plunger or permeability cell,

4.7.2 If any loss in the manometer fluid occurs, recalibrate starting with 4.5, or

4.7.3 If a change is made in the type or quality of the filter paper used for the tests.

NOTE 8—It is suggested that a secondary sample be prepared and used as a fineness standard for the check determinations of the instrument between regular calibrations with the standard cement sample.

5. Procedure

5.1 *Temperature of Cement*—The cement sample shall be at room temperature when tested.

5.2 *Size of Test Sample*—The weight of sample used for the test shall be the same as that used in the calibration test on the standard sample, with these exceptions: When determining the fineness of Type III or other types of fine-ground portland cement whose bulk for this weight is so great that ordinary thumb pressure will not cause the plunger collar to contact the top of the cell, the weight of the sample shall be that required to produce a test bed having a porosity of 0.530 ± 0.005. When determining the fineness of materials other than portland cement, or if for a portland cement sample one of the required porosities cannot be attained, the weight of the sample shall be adjusted so that a firm, hard bed is produced by the compacting process. In no case, however, shall more than thumb pressure be used to secure the proper bed, nor shall such thumb pressure be used that the plunger "rebounds" from the cell top when pressure is removed.

5.3 *Preparation of Bed of Cement*—Prepare the test bed of cement in accordance with the method described in 4.5.

5.4 *Permeability Tests*—Make the permeability tests in accordance with the method described in 4.6, except that only one time-of-flow determination need be made on each bed.

6. Calculation

6.1 Calculate the specific surface values in accordance with the following equations:

$$S = \frac{S_s\sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} \quad (3)$$

$$S = \frac{S_s\sqrt{\eta_s}\sqrt{T}}{\sqrt{T_s}\sqrt{\eta}} \quad (4)$$

$$S = \frac{S_s(b - \epsilon_s)\sqrt{\epsilon^3}\sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3}\sqrt{T_s}(b - \epsilon)} \quad (5)$$

$$S = \frac{S_s(b - \epsilon_s)\sqrt{\epsilon^3}\sqrt{\eta_s}\sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3}\sqrt{T_s}\sqrt{\eta}(b - \epsilon)} \quad (6)$$

$$S = \frac{S_s\rho_s(b_s - \epsilon_s)\sqrt{\epsilon^3}\sqrt{T}}{\rho(b - \epsilon)\sqrt{\epsilon_s^3}\sqrt{T_s}} \quad (7)$$

$$S = \frac{S_s\rho_s(b_s - \epsilon_s)\sqrt{\eta_s}\sqrt{\epsilon^3}\sqrt{T}}{\rho(b - \epsilon)\sqrt{\epsilon_s^3}\sqrt{T_s}\sqrt{\eta}} \quad (8)$$

where:

S = specific surface of the test sample, m^2/kg.

TABLE 2 Values for Porosity of Cement Bed

Porosity of Bed, ϵ	$\sqrt{\epsilon^3}$
0.495	0.348
0.496	0.349
0.497	0.350
0.498	0.351
0.499	0.352
0.500	0.354
0.501	0.355
0.502	0.356
0.503	0.357
0.504	0.358
0.505	0.359
0.506	0.360
0.507	0.361
0.508	0.362
0.509	0.363
0.510	0.364
0.525	0.380
0.526	0.381
0.527	0.383
0.528	0.384
0.529	0.385
0.530	0.386
0.531	0.387
0.532	0.388
0.533	0.389
0.534	0.390
0.535	0.391

S_s = specific surface of the standard sample used in calibration of the apparatus, m^2/kg.

T = measured time interval, s, of manometer drop for test sample (Note 9),

T_s = measured time interval, s, of manometer drop for standard sample used in calibration of the apparatus (Note 9),

η = viscosity of air, micro pascal seconds (µPa·s), at the temperature of test of the test sample (Note 9),

η_s = viscosity of air, micro pascal seconds (µPa·s), at the temperature of test of the standard sample used in calibration of the apparatus (Note 9),

ϵ = porosity of prepared bed of test sample (Note 9),

ϵ_s = porosity of prepared bed of standard sample used in calibration of apparatus (Note 9),

ρ = density of test sample (for portland cement a value of 3.15 Mg/m^3 or 3.15 g/cm^3 shall be used),

ρ_s = density of standard sample used in calibration of apparatus (assumed to be 3.15 Mg/m^3 or 3.15 g/cm^3),

b = a constant specifically appropriate for the test sample (for hydraulic cement a value of 0.9 shall be used), and

b_s = 0.9, the appropriate constant for the standard sample.

NOTE 9—Values for $\sqrt{\eta}$, $\sqrt{\epsilon^3}$, and $\sqrt{T}$ may be taken from Tables 1, 2, and 3, respectively.

6.1.1 Equations 3 and 4 shall be used in calculations of fineness of portland cements compacted to the same porosity as the standard fineness sample. Equation 3 is used if the temperature of test of the test sample is within ±3°C of the temperature of calibration test, and Eq 4 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

TABLE 3 Time of Airflow

T = time of airflow in seconds; $\sqrt{T}$ = the factor for use in the equations

T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$
26	5.10	51	7.14	76	8.72	101	10.05	151	12.29	201	14.18
26½	5.15	51½	7.18	76½	8.75	102	10.10	152	12.33	202	14.21
27	5.20	52	7.21	77	8.77	103	10.15	153	12.37	203	14.25
27½	5.24	52½	7.25	77½	8.80	104	10.20	154	12.41	204	14.28
28	5.29	53	7.28	78	8.83	105	10.25	155	12.45	205	14.32
28½	5.34	53½	7.31	78½	8.86	106	10.30	156	12.49	206	14.35
29	5.39	54	7.35	79	8.89	107	10.34	157	12.53	207	14.39
29½	5.43	54½	7.38	79½	8.92	108	10.39	158	12.57	208	14.42
30	5.48	55	7.42	80	8.94	109	10.44	159	12.61	209	14.46
30½	5.52	55½	7.45	80½	8.97	110	10.49	160	12.65	210	14.49
31	5.57	56	7.48	81	9.00	111	10.54	161	12.69	211	14.53
31½	5.61	56½	7.52	81½	9.03	112	10.58	162	12.73	212	14.56
32	5.66	57	7.55	82	9.06	113	10.63	163	12.77	213	14.59
32½	5.70	57½	7.58	82½	9.08	114	10.68	164	12.81	214	14.63
33	5.74	58	7.62	83	9.11	115	10.72	165	12.85	215	14.66
33½	5.79	58½	7.65	83½	9.14	116	10.77	166	12.88	216	14.70
34	5.83	59	7.68	84	9.17	117	10.82	167	12.92	217	14.73
34½	5.87	59½	7.71	84½	9.19	118	10.86	168	12.96	218	14.76
35	5.92	60	7.75	85	9.22	119	10.91	169	13.00	219	14.80
35½	5.96	60½	7.78	85½	9.25	120	10.95	170	13.04	220	14.83
36	6.00	61	7.81	86	9.27	121	11.00	171	13.08	222	14.90
36½	6.04	61½	7.84	86½	9.30	122	11.05	172	13.11	224	14.97
37	6.08	62	7.87	87	9.33	123	11.09	173	13.15	226	15.03
37½	6.12	62½	7.91	87½	9.35	124	11.14	174	13.19	228	15.10
38	6.16	63	7.94	88	9.38	125	11.18	175	13.23	230	15.17
38½	6.20	63½	7.97	88½	9.41	126	11.22	176	13.27	232	15.23
39	6.24	64	8.00	89	9.43	127	11.27	177	13.30	234	15.30
39½	6.28	64½	8.03	89½	9.46	128	11.31	178	13.34	236	15.36
40	6.32	65	8.06	90	9.49	129	11.36	179	13.38	238	15.43
40½	6.36	65½	8.09	90½	9.51	130	11.40	180	13.42	240	15.49
41	6.40	66	8.12	91	9.54	131	11.45	181	13.45	242	15.56
41½	6.44	66½	8.15	91½	9.57	132	11.49	182	13.49	244	15.62
42	6.48	67	8.19	92	9.59	133	11.53	183	13.53	246	15.68
42½	6.52	67½	8.22	92½	9.62	134	11.58	184	13.56	248	15.75
43	6.56	68	8.25	93	9.64	135	11.62	185	13.60	250	15.81
43½	6.60	68½	8.28	93½	9.67	136	11.66	186	13.64	252	15.87
44	6.63	69	8.31	94	9.70	137	11.70	187	13.67	254	15.94
44½	6.67	69½	8.34	94½	9.72	138	11.75	188	13.71	256	16.00
45	6.71	70	8.37	95	9.75	139	11.79	189	13.75	258	16.06
45½	6.75	70½	8.40	95½	9.77	140	11.83	190	13.78	260	16.12
46	6.78	71	8.43	96	9.80	141	11.87	191	13.82	262	16.19
46½	6.82	71½	8.46	96½	9.82	142	11.92	192	13.86	264	16.25
47	6.86	72	8.49	97	9.85	143	11.96	193	13.89	266	16.31
47½	6.89	72½	8.51	97½	9.87	144	12.00	194	13.93	268	16.37
48	6.93	73	8.54	98	9.90	145	12.04	195	13.96	270	16.43
48½	6.96	73½	8.57	98½	9.92	146	12.08	196	14.00	272	16.49
49	7.00	74	8.60	99	9.95	147	12.12	197	14.04	274	16.55
49½	7.04	74½	8.63	99½	9.97	148	12.17	198	14.07	276	16.61
50	7.07	75	8.66	100	10.00	149	12.21	199	14.11	278	16.67
50½	7.11	75½	8.69	100½	10.02	150	12.25	200	14.14	280	16.73

6.1.2 Equations 5 and 6 shall be used in calculation of fineness of portland cements compacted to some porosity other than that of the standard fineness sample used in the calibration test. Equation 5 is used if the temperature of test of the test sample is within ±3°C of the temperature of calibration test of the standard fineness sample, and Eq 6 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

6.1.3 Equations 7 and 8 shall be used in calculation of fineness of materials other than hydraulic cement. Equation 7 shall be used when the temperature of test of the test sample is within ±3°C of the temperature of calibration test, and Eq 8 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

6.1.4 It is recommended that values of b be determined on no less than three samples of the material in question. Test each sample at a minimum of four different porosities over a porosity range of at least 0.06. Correlation coefficients should exceed 0.9970 for the correlation of $\sqrt{\epsilon^3 T}$ versus ϵ on each sample tested (see Appendix X1).

6.2 To calculate the specific surface values in square metres per kilogram, multiply the surface area in cm^2/g by

the factor of 0.1.

6.3 Round values in cm^2/g to the nearest 10 units (in m^2/kg to the nearest unit). Example: 3447 cm^2/g is rounded to 3450 cm^2/g or 345 m^2/kg.

7. Report

7.1 For portland cements and portland cement-based materials, report results on a single determination on a single bed.

7.2 For very high fineness materials with long time intervals, report the average fineness value of two permeability tests, provided that the two agree within 2 % of each other. If they do not agree, discard the values and repeat the test (Note 10) until two values so agreeing are obtained.

NOTE 10—Lack of agreement indicates a need for checks of procedure and apparatus. See also the "Manual of Cement Testing."[2]

8. Precision and Bias

8.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator coefficient of variation for portland cements has been found to be 1.2 % (Note 11). Therefore, results of two properly conducted tests, by the same operator, on the same sample, should not differ by more than 3.4 % (Note 11) of their average.

8.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory coefficient of variation for portland cements has been found to be 2.1 % (Note 11). Therefore, results of two different laboratories on identical samples of a material should not differ from each other by more than 6.0 % (Note 11) of their average.

NOTE 11—These numbers represent, respectively, the 1s % and d2s % limits as described in Practice C 670.

8.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that may be associated with Test Method C 204, no statement is being made.

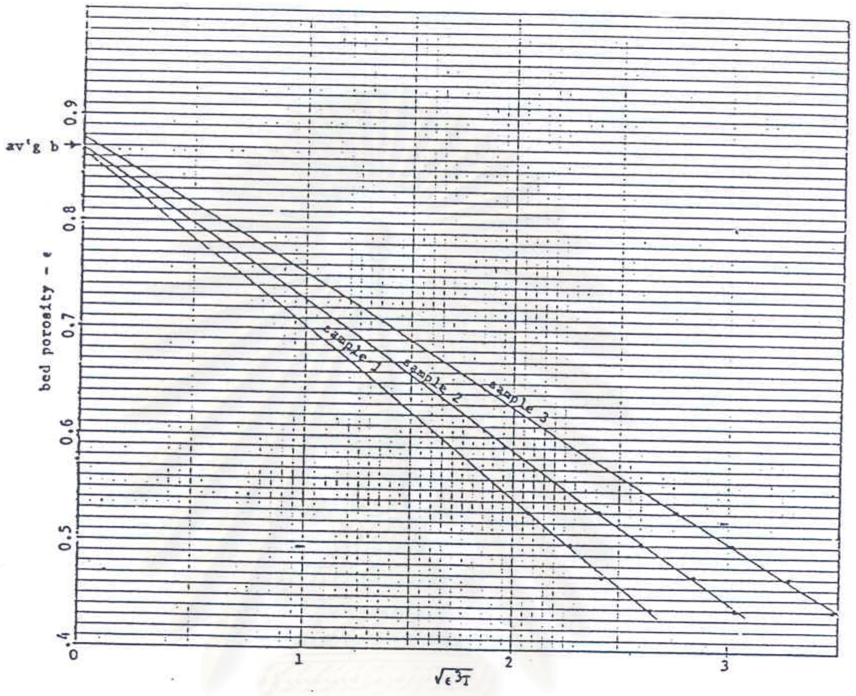
9. Keywords

9.1 air permeability; apparatus; fineness

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPENDIX

(Nonmandatory Information)



Material: Silica flour
- ρ = density of test sample = 2.65 Mg/m³
- V = bulk volume of sample bed = 1.887 cm³
- ϵ = desired porosity of test
- W = grams of sample required = $\rho V(1 - \epsilon)$
- T = measured test time interval, seconds

Computed values of b by linear regression:
- Sample 1 b = 0.863 (correlation coefficient = 0.9980)
- Sample 2 b = 0.869 (correlation coefficient = 0.9993)
- Sample 3 b = 0.879 (correlation coefficient = 0.9973)
- Average b = 0.870

ϵ	W	T	$\sqrt{\epsilon^3 T}$
	Sample 1		
0.530	2.350	29.0	2.076
0.500	2.500	42.0	2.291
0.470	2.650	57.5	2.443
0.440	2.800	82.5	2.651
	Sample 2		
0.530	2.350	39.0	2.410
0.500	2.500	55.5	2.634
0.470	2.650	79.0	2.664
0.440	2.800	108.5	3.040
	Sample 3		
0.530	2.350	51.5	2.769
0.500	2.500	73.0	3.021
0.470	2.650	104.0	3.286
0.440	2.800	141.5	3.472

FIG. X1.1 Illustrative Method for the Determination of the Value for the Constant *b* (for use in fineness calculations of materials other than portland cement)

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Designation: C 311 – 96a

Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete[1]

This standard is issued under the fixed designation C 311; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover procedures for sampling and testing fly ash and raw or calcined pozzolans for use as a mineral admixture in portland-cement concrete.

1.2 The procedures appear in the following order:

	Sections
Sampling	7
CHEMICAL ANALYSIS	
Reagents and apparatus	10
Moisture content	11 and 12
Loss on ignition	13 and 14
Silicon dioxide, aluminum oxide, iron oxide, calcium oxide, magnesium oxide, and sulfur trioxide	15
Available alkali	16 and 17
PHYSICAL TESTS	
Density	18
Fineness	19
Increase of drying shrinkage of mortar bars	20 to 22
Soundness	23
Air-entrainment of mortar	24 and 25
Strength activity index with portland cement	26 to 29
Water requirement	30
Effectiveness of Mineral Admixture in Controlling Alkali-Silica Reactions	31

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are provided for information purposes only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 33 Specification for Concrete Aggregates[2]

C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)[3]

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement[3]

C 150 Specification for Portland Cement[3]

C 151 Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement[3]

C 157 Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete[2]

C 185 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar[3]

C 188 Test Method for Density of Hydraulic Cement[3]

C 204 Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus[3]

C 226 Specification for Air-Entraining Additions for Use in the Manufacture of Air-Entraining Portland Cement[3]

C 227 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)[2]

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency[3]

C 430 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve[3]

C 441 Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction[2]

C 618 Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete[2]

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials[2]

C 778 Specification for Standard Sand[3]

3. Terminology

3.1 *Descriptions of Terms Specific to This Standard:*

3.1.1 *composite sample*—a sample that is constructed by combining equal portions of grab or regular samples.

3.1.2 *established source*—a source for which at least six months of continuous production quality assurance records from a test frequency required for a new source are available, sampled at the source.

3.1.3 *grab sample*—a sample that is taken in a single operation from a conveyor delivering to bulk storage, from bags, or from a bulk shipment. Such a sample may, or may not, reflect the composition or physical properties of a single lot of mineral admixture. This type of sample can be used to characterize small amounts of mineral admixture.

3.1.4 *jobsite or new source*—a source for which less than six months of production records are available, sampled at the source.

3.1.5 *lot*—specific quantity of fly ash or natural pozzolan

---

[1] These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and are the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Mineral Admixtures.

Current edition approved Feb. 10, 1996. Published April 1996. Originally published as C 311 – 53. Last previous edition C 311 – 96.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

offered for inspection at any one time. A lot may be one storage bin or the contents of one or more transport units representing mineral admixture drawn from the same storage bin.

3.1.6 *regular sample*—a sample that is constructed by combining equal portions of grab samples that were taken at predetermined times or locations from any single lot of mineral admixture.

4. Significance and Use

4.1 These test methods are used to develop data for comparison with the requirements of Specification C 618. These test methods are based on standardized testing in the laboratory and are not intended to simulate job conditions.

4.1.1 *Strength Activity Index*—The test for strength activity index is used to determine whether a mineral admixture results in an acceptable level of strength development when used with hydraulic cement in concrete. Since the test is performed with mortar, the results may not provide a direct correlation of how the mineral admixture will contribute to strength in concrete.

4.1.2 *Chemical Tests*—The chemical component determinations and the limits placed on each do not predict the performance of a mineral admixture with hydraulic cement in concrete, but collectively help describe composition and uniformity of the mineral admixture.

5. Materials

5.1 *Graded Standard Sand*—The sand used for making test specimens for the activity index with lime or portland cement shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification C 778.

NOTE 1—*Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

5.2 *Hydrated Lime*—The hydrated lime used in the tests shall be reagent-grade calcium hydroxide, 95 % minimum calculated as $Ca(OH)_2$ (Note 2), and have a minimum fineness of 2500 m^2/kg as determined in accordance with Test Method C 204.

NOTE 2—The calcium hydroxide should be protected from exposure to carbon dioxide. Material remaining in an opened container after a test should not be used for subsequent tests.

5.3 *Portland Cement*—The portland cement used in the Strength Activity Index with Portland Cement test shall comply with the requirements of Specification C 150 and have a minimum compressive strength of 5000 psi (35 MPa) at 28 days and total alkalies (Na_2O + 0.658 K_2O) not less than 0.50 % nor more than 0.80 %.

5.3.1 The use of a locally available portland cement in the Strength Activity Index or a project cement that does not meet the requirements of the section on Materials is permitted when the variations from the requirements of the section on Materials are reported and when the use of such portland cement is requested.

6. Sample Type and Size

6.1 Grab samples and regular samples shall weigh at least 4 lb (2 kg).

6.2 Grab samples or regular samples taken at prescribed intervals over a period of time (see Table 1), may be combined to form a composite sample representative of the mineral admixture produced during that period of time.

6.3 Composite samples shall weigh at least 8 lb (4 kg).

6.4 The sampling shall be done by, or under the direction of, a responsible representative of the purchaser.

7. Sampling Procedure

7.1 The mineral admixture may be sampled by any one of the following methods:

7.1.1 *From Bulk Storage at Point of Discharge or from Rail Cars and Road Tankers.* A sample may be taken by siphon tube during loading or by sampling tube from each loaded car or tanker. If the load is sampled at the point of discharge into the rail car or tanker, the top surface shall be removed to a depth of at least 8 in. (200 mm) before sampling. The sample shall be identified with at least the date and shipment number.

7.1.2 *From Bags in Storage.* The regular sample shall comprise increments of equal size taken by sampling tube from three bags selected at random from one lot of bagged material. The sample shall be identified with date and lot number.

7.1.3 *From Conveyor Delivering to Bulk Storage.* Take one sample of 4 lb (2 kg) or more of the material passing over the conveyor. This may be secured by taking the entire test sample in a single operation, known as the grab sample method, or by combining several equal portions taken at regular intervals, known as the regular sample method. Automatic samplers may be used to obtain samples.

7.2 Samples shall be treated as described in Section 8.

NOTE 3—Some methods of loading or delivery of mineral admixtures, particularly from an airstream or conveyor belt, may create stratification or segregation in the material stream. Sampling techniques must be designed to ensure that the sample is representative of the mineral admixture shipped.

8. Preparation and Storage of Samples

8.1 Prepare composite samples for the tests required in Section 9, by arranging all grab or regular samples into groups covering the period or quantity to be represented by the sample. Take equal portions from each, sufficient to

TABLE 1 Minimum Sampling and Testing Frequency[A]

Test	Sample Type	Jobsite or New Source[B]	Established Source[B]
Moisture content Loss on ignition Fineness	Regular	Daily or each 100 Tons (90 Mg)[C]	Daily or each 400 Tons (360 Mg)[C]
Density and the other tests in Specification C 618, Tables 1 and 2	Composite	Monthly or each 2 000 Tons (1 800 Mg)[C]	Monthly or each 3 000 Tons (2 700 Mg)[C]

[A] It should be noted that the minimum test frequency given in Table 1 is not necessarily the frequency needed for quality control programs on some mineral admixtures.

[B] For definitions, refer to the Terminology section.

[C] Whichever comes first.

produce a composite sample large enough for the tests required. Mix the composite sample thoroughly.

8.2 Samples shall be stored in clean, airtight containers identified with the source and lot or peroid of time represented. Untested portions of the sample shall be retained for at least one month after all test results have been reported.

9. Testing Frequency

9.1 *General*—When required, the purchaser shall specify the amount of testing for available alkalies, reactivity with cement alkalies, drying shrinkage, and air-entrainment. Make all other tests on regular or composite samples chosen as specified in Table 1.

CHEMICAL ANALYSIS

10. General

10.1 All apparatus, reagents and techniques shall comply with the requirements of Test Methods C 114.

10.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean distilled water or water of equal purity.

MOISTURE CONTENT

11. Procedure

11.1 Dry a weighed sample, as received, to constant weight in an oven at 221 to 230°F (105 to 110°C).

12. Calculation

12.1 Calculate the percentage of moisture to the nearest 0.1 %, as follows:

$$\text{Moisture content, \%} = (A/B) \times 100 \quad (1)$$

where:
A = weight loss during drying, and
B = weight as received.

LOSS ON IGNITION

13. Procedure

13.1 Determine loss on ignition in accordance with the procedures outlined in Test Methods C 114, except that the material remaining from the determination of moisture content shall be ignited to constant weight in an uncovered porcelain, not platinum, crucible at 1382 ± 122°F (750 ± 50°C).

14. Calculation

14.1 Calculate the percentage of loss on ignition to the nearest 0.1, as follows:

$$\text{Loss on ignition, \%} = (A/B) \times 100 \quad (2)$$

where:
A = weight loss between 221°F and 1382 ± 90°F (105°C and 750 ± 50°C), and
B = weight of moisture-free sample used.

SILICON DIOXIDE, ALUMINUM OXIDE, IRON OXIDE, CALCIUM OXIDE, MAGNESIUM OXIDE, AND SULFUR TRIOXIDE

15. Procedure

15.1 Determine the percentages of these oxides as required in accordance with the applicable sections of Test Methods C 114 for materials having an insoluble residue greater than 1 % (Note 4).

NOTE 4—Rapid and instrumental methods may be employed similar to those in Test Methods C 114.

AVAILABLE ALKALI

16. Procedure

16.1 Weigh 5.0 g of the sample and 2.0 g of hydrated lime on a piece of weighing paper, carefully mix using a metal spatula, and transfer to a small plastic vial of approximately 25-mL capacity. Add 10.0 mL of water to this mixture, seal the vial by securing the cap or lid to the vial with tape (Note 5), blend by shaking until the mixture is uniform, and store at 38 ± 2°C.

NOTE 5—To ensure that moisture loss from the paste does not occur, place the sealed vial in a sealable container (such as a small sample or mason jar), add sufficient water to cover the bottom of the container, and seal.

16.2 Open the vial at the age of 28 days and transfer the contents to a 250-mL casserole. Break up and grind the cake with a pestle, adding a small amount of water, if necessary, so that a uniform slurry containing no lumps is obtained (Note 6). Add sufficient water to make the total volume 200 mL. Let stand 1 h at room temperature with frequent stirring. Filter through a medium-textured filter paper onto a 500-mL volumetric flask. Wash thoroughly with hot water (eight to ten times).

NOTE 6—At times it may be necessary to break the vial and peel off the plastic from the solid cake. In such cases, care should be exercised to avoid the loss of material and to remove all solid material from the fragments of the vial. If the cake is too hard to break up and grind in the casserole, a mortar should be used.

16.3 Neutralize the filtrate with dilute HCl (1+3), using 1 to 2 drops of phenolphthalein solution as the indicator. Add exactly 5 mL of dilute HCl (1+3) in excess. Cool the solution to room temperature and fill the flask to the mark with distilled water. Determine the amount of sodium and potassium oxides in the solution using the flame photometric procedure, described in Test Methods C 114, except that the standard solutions shall be made up to contain 8 mL of calcium chloride ($CaCl_2$) stock solution per litre of standard solution, and the solution as prepared shall be used in place of the solution of cement.

NOTE 7—The standard solutions made up with 8 mL of calcium chloride ($CaCl_2$) stock solution contain the equivalent of 504 ppm of CaO. Tests have shown that this amount closely approximates the amount of calcium dissolved in the test solution.

17. Calculation and Report

17.1 Calculate the results as weight percent of the original sample material. Report as equivalent percentage of sodium oxide (Na_2O), calculated as follows:

$$\text{Equivalent } Na_2O, \% = Na_2O, \% + 0.658 \times K_2O, \% \quad (3)$$

PHYSICAL TESTS

DENSITY

18. Procedure

18.1 Determine the density of the sample in accordance

with the procedure described in Test Method C 188, except use about 50 g of mineral admixture instead of approximately 64 g of cement as recommended in Test Method C 188.

FINENESS, AMOUNT RETAINED WHEN WET-SIEVED ON A 45-µm (NO. 325) SIEVE

19. Procedure

19.1 Determine the amount of the sample retained when wet-sieved on a 45-µm (No. 325) sieve, in accordance with Test Method C 430, with the following exceptions.

19.1.1 Calibrate the 45-µm (No. 325) sieve using a cement standard (SRM 114).[4] Calculate the sieve correction factors as follows:

$$CF = std - obs \quad (4)$$

where:
CF = the sieve correction factor, %, (include a negative sign when appropriate),
std = the certified residue value for the SRM, %, and
obs = the observed residue value for the SRM, %.

19.1.2 Calculate the fineness of the mineral admixture to the nearest 0.1 % as follows:

$$R_C = R_S + CF \quad (5)$$

where:
R_C = corrected sieve residue, %,
R_S = observed residue for the test sample, %, and
CF = the sieve correction factor, %.

NOTE 8—Test Method C 430 has been adopted for testing fly ash fineness. However, certain requirements, such as cleaning of sieves and interpretation of the test results, are sometimes not appropriate for fly ashes. The C 311 task group is currently evaluating the use of SRM fly ashes for performing sieve calibrations.

INCREASE OF DRYING SHRINKAGE OF MORTAR BARS

20. Test Specimens

20.1 Prepare test specimens in accordance with the procedures described in Test Method C 157, except mold three mortar bars from both the control mix and the test mix using the following proportions:

	Control Mix	Test Mix
Portland cement, g	500	500
Mineral admixture, g	None	125
Graded standard sand, g	1375	1250
Water	sufficient to produce a flow of 100 to 115 %	

21. Procedure

21.1 Cure and measure the test specimens in accordance with Test Method C 157, except that the moist-curing period (including the period in the molds) shall be 7 days, and the comparator reading at the age of 24 ± ½ h shall be omitted. Immediately after taking the comparator reading at the end of the 7-day moist-curing period, store the specimens in accordance with Test Method C 157, and after 28 days of air storage, take a comparator reading for the specimens in accordance with Test Method C 157.

[4] Available from the National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899.

22. Calculation and Report

22.1 Calculate the increase in drying shrinkage of the mortar bars, S_i, as follows:

$$S_i = S_t - S_c \quad (6)$$

where:
S_t = average drying shrinkage of the test specimens calculated as follows, and
S_c = average drying shrinkage of the control specimens calculated as follows:

$$S = \frac{[\text{initial CRD} - \text{CRD}] \times 100}{G} \quad (7)$$

where:
S = drying shrinkage of test or control specimens, %,
initial CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at 7 days of moist curing,
CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at 28 days of drying, and
G = the gage length of the specimens (10 in. or 250 mm).

22.2 Report the results to the nearest 0.01. If the average drying shrinkage of the control specimens is larger than the average drying shrinkage of the test specimens, prefix a minus sign to the increase of drying shrinkage of mortar bars reported.

SOUNDNESS

23. Procedure

23.1 Conduct the soundness test in accordance with Test Method C 151, except that the specimens shall be molded from a paste composed of 25 parts by weight of mineral admixture and 100 parts by weight of a portland cement conforming to Specification C 150.

AIR-ENTRAINMENT OF MORTAR

24. Procedure

24.1 Using portland cement conforming to the requirements for Type I or Type II of Specification C 150, prepare a test mixture in accordance with Test Method C 185, using the following proportions:

	Test Mix
Portland cement, g	300
Mineral admixture	75
20–30 standard sand, g	1125
Water, mL, sufficient to give a flow of 80 to 95	Y
Neutralized Vinsol[5] resin solution, mL,[A] sufficient to produce an air content of 18 ± 3 %	Z

[A] The amount of Vinsol resin solution used shall be considered as part of the mixing water.

24.2 The neutralized Vinsol resin solution used in this section on Air-Entrainment of Mortar shall be either a commercial neutralized Vinsol resin solution or a neutralized Vinsol resin solution prepared in accordance with

[5] Available from Hercules, Inc., 917 King St., Wilmington, DE 19899.

Specification C 226. If it is necessary to dilute either of these solutions, use distilled or demineralized water. (Note 9.)

NOTE 9—Dissolved minerals in drinking water may precipitate Vinsol resin solutions and greatly diminish its air-entraining characteristics.

24.3 Prepare two test mixtures with sufficient neutralized Vinsol[5] resin to produce an air content of 15 to 18 % in the first mix and 18 to 21 % in the second mix. Then, determine by interpolation the amount of Vinsol resin, expressed as weight percent of the cement, required to produce an air content of 18 %.

25. Calculation

25.1 Calculate the air content of the test mixtures as follows:

$$\text{Air content, volume \%} = 100\,[1 - (W'_a/W'_c)] \quad (8)$$

$$W_a = W/400$$

$$W_c = \frac{300 + 1125 + 75 + (300 \times P \times 0.01)}{(300/3.15) + (1125/2.65) + (75/D) + [(300 \times P \times 0.01)/1]}$$

where:

W_a = actual weight per unit of volume of mortar as determined by Test Method C 185, g/mL,
W = weight of the specified 400 mL of mortar (see Test Method C 185), g,
W'_c = theoretical weight per unit of volume, calculated on an air-free basis and using the values for density and quantities of the materials in the mix, g/mL,
P = percentage of mixing water plus Vinsol resin solution based on weight of cement, and
D = density of mineral admixture in the mixture, Mg/m^3.

STRENGTH ACTIVITY INDEX WITH PORTLAND CEMENT

26. Specimens

26.1 Mold the specimens from a control mixture and from a test mixture in accordance with Test Method C 109/C 109M. The portland cement used in the Strength Activity Index test shall comply with the requirements of Specification C 150 and with the alkali and strength limits given in the section on Materials. In the test mixture, replace 20 % of the mass of the amount of cement used in the control mixture by the same mass of the test sample. Make six-cube batches as follows:

26.1.1 Control Mixture:

500 g of portland cement
1375 g of graded standard sand
242 mL of water

26.1.2 Test Mixture:

400 g of portland cement
100 g of test sample
1375 g of graded standard sand
mL of water required for flow ±5 of control mixture

26.2 *Number of Specimens:*

26.2.1 Since Specification C 618 specifies that "meeting the 7 day or 28 day Strength Activity Index will indicate specification compliance" only one age might be required. At the option of the producer or the user after preparing six-cube batches, only three cubes of control and test mixtures need to be molded for either 7 or 28 day testing.

27. Storage of Specimens

27.1 After molding, place the specimens and molds (on the base plates) in the moist room or closet at 73.4 ± 3°F (23 ± 1.7°C) for 20 to 24 h. While in the moist room or closet protect the surface from dripping water. Remove the molds from the moist room or closet and remove the cubes from the molds. Place and store the cubes in saturated lime water as specified in Test Method C 109/C 109M.

NOTE 10—Take care to ensure against zones of stratification or pockets of variation in temperature in the curing chamber.

28. Compressive Strength Test

28.1 Determine the compressive strength, as specified in Test Method C 109/C 109M, of three specimens of the control mixture and three specimens of the test mixture at ages of 7 days, or 28 days, or both, depending upon how many specimens were molded as prescribed in the section on Number of Specimens.

29. Calculation

29.1 Calculate the strength activity index with portland cement as follows:

$$\text{Strength activity index with portland cement} = (A/B) \times 100 \quad (7)$$

where:

A = average compressive strength of test mixture cubes, psi (Pa), and
B = average compressive strength of control mix cubes, psi (Pa).

WATER REQUIREMENT

30. Calculation

30.1 Calculate the water requirement for the Strength Activity Index with Portland Cement as follows:

$$\text{Water requirement, percentage of control} = (Y/242 \times 100) \quad (8)$$

where:

Y = water required for the test mixture to be ±5 of control flow.

EFFECTIVENESS OF MINERAL ADMIXTURE IN CONTROLLING ALKALI SILICA-REACTIONS (SEE APPENDIX X1.)

31. Procedure

31.1 Determine expansion of mortar made with a mineral admixture and a test cement as a percent of expansion of mortar made with low alkali cement in accordance with Test Method C 441 as modified in the following paragraphs:

31.1.1 *Control Mixture*—The control mixture will be made as required in Test Method C 441 except that the control cement shall have an alkali content (as equivalent Na_2O) less than 0.60 % (Note 11).

NOTE 11—Generally, the control cement should have an alkali content as equivalent Na_2O between 0.50 and 0.60 %. However, lower alkali control cement may be used, if desired, to demonstrate equivalence.

31.1.2 *Test Mixture Using Mineral Admixture*—The combined quantity of cement plus mineral admixture shall

total 400 g. See Appendix X1. Use 900 g of borosilicate glass[6] aggregate and sufficient mixing water to produce a flow between 100 and 115 % as determined in accordance with Test Method C 109/C 109M. The cement used in the test mixture shall have an alkali content greater than that of the cement in the control mixture (Note 12).

NOTE 12—Generally, this test cement will have an alkali content equal to or higher than that used in the job.

31.1.3 Store and measure specimens as required in Test Method C 227. Measure length of specimens at ages of 1 and 14 days.

32. Report

32.1 Include in the report for each test mixture comparison made:

32.1.1 The 14 day expansion of the test mixture as a percent of the control mixture at that age,

32.1.2 The identification and chemical analysis of the mineral admixture,

32.1.3 The mass percentage of mineral admixture based on the total mass of cement plus mineral admixture in the test mixture, and

32.1.4 The alkali content of control and test mixture cements as equivalent alkali ($Na_2O + 0.658\ K_2O$).

PRECISION AND BIAS

33. Precision and Bias

33.1 *Strength Activity Index Test:*

33.1.1 Precision was determined from two interlaboratory studies involving two Class C fly ashes, two Class F fly ashes, and one Class N pozzolan. Participating laboratories numbered 12 and 7 in the two studies.[7]

33.1.2 The single-operator standard deviation for the Strength Activity Index test has been found to be 3.7 % (1s). This does not appear to vary either with material or with test age, over the range of 7 to 28 days. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 10.5 % (d2s) of the average of the two results.

33.1.3 The multilaboratory standard deviation for the Strength Activity Index test has been found to be 4.5 % (1s). This does not appear to vary either with material or with test age, over the range of 7 to 28 days. Therefore, results of two properly conducted tests in different laboratories on the same material should not differ by more than 12.7 % (d2s) of the average of the two results.

33.1.4 Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for this procedure, no statement on bias is being made.

33.2 *Chemical Analysis:*

33.2.1 Precision and bias estimates for the test methods in C 114 when applied to the analysis of pozzolans were calculated from an interlaboratory study involving 7 laboratories each analysing 4 NIST SRM fly ashes. A research report describing the results of this study is available from ASTM.[8]

33.2.2 *Precision*—Within-laboratory (W/L) and between-laboratory (B/L) estimates of standard deviation[9] and estimates of maximum differences expected between duplicate determinations in 95 % of comparisons[9] are summarized in Table 2.

33.2.3 *Bias*—Statistically significant bias was found in the determination of CaO and MgO. CaO determinations averaged 0.46 % higher than the value certified for the SRM. MgO determinations averaged 0.19 % higher than the value certified for the SRM.

TABLE 2 Within and Between Lab Precision Estimates for C 114 Methods Applied to the Analysis of Fly Ash

Oxide	1s		d2s	
	W/L	B/L	W/L	B/L
SiO_2	0.62	0.86	1.75	2.45
Al_2O_3	1.46	2.29	4.12	6.48
Fe_2O_3				
<2 %	0.12	0.11	0.34	0.31
≥ 2 %	0.12	0.25	0.34	0.71
CaO	0.63	0.74	1.79	2.09
MgO	0.20	0.21	0.55	0.61
SO_3	0.01	0.03	0.27	0.48
Moisture	0.05	0.06	0.15	0.17
LOI	0.09	0.12	0.25	0.35

34. Keywords

34.1 fly ash; natural pozzolan

[6] Pyrex brand glass No. 7740 is available from Corning Glass Works, Corning, New York.

[7] A research report summarizing the statistical analysis is available from ASTM Headquarters, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103. Request RR: C09-1001.

[8] A research report is available from ASTM Headquarters, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103. Request RR: C09-1008.

[9] These values represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. COMMENTARY ON SECTION 30

X1.1 Test procedures in Section 30 are designed to determine the effectiveness of fly ash, or natural pozzolan, in preventing excessive expansion resulting from a reaction between certain aggregates and alkalies in portland-cement mixtures. Tests are made in accordance with Test Method C 441 using:

X1.1.1 400 g of portland cement or a combined total of cement plus fly ash or natural pozzolan of 400 g.

X1.1.2 900 g of borosilicate glass,[6] and

X1.1.3 Sufficient water to obtain a flow of 100 to 115 %.

X1.2 The control mixture is made with a low-alkali portland cement. The test mixture, made of a test percentage of the fly ash or natural pozzolan, can be made with the same cement or any other cement having an equivalent alkali content greater than 0.60 %.

X1.3 *Interpretation of Results*—The fly ash or natural pozzolan will be considered "effective" when used at percentages equal to or greater than the percentages used in the test mixture with cements having alkali contents that do not exceed by more than 0.05 percentage points the alkali content of the cement used in the test mixture.

X1.4 *Selection of the Percentage of Fly Ash or Natural Pozzolan*—It may be necessary to make test mixtures with several percentages of fly ash or natural pozzolan to determine the minimum amount necessary to be considered "effective" in reducing expansion to the level produced by the "control" low-alkali cement. The minimum amount of fly ash or natural pozzolan shall be 15 % by weight of cementitious material.

X1.5 *Selection of the Alkali Content of the Cement Used in the Test Mixture*—In some instances it may not be necessary to demonstrate that the fly ash or natural pozzolan will reduce expansion, but rather that it will not increase expansion. In this instance the test and control mixtures should be made with the same low alkali cement used in the control mixture to better delineate any increase in expansion. The fly ash or natural pozzolan percentage used may need to be sufficiently high to demonstrate that the percentage exceeds the pessimum if such pessimum exists for the combination.

X1.6 *Selection of the Low Alkali Control Cement*—The test procedure in this test method and requirements in Specification C 618 are designed to measure the relative effectiveness of the fly ash or natural pozzolan in reducing expansion due to alkali-silica reactions. The effectiveness is a function of both the alkali content of the cement used in the test mixture and the percentage of fly ash or natural pozzolan. The higher the alkali content of the test mixture cement and the lower the percentage of fly ash or natural pozzolan used, the more effective the fly ash or natural pozzolan. This test procedure and the 100 % criterion of Specification C 618 can be used as a guide to enhance field performance of job mixtures if it is assumed that use of the low alkali control cement will prevent excessive expansion in service with materials proposed for use in the job. This is the situation when the aggregates proposed for use contain rapidly reactive constituents but do not exceed 0.05 % expansion in three months or 0.10 % expansion in six months when tested with the control cement in Test Method C 227. In such instances the control cement used in this test method should have an alkali content as required to control the expansive reactions of the aggregates being used, for example in the 0.50 to 0.60 % range. See the appendix to Specification C 33.

X1.6.1 Certain reactive aggregates have been identified which produce deleterious expansion after many years of service when used with cements with equivalent alkali contents well below 0.60 %. Often these reactive aggregates do not produce expansions in Test Method C 227 exceeding those discussed in the appendix of Specification C 33 until a much later age, perhaps one or two years. In such instances the use of a control cement with an alkali content significantly less than 0.60 % is appropriate.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Designation: C 618 – 96

Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete[1]

This standard is issued under the fixed designation C 618; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete where cementitious or pozzolanic action, or both, is desired, or where other properties normally attributed to finely divided mineral admixtures may be desired, or where both objectives are to be achieved.

NOTE 1—Finely divided materials may tend to reduce the entrained air content of concrete. Hence, if a mineral admixture is added to any concrete for which entrainment of air is specified, provision should be made to ensure that the specified air content is maintained by air content tests and by use of additional air-entraining admixture or use of an air-entraining admixture in combination with air-entraining hydraulic cement.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete[2]

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *fly ash*—finely divided residue that results from the combustion of ground or powdered coal.

NOTE 2—This definition of fly ash does not include, among other things, the residue resulting from: (*1*) the burning of municipal garbage or any other refuse with coal; (*2*) the injection of lime directly into the boiler for sulfur removal; or (*3*) the burning of industrial or municipal garbage in incinerators commonly known as "incinerator ash."

3.1.2 *pozzolans*—siliceous or siliceous and aluminous materials which in themselves possess little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties.

4. Classification

4.1 *Class N*—Raw or calcined natural pozzolans that comply with the applicable requirements for the class as given herein, such as some diatomaceous earths; opaline cherts and shales; tuffs and volcanic ashes or pumicites, any of which may or may not be processed by calcination; and various materials requiring calcination to induce satisfactory properties, such as some clays and shales.

4.2 *Class F*—Fly ash normally produced from burning anthracite or bituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class fly ash has pozzolanic properties.

4.3 *Class C*—Fly ash normally produced from lignite or subbituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class of fly ash, in addition to having pozzolanic properties, also has some cementitious properties. Some Class C fly ashes may contain lime contents higher than 10 %.

5. Ordering Information

5.1 The purchaser shall specify any supplementary optional chemical or physical requirements.

6. Chemical Composition

6.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the requirements as to chemical composition prescribed in Table 1. Supplementary optional chemical requirements are shown in Table 1A.

7. Physical Properties

7.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the physical requirements prescribed in Table 2. Supplementary optional physical requirements are shown in Table 2A.

8. Methods of Sampling and Testing

8.1 Sample and test the mineral admixture in accordance with the requirements of Test Methods C 311.

8.2 Use cement of the type proposed for use in the work and, if available, from the mill proposed as the source of the cement, in all tests requiring the use of hydraulic cement.

9. Storage and Inspection

9.1 The mineral admixture shall be stored in such a manner as to permit easy access for proper inspection and identification of each shipment. Every facility shall be provided the purchaser for careful sampling and inspection,

---

[1] This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Mineral Admixtures.

Current edition approved Jan. 10, 1996. Published March 1996. Originally published as C 618 – 68 T to replace C 350 and C 402. Last previous edition C 618 – 95.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

TABLE 1 Chemical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO_2) plus aluminum oxide (Al_2O_3) plus iron oxide (Fe_2O_3), min, %	70.0	70.0	50.0
Sulfur trioxide (SO_3), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0 [A]	6.0

[A] The use of Class F pozzolan containing up to 12.0 % loss on ignition may be approved by the user if either acceptable performance records or laboratory test results are made available.

TABLE 1A Supplementary Optional Chemical Requirement

NOTE—This optional requirement applies only when specifically requested.

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Available alkalies, as equivalent, as Na_2O, max, % [A]	1.5	1.5	1.5

[A] Applicable only when specifically required by the purchaser for mineral admixture to be used in concrete containing reactive aggregate and cement to meet a limitation on content of alkalies.

TABLE 2 Physical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Fineness:			
Amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325) sieve, max, % [A]	34	34	34
Strength activity index: [B]			
With portland cement, at 7 days, min, percent of control	75 [D]	75 [D]	75 [D]
With portland cement, at 28 days, min, percent of control	75 [D]	75 [D]	75 [D]
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
Soundness: [C]			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
Uniformity requirements:			
The density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than:			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45-μm (No. 325), max variation, percentage points from average	5	5	5

[A] Care should be taken to avoid the retaining of agglomerations of extremely fine material.
[B] The *strength* activity index with portland cement is not to be considered a measure of the compressive strength of concrete containing the mineral admixture. The *strength* activity index with portland cement is determined by an accelerated test, and is intended to evaluate the contribution to be expected from the mineral admixture to the longer strength development of concrete. The weight of mineral admixture specified for the test to determine the *strength* activity index with portland cement is not considered to be the proportion recommended for the concrete to be used in the work. The optimum amount of mineral admixture for any specific project is determined by the required properties of the concrete and other constituents of the concrete and should be established by testing. *Strength* activity index with portland cement is a measure of reactivity with a given cement and may vary as to the source of both the mineral admixture and the cement.
[C] If the mineral admixture will constitute more than 20 % by weight of the cementitious material in the project mix design, the test specimens for autoclave expansion shall contain that anticipated percentage. Excessive autoclave expansion is highly significant in cases where water to mineral admixture and cement ratios are low, for example, in block or shotcrete mixes.
[D] Meeting the 7 day or 28 day *strength* activity index will indicate specification compliance.

either at the source or at the site of the work as may be specified by the purchaser.

10. Rejection

10.1 Material that fails to conform to the requirements of this specification may be rejected. Rejection should be reported to the producer or supplier promptly and in writing.

10.2 Packages varying more than 5 % from the stated weight may be rejected. If the average weight of the packages in any shipment, as shown by weighing 50 packages taken at random, is less than that specified, the entire shipment may be rejected.

10.3 Mineral admixture in storage prior to shipment for a period longer than 6 months after testing may be retested and may be rejected if it fails to meet the fineness requirements.

11. Packaging and Package Marking

11.1 When the mineral admixture is delivered in packages, the class, name, and brand of the producer, and the weight of the material contained therein, shall be plainly marked on each package. Similar information shall be provided in the shipping invoices accompanying the shipment of packaged or bulk mineral admixture.

12. Keywords

12.1 fly ash; mineral admixtures; natural pozzolan; pozzolans

TABLE 2A Supplementary Optional Physical Requirements

NOTE—These optional requirements apply only when specifically requested.

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Multiple factor, calculated as the product of loss on ignition and fineness, amount retained when wet-sieved on 45-μm (No. 325) sieve, max, %[A]	....	255	....
Increase of drying shrinkage of mortar bars at 28 days, max, difference, in %, over control[B]	0.03	0.03	0.03
Uniformity Requirements:			
In addition, when air-entraining concrete is specified, the quantity of air-entraining agent required to produce an air content of 18.0 vol % of mortar shall not vary from the average established by the ten preceding tests or by all preceding tests if less than ten, by more than, %	20	20	20
Effectiveness in Controlling Alkali-Silica Reaction:[C]			
Expansion of test mixture as percentage of low-alkali cement control, at 14 days, max, %	100	100	100

[A] Applicable only for Class F mineral admixtures since the loss on ignition limitations predominate for Class C.

[B] Determination of compliance or noncompliance with the requirement relating to increase in drying shrinkage will be made only at the request of the purchaser.

[C] Mineral admixtures meeting this requirement are considered as effective in controlling alkali aggregate reactions as the use of the low-alkali control cement used in the evaluation. However, the mineral admixture shall be considered effective only when the mineral admixture is used at percentages by mass of the total cementitious material equal to or exceeding that used in the tests and when the alkali content of the cement to be used with the mineral admixture does not exceed that used in the tests by more than 0.05 %. See Appendix X1, Test Methods C 311.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Designation: C 778 – 92a$^{\epsilon 1}$

Standard Specification for Standard Sand[1]

This standard is issued under the fixed designation C 778; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

$^{\epsilon 1}$ NOTE—Section 10.2 was editorially corrected in March 1995.

1. Scope

1.1 This specification covers standard sand for use in the testing of hydraulic cements.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)[2]

C 127 Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate[3]

C 136 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates[3]

C 150 Specification for Portland Cement[2]

C 185 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar[2]

C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements[2]

C 1005 Specification for Weights and Weighing Devices for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements[2]

E 11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes[4]

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *standard sand*—silica sand, composed almost entirely of naturally rounded grains of nearly pure quartz, used for preparing mortars in the testing of hydraulic cements.

3.1.2 *20–30 sand*—standard sand, predominantly graded to pass a 850-µm (No. 20) sieve and be retained on a 600-µm (No. 30) sieve.

3.1.3 *graded sand*—standard sand, predominantly graded between the 600-µm (No. 30) sieve and the 150-µm (No. 100) sieve.

TABLE 1 Standard Sand Requirements

Characteristics	20-30 Sand	Graded Sand
Grading, percent passing sieve:		
1.18 mm (No. 16)	100	100
850 µm (No. 20)	85 to 100	
600 µm (No. 30)	0 to 5	96 to 100
425 µm (No. 40)		65 to 75
300 µm (No. 50)		20 to 30
150 µm (No. 100)		0 to 4
Difference in air content of mortars made with washed and unwashed sand, max, % air	2.0	1.5[A]
Source of sand	Ottawa, IL or LeSuer, MN	Ottawa, IL

[A] Compressive strength of Test Method C 109 mortar made with Specification C 150 or C 595 cement will be reduced approximately 4 % for each percent of air in the compacted cube. However, as many as three batches of washed and three of unwashed sand may be needed to reliably detect a difference in strength of 7 % between washed and unwashed sand mortars.

4. Requirements

4.1 Sand shall meet the requirements of Table 1 with respect to grading, source of sand and absence of undesirable air entraining characteristics.

METHODS OF SAMPLING AND TESTING STANDARD SANDS

5. Apparatus

5.1 *Sieves*—The sieves shall be standard 203-mm (8 in.) diameter, full-height, wire-cloth sieves, conforming to the requirements of Specification E 11, and of the following sizes:

1.18-mm (No. 16)	425-µm (No. 40)
850-µm (No. 20)	300-µm (No. 50)
600-µm (No. 30)	150-µm (No. 100)

5.2 *Sample Splitter*—The sample splitter shall be of the riffle type and shall have an even number of equal-width chutes that alternately discharge in opposite directions. The device shall have no fewer than eight chutes having a maximum opening no greater than 12.7 mm (½ in.), and a minimum opening at least three times the diameter of the largest particle of sand in a sample to be split. It shall be equipped with a hopper or straightedged pan by which a sample may be fed to the chutes at a controlled rate, and two

[1] This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.95 on Coordination of Standards.

Current edition approved Nov. 15, 1992. Published January 1993. Originally published as C 778 – 74 T. Last previous edition C 778 – 92.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

receptacles to hold the two halves of the sample following splitting. The length of the hopper or pan shall be approximately equal to the overall width of the assembly of chutes.

5.3 *Weights and Weighing Devices*—Weights and weighing devices shall conform to the requirements of Specification C 1005 as appropriate for the size of the sample to be weighed.

6. Sampling

6.1 *Procedure*—Pour an approximate quantity of sand from the bag or other container into the hopper or pan of the sample splitter, leveling the surface from end to end and from edge to edge so that approximately equal amounts will flow through each chute when the sand is introduced to the chutes. The rate at which the sand is introduced shall be such as to allow free flow through the chutes into the receptacles below. When all of the original material has been divided, the portion in one of the receptacles shall be reintroduced to the hopper. Repeat as many times as necessary to obtain a sample of the desired mass. As appropriate, the portion of the sample collected in the second receptacle each time may either be reserved for testing, for reduction in size for other tests, or discarded.

7. Sieve Analysis

7.1 *General*—Obtain approximately 700 g of sand from a full bag and reduce to approximately 100 g using the procedure described in the section on sampling.

7.2 *Sieving*—Sieve the sand by hand or mechanically as described in Test Method C 136.

7.3 *Reporting*—Report the results of the sieve analysis as total percentage passing each sieve.

8. Tests for Air-Entraining Potential of Sand

8.1 Both 20–30 and graded sands may contain small amounts of surfactants or other contaminants that will produce air voids in mortars made with the sand. When contamination is suspected, tests can be made using "washed" and "as received" sand to determine the effect on air content or strength (see Note 1).

NOTE 1—Often it may be desirable to wash these sands routinely to avoid potential problems. Additionally, the washing procedure outlined in 8.1.1 will tend to minimize segregation of sand that may occur when the sand is handled in a dry state.

8.1.1 Obtain a sample of at least 2800 g from a full bag of sand. Place the remainder of the sand from the bag in a drum-type concrete mixer. Add sufficient water to cover the sand and mix for 2 min. Decant the water over a No. 200 sieve and drain for 2 min. Repeat the washing and decanting procedure four times. Tilt the mixer and drain the sand for 20 min or longer. Weigh damp sand, in approximately batch-sized quantities, into separate containers. Dry the sand to constant weight in an oven at 110°C. Cool and adjust the quantity of dry sand to the amount required for the test. Prepare two batches of each of washed and as "as received" sand for test following the procedures in Test Method C 185 for 20–30 sand or Test Method C 109 for graded sand.

8.1.2 Tests for air-entraining potential of a standard sand shall be made on a single day by a single operator.

8.2 *20–30 Sand*—Prepare two batches of mortar with washed sand and two with "as received" sand in accordance with Test Method C 185. Compare the average air content for washed and unwashed sand mortars for compliance with limit in 4.1.2.

8.3 *Graded Sand*—Prepare two batches of mortar with washed sand and two with "as received" sand in accordance with Test Method C 109. When Test Method C 109 mortar cubes are removed from the molds, determine the density of a group of at least three cubes from each batch by weighing the cubes both in air and immersed in water. Follow procedures outlined in Test Method C 127 for bulk specific gravity (SSD). Weigh cubes to at least the nearest gram. Calculate the apparent air content as follows:

$$\text{apparent air content} = ((D_t - D_m)/D_t) \times 100$$

where:

D_m = the measured density (bulk specific gravity (SSD)), and

D_t = the theoretical density of air-free mortar, g/cm^3.

Note that D_t is calculated as the total mass of the ingredients in a batch of mortar divided by the sum of the absolute volumes of the cement, sand, and water used in the batch. Average the apparent air content of the two batches made with washed sand and compare that average with the similar average for "as received" sand mortar to determine compliance with the limit in 4.2.2.

9. Rejection

9.1 *Standard Sand*—A bag of standard sand shall be rejected if the contents fail to meet one or more of the requirements of this specification. A shipment of standard sand shall be sampled by selecting every 15th bag by consecutive number beginning with the 5th bag of the shipment. Bags missing from the sequence shall be counted as if they were there. A shipment of standard sand may be accepted if the contents of the selected bags meet the requirements of this specification. If any of the selected bags fail to meet one or more of the requirements of this specification, the shipment shall be resampled by selecting every 15th bag by consecutive number beginning with the 10th bag of the shipment. A shipment of standard sand may be accepted if the contents of the selected bags on the resampling meet the requirements of this specification. If any of the selected bags in the resampling fail to meet one or more of the requirements of this specification, and the rejected bag is within a 15-bag sequence of a bag rejected in the first selection of bags, the entire sequence of bags between accepted tests shall be rejected. The entire shipment shall be rejected if half of the number of bags tested fail to meet the requirements of this specification, or if the shipment consists of five bags or less if one randomly selected bag fails the specification.

TABLE 2 Sampling and Resampling of Standard Sand

Total No. of Consecutive Bags in Shipment	No. of Bags to Test	Test in Consecutive No., the Following Bags
Sampling:		
less than 5	1	random
5 to 19	1	5th
20 to 34	2	5th and 20th
35 to 49	3	5th, 20th, and 35th
50 to 64	4	5th, 20th, 35th, and 50th
Resampling:		
less than 5	none	reject shipment
5 to 19	1	10th
20 to 34	2	10th and 25th
35 to 49	3	10th, 25th, and 40th
50 to 64	4	10th, 25th, 40th, and 55th

9.2 Table 2 shows for both sampling and resampling in Column 2 the number of bags to be tested based on the total number of consecutive bags in the shipment. Column 3 shows the identification of the bag to be selected for test based on the consecutive number of the bags.

NOTE 2—If, in a shipment of 30 bags, on first sampling, the 20th bag fails the specification, and on resampling, the 25th bag fails the specification, the entire shipment is rejected. If the shipment were 100 bags and on first sampling only the 20th bag fails, and on resampling only the 25th bag fails, only bags No. 11 to 34 would be rejected.

10. Packaging and Package Marking

10.1 *Packaging*—Standard sands shall be delivered in bags with impervious liners made of material that will not contaminate the sand.

10.2 *Marking*—Each bag shall be plainly marked as follows: ASTM C 778 20-30 Sand, or ASTM C 778 Graded Sand as the case may be. The source of the sand and the weight of the sand contained therein shall be plainly indicated on each bag.

11. Keywords

11.1 graded sand; hydraulic cement testing sand; standard sand; 20-30 sand

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

รูปการจัดการเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ผ1 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

รูปที่ ผ2 เส้นใยปาล์ม

สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ ผ3 เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

รูปที่ ผ4 กองชานอ้อยที่ได้จากการหีบ

รูปที่ ผ5 เถ้าลอยชานอ้อยที่นำไปถมในบ่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณ์ จารุทะวัย เกิดวันที่ 26 ธันวาคม 2518 ที่จังหวัดนครนายก สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2542 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย