การศึกษาอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆของภาคใต้ตอนบน ต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

นายสุรินทร์ มายูร อส.บ. (วิศวกรรมก่อสร้าง)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด)

.... กรรมการ
(ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆของภาคใต้ตอนบน ต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

หน่วยกิต 6

ผู้เขียน นายสุรินทร์ มายูร

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา ครุศาสตร์โยธา

คณะ ครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

พ.ศ. 2550

บทคัดย่อ

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการนำเส้นใยผสมกับกะลาปาล์มน้ำมันไปเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน การใช้ปริมาณเส้นใยกับกะลาปาล์มและการใช้อุณหภูมิในการเผามีความแตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน ทำให้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้อาจมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน และศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดในระดับค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มีทั้งที่เป็นเถ้าลอยล้วนและที่เป็นเถ้าลอยผสมเถ้าก้นเตาซึ่งได้มาจากแหล่งต่างๆ ในภาคใต้ 4 แหล่ง และใช้ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจากแต่ละแหล่งมีองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกัน เถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นเถ้าลอยล้วนบางแหล่งมีอนุภาคกลมและผิวเรียบ เมื่อนำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์โดยที่มีการควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 105 - 115 พบว่ามีความต้องการปริมาณน้ำลดลง เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นเถ้าลอยล้วนที่ทำการศึกษา สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีบางแหล่งที่สามารถใช้ได้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 466 ถึง 488 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าลอยผสมเถ้าก้นเตาไม่สามารถนำมาใช้ได้ เนื่องจากทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำลง ดังนั้นการนำเถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์สามารถทำได้ แต่จะต้องพิจารณาเลือกแหล่งที่มาและทดสอบหาปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม

คำสำคัญ: เถ้าปาล์มน้ำมัน / วัสดุปอซโซลาน / ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ / กำลังรับแรงอัด

Thesis Title	Influences of Palm Oil Fuel Ash From Upper Southern Part of Thailand on Properties of Mortar Portland Cement
Thesis Credits	6
Candidate	Mr.Surin Mayoon
Thesis Advisor	Dr. Teerawut Muhummud
Program	Master of Science in Industrial Education
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Technology Education
Faculty	Industrial Education and Technology
B.E.	2550

Abstract

Palm Oil Fuel Ash (POFA) is one of the pozzolanic materials. It is a by-product from palm oil industry being produced from combustion of palm fibers and nutshells in the steam boiler. However, POFA obtained form each factory may have different properties since each factory uses different temperatures and mixture palm fibers and nutshells in combustion. In this research, the chemical and physical properties of POFA as well as the effects of POFA on the compressive strength of mortars under uniaxial compression were investigated. POFA used in this study was the ground fly ash and mixed of ground and bottom ashes, obtained from four different factories and replaced Portland cement in the percentages of 10 20 30 40 and 50 by weight. The cement to sand ratio of 1 : 2.75 was used for all mixture. The studies of the chemical and physical properties showed that, there was variation in properties from factory to factory. Ground POFA particles from two factories have round shapes and smooth surfaces. As a result, for constant flow of 105-115, the mortar mixed with the small amounts of these POFA required less water than the standard mortar. According to the uniaxial compressive test results, the proper amount of POFA as Portland cement replacement varied from factory to factory. The compressive strengths of the mortars that contain 10 percent of palm oil fly ash were in the rang of 466 to 488 Ksc, which are higher than those of the standard mortars. Some of these fly ashes can be used up to 20 percent and without causing strength reduction in mortar.

Keywords: Palm Oil Fuel Ash/ Pozzolanic Material/ Portland Cement/ Compressive Strength

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาดำเนินการวิจัย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อคิดอันเป็นประโยชน์ และมีคุณค่ายิ่งต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ ที่เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอต่างๆ ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และหน่วยงานผู้เกี่ยวข้ ... านี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้า ... ขอบพระคุณบิดามารดา สมาชิกใน ... ่งใจมาโดยตลอด ความดีและประโยชน์อันใดทีเกิดจากงานวิจัยครังนี ผู้วิจัยขอมอบความดีทังปวงให้แก่บุคคลเหล่านี้ ตลอดจนคณาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ขอขอบคุณ บริษัท วิจิตรภัณฑ์สวนปาล์ม จำกัด บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) บริษัท ทักษิณปาล์ม จำกัด ห้างหุ้นส่วนจำกัดมิตรเจริญปาล์มออยล์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าปาล์มน้ำมัน ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความอนุเคราะห์ของบุคคลและหน่วยงานที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฎ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 ทฤษฎี	4
2.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	8
3. วิธีการวิจัย	**11**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	11
3.2 ส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัย	12
3.3 การเตรียมตัวอย่าง	14
3.4 การทดสอบตัวอย่าง	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4. ผลของการวิจัย **16**

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ 16

4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์ 23

4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ 23

4.4 การทดสอบความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ 35

5. สรุปและข้อเสนอแนะ **40**

5.1 สรุปผลการทดสอบ 40

5.2 ข้อเสนอแนะ 41

เอกสารอ้างอิง **42**

ภาคผนวก

ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน 45

ข. รูปเครื่องมือและตัวอย่างการทดสอบ 114

ประวัติผู้วิจัย **122**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 การจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM 618-99 5

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน 7

2.3 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน 7

3.1 สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบด 13

4.1 ค่าองค์ประกอบทางเคมี ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(LOI) และค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 22

4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมโดยควบคุมให้มีค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ระหว่าง 105 – 115 23

4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 24

4.4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 26

4.5 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 27

4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์แลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 28

4.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยทรายบด (SA) 29

4.8 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 10 30

4.9 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 20 31

4.10 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 30 31

4.11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 40 32

4.12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 50 32

4.13 ค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ 36

4.14 ค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ 37

ก.1 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 46

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ก.2	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ควบคุม (Control)	46
ก.3	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ OP1-01	47
ก.4	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1-02	48
ก.5	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1-03	49
ก.6	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1-04	50
ก.7	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1-05	51
ก.8	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2-01	52
ก.9	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2-02	53
ก.10	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2-03	54
ก.11	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2-04	55
ก.12	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2-05	56
ก.13	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3-01	57
ก.14	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3-02	58
ก.15	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3-03	59
ก.16	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3-04	60
ก.17	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3-05	61
ก.18	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4-01	62
ก.19	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4-02	63
ก.20	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4-03	64
ก.21	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4-04	65
ก.22	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4-05	66
ก.23	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA-01	67
ก.24	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA-02	68
ก.25	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA-03	69
ก.26	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA-04	70
ก.27	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA-05	71
ก.28	ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ Control	72

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

ก.29 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 01 73
ก.30 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 02 74
ก.31 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 03 75
ก.32 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 04 76
ก.33 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 05 77
ก.34 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 01 78
ก.35 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 02 79
ก.36 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 03 80
ก.37 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 04 81
ก.38 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 05 82
ก.39 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 01 83
ก.40 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 02 84
ก.41 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 03 85
ก.42 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 04 86
ก.43 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 05 87
ก.44 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 01 88
ก.45 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 02 89
ก.46 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 03 90
ก.47 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 04 91
ก.48 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 05 92
ก.49 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 01 93
ก.50 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 02 94
ก.51 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 03 95
ก.52 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 04 96
ก.53 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 05 97
ก.54 ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ควบคุม (Control) 98
ก.55 ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ควบคุม (Control) 98
ก.56 ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ OP1 99

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

ก.57	ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ OP1	100
ก.58	ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ OP2	101
ก.59	ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ OP2	102
ก.60	ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ OP3	103
ก.61	ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ OP3	104
ก.62	ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ OP4	105
ก.63	ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ OP4	106
ก.64	ค่าความหนาแน่นเปียกตัวอย่างที่ SA	107
ก.65	ค่าความหนาแน่นแห้งตัวอย่างที่ SA	108
ก.66	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ควบคุม (Control)	109
ก.67	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ OP1	109
ก.68	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ OP2	110
ก.69	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ OP3	111
ก.70	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ OP4	112
ก.71	ค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ SA	113

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ก.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ Control	72
ก.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1-01	73
ก.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1-02	74
ก.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1-03	75
ก.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1-04	76
ก.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1-05	77
ก.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2-01	78
ก.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2-02	79
ก.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2-03	80
ก.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2-04	81
ก.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2-05	82
ก.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3-01	83

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

4.1 การเปรียบเทียบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าปาล์มน้ำมัน 16

4.2 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 17

4.3 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 18

4.4 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 19

4.5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 20

4.6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 21

4.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 25

4.8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 26

4.9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 27

4.10 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 28

4.11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้ทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 29

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุต่างๆ ของมอร์ตาร์ 33

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุของมอร์ตาร์ที่ปริมาณต่างๆของเถ้าปาล์มน้ำมัน 34

4.14 ความหนาแน่นเปียกของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 38

4.15 ความหนาแน่นแห้งของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 38

4.16 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ 39

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ก.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3-02	84
ก.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3-03	85
ก.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3-04	86
ก.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3-05	87
ก.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4-01	88
ก.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4-02	89
ก.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4-03	90
ก.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4-04	91
ก.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4-05	92
ก.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA-01	93
ก.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA-02	94
ก.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA-03	95
ก.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA-04	96
ก.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA-05	97

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ข.1	เครื่องบดเถ้าปาล์มน้ำมัน	115
ข.2	เครื่องผสมมอร์ตาร์	115
ข.3	เครื่องทดสอบหาค่าการไหล	116
ข.4	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	116
ข.5	ตู้อบ	117
ข.6	แบบหล่อตัวอย่างกำลังรับแรงอัด รูปลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร	117
ข.7	ตัวอย่างกำลังรับแรงอัด รูปลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร	118
ข.8	การบ่มก้อนตัวอย่าง	119
ข.9	การทดสอบหาค่าการไหล	120
ข.10	ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่าง	120
ข.11	เครื่องคัดขนาดทราย	121

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing Material Standard
°C	=	องศาเซลเซียส
W/(C+OP)	=	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน
W/(C+SA)	=	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แทนที่ด้วยทรายบด
ลบ.ซม.	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
กก./ซม^2	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
ซม^2	=	ตารางเซนติเมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
%	=	เปอร์เซ็นต์
KSC	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานก่อสร้างในประเทศไทยได้ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก ส่งผลให้มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำนวนมาก ในการผสมคอนกรีต เมื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีราคาสูงขึ้นจะทำให้ต้นทุนค่าก่อสร้างสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะหาวัสดุต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติและหาได้ง่ายตามท้องถิ่นหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากระบบอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตและทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลงตามไปด้วยวัสดุที่เหลือใช้เหล่านี้ ได้แก่ เถ้าปาล์มน้ำมัน [6,7,8] เถ้าแกลบ [7] เถ้าเปลือกไม้ [7] และเถ้าลอย [15]

ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภาคที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมากที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มกะลาปาล์มน้ำมันและเส้นใยของผลปาล์มจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำโดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาไหม้จะมีขี้เถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมากที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งและอาจทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าปาล์มน้ำมัน ผลการวิจัยที่ผ่านมา [6,7,8] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีหลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอริคออกไซด์ อยู่เป็นจำนวนมาก สามารถนำมาใช้แทนแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยจากการศึกษาของ Hussin และ Awal [1] พบว่า ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังอัดสูงสุด และมีกำลังอัดเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว และที่อายุ 1 วัน มีกำลังอัดสูงสุดกว่าคอนกรีตมาตรฐานอยู่ร้อยละ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน

อย่างไรก็ตามกระบวนการในการได้มาของเถ้าปาล์มน้ำมันของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกันตั้งแต่สัดส่วนของเศษกะลาปาล์ม และเส้นใยปาล์มที่ใช้ อุณหภูมิในการเผา และการจัดเก็บเถ้าปาล์มน้ำมันงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ได้จากแหล่งต่างๆในภาคใต้ของประเทศไทยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพิจารณานำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆทางด้านคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ค่าความถ่วงจำเพาะ

2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ

3. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน ที่อายุการบ่มเท่ากัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

2) เถ้าปาล์มน้ำมัน จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ได้แก่

- บริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร
- บริษัททักษิณปาล์ม(2521) จำกัด อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- บริษัทวิจิตรภัณฑ์สวนปาล์ม จำกัด อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร
- ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิตรเจริญปาล์มออยล์ อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร

นำเถ้าปาล์มน้ำมันมาอบด้วยเครื่องอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดเป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง จนมีความละเอียดค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

3) ทราย เป็นทรายแม่น้ำจากคลองท่าแซะ จังหวัดชุมพร นำมาล้างให้สะอาดแล้วอบให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 16 ค้างเบอร์ 30

4) น้ำ เป็นน้ำดื่มสะอาด

1.3.2 ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้ วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายคงที่ เท่ากับ 1 : 2.75

1.3.3 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่

- กำลังรับแรงอัด
- ค่าหน่วยน้ำหนักเปียก
- ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง

โดยทำการศึกษาที่อายุของมอร์ตาร์ 3 7 14 28 และ 56 วัน และทำการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 109/C109M-99 [19]

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 [2] หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสม และมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่าง หรือแคลเซียม ไฮดรอกไซด์($Ca(OH)_2$)ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาโปซโซลาน (Pozzolanic Reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzalan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pazzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเถาถลุงเหล็ก เป็นต้น[3]

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-99 [2] ได้จำแนกวัสดุปอซโซลานเป็นสามกลุ่มดังนี้

1) Class N ได้แก่ สารปอซโซลาน ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzalan) คือ วัสดุที่ได้จากการระเบิดภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพรุน (Pumice) เป็นต้น

2) Class F ได้แก่ สารประกอบปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pazzolan) คือวัสดุที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล ขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น

3) Class C ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ได้จากการกระบวนการทางความร้อน เช่นเดียวกับ Class F แต่มีข้อกำหนดคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านการรับกำลังอัด ความทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลงเนื่องมาจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวโดยองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่อยู่ในรูปไม่เป็นผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน คือ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [4]

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM 618-99 [2]

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)	**ชั้นของวัสดุปอซโซลาน**		
	N	**F**	**C**
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$(min.%)	70	70	50
SO_3(max.%)	4	5	5
MgO(max.%)	5	5	5
Na_2O(max.%)	1.5	1.5	1.5
Loss of Ignition (max.%)	10	12	6
Moisture Content (max.%)	3	3	3
Pozzolanic Index (min.%)	75	75	75
Water Requirement(max.%)	115	105	105

2.1.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H) , แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-A-H ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)

$$2(3CaO.2SiO_2)+6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

$$3CaO.Al_2O_3+6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3+6H_2O \quad (2.3)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$Ca(OH)_2+SiO_2+H_2O \longrightarrow x\,CaO.y\,SiO_2.z\,H_2O \quad (2.4)$$

$$Ca(OH)_2+Al_2O_3+H_2O \longrightarrow x\,CaO.y\,Al_2O_3.z\,H_2O \quad (2.5)$$

ค่า x,y และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง (C-S-H) และ (C-A-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้

คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม [5]

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของสารปอซโซลาน

สารปอซโซลาน เมื่อถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการทำคอนกรีตนั้น จะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งจะเป็นส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพอที่จะสรุปข้อดีและข้อเสียของสารปอซโซลานที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้ดังนี้

ข้อดี

1) เมื่อใช้ทำคอนกรีต ความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีต่างๆ ได้ดีกว่า

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเมื่อใช้ทำโครงสร้างใต้น้ำให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

3) การทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลาน และลดความร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีต ดังนั้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตหลา

4) ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง

ข้อเสีย

ผลกระทบในทางตรงข้ามเกี่ยวกับคุณภาพของคอนกรีตเกิดขึ้นเมื่อ ใช้สารปอซโซลานที่เสื่อมคุณภาพหรือใช้สารปอซโซลานในสัดส่วนที่มากเกินไป ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1) ลดอัตราการก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

2) การหดตัว (Drying Shrinkage) เพิ่มขึ้น

3) มีความต้องการน้ำมาก

4) มีความต้านทานต่อการแข็งตัวของน้ำในโพรงได้ต่ำ

2.1.4 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการเผาเส้นใยปาล์มผสมกับกะลาปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์มจะถูกเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน(ไมโครเมตร)จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งจะถูกดักจับด้วยแรงลม(Multi Cyclone) เพื่อไม่ให้ออกไปสู่ภายนอกกับอากาศร้อน

เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดนั้นมีความพรุนมากแต่เมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้นทำให้เถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนลดลงเป็นผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ลดลงด้วย[6]

2.1.4.1 องค์ประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าปาล์มน้ำมันได้แก่ SiO_2 Fe_2O_3 และ CaO ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้มีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนใหญ่แล้วผลรวมของออกไซด์หลักร้อยละโดยน้ำหนักอยู่ในปริมาณ 60-75 จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของงานวิจัยในอดีต [6, 7, 8] พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	จักพล กลั่นมั่นคง (2543)	สุรพันธ์ สันธปวีย์ (2545)	ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง (2547)
CaO	5.83	7.58	6.55
SiO_2	76.65	63.56	57.71
Al_2O_3	0.77	1.56	4.56
Fe_2O_3	2.26	1.42	3.30
LOI	11.06	9.62	10.52

2.1.4.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่า 3-3.15 จากการศึกษาของ จักพล กลั่นมั่งคงและคณะ [6] สุรพันธ์ สุคันธปวีย์ [7] และ ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง [8] พบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่2.3

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ความถ่วงจำเพาะ	จักพล กลั่นมั่นคง (2543)	สุรพันธ์ สันธปวีย์ (2545)	ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง (2547)
ปูนซีเมนต์	3.15	3.15	3.14
เถ้าปาล์มน้ำมัน	2.44	2.33	2.43

2.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์พอที่จะรวบรวมได้ดังนี้

จักพล กลั่นมั่นคง และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเถ้าก้นเตา (Bottom Ash)จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่ เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งใช้ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน 3 ตัวอย่าง คือ เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 28.4 โดยน้ำหนักและเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด จนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำโดยการร่อนเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนผ่านน้ำตามมาตรฐาน ASTM C430 และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด ผลการศึกษาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ถูกบดละเอียดมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ซึ่งพบว่าที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม โดยที่ค่ากำลังแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด อนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก จะมีค่าสูงกว่ากำลังแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 28.4 โดยน้ำหนัก

สุรพันธ์ สุคันธปปรีย์ [7] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) จากบริษัท ยูนิวานิชน้ำมันปาล์ม จำกัด ไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดจนค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0 ถึง 5 และร้อยละ 25 ถึง 30 จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ร้อยละ10 20 และ30 ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีกำลังรับแรงอัดไม่สูงมากนักเพราะมีอนุภาคขนาดที่ใหญ่ และมีรูพรุนสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนละเอียดจนค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 29.2 และ 4.3 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งแสดงว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

ธิรสิทธิ์ แซติ้ง [8] ได้ศึกษาถึงการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ขนาดหยาบ) และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปรับปรุงคุณภาพโดยบดให้มีความละเอียดจนค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 15 – 20 (ขนาดละเอียดปานกลาง)

และน้อยกว่าร้อยละ5 (ขนาดละเอียดมาก) โดยน้ำหนัก จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดทุกส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ควบคุม และการแทนที่มากขึ้นกำลังรับแรงอัดยิ่งมีค่าลดลง ส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดสูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยปาล์มน้ำมันก่อนบดมาก ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลางและขนาดละเอียดมาก ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 90 วัน สามารถทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1

Joo – Hwa Tay [9] ได้ศึกษาถึงการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต พบว่าที่อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน 90:10 โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังที่สูงใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

Hussin and Ausal [10] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน 70:30 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนจากซัลเฟตสูงกว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังให้กำลังอัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ

Basri และ คณะ [11] ได้ทำการศึกษากะลาของผลปาล์มน้ำมันมาบดเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) พบว่าคอนกรีตที่ใช้กะลาจากผลปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดมีค่ากำลังที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด แต่จะมีน้ำหนักที่เบากว่าซึ่งสามารถนำมาทำเป็นวัสดุปูพื้นหรือทำผนังห้อง

Okafor และคณะ [12] ได้นำเส้นใยจากผลปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีต โดยนำมาผสมในมอร์ตาร์ พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากผลปาล์มมีกำลังอัดและกำลังดึงน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเส้นใยแต่มอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากผลปาล์มน้ำมันมีกำลังดัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยถึงร้อยละ 33

Awal and Hussin [13] ได้ศึกษาคอนกรีตที่บ่มในน้ำทะเลโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน พบว่าเมื่อคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา 28 วัน จากนั้น บ่มในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 ปี พบว่าคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 โดยน้ำหนักจะมีการพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 61.90 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 60.75 เมกะปาสคาล และยังพบว่าคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่า

กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 7.50 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยมีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 6.90 เมกะปาสคาล

Ishida และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสาน โดยบ่มแท่งคอนในน้ำประปาเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่า แท่งคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 มีค่าการหดตัวเท่ากับ 521×10^{-6} โดยมีค่าน้อยกว่าแท่นคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งค่าการหดตัวเท่ากับ 488×10^{-6}

กฤษณ์ จารุทะวัย [15] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยของเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนรด์บางส่วนในการผสมมอร์ตาร์ พบว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C 18 และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงส่วนของความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าชานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้แก่ องค์ประกอบทางด้านเคมี ค่าความถ่วงจำเพาะ และเพื่อหาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ ได้แก่ การทดสอบหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนต่างๆ ดังมีรายละเอียดต่างๆในหัวข้อต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 โดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทที่ 1 และมาตรฐาน ASTM (150-71 Type I) [16]

3.1.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้ โดยนำมาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ได้แก่

- บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) (OP1)
- ห้างหุ้นส่วนจำกัดมิตรเจริญปาล์มออยล์ (OP2)
- บริษัททักษิณปาล์ม (2521) จำกัด (OP3)
- บริษัทวิจิตรภัณฑ์สวนปาล์ม จำกัด (OP4)

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จะถูกนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสในเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine (ดูรูปที่ 1 ในภาคผนวก ข.) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.771 เมตร มีความยาว 0.508 เมตร ภายในบรรจุลูกเหล็กเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร น้ำหนักลูกละ 390-445 กรัม จำนวน 12 ลูก ขับเคลื่อนถึงให้หมุนด้วยความเร็วรอบ 33 รอบต่อนาที ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันครั้งละ 10 กิโลกรัม ใช้เวลาบดประมาณ 8-10 ชั่วโมง จนมีความละเอียดค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

3.1.3 ทราย

ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำจากคลองท่าแซะ จังหวัดชุมพร โดยจะมีการใช้ใน 2 ลักษณะ ได้แก่

- การใช้ในส่วนผสมปกติ ทรายที่ใช้ในส่วนนี้ คือทรายส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 และ ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์30
- การใช้สำหรับศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดกับมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน ทรายที่ใช้ในส่วนนี้ คือทรายที่ถูกนำไปบดให้ละเอียด โดยมีขั้นตอนการบดเหมือนกับการบดเถ้าปาล์มน้ำมันจนมีความละเอียดเท่ากับเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.2 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนผสมของมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก มีการควบคุมปริมาณน้ำ ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ระหว่าง 0.59 ถึง 0.72 โดยให้มีค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ระหว่างร้อยละ 105 – 115 (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 4.2) ในการทดสอบนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะถูกแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในปริมาณร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ส่วนผสมของวัสดุต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. อัตราส่วนวัสดุประสาน ต่อทราย เท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก
2. ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) การผสมมอร์ตาร์จะมีการควบคุมค่าการไหลแผ่ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 105 – 115 ดังนั้นปริมาน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ที่ใช้ จึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.59 – 0.72 (ดูรายละเอียดในตารางที่ 4.2)
3. ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบด มอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัย มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบด ในปริมาณ ร้อยละ 0 10 20 30 40 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดของชุดตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบด

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	เถ้าปาล์มน้ำมันหรือทรายบด (ร้อยละ)
Control	100	0
OP1 – 01	90	10
OP1 – 01	80	20
OP1 – 03	70	30
OP1 – 04	60	40
OP1 – 05	50	50
OP2 – 01	90	10
OP2 – 02	80	20
OP2 – 03	70	30
OP2 – 04	60	40
OP2 – 05	50	50
OP3 – 01	90	10
OP3 – 02	80	20
OP3 – 03	70	30
OP3 – 04	60	40
OP3 – 05	50	50
OP4 – 01	90	10
OP4 – 02	80	20
OP4 – 03	70	30
OP4 – 04	60	40
OP4 - 05	50	50
SA – 01	90	10
SA – 02	80	20
SA – 03	70	30
SA – 04	60	40
SA – 05	50	50

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เป็นลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร[3] ทำการผสมมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM 305 – 95 [18] การทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ การหล่อ การบ่ม เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109/C109/M-99 [19] ก้อนตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุได้ 24 ชั่วโมง และบ่มในน้ำทันทีจนมีอายุครบ 3 7 14 28 และ 56 วัน จึงนำไปทดสอบ

3.4 การทดสอบตัวอย่าง

3.4.1 การทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

การหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer และวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Analysis การทดสอบความละเอียดใช้วิธีการหาค่าความละเอียดโดยร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.4.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 188-95 [17] การหาปริมาตรของเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะหาได้จากการแทนที่น้ำมันก๊าด (Kerosene) ในขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเอร์ (Standard Chaterliar Flask) ความถ่วงจำเพาะคำนวณได้จากการหารความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ด้วยความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ } (G_c) = \frac{W_c}{V_c \cdot \gamma_w} \qquad (3.1)$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบ (กรัม)

V_c = ปริมาตรของปูนซีเมนต์หรือเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 ℃ มีค่าเป็น 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.3 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

การทดสอบการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77-2517 [21] โดยทำการอบก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาไม่น้อยกว่า 48 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักมอร์ตาร์แห้ง (W_1) จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่อบแห้งมาแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกมอร์ตาร์ออกใช้ผ้าเปียกซับน้ำที่ผิว แล้วชั่งน้ำหนักให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักมอร์ตาร์ที่ดูดซึมน้ำ (W_2) โดยค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (Percent Absorption)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} x100 \qquad \text{.................. (3.2)}$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักของมอร์ตาร์ที่อบแห้ง (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ดูดซึมน้ำ (กรัม)

3.4.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ใช้ลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร^3 วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109/M-99 [19] ทำการทดสอบตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีจำนวน 390 ตัวอย่าง (ดูตารางที่ 3.1) โดยคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) จากสูตร

$$\text{กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต } (f_c') = \frac{P}{A} \qquad \text{..................(3.3)}$$

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กิโลกรัม)

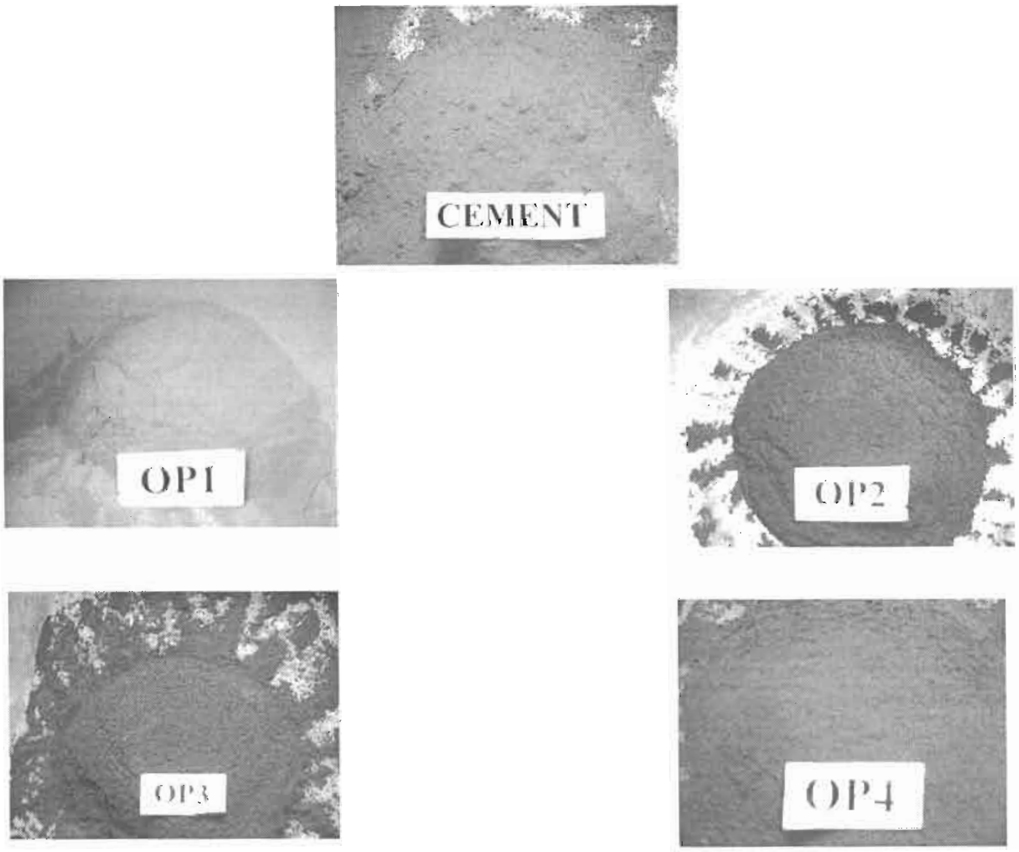
A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)

บทที่ 4 ผลของการวิจัย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

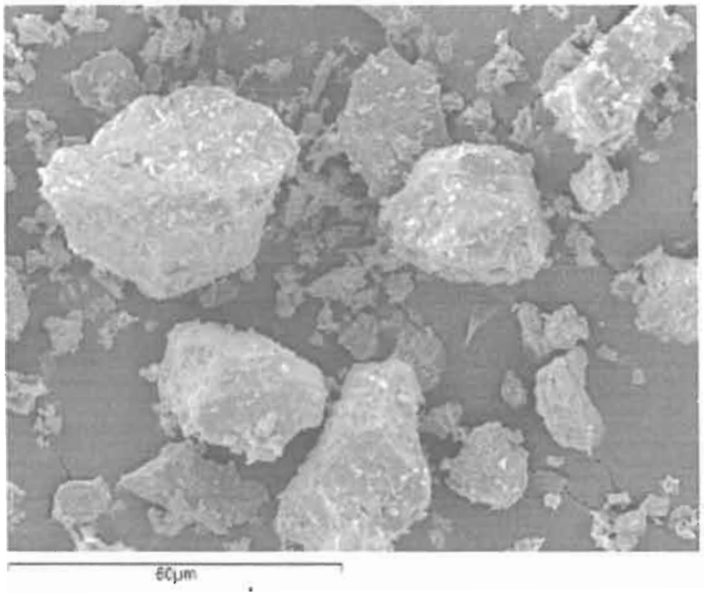
4.1.1 สีและรูปร่าง

รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสีของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดและค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 จากรูปจะเห็นได้ว่าสีของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีความแตกต่างกัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 จะมีสีเทา ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 OP3 OP4 จะมีสีดำสนิทเป็นผงละเอียดมีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง



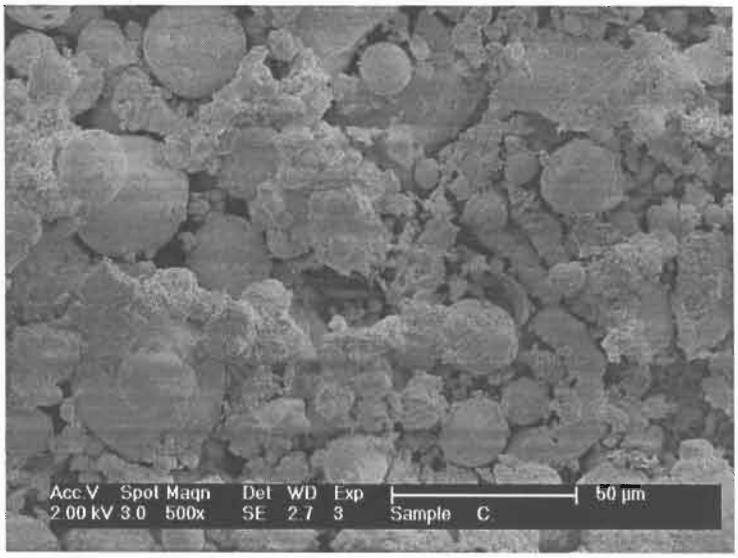
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ และรูปที่4.3 ถึงรูปที่4.6 แสดงลักษณะรูปร่างของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ถึง OP4 ตามลำดับ จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวมีความขรุขระรูปร่างไม่แน่นอน เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 และ OP2 มีผิวเรียบรูปร่างกลม มีความพรุนน้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 และ OP4 มีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวมีความขรุขระ และมีความพรุนสูง

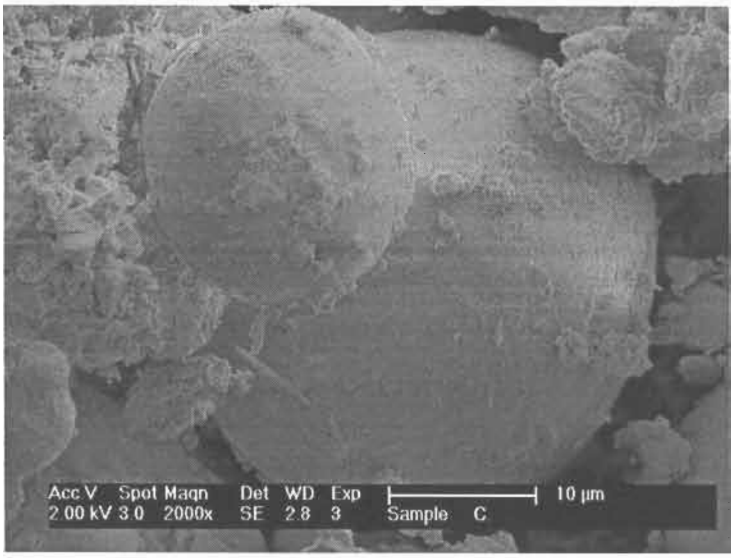


กำลังขยาย 1000 เท่า

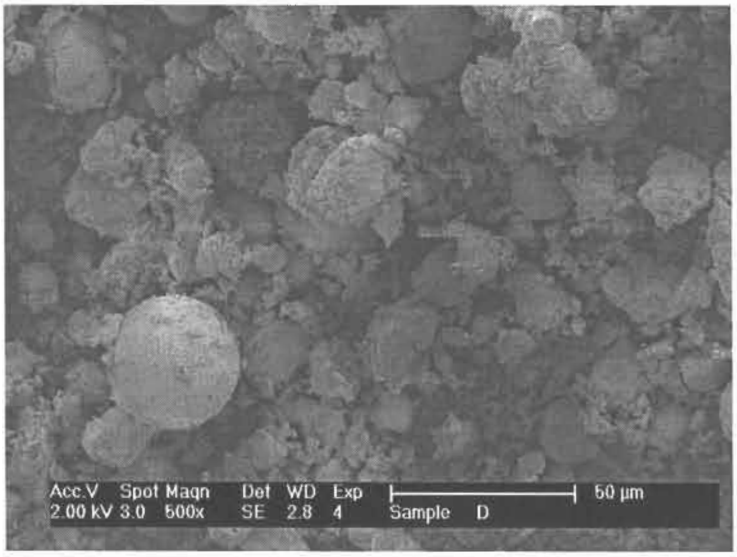
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



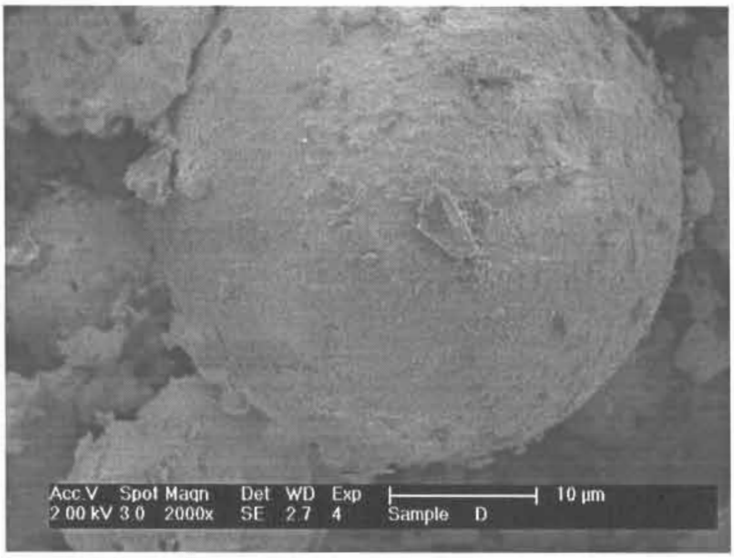
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1

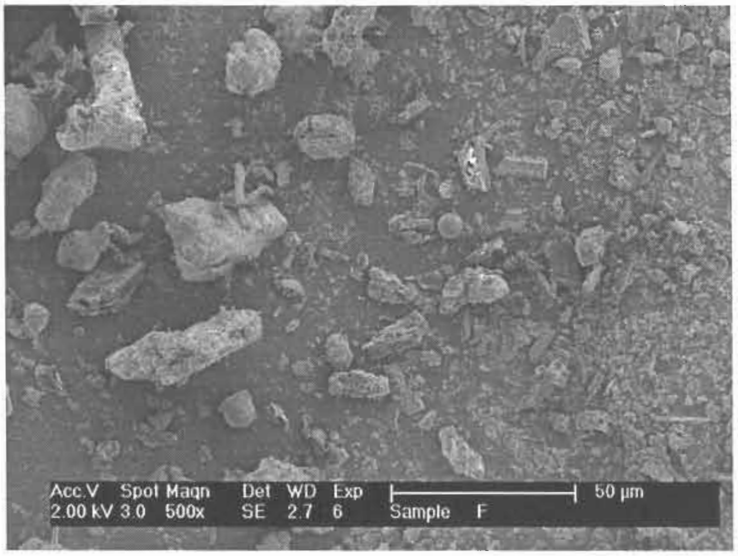


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

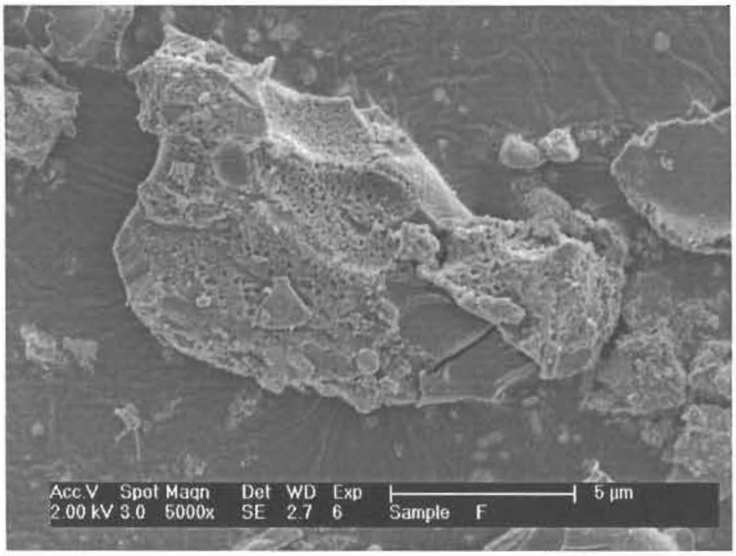


(ข) กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2

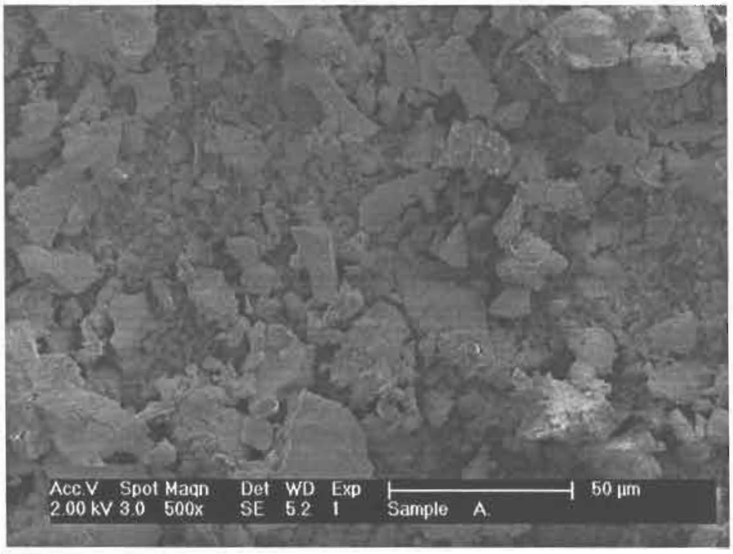


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

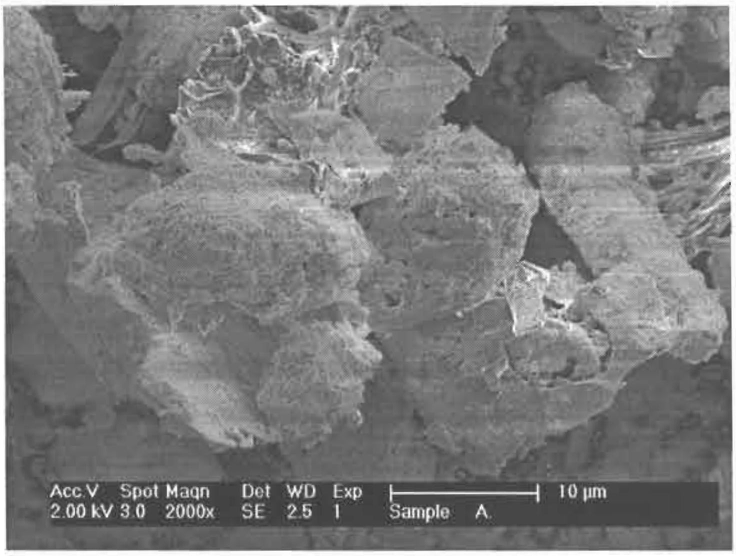


(ข) กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3



(ก) กำลังขยาย 500 เท่า



(ข) กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันทุกตัวที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากผลรวมองค์ประกอบทางเคมี

(SiO_2+Al_2O_3+Al_2O_3) ของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 โดยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 มีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีร้อยละ 60.41 เถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 มีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีร้อยละ 65.59 เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 มีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีร้อยละ 67.61 และเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 มีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีร้อยละ 60.28 ผลการศึกษาผลรวมองค์ประกอบทางเคมี ปรากฏว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 OP1 และOP4 มีค่าผลรวมองค์ประกอบทางเคมีต่ำที่สุด

4.1.3 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

ผลการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(Loss On Ignition) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM C 114 [20] พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง 6.37 – 10.10 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าองค์ประกอบทางเคมี ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(LOI) และค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าปาล์มน้ำมัน			
		OP1	**OP2**	**OP3**	**OP4**
CaO	70.05	14.27	12.69	11.08	11.57
SiO_2	15.48	36.95	40.26	59.01	56.24
Al_2O_3	2.54	19.61	20.73	1.156	1.19
Fe_2O_3	3.62	3.85	4.60	7.44	2.84
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	21.64	60.41	65.59	67.61	60.28
LOI	-	6.37	9.94	10.10	7.27
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.14	2.10	2.00	2.18

4.1.4 ค่าความถ่วงจำเพาะ

จากการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM C188-95 [17] พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3.15 ในขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง 2.00 – 2.18 ซึ่งต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์โดยการควบคุมให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 105 – 115 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากตารางจะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ทุกตัวมีความต้องการปริมาณน้ำในการผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 แทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 มีความต้องการปริมาณน้ำในการผสมต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน และเมื่อปริมาณการแทนที่มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไป ความต้องการปริมาณน้ำในการผสมของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 และมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วนจะมีค่าเท่ากัน

มอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ต้องการปริมาณน้ำในการผสมต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน (Control) เพราะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 มีลักษณะรูปร่างกลมและมีผิวเรียบ ซึ่งจะช่วยทำให้การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ดีขึ้น และลดปริมาณการใช้น้ำลง

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมโดยควบคุมให้มีค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ระหว่าง 105 – 115

ตัวอย่าง	อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน (C:OP)	อัตราส่วน W/(C+OP)			
		OP1	OP2	OP3	OP4
Control	100 : 0	0.63	0.63	0.63	0.63
OP - 01	90 : 10	0.60	0.69	0.68	0.59
OP - 02	80 : 20	0.61	0.69	0.68	0.62
OP - 03	70 : 30	0.62	0.7	0.7	0.655
OP - 04	60 : 40	0.62	0.71	0.71	0.66
OP - 05	50 : 50	0.63	0.72	0.71	0.66

4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร^3 ที่มีการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนผสมวัสดุประสาน (C+OP) ต่อทรายเท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) อยู่ระหว่าง 0.59 – 0.72 โดยน้ำหนัก ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 105

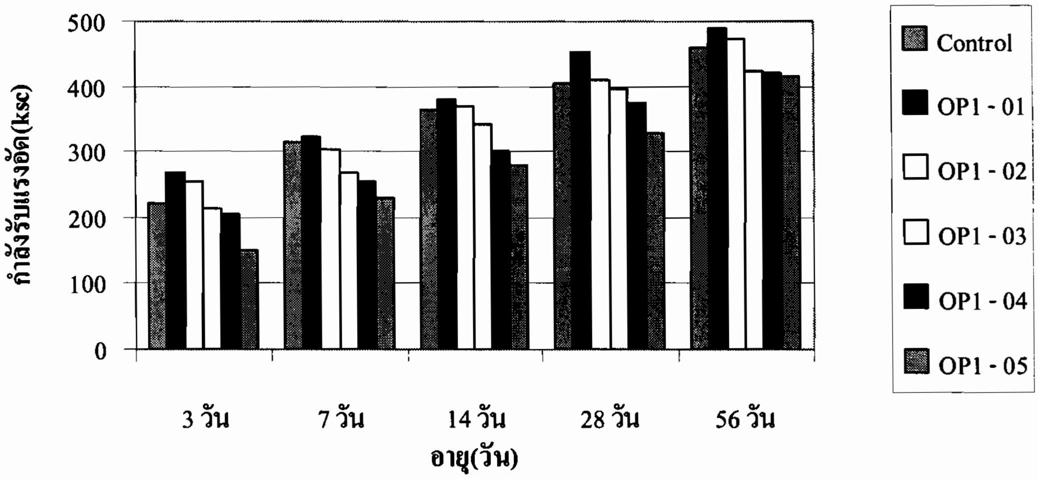
ถึง 115 โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 7 14 28 และ 56 วัน ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.3.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ20 มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วนทุกอายุการบ่ม โดยพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ในปริมาณร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน โดยที่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (C : OP)	อัตราส่วนผสม W/(C+OP)	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	100 : 0	0.63	222	313	365	404	459
OP1 - 01	90 : 10	0.60	268	322	379	454	488
OP1 - 02	80 : 20	0.61	255	304	370	410	474
OP1 - 03	70 : 30	0.62	212	269	342	396	423
OP1 - 04	60 : 40	0.63	205	255	301	374	420
OP1 - 05	50 : 50	0.63	151	230	280	327	415



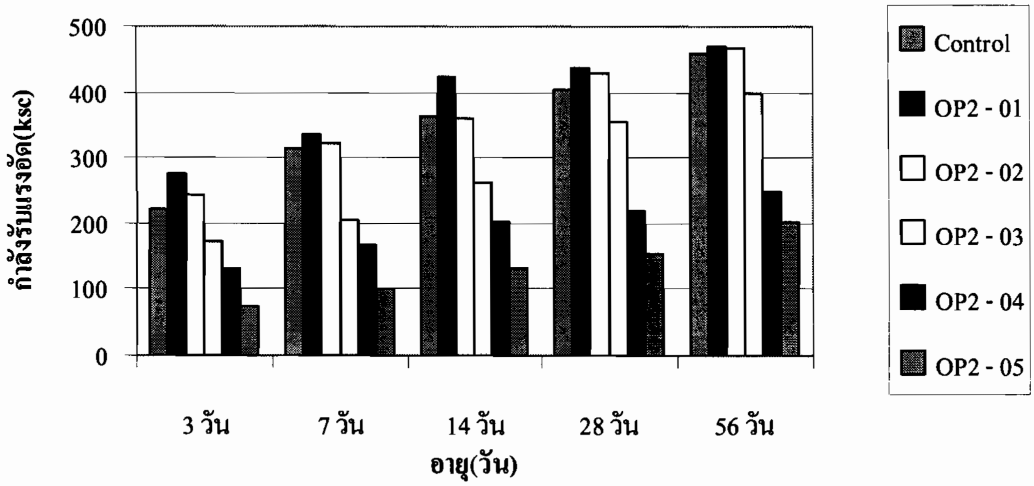
รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วนทุกอายุการบ่ม โดยพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 ในปริมาณร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน โดยที่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (C : OP)	อัตราส่วนผสม W/(C+OP)	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	100 : 0	0.63	222	313	365	404	459
OP2 - 01	90 : 10	0.69	275	336	423	436	470
OP2 - 02	80 : 20	0.69	242	323	362	430	466
OP2 - 03	70 : 30	0.70	173	205	261	355	399
OP2 - 04	60 : 40	0.71	130	166	201	219	249
OP2 - 05	50 : 50	0.72	75	100	130	154	202



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

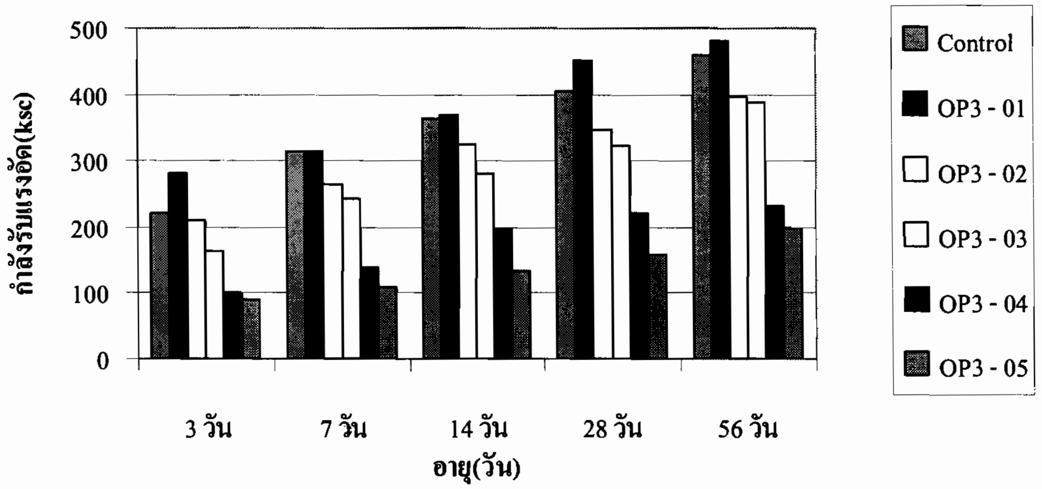
4.3.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3

ตารางที่4.5 และรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 10 มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วนทุกอายุการบ่ม โดยพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 ในปริมาณร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 10 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ล้วน โดยที่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะ 14 วันแรกจะมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน และที่อายุการบ่มที่ 28 และ 56 วัน การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 ในปริมาณร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลังที่ดีกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน

ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (C : OP)	อัตราส่วนผสม W/(C+OP)	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	100 : 0	0.63	222	313	365	404	459
OP3 - 01	90 : 10	0.68	282	315	368	450	481
OP3 - 02	80 : 20	0.68	210	264	326	346	397
OP3 - 03	70 : 30	0.70	163	244	282	322	388
OP3 - 04	60 : 40	0.71	100	140	200	220	233
OP3 - 05	50 : 50	0.71	91	110	133	159	200



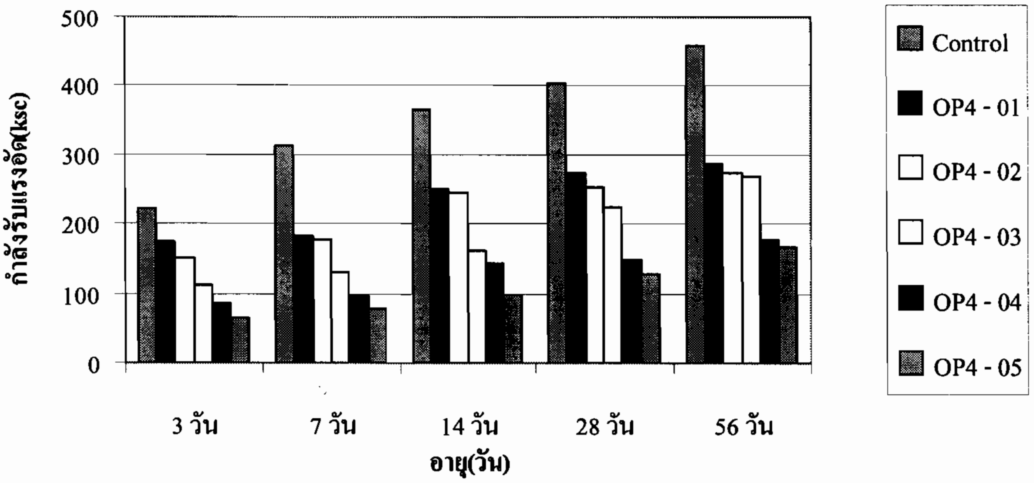
รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดและอายุการบ่ม ของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 จะเห็นได้ว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 ในทุกอัตราส่วนการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังรับแรงอัดอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์แลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (C : OP)	อัตราส่วนผสม W/(C+OP)	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	100 : 0	0.63	222	313	365	404	459
OP4 - 01	90 : 10	0.57	174	182	249	274	286
OP4 - 02	80 : 20	0.62	151	176	244	253	273
OP4 - 03	70 : 30	0.655	111	129	162	225	267.
OP4 - 04	60 : 40	0.66	85	97	142	148	178
OP4 - 05	50 : 50	0.66	65	79	100	127	167



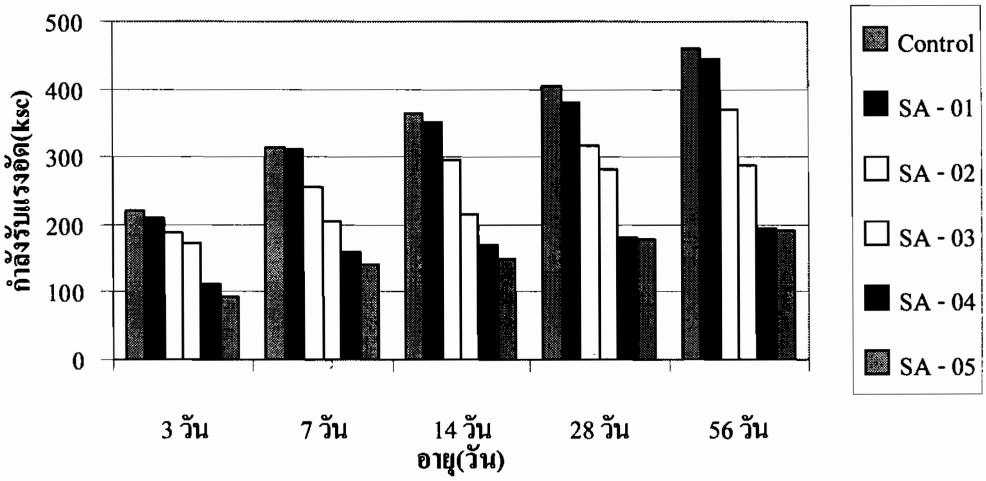
รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.5 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยทรายบด (SA)

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดและอายุการบ่ม ของมอร์ตาร์ปอร์แลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยทรายบด จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้ทรายบด(SA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าลดลง เมื่อปริมาณทรายบด(SA)เพิ่มมากขึ้น การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยทรายบดมีลักษณะคล้ายกันกับมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วนโดยมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุ

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยทรายบด (SA)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ : ทรายบด (C:SA)	อัตราส่วนผสม W/(C+SA)	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	100 : 0	0.63	222	313	365	404	459
SA - 01	90 : 10	0.64	210	311	352	381	445
SA - 02	80 : 20	0.68	190	256	295	317	370
SA - 03	70 : 30	0.68	172	204	216	281	288
SA - 04	60 : 40	0.69	111	160	169	182	193
SA - 05	50 : 50	0.70	92	141	149	177	191



รูปที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้ทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.8 ถึง 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ข้อมูลจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุต่างๆ ของมอร์ตาร์ และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุของมอร์ตาร์ที่ปริมาณต่างๆ ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปาล์มน้ำมันและทรายบด พบว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันอื่นๆ โดยมีมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 OP3 ทรายบด (SA) และเถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 มีกำลังรับแรงอัดรองลงไปตามลำดับ การที่มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน OP4 มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีทรายบด (SA) ที่ทุกปริมาณการใช้ แสดงว่าการใส่เถ้าลอยปาล์มน้ำมัน OP4 ซึ่งเป็นเถ้าที่มีการผสมกันของเถ้าปาล์มน้ำมันลอยและเถ้าปาล์มน้ำมันก้นเตา มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าเถ้าอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากวิธีการเก็บตัวอย่างที่มีสิ่งสกปรกปะปนมา ทำให้กำลังของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน OP4 มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายบด

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 10

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	222	313	365	404	459
SA - 01	210	311	352	381	445
OP1 - 01	268	322	379	454	488
OP2 - 01	275	336	423	436	470
OP3 - 01	282	315	368	450	481
OP4 - 01	174	182	249	274	286

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 20

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	222	313	365	404	459
SA - 02	190	256	295	317	370
OP1 - 02	255	304	370	410	474
OP2 - 02	242	323	361	430	466
OP3 - 02	210	264	326	346	397
OP4 - 02	151	176	244	253	273

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 30

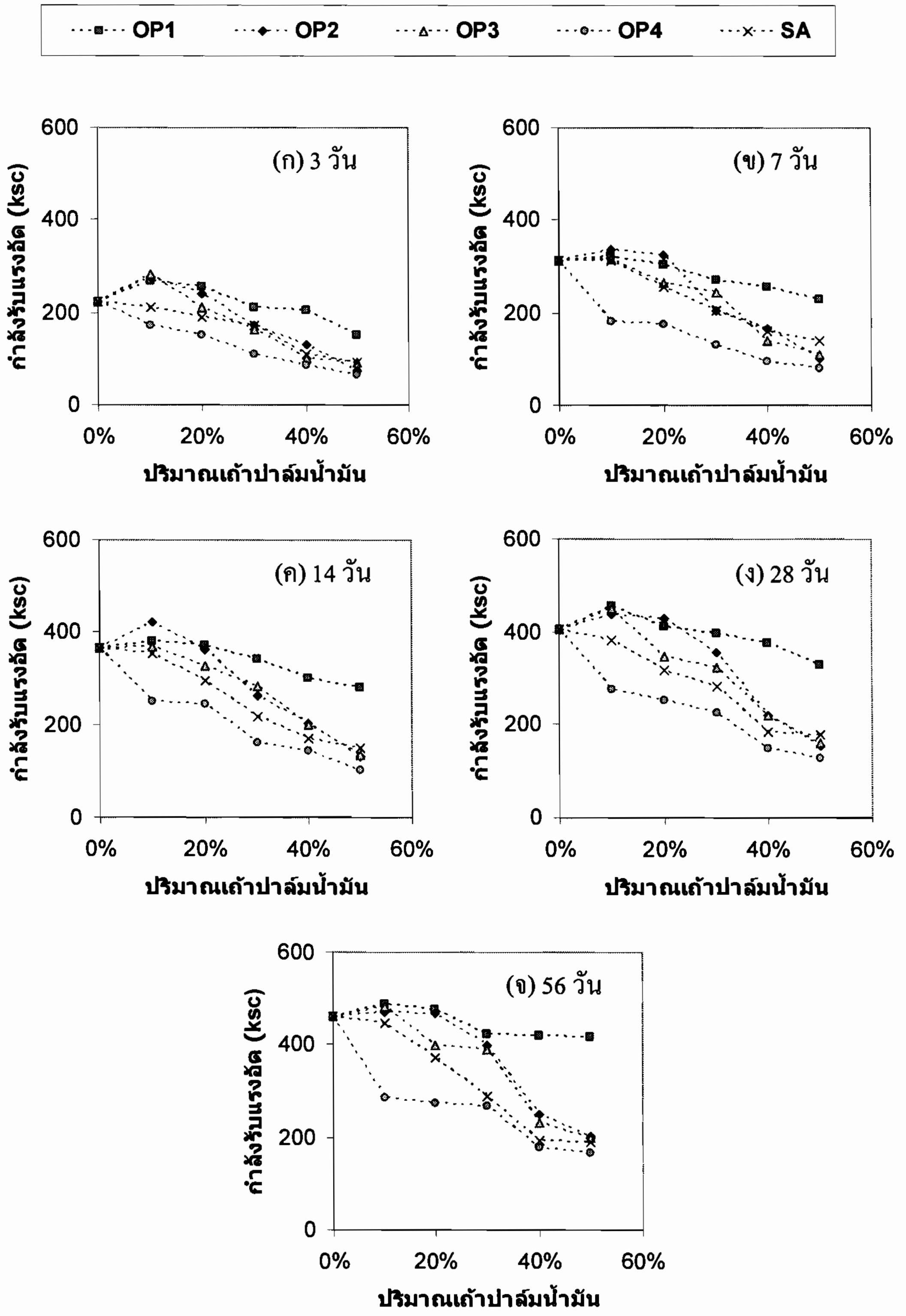
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	222	313	365	404	459
SA - 03	172	204	216	281	288
OP1 - 03	212	269	342	396	423
OP2 - 03	173	205	261	355	399
OP3 - 03	163	244	282	322	388
OP4 - 03	111	129	162	225	267

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 40

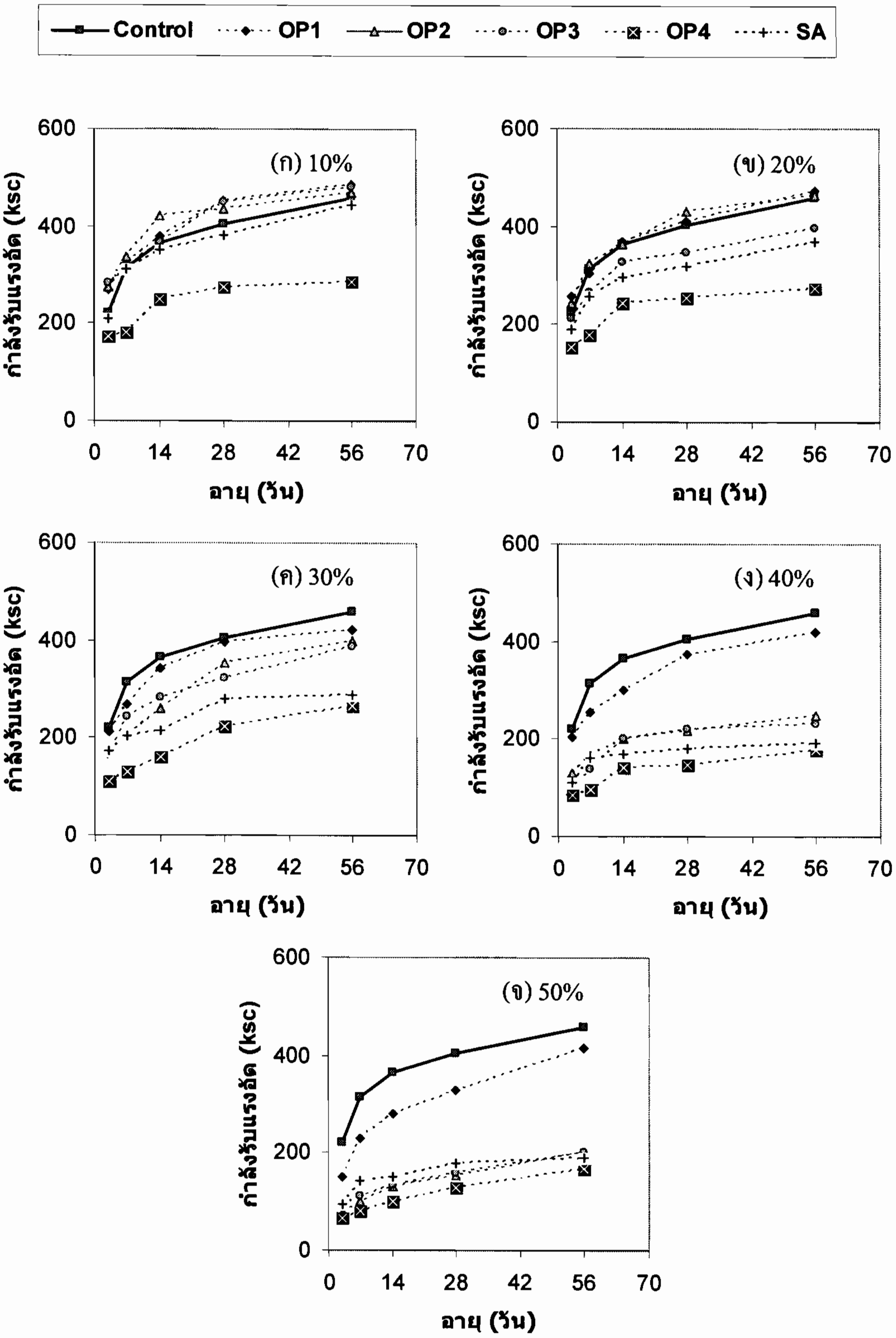
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	222	313	365	404	459
SA - 04	111	160	169	183	193
OP1 - 04	205	255	301	374	420
OP2 - 04	130	166	201	219	249
OP3 - 04	100	140	200	220	233
OP4 - 04	85	97	142	149	178

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 50

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด(กก./ซม^2)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	222	313	365	404	459
SA - 05	92	141	149	177	190
OP1 - 05	151	230	280	327	415
OP2 - 05	75	100	130	154	202
OP3 - 05	91	110	133	159	200
OP4 - 05	65	79	100	127	167



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุต่างๆ ของมอร์ตาร์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุของมอร์ตาร์ที่ปริมาณต่างๆของเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.4 การทดสอบความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 4.13 ถึง 4.14 และรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 แสดงค่าความหนาแน่นเปียก ค่าความหนาแน่นแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเปียกและแห้งของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ จะมีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ควบคุม โดยค่าความหนาแน่นเปียกของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าระหว่าง 1.90 ถึง 2.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นแห้งของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าระหว่าง 1.80 ถึง 2.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจะมีค่าความหนาแน่นลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่แทนที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ชนิดของเถ้าปาล์มน้ำมันไม่มีผลทำให้มีความแตกต่างของความหนาแน่นมากนัก

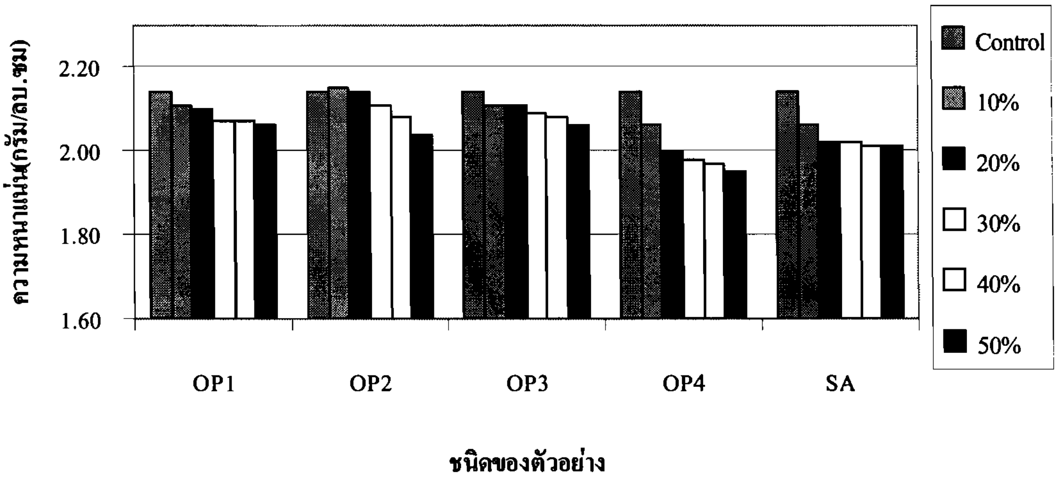
ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ควบคุม โดยมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 9 และค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด และมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด ซึ่งสัมพันธ์กับรูปร่างและลักษณะของอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 และ OP1 ที่มีรูพรุนมากและน้อยตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ

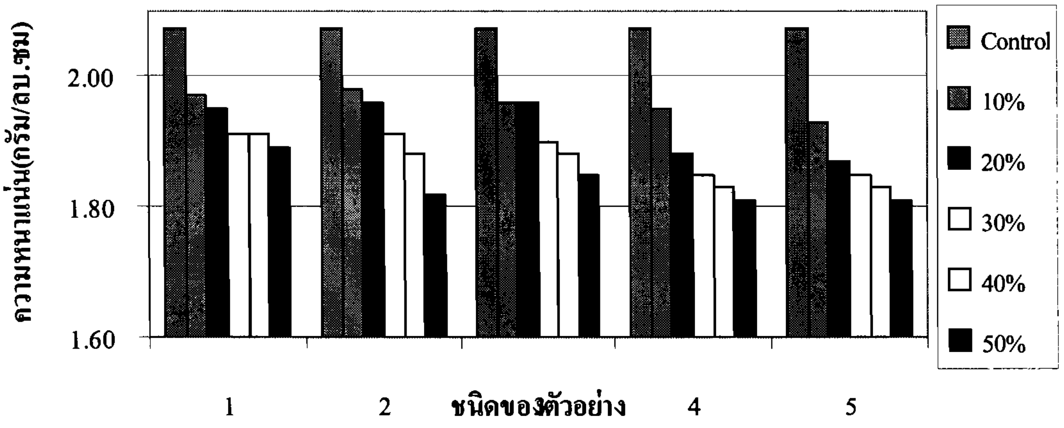
ตัวอย่าง	ค่าความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าการดูดซึมน้ำ %
Control	2.142	2.073	3.35
OP1-01	2.104	2.035	3.43
OP1-02	2.101	2.024	3.81
OP1-03	2.074	1.993	4.07
OP1-04	2.054	1.965	4.54
OP1-05	2.024	1.924	5.20
OP2-01	2.112	2.025	4.28
OP2-02	2.096	1.995	5.03
OP2-03	2.069	1.962	5.46
OP2-04	2.062	1.945	6.03
OP2-05	2.057	1.932	6.50

ตารางที่ 4.14 ค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ

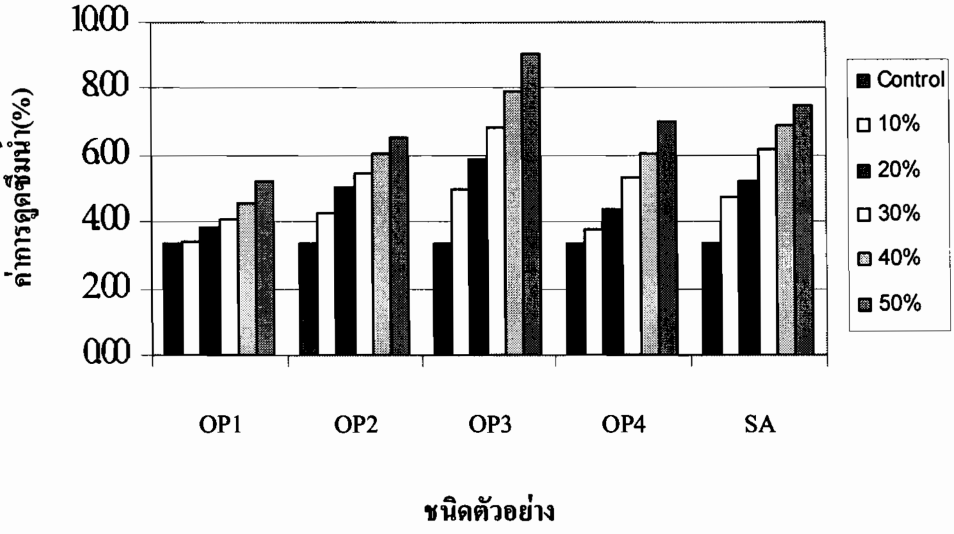
ตัวอย่าง	ค่าความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าการดูดซึมน้ำ %
OP3-01	2.132	2.031	4.95
OP3-02	2.122	2.004	5.88
OP3-03	2.104	1.969	6.82
OP3-04	2.089	1.936	7.90
OP3-05	1.973	1.810	9.03
OP4-01	2.123	2.046	3.80
OP4-02	2.079	1.992	4.37
OP4-03	2.026	1.924	5.35
OP4-04	2.009	1.894	6.05
OP4-05	1.964	1.836	6.98
SA-01	2.103	2.008	4.73
SA-02	2.057	1.955	5.21
SA-03	2.048	1.929	6.19
SA-04	2.035	1.904	6.89
SA-05	2.019	1.879	7.47



รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นเปียกของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นแห้งของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 และ OP2 มีรูปร่างกลมและผิวมีความพรุนน้อย ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 และ OP4 มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน น้ำหนักเบา มีความพรุนสูง

2. เถ้าปาล์มน้ำมันทุกตัวเป็นวัสดุปอซโซลานนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และเฟอริคออกไซด์อยู่รวมกันเกินร้อยละ 50

3. เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยที่มีการควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 105 – 115 พบว่ามีความต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน เนื่องจากมีอนุภาคกลมและผิวเรียบทำให้มอร์ตาร์มีการไหลแผ่ดีขึ้น จึงต้องการน้ำในการผสมน้อยลง ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันอื่นๆ ต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน โดยที่ความต้องการปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน

4. มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มาของเถ้าปาล์มน้ำมันและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าลอยสามารถนำไปใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนได้ โดยที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 และ OP2 สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 20 เถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 10 โดยที่มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP4 ซึ่งเป็นเถ้าผสมระหว่างเถ้าลอยกับเถ้าก้นเตา ไม่สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ ปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงสุด รองลงมาคือ เถ้าปาล์มน้ำมัน OP2 OP3 และ OP4 ตามลำดับ

5. ความหนาแน่นเปียกและค่าความหนาแน่นแห้งของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาร์ควบคุมและขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นเปียกและค่าความหนาแน่นแห้งลดต่ำลง ในขณะที่ชนิดของเถ้าปาล์มน้ำมันไม่มีผลทำให้มีความแตกต่างของความหนาแน่นมากนัก

6. การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าของมอร์ตาร์ควบคุมและขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน กล่าวคือ การแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด และมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน OP1 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด ซึ่งสัมพันธ์กับรูปร่างและลักษณะของอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP3 และ OP1 ที่มีรูพรุนมากและน้อยตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เถ้าปาล์มน้ำมันในภาคใต้มีอยู่หลายแหล่งตามที่ตั้งของโรงงาน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติจะแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา ดังนั้นควรศึกษาแหล่งต่างๆเพิ่มเติม

2. เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงจะช่วยเพิ่มกำลังมอร์ตาร์ได้ดี การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ จะต้องศึกษาเรื่องต้นทุนที่ต้องใช้ในการบดให้เถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดสูงขึ้นว่ามีความคุ้มค่าในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้งานจริง

3. ศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นๆเพิ่มเติม เช่น กำลังรับแรงดึง การหดตัวเมื่อแห้ง การขยายตัว การต้านทานกรดซัลฟูริค

4. ศึกษาเรื่องคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันและมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่เก็บจากโรงงานเดียวกัน ในช่วงเวลาต่างๆของแต่ละปี เพื่อศึกษาความแปรปรวนของคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันและมอร์ตาร์

เอกสารอ้างอิง

1. Hussin , M.w. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Palm Oil Fuel Ash-A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction," **Proceeding of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century**, 20-23 November 1996, Bangkok, Thailand, pp. D361-D36.

2. American Society for Testing and Material, 1999, ASTM C 618 – 99 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in concrete, **In Annual Book of ASTM Standard**, Vol. 4.02, pp. 1034-1037.

3. Lea, F.M., 1970, The Chemistry of Cement and Concrete, **Eduard Arnold Publishers**, pp.361, 414-423.

4. Davis, R.E., 1950, "Use of Pozzolans in Concrete", **Journal of The Edward Arnold Publishers**, pp.361, 414-423.

5. Hansen , T.C., 1990, "Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20 , pp.193-196.

6. จักผล กลั่นมั่นคง และ คณะ, 2543, "**การศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน**", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-33.

7. สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, 2545, "**การศึกษาคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ – เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม**", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 35.

8. ธิรสิทธิ์ แซ่ตั้ง, 2547, "**การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน**", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 29.

9. Joo-Hwa Tay, 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material", **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol.2, May, pp. 94-105.

10. Hussin , M.W. and Awal, A.S.M.A., 1998, "Influence of Palm Oil Fuel Ash on sulfate Resistance of Mortar and Concrete", **Proceeding of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash , Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete,** May, Bangkok, Thailand, pp. 417-429.

11. Basri, H.B., Mannan, M.A. and Zain, M.F.M., 1999, " Concrete using Waste Oil Palm Shells as Aggregate", **Cement and Concrete Research**, Vol.29, No.7, pp. 619-622.

12. Okafor, F.O, Eze-Uzomaka, O.J. and Egbuniwe, N., 1996, "The Structure Properties and Optimum Mix Proportions of Palmnut Fibre – Reinforced Mortar Composite, **"Cement and Concrete Research"**, Vol.26, No. 7, pp. 1045-1055.

13. Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W, 1999, "Concrete in Marine Environment : Influence of Palm Oil Fuel Ash on Strength and Durability, **"Proceeding of the Sixth Cycle ; Civil and Environmental Engineering Conference New Frontiers and Challenges**, Vol. 3 (part I), 8-12 November, Bangkok, Thailand, pp. (III -49) – (III-55).

14. Ishida , T., Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1999, "A Study on Shinkage of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash", **Proceeding of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & a Construction**, Vol. 2, 27-29 August 1999, Kochi, Japan, pp.1378-1383.

15. กฤษณ์ จารุทะวัย, 2545, **"การใช้เถ้าลอยเส้นปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน"** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 49.

16. American Society for testing and Material, 2001, "ASTM C150-00 : Standard Specification for Portland Cement"; **In Annual Book of ASTM Standards,** Vol. 04.01, pp.149-155.

17. American Society for Testing and Material, 2001, " ASTM C 188-95 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standard**, Vol. 4.02, pp.179-180.

18. American Society for Testing and Material, 2001, " ASTM C 305-99 : Standard Practice for Mechonic Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of plastic Consistency", **In Annual Book of ASTM Standard**, Vol. 04.01, pp. 220-222.

19. American Society for Testing and Material, 2001, "ASTM C109/C109M-99 : Standard Test Method for Compressive Strength for Hydraulic Cement Mortars", **In Annual Book of ASTM Standard**, Vol. 04.01, pp.83-88.

20. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C114-97 : Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphai, Vol. 04.01, pp.94-121.

21. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2517, **มอก. 77-2517 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ**, หน้า 1-15.

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ ก.1 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

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

ตารางที่ ก.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ควบคุม(Control)

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : Control	**วันที่หล่อตัวอย่าง** : 8 Oct 07
W/C = 0.63	Flow = 105

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย กิโลนิวตัน	แรงอัดประลัย กิโลกรัม	หน่วยแรงอัด กิโลกรัม/ตร.ซม.	หน่วยแรงอัด เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	24.68	260	53	5361.88	217	221.65
	2	25.10	277	57	5840.98	233	
	3	24.80	260	52	5331.29	215	
7	1	25.25	268	81	8226.30	326	313.02
	2	25.15	265	75	7645.26	304	
	3	25.05	264	76	7747.20	309	
14	1	25.15	266	88	8929.66	355	364.56
	2	25.15	266	93	9449.54	376	
	3	25.00	265	89	9072.38	363	
28	1	25.15	259	99	10061.16	400	404.10
	2	25.15	263	101	10295.62	409	
	3	25.10	265	99	10112.13	403	
56	1	25.15	270	112	11416.92	454	459.05
	2	25.20	270	113	11518.86	457	
	3	25.15	270	115	11722.73	466	

ตารางที่ ก.3 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1 – 01

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP1 - 01	วันที่หล่อตัวอย่าง : 10 Oct 07
W/C = 0.60	Flow = 107.25

อายุ	ตัวอย่าง	พ.ท.หน้าตัด	น้ำหนัก	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
(วัน)	ที่	(ตร.ซม.)	(กรัม)	กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.15	267.13	66.90	6819.57	271	268.08
	2	25.10	263.82	63.40	6462.79	257	
	3	25.15	266.51	68.00	6931.70	276	
7	1	25.30	267.15	79.50	8103.98	320	321.67
	2	25.15	265.22	79.80	8134.56	323	
	3	25.10	263.54	79.10	8063.20	321	
14	1	25.15	265.15	93.20	9500.51	378	378.95
	2	25.10	267.21	93.60	9541.28	380	
	3	25.15	267.23	93.50	9531.09	379	
28	1	25.00	275.12	112.40	11457.70	458	454.33
	2	25.60	285.35	114.80	11702.34	457	
	3	26.01	291.66	114.20	11641.18	448	
56	1	25.10	272.40	119.20	12150.87	484	487.74
	2	25.20	273.10	122.50	12487.26	496	
	3	25.00	272.20	118.60	12089.70	484	

ตารางที่ ก.4 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1 – 02

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP1 - 02	วันที่หล่อตัวอย่าง : 12 Oct 07
W/C = 0.61	Flow = 107.5

อายุ	ตัวอย่าง	พ.ท.หน้าตัด	น้ำหนัก	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
(วัน)	ที่	(ตร.ซม.)	(กรัม)	กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.20	271	63	6422.02	255	255.01
	2	25.15	263	61	6218.14	247	
	3	25.20	275	65	6625.89	263	
7	1	25.00	260	78	7900.10	316	304.09
	2	25.25	270	72	7339.45	291	
	3	25.15	270	75	7686.03	306	
14	1	25.85	260	91	9317.02	360	370.06
	2	25.50	260	93	9480.12	372	
	3	25.35	270	94	9582.06	378	
28	1	25.25	279	100	10224.26	405	410.40
	2	25.20	278	102	10428.13	414	
	3	26.00	272	105	10723.75	412	
56	1	25.75	270	117	11967.38	465	473.60
	2	24.84	260	119	12120.29	488	
	3	25.50	270.00	117	11936.80	468	

ตารางที่ ก.5 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1 – 03

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP1 - 03	วันที่หล่อตัวอย่าง : 14 Oct 07
W/C = 0.62	Flow = 112.5

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	261	54	5535.17	221	211.64
	2	25.30	259	49	5025.48	199	
	3	25.00	277	53	5372.07	215	
7	1	25.15	263	68	6941.90	276	269.24
	2	25.25	261	66	6676.86	264	
	3	25.25	275	66	6748.22	267	
14	1	25.10	277	83	8491.34	338	342.26
	2	25.00	266	87	8878.70	355	
	3	25.20	263	82	8399.59	333	
28	1	25.00	265	98	10000.00	400	395.66
	2	25.00	261	95	9694.19	388	
	3	25.10	266	98	10020.39	399	
56	1	25.10	264	104	10601.43	422	423.47
	2	25.00	259	104	10581.04	423	
	3	24.50	260	102	10407.75	425	

ตารางที่ ก.6 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1 – 04

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP1 - 04	วันที่หล่อตัวอย่าง : 17 Oct 07
W/C = 0.63	Flow = 111.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.15	266	51	5198.78	207	205.21
	2	25.10	263	49	4994.90	199	
	3	25.25	266	52	5300.71	210	
7	1	26.42	274	65	6625.89	251	255.01
	2	25.15	280	63	6422.02	255	
	3	25.20	280	64	6523.96	259	
14	1	25.20	271	75	7645.26	303	300.73
	2	26.42	273	78	7951.07	301	
	3	26.01	270	76	7747.20	298	
28	1	25.50	268	93	9500.51	373	373.99
	2	25.40	268	94	9541.28	376	
	3	25.50	267	94	9531.09	374	
56	1	25.00	270	102	10397.55	416	419.98
	2	25.00	270	103	10499.49	420	
	3	25.00	268	104	10601.43	424	

ตารางที่ ก.7 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP1 – 05

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP1 - 05	วันที่หล่อตัวอย่าง : 20 Oct 07
W/C = 0.63	Flow = 108.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	274	38	3873.60	154	150.46
	2	25.00	273	36	3628.95	145	
	3	25.10	269	37	3812.44	152	
7	1	25.20	272	58	5912.33	235	229.82
	2	25.10	269	56	5708.46	227	
	3	25.10	268	56	5708.46	227	
14	1	25.00	269	68	6880.73	275	280.12
	2	25.00	276	68	6952.09	278	
	3	25.00	272	70	7176.35	287	
28	1	25.40	257	79	8073.39	318	327.46
	2	25.00	257	82	8338.43	334	
	3	25.10	260	82	8307.85	331	
56	1	25.25	256	102	10438.33	413	415.04
	2	25.10	257	104	10570.85	421	
	3	25.20	256	102	10346.59	411	

ตารางที่ ก.8 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2 – 01

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP2 - 01	วันที่หล่อตัวอย่าง : 9 Oct 07
W/C = 0.69	Flow = 106.75

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	268	66.00	6727.83	269	275.07
	2	25.20	284	69.00	7033.64	279	
	3	25.10	276	68.20	6952.09	277	
7	1	25.10	275	82.40	8399.59	335	335.81
	2	25.00	277	81.60	8318.04	333	
	3	25.30	271	84.40	8603.47	340	
14	1	25.60	286	106.80	10886.85	425	423.28
	2	25.20	288	103.80	10581.04	420	
	3	25.25	284	105.20	10723.75	425	
28	1	26.00	288	109.00	11111.11	427	435.88
	2	25.20	283	110.20	11233.44	446	
	3	25.50	286	108.70	11080.53	435	
56	1	25.85	287	118.00	12028.54	465	469.59
	2	25.00	280	118.60	12089.70	484	
	3	26.60	290	120.00	12232.42	460	

ตารางที่ ก.9 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2 – 02

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP2 - 02	วันที่หล่อตัวอย่าง : 12 Oct 07
W/C = 0.69	Flow = 105

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	276	58.60	5973.50	239	242.20
	2	25.00	279	60.10	6126.40	245	
	3	25.00	274	59.50	6065.24	243	
7	1	25.10	284	80.30	8185.52	326	323.29
	2	25.10	273	79.80	8134.56	324	
	3	25.00	283	78.40	7991.85	320	
14	1	25.35	279	92.30	9408.77	371	361.50
	2	25.20	274	88.60	9031.60	358	
	3	25.10	274	87.40	8909.28	355	
28	1	24.40	272	104	10601.43	434	429.87
	2	25.30	278	105	10723.75	424	
	3	26.00	272	110	11213.05	431	
56	1	25.60	275	115	11722.73	458	465.63
	2	25.00	287	117	11926.61	477	
	3	25.60	278	116	11824.67	462	

ตารางที่ ก.10 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2 – 03

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP2 - 03	วันที่หล่อตัวอย่าง : 15 Oct 07
W/C = 0.70	Flow = 111.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง ที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	283	44.70	4556.57	182	172.71
	2	25.00	281	40.40	4118.25	165	
	3	25.15	282	42.40	4322.12	172	
7	1	25.20	269	53.30	5433.23	216	205.48
	2	25.10	268	49.80	5076.45	202	
	3	25.10	268	48.90	4984.71	199	
14	1	25.00	274	63.50	6472.99	259	260.74
	2	25.10	272	65.30	6656.47	265	
	3	25.00	269	63.30	6452.60	258	
28	1	25.00	265	87.50	8919.47	357	354.72
	2	25.15	280	86.40	8807.34	350	
	3	25.20	282	88.30	9001.02	357	
56	1	25.20	280	99.10	10101.94	401	398.80
	2	25.00	270	97.00	9887.87	396	
	3	25.00	270	98.10	10000.00	400	

ตารางที่ ก.11 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2 – 04

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP2 - 04	วันที่หล่อตัวอย่าง : 17 Oct 07
W/C = 0.71	Flow = 112

อายุ	ตัวอย่าง	พ.ท.หน้าตัด	น้ำหนัก	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
(วัน)	ที่	(ตร.ซม.)	(กรัม)	กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	274	31.60	3221.20	129	129.71
	2	25.00	271	30.70	3129.46	125	
	3	25.20	276	33.40	3404.69	135	
7	1	25.00	264	38.60	3934.76	157	165.68
	2	25.10	264	41.60	4240.57	169	
	3	25.20	268	42.20	4301.73	171	
14	1	25.20	264	48.90	4984.71	198	200.66
	2	25.60	275	50.60	5158.00	201	
	3	25.80	273	51.30	5229.36	203	
28	1	25.35	272	54.20	5524.97	218	219.31
	2	25.20	269	53.60	5463.81	217	
	3	25.35	268	55.50	5657.49	223	
56	1	25.15	270	62.50	6371.05	253	248.92
	2	25.00	270	60.60	6177.37	247	
	3	25.20	270	60.90	6207.95	246	

ตารางที่ ก.12 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP2 – 05

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์			
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 01		วันที่หล่อตัวอย่าง :	10 Oct 07
W/C = 0.68		Flow =	105

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.25	289	69.6	7094.80	281	282.04
	2	25.00	276	67.7	6901.12	276	
	3	25.60	296	72.6	7400.61	289	
7	1	25.00	274	76.4	7787.97	312	314.73
	2	25.20	280	79.1	8063.20	320	
	3	25.10	283	77.0	7849.13	313	
14	1	25.05	286	91.4	9317.02	372	367.54
	2	25.00	285	89.5	9123.34	365	
	3	25.00	283	89.7	9143.73	366	
28	1	25.00	269	110.6	11274.21	451	449.52
	2	25.00	267	108.3	11039.76	442	
	3	25.35	264	113.4	11559.63	456	
56	1	25.00	274	117.8	12008.15	480	480.74
	2	25.20	275	118.2	12048.93	478	
	3	25.35	274	120.3	12263.00	484	

ตารางที่ ก.13 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3 – 01

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 01	วันที่หล่อตัวอย่าง : 10 Oct 07
W/C = 0.68	Flow = 105

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.25	289	69.6	7094.80	281	282.04
	2	25.00	276	67.7	6901.12	276	
	3	25.60	296	72.6	7400.61	289	
7	1	25.00	274	76.4	7787.97	312	314.73
	2	25.20	280	79.1	8063.20	320	
	3	25.10	283	77.0	7849.13	313	
14	1	25.05	286	91.4	9317.02	372	367.54
	2	25.00	285	89.5	9123.34	365	
	3	25.00	283	89.7	9143.73	366	
28	1	25.00	269	110.6	11274.21	451	449.52
	2	25.00	267	108.3	11039.76	442	
	3	25.35	264	113.4	11559.63	456	
56	1	25.00	274	117.8	12008.15	480	480.74
	2	25.20	275	118.2	12048.93	478	
	3	25.35	274	120.3	12263.00	484	

ตารางที่ ก.14 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3 – 02

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 02	วันที่หล่อตัวอย่าง : 13 Oct 07
W/C = 0.68	Flow = 109.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	24.50	266.00	49.3	5025.48	205	209.96
	2	25.20	281.00	53.4	5443.43	216	
	3	25.15	267.00	51.5	5249.75	209	
7	1	25.20	272.00	65.1	6636.09	263	264.32
	2	25.10	273.00	64.6	6585.12	262	
	3	25.25	278.00	66.2	6748.22	267	
14	1	25.20	272.00	81.3	8287.46	329	325.65
	2	25.20	273.00	81.1	8267.07	328	
	3	25.10	268.00	78.8	8032.62	320	
28	1	25.20	271.00	85.2	8685.02	345	345.64
	2	25.20	269.00	86.2	8786.95	349	
	3	25.10	280.00	84.6	8623.85	344	
56	1	25.35	280.00	99.0	10091.74	398	397.23
	2	25.86	278.00	101.4	10336.39	400	
	3	25.00	275.00	96.6	9847.09	394	

ตารางที่ ก.15 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3 – 03

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 03	วันที่หล่อตัวอย่าง : 15 Oct 07
W/C = 0.70	Flow = 113.75

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง ที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.30	281	41.6	4240.57	168	163.16
	2	25.10	278	40.4	4118.25	164	
	3	25.00	276	38.7	3944.95	158	
7	1	25.20	269	61.5	6269.11	249	243.97
	2	25.20	272	60.2	6136.60	244	
	3	25.10	268	59.0	6014.27	240	
14	1	25.30	271	69.1	7043.83	278	281.95
	2	25.25	280	68.8	7013.25	278	
	3	25.30	271	71.9	7329.26	290	
28	1	25.20	272	80.8	8236.49	327	322.03
	2	25.55	281	80.0	8154.94	319	
	3	25.00	273	78.5	8002.04	320	
56	1	24.84	270	95.0	9684.00	390	388.19
	2	25.00	275	95.7	9755.35	390	
	3	25.00	270	94.3	9612.64	385	

ตารางที่ ก.16 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3 – 04

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์		
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 04	วันที่หล่อตัวอย่าง :	16 Oct 07
W/C = 0.71	Flow =	109.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	24.50	270	23.2	2364.93	97	99.73
	2	25.00	270	25.4	2589.19	104	
	3	25.00	267	24.3	2477.06	99	
7	1	25.00	266	33.7	3435.27	137	140.29
	2	25.10	263	34.7	3537.21	141	
	3	25.10	267	35.1	3577.98	143	
14	1	25.00	264	46.4	4729.87	189	199.65
	2	25.20	263	49.5	5045.87	200	
	3	25.25	265	51.9	5290.52	210	
28	1	25.00	265	55.6	5667.69	227	220.22
	2	25.35	274	54.4	5545.36	219	
	3	25.20	262	53.2	5423.04	215	
56	1	25.70	276	60.2	6136.60	239	232.88
	2	25.25	274	57.6	5871.56	233	
	3	25.20	260	56.2	5728.85	227	

ตารางที่ ก.17 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP3 – 05

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP3 - 05	**วันที่หล่อตัวอย่าง :** 18 Oct 07
W/C = 0.71	Flow = 108.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	259	22.0	2242.61	89	91.05
	2	25.15	260	22.5	2293.58	91	
	3	25.10	260	22.8	2324.16	93	
7	1	25.20	273	28.7	2925.59	116	110.23
	2	25.20	261	26.8	2731.91	108	
	3	25.15	267	26.2	2670.74	106	
14	1	25.25	274	34.4	3506.63	139	132.62
	2	25.20	269	32.1	3272.17	130	
	3	25.10	287	31.8	3241.59	129	
28	1	25.10	260	38.7	3944.95	157	159.21
	2	25.20	260	39.5	4026.50	160	
	3	25.25	261	39.8	4057.08	161	
56	1	25.70	273	51.0	5198.78	202	199.99
	2	25.30	260	48.0	4892.97	193	
	3	25.00	260	50.1	5107.03	204	

ตารางที่ ก.18 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4 – 01

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP4 - 01	วันที่หล่อตัวอย่าง : 8 Oct 07
W/C = 0.59	Flow = 112.5

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.15	241	42.80	4362.90	173	173.66
	2	25.10	237	43.30	4413.86	176	
	3	25.00	248	42.10	4291.54	172	
7	1	25.20	242	46.30	4719.67	187	181.98
	2	25.15	249	44.80	4566.77	182	
	3	25.10	248	43.60	4444.44	177	
14	1	25.10	244	60.80	6197.76	247	248.83
	2	25.20	253	61.40	6258.92	248	
	3	25.20	256	62.10	6330.28	251	
28	1	25.00	255	68.30	6962.28	278	274.14
	2	25.00	252	65.60	6687.05	267	
	3	25.00	254	67.80	6911.31	276	
56	1	25.60	255	70.60	7196.74	281	285.87
	2	25.50	253	70.80	7217.13	283	
	3	25.60	250	73.70	7512.74	293	

ตารางที่ ก.19 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4 – 02

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์		
ชนิดของตัวอย่าง : OP4 - 02	วันที่หล่อตัวอย่าง :	11 Oct 07
W/C = 0.62	Flow =	111.5

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	245	34.40	3506.63	140	150.72
	2	25.10	244	36.40	3710.50	148	
	3	25.20	241	40.70	4148.83	165	
7	1	25.10	240	43.50	4434.25	177	176.30
	2	25.10	238	45.20	4607.54	184	
	3	25.20	251	41.70	4250.76	169	
14	1	25.10	243	58.20	5932.72	236	243.58
	2	25.10	242	60.00	6116.21	244	
	3	25.25	242	62.10	6330.28	251	
28	1	25.10	247	62.40	6360.86	253	252.58
	2	25.35	242	63.20	6442.41	254	
	3	25.10	249	61.60	6279.31	250	
56	1	25.00	250	68.40	6972.48	279	272.57
	2	25.20	258	67.20	6850.15	272	
	3	25.20	247	66.00	6727.83	267	

ตารางที่ ก.20 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4 – 03

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : OP4 - 03	วันที่หล่อตัวอย่าง : 13 Oct 07
W/C = 0.655	Flow = 108

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	238	27.6	2813.46	112	111.34
	2	25.15	247	27.0	2752.29	109	
	3	25.10	245	27.7	2823.65	112	
7	1	25.20	244	32.8	3343.53	133	129.39
	2	25.15	246	32.1	3272.17	130	
	3	25.20	254	31.0	3160.04	125	
14	1	25.20	253	40.2	4097.86	163	161.75
	2	25.20	257	40.1	4087.67	162	
	3	25.10	250	39.5	4026.50	160	
28	1	25.10	255	55.0	5606.52	223	224.67
	2	25.00	252	53.8	5484.20	219	
	3	25.30	254	57.4	5851.17	231	
56	1	25.30	250	66.9	6819.57	270	267.32
	2	25.00	257	64.4	6564.73	263	
	3	25.35	248	67.1	6839.96	270	

ตารางที่ ก.21 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4 – 04

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์			
ชนิดของตัวอย่าง : OP4 - 04		วันที่หล่อตัวอย่าง :	16 Oct 07
W/C = 0.66		Flow =	107.5

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	252	20.6	2099.90	84	85.12
	2	25.00	246	20.7	2110.09	84	
	3	25.20	243	21.5	2191.64	87	
7	1	25.20	231	24.7	2517.84	100	96.53
	2	25.10	225	22.7	2313.97	92	
	3	25.20	229	24.1	2456.68	97	
14	1	25.10	230	28.8	2935.78	117	142.08
	2	15.10	224	28.4	2895.01	192	
	3	25.15	230	29.0	2956.17	118	
28	1	25.10	253	35.2	3588.18	143	148.47
	2	25.20	251	37.4	3812.44	151	
	3	25.15	253	37.3	3802.24	151	
56	1	26.00	240	45.4	4627.93	178	177.53
	2	25.15	255	43.1	4393.48	175	
	3	25.10	254	44.3	4515.80	180	

ตารางที่ ก.22 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ OP4 – 05

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์		
ชนิดของตัวอย่าง : OP4 - 05	วันที่หล่อตัวอย่าง :	19 Oct 07
W/C = 0.66	Flow =	108.75

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.50	239	14.9	1518.86	60	64.66
	2	25.10	253	16.4	1671.76	67	
	3	25.10	251	16.7	1702.34	68	
7	1	25.30	245	19.1	1946.99	77	79.36
	2	25.60	240	21.2	2161.06	84	
	3	25.25	240	19.0	1936.80	77	
14	1	25.30	249	25.7	2619.78	104	99.57
	2	25.15	236	23.7	2415.90	96	
	3	25.30	241	24.6	2507.65	99	
28	1	25.60	261	32.5	3312.95	129	127.04
	2	26.00	261	31.8	3241.59	125	
	3	26.00	261	32.4	3302.75	127	
56	1	26.00	262	42.4	4322.12	166	167.13
	2	25.00	258	41.5	4230.38	169	
	3	25.00	256	40.7	4148.83	166	

ตารางที่ ก.23 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA – 01

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์	
ชนิดของตัวอย่าง : SA - 01	วันที่หล่อตัวอย่าง : 9 Oct 07
W/C = 0.64	Flow = 107.5

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	283	62	6320.08	252	257.35
	2	25.75	268	66	6727.83	261	
	3	24.01	262	61	6218.14	259	
7	1	25.10	270	77	7808.36	311	314.69
	2	24.65	260	77	7889.91	320	
	3	24.01	270	74	7512.74	313	
14	1	25.30	260	91	9235.47	365	372.05
	2	25.15	260	92	9408.77	374	
	3	25.20	270	93	9500.51	377	
28	1	25.10	273	118	11997.96	478	470.91
	2	24.65	280	116	11834.86	480	
	3	26.01	273	116	11824.67	455	
56	1	25.10	270	117	11926.61	475	475.32
	2	25.55	270	118	12048.93	472	
	3	25.25	270	119	12099.90	479	

ตารางที่ ก.24 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA – 02

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์		
ชนิดของตัวอย่าง : SA - 02	วันที่หล่อตัวอย่าง :	11 Oct 07
W/C = 0.68	Flow =	107.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย กิโลนิวตัน	แรงอัดประลัย กิโลกรัม	หน่วยแรงอัด กิโลกรัม/ตร.ซม.	หน่วยแรงอัด เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.20	285	47.60	4852.19	193	190.23
	2	25.10	275	45.40	4627.93	184	
	3	25.20	272	47.90	4882.77	194	
7	1	25.00	272	62.70	6391.44	256	255.97
	2	25.20	281	64.80	6605.50	262	
	3	25.35	270	62.20	6340.47	250	
14	1	25.10	268	73.20	7461.77	297	295.05
	2	25.25	266	73.00	7441.39	295	
	3	25.00	272	71.90	7329.26	293	
28	1	25.50	263	78.20	7971.46	313	317.36
	2	26.01	268	80.80	8236.49	317	
	3	25.20	262	79.80	8134.56	323	
56	1	24.01	275	87.50	8919.47	371	370.10
	2	26.01	274	93.30	9510.70	366	
	3	25.35	265	92.80	9459.73	373	

ตารางที่ ก.25 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA – 03

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์

ชนิดของตัวอย่าง : SA - 03 วันที่หล่อตัวอย่าง : 14 Oct 07

W/C = 0.68 Flow = 108

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง ที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.10	273	42.60	4342.51	173	171.94
	2	25.00	274	41.20	4199.80	168	
	3	25.25	266	43.30	4413.86	175	
7	1	25.00	268	50.40	5137.61	206	204.27
	2	25.20	265	51.00	5198.78	206	
	3	25.00	263	49.30	5025.48	201	
14	1	25.00	268	52.80	5382.26	215	216.44
	2	25.15	270	53.10	5412.84	215	
	3	25.25	267	54.20	5524.97	219	
28	1	25.10	273	68.60	6992.86	279	281.02
	2	25.00	275	68.00	6931.70	277	
	3	25.20	270	71.00	7237.51	287	
56	1	25.60	277	72.60	7400.61	289	288.16
	2	25.25	266	71.20	7257.90	287	
	3	25.10	278	70.90	7227.32	288	

ตารางที่ ก.26 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA – 04

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์			
ชนิดของตัวอย่าง : SA - 04		วันที่หล่อตัวอย่าง :	19 Oct 07
W/C = 0.69		Flow =	111.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.00	256	26.40	2691.13	108	111.27
	2	25.10	259	27.10	2762.49	110	
	3	25.20	256	28.70	2925.59	116	
7	1	25.15	259	39.50	4026.50	160	159.72
	2	25.10	260	38.70	3944.95	157	
	3	25.25	260	40.10	4087.67	162	
14	1	25.00	247	41.00	4179.41	167	169.01
	2	25.00	244	41.50	4230.38	169	
	3	25.15	247	42.10	4291.54	171	
28	1	25.60	260	45.30	4617.74	180	182.64
	2	25.25	261	45.40	4627.93	183	
	3	24.01	262	43.40	4424.06	184	
56	1	25.00	261	47.30	4821.61	193	193.41
	2	25.00	261	47.10	4801.22	192	
	3	25.00	255	47.90	4882.77	195	

ตารางที่ ก.27 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ SA – 05

ค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์

ชนิดของตัวอย่าง : SA - 05 วันที่หล่อตัวอย่าง : 19 Oct 07

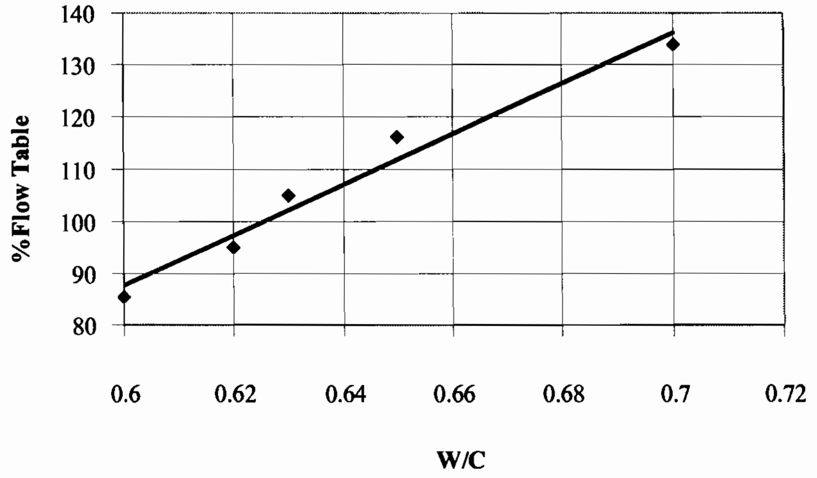
W/C = 0.70 Flow = 109.25

อายุ (วัน)	ตัวอย่างที่	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย		หน่วยแรงอัด	
				กิโลนิวตัน	กิโลกรัม	กิโลกรัม/ตร.ซม.	เฉลี่ย(กก./ซม.)
3	1	25.20	257	23.60	2405.71	95	91.71
	2	25.00	265	21.80	2222.22	89	
	3	25.15	257	22.40	2283.38	91	
7	1	25.00	256	33.90	3455.66	138	140.58
	2	25.35	260	35.60	3628.95	143	
	3	25.20	262	34.70	3537.21	140	
14	1	24.50	260	34.20	3486.24	142	148.93
	2	25.20	269	36.90	3761.47	149	
	3	25.15	260	38.30	3904.18	155	
28	1	24.65	259	43.50	4434.25	180	177.26
	2	25.00	256	44.10	4495.41	180	
	3	25.00	253	42.20	4301.73	172	
56	1	25.40	258	47.60	4852.19	191	190.47
	2	24.75	264	45.40	4627.93	187	
	3	25.25	257	47.90	4882.77	193	

ตารางที่ ก.28 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ Control

Sample No	W/C	Cement (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.6	300	180	10	18.525	85.25
2	0.62	300	186	10	19.5	95
3	0.63	300	189	10	20.5	105
4	0.65	300	195	10	21.625	116.25
5	0.7	300	210	10	23.375	133.75

W/C = 0.63

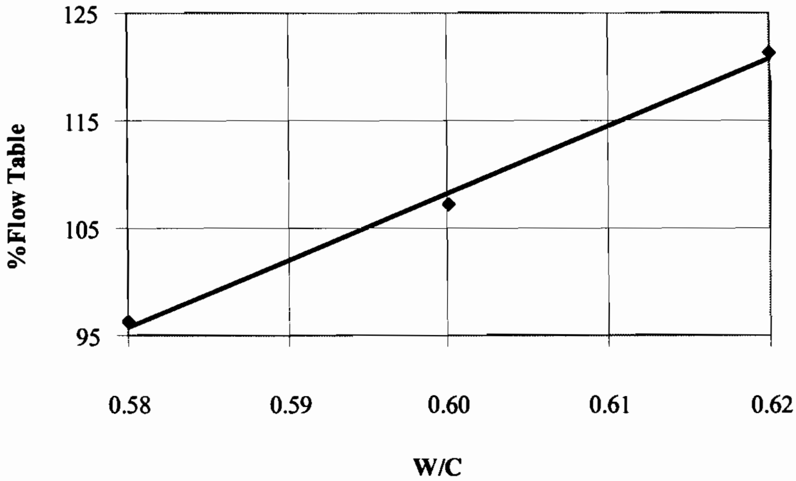


รูปที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ Control

ตารางที่ ก.29 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 01

Sample No	W/C	Cement + OP1 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.58	200	116	10	19.625	96.25
2	0.60	200	120	10	20.725	107.25
3	0.62	200	124	10	22.125	121.25

W/C = 0.60

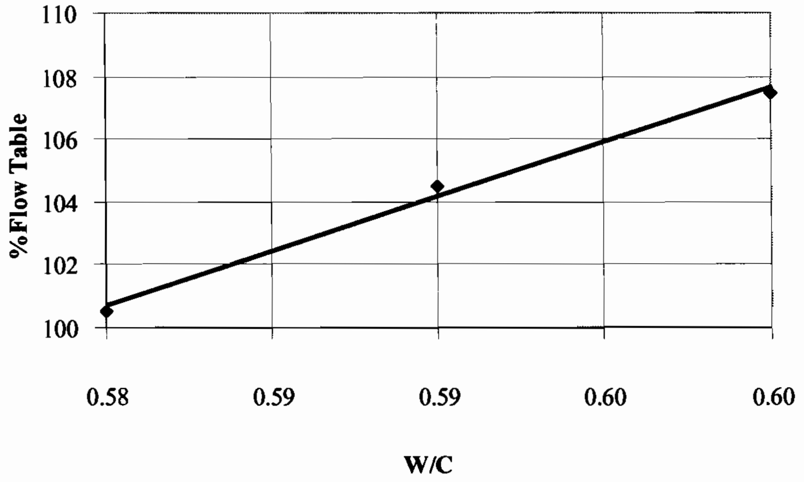


รูปที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1 – 01

ตารางที่ ก.30 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 02

Sample No	W/C	Cement + OP1 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.58	300	174	10	20.05	100.50
2	0.59	300	177	10	20.45	104.50
3	0.60	300	180	10	20.75	107.50

W/C = 0.61

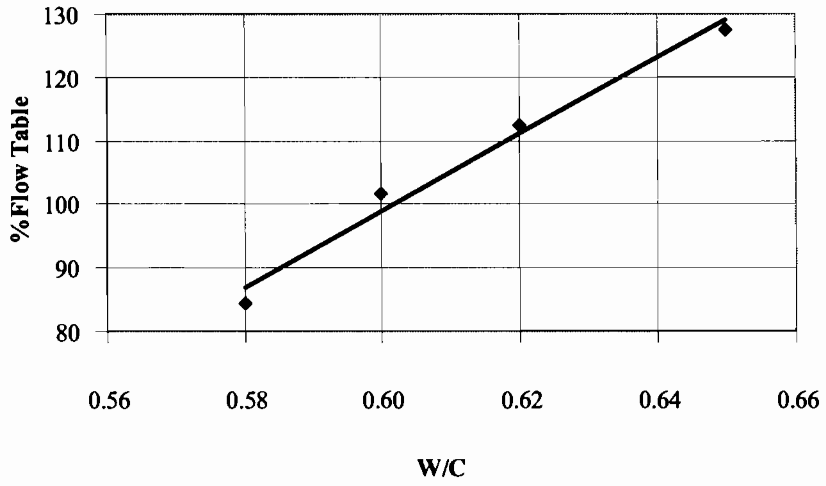


รูปที่ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1 – 02

ตารางที่ ก.31 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 03

Sample No	W/C	Cement + OP1 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.58	300	174	10	18.45	84.50
2	0.60	300	180	10	20.175	101.75
3	0.62	300	186	10	21.25	112.50
4	0.65	300	195	10	22.75	127.50

W/C = 0.62

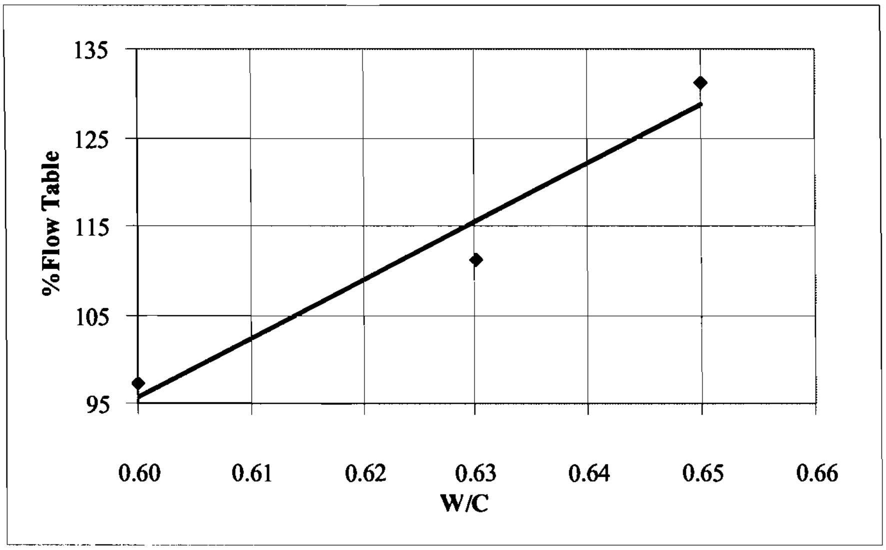


รูปที่ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1 – 03

ตารางที่ ก.32 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 04

Sample No	W/C	Cement + OP1 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.60	300	180	10	19.725	97.25
2	0.63	300	189	10	21.125	111.25
3	0.65	300	195	10	23.125	131.25

W/C = 0.63

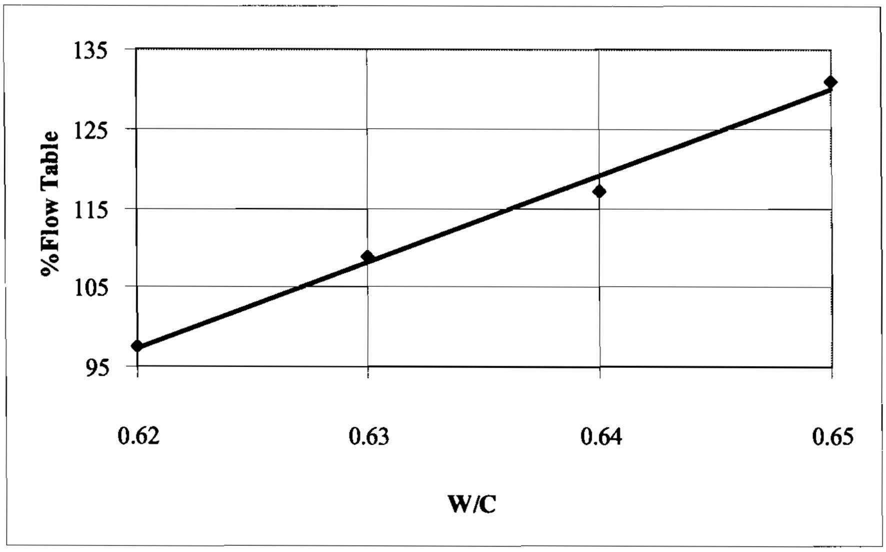


รูปที่ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1 – 04

ตารางที่ ก.33 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP1 – 05

Sample No	W/C	Cement + OP1 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.62	300	186	10	19.75	97.50
2	0.63	300	189	10	20.88	108.75
3	0.64	300	192	10	21.73	117.25
4	0.65	300	195	10	23.10	131.00

W/C = 0.63

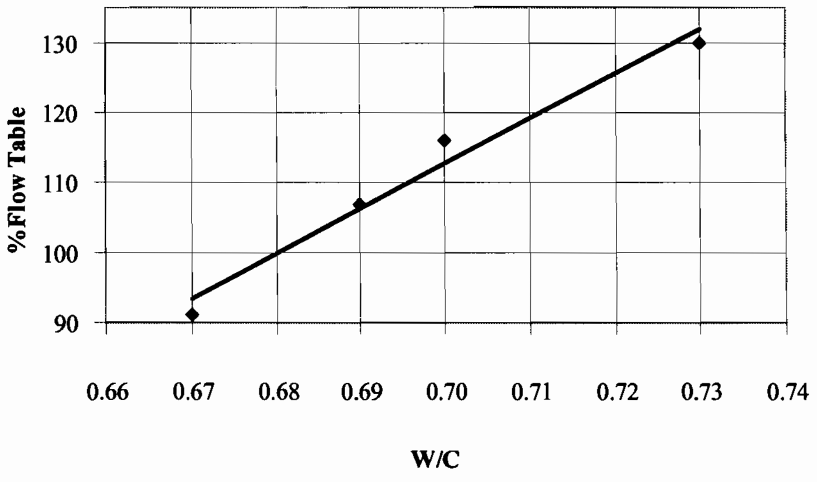


รูปที่ ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP1 – 05

ตารางที่ ก.34 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 01

Sample No	W/C	Cement + OP2 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.67	300	201	10	19.125	91.25
2	0.69	300	207	10	20.675	106.75
3	0.70	300	210	10	21.6	116.00
4	0.73	300	219	10	23	130.00

W/C = 0.69

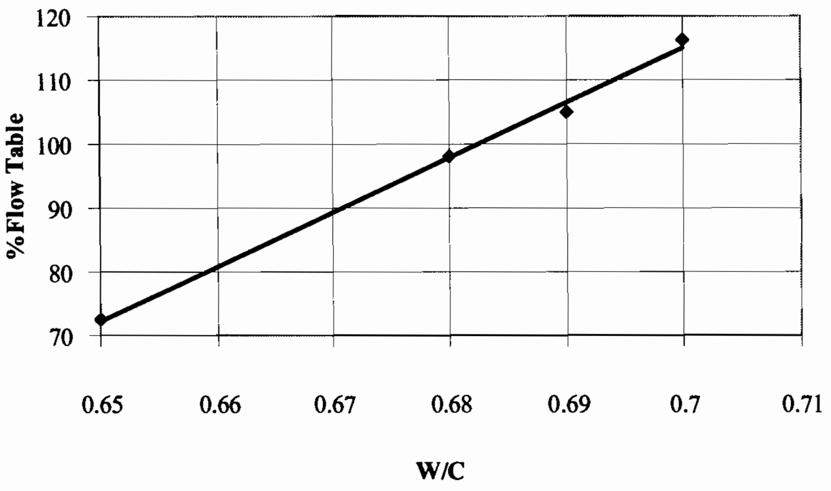


รูปที่ ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2 – 01

ตารางที่ ก.35 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 02

Sample No	W/C	Cement + OP2 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.65	300	195	10	17.25	72.5
2	0.68	300	204	10	19.81	98.1
3	0.69	300	207	10	20.5	105
4	0.7	300	210	10	21.625	116.25

W/C = 0.69

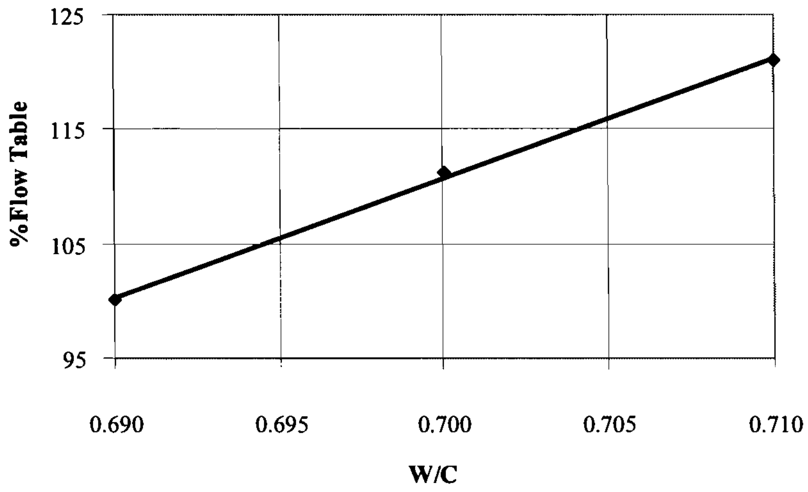


รูปที่ ก.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2 – 02

ตารางที่ ก.36 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 03

Sample No	W/C	Cement + OP2 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.69	300	207	10	20.00	100.00
2	0.70	300	210	10	21.13	111.25
3	0.71	300	213	10	22.10	121.00

W/C = 0.70

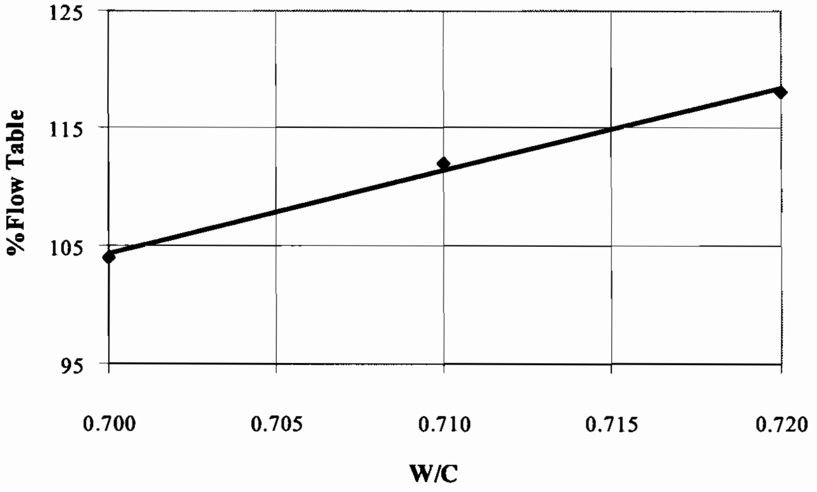


รูปที่ ก.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2 – 03

ตารางที่ ก.37 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 04

Sample No	W/C	Cement + OP2 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.70	300	210	10	20.40	104.00
2	0.71	300	213	10	21.20	112.00
3	0.72	300	216	10	21.80	118.00

W/C = 0.71

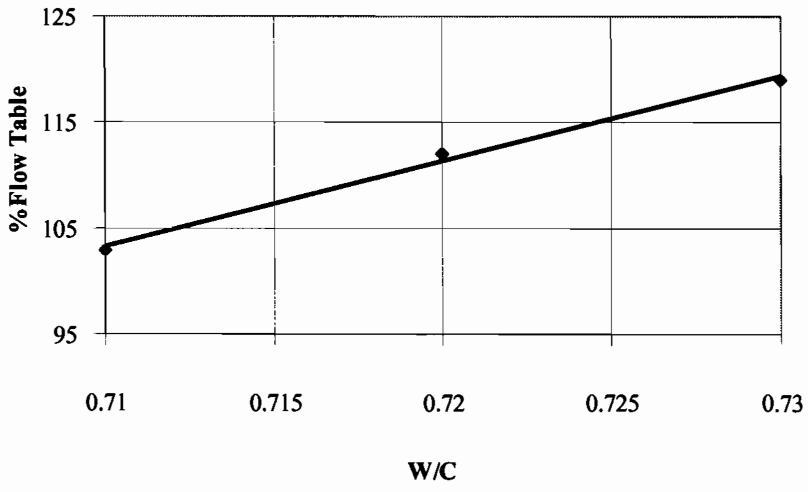


รูปที่ ก.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2 – 04

ตารางที่ ก.38 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP2 – 05

Sample No	W/C	Cement + OP2 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.71	300	213	10	20.30	103.00
2	0.72	300	216	10	21.20	112.00
3	0.73	300	219	10	21.90	119.00

W/C = 0.72

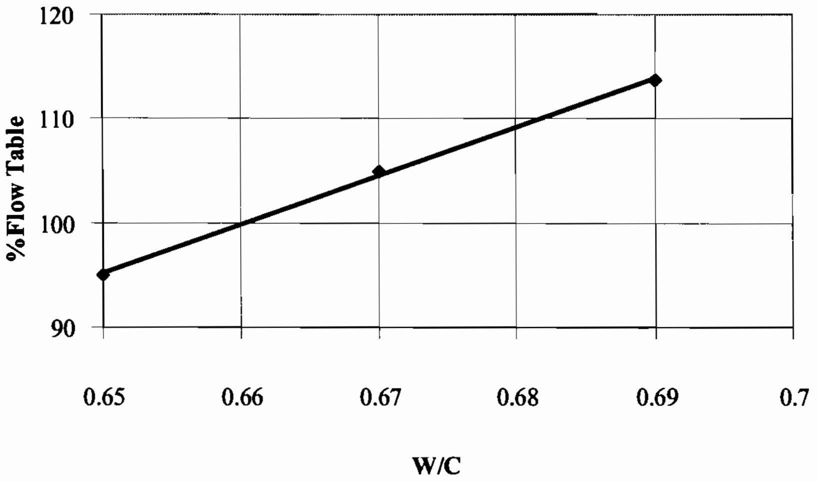


รูปที่ ก.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP2 – 05

ตารางที่ ก.39 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 01

Sample No	W/C	Cement +OP3 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.65	300	195	10	19.50	95.00
2	0.67	300	201	10	20.50	105.00
3	0.69	300	207	10	21.38	113.75

W/C = 0.67

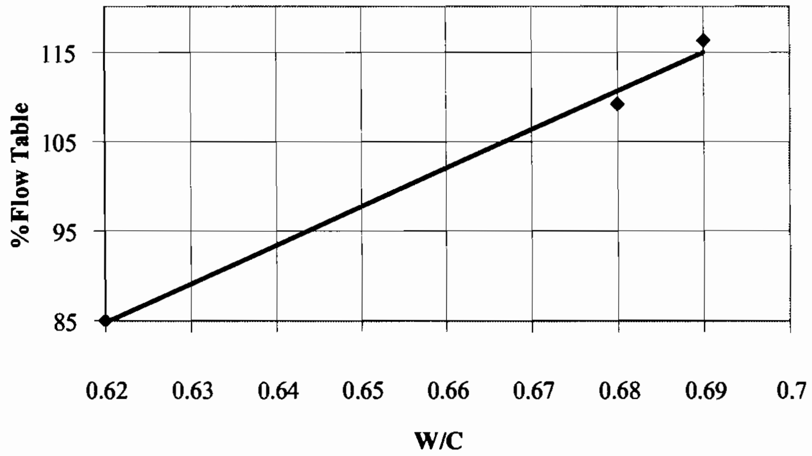


รูปที่ ก.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3 – 01

ตารางที่ ก.40 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 02

Sample No	W/C	Cement +OP3 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.62	300	186	10	18.50	85.00
2	0.68	300	204	10	20.93	109.25
3	0.69	300	207	10	21.63	116.25

W/C = 0.68

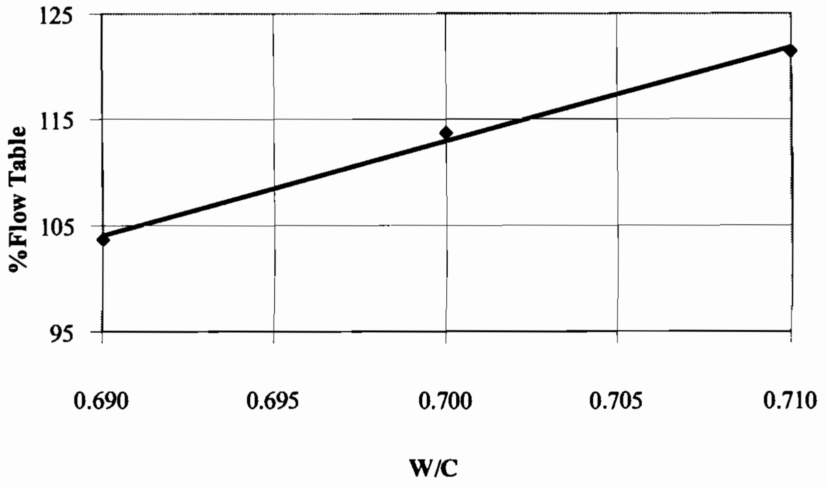


รูปที่ ก.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3 – 02

ตารางที่ ก.41 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 03

Sample No	W/C	Cement +OP3 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.69	300	207	10	20.38	103.75
2	0.70	300	210	10	21.38	113.75
3	0.71	300	213	10	22.15	121.50

W/C = 0.70

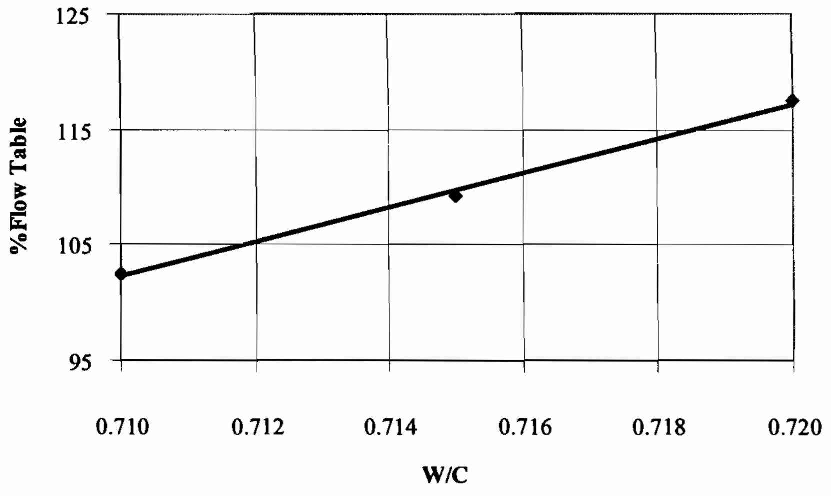


รูปที่ ก.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3 – 03

ตารางที่ ก.42 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 04

Sample No	W/C	Cement +OP3 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.71	300	213	10	20.25	102.50
2	0.715	300	214.5	10	20.93	109.25
3	0.72	300	216	10	21.75	117.50

W/C = 0.715

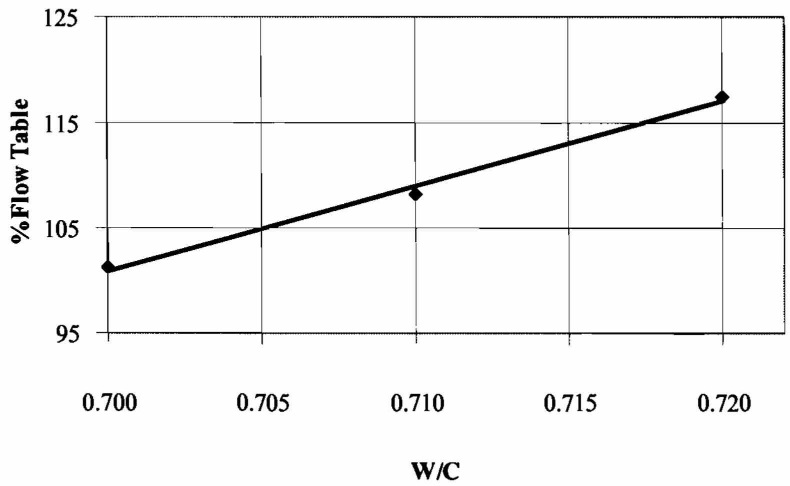


รูปที่ ก.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3 – 04

ตารางที่ ก.43 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP3 – 05

Sample No	W/C	Cement +OP3 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.70	300	210	10	20.13	101.25
2	0.71	300	213	10	20.83	108.25
3	0.72	300	216	10	21.75	117.50

W/C = 0.71

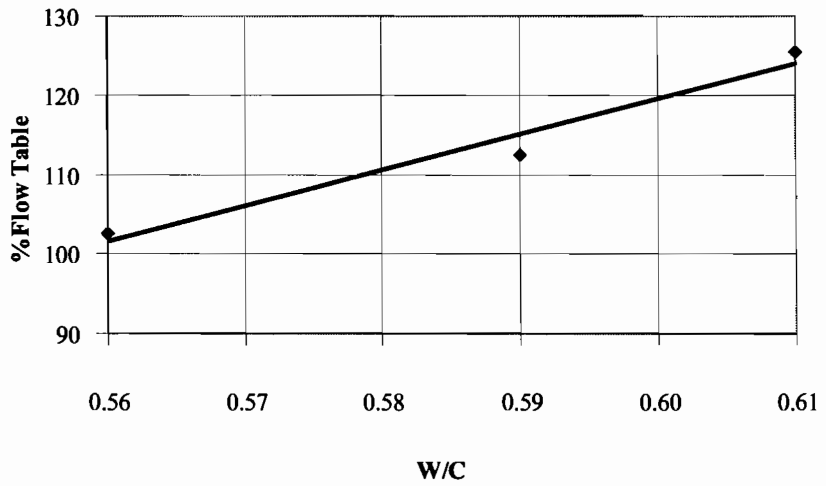


รูปที่ ก.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP3 – 05

ตารางที่ ก.44 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 01

Sample No	W/C	Cement + OP4 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.56	300	168	10	20.25	102.50
2	0.59	300	177	10	21.25	112.50
3	0.61	300	183	10	22.55	125.50

W/C = 0.59

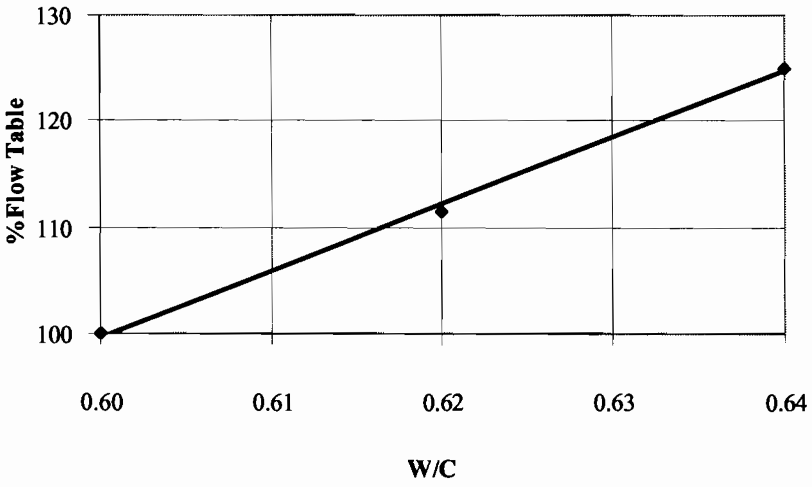


รูปที่ ก.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4 – 01

ตารางที่ ก.45 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 02

Sample No	W/C	Cement + OP4 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.60	300	180	10	20.00	100.00
2	0.62	300	186	10	21.15	111.50
3	0.64	300	192	10	22.50	125.00

W/C = 0.62

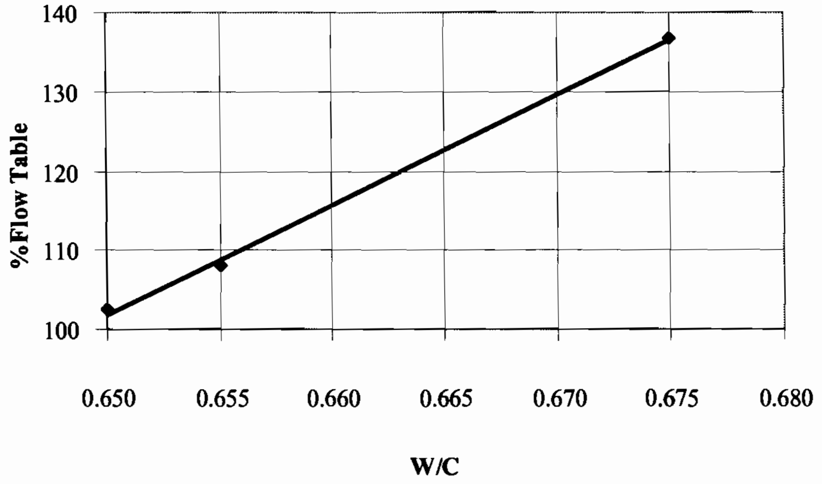


รูปที่ ก.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4 – 02

ตารางที่ ก.46 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 03

Sample No	W/C	Cement + OP4 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.65	300	195	10	20.25	102.50
2	0.66	300	197	10	20.80	108.00
3	0.68	300	203	10	23.68	136.75

W/C = 0.66

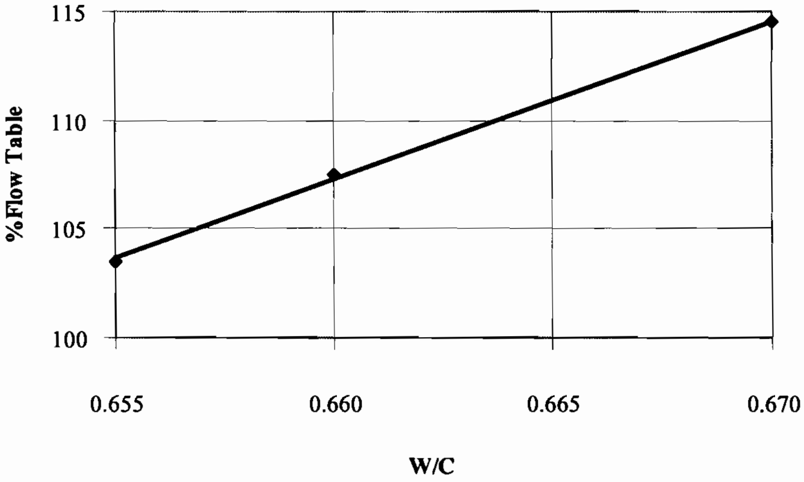


รูปที่ ก.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4 – 03

ตารางที่ ก.47 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 04

Sample No	W/C	Cement + OP4 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.66	300	197	10	20.35	103.50
2	0.66	300	198	10	20.75	107.50
3	0.67	300	201	10	21.45	114.50

W/C = 0.66

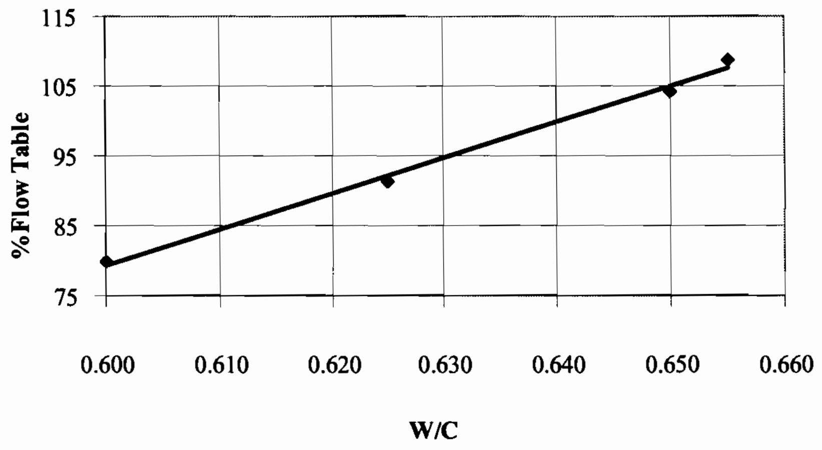


รูปที่ ก.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4 – 04

ตารางที่ ก.48 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ OP4 – 05

Sample No	W/C	Cement + OP4 (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.60	300	180	10	18.00	80.00
2	0.63	300	188	10	19.13	91.25
3	0.65	300	195	10	20.43	104.25
4	0.66	300	197	10	20.88	108.75

W/C = 0.66

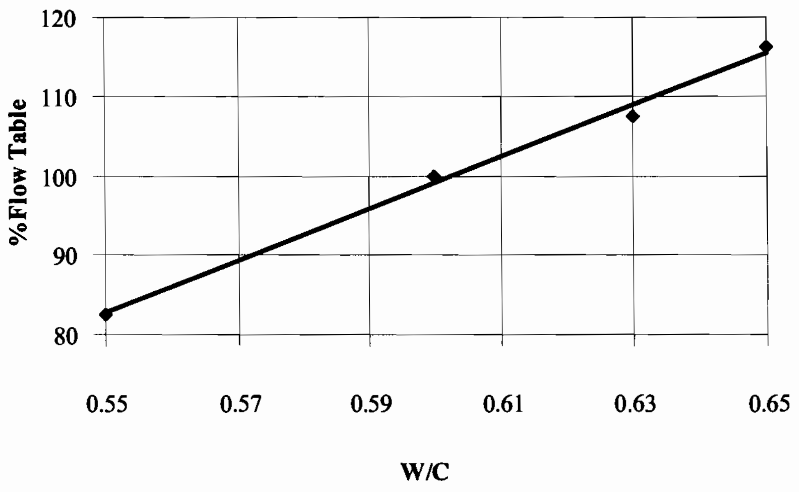


รูปที่ ก.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ OP4 – 05

ตารางที่ ก.49 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 01

Sample No	W/C	Cement + SA (gm.)	Water (gm.)	D_0 (cm.)	D_1 (cm.)	Percent Flow Table %
1	0.55	300	165	10	18.25	82.50
2	0.60	300	180	10	20.00	100.00
3	0.63	300	189	10	20.75	107.50
4	0.65	300	195	10	21.63	116.25

W/C = 0.63

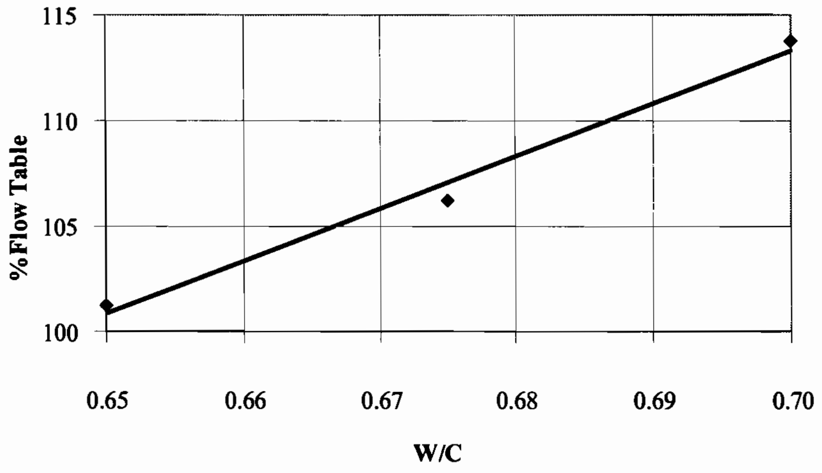


รูปที่ ก.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA – 01

ตารางที่ ก.50 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 02

Sample No	W/C	Cement + SA (gm.)	Water (gm.)	D_0 (Cm.)	D_1 (Cm.)	Percent Flow Table %
1	0.65	300	195	10	20.13	101.25
2	0.68	300	203	10	20.63	106.25
3	0.70	300	210	10	21.38	113.75

W/C = 0.68

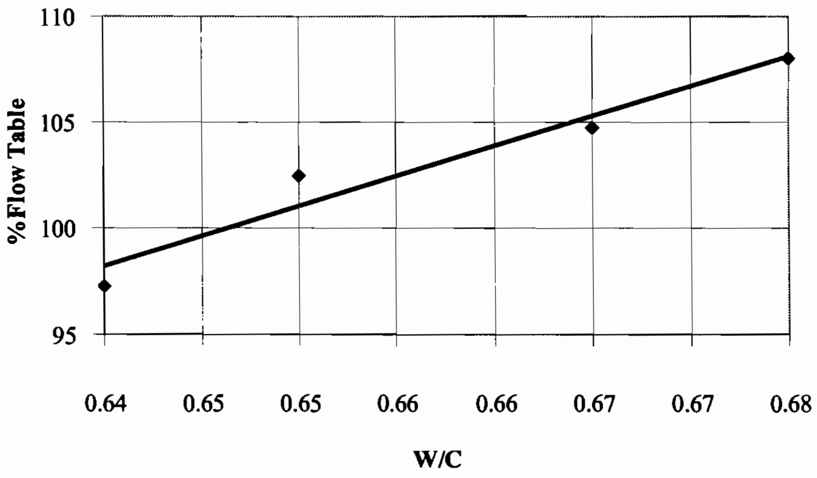


รูปที่ ก.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA – 02

ตารางที่ ก.51 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 03

Sample No	W/C	Cement + SA (gm.)	Water (gm.)	D_0 (Cm.)	D_1 (Cm.)	Percent Flow Table %
1	0.64	300	128	10	19.73	97.25
2	0.65	300	130	10	20.25	102.50
3	0.67	300	133	10	20.48	104.75
4	0.68	300	135	10	20.80	108.00

W/C = 0.68

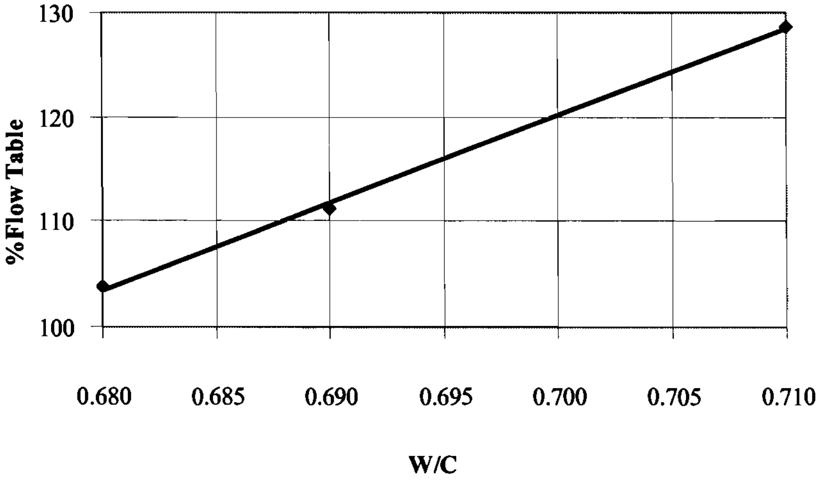


รูปที่ ก.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA – 03

ตารางที่ ก.52 ค่าการไหลแผ่(Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 04

Sample No	W/C	Cement + SA (gm.)	Water (gm.)	D_0 (Cm.)	D_1 (Cm.)	Percent Flow Table %
1	0.68	300	150	10	20.38	103.75
2	0.69	300	140	10	21.13	111.25
3	0.71	300	140	10	22.88	128.75

W/C = 0.69

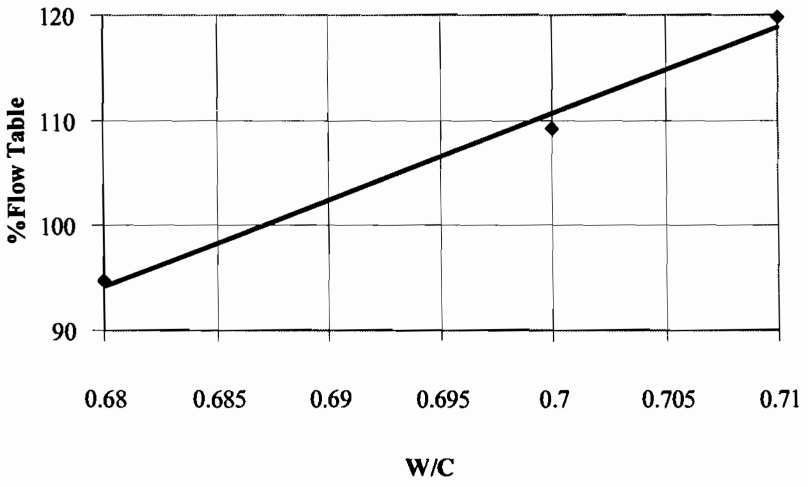


รูปที่ ก.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA – 04

ตารางที่ ก.53 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test For Consistency of Cement Mortar) ตัวอย่างที่ SA – 05

Sample No	W/C	Cement + SA (gm.)	Water (gm.)	D_0 (Cm.)	D_1 (Cm.)	Percent Flow Table %
1	0.680	300	204	10	19.48	94.75
2	0.700	300	210	10	20.93	109.25
3	0.710	300	213	10	21.99	119.85

W/C = 0.69



รูปที่ ก.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างที่ SA – 05

ตารางที่ ก.54 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ควบคุม (Control)

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
Control	1	268.6	124.99	2.149	2.142
	2	267.5	124.75	2.144	
	3	275.7	129.29	2.132	

ตารางที่ ก.55 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ควบคุม (Control)

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
Control	1	260.1	124.99	2.081	2.073
	2	259.1	124.75	2.077	
	3	266.3	129.29	2.060	

ตารางที่ ก.56 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ OP1

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP1-01	1	271.8	128.270	2.119	2.104
	2	267.6	129.544	2.066	
	3	270.9	127.263	2.129	
OP1-02	1	279.8	132.131	2.118	2.101
	2	275.3	132.391	2.079	
	3	278.8	132.391	2.106	
OP1-03	1	263.4	126.504	2.082	2.074
	2	260.4	126.506	2.058	
	3	261.1	125.501	2.080	
OP1-04	1	271.3	131.611	2.061	2.054
	2	271.6	131.611	2.064	
	3	268.2	131.608	2.038	
OP1-05	1	261.1	129.286	2.020	2.024
	2	263.1	129.799	2.027	
	3	260.2	128.517	2.025	

ตารางที่ ก.57 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ OP1

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP1-01	1	261.9	128.270	2.042	2.035
	2	259.4	129.544	2.002	
	3	262.1	127.263	2.060	
OP1-02	1	269.5	132.131	2.040	2.024
	2	265.4	132.391	2.005	
	3	268.4	132.391	2.027	
OP1-03	1	252.8	126.504	1.998	1.993
	2	250.5	126.506	1.980	
	3	250.9	125.501	1.999	
OP1-04	1	258.7	131.611	1.966	1.965
	2	259.5	131.611	1.972	
	3	257.7	131.608	1.958	
OP1-05	1	248.3	129.286	1.921	1.924
	2	249.3	129.799	1.921	
	3	248	128.517	1.930	

ตารางที่ ก.58 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ OP2

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP2-01	1	261.8	123.75	2.115	2.112
	2	263.6	124.75	2.113	
	3	262.2	124.50	2.106	
OP2-02	1	271.5	129.30	2.100	2.096
	2	274.6	130.32	2.107	
	3	272.1	130.84	2.080	
OP2-03	1	256.4	122.27	2.097	2.069
	2	254.3	124.50	2.043	
	3	256.5	124.00	2.069	
OP2-04	1	258.1	125.00	2.065	2.062
	2	257.5	125.00	2.060	
	3	257.7	125.00	2.062	
OP2-05	1	260.3	126.76	2.054	2.057
	2	258.2	125.25	2.061	
	3	259.6	126.25	2.056	

ตารางที่ ก.59 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ OP2

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP2-01	1	250.6	123.75	2.025	2.025
	2	252.9	124.75	2.027	
	3	251.8	124.50	2.022	
OP2-02	1	258.6	129.30	2.000	1.995
	2	261.3	130.32	2.005	
	3	259.1	130.84	1.980	
OP2-03	1	243.1	122.27	1.988	1.962
	2	241.2	124.50	1.937	
	3	243.2	124.00	1.961	
OP2-04	1	243.8	125.00	1.950	1.945
	2	243.2	125.00	1.946	
	3	242.3	125.00	1.938	
OP2-05	1	243.8	126.76	1.923	1.932
	2	242.4	125.25	1.935	
	3	244.4	126.25	1.936	

ตารางที่ ก.60 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ OP3

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP3-01	1	280.2	131.35	2.133	2.132
	2	277.5	130.32	2.129	
	3	279.7	131.09	2.134	
OP3-02	1	262.4	124.50	2.108	2.122
	2	264.5	124.00	2.133	
	3	262.3	123.50	2.124	
OP3-03	1	267.2	126.51	2.112	2.104
	2	263	125.25	2.100	
	3	266	126.75	2.099	
OP3-04	1	263.3	125.50	2.098	2.089
	2	261.2	125.00	2.090	
	3	259.3	124.75	2.079	
OP3-05	1	249	125.00	1.992	1.973
	2	247.4	125.75	1.967	
	3	248.4	126.75	1.960	

ตารางที่ ก.61 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ OP3

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP3-01	1	267.3	131.35	2.035	2.031
	2	264.1	130.32	2.027	
	3	266.5	131.09	2.033	
OP3-02	1	246.9	124.50	1.983	2.004
	2	250.3	124.00	2.019	
	3	248.2	123.50	2.010	
OP3-03	1	250.3	126.51	1.979	1.969
	2	245.9	125.25	1.963	
	3	249.2	126.75	1.966	
OP3-04	1	243.4	125.50	1.939	1.936
	2	242.3	125.00	1.938	
	3	240.7	124.75	1.929	
OP3-05	1	228.5	125.00	1.828	1.810
	2	227.1	125.75	1.806	
	3	227.5	126.75	1.795	

ตารางที่ ก.62 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ OP4

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP4-01	1	270.3	127.77	2.116	2.123
	2	270.6	127.52	2.122	
	3	270.8	127.01	2.132	
OP4-02	1	277.2	134.73	2.057	2.079
	2	275.5	132.13	2.085	
	3	276.9	132.12	2.096	
OP4-03	1	266.2	131.61	2.023	2.026
	2	267.2	132.13	2.022	
	3	268.3	131.87	2.035	
OP4-04	1	265.2	131.87	2.011	2.009
	2	263.6	131.09	2.011	
	3	262.3	130.84	2.005	
OP4-05	1	247	125.50	1.968	1.964
	2	245.3	125.25	1.959	
	3	246.8	125.50	1.967	

ตารางที่ ก.63 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ OP4

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
OP4-01	1	260.4	127.77	2.038	2.046
	2	260.2	127.52	2.041	
	3	261.4	127.01	2.058	
OP4-02	1	266.9	134.73	1.981	1.992
	2	262.8	132.13	1.989	
	3	265.2	132.12	2.007	
OP4-03	1	251.3	131.61	1.909	1.924
	2	256.1	132.13	1.938	
	3	253.6	131.87	1.923	
OP4-04	1	250.1	131.87	1.897	1.894
	2	248.7	131.09	1.897	
	3	247.2	130.84	1.889	
OP4-05	1	230.6	125.50	1.837	1.836
	2	229.4	125.25	1.832	
	3	230.9	125.50	1.840	

ตารางที่ ก.64 ค่าความหนาแน่นเปียก ตัวอย่างที่ SA

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นเปียกเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
SA-01	1	279.2	132.65	2.105	2.103
	2	278.5	132.13	2.108	
	3	276.9	132.12	2.096	
SA-02	1	255.9	125.50	2.039	2.057
	2	255.3	124.47	2.051	
	3	257.9	123.99	2.080	
SA-03	1	268.4	130.32	2.060	2.048
	2	270	133.68	2.020	
	3	275	133.17	2.065	
SA-04	1	254.8	125.25	2.034	2.035
	2	253.4	123.74	2.048	
	3	250.3	123.74	2.023	
SA-05	1	268.3	132.91	2.019	2.019
	2	265.3	131.86	2.012	
	3	265.3	130.84	2.028	

ตารางที่ ก.65 ค่าความหนาแน่นแห้ง ตัวอย่างที่ SA

ตัวอย่าง		น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
SA-01	1	265.9	132.65	2.005	2.008
	2	265.8	132.13	2.012	
	3	265.2	132.12	2.007	
SA-02	1	243.4	125.50	1.939	1.955
	2	242	124.47	1.944	
	3	245.6	123.99	1.981	
SA-03	1	252.9	130.32	1.941	1.929
	2	254.4	133.68	1.903	
	3	258.7	133.17	1.943	
SA-04	1	238.1	125.25	1.901	1.904
	2	237.2	123.74	1.917	
	3	234.3	123.74	1.894	
SA-05	1	249.8	132.91	1.879	1.879
	2	247.2	131.86	1.875	
	3	246.4	130.84	1.883	

ตารางที่ ก.66 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ควบคุม(Control)

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม %	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย %
Control	1	268.6	260.1	3.27	3.35
	2	267.5	259.1	3.24	
	3	275.7	266.3	3.53	

ตารางที่ ก.67 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ OP1

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม (%)	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย (%)
OP1-01	1	271.8	261.9	3.78	3.43
	2	267.6	259.4	3.16	
	3	270.9	262.1	3.36	
OP1-02	1	279.8	269.5	3.82	3.81
	2	275.3	265.4	3.73	
	3	278.8	268.4	3.87	
OP1-03	1	263.4	252.8	4.19	4.07
	2	260.4	250.5	3.95	
	3	261.1	250.9	4.07	
OP1-04	1	271.3	258.7	4.87	4.54
	2	271.6	259.5	4.66	
	3	268.2	257.7	4.07	
OP1-05	1	261.1	248.3	5.16	5.20
	2	263.1	249.3	5.54	
	3	260.2	248	4.92	

ตารางที่ ก.68 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ OP2

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม %	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย %
OP2-01	1	261.8	250.6	4.47	4.28
	2	263.6	252.9	4.23	
	3	262.2	251.8	4.13	
OP2-02	1	271.5	258.6	4.99	5.03
	2	274.6	261.3	5.09	
	3	272.1	259.1	5.02	
OP2-03	1	256.4	243.1	5.47	5.46
	2	254.3	241.2	5.43	
	3	256.5	243.2	5.47	
OP2-04	1	258.1	243.8	5.87	6.03
	2	257.5	243.2	5.88	
	3	257.7	242.3	6.36	
OP2-05	1	260.3	243.8	6.77	6.50
	2	258.2	242.4	6.52	
	3	259.6	244.4	6.22	

ตารางที่ ก.69 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ OP3

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม %	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย %
OP3-01	1	280.2	267.3	4.83	4.95
	2	277.5	264.1	5.07	
	3	279.7	266.5	4.95	
OP3-02	1	262.4	246.9	6.28	5.88
	2	264.5	250.3	5.67	
	3	262.3	248.2	5.68	
OP3-03	1	267.2	250.3	6.75	6.82
	2	263	245.9	6.95	
	3	266	249.2	6.74	
OP3-04	1	263.3	243.4	8.18	7.90
	2	261.2	242.3	7.80	
	3	259.3	240.7	7.73	
OP3-05	1	249	228.5	8.97	9.03
	2	247.4	227.1	8.94	
	3	248.4	227.5	9.19	

ตารางที่ ก.70 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ OP4

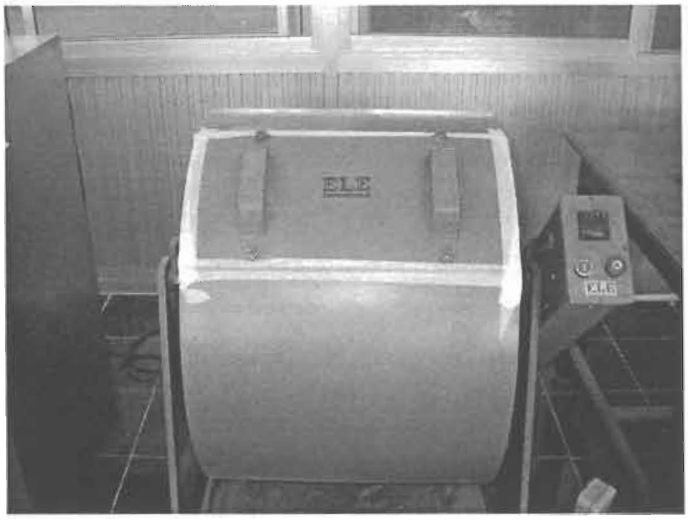
ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม %	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย %
OP4-01	1	270.3	260.4	3.80	3.80
	2	270.6	260.2	4.00	
	3	270.8	261.4	3.60	
OP4-02	1	277.2	266.9	3.86	4.37
	2	275.5	262.8	4.83	
	3	276.9	265.2	4.41	
OP4-03	1	266.2	251.3	5.93	5.35
	2	267.2	256.1	4.33	
	3	268.3	253.6	5.80	
OP4-04	1	265.2	250.1	6.04	6.05
	2	263.6	248.7	5.99	
	3	262.3	247.2	6.11	
OP4-05	1	247	230.6	7.11	6.98
	2	245.3	229.4	6.93	
	3	246.8	230.9	6.89	

ตารางที่ ก.71 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างที่ SA

ตัวอย่าง		น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึม %	ค่าการดูดซึมเฉลี่ย %
SA-01	1	279.2	265.9	5.00	4.73
	2	278.5	265.8	4.78	
	3	276.9	265.2	4.41	
SA-02	1	255.9	243.4	5.14	5.21
	2	255.3	242	5.50	
	3	257.9	245.6	5.01	
SA-03	1	268.4	252.9	6.13	6.19
	2	270	254.4	6.13	
	3	275	258.7	6.30	
SA-04	1	254.8	238.1	7.01	6.89
	2	253.4	237.2	6.83	
	3	250.3	234.3	6.83	
SA-05	1	268.3	249.8	7.41	7.47
	2	265.3	247.2	7.32	
	3	265.3	246.4	7.67	

ภาคผนวก ข.

รูปเครื่องมือและตัวอย่างการทดสอบ

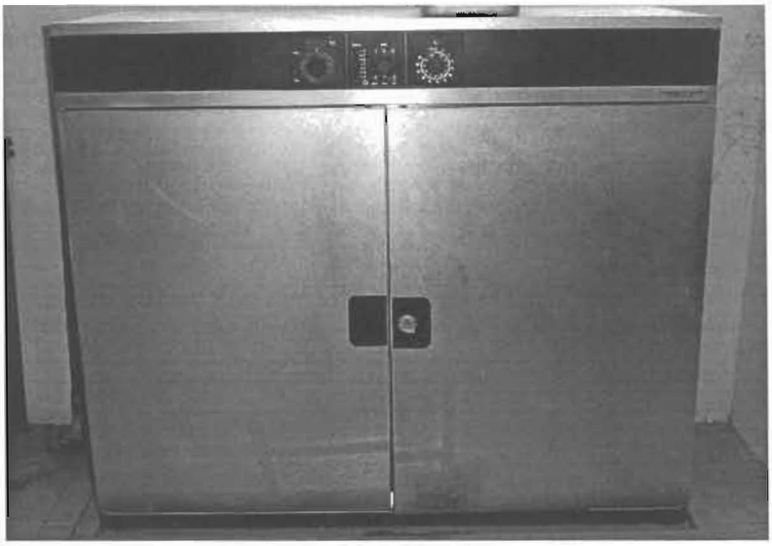


รูปที่ ข.1 เครื่องบดเถ้าปาล์มน้ำมัน

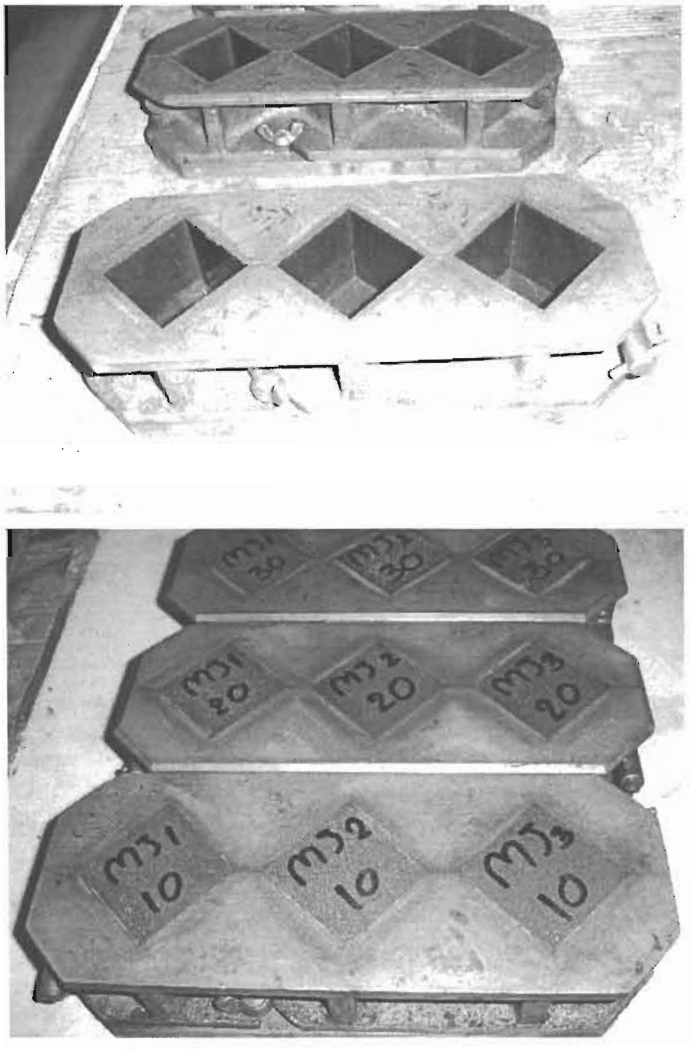
รูปที่ ข.2 เครื่องผสมมอร์ตาร์

รูปที่ ข.3 เครื่องทดสอบหาค่าการไหล

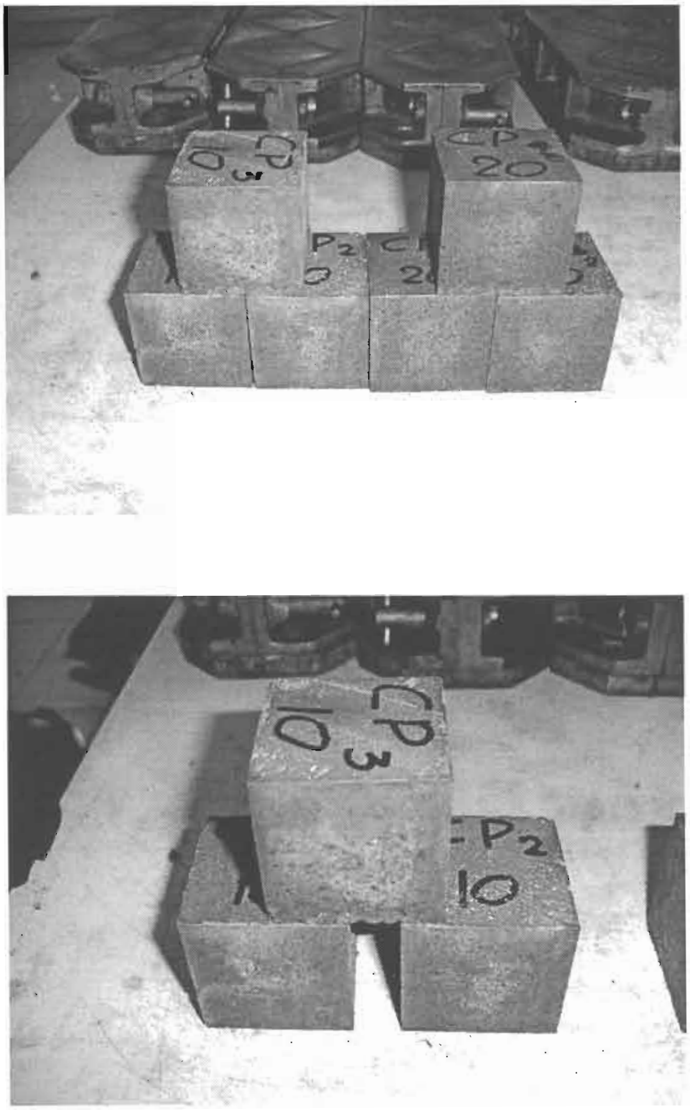
รูปที่ ข.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



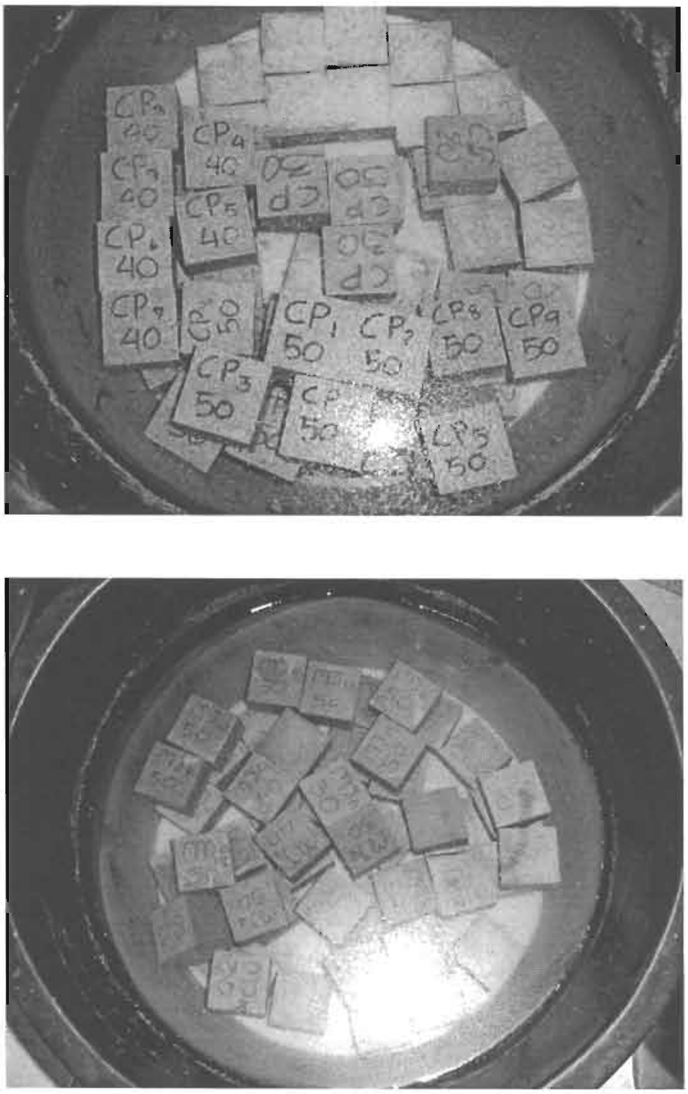
รูปที่ ข.5 ตู้อบ



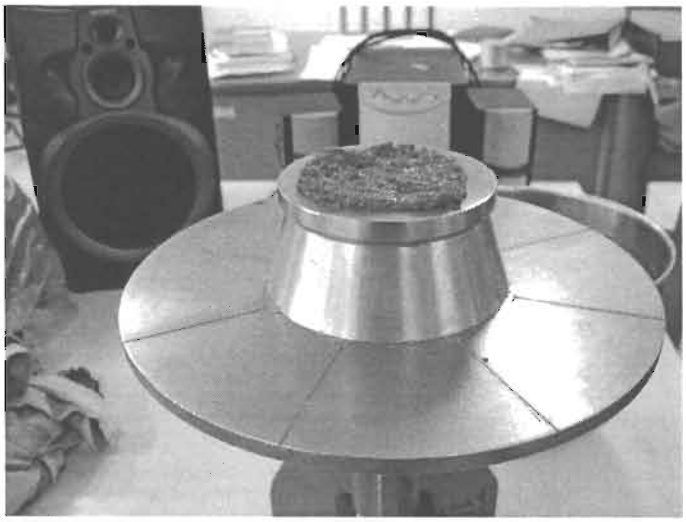
รูปที่ ข.6 แบบหล่อตัวอย่างกำลังรับแรงอัด รูปลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร



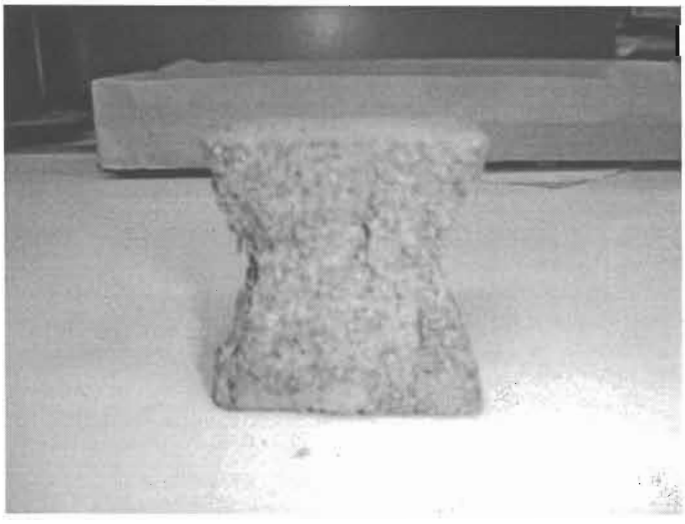
รูปที่ ข.7 ตัวอย่างกำลังรับแรงอัด รูปลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร



รูปที่ ข.8 การบ่มก้อนตัวอย่าง



รูปที่ ข.9 การทดสอบหาค่าการไหล



รูปที่ ข.10 ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่าง

รูปที่ ข.11 เครื่องคัดขนาดทราย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล นายสุรินทร์ มายูร

วัน เดือน ปีเกิด 17 พฤศจิกายน 2509

ประวัติการศึกษา

ระดับอาชีวศึกษา ประกาศนียบัตร วิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างก่อสร้าง
วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ พ.ศ.2529

ระดับปริญญาตรี อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมก่อสร้าง
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล พ.ศ. 2537

ระดับปริญญาโท ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

ประวัติการทำงาน อาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างก่อสร้าง
วิทยาลัยเทคนิคชุมพร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 10 มีนาคม พ.ศ. 2551

ข้าพเจ้า นายสุรินทร์ มายูร รหัสประจำตัว 49490213 เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีระดับปริญญาโท หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี อยู่บ้านเลขที่ 31 ถนนเพชรเกษม ตำบลท่าข้าม อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร รหัสไปรษณีย์ 86140 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ ตำแหน่ง คณบดี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆของภาคใต้ตอนบนต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้น จากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตามข้าพเจ้าจะต้องระบุวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญา ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ..ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายสุรินทร์ มายูร)

ลงชื่อ..ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ)

ลงชื่อ..พยาน
(ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด)

ลงชื่อ..พยาน
(นางกิ่งแก้ว ผลตระกูล)