

การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้

นายทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ASSESSMENT OF FIRE-DAMAGED CONCRETE

Mr. Totsawat Daungwilailuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้

โดย

นายทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิ์ศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวินทร์ เลื่อนวารี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธชวีร์ ลีละวัฒน์)

ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ : การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้ (ASSESSMENT OF FIRE-DAMAGED CONCRETE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิฑิต ปานสุข, 160 หน้า.

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเสื่อมสภาพเมื่อถูกเพลิงไหม้หากจะนำโครงสร้างดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ การซ่อมแซมอาจเป็นตัวเลือกที่ดีในแง่ของค่าใช้จ่ายและเวลา แต่ทั้งนี้การซ่อมแซมจะกระทำที่ผิวซึ่งความเสียหายจากเพลิงไหม้ก็จะเกิดขึ้นที่ผิวเช่นกัน โดยอุณหภูมิแต่ละระดับจะทำให้เกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทราบถึงระดับความเสียหายที่ผิวดังกล่าวก่อน จึงจะหาวิธีการซ่อมแซมผิวหน้าที่เหมาะสมกับความเสียหายนั้นๆ ได้ เช่นนั้นแล้วจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษเพื่อตรวจสอบและจำแนกระดับความเสียหายขององค์อาคารที่เกิดเพลิงไหม้ โดยจะมีดัชนีชี้วัดคือการทดสอบแบบไม่ทำลายและแบบกึ่งทำลาย

ในงานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งถูกเผาไฟเพียงด้านเดียวที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามมาตรฐาน ASTM E119 แล้วจึงตรวจสอบสภาพความเสียหาย โดยใช้การทดสอบ 2 วิธีได้แก่ การทดสอบแบบไม่ทำลายประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยสายตา ผลที่ได้คือความเสียหายของชิ้นตัวอย่างจะรุนแรงขึ้น และสีจะเปลี่ยนชัดเจนขึ้นเมื่อถูกเผาไปเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อหาระดับความลึกที่เสียหายซึ่งจะตรวจวัดและคำนวณความเสียหายได้ตั้งแต่ปานกลางจนถึงมาก และการทดสอบแบบกึ่งทำลายประกอบด้วยวิธีค้อนกระแทก ซึ่งผลการทดสอบพบว่ายิ่งระยะเวลาถูกเผาไฟนานขึ้นค่าการสะท้อนจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ การเจาะทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ของชิ้นตัวอย่างและระดับความลึกของข้อที่เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลของวิธีคลื่นอัลตราโซนิกแล้วจะมีค่าที่มากกว่า และการดึงทดสอบ ซึ่งพบว่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกันจะสามารถสร้างเป็นตารางสำหรับจำแนกระดับความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กและสามารถทำนายความลึกของผิวที่มีกำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซมได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโครงสร้าง.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5370545921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CONCRETE/FIRE/ASSESSMENT/DAMAGED

TOTSAWAT DAUNGWILAILUK : ASSESSMENT OF FIRE-DAMAGED CONCRETE.

ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHIT PANSUK, Ph.D., 160pp

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Reinforced concrete structure after fire cannot be effectively used as it was. Repairing may be a better in terms of money and time. However, repairing do on the surface concrete which is fire damaged. The degree of damage varied on temperature. Therefore, it is necessary to know the degree of damage of surface before use the suitable repair. The research study is to determine the degree of fire damaged concrete. It is an indicator of non-destructive testing and partially destructive testing.

Concrete specimens are only one side of the fire in time 30, 60, 90 and 120 minutes according to ASTM E119. Non-destructive testing used to investigation. Visual inspection, concrete is severely damaged and color will change in fire a long time. Ultrasonic pules velocity test, measure and calculate depth of damage since moderate to severe damage of specimen. Partially destructive testing used to investigation. Schmidt hammer, rebound number decrease when time increase. Core testing for integrity of the samples and depth of color changes. When compared with the results of ultrasonic pulse velocity test will be over. Pull off test, trend of bond strength of concrete are decrease with time. The data were analyzed to create class of damage of reinforced concrete and predict the depth of damage.

Department : ...Civil Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study : ...Structural Engineering..Advisor's Signature.....

Academic Year :2012.....

กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความอุปถัมภ์ ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำสั่งสอนที่ดีเสมอมา ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นอย่างยิ่งที่อนุมัติเงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ในปีงบประมาณ 2554 จนทำให้โครงการนี้สำเร็จเป็นจริงขึ้นมาได้ ขอขอบพระคุณบริษัทซีโก้ (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัทรีโทรฟิต สตาร์เจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ให้ความร่วมมือ และให้การสนับสนุนตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง คุณอนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ คุณพรเพ็ญ ลิ้มปนิลชาติ และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือจนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ต้องขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่เป็นแรงผลักดัน สนับสนุนและให้กำลังใจ ตัวกระผมให้ผ่านงานวิจัยนี้ไปได้จนประสบผลสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	๑
สารบัญ	๗
สารบัญตาราง	๘
สารบัญภาพ	๙
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. พฤติกรรมของคอนกรีต	4
2.1.1. ลักษณะของคอนกรีตเมื่อถูกเผาไฟ	4
2.1.2. คุณสมบัติของคอนกรีตหลังเผาไฟ	5
2.2. การรวบรวมข้อมูลและการตรวจสอบคอนกรีตที่ถูกเผาไฟ	11
2.3. ผลของผิวคอนกรีตที่มีต่อการเสริมกำลัง.....	18
2.4. มาตรฐานสำหรับจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้.....	20
2.5. มาตรฐานในการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหาย	22
2.6. มาตรฐานงานการเสริมกำลัง	28
2.7. มาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพ	29
บทที่3 การดำเนินงานวิจัย	36
3.1. เตรียมคอนกรีตตัวอย่าง	36
3.2. จำลองสภาวะเพลิงไหม้.....	38
3.3. ตรวจสอบสภาพความเสียหาย.....	39
3.3.1. ทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย	39
3.3.2. ทำการทดสอบแบบกึ่งทำลาย	45
3.4. ปรับผิวตัวอย่าง	47
3.5. การทดสอบด้วยวิธีดึงทดสอบ	47
3.6. จัดระดับความเสียหาย	51
3.7. ซ่อมแซมตัวอย่างที่เสียหาย	51

3.8. ตรวจสอบคุณสมบัติภายหลังการซ่อม.....	52
3.9. สรุปผล.....	52
3.10.แผนผังแสดงลำดับการวิจัย.....	53
บทที่4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์.....	54
4.1. คุณสมบัติของคนกรีต.....	54
4.2. ผลการจำลองเพลิงไหม้.....	54
4.2.1. อุณหภูมิภายในเตา.....	54
4.2.2. อุณหภูมิบนผิวชั้นตัวอย่าง.....	63
4.2.3. อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง.....	66
4.3. ผลการตรวจสอบสภาพความเสียหาย.....	86
4.3.1. การตรวจสอบด้วยสายตา.....	86
4.3.2. ผลการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	95
4.3.3. ผลการทดสอบด้วยค้อนกระทบ.....	110
4.3.4. ผลการเจาะทดสอบ.....	113
4.3.5. ผลการดึงทดสอบ (Pull off test).....	119
4.3.6. ผลการซ่อมแซม.....	144
4.4. การจำแนกระดับความเสียหาย.....	145
4.4.1. การพินิจด้วยสายตา.....	145
4.4.2. การทดสอบในที่.....	145
4.5. การประมาณหาความลึกของกำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซม.....	147
บทที่ 5 สรุปผล.....	151
ภาคผนวก.....	156
ภาคผนวก ก.....	157
คุณสมบัติวัสดุซ่อม.....	157
1.วัสดุซ่อม ก. Sika MonoTop -412 TH.....	157
2.วัสดุซ่อม ข. Sikadur -31 CF normal.....	157
3.วัสดุซ่อม ค. Sikadur -41 CF normal.....	158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	160

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2 ลักษณะของรูปแบบการหลุดร่อนต่างๆ [12]	9
ตารางที่ 3 แสดงแนวทางสำหรับการตรวจสอบความเสียหาย [16]	12
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีต่างๆ[18]	15
ตารางที่ 5 แสดงการจำแนกระดับความเสียหาย [15].....	16
ตารางที่ 6 แสดงระดับความเสียหาย [16].....	17
ตารางที่ 7 ขนาดของความกว้างรอยร้าวที่ยอมให้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ [27].....	26
ตารางที่ 8 จำนวนชิ้นงานตัวอย่าง.....	38
ตารางที่ 9 ชนิดผลิตภัณฑ์และวิธีที่ใช้ซ่อมแซม	51
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของชิ้นตัวอย่าง	54
ตารางที่ 11 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 30 นาที.....	55
ตารางที่ 12 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 60 นาที.....	56
ตารางที่ 13 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 60 นาที.....	57
ตารางที่ 14 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.....	58
ตารางที่ 15 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม.	60
ตารางที่ 16 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.....	62
ตารางที่ 17 สรุปผลอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวของแต่ละชิ้นตัวอย่าง	66
ตารางที่ 18 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกต่างๆ สำหรับกำลังอัด 240KSC	78
ตารางที่ 19 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 240KSC ระยะหุ้ม 1 ซม	78
ตารางที่ 20 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกสำหรับกำลังอัด 240KSC ระยะหุ้ม 3 ซม.	78
ตารางที่ 21 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกต่างๆ สำหรับกำลังอัด 350KSC	79
ตารางที่ 22 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 350KSC ระยะหุ้ม 1 ซม.	79
ตารางที่ 23 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 350KSC ระยะหุ้ม 3 ซม.	79
ตารางที่ 24 ผลของความรุนแรงไฟ.....	80
ตารางที่ 25 สภาพผิวคอนกรีตกำลังอัด 240KSC หลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆ	81
ตารางที่ 26 สภาพผิวคอนกรีตกำลังอัด 350KSC หลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆ	84
ตารางที่ 27 ผลการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตาสำหรับกำลังอัด 240KSC	86
ตารางที่ 28 ผลการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตาสำหรับกำลังอัด 350KSC	87

ตารางที่ 29 ภาพผิวก่อนและหลังใช้โปรแกรมในการจำแนกความเสียหาย กำลังอัด 240 KSC.....	89
ตารางที่ 30 ภาพผิวก่อนและหลังใช้โปรแกรมในการจำแนกความเสียหาย กำลังอัด 350 KSC.....	91
ตารางที่ 31 ความเสียหายโดยใช้โปรแกรมสำหรับกำลังอัดที่ 240KSC.....	93
ตารางที่ 32 ความเสียหายโดยใช้โปรแกรมสำหรับกำลังอัดที่ 350KSC.....	94
ตารางที่ 33 ผลเปรียบเทียบร้อยละความเสียหายของชั้นตัวอย่าง 240KSC.....	94
ตารางที่ 34 ผลเปรียบเทียบร้อยละความเสียหายของชั้นตัวอย่าง 350KSC.....	95
ตารางที่ 35 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240KSC ชั้นล่าง.....	110
ตารางที่ 36 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240KSC ชั้นบน.....	111
ตารางที่ 37 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350KSC ชั้นล่าง.....	111
ตารางที่ 38 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350KSC ชั้นบน.....	111
ตารางที่ 39 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240KSC ระยะหุ้ม 1 ซม. และ 3 ซม. ...	112
ตารางที่ 40 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350KSC ระยะหุ้ม 1 ซม. และ 3 ซม. ...	112
ตารางที่ 41 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 240 KSC ชุดที่1	114
ตารางที่ 42 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 240 KSC ชุดที่2	115
ตารางที่ 43 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 350 KSC ชุดที่1	116
ตารางที่ 44 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 350 KSC ชุดที่2	117
ตารางที่ 45 ผลการดึงทดสอบ 240KSC ไม่เผาไฟ.....	120
ตารางที่ 46 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 30นาที ชั้นล่าง	120
ตารางที่ 47 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 30นาที ชั้นบน.....	121
ตารางที่ 48 แสดงผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 60นาที ชั้นล่าง.....	121
ตารางที่ 49 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 60นาที ชั้นบน	122
ตารางที่ 50 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 90นาที ชั้นล่าง	123
ตารางที่ 51 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 90นาที ชั้นบน.....	124
ตารางที่ 52 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง.....	125
ตารางที่ 53 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน	126
ตารางที่ 54 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง	127
ตารางที่ 55 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน	128
ตารางที่ 56 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง	129
ตารางที่ 57 ผลการดึงทดสอบ 240KSC เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน	130

ตารางที่ 58 ผลการดิ่งทดสอบ 240KSC ไม่เผาไฟ	131
ตารางที่ 59 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 30นาที่ ชั้นล่าง.....	131
ตารางที่ 60 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 30นาที่ ชั้นบน	132
ตารางที่ 61 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 60นาที่ ชั้นล่าง	133
ตารางที่ 62 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 60นาที่ ชั้นบน	134
ตารางที่ 63 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 90นาที่ ชั้นล่าง	135
ตารางที่ 64 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 90นาที่ ชั้นบน	136
ตารางที่ 65 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นล่าง	137
ตารางที่ 66 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นบน	138
ตารางที่ 67 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 1ซม. ชั้นล่าง	139
ตารางที่ 68 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 1ซม. ชั้นบน	140
ตารางที่ 69 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นล่าง	141
ตารางที่ 70 ผลการดิ่งทดสอบ 350KSC เผาไฟ 120นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นบน	142
ตารางที่ 71 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีดิ่งทดสอบบนผิวที่ถูกเผาไฟ	144
ตารางที่ 72 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีดิ่งทดสอบบนผิวที่ไม่ถูกเผาไฟ	144
ตารางที่ 73 การจำแนกระดับความเสียหาย.....	146
ตารางที่ 74 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ก.....	157
ตารางที่ 75 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ข.	157
ตารางที่ 76 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ค.	158

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะผิวคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ [7].....	5
ภาพที่ 2 คอนกรีตที่ถูกเผาไฟ.....	7
ภาพที่ 3 กระบวนการเกิดการหลุดร่อนโดยความชื้นที่อุดตัน (MOISTURE CLOG SPALLING)	8
ภาพที่ 4 เส้นโค้งของGLOW[18].....	14
ภาพที่ 5 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119	21
ภาพที่ 6 การทดสอบแรงดึง (ASTM D4541).....	32
ภาพที่ 7 การทดสอบ INDIRECT TEST	33
ภาพที่ 8 แสดงการทดสอบโดยเคลื่อนตัวรับสัญญาณออกไป.....	34
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทาง และจุดเปลี่ยนความชื้น.....	34
ภาพที่ 10 การตั้งแบบหล่อขึ้นตัวอย่าง	36
ภาพที่ 11 ขนาดของขึ้นตัวอย่างและการวางเหล็กเสริม	37
ภาพที่ 12 การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่เหล็กเสริม	37
ภาพที่ 13 การวางขึ้นตัวอย่างในเตา	39
ภาพที่ 14 แผ่นอะคริลิคสำหรับตรวจนับความเสียหาย	40
ภาพที่ 15 การตั้งค่า SMART SHARPEN	41
ภาพที่ 16 การตั้งค่า SURFACE BLUR	41
ภาพที่ 17 การตั้งค่าสีและการถมสี.....	42
ภาพที่ 18 การปรับภาพเป็นขาวดำ	42
ภาพที่ 19 การอ่านค่า	43
ภาพที่ 20 การแบ่งพื้นที่ทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก.....	44
ภาพที่ 21 การทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก.....	44
ภาพที่ 22 การแบ่งพื้นที่ทดสอบค้อนกระทบ	45
ภาพที่ 23 การทดสอบด้วยค้อนกระทบ.....	45
ภาพที่ 24 ตำแหน่งการเจาะคอนกรีตเพื่อดูความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีต	46
ภาพที่ 25 การเจาะขึ้นตัวอย่าง	46
ภาพที่ 26 ตำแหน่งการสกัดผิว	47
ภาพที่ 27 การใช้ใบตัดตัดรอบบริเวณที่จะทำการทดสอบ	48
ภาพที่ 28 การใช้สว่านสกัดผิวให้ได้ความลึกใกล้เคียงกับที่ต้องการ	48

ภาพที่ 29 การใช้เครื่องเจียร เจียรให้เรียบและให้ได้ความลึกที่ต้องการ	48
ภาพที่ 30 แสดงพื้นที่ทดสอบ	49
ภาพที่ 31 การติดตั้งลูกเหล็ก.....	50
ภาพที่ 32 เครื่องดึงทดสอบ (TENSILE LOADING) สำหรับการทดสอบดึงทดสอบ	50
ภาพที่ 33 ลำดับการซ่อมเรียงจาก A-E ตามลำดับ.....	52
ภาพที่ 34 แผนผังแสดงการทำงาน.....	53
ภาพที่ 35 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 30 นาที.....	55
ภาพที่ 36 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 60 นาที.....	56
ภาพที่ 37 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 90 นาที.....	57
ภาพที่ 38 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.	59
ภาพที่ 39 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม.	61
ภาพที่ 40 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.	62
ภาพที่ 41 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 30 นาที	63
ภาพที่ 42 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 60 นาที	63
ภาพที่ 43 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 90 นาที	64
ภาพที่ 44 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.	64
ภาพที่ 45 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม.	65
ภาพที่ 46 คุณหมุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.	65
ภาพที่ 47 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 30 นาที 240KSC ชั้นบน	67
ภาพที่ 48 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 30 นาที 350KSC ชั้นล่าง	67
ภาพที่ 49 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 30 นาที 350KSC ชั้นบน	68
ภาพที่ 50 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 60 นาที 240KSC ชั้นล่าง	68
ภาพที่ 51 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 60 นาที 350KSC ชั้นล่าง	69
ภาพที่ 52 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 60 นาที 350KSC ชั้นบน	69
ภาพที่ 53 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 90 นาที 240KSC ชั้นล่าง	70
ภาพที่ 54 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 90 นาที 350KSC ชั้นล่าง	70
ภาพที่ 55 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 90 นาที 240KSC ชั้นบน	71
ภาพที่ 56 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 90 นาที 350KSC ชั้นบน	71
ภาพที่ 57 คุณหมุมิภายในขึ้นตัวอย่าง 120 นาที 240KSC ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง.....	72

หน้า

ภาพที่ 87 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 90 นาที ชั้นล่าง	105
ภาพที่ 88 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 90 นาที ชั้นบน	105
ภาพที่ 89 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง	106
ภาพที่ 90 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน	106
ภาพที่ 91 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง	107
ภาพที่ 92 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน	107
ภาพที่ 93 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง	108
ภาพที่ 94 ผลของกำลังอัด 350KSC เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน	108
ภาพที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและความลึกจากการคำนวณ.....	109
ภาพที่ 96 ความสัมพันธ์ที่ลดลงระหว่างค่า REBOUND NUMBER และความรุนแรงไฟ	113
ภาพที่ 97 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 240 KSC ชุดที่1	114
ภาพที่ 98 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 240 KSC ชุดที่2	115
ภาพที่ 99 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 350 KSC ชุดที่1	116
ภาพที่ 100 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 350 KSC ชุดที่2	117
ภาพที่ 101 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความรุนแรงไฟและความลึกของสีที่เปลี่ยนไป.....	118
ภาพที่ 102 เปรียบเทียบความลึกสำหรับชิ้นตัวอย่าง 240KSC	118
ภาพที่ 103 เปรียบเทียบความลึกสำหรับชิ้นตัวอย่าง 350KSC	119
ภาพที่ 104 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 30 นาที ชั้นล่าง.....	120
ภาพที่ 105 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 30 นาที ชั้นบน.....	121
ภาพที่ 106 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 60 นาที ชั้นล่าง.....	122
ภาพที่ 107 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 60 นาที ชั้นบน.....	123
ภาพที่ 108 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 90 นาที ชั้นล่าง.....	124
ภาพที่ 109 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 90 นาที ชั้นบน.....	125
ภาพที่ 110 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง.....	126
ภาพที่ 111 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน.....	127
ภาพที่ 112 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง.....	128
ภาพที่ 113 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน.....	129
ภาพที่ 114 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง.....	130
ภาพที่ 115 แนวโน้มของข้อมูล 240KSC เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน.....	131

ภาพที่ 116 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 30นาที่ ชั้นล่าง..... 132

ภาพที่ 117 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 30นาที่ ชั้นบน..... 133

ภาพที่ 118 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 60นาที่ ชั้นล่าง..... 134

ภาพที่ 119 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 60นาที่ ชั้นบน..... 135

ภาพที่ 120 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 90นาที่ ชั้นล่าง..... 136

ภาพที่ 121 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 90นาที่ ชั้นบน..... 137

ภาพที่ 122 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 2ซม ชั้นล่าง..... 138

ภาพที่ 123 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 2ซม ชั้นบน..... 139

ภาพที่ 124 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 1ซม ชั้นล่าง..... 140

ภาพที่ 125 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 1ซม ชั้นบน..... 141

ภาพที่ 126 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม ชั้นล่าง..... 142

ภาพที่ 127 แนวโน้มของข้อมูล 350KSC เผา 120นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม ชั้นบน..... 143

ภาพที่ 128 ค่าประมาณระหว่างเวลาและอุณหภูมิของขึ้นตัวอย่าง 240ksc ที่ความลึกใดๆ 147

ภาพที่ 129 ค่าประมาณระหว่างเวลาและอุณหภูมิของขึ้นตัวอย่าง 350ksc ที่ความลึกใดๆ 148

ภาพที่ 130 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและอัตราส่วนกำลังตั้งค่าง 148

ภาพที่ 131 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความรุนแรงไฟที่ระยะเวลาเผาไฟต่างๆ 149

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุบัติเหตุอันเกิดจากเพลิงไหม้สามารถเกิดขึ้นได้อยู่ตลอดเวลาซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงและเป็นบริเวณกว้าง โดยเฉพาะกับความเสียหายของอาคารและสิ่งก่อสร้างที่เสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็วจากเหตุการณ์ดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายใน การหลุดร่อน แยกชั้น การสูญเสียความสามารถด้านกำลังของวัสดุตลอดจนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต[1] เหล่านี้คือผลที่ตามมาเนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง จนอาจทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก

การรื้อถอนอาคารที่ถูกเพลิงไหม้เพื่อการสร้างใหม่อาจไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป เมื่อพิจารณาจากค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องเสียไป การซ่อมแซมอาจเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าในหลายๆโอกาส แต่ต้องคำนึงว่าความเสียหายจากเพลิงไหม้จะเกิดขึ้นที่ผิวจึงต้องพิจารณาการซ่อมแซมที่ผิวเป็นสำคัญ อีกทั้งอุณหภูมิแต่ละระดับจะทำให้องค์อาคารเกิดความเสียหายที่ผิวที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงระดับความเสียหายดังกล่าวและวิธีการซ่อมแซมผิวหน้าที่เหมาะสมกับความเสียหายนั้นๆ จากนั้นหากจำเป็นที่ต้องเสริมกำลังด้วยวัสดุอื่นเช่นวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ก็สามารถทำได้ต่อไป

จากมาตรฐานการซ่อมแซมของกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1901-51[2] ซึ่งเป็นมาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมอาคาร นั้นจะกล่าวถึงความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้งานและการก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพแต่จะไม่มีกล่าวถึงการซ่อมโครงสร้างที่ถูกเผาไฟ แต่ถึงกระนั้นการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากเพลิงไหม้ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือการรีวัสดุเดิมที่เสียหายออกจนกระทั่งถึงเนื้อคอนกรีตที่แกร่งแล้วจึงซ่อมด้วยวัสดุซ่อมที่วิศวกรควบคุมเห็นสมควร ดังนั้นแล้วจึงสามารถบอกได้ว่าในประเทศไทยเวลานี้ยังไม่มีหลักเกณฑ์อะไรที่จะใช้ในการจำแนกและซ่อมแซมโครงสร้าง และนี่เองจึงเป็นที่มาและความสำคัญของงานวิจัยฉบับนี้

อย่างไรก็ดีการซ่อมแซมในรายงานวิจัยฉบับนี้ก็ยังคงต้องยึดเอาวิธีการซ่อมแซมดังกล่าวเป็นพื้นฐาน อย่างน้อยที่สุดก็เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ที่นำไปใช้งานเช่นนั้นแล้วจุดประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบระดับความเสียหายขององค์อาคารที่เกิดจากเพลิงไหม้ จากนั้นจะหาวิธีการซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีตที่เหมาะสมกับระดับความเสียหายดังกล่าว โดยที่ขั้นตอนทั้งสองนั้นจะมีดัชนีชี้วัดเป็นค่ากำลังและแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลความเสียหายของคอนกรีตที่ถูกเผาไฟด้วยตัวแปรต่างๆ เช่นระยะเวลาในการเผา ค่ากำลังของคอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริม ด้วยวิธีการพินิจด้วยสายตา การทดสอบแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing) และการทดสอบแบบกึ่งทำลาย (partial destructive testing) แล้วจึงนำมาจำแนกระดับความเสียหาย

2. เพื่อเสนอแนวทางในการหาพื้นผิวแกร่งของคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซมต่อไป

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตและเงื่อนไขของงานวิจัยมีดังนี้

1. การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบเผาไฟและการควบคุมอุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 [3]

2. ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดด้วยการ พินิจด้วยสายตา การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) ได้แก่ การเคาะฟังเสียง วิธีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity) และการทดสอบแบบกึ่งทำลาย (Semi Destructive Testing) ได้แก่ วิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer) การดึงทดสอบ (Pull off test) การเจาะทดสอบ (Core test)แล้วจำแนกระดับความเสียหายที่เกิด

3. การซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายโดยดำเนินการอ้างอิงจากมาตรฐานของ มยผ.1901-51 เป็นหลัก

4. ทำการทดสอบกำลังของชิ้นส่วนคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก และคลื่นอัลตราโซนิก ตามมาตรฐาน มยผ. 1501-51 ถึง 1507-51 [4]

5. การทดสอบการยึดเหนี่ยวระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตเดิมที่เสียหายกับวัสดุซ่อมผิวหน้าด้วยวิธีการดึงทดสอบ โดยดำเนินการตาม ASTM C1538 [5]

6. ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ซ่อมแซมไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะที่มีแรงภายนอกกระทำเหมือนองค์อาคารจริง

7. ชิ้นตัวอย่างที่ทำการเผามีอายุมากกว่า 28 วัน

8. คอนกรีตที่ใช้หล่อขึ้นตัวอย่างมีความหนาแน่นธรรมดาไม่มีสารผสมเพิ่ม

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลความเสียหายของคอนกรีตที่ถูกเผาไฟด้วยตัวแปรต่างๆ และสามารถนำมาจัดระดับความเสียหาย

2. ได้แนวทางในการประเมินและตรวจหาผิวแกร่งของผิวคอนกรีตที่ถูกเพลิงไหม้ก่อนทำการซ่อมแซม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. พฤติกรรมของคอนกรีต

2.1.1. ลักษณะของคอนกรีตเมื่อถูกเผาไฟ

ผลจากเพลิงไหม้นั้นอาจสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีต[6] เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ในทางกายภาพที่อุณหภูมิความร้อนต่างๆทำให้เกิดรอยร้าวตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ภายนอกและภายในเนื้อคอนกรีต ความชื้นในเนื้อคอนกรีตหากมีมากจะทำให้เกิดแรงดันของการระเหยที่สูงยังผลทำให้มีการหลุดร่อนของคอนกรีตที่ผิวหน้า ในทางเคมีความร้อนที่สูงจากเพลิงไหม้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบภายในเนื้อวัสดุ เกิดการเปลี่ยนรูปใหม่ของผลึกหรือเปลี่ยนสีไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นผลการทดสอบจากต่างประเทศที่อาจไม่สอดคล้องกับคอนกรีตในประเทศไทย

ในปี ค.ศ.2007 Arioiz [7] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยการผสมคอนกรีตที่แตกต่างกัน 4 ชนิด หล่อเป็นลูกบาศก์ขนาด 70 มม x70 มม x70 มม ตามมาตรฐานตุรกี จากนั้นจึงนำไปเผาไฟที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสจนถึง 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่ออนาที

ตารางที่ 1 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี [6]

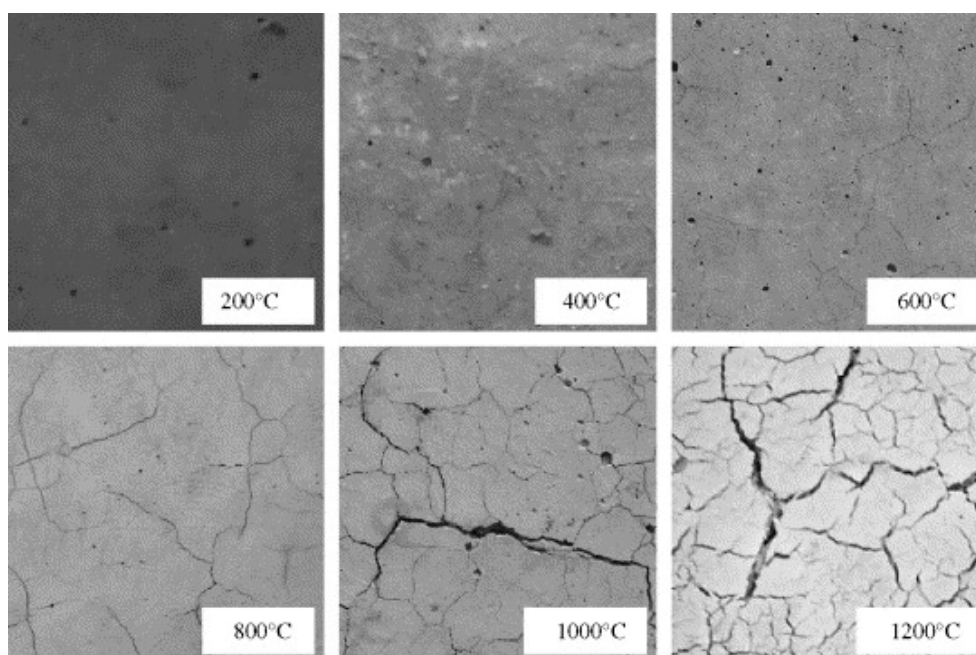
อุณหภูมิ	สีที่เปลี่ยนไป	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ	สภาพของคอนกรีต
0-290 °C	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
290-590 °C	สีชมพูถึงแดง	รอยร้าวที่ผิว (300°C) รอยร้าวที่ลึก (550°C) การหลุดร่อนของมวลรวม (575°C)	สภาพยังคงดีแต่กำลังลดลง
590-950 °C	เทาขาว	การหลุดร่อนที่ผิวแต่เห็นเหล็กเสริมไม่เกิน 25% ของเหล็กทั้งหมด (800°C) คายน้ำออกจนเป็นผง (900°C)	เปราะบางและแตกหักง่าย
950+ °C	เหลืองอ่อน	มีการหลุดร่อนเป็นบริเวณกว้าง	เปราะบางและแตกหักง่าย

ผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิถึง 400 องศาเซลเซียส บนผิวคอนกรีตตัวอย่างไม่พบรอยร้าวที่เห็นได้ชัดแต่สีของคอนกรีตจะเริ่มเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 600 องศาเซลเซียส จะเริ่มเห็นรอยร้าวกระจายแต่ไม่มากนัก เมื่ออุณหภูมิถึง 800 องศาเซลเซียส รอยแตกร้าวจะปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดและจะพบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิขึ้นไปถึง 1000 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส คอนกรีตจะแยกและแตกร้าวออกโดยสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 1

2.1.2. คุณสมบัติของคอนกรีตหลังเผาไฟ

1. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่น (Strength and elastic modulus)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังเผาไฟนั้นจะขึ้นกับรอยร้าวขนาดเล็ก (micro crack) ที่เกิดที่ผิวระหว่างมวลรวม และซีเมนต์เพสต์เองเป็นสำคัญ ซึ่งผลอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์เพสต์และการขยายตัวของมวลรวมทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กมากขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง[8] อีกทั้งสิ่งที่มีผลต่อกำลังที่จะเหลือในคอนกรีตหลังจากเย็นลงแล้วดังนี้



ภาพที่ 1 ลักษณะผิวคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ [7]

- 1.1. อุณหภูมิสูงสุดที่ได้รับ
- 1.2. ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน
- 1.3. สัดส่วนผสม
- 1.4. มวลรวม
- 1.5. น้ำหนักบรรทุกระหว่างที่ได้รับความร้อน

ในปี ค.ศ. 1981 Bennetts [9] ได้ทำการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตสูงขึ้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงและลดลงเร็วกว่าค่ากำลังอัด [Compressive Strength] ของคอนกรีตนั้น

ทั้งนี้ในปัจจุบัน อาคารที่ก่อสร้างมักใช้คอนกรีตที่มีสารผสมเพิ่มเช่น เถ้าลอย (fly ash) นั้นจะช่วยเพิ่มความทนไฟได้เพียงเล็กน้อย แต่หากใช้ซิลิกาฟูม (silicafume) จะทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดการหลุดร่อนสูงขึ้น เพราะทำให้มีการซึมผ่าน (permeability) ที่ต่ำลงซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ การหลุดร่อน ถัดไป

2. การเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในคอนกรีตเนื่องจากความร้อน

การเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุเนื่องจากความร้อนนั้นมีข้อดีคือหากใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบ (petrographic examination) จะทำให้สามารถรู้ได้ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่คอนกรีตได้รับ และความลึกของความเสียหายของคอนกรีต

สีที่เปลี่ยนแปลงไปของคอนกรีตก็เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุเช่นกัน สีแดง/ชมพู จะปรากฏอุณหภูมิมากกว่า 300°C ซึ่งนั่นทำให้สามารถประมาณได้ว่าขณะนั้นคอนกรีตเริ่มสูญเสียกำลังไปแล้ว ซึ่งสีที่เปลี่ยนไปนั้นจะขึ้นอยู่กับแร่ธาตุที่อยู่ในมวลรวมโดยที่มวลรวมที่เป็นทรายและหินปูนจะยังเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ดี ไม่ใช่แค่ความร้อนเท่านั้นที่ทำให้คอนกรีตเปลี่ยนสี ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากผลโดยธรรมชาติของมวลรวมหรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (carbonation) ก็เป็นไปได้ ซึ่งนั่นจำเป็นต้องตรวจสอบให้ดี

3. รอยร้าวเนื่องจากไฟ

ที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการขยายตัวของเหล็กเสริมจะมีมากกว่าคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงเค้นและทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆเหล็กเสริม นอกจากนี้รอยร้าวอาจเกิดจากบริเวณที่เกิดการหดตัวแบบแห้ง บริเวณที่รับแรงดัด ก็เป็นได้ นอกเหนือจากนี้อุณหภูมิที่

แตกต่างกันระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟลสก็ทำให้เกิดเป็นรอยร้าวได้เช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งรอยแตกลายงาบนผิวคอนกรีต

4. การหลุดร่อน (Spalling) [10] ในภาพที่ 2 จะแสดงความเสียหายจากการหลุดร่อนของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจากการศึกษาของ Harmathy [11] พบว่าลักษณะการหลุดร่อนของคอนกรีตที่มีอุณหภูมิสูงมีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือ

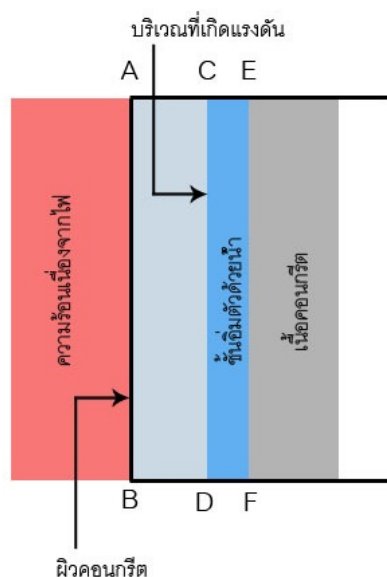
1) การหลุดร่อนเฉพาะที่ (Local spalling) คือการแตกเฉพาะจุดเช่นการแตกที่ผิวการแตกที่มุม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อุณหภูมิสูงของคอนกรีต

2) การหลุดลอก (Sloughing off) คือการแยกตัวของผิวคอนกรีตที่เกิดระหว่างการเผาไฟ ซึ่งการเกิดการหลุดร่อนลักษณะนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

3) การหลุดร่อนระเบิดออก (Explosive spalling) คือการเกิดการหลุดร่อนอย่างรุนแรง มีการระเบิดเนื่องจากแรงดันของความชื้นจากภายในจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การหลุดร่อนโดยความชื้นที่อุดตัน (Moisture clog spalling)



ภาพที่ 2 คอนกรีตที่ถูกเผาไฟ



ภาพที่ 3 กระบวนการเกิดการหลุดร่อนโดยความชื้นที่อุดตัน (moisture clog spalling)

การหลุดร่อนใน 2 แบบแรกไม่ค่อยจะเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างเท่าใดนัก แต่การหลุดร่อนแบบที่ 3 นั้นจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอย่างรุนแรง บางครั้งการหลุดร่อนทำให้เห็นถึงเนื้อเหล็กเสริมภายในก็เกิดขึ้นได้ อีกทั้งยังเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งสามารถสรุปกระบวนการเกิดความเสียหายได้ว่า จากภาพที่ 3 เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตสูงขึ้น (ผิว A-B) เนื่องจากเพลิงไหม้ ความชื้นบริเวณนั้นจะเคลื่อนหนีความร้อนผ่านเข้าไปยังชั้นภายในที่เย็นกว่า (ชั้น C-D) จนกระทั่งสะสมกลายเป็นชั้นอิมมิดด้วยน้ำ (ชั้น CD-EF) เมื่อความร้อนผ่านเข้ามาถึงผิวชั้นอิมมิด (C-D) ทำให้ความชื้นที่ผิวชั้นอิมมิดนั้นระเหยกลายเป็นไอ และหากไอนั้นไม่สามารถเคลื่อนผ่านชั้นอิมมิดไปได้จึงจำเป็นต้องเคลื่อนผ่านชั้นความร้อนแทน (ชั้น AB-CD) และหากชั้นด้านที่รับความร้อนมีการซึมผ่านต่ำทำให้ไอระเหยออกไปไม่ได้ก็จะเกิดความดันสูงที่ผิวชั้นที่อิมมิด และเมื่อความดันดังกล่าวมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตก็จะเกิดการหลุดร่อนขึ้น กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำไปมาเรื่อยๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความหนาของรอยแตกจะประมาณ 25 มิลลิเมตรจากผิวสัมผัสไฟ

แต่จากเอกสาร fib [12] ได้จำแนกการหลุดร่อนออกเป็น 6 ประเภทคือ

1. การหลุดร่อนที่มวลรวม (aggregate spalling)
2. การหลุดร่อนระเบิดออก (explosive spalling)
3. การหลุดร่อนที่ผิวหน้า (surface spalling)
4. การหลุดร่อนแบบหลุดลอก (sloughing off spalling)

5. การหลุดร่อนที่มุม (corner spalling)

6. การหลุดร่อนเมื่อปล่อยให้เย็นลง (post cooling spalling)

โดยที่การหลุดร่อน 3 ประเภทแรกเกิดในช่วงแรกของการเผาไฟ และ 3 ประเภทหลังจะเกิดหลังจากนั้น ทั้งนี้ปัจจัย ความรุนแรงและช่วงเวลาที่จะเกิดการหลุดร่อนจะเป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะของรูปแบบการหลุดร่อนต่างๆ [12]

การหลุดร่อน	เวลาที่น่าจะเกิด	ลักษณะ	เสียง	ผลกระทบ	สิ่งที่มีผล
มวลรวม	7-30 นาที	แตกออก	เกิดเสียงดัง เล็กๆ (Popping)	เล็กน้อย	H, A, S, D, W
มุม	30-90 นาที	ไม่รุนแรง	ไม่มี	อาจรุนแรง	T, A, Ft, R
ผิวหน้า	7-30 นาที	รุนแรง	เกิดเสียงดัง เปรี๊ยะ (Cracking)	อาจรุนแรง	H, W, P, Ft
ระเบิดออก	7-30 นาที	รุนแรง	ระเบิดเสียง ดัง (Loud bang)	รุนแรง	H, A, S Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
หลุดลอก	เมื่อคอนกรีตอ่อนแอ	ไม่รุนแรง	ไม่มี	อาจรุนแรง	T, Fs, L, Q, R
หลังจากปล่อยให้เย็น	ดูดซึมความชื้น ระหว่างและหลังจาก ปล่อยให้เย็นตัว	ไม่รุนแรง	ไม่มี	อาจรุนแรง	เหมือนกับการหลุดลอก แต่เพิ่ม W1, AT

โดยที่

A = การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของมวลรวม (Aggregate thermal expansion)

D = การแพร่กระจายความร้อนของมวลรวม (Aggregate thermal diffusivity)

Fs = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (Shear strength of concrete)

Ft = กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile strength of concrete)

G = อายุของคอนกรีต (Age of concrete)

H = อัตราความร้อน (Heating Rate)

L = น้ำหนักบรรทุก (Loading)

O = รายละเอียดความร้อน (Heating profile)

AT = ชนิดของมวลรวม (Aggregate type)

P = การซึมผ่าน (Permeability)

Q = รูปร่างหน้าตัด (Section shape)

R = การเสริมกำลัง (Reinforcement)

S = ขนาดของมวลรวม (Aggregate size)

T = อุณหภูมิสูงสุด (Max temperature)

W = ปริมาณความชื้น (Moisture content)

Z = ขนาดหน้าตัด (Section size)

W1 = การดูดซึมความชื้น (Moisture absorption)

ความเสียหายที่เกิดจากการหลุดร่อนนั้นรุนแรงและยังมีนัยสำคัญอยู่ในปี ค.ศ.2000 Hertz [13] ได้ทำการศึกษาถึงขีดจำกัดในการหลุดร่อนของคอนกรีตที่ถูกเผาไฟ ในงานวิจัยดังกล่าวได้แบ่งการศึกษาคอนกรีตออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. คอนกรีตหนาแน่น หรือคอนกรีตกำลังสูง หมายถึง คอนกรีตที่มีส่วนผสมเพิ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกาฟุ่ม และคอนกรีตหนาแน่นนี้สามารถจำแนกออกได้เป็นอีก 2 ประเภทย่อยคือ

1.1. คอนกรีตหนาแน่นธรรมดา (Dense) หมายถึงคอนกรีตหนาแน่นที่จะมีการหลุดร่อนเมื่อถูกเผาไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 800 องศาเซลเซียส ได้ก็ต่อเมื่ออย่างน้อยต้องมีหน่วยแรงเค้นเนื่องจากอุณหภูมิหรือหน่วยแรงเค้นภายนอกประกอบด้วย

1.2. คอนกรีตหนาแน่นขั้นพิเศษ (Super Dense) หมายถึงคอนกรีตหนาแน่นที่ไม่จำเป็นต้องมีความเค้นภายนอกใดๆก็สามารถจะเกิดการหลุดร่อนได้เมื่อถูกเผาไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 800 องศาเซลเซียสเช่นกัน

2. คอนกรีตทั่วไป หมายถึง คอนกรีตที่ผสมและใช้งานโดยทั่วไป

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงของการหลุดร่อนมีอยู่มากแต่ที่สำคัญที่สุดคือความชื้นภายในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่ไม่มีการผสมสารผสมเพิ่มที่มีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์และมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแล้ว คอนกรีตนั้นจะไม่มี การหลุดร่อนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าคอนกรีตนั้นมีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 3-4 แล้ว ความเสี่ยงนั้นจะมีเล็กน้อย

ในปี ค.ศ.1991 Ellingwood และ Lin [14] ได้ทำการตรวจสอบเรื่องกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อได้รับผลจากเพลิงไหม้ เพื่อศึกษาถึงผลจากระยะไหม้เหล็กและชนิดของกราฟไฟมาตฐาน ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าองค์อาคารที่รับผลกระทบจากเพลิงไหม้จะวิบัติเนื่องจากแรงดัดเป็นหลักอีกทั้งระยะไหม้มีผลต่อการโก่งตัวของคานนั้นหมายความว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนไม่ได้ควบคุมการวิบัติดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กราฟไฟมาตฐานที่ต่างกันในการจำลองสภาวะเพลิงไหม้จะมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นส่วนที่ทำการทดลองด้วย

2.2. การรวบรวมข้อมูลและการตรวจสอบคอนกรีตที่ถูกเผาไฟ

ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า การซ่อมแซมคอนกรีตที่ถูกเผาไฟเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นที่นิยม แต่การที่จะซ่อมแซมได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นที่จะมีข้อมูลของคอนกรีตที่เสียหายอย่างชัดเจน เอกสาร FIB [15] ได้ให้แนวทางการเก็บข้อมูลไว้ 4 ขั้นตอนดังนี้

2.2.1. รวบรวมข้อมูลของไฟ

หลังจากผ่านเพลิงไหม้ไปแล้ว หากต้องการทราบถึงอุณหภูมิสูงสุด ณ ตำแหน่งใดๆ ในห้อง หรืออาคาร วัสดุต่างๆที่ถูกเพลิงไหม้ไปด้วยจะสามารถบอกได้ เช่น เหล็ก พลาสติก เส้นใยไม้ หรือโลหะต่างๆ เพราะวัสดุเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน

2.2.2. ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต

การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นเอกสาร Technical Report No.68 [16] ได้จำแนกและให้แนวการตรวจสอบเป็นไปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงแนวทางสำหรับการตรวจสอบความเสียหาย [16]

บริเวณทดสอบ	ชนิดการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ข้อมูลที่จะได้รับ			
			การเปลี่ยนแปลง	ความเสียหายด้านข้าง	ความลึกของความเสียหาย	กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม (ทั้งเสียหายและไม่เสียหาย)
หน้างาน	การทดสอบแบบไม่ทำลาย	ตรวจสอบด้วยสายตา	/	/	/	
		ค้อนเคาะฟังเสียง		/	/	
		ค้อนกระทบ		/		
		คลื่นอัลตราโซนิก		/		
ห้องปฏิบัติการ	การทดสอบแบบทำลายบางส่วน	เจาะ		/	/	
		กลึงจูลทรรศน์			/	
		วิธีเรียงแสง	/		/	
		เจาะทดสอบ			/	
		ทดสอบเหล็กเสริม				/

โดยที่การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนี้เป็นแบบโดยตรง (direct)

ในเอกสาร fib [15] ได้ให้รายละเอียดของการทดสอบไว้ดังนี้

1. วิธีเจาะทดสอบ (core test)

การเจาะทดสอบเป็นการประมาณค่ากำลังได้โดยตรงจากหน้างาน อีกทั้งยังได้ความลึกของความเสียหายของคอนกรีตด้วย แต่ทั้งนี้การเจาะทดสอบอาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีความเสียหายหรืออ่อนแอลงได้เช่นกัน

2. วิธีค้อนกระทบ

วิธีนี้เป็นการทดสอบความแข็งที่ผิวคอนกรีตที่สามารถนำไปหาค่ากำลังได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและกำลังคอนกรีต แต่วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะใช้ในคอนกรีตที่ผิวหน้าเสียหายมากเพราะจะมีการหลุดร่อนเกิดขึ้นทำให้ค่าที่ได้ผิดเพี้ยน แต่อย่างไรก็ดีวิธีนี้ยังคงได้รับความนิยมอยู่เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วในการตรวจสอบและมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

3. วิธีคลื่นอัลตราโซนิก

วิธีนี้จะเป็นการทดสอบแบบไม่โดยตรง (indirect) [17] ซึ่งอาศัยความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในการตรวจสอบ โดยที่ความเร็วคลื่นที่ชั้นคอนกรีตที่เสียหาย (damage

concrete) จะน้อยกว่าชั้นคอนกรีตที่ดี (sound concrete) ความแตกต่างนี้จะทำให้สามารถนำไปประมาณค่าความลึกที่เสียหายได้ดังที่จะอธิบายในหัวข้อ มาตรฐานการตรวจสอบ ต่อไป

ปี ค.ศ.1993 Michael [18] ได้ศึกษาการประเมินผลความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากไฟ ซึ่งการประเมินเพื่อหาว่าองค์อาคารส่วนที่เสียหายมีอุณหภูมิสูงสุดที่เท่าไรนั้นมีอยู่หลายวิธี

1) การสำรวจทั่วไป เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วโดยการตรวจดูเศษซากที่เกิดจากความเสียหายในบริเวณที่เกิดเหตุ ไม่ว่าจะเป็นเศษโลหะ พื้น หรือท่อสุขาภิบาลต่างๆ

2) ตรวจสอบคอนกรีตด้วยตาเปล่า วิธีนี้คล้ายกับการตรวจสอบทั่วไป คือตรวจดูองค์อาคารส่วนที่เป็นคอนกรีตว่ามีความเสียหายอย่างไรด้วยตาเปล่า เช่นการหลุดร่อนของคอนกรีตจนทำให้เห็นเหล็กเสริม การโก่งขององค์อาคาร ซึ่งองค์อาคารเหล่านั้นควรมีการจำแนกระดับความเสียหาย

3) ฟังเสียง (Sound test) เป็นการทดสอบโดยการใช้ค้อนทดสอบเคาะลงบริเวณที่ต้องการรายละเอียดแล้วฟังเสียงเพื่อวิเคราะห์

4) ค้อนกระทบ (Schmidt hammer test) การทดสอบนี้เป็นการวัดกำลังของคอนกรีตโดยอิงกับความแข็งของผิวคอนกรีต

5) สังกะสีที่เปลี่ยนไป (Color test) เป็นการตรวจวัดโดยดูจากสีของคอนกรีตหลังจากถูกเผาไฟแล้ว ซึ่งสีที่แสดงออกที่ผิวของคอนกรีตจะบ่งบอกได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดที่คอนกรีตเคยได้รับเป็นเท่าไร โดยปกติสีของคอนกรีตจะเปลี่ยนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ iron oxide ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกลือที่มาจากมวลรวมที่ใช้ในการผสม

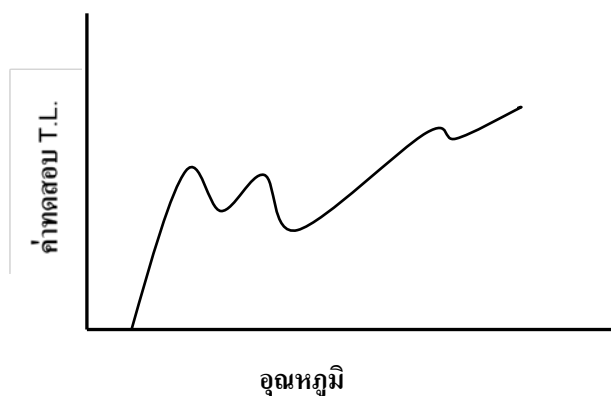
6) วิธีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity test (UPV)) วิธีนี้เป็นการทดสอบหาคุณภาพของคอนกรีตโดยวัดจากความเร็วคลื่นที่ใช้ในการเดินทางในเนื้อคอนกรีต กล่าวคือหากคอนกรีตไม่มีรอยร้าวหรือแยกชั้นภายในเนื้อคอนกรีต ความเร็วคลื่นที่ใช้ก็จะสูง แต่ถ้ามีความผิดปกติภายในเนื้อคอนกรีตเวลาที่ใช้ก็จะน้อยลง หลังจากนั้นจึงจะนำเอาความเร็วที่ได้ไปหาค่ากำลังของคอนกรีตต่อไปในภายหลัง

7) การดึงทดสอบ (Pull off test) การทดสอบนี้จะเป็นการวัดกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ข้อดีคือสามารถตรวจวัดได้ที่หน้างานเลย

8) การเจาะทดสอบ (Core test) วิธีนี้ทำโดยการเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตออกจากโครงสร้างเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะให้ค่ากำลังที่ถูกต้อง แต่มี

ข้อเสียคือมีความเป็นไปได้ว่าบริเวณที่ทำการเจาะไปจะเป็นจุดที่สร้างความอ่อนแอให้กับโครงสร้างได้

9) วิธีวัดค่าเรืองแสง (Thermoluminescence test (TL)) วิธีนี้เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า TL output ของชิ้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟกับอุณหภูมิที่เรียกว่า Glow curve ในห้องปฏิบัติการดังภาพที่ 4 แล้วนำค่าจาก Glow curve ที่ได้ไปประมาณหาอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆของชั้นคอนกรีตที่ถูกเพลิงไหม้จากหน่วยงานจริง



ภาพที่ 4 เส้นโค้งของGlow[18]

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีต่างๆ[18]

ชิ้นส่วน	ค่าการสะท้อน	การดึงทดสอบ (Mpa)	กำลังรับแรงอัด (กำลังอัดคงค้าง %)	การทดสอบ TL	
				ความลึก (มม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)
C1	28.00	1.66	82	3-7	<200
				13-17	<150
				23-17	<120
				28-32	<100
W1	28.10	1.43	87	3-7	<200
				13-17	<150
				23-27	<100
W7	28.80	1.56	100	3-7	<150
				13-17	<100
B2	40.60	1.40		3-7	<150
				13-17	<120
				23-27	<100
S2	33.00	1.66		3-7	<200
				13-17	<150
				23-27	<100

จากผลการทดสอบในงานวิจัยฉบับนี้ Michael ได้ทำการทดสอบจริงกับเสา (C) กำแพง (W) คาน (B) และพื้น (S) ที่อุณหภูมิสูงสุด 200 องศาเซลเซียส และทำการประเมินความเสียหายด้วย 5 วิธี คือการสำรวจทั่วไป วิธีค้อนกระทบ การดึงทดสอบ การเจาะทดสอบ และวิธีเรืองแสงเป็นไปตามตารางที่ 4 โดยที่แต่ละหลักหมายถึงวิธีที่ใช้ในการหาค่า ค่ากำลังอัดในหลักที่ 4 ได้จากการเจาะทดสอบ ดังนั้นจึงถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงความจริงที่สุดซึ่งงานวิจัยดังกล่าวจะยึดถือ ดังนั้นเมื่อเทียบกับค่าการทดสอบโดยวิธีค้อนกระทบจะพบว่าค่าที่ได้ค่อนข้างต่ำกว่าความเป็นจริง (เจาะทดสอบ) สำหรับกำลังจากการดึงทดสอบที่ตัวอย่าง C1 การดึงทดสอบจะให้ค่ากำลังสูงสุดแต่จะเป็นค่ากำลังคงเหลือที่ต่ำที่สุดของการเจาะทดสอบซึ่งตัวอย่างนี้มีอุณหภูมิที่ผิวจากการทดสอบด้วยวิธีเรืองแสงสูงสุดคือ 200 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า การ

ทดสอบด้วยวิธีเจาะทดสอบจะให้ผลของค่ากำลังที่ดีที่สุดแต่มีข้อเสียคือทำให้โครงสร้างได้รับความเสียหาย ส่วนวิธีเรียงแสงและการตรวจดูสีจะสามารถทำนายอุณหภูมิสูงที่สุดที่โครงสร้างได้รับอยู่ในเกณฑ์ดีแต่ทั้งนี้ก็ยังต้องมีข้อบกพร่องอยู่ ส่วนวิธีค้อนกระแทกให้ผลที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อย อีกทั้งวิธีค้อนกระแทกและการดึงทดสอบยังไม่ละเอียดเพียงพอสำหรับความเสียหายที่มีเพียงเล็กน้อย

อย่างไรก็ดีในงานวิจัยฉบับนี้ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นอยู่บนสมมติฐานว่าไม่มีการแยกชั้น (Delaminate) ภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นการทดสอบที่จะใช้เพื่อวัดกำลังและประเมินความเสียหายคือวิธี เคาะฟังเสียง ค้อนกระแทก คลื่นอัลตราโซนิก เจาะทดสอบ และการทดสอบแรงดึงซึ่งรายละเอียดและข้อกำหนดที่ใช้ทดสอบจะอธิบายในหัวข้อ มาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพ ต่อไป

2.2.3. จำแนกระดับความเสียหาย

หลังจากรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้แล้วจึงจะนำมาจำแนกระดับความเสียหายเพื่อเป็นแนวทางสำหรับซ่อมแซมต่อไป จากเอกสาร fib [15] ได้จำแนกระดับความเสียหายออกเป็น 5 ระดับดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงการจำแนกระดับความเสียหาย [15]

ระดับ	ลักษณะ	คำอธิบาย
1	ความเสียหายเล็กน้อยที่ผิว	มีเขม่าติดที่ผิวซึ่งสามารถล้างออกได้ และมีการเปลี่ยนสี รวมไปถึงมีกลิ่นติดด้วย
2	ความเสียหายเฉพาะทางที่ผิว	คอนกรีตมีการหลุดร่อนบวมมีขอบเขตจำกัดสิ่งทีเคลือบผิวคอนกรีตต้องทำการซ่อมแซมโดยรื้อออกแล้วเคลือบใหม่หรืออาจปล่อยให้แห้งได้
3	ความเสียหายด้านโครงสร้างที่ผิว	คอนกรีตมีการหลุดร่อนและมีรอยร้าว ส่วนที่เป็นไม้ใหม่เกรียมบริเวณผิว ส่วนที่เป็นโลหะมีการเปลี่ยนรูปที่ผิวหรือถูกกัดกร่อนปานกลาง การซ่อมแซมเหมือนกับระดับที่ 2
4	ความเสียหายด้านโครงสร้างที่หน้าตัด	คอนกรีตมีรอยร้าวขนาดใหญ่ และบริเวณแนวของคานรูปตัว I มีการหลุดร่อนปีกมีการเปลี่ยนรูป และหน้าตัดส่วนที่เป็นไม้ใหม่เกรียมเป็นบางส่วน ในการซ่อมแซมของระดับนี้ a) โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนรูปให้ลดปริมาณน้ำหนักบรรทุกลง b) ทำการซ่อมแซมให้เหมาะกับแต่ละส่วนและระบบของโครงสร้าง

5	ความเสียหายด้านโครงสร้างที่องค์อาคารและส่วนประกอบอื่น	โครงสร้างคอนกรีตมีความเสียหายอย่างรุนแรง มีการวิบัติในจุดต่างๆ และมีการเปลี่ยนรูปขององค์อาคาร มีการหลุดร่อนขนาดใหญ่ที่ทำให้เห็นถึงเหล็กเสริมและบริเวณที่รับหน่วยแรงอัด ในโครงสร้างเหล็กมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเนื่องจากน้ำหนักที่บรรทุกและอุณหภูมิที่สูง และในโครงสร้างใหม่ใหม่เกรียมเกือบทั้งหมด ในความเสียหายระดับนี้มักจะรื้อสร้างใหม่
---	---	--

The Concrete society [16] ได้จำแนกระดับความเสียหายออกเป็น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงระดับความเสียหาย [16]

ระดับความเสียหาย	ชั้นส่วน	ลักษณะพื้นผิวของคอนกรีต			สภาพโครงสร้าง			
		สิ่งที่หุ้มอยู่	สี	รอยแตก	การหลุดร่อน	การระเบิดออกและสภาพของเหล็กเสริม	รอยร้าว	การโก่ง การเปลี่ยนรูป
0	ทุกชั้นส่วน	ไม่มีผลใดๆ หรือไม่ได้รับผลกระทบจากไฟ						
1	เสา	หลุดลอก บางส่วน	ปกติ	เล็กน้อย	เล็กน้อย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
	กำแพง							
	พื้น							
2	คาน	สูญเสียอย่างมาก	ชมพู/แดง	ปานกลาง	ที่มุมเล็กน้อย	25% และไม่มีการโก่ง	ไม่มี	ไม่มี
	เสา				เป็นหย่อมเล็กน้อย	10% เหล็กยังยึดแน่น		
	กำแพง				ที่มุมและจุดสูงสุดที่ความโค้ง(soffit)	25% และไม่มีการโก่ง		
	พื้น							
3	คาน	สูญเสียทั้งหมด	ชมพู/แดงเทาอ่อน	อย่างมาก	ที่มุมอย่างมาก	50% มีการโก่งไม่เกิน 1 เส้น	เล็กน้อย	ไม่มีนัยสำคัญ
	เสา				ที่ผิวอย่างมาก	20% เหล็กทั่วไปยังยึดแน่น		
	กำแพง				ที่จุดสูงสุดความโค้งอย่างมาก			
	พื้น				ที่มุม ด้านข้างและจุดสูงสุดความโค้งอย่างมาก	50% มีการโก่งไม่เกิน 1 เส้น		

4	เสา	ถูกทำลาย	เทาอ่อน	สูญเสีย ผิวหน้า	ผิวหน้าเกือบ ทั้งหมด	มากกว่า 50% มีการโก่ง มากกว่า 1 เส้น	อย่างมาก	เปลี่ยนรูป
	กำแพง					มากกว่า 20% เหล็กหลุด จากคอนกรีต	รุนแรง และมี นัยสำคัญ	รุนแรง และมี นัยสำคัญ
	พื้น					มากกว่า 50% มีการโก่ง มากกว่า 1 เส้น		
	คาน							

2.2.4. เลือกวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม

หลังจากจำแนกระดับความเสียหายแล้ว จึงทำการซ่อมแซมตามความเหมาะสมตามระดับความเสียหายที่ได้จำแนกไว้ ซึ่งวิธีการซ่อมแซมจะได้อธิบายในหัวข้อ มาตรฐานการซ่อมแซมต่อไป

2.3. ผลของผิวคอนกรีตที่มีต่อการเสริมกำลัง

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นของบทที่ 1 ว่าหนึ่งในวิธีการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกเพลิงไหม้ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยซึ่งปัจจัยสำคัญในการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้นั้นคือสภาพของผิวคอนกรีต ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2010 ที่ผ่านมา Yaqub และ Bailey [19] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการซ่อมแซมเสาคอนกรีตกลมที่เสียหายเนื่องจากเพลิงไหม้โดยใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ซึ่งหลังจากที่ซ่อมแซมแล้วได้นำเสานั้นไปทำการทดสอบโดยให้รับกำลังอัดตามแนวแกนเพื่อหาค่ากำลังประลัยตามแนวแกน สติฟเนส และความเหนียว แล้วจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบ

ในการศึกษา Yaqub และ Bailey ได้หล่อเสาคอนกรีตกลมเสริมเหล็กแล้วให้ความร้อนโดยขดลวดไฟฟ้าที่ให้ความร้อนสูงถึง 500 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่ออนาทีจนกระทั่งเสามีความร้อน 500 องศาเซลเซียสทั่วทั้งต้นโดยวัดที่ กึ่งกลางเสา ผิวของเสา และที่ขดลวดไฟฟ้า เมื่อนำออกจากเตาพบว่าเสียบางต้นเกิดการหลุดร่อนอย่างรุนแรงและบางส่วนไม่มีการหลุดร่อนหรือเสียหายอย่างรุนแรง

จากนั้นจึงทำการซ่อมแซม พื้นผิวตามมาตรฐาน BSEN1504 โดยใช้ตัวยึดประสานทาลงไปก่อนแล้วจึงตามด้วย อีพอกซีเรซินมอร์ตาร์ (epoxy resin mortar) แล้วจึงนำไปบ่มให้ได้กำลังเป็นเวลา 1 เดือน จากนั้นจึงนำมาซ่อมด้วย Tyfo SHE-51A glass, Tyfo SCH-41 carbon and Weber.tec force C-240 carbon jackets

หลังจากซ่อมแล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลัง ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้

1. เสาที่ถูกเผาไฟที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส กำลังลดลงไป 42%

2. ค่าสติเฟนสที่คงเหลือในเสาหลังถูกเผาไฟดีกว่าค่ากำลังรับแรงอัด
3. กำลังของการซ่อมโดยใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยชนิด Glass เพียงอย่างเดียว มากกว่ากำลังของเสาที่ไม่เผาไฟอยู่ 29% และมากกว่าที่ไม่ได้ซ่อมอยู่ 122%
4. กำลังของเสาที่มีการหลุดร่อนและซ่อมด้วยอีพ็อกซีมอร์ต้าอย่างเดียวกว่าเสาที่ไม่ได้ซ่อมอยู่ 15%
5. กำลังของเสาที่มีการหลุดร่อนและซ่อมด้วยอีพ็อกซีมอร์ต้าและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยชนิด Glass มีมากกว่าเสาที่ไม่เผาอยู่ 10% และมากกว่าเสาที่เผาแต่ไม่ได้ซ่อมอยู่ 65%
6. กำลังของเสาที่มีการหลุดร่อนและซ่อมด้วยอีพ็อกซีมอร์ต้าและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยชนิดเส้นใยคาร์บอน มีมากกว่าเสาที่ไม่เผาอยู่ 20% และมากกว่าเสาที่เผาแต่ไม่ได้ซ่อมอยู่ 80%
7. สำหรับเสาที่ซ่อมโดยการติวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ชนิดเส้นใยคาร์บอน เพียงอย่างเดียวกำลังได้ใกล้เคียงกับเสาที่ไม่ได้เผา

จากผลการศึกษาเราจะเห็นว่าการซ่อมแซมวัสดุฐานก่อนจะเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยนั้นเป็นสิ่งจำเป็น อีกทั้งสามารถระบุได้ว่าประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยระบบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับสภาพของวัสดุฐานเป็นสำคัญ นั้นหมายความว่าเพื่อให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยและคอนกรีตเดิมมีประสิทธิภาพ พื้นผิวคอนกรีตที่จะติดนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่ดีเพียงพอ

ในปี ค.ศ.2010 พราวพร ญุชและสุวัชร ต้นวัฒนประทีป [20] ได้ศึกษาเรื่องพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเพลิงไหม้กับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย โดยหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นมาและนำไปจำลองสภาวะเพลิงไหม้แล้วจึงนำมาเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแบบแผ่นบางชนิดเส้นใยแก้วและเส้นใย PBO โดยไม่มีการซ่อมแซมผิวหน้าก่อน ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของความเครียดจะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่คอนกรีตได้รับ ระยะเวลาหลังเสริมและระยะเวลาที่ถูกเพลิงไหม้ อีกทั้งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกระจายตัวดังกล่าวคือสภาพความเสียหายของผิวคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังไม่ได้รับการซ่อมแซมก่อนติดด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

2.4. มาตรฐานสำหรับจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้

นักวิจัยชาวอเมริกัน Ingberg [21] ได้เสนอ “แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire Load Concept)” เอาไว้โดยมีสมมติฐานที่สำคัญ 2 ข้อคือ

1. อัตราการทนไฟของอาคารนั้นขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของไฟ (Fire severity) เพียงอย่างเดียว โดยที่ความรุนแรงของไฟดังกล่าวคือพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิกับเวลา

2. ความรุนแรงของไฟในข้อแรกนั้นจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มของปริมาณไฟ (Fire load density) หรือก็คืออุณหภูมิเพียงอย่างเดียว

จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้ ASTM [3] ได้เสนอเป็นเส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่มีความเข้มของไฟที่ใกล้เคียงกับสภาพไฟที่เกิดขึ้นจริงสำหรับเป็นมาตรฐานให้กับทุกองค์อาคาร ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$T = T_0 + 345 \cdot \text{Log}(8t + 1) \quad (1)$$

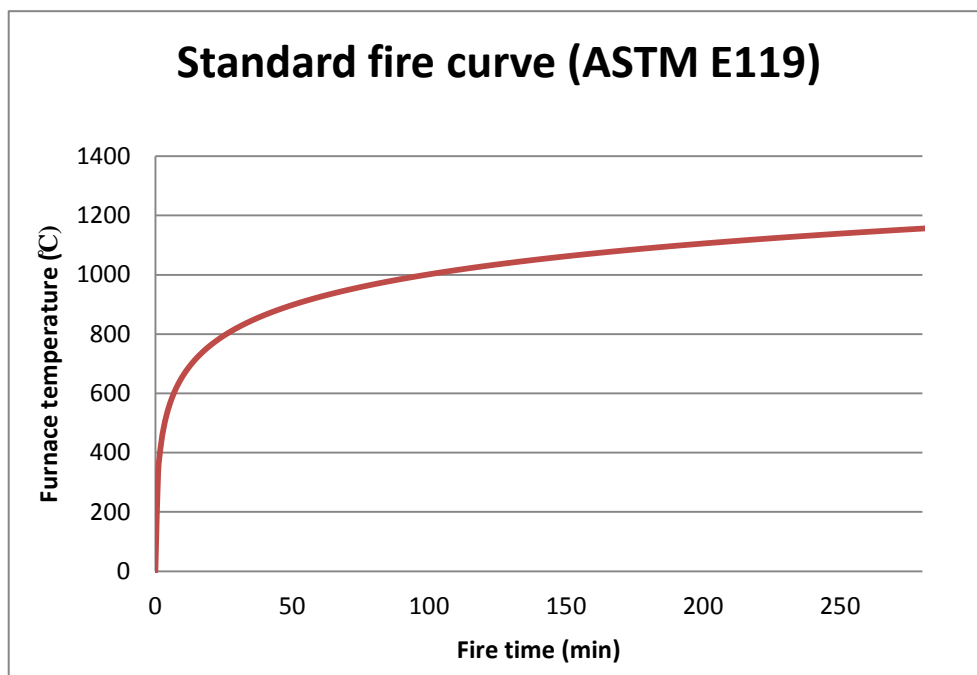
เมื่อ

T = อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา t (องศาเซลเซียส)

T_0 = อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)

t = เวลานั้นนับตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบ (นาที)

ซึ่งสมการดังกล่าวได้เป็นกราฟไฟมาตรฐานดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

อย่างไรก็ดี สมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้นนั้นก็ยังคงมีข้อบกพร่องเนื่องจากขาดความสมเหตุสมผลอยู่ 2 ประการคือ

1. จากสมมติฐานข้อที่ 1 หากเทียบระหว่าง 2 เหตุการณ์คือมีความเข้มของปริมาณไฟมากในเวลาสั้นๆ กับมีความเข้มของปริมาณไฟน้อยๆ ในเวลานานๆ จะมีพื้นที่ได้กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นโครงสร้างจะต้องมีพฤติกรรมที่ไม่ต่างกัน

แต่ในความเป็นจริงนั้นพบว่าในเหตุการณ์จริงอุณหภูมิที่เพิ่มอย่างกะทันหันจะทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง แต่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ละน้อยอาจไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ

2. จากสมมติฐานข้อที่ 2 พบว่าในความเป็นจริงแล้วความรุนแรงของไฟไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณไฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย คือพื้นที่ช่องเปิด ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิง อัตราการเผาไหม้ ปริมาณวัสดุที่ไม่ติดไฟและคุณสมบัติของการนำความร้อน

ซึ่งในปัจจุบัน ASTM ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาใช้เพื่อปรับผลการทดสอบการทนไฟของวัสดุ

2.5. มาตรฐานในการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหาย

มาตรฐานการซ่อมแซมวัสดุฐาน (Substrate)

ในการซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีตให้กลับมามีประสิทธิภาพเหมือนเดิมหรือดีกว่า มีวิธีการและลำดับขั้นตามมาตรฐาน มยผ. 1508-51[22] และ มยผ. 1901-51 [2] ดังนี้

1. รื้อคอนกรีตส่วนที่เสียหาย

การรื้อคอนกรีตส่วนที่เสียหายบริเวณวัสดุฐานให้อ้างอิงตาม มยผ. 1901-51[2] ซึ่งระบุไว้ว่า

1.1. การสกัดคอนกรีต

ในการสกัดคอนกรีตที่เสียหาย โดยปกติจะกำจัดคอนกรีตส่วนที่ไม่ดีออกให้หมดจนถึงเนื้อคอนกรีตที่แกร่ง ซึ่งบางครั้งอาจต้องสกัดไปจนถึงแนวเหล็กเสริม แต่กระนั้นวิธีการสำหรับสกัดคอนกรีตโดยทั่วไปก็มีอยู่มากมาย บางวิธีอาจเป็นการสกัดที่รุนแรงจนทำให้คอนกรีตส่วนที่ดีต้องเสียหายไปด้วย ดังนั้นจึงมีข้อควรพิจารณาในการสกัดคือ

1.1.1. เลือกวิธีที่สามารถสกัดเอาคอนกรีตที่เสียหายออกได้หมดโดยไม่ทำลายเนื้อคอนกรีตที่ดี

1.1.2. วิศวกรผู้รับผิดชอบในการออกแบบซ่อมแซมควรระบุวัตถุประสงค์ในการสกัดให้ชัดเจน รวมถึงผู้รับเหมาที่ต้องเลือกวิธีที่ประหยัดและตอบสนองความต้องการของวิศวกรได้ดีที่สุด

1.1.3. วิศวกรผู้รับผิดชอบในการออกแบบซ่อมแซมจะต้องดำเนินการให้เป็นไปอย่างปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม

ทั้งนี้ระหว่างการดำเนินการซ่อมควรมีการเฝ้าระวังพฤติกรรมของโครงสร้างคือ

1. ก่อนทำการสกัดควรมีการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของอาคารในระหว่างการดำเนินการสกัดด้วย เพราะต้องไม่ลืมว่าเมื่อสกัดคอนกรีตแล้วจะทำให้โครงสร้างมีขนาดหน้าตัดที่เล็กลงยังผลให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงไปด้วย

2. เฝ้าระวังไม่ให้เกิดการสั่นเกินกว่าความต้องการของวิศวกร

3. ภายหลังจากการสกัดแล้วต้องมีการทดสอบผิวคอนกรีตตามข้อกำหนดของวิศวกร

ภายหลังจากทำการสกัดแล้วควรประเมินปริมาณและลักษณะของคอนกรีตในโครงสร้างอีกครั้งเพื่อเตรียมการซ่อม อีกทั้งต้องตรวจสอบความเสียหายของผิวคอนกรีตรวมไปถึงตรวจสอบเนื้อคอนกรีตหากสงสัยในคุณภาพด้วยวิธีเคาะด้วยค้อน (Hammer Sounding) และการทดสอบแรงดึง (Pull off test) ตามลำดับ

1.2. การเตรียมขอบ

บริเวณที่ต้องการหรือคอนกรีตที่เสียหายจำเป็นต้องมีการกำหนดขอบหรือรูปร่างที่แน่นอนเสียก่อน เหตุเพราะรูปร่างของบริเวณที่ต้องการหรือมีผลต่อการบูรณะซ่อมแซมและประสิทธิภาพภายหลังการซ่อมแซมดังนี้

1.2.1. ผลจากการหดตัวของวัสดุซ่อม

เนื่องจากสภาพความเสียหายของพื้นผิวจะไม่เท่ากันทั้งพื้นที่[23] ดังนั้นควรมีการปรับปรุงเพื่อให้มีรูปแบบที่ง่าย โดยควรมีให้มีเหลี่ยมมุมและความยาวขอบน้อยที่สุดเพื่อลดหน่วยแรงจากการหดตัวของวัสดุซ่อม

ตามคู่มือการซ่อมของ American Concrete Pavement Association [24] ได้ระบุถึงการซ่อมผิวหน้าถนนเอาไว้โดยสำหรับกองทัพบกและกองทัพอากาศทั้งการซ่อมที่ขอบหรือที่มุม รูปร่างของบริเวณที่ต้องการซ่อมให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมครอบคลุมจุดที่มีความเสียหายและควรมีระยะห่างจากจุดที่กว้างที่สุดของความเสียหายออกไปอย่างน้อย 75 มิลลิเมตรและมีความกว้างและความยาวด้านละไม่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตร

1.2.2. ความมีประสิทธิภาพภายหลังการซ่อม

รูปร่างของบริเวณที่ต้องการซ่อมหากไม่เตรียมให้เหมาะสมแล้วจะมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเดิมและวัสดุซ่อม ตามมาตรฐาน EN 1504-10 [25] ในเรื่องการเตรียมผิวสำหรับการซ่อมได้กำหนดไว้ว่าขอบของส่วนที่รื้อออกไปแล้วนั้นควรมีมุมไม่น้อยกว่า 90 องศาเซลเซียสและไม่เกินกว่า 135 องศาเซลเซียส

1.3. วิธีการสกัดคอนกรีต

วิธีการสกัดคอนกรีตมีอยู่หลายวิธี ซึ่งในมาตรฐานมยผ.1508-51[22] ได้ระบุไว้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

1.3.1. การตัดคอนกรีต (Cutting Method)

ในประเภทการตัดคอนกรีตก็จะมีวิธีการที่แตกต่างตามแต่อุปกรณ์ซึ่งต้องคำนึงถึงขนาดและบริเวณที่ต้องการ ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

1.3.1.1. เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (High Pressure Water Jet)

เครื่องมือนี้จะเป็นเครื่องมือฉีดน้ำที่มีแรงดัน 69-310 เมกาปาสกาล (MPa) เป็นลำเล็กๆ เพื่อใช้ตัดแผ่นพื้นหรือโครงสร้าง มีข้อดีคือตัดได้แม่นยำ ไม่มีฝุ่นและไม่รบกวนโครงสร้างโดยรอบ ข้อเสียคือตัดได้เฉพาะโครงสร้างที่บาง ค่าใช้จ่ายสูงและมีเสียงดังรบกวน

1.3.1.2. การตัดด้วยเลื่อย (Saw Cutting)

วิธีนี้นิยมใช้กันมากเพราะมีข้อดีคือตัดได้แม่นยำ ไม่รบกวนโครงสร้าง โดยรอบให้เสียหาย แต่ยังมีข้อเสียคือตัดได้เฉพาะโครงสร้างที่บาง มีเสียงดัง และจำเป็นต้องควบคุมน้ำที่ใช้หากต้องมีการใช้น้ำร่วมในการตัด

1.3.1.3. การชอยคอนกรีตด้วยการเจาะ (Stitch Drilling)

วิธีนี้ดำเนินการโดยใช้สว่านหรือเครื่องเจาะคอนกรีตเจาะรูบริเวณที่ต้องการ ต่อเนื่องกัน จากนั้นจึงทำการสกัดออกด้วยมือ วิธีนี้เหมาะสำหรับสกัดคอนกรีตที่สกัดได้ด้านเดียว แต่มีข้อเสียคือมีฝุ่นมาก

1.3.2. การสกัดโดยใช้วิธีกระแทก

การสกัดโดยใช้เครื่องมือกระแทกก็เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่เนื่องจากการกระแทกไม่สามารถควบคุมการแตกร้าวได้จึงจำเป็นต้องใช้การสกัดด้วยมือร่วมด้วย เพื่อแต่งผิวที่เกิดรอยร้าว อย่างไรก็ตามหากพบว่ามี ความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงสร้าง วิศวกรอาจจำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงดึง (Pull off Test) เพื่อความมั่นใจอีกครั้ง

1.3.2.1. การสกัดโดยใช้แรงดันน้ำ

เป็นการสกัดโดยฉีดน้ำที่มีแรงดันตั้งแต่ 70-140 เมกาปาสกาล(MPa) ลงบนผิวที่ต้องการสกัดเพื่อรื้อคอนกรีตที่ไม่ต้องการออก วิธีนี้มีข้อดีคือไม่ทำให้เกิดรอยร้าวและยังได้ฉีดทำความสะอาดเหล็กเสริมและคอนกรีตไปได้พร้อมกันด้วย

1.3.2.2. การสกัด (Presplitting Methods)

วิธีนี้จะใช้อุปกรณ์ประเภท เครื่องสกัดไฮดรอลิค (Hydraulic Splitter) เพื่อทำลายให้คอนกรีตแตกออกเป็นชิ้นใหญ่ๆ ก่อนดำเนินการต่อด้วยวิธีอื่น นิยมที่ใช้กันในงานคอนกรีตหยาบ (Mass concrete) หรือคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม

1.3.2.3. การสกัดโดยวิธีพ่นทราย (Sandblasting)

วิธีนี้เป็นการสกัดต่อจากวิธีการอื่นโดยการพ่นทรายที่มีขนาด 2.12-4.75 มิลลิเมตรออกไปด้วยแรงดันลมประมาณ 860 กิโลปาสกาล (kPa) โดยจะใช้กำจัดผิวที่หนาไม่เกิน 6 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 546R-04 [26]

การพ่นทรายนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็น 3 วิธีคือ การพ่นทรายแบบแห้ง การพ่นทรายแบบเปียก และการพ่นทรายแบบเปียกด้วยแรงดันสูง

1.3.2.4. การสกัดด้วยการพ่นอนุภาคโลหะ (Shotblasting)

วิธีนี้เป็นการสกัดคอนกรีตที่ไม่แข็งแรงออกได้อย่างดีโดยการพ่นอนุภาคโลหะออกมากระแทกผิว เหมาะที่จะใช้กับการสกัดที่หนาน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีข้อเสียคือ วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายที่สูงตามความหนาที่ต้องการสกัด

1.4. การทำความสะอาดผิว

การทำความสะอาดและเตรียมผิวเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้คอนกรีตเดิมมีความสะอาดและมีความหยาบเพียงพอต่อการซ่อมแซมต่อไป โดยปกติการเตรียมผิวจะใช้เครื่องมือสกัดหรือเครื่องมือขัด เพื่อสร้างความหยาบให้พอเหมาะ และสำหรับการทำความสะอาด จะใช้น้ำและลมฉีดสลับกันเพื่อล้างไม่ให้มีตะกอนหรือฝุ่นผงที่จะมารบกวนการซ่อมแซม ทั้งนี้ความหยาบดังกล่าวขึ้นกับวัสดุที่จะนำมาซ่อมแซมว่ามีข้อกำหนดจากผู้ผลิตเป็นอย่างไร

2. การซ่อมแซมผิวหน้าด้วยการอุดหลังจากรื้อคอนกรีตส่วนที่เสียหาย

ภายหลังจากการรื้อคอนกรีตเดิมออกไปแล้วจนถึงเนื้อคอนกรีตที่แกร่งตามต้องการ ก็จะมีการบูรณะซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีตเพื่อให้มีรูปร่างลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิมหรือดีกว่า โดยมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้

2.1. หลังจากรื้อคอนกรีตตามวิธีในหัวข้อก่อนหน้าแล้วหรือพบเห็นรูโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกมากกว่า 13 มิลลิเมตร ต้องทำการอุดด้วยวัสดุซ่อมที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยไม่น้อยกว่ากำลังของวัสดุเดิม ทั้งนี้ต้องมีต้องมีกำลังอัดรูปทรงกระบอกที่อายุ 7 วัน และ 28 วันไม่น้อยกว่า 31 เมกะปาสกาล (MPa) และ 38 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ ทั้งนี้ขั้นตอนในการทำงานจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 และชนิดวัสดุซ่อมจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4

2.2. สำหรับวัสดุที่จะนำมาบูรณะ ส่วนผสมต้องได้รับการอนุมัติจากวิศวกรผู้ควบคุม โดยที่กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุซ่อมและคอนกรีตเดิมต้องไม่น้อยกว่า 1.4 เมกะปาสกาลเมื่อทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง (Pull off Test) ตามมาตรฐาน ASTM C1538-04 [5] ซึ่งสำหรับจุดทดสอบควรทำอย่างน้อย 1 จุดบนพื้นที่ 10 ตารางเมตรและไม่น้อยกว่า 3 จุดต่องานซ่อม หรือขึ้นกับดุลยพินิจของวิศวกรผู้ควบคุม

2.3. ทำการซ่อมด้วยวัสดุซ่อมโดยการทาสารเชื่อมประสานที่คอนกรีตเดิมรวมไปถึงเหล็กเสริมที่โผล่พ้นออกมาแล้วจึงเทปิดหรือฉาบปิดด้วยวัสดุซ่อมที่เลือกใช้ จากนั้นจึงทำการบ่มเพื่อให้กำลังได้ตามมาตรฐานที่กล่าวไว้ในหัวข้อแรก ซึ่งระยะเวลาขึ้นกับผลการทดสอบของวัสดุซ่อมเป็นสำคัญ หรืออย่างน้อย 7 วันก่อนจะทำการติดตั้งระบบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยต่อไป

อนึ่ง การอุดวัสดุฐานดังกล่าวเพื่อให้กลับมาดีสภาพดีนั้น บางครั้งอาจเป็นเพียงการฉาบผิวซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อหลักที่ 3 ก็ได้ และบางครั้งอาจจำเป็นต้องตั้งแบบหล่อก็เป็นได้

3. การซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีต

ในงานโครงสร้างจริงจะพบว่านอกจากบริเวณที่เสียหายจนต้องทำการรื้อและซ่อมแซมแล้ว บางบริเวณของผิวหน้าคอนกรีตอาจมีรอยร้าวหรือรูโพรงที่ไม่มีความจำเป็นต้องรื้อออกแต่สามารถทำการซ่อมด้วยวิธีการอุด ดังนั้นในหัวข้อการซ่อมแซมนี้จะแบ่งการซ่อมออกเป็น 2 ประเภทคือ การซ่อมแซมรอยร้าว และการซ่อมแซมภายหลังการรื้อผิวหน้า

3.1. การซ่อมแซมรอยร้าว

3.1.1. สำหรับรอยร้าวมีขนาดกว้างกว่า 0.25 มิลลิเมตรในสภาพแวดล้อมปกติและสำหรับสภาพแวดล้อมอื่น ๆ เป็นดังตารางที่ 7 [27]

3.1.2. เลือกวัสดุและวิธีในการซ่อม โดยการซ่อมจะแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการอัดฉีดอีพอกซีหรือน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปในรอยร้าว หรือการฉาบอีพอกซีลงบนผิวซึ่งวิธีหลังจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.2. การซ่อมแซมภายหลังการรื้อผิวหน้า

3.1.3. ทำการอัดฉีดอีพอกซีเรซินหรือน้ำปูนไปยังรอยร้าวที่มีชั้นตอนคือ

3.1.3.1. ทำความสะอาดรอยร้าว

รอยร้าวที่ต้องการซ่อมจะต้องสะอาดไม่มีฝุ่นผงหรือสารอินทรีย์ใดๆที่จะไปรบกวนประสิทธิภาพหลังการซ่อม ดังนั้นจึงต้องทำความสะอาดโดยใช้ลมหรือน้ำที่แรงดันสูงอัดฉีดสลับกัน แล้วควรต้องรอยให้รอยร้าวที่ทำความสะอาดแล้วแห้งเสียก่อนจะดำเนินการขั้นต่อไป

ตารางที่ 7 ขนาดของความกว้างรอยร้าวที่ยอมให้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ [27]

สภาวะที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม	ความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้ไม่เกินขนาด	
	(นิ้ว)	(มิลลิเมตร)
อากาศแห้ง, มีการหุ้มป้องกัน	0.016	0.41
อากาศชื้น, ในดิน	0.012	0.30
สัมผัสกับสารเคมีสำหรับละลายน้ำแข็ง	0.007	0.18
น้ำทะเล, ละอองน้ำทะเล, เปียกสลับแห้ง	0.006	0.15
โครงสร้างเก็บกักน้ำไม่รวมท่อที่ไม่รับแรงดัน	0.004	0.10

3.1.3.2. เตรียมช่องอัดฉีด

ขั้นตอนนี้จะเป็นการเตรียมช่องสำหรับที่จะใช้อัดฉีดอีพอกซีเข้าไปในรอยร้าวโดยมีอยู่ 2 ลักษณะคือ 1. เจาะช่องอัดฉีดบนผิวคอนกรีตเลย ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับรอยร้าวที่เห็นชัด และ 2. เจาะช่องอัดฉีดด้านข้างรอยร้าว วิธีนี้จะทำการเจาะรูเข้าไปด้านข้างทั้งสองของรอยร้าวให้เอียงไปตัดทะลุกับระนาบของรอยร้าวเพื่อทำการอัดฉีด

3.1.3.3. การอัดฉีด

การอัดฉีดสามารถทำได้ 2 ลักษณะตามการเตรียมช่องอัดฉีดในหัวข้อก่อน คือ 1. การอัดฉีดด้านบนผิวของคอนกรีต และ 2. การอัดฉีดเข้าด้านข้างของรอยร้าว โดยทั้งคู่จะเริ่มอัดฉีดจากจุดที่ต่ำสุดก่อนแล้วค่อยขยับสูงขึ้นไปตามแนวรอยร้าว

3.1.3.4. ทำความสะอาด

หลังจากทำการอัดฉีดแล้ว จะต้องทำความสะอาดส่วนเกินออกให้หมดด้วยน้ำแรงดันสูงหรือขัดออก รวมไปถึงซ่อมปิดรูอัดฉีดให้เต็มด้วย

3.1.3.5. ตรวจสอบความสมบูรณ์

ภายหลังจากการอัดฉีดสามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ได้โดยเจาะตัวอย่างขนาดเล็กจากบริเวณที่ซ่อมเพื่อตรวจดู ซึ่งหากช่องว่างจากรอยร้าวถูกเติมเต็มด้วยวัสดุซ่อมที่แข็งตัวดีแล้วมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่ทั้งหมดให้ถือว่าซ่อมแซมสมบูรณ์ หากไม่แล้วต้องทำการอัดฉีดใหม่และเก็บตัวอย่างมาเพื่อพิสูจน์ความสมบูรณ์ต่อไป

3.2. การซ่อมแซมหลังการรื้อผิวหน้า

ในการซ่อมแซมผิวหน้าภายหลังการรื้อหรือการอุดโพรงตามหลักเกณฑ์ในหัวข้อที่ 2 นั้นมี 2 วิธีหลักๆคือการ ฉาบและการตั้งแบบหล่อโดยทั้ง 2 มีวิธีดำเนินการดังนี้

3.2.3. การฉาบ

การฉาบซ่อมเหมาะสำหรับการซ่อมผิวที่ตื้นหรือมีพื้นที่ไม่มากโดยการใช้เกรียงฉาบปูนมาฉาบซ่อม แรงกดจากมือในการฉาบจะทำให้วัสดุซ่อมแซมอัดเข้าไปสู่พูนของพื้นผิวเดิม แต่ไม่ควรฉาบบริเวณที่มีเหล็กเสริมเพราะจะเป็นการยากที่จะทำให้คอนกรีตแน่นตัวและหุ้มเหล็กเสริมได้หมดโดยไม่เหลือช่องว่างหลังเหล็กเสริม วิธีนี้ปกติจะทำการฉาบเป็นชั้นๆ ชั้นละไม่เกิน 25 มิลลิเมตร รวมไม่เกิน 50 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุซ่อมเป็นสำคัญ

ปัญหาหลักของการซ่อมด้วยวิธีนี้คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเดิมและวัสดุซ่อมที่ไม่ดี และโพรงที่เกิดรอบๆเหล็กเสริม

3.2.4. การตั้งแบบหล่อ

วิธีนี้เป็นการตั้งแบบหล่อขึ้นมาเพื่อการเทหล่อวัสดุซ่อมแซมลงไป วัสดุที่เลือกใช้มีพื้นฐานคือต้องมีความสามารถในการไหลได้ดี มีการหดตัวต่ำ โดยวิธีดำเนินการเหมือนกับการเทคอนกรีตทั่วไป คือมีการตั้งแบบหล่อขึ้น ทำการเทวัสดุซ่อม ทำการกระทุ้งหรือสั่นเพื่อกำจัดฟองอากาศและให้วัสดุซ่อมไหลเข้าไปสัมผัสวัสดุเดิม

วิธีการนี้มีปัญหาคือในบางครั้งการเทหล่อให้เต็มช่องว่างอาจทำได้ยาก แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการอุดช่องว่างดังกล่าวด้วยวิธีอัดแน่นแบบแห้ง (Dry Packing)

4. วัสดุในการซ่อมแซม

4.1. ปูนทรายธรรมดา (Conventional Mortar)

ปูนทรายธรรมดาหรือก็คือมอร์ตาร์เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และน้ำ และอาจมีสารผสมเพิ่มอื่นๆ

มอร์ตาร์มีการใช้งานเหมือนกับคอนกรีตทั้งยังสามารถใช้ในงานที่หน้าตัดบางๆ ที่มีความหนา 10-50 มิลลิเมตรได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่ปูนทรายมีการหดตัวที่มากเนื่องจากมีปริมาณการใช้น้ำมากทั้งยังไม่มีมวลรวมหยาบอีกด้วย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นความสามารถในการใช้งานและการหดตัวดังกล่าวก็ยังขึ้นอยู่กับตัววัสดุซ่อมเป็นสำคัญ

4.2. ปูนทรายสูตรพิเศษ (Proprietary Repair Mortar)

ปูนทรายสูตรพิเศษมีลักษณะคล้ายกับปูนทรายธรรมดาแต่ต่างกันที่จะมีการผสมสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเช่นสารเพิ่มการขยายตัว สารทำให้แน่นตัว เป็นต้น ดังนั้นลักษณะการใช้งานจึงมีความหลากหลายมากขึ้นและยังใช้ได้กับหน้าตัดที่มีความหนามากกว่า 3 มิลลิเมตรขึ้นไป แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการหดตัวที่มาก อย่างไรก็ตามการใช้งานปูนทรายสูตรพิเศษนี้ก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัววัสดุซ่อมเองเป็นสำคัญ

2.6. มาตรฐานงานการเสริมกำลัง

หากต้องการเสริมกำลังของโครงสร้างภายหลังจากที่ถูกเพลิงไหม้ในประเทศไทยวิธีหนึ่งที่นิยมคือการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ซึ่งก่อนที่จะเสริมกำลังได้นั้นจะต้องซ่อมแซมผิวหน้าให้มีสภาพดั้งเดิมหรือดีกว่าเดิมเสียก่อน สาเหตุเพราะมาตรฐาน ACI440[28] ได้แบ่งการใช้งานระบบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเอาไว้ 2 ประเภทคือ

1. แร่งยึดเหนี่ยววิกฤต (Bond Critical Application)

2. การสัมผัสวิกฤต (Contact Critical Application)

ประเภทแรงยึดเหนี่ยววิกฤตเป็นการเสริมกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนของคาน พื้น เสา และผนัง ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นปัจจัยหลักคือความแข็งแรงของพื้นผิวคอนกรีต ส่วนประเภทการสัมผัสวิกฤตนั้นเป็นการเสริมกำลังโดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวแต่จะคำนึงถึงความแนบสนิทระหว่างคอนกรีตและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

อย่างไรก็ดี จากมาตรฐานในประเทศไทย มยผ. 1508-51[22] จะไม่มีการแบ่งประเภทดังกล่าวด้วยสาเหตุว่า

1. ถึงแม้แรงยึดเหนี่ยวจะไม่ใช่สิ่งจำเป็นสำหรับการเสริมกำลังประเภทสัมผัสวิกฤต แต่ก็ควรมีไว้เพื่อให้เกิดความคงทนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนที่รุนแรง
2. ณ ปัจจุบัน ยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะบอกได้ว่าการสัมผัสแนบสนิทสามารถทำให้เกิดแรงโอบรัดเสาได้โดยไม่ทำให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้างของคอนกรีตในเสา
3. การให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเอาไว้ในทุกรูปแบบการใช้งานย่อมส่งผลดีมากกว่า

ดังนั้นเมื่อทำการซ่อมแซมผิวหน้าที่ถูกเพลิงไหม้ให้กลับมามีสภาพดั้งเดิมหรือดีกว่าแล้วหากต้องการที่จะเสริมกำลังด้วยวัสดุอื่น ๆ ก็จะสามารถทำต่อไปได้

2.7. มาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซมและภายหลังการซ่อมเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของผิวคอนกรีต โดยการตรวจสอบจะมี 5 วิธีคือ

1. ค้อนกระแทก (Rebound number) (มยผ. 1502-51)[4]

อุปกรณ์

1. ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt Hammer หรือ Swiss Hammer)

2. ก้อนหินขัด (Abrasive Stone) เป็นก้อนหินที่มีส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์หรือวัสดุเทียบเท่าอื่นๆ มีลักษณะผิวหยาบ

3. ทังทดสอบ (Test Anvil) เป็นก้อนเหล็กทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 มิลลิเมตร มีความแข็งของจุดรับการกระแทกเท่ากับ Brinell 500 หรือ Rockwell 52C และมีอุปกรณ์ช่วยให้ค้อนกระแทกตั้งฉากกับจุดกระแทกขณะทำการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบ

1. เตรียมพื้นที่ทดสอบโดยต้องมี ไม่มีรอยร้าวหรือโพรง ไม่มีการหลุดร่อนและไม่มีสิ่งใดบูนบนผิว(Finishing)ที่จะทำการทดสอบรวมถึงปูนฉาบที่ต้องหลุดร่อนออกแล้วทำการปรับผิวให้เรียบโดยการใช้หินขัด

2. ตรวจสอบค้อนให้อยู่ในลักษณะพร้อมใช้งานและจับอย่างมั่นคงให้แกนของค้อนตั้งฉากกับผิวคอนกรีตทดสอบ

3. ค้อนกดอุปกรณ์ลงไปบนจุดที่กำหนดไว้จนสุดกระทั่งเกิดเสียงกระแทกขึ้นภายใน

4. ถอนอุปกรณ์แล้วอ่านค่าการสะท้อน (Rebound Number) โดยอ่านเป็นจำนวนเต็มทีใกล้เคียงมาก

5. ตรวจสอบดูความเสียหายของผิวคอนกรีตอันเนื่องมาจากการทดสอบ หากพบความเสียหายให้บันทึกรายละเอียดเพิ่มเติมกำกับหรือยกเลิกการใช้ค่าจากจุดทดสอบนั้น

6. ทดสอบจุดต่อไปโดยมีระยะห่างระหว่างจุดทดสอบไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

การประเมินผลการทดสอบ

1. ให้ทำการเฉลี่ยค่าการสะท้อนที่อ่านได้อย่างน้อย 10 ตำแหน่งและหากมีค่าใดที่มากกว่าค่าเฉลี่ยอยู่ 6 ให้ตัดค่านั้นและทำการเฉลี่ยใหม่ ทั้งนี้หากค่าที่เกิน 6 มีตั้งแต่ 3 ค่าขึ้นไปให้ทำการทดสอบค่าชุดใหม่แทน

2. นำค่าการสะท้อนมาเทียบหาค่ากำลังอัดกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและค่าสะท้อน ซึ่งโดยปกติแล้วผู้ผลิตคอนกรีตจะมีกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวให้มาพร้อมับอุปกรณ์อยู่แล้ว แต่ต้องไม่ลืมค่ากำลังอัดที่ผู้ผลิตทำการทดสอบมานั้นอาจจะแตกต่างจากโครงสร้างที่กำลังทำการทดสอบอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้การประมาณค่ากำลังอัดเป็นไปอย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1. เตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีช่วงครอบคลุมกำลังอัดของคอนกรีตที่จะตรวจสอบโดยให้มือตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่างทดสอบในแต่ละช่วงกำลังอัด

2.2. ตัวอย่างทดสอบต้องอยู่ในสภาพพิมพ์ผิวแห้งแล้วเตรียมผิวให้เรียบโดยการปรับผิวที่จะกดทดสอบ (Capping) แล้วจึงนำเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด กดตัวอย่างให้มีค่าประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัดคอนกรีตประลัยเพื่อยึดให้ตัวอย่างอยู่นิ่ง

2.3. วัดค่าการสะท้อนของคอนกรีตทดสอบด้วยอุปกรณ์ตัวเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบ โดยวัดทั้งสิ้น 15 ครั้ง แบ่งเป็นแนวตั้ง 3 แนวทดสอบแนวละ 5 ครั้ง โดยแต่ละแนวห่างกัน

เป็นมุม 120 องศา ซึ่งตำแหน่งการกดควรอยู่ในระยะ 200 มิลลิเมตรบริเวณช่วงกลางของตัวอย่างทดสอบหรือประมาณ 2 ใน 3 ของความสูงและต้องไม่ทดสอบซ้ำในตำแหน่งเดิม

2.4. เฉลี่ยค่าสะท้อนที่ได้เป็นค่าสะท้อนของตัวอย่าง

2.5. ทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตทดสอบ ทำการบันทึก

2.6. ทำการทดสอบกับคอนกรีตทดสอบอื่นๆด้วยวิธีการเดียวกันจนครบ

2.7. นำผลที่ได้มาสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัดด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Technique) เป็นต้น

2. การดึงทดสอบ (Pull off test) (ASTM C1583)[5]

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับเจาะคอนกรีต

2. ลูกเหล็ก (Steel Disk) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรหนา 25 มิลลิเมตร

3. เครื่องดึงทดสอบ (Tensile Loading Deice)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. เลือกจุดที่จะทดสอบโดยต้องมีระยะหุ้มเหล็กอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร และมีระยะระหว่าง 2 จุดทดสอบวัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางทดสอบอย่างน้อย 10 เซนติเมตร และระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบ 5 เซนติเมตร

2. กำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากผิวหน้าที่จะทดสอบ รวมถึงกำจัดเศษคอนกรีตที่ไม่ยึดกับผิวออกด้วย

3. เจาะผิวคอนกรีตตั้งฉากลงไป สำหรับการทดสอบวัสดุฐานให้เจาะลึกอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร และสำหรับการทดสอบวัสดุซ่อมให้เจาะลึกอย่างน้อย 10 มิลลิเมตรจากผิวคอนกรีตเดิม แล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 2 แกนซึ่งต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร

4. ทำความสะอาดรอยเจาะดังกล่าว

5. ทากาวลงบนผิวที่เจาะไว้แล้วนำ Steel Disk มาวางทับโดยให้แกนของ Steel Disk ขนานไปกับชิ้นงานทดสอบ ทั้งนี้ต้องไม่ให้กาวไหลลงไปยังรอยเจาะดังแสดงในภาพที่ 6

6. ติดตั้ง Tensile Loading เข้ากับ Steel Disk แล้วจึงทำการเพิ่มความเค้นดึงด้วยอัตรา 35 ± 15 กิโลปาสกาลต่อวินาทีจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบหลุด

7. บันทึกค่าสุดท้ายที่อ่านได้และบันทึกว่าเกิดการวิบัติที่ใดดังนี้

7.1. ที่คอนกรีตเดิม

7.2. ที่รอยต่อระหว่างวัสดุเดิมและวัสดุซ่อม



ภาพที่ 6 การทดสอบแรงดึง (ASTM D4541)

7.3. ที่วัสดุซ่อม

7.4. ที่รอยต่อระหว่างวัสดุซ่อมและกาวที่ใช้ยึดกับ Steel Disk

การประเมินผล

1. หากเกิดการวิบัติที่รอยต่อระหว่างวัสดุเดิมและวัสดุซ่อม ค่าที่ได้จะเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างรอยต่อดังกล่าว
2. หากเกิดการวิบัติที่วัสดุเดิมหรือวัสดุซ่อมค่าที่ได้จะเป็นกำลังรับแรงดึงในเนื้อวัสดุ
3. แรงยึดเหนี่ยวหรือกำลังรับแรงดึงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\text{Bond or Tensile Strength (MPa)} = \text{Tensile load (N)} / \text{Area of test specimen (mm}^2\text{)} \quad (2)$$

3. คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic pulse velocity) [17]

อุปกรณ์

1. ตัวกำเนิดคลื่น (Pulse Generator) ซึ่งให้กำเนิดคลื่นดลไม่น้อยกว่า 3 คลื่นต่อวินาที
2. ตัวส่งสัญญาณ (Transmitting Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงคลื่นไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ให้เป็นคลื่นกลที่มีสัญญาณความถี่ในช่วง 30-100 กิโลเฮิรตซ์ อีกทั้งยังสร้างคลื่นดลแรก (Triggering Pulse) ไปเป็นสัญญาณในการเริ่มต้นจับเวลา
3. ตัวรับสัญญาณ (Receiving Transducer) มีส่วนประกอบเหมือนตัวส่งสัญญาณ เพียงแต่ต่างกันที่จะเปลี่ยนคลื่นกลที่ได้รับกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า
4. ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีอัตราส่วนขยายคงที่ไม่เกิน 3 เท่าของสัญญาณที่วัดได้

5. วงจรควบคุมเวลา (Time-Measuring Circuit) วงจรนี้จะแสดงผลของเวลาที่เคลื่อนใช้ในการเดินทางระหว่างตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณซึ่งอ้างอิงเวลาเริ่มต้นจากคลื่นดลแรก ทั้งนี้วงจรจะตรวจวัดจับเวลาได้อย่างไม่คลาดที่อุณหภูมิระหว่าง 0-40 องศาเซลเซียส

6. แท่งอ้างอิง (Reference Bar) เป็นแท่งของแข็งที่มีไว้เพื่อใช้อ้างอิงและปรับแก้การตั้งค่าของเครื่องวัดสัญญาณ

7. สายส่งสัญญาณ (Connecting Cables) เป็นสายเชื่อมต่อจากตัวรับหรือตัวส่งสัญญาณไปยังส่วนประมวลผล โดยจะต้องให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าการอ่านที่ถูกต้องที่สุด

8. วัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) เป็นวัสดุความหนืดสูงที่จะไปอุดช่องว่างระหว่างตัวส่งและรับสัญญาณกับผิวคอนกรีต เพื่อให้การส่งผ่านคลื่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์
ขั้นตอนการทดสอบ

การตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วิธี Indirect Test ซึ่งการทดสอบจะเป็นไปดังภาพที่ 7

1. เลือกจุดที่จะทำการทดสอบโดยจุดที่เลือกต้องห่างจากเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการผิดพลาดของการอ่านค่า อีกทั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและรับที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 100-300 มิลลิเมตร

2. ทาวัสดุเชื่อมสัญญาณลงบนจุดที่จะทำการทดสอบ

3. นำตัวส่งและรับสัญญาณกดลงไปบริเวณที่ทาวัสดุเชื่อมแล้ว โดยกดให้ไม่มีช่องว่างระหว่างผิวคอนกรีตและตัวส่งและรับสัญญาณ

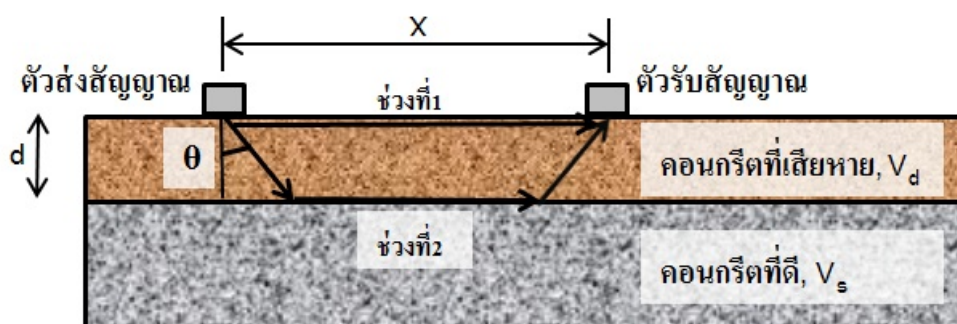
4. ทำการวัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านคอนกรีตและบันทึกค่า

5. ขยับตัวส่งสัญญาณออกไปด้านข้างที่ระยะต่างๆดังภาพที่ 8 แล้วทำการทดสอบจนครบ

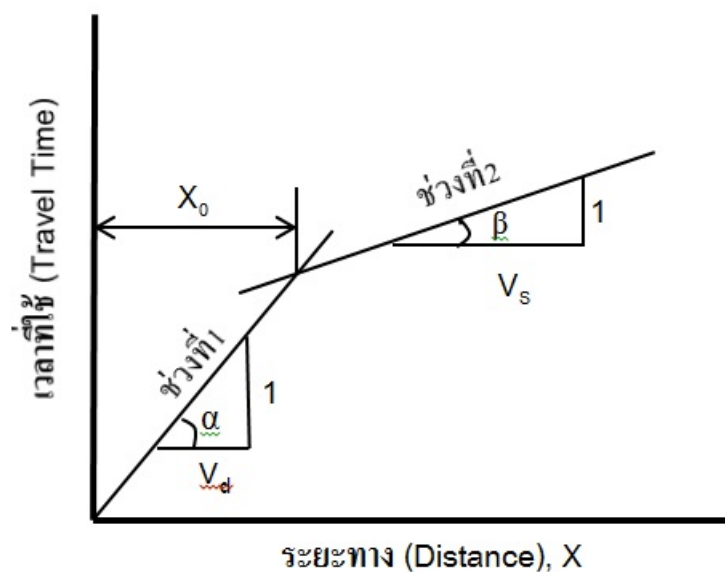
6. นำค่าระหว่างเวลาและระยะทางที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาจุดเปลี่ยนความชันดังภาพที่ 9



ภาพที่ 7 การทดสอบ Indirect Test



ภาพที่ 8 แสดงการทดสอบโดยคลื่นตัวรับสัญญาณออกไป



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทาง และจุดเปลี่ยนความชัน

ข้อควรระวัง

1. ความเร็วของคลื่นในการเดินทางผ่านคอนกรีตที่มีสถานะอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าสถานะแห้งอยู่ประมาณร้อยละ 5 ดังนั้นเรื่องความชื้นภายในคอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่ต้องพึงระวังเป็นอย่างยิ่ง
2. ขนาดและรูปร่างของคอนกรีตไม่ได้เป็นปัญหาในการตรวจสอบ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือระยะระหว่างตัวส่งและรับสัญญาณ โดยที่ระยะดังกล่าวไม่ควรน้อยกว่าความยาวคลื่นที่ใช้
3. ควรหลีกเลี่ยงการตรวจสอบบริเวณที่มีเหล็กเสริม เพราะอาจทำให้ค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อน

การประเมินผล

ตามมาตรฐาน ACI [17] ได้อธิบายการแปรผลไว้คือ “เมื่อความชื้นในช่วงก่อนถึงจุดเปลี่ยนความชื้นมีค่าที่น้อยกว่าช่วงหลังจุดเปลี่ยนความชื้น หมายความว่าคอนกรีตนั้นอาจเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลย แต่ถ้าหากเมื่อความชื้นในช่วงก่อนถึงจุดเปลี่ยนความชื้นมีค่าที่มากกว่าช่วงหลังจุดเปลี่ยนความชื้น ให้คำนวณหาความลึกของความเสียหายได้ดังสมการที่ 3

$$d = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (3)$$

โดยที่

d คือ ความลึกที่เสียหายจากผิว

X_0 คือ ระยะทางที่ความชื้นเปลี่ยนไป

V_s คือ ความเร็วของผิวคอนกรีตที่ดี

V_d คือ ความเร็วของผิวคอนกรีตที่เสียหาย

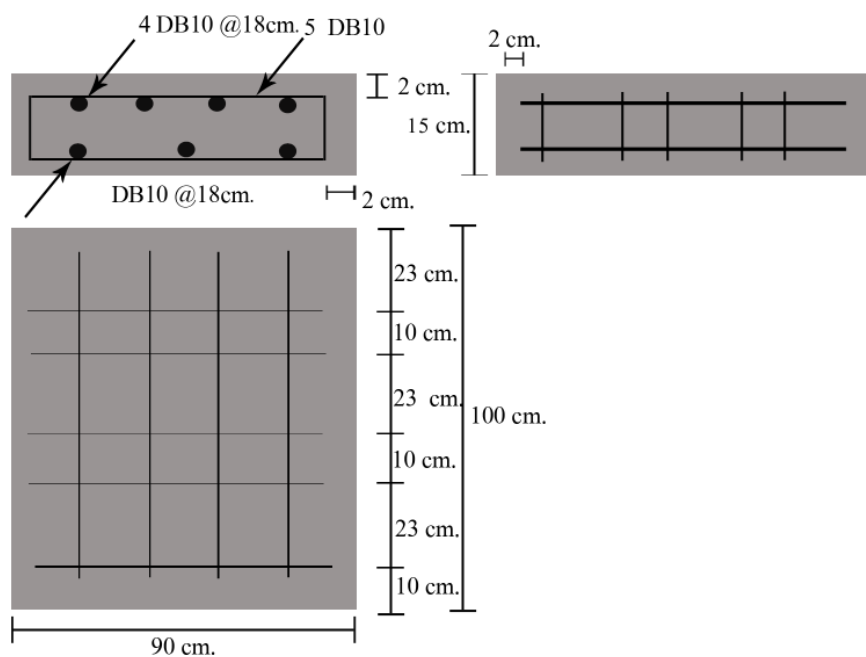
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1.เตรียมคอนกรีตตัวอย่าง

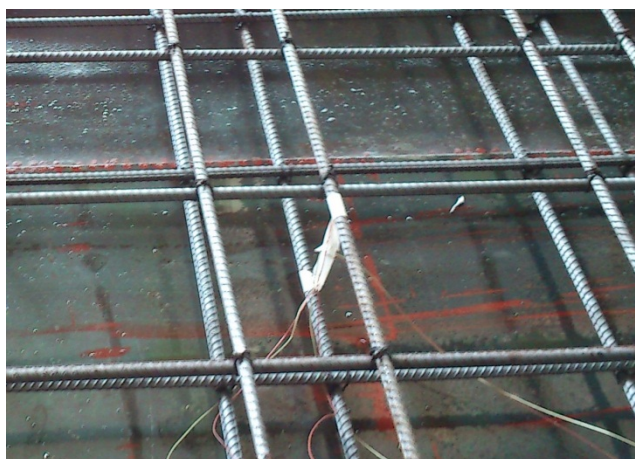
1. หล่อคอนกรีตที่ผสมตามมาตรฐาน ASTM C192/C 192M-07 [29] โดยมีค่ากำลังอัดประลัย (f_c') เท่ากับ 240 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ในแบบขนาด 900x1000x150 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 10 โดยขึ้นตัวอย่างจะมีเหล็กเสริม โดยเสริมเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร เป็นเหล็กบน 4 เส้น เหล็กล่าง 3 เส้น เสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตรมีระยะดังภาพที่ 11 โดยมีระยะหุ้มเหล็กเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ยกเว้นคอนกรีตตัวอย่างที่มีระยะเวลาเผาไฟ 120 นาทีจะมีระยะหุ้มเหล็ก 10, 20 และ 30 มิลลิเมตร และติดตั้งสายวัดอุณหภูมิไว้ที่ระยะ 2.5, 7.5 และ 12.5 เซนติเมตร จากผิว เว้นแต่ที่ขึ้นตัวอย่างระยะหุ้ม 10 จะติดตั้งสายวัดอุณหภูมิไว้ที่ระยะ 1.5, 7.5 และ 12.5 เซนติเมตร จากผิวและระยะหุ้ม 30 มิลลิเมตร จะติดตั้งสายวัดอุณหภูมิไว้ที่ระยะ 3.5, 7.5 และ 12.5 เซนติเมตร จากผิว ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 10 การตั้งแบบหล่อขึ้นตัวอย่าง



ภาพที่ 11 ขนาดของชั้นตัวอย่างและการวางเหล็กเสริม



ภาพที่ 12 การติดตั้งสายรัดคอกเหล็กเสริม

2. ทำการทดสอบค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M-08 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete” [29]

3. ทำการบ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 28 วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-09a “Standard Test Method for Compressive Strength” [29] ที่ 28 วัน รายละเอียดจำนวนชั้นตัวอย่างแสดงให้เห็นในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 จำนวนชิ้นงานตัวอย่าง

ค่ากำลังอัด	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	ระยะหุ้มเหล็ก (ชม.)	จำนวน
240	0	2	2
	30	2	2
	60	2	2
	90	2	2
	120	1	2
		2	2
		3	2
	รวม	14	ตัวอย่าง

ค่ากำลังอัด	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	ระยะหุ้มเหล็ก (ชม.)	จำนวน
350	0	2	2
	30	2	2
	60	2	2
	90	2	2
	120	1	2
		2	2
		3	2
	รวม	14	ตัวอย่าง

3.2. จำลองสภาวะเพลิงไหม้

- นำคอนกรีตตัวอย่างที่พักที่อุณหภูมิห้องแล้วมาพันรอบทุกด้านด้วยแผ่นเซรามิกไฟเบอร์เว้นไว้แต่ด้านที่กำหนดระยะหุ้มเหล็ก



ภาพที่ 13 การวางชิ้นตัวอย่างในเตา

2. นำคอนกรีตตัวอย่างเข้าเตาเผา วางเป็น 2 แถว แถวละ 2 ชิ้น ระหว่างชั้นห่างประมาณ 30 ซม. ดังภาพที่ 13 และเผาให้อุณหภูมิเป็นไปตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 [3] กำหนดเวลาไว้ที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที โดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

3.3. ตรวจสอบสภาพความเสียหาย

หลังจากตัวอย่างถูกเผาไฟแล้วจะทิ้งให้เย็นในเตาเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชม. จากนั้นจึงนำออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในอากาศอีกไม่น้อยกว่า 3 วัน จากนั้นใช้เครื่องเป่าลม (Blower) กำลังไฟ 580 วัตต์ เป่าทำความสะอาดก่อนทำการตรวจสอบความเสียหาย โดยการตรวจสอบความเสียหายนั้นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

3.3.1. ทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย

1. การพินิจด้วยสายตา

การพินิจด้วยสายตา มี 2 ขั้นตอนคือ

1.1. ปริมาณและขนาดรอยร้าว

- นำแผ่นวัดรอยร้าว วัดขนาดของรอยร้าวที่เกิด
- บันทึกค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ได้

1.2. สี

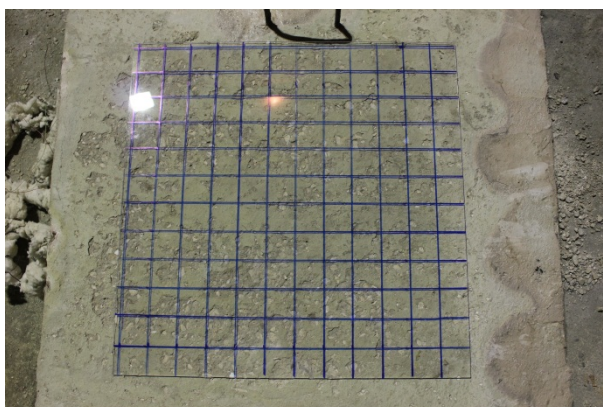
สังเกตสีของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละอุณหภูมิแล้วจดบันทึก

1.3. ปริมาณการหลุ่ร่อน

การวัดปริมาณการหลุ่ร่อนจะทำโดย 2 วิธีคือ

1.3.1. วัดด้วยมือ

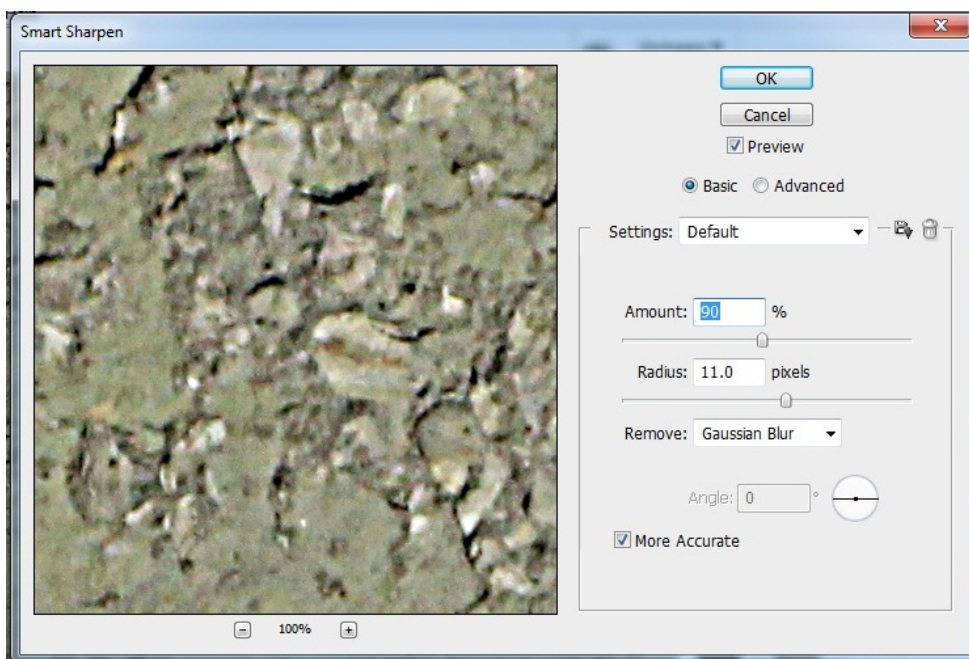
- นำแผ่นอะคริลิกใสขนาด 60 x 60 ซม. แบ่งเป็นตารางขนาด 5x5 ซม. จำนวน 144 ช่อง
- นำแผ่นอะคริลิกลงทาบกับชิ้นตัวอย่าง แล้วนับจำนวนช่องความเสียหายและช่องที่ติดภาพที่ 14
- บันทึกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความเสียหายเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดในตาราง
- การตรวจวัดจะทำทั้งสิ้น 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำต่างวันและเวลา เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ตรวจนับ



ภาพที่ 14 แผ่นอะคริลิกสำหรับตรวจนับความเสียหาย

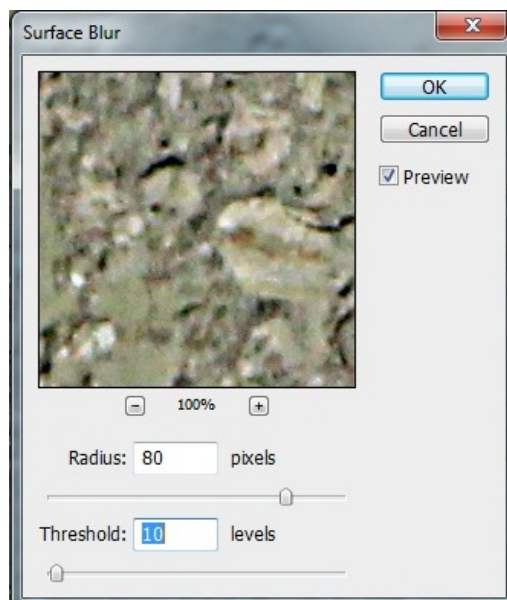
1.3.2. วัดด้วยโปรแกรม

- ใช้กล้องดิจิทัลคุณภาพ 15 ล้านพิกเซลถ่ายผิวชิ้นตัวอย่างให้ตั้งฉากมากที่สุด
- นำภาพที่ได้ไปตัด (crop) ในคอมพิวเตอร์ให้มีขนาด 2800x2800 พิกเซล (จะได้ขนาดใกล้เคียงกับแผ่นอะคริลิกใส) ที่บริเวณเดียวกันกับที่นำแผ่นอะคริลิกใสลงทาบ
- เปิดภาพที่ได้ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop
- ใช้คำสั่ง Filter-Sharpen-Smart Sharpen ตั้งค่าตามภาพที่ 15



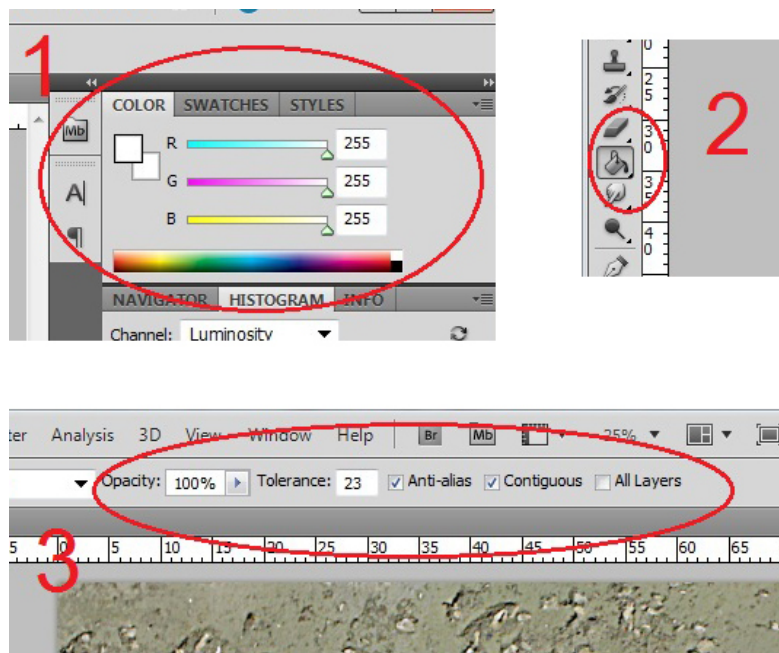
ภาพที่ 15 การตั้งค่า Smart Sharpen

- ใช้คำสั่ง Filter-Blur-Surface Blur ตั้งค่าตามภาพที่16



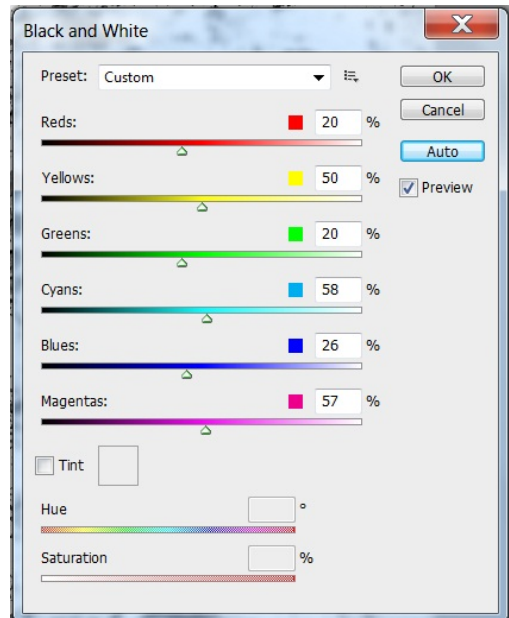
ภาพที่ 16 การตั้งค่า Surface Blur

- ตั้งค่าสี, เลือกคำสั่ง Paint Bucket Tool, ตั้งค่า ดังภาพที่17 แล้วจึง
ถมสีขาวลงไปยังพื้นที่สีจนครบ



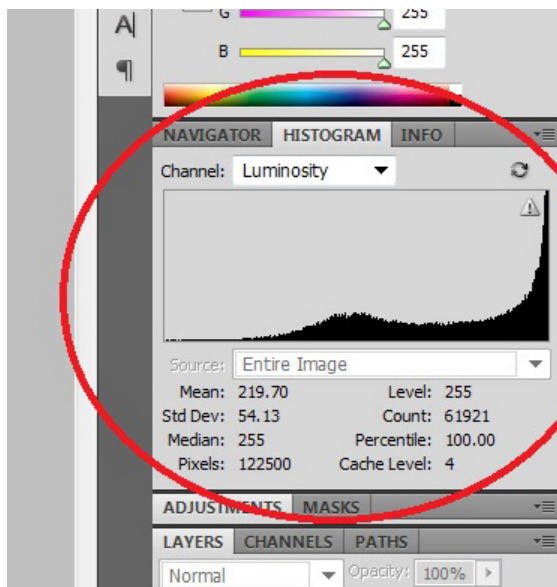
ภาพที่ 17 การตั้งค่าสีและการถมสี

- ใช้คำสั่ง Image-Adjustments-Black&White เลือกคำสั่ง Auto แล้วตอบ OK ดังภาพที่18



ภาพที่ 18 การปรับภาพเป็นขาวดำ

- ใช้คำสั่ง Paint Bucket Tool อีกครั้ง โดยถมลงไปยังพื้นที่สีขาวซ้ำ 3 ครั้ง
- จากนั้นที่หน้าต่าง Histogram เลือก Luminosity ที่กราฟเลือกไปที่ Level 255 บันทึกค่า Count (จำนวนพิกเซลสีขาว หรือก็คือพื้นที่ดี) และค่า Pixels (จำนวนพิกเซลทั้งหมด) ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การอ่านค่า

- นำค่า Pixels ลบด้วย Count จะได้จำนวนพิกเซลบนพื้นผิวที่เสียหาย
- เปอร์เซ็นต์ความเสียหายคำนวณได้ดังสมการที่ 3

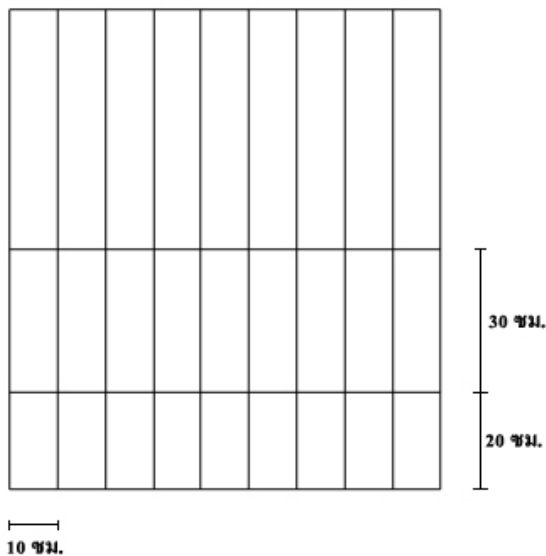
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย} = \frac{\text{จำนวนพิกเซลที่เสียหาย}}{\text{Pixels}} \times 100 \quad (4)$$

1.4. วัดความลึกที่หลุดร่อน

- ใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (vernier caliper) วัดความลึกที่หลุดร่อนด้วยจำนวนไม่ต่ำกว่า 100 ค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยแล้วจดบันทึก
- การตรวจวัดจะทำทั้งสิ้น 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำต่างวันและเวลา เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ตรวจวัด

2. วิธีคลื่นอัลตราโซนิก

1. ตั้งค่าศูนย์ให้กับตัวรับและตัวส่งสัญญาณ
2. ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องโดยทดสอบกับแท่งทดสอบมาตรฐาน
3. แบ่งชั้นตัวอย่างเป็นดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การแบ่งพื้นที่ทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก

4. วัดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบไม่โดยตรง (Indirect test) ตามจุดตัดบนภาพ แล้วทำการทดสอบดังภาพที่ 21



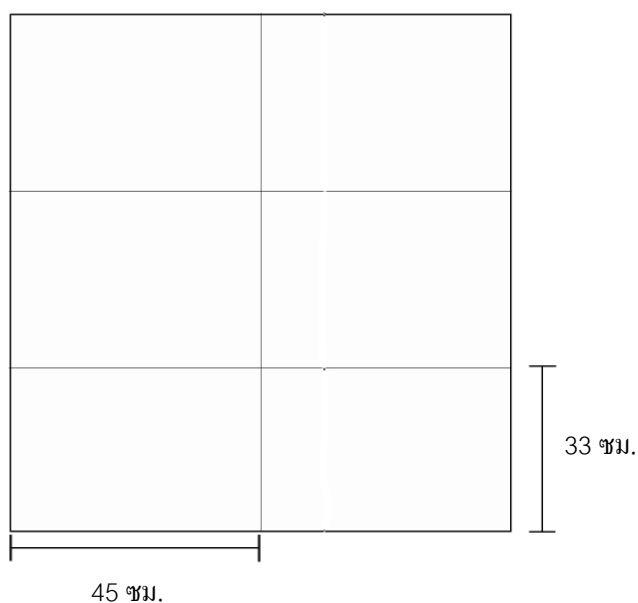
ภาพที่ 21 การทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก

5. บันทึกค่า แล้วทำซ้ำอีกครั้ง

3.3.2. ทำการทดสอบแบบกึ่งทำลาย

1. วิธีค้อนกระแทก

1. แบ่งชิ้นตัวอย่างออกเป็น 3 แถว แต่ละแถวแบ่งออกเป็น 2 หลักระหว่างแถว 22
2. วัดค่าสะท้อน จำนวน 16 ครั้งในแต่ละพื้นที่ โดยใช้หินขัดขีดบริเวณที่จะกดทดสอบให้เรียบก่อน ทั้งนี้ต้องไม่ทำซ้ำตำแหน่งเดิม และแต่ละจุดต้องห่างกันอย่างน้อย 2.5 ซม ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 การแบ่งพื้นที่ทดสอบค้อนกระแทก



ภาพที่ 23 การทดสอบด้วยค้อนกระแทก

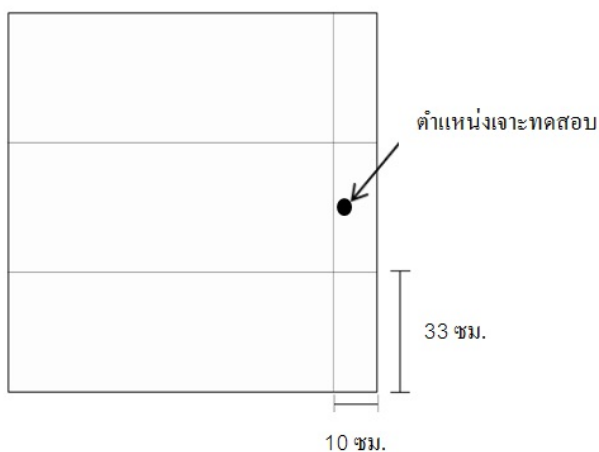
3. เฉลี่ยค่าการสะท้อนที่อ่านได้และหากมีค่าใดที่มากกว่าค่าเฉลี่ยอยู่ 6 ให้ตัดค่านั้นและทำการเฉลี่ยใหม่ ทั้งนี้หากค่าที่เกิน 6 มีตั้งแต่ 3 ค่าขึ้นไปให้ทำการทดสอบค่าชุดใหม่แทน

4. นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนและกำลังอัดที่ทำได้ในช่วงต้น เพื่อหาค่ากำลังอัดของชิ้นงานตัวอย่าง

2. การเจาะตัวอย่างทดสอบ

1. แบ่งพื้นที่ขึ้นตัวอย่างออกเป็น 3 แถว โดยเว้นจากขอบด้านขวาเป็นระยะ 10 ซม. ดังภาพที่ 24

2. เจาะตัวอย่างทดสอบของชิ้นตัวอย่างที่ ด้วยหัวเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (2 นิ้ว) ความลึก 10 เซนติเมตร จำนวน 1 ตัวอย่างดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 ตำแหน่งการเจาะคอนกรีตเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีต



ภาพที่ 25 การเจาะชิ้นตัวอย่าง

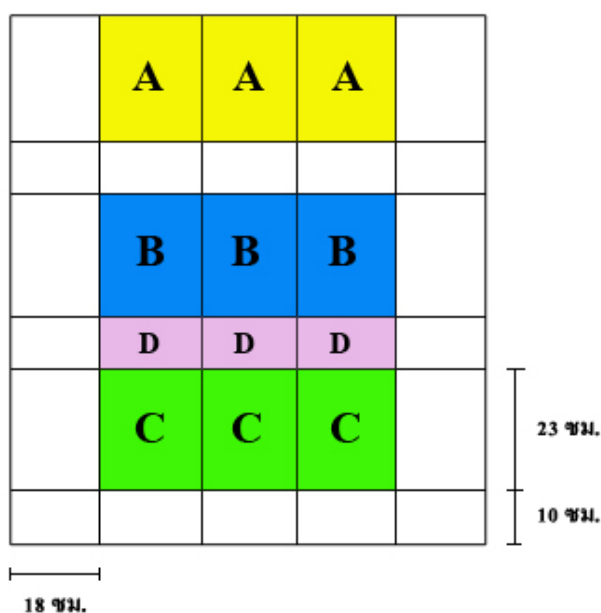
3. สํารวจดูความสมบูรณ์ของชิ้นตัวอย่าง วัดความลึกของสีที่เปลี่ยนไปจำนวน 4 ค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.4. ปรับผิวตัวอย่าง

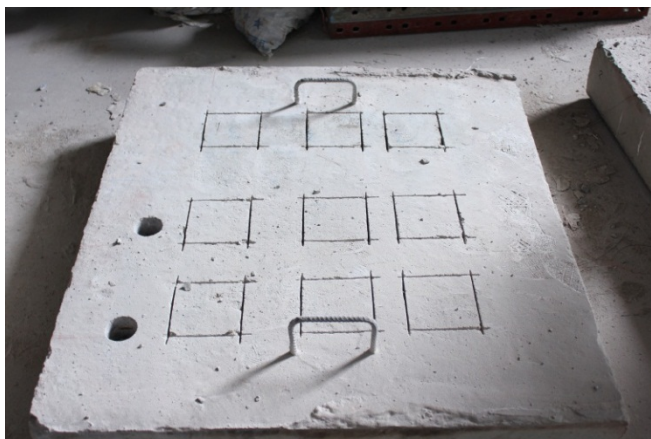
กำหนดให้ความเสียหายเฉลี่ยที่วัดได้ของชิ้นตัวอย่างที่เวลาใดๆเป็นความลึกที่ต้องปรับระดับ แล้วทำการปรับผิวทั่วทั้งชิ้นตัวอย่างให้มีระดับที่เท่ากัน

3.5. การทดสอบด้วยวิธีดิงทดสอบ

ภายหลังจากการปรับผิวจะแบ่งพื้นที่ผิวออกเป็นดังภาพที่ 26 ในช่อง A, B, C จะสกัดผิวลงไปเป็นความลึก 1, 2, 3 ซม. ตามลำดับ วิธีการสกัด จะใช้ใบตัดตัดโดยรอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีความลึกใกล้เคียงกับความลึกที่ต้องการ ดังภาพที่ 27 จากนั้นจึงใช้สว่านสกัดออกดังภาพที่ 28 จากนั้นจึงใช้ใบเจียร เจียรผิวให้เรียบและให้ได้ความลึกตามต้องการดังภาพที่ 29 ทั้งนี้ชิ้นตัวอย่างใดที่ผ่านการปรับผิวมาแล้วก็ยังคงสกัดลงไป 1, 2, 3 ซม. เช่นกัน



ภาพที่ 26 ตำแหน่งการสกัดผิว



ภาพที่ 27 การใช้ใบตัดตัดกรอบบริเวณที่จะทำการทดสอบ



ภาพที่ 28 การใช้สว่านสกัดผิวให้ได้ความลึกใกล้เคียงกับที่ต้องการ



ภาพที่ 29 การใช้เครื่องเจียร เจียรให้เรียบและให้ได้ความลึกที่ต้องการ

ดังนั้นความลึกของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการปรับผิวแล้ว ภายหลังจากการสกัดจะมีความลึกเทียบกับระดับเดิมเป็นไปตามสมการที่ 5 แต่ทั้งนี้เพื่อความสะดวก ก็จะใช้ยังคงเรียกว่าความลึก 1, 2, 3 ซม เช่นเดิม

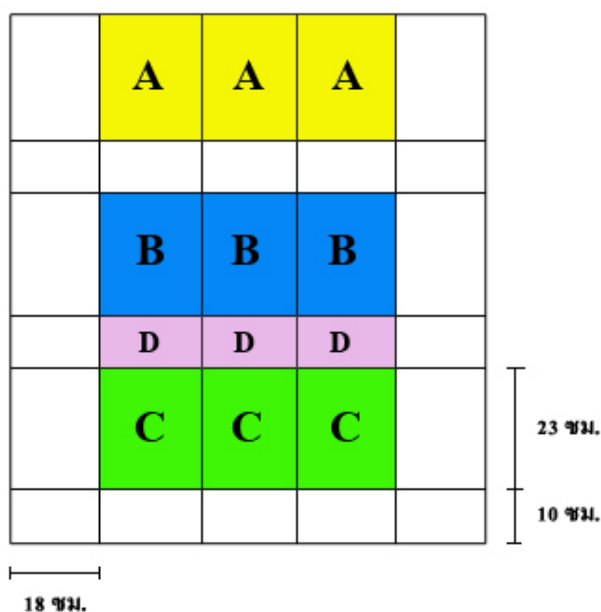
$$\text{ความจริงลึกทั้งหมด} = \text{ความลึกของการหลุดร่อน} + \text{ความลึกของการสกัด} \quad (5)$$

จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความเสียหายด้วยวิธีดังทดสอบ

วิธีดังทดสอบ

1. เลือกจุดที่จะทดสอบโดยต้องมีระยะหุ้มเหล็กอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร และมีระยะระหว่าง 2 จุดทดสอบวัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางทดสอบอย่างน้อย 10 เซนติเมตร และระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบ 5 เซนติเมตร ในที่นี้คือจุด A, B, C ที่ได้สกัดไปแล้ว และจุด D ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ไม่ทำการสกัดดังภาพที่ 30

2. กำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากผิวหน้าที่จะทดสอบ รวมถึงกำจัดเศษคอนกรีตที่ไม่ยึดกับผิวออกด้วย



ภาพที่ 30 แสดงพื้นที่ทดสอบ

3. เจาะผิวคอนกรีตตั้งฉากลงไป ลึกอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร
4. ทำความสะอาดรอยเจาะ
5. ทากาวลงบนผิวที่เจาะไว้แล้วนำลูกเหล็ก (steel disk) มาวางทับโดยให้แกนของ Steel Disk ขนานไปกับชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 31 ทั้งนี้ต้องไม่ให้อากาศไหลลงไปยังรอยเจาะ ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 วัน
6. ติดตั้งเครื่องดึงทดสอบเข้ากับลูกเหล็กแล้วจึงทำการเพิ่มความเค้นดึงด้วยอัตรา 35 ± 15 กิโลปาสกาลต่อวินาทีจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบหลุดดังภาพที่ 32
7. บันทึกค่าสุดท้ายที่อ่านได้และบันทึกว่าเกิดการวิบัติที่ใด
8. ทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้งแล้วบันทึกผล



ภาพที่ 31 การติดตั้งลูกเหล็ก



ภาพที่ 32 เครื่องดึงทดสอบ (Tensile Loading) สำหรับการทดสอบดึงทดสอบ

3.6. จัดระดับความเสียหาย

นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาเรียงเรียงและนำมาจำแนกระดับความเสียหายต่างๆ

3.7. ซ่อมแซมตัวอย่างที่เสียหาย

1. การซ่อมจะใช้ 2 วิธี และใช้ 3 ผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ชนิดผลิตภัณฑ์และวิธีที่ใช้ซ่อมแซม

ผลิตภัณฑ์	ชนิด	วิธีซ่อม
ก	ซีเมนต์มอร์ตาร์	ฉาบซ่อม
ข	อีพ็อกซีมอร์ตาร์	ตั้งแบบหล่อ
ค	อีพ็อกซีมอร์ตาร์	ฉาบซ่อม

*หมายเหตุ คุณสมบัติของวัสดุซ่อมอยู่ในภาคผนวก ก.

2. ทำการซ่อมบนผิวชั้นตัวอย่าง 350ksc ที่ไม่เผาไฟ ด้วยผลิตภัณฑ์ ค. และบนผิวชั้นตัวอย่าง 350ksc เวลาเผาไฟ 60 นาที ด้วยทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ด้วยความหนา 2 ซม
3. ในการซ่อมจะมีลำดับดังภาพที่ 33



a) เป่าทำความสะอาดผิวที่จะซ่อม



b) ทาน้ำยาประสานระหว่างผิวคอนกรีตเดิมและวัสดุซ่อม



c) ซ่อมโดยวัสดุซ่อม ก



d) ซ่อมโดยวัสดุซ่อม ข



e) ซ่อมโดยวัสดุซ่อม ค

ภาพที่ 33 ลำดับการซ่อมเรียงจาก a-e ตามลำดับ

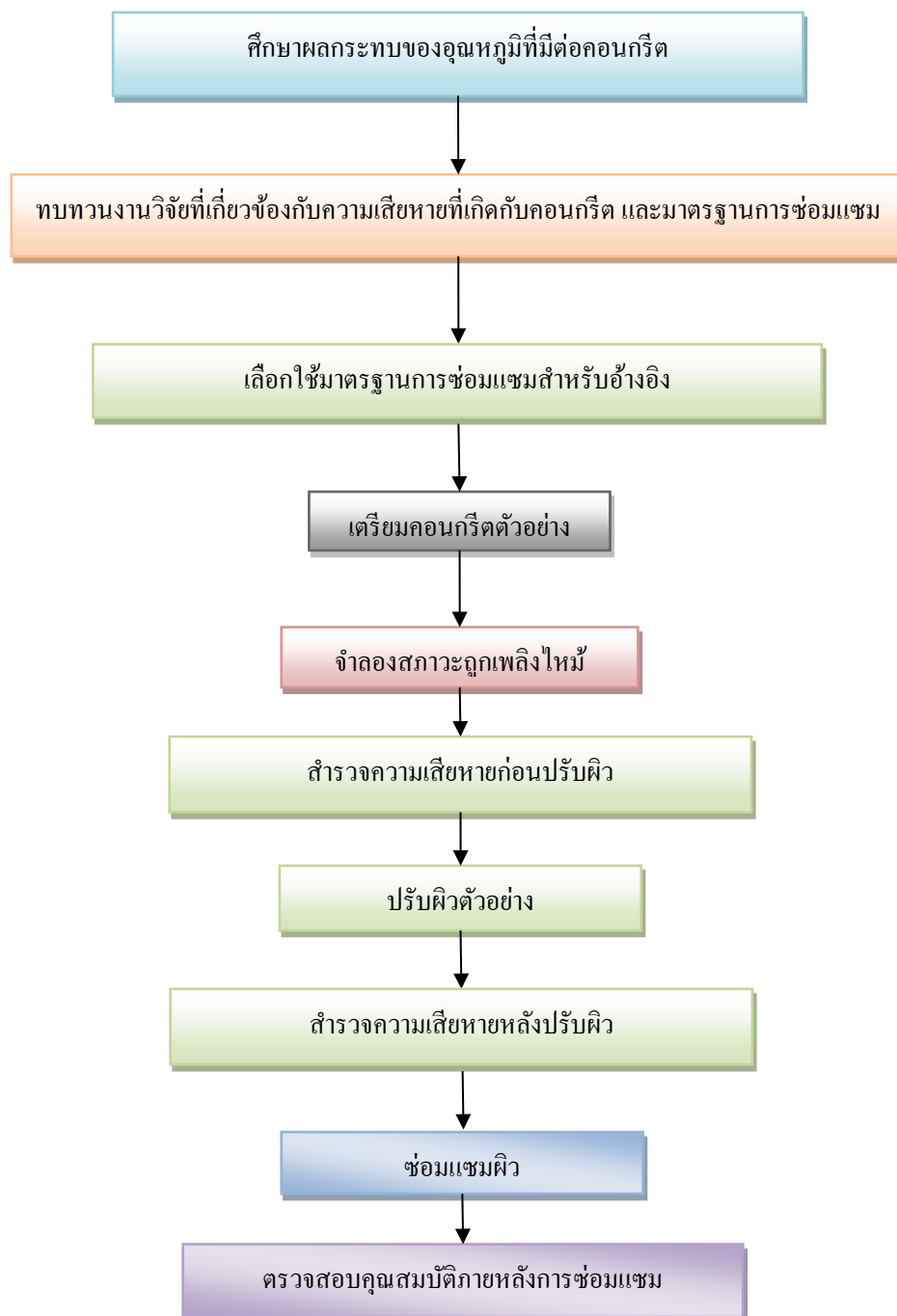
3.8. ตรวจสอบคุณสมบัติภายหลังการซ่อม

ภายหลังจากการซ่อมจะทำการตรวจสอบแบบกึ่งทำลายอีกทั้งโดยวิธีดึงทดสอบ จุดที่ทำการดึงคือจุด A สำหรับวัสดุซ่อม ก. จุด B สำหรับวัสดุซ่อม ข. และจุด C สำหรับวัสดุซ่อม ค. จากนั้นทำการบันทึกค่าที่อ่านได้ โดยทำซ้ำทั้งสิ้น 3 ครั้ง

3.9. สรุปผล

ทำการสรุปผลและค่าทั้งหมดที่ได้

3.10. แผนผังแสดงลำดับการวิจัย



ภาพที่ 34 แผนผังแสดงการทำงาน

บทที่ 4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์

4.1. คุณสมบัติของคอนกรีต

ชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบ ได้ถูกออกแบบไว้ที่กำลัง 240ksc และ 350ksc ซึ่งผลการทดสอบจริงที่อายุไม่น้อยกว่า 28 วันในห้องปฏิบัติการ เป็นไปตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของชิ้นตัวอย่าง

ค่ากำลังที่ ออกแบบ (ksc)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ค่ากำลังที่กดได้จริง (ksc)			
		1	2	3	เฉลี่ย
240	15	224.04	226.35	228.91	229.36
350	15	310.11	313.85	331.93	318.63

4.2. ผลการจำลองเพลิงไหม้

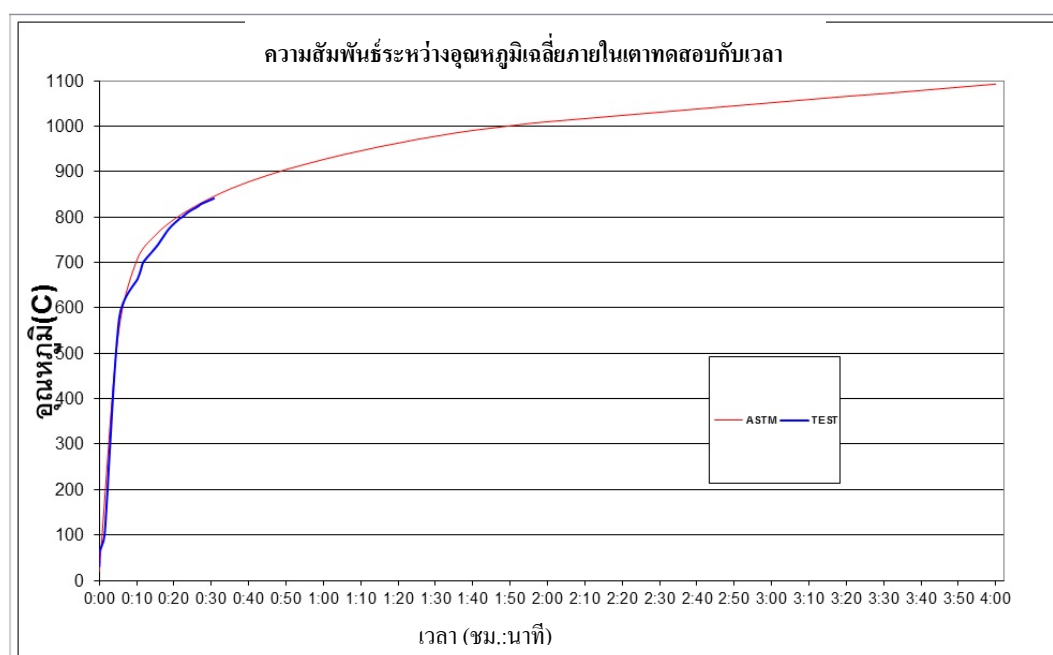
เมื่ออายุของชิ้นตัวอย่างมีไม่น้อยกว่า 28 วันแล้ว จึงนำชิ้นตัวอย่างเข้าเตาเผาที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที โดยสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

4.2.1. อุณหภูมิภายในเตา

อุณหภูมิภายในเตาที่เวลาต่างๆดังตารางที่ 11-17 และมีผลเทียบกับกราฟไฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 35-40

ตารางที่ 11 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 30 นาที

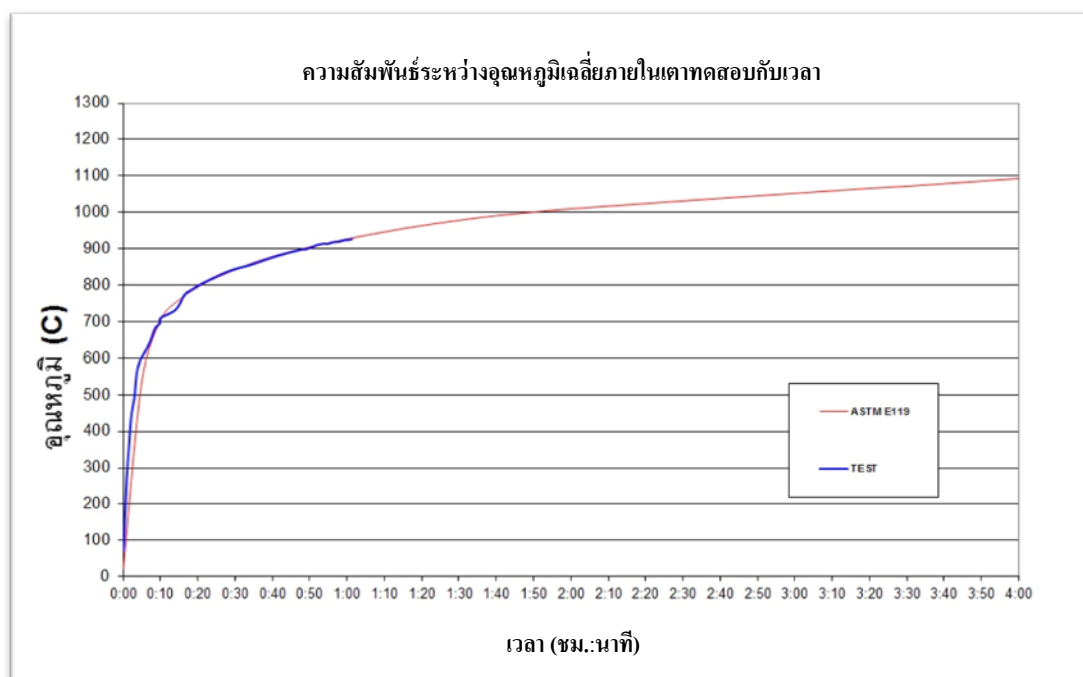
เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	31
0:00:03	65
0:01:24	100
0:05:21	579
0:10:15	664
0:11:36	698
0:12:15	706
0:15:39	739
0:18:36	774
0:21:48	799
0:22:00	799
0:23:36	810
0:26:27	824
0:27:15	829
0:30:39	841



ภาพที่ 35 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 30 นาที

ตารางที่ 12 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 60 นาที

เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	72	0:32:33	851
0:00:00	72	0:35:18	860
0:00:12	100	0:37:54	869
0:01:00	277	0:41:00	879
0:02:12	443	0:44:21	889
0:03:00	492	0:48:03	898
0:04:00	578	0:49:00	898
0:07:00	640	0:51:33	909
0:08:33	682	0:52:03	911
0:09:48	695	0:53:42	914
0:10:03	710	0:54:48	913
0:14:06	733	0:56:03	918
0:16:27	774	0:58:00	920
0:18:12	787	0:59:21	924
0:21:30	806	1:00:06	924
0:27:12	834	1:01:18	927
0:30:21	846		

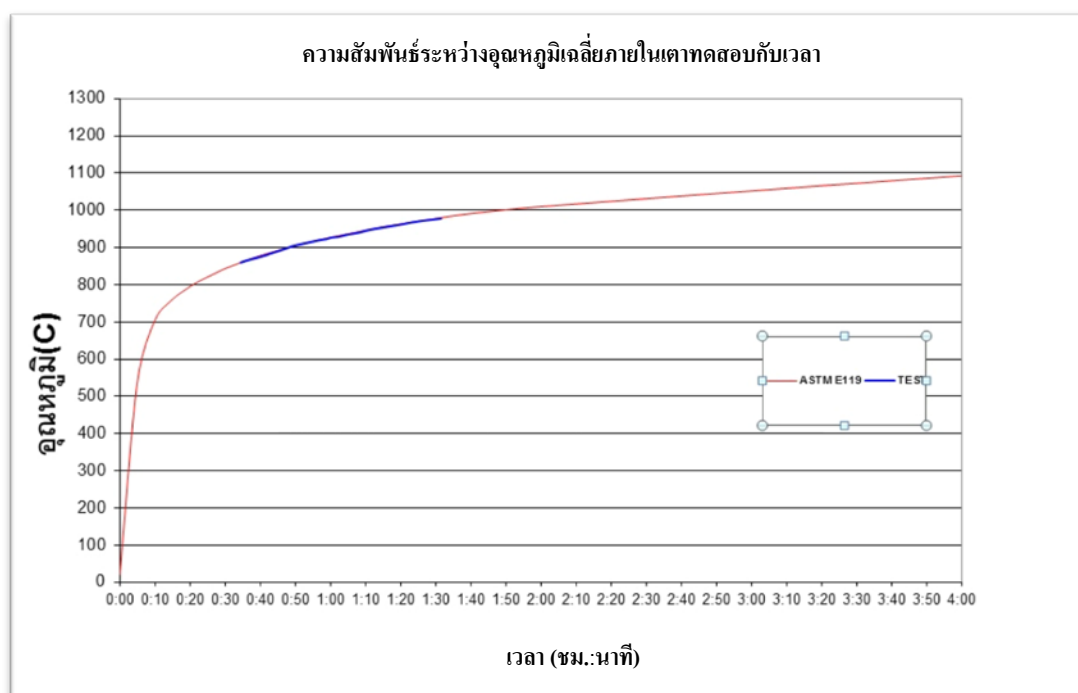


ภาพที่ 36 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 60 นาที

ตารางที่ 13 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 60 นาที

เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:34:30	860	1:20:00	961
0:36:00	865	1:23:12	967
0:41:21	878	1:26:00	972
0:42:30	882	1:27:03	973
0:45:48	892	1:30:18	977
0:49:09	904	1:31:33	978
0:49:54	905		
0:56:06	918		
0:57:18	920		
0:58:42	922		
1:00:00	926		
1:01:00	927		
1:02:06	929		
1:04:00	933		
1:05:00	935		
1:07:33	939		
1:11:33	948		

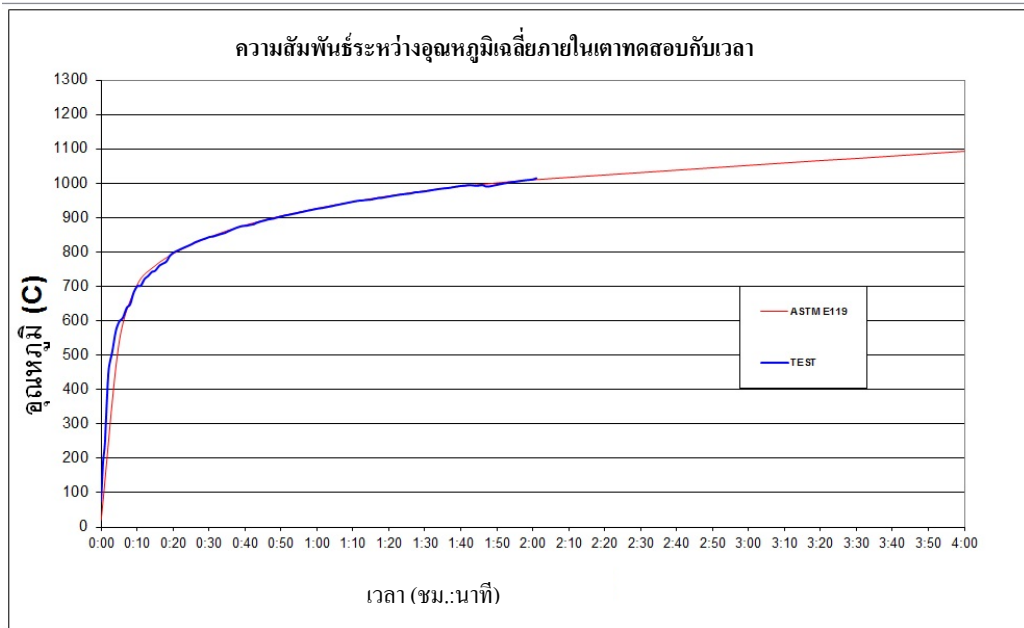
*หมายเหตุ จากปัญหาทางการบันทึกข้อมูล ทำให้ไม่มีค่าอุณหภูมิในช่วง 34 นาทีแรก



ภาพที่ 37 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 90 นาที

ตารางที่ 14 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.

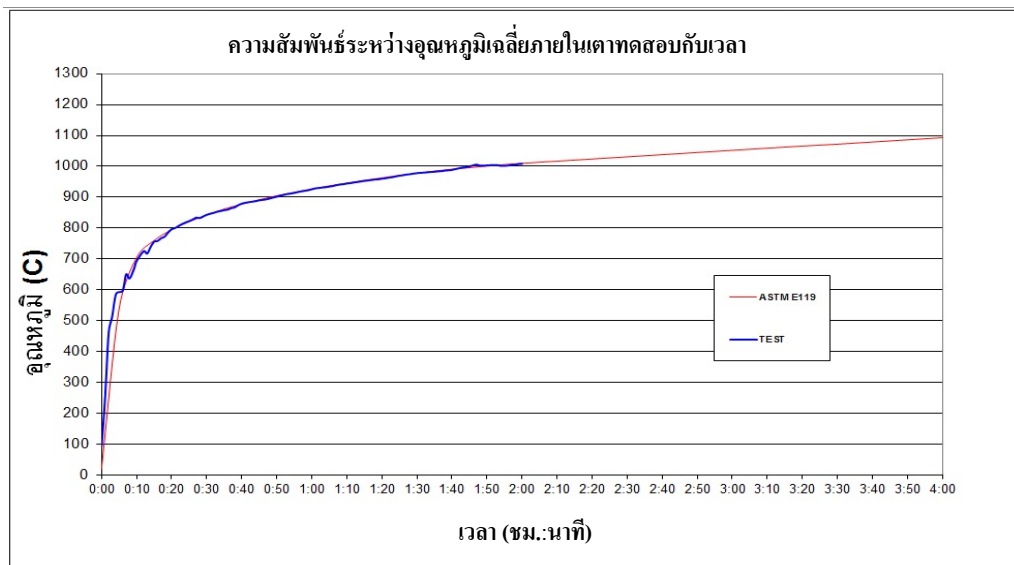
เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	75	0:26:03	828	0:55:12	915	1:31:03	978
0:00:00	78	0:26:57	832	0:56:00	917	1:32:27	981
0:00:33	193	0:28:12	837	0:56:57	919	1:34:03	984
0:01:03	245	0:29:03	840	0:58:00	922	1:35:18	985
0:02:03	453	0:30:09	844	0:59:06	924	1:36:09	986
0:03:03	508	0:31:00	845	1:00:21	927	1:37:03	987
0:04:03	569	0:32:03	848	1:01:18	928	1:39:09	991
0:05:00	597	0:33:03	852	1:02:00	929	1:40:00	992
0:06:03	609	0:34:33	856	1:03:00	931	1:41:06	993
0:07:06	638	0:35:24	861	1:04:06	934	1:42:27	995
0:08:03	648	0:37:42	871	1:05:15	936	1:44:24	993
0:09:03	683	0:39:12	876	1:06:03	938	1:45:00	993
0:10:03	701	0:40:18	876	1:11:00	949	1:46:03	995
0:11:00	702	0:41:33	879	1:12:18	950	1:47:03	990
0:12:03	721	0:42:27	881	1:13:03	951	1:48:12	991
0:13:03	730	0:43:06	885	1:14:09	952	1:49:45	995
0:14:06	742	0:44:33	890	1:15:06	953	1:51:12	998
0:15:00	746	0:45:30	892	1:16:00	955	1:52:48	1001
0:16:18	761	0:46:12	894	1:17:00	957	1:53:45	1003
0:18:06	772	0:47:21	896	1:18:00	958	1:55:27	1005
0:19:03	788	0:48:06	898	1:19:33	961	1:57:00	1007
0:20:03	798	0:49:03	901	1:23:12	967	1:58:27	1009
0:21:03	803	0:50:03	904	1:25:54	970	1:59:03	1010
0:22:03	808	0:51:06	906	1:27:24	974	2:00:00	1011
0:22:57	813	0:52:06	908	1:28:00	974	2:01:00	1015
0:24:00	817	0:53:21	911	1:29:03	975		
0:25:06	822	0:54:21	913	1:30:03	977		



ภาพที่ 38 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.

ตารางที่ 15 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะเวลาหุ้ม 1 ชม.

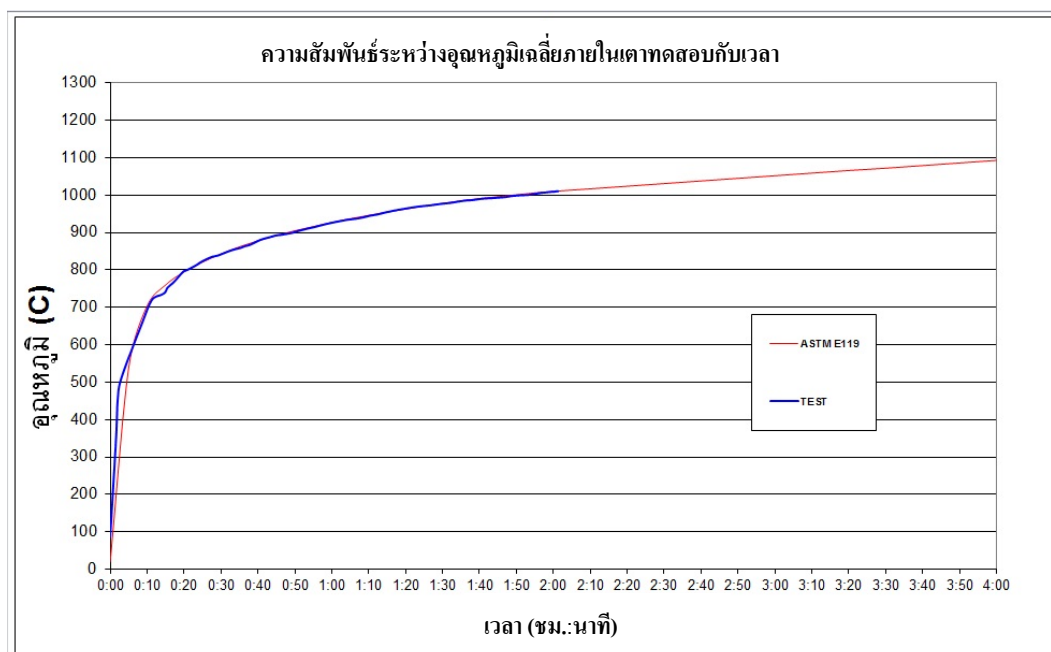
เวลา (ชม.: นาที: วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที: วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที: วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที: วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที: วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	94	0:28:00	833	0:56:00	917	1:23:00	965	1:51:00	1004
0:00:03	97	0:29:00	838	0:57:00	919	1:24:00	968	1:52:00	1005
0:01:00	246	0:30:00	843	0:58:00	921	1:25:00	970	1:53:03	1004
0:02:03	462	0:31:00	847	0:59:00	923	1:26:00	971	1:54:00	1002
0:03:00	512	0:32:00	850	1:00:00	926	1:27:00	974	1:55:00	1002
0:04:09	587	0:33:00	853	1:01:00	929	1:28:00	975	1:56:00	1003
0:06:00	597	0:34:00	856	1:02:00	930	1:29:00	977	1:57:00	1005
0:07:00	650	0:35:00	858	1:03:00	932	1:30:00	978	1:58:00	1005
0:08:00	637	0:36:00	860	1:04:00	933	1:31:00	979	1:59:00	1008
0:09:18	669	0:37:00	865	1:05:00	935	1:32:00	980	2:00:00	1008
0:10:00	693	0:38:00	867	1:06:00	936	1:33:00	981		
0:12:00	725	0:39:00	874	1:07:00	939	1:34:00	982		
0:13:00	718	0:40:00	879	1:08:00	941	1:35:00	983		
0:14:00	739	0:41:00	882	1:09:00	942	1:36:00	984		
0:15:00	756	0:42:00	884	1:10:00	945	1:37:00	985		
0:16:00	759	0:43:00	886	1:11:00	946	1:38:00	987		
0:17:00	768	0:44:00	887	1:12:00	948	1:39:00	987		
0:18:00	773	0:45:00	890	1:13:00	950	1:40:00	989		
0:19:00	786	0:46:00	892	1:14:00	951	1:42:00	994		
0:20:00	797	0:47:00	893	1:15:00	953	1:43:00	996		
0:21:00	801	0:48:00	896	1:16:00	954	1:44:00	997		
0:22:00	807	0:49:00	899	1:17:00	956	1:45:00	1000		
0:23:00	814	0:50:00	902	1:18:00	958	1:46:00	1003		
0:24:00	818	0:51:00	905	1:19:00	958	1:47:00	1006		
0:25:00	823	0:52:00	908	1:20:00	960	1:48:00	1003		
0:26:00	828	0:53:00	911	1:21:00	961	1:49:00	1003		
0:27:00	834	0:54:00	912	1:22:00	964	1:50:00	1003		



ภาพที่ 39 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม.

ตารางที่ 16 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตา สำหรับการเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.

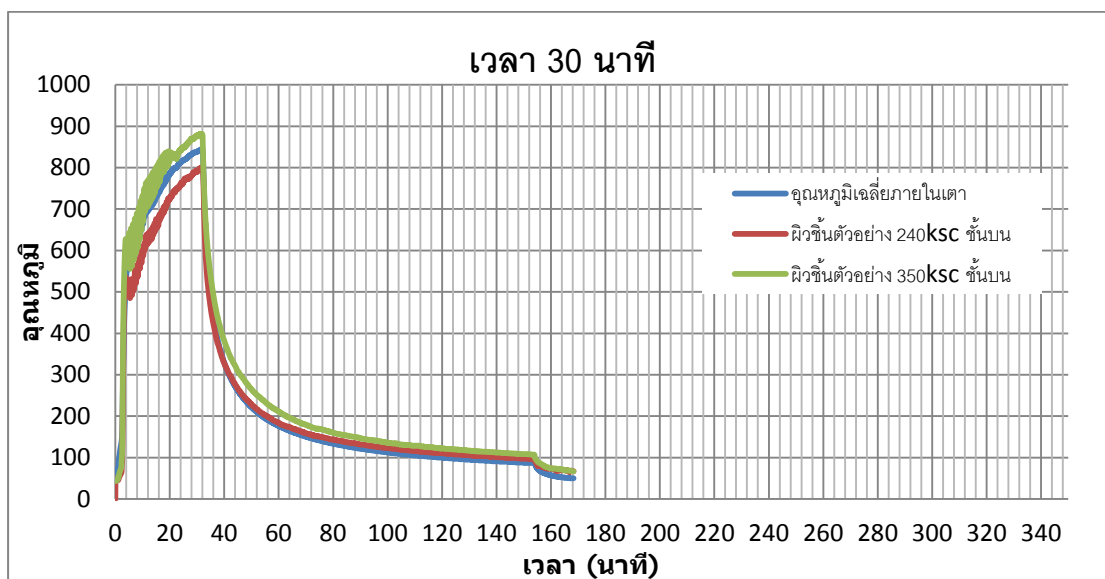
เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.: นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	87	0:29:12	839	0:56:15	917	1:34:00	983
0:00:00	87	0:31:15	847	0:58:30	923	1:36:00	985
0:01:36	353	0:33:27	855	1:01:27	929	1:38:03	987
0:02:00	449	0:35:18	859	1:04:03	934	1:40:36	990
0:03:00	511	0:36:27	864	1:06:27	937	1:43:33	992
0:08:30	655	0:37:51	867	1:08:42	941	1:45:03	993
0:11:15	719	0:40:45	881	1:10:12	945	1:47:00	995
0:13:54	734	0:42:57	887	1:12:09	948	1:48:36	998
0:14:54	741	0:44:51	892	1:14:15	953	1:50:45	999
0:15:33	753	0:46:09	894	1:15:39	956	1:53:18	1001
0:17:00	766	0:47:09	895	1:16:48	959	1:56:30	1006
0:18:36	783	0:48:36	898	1:18:30	962	1:57:36	1007
0:19:51	796	0:49:27	900	1:21:42	967	1:59:30	1009
0:20:57	801	0:50:45	904	1:23:36	970	2:00:06	1009
0:23:06	812	0:52:03	907	1:26:33	973	2:01:00	1011
0:24:45	822	0:53:30	911	1:29:24	977	2:01:18	1011
0:27:18	834	0:55:03	914	1:32:03	979		



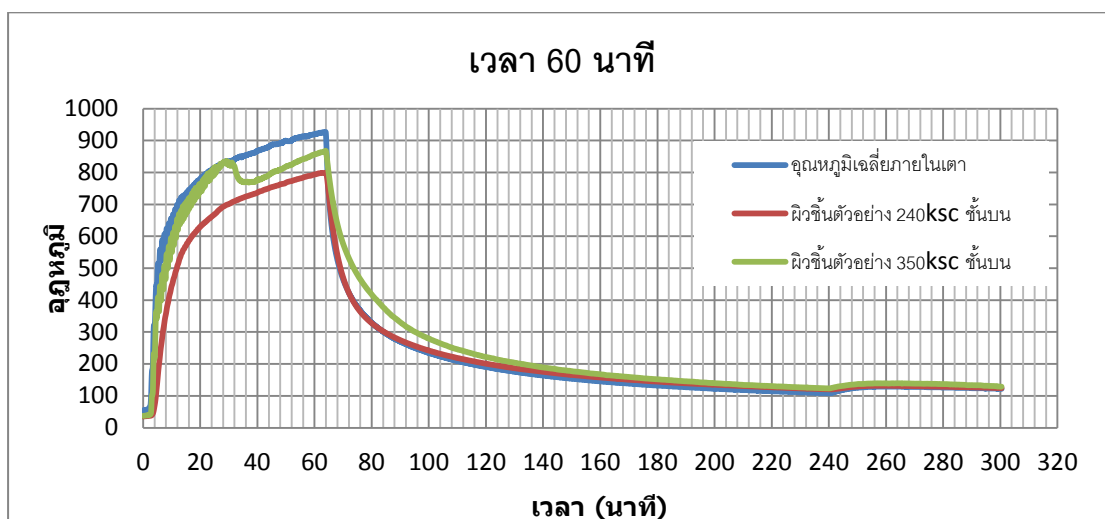
ภาพที่ 40 กราฟไฟเฉลี่ยภายในเตาสำหรับเวลา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.

4.2.2. อุณหภูมิบนผิวชิ้นตัวอย่าง

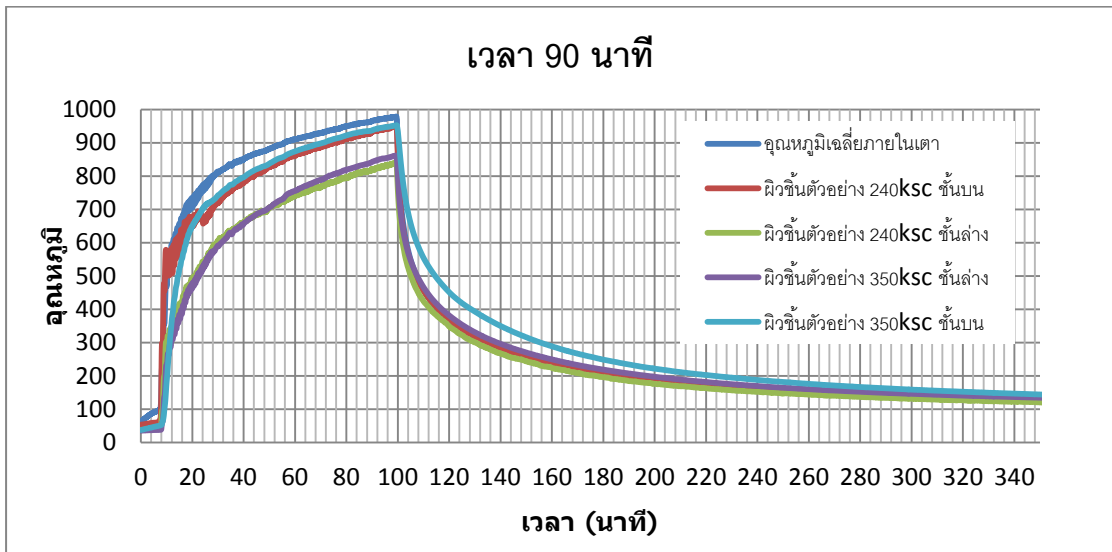
ขณะเผา ได้ใช้สายวัดอุณหภูมิ วัดที่บริเวณกลางผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยที่เวลาเผา 30 และ 60 นาที ได้ติดตั้งไว้ที่ชั้นบนของชิ้นตัวอย่างกำลัง 240 ksc และ 350ksc สำหรับเวลาเผา 90 และ 120 นาที ได้ติดตั้งไว้ที่ทุกชั้นตัวอย่าง ยกเว้นที่เวลา 120 นาทีของระยะหุ้ม 3 ซม. ที่เกิดความผิดพลาดในการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถเก็บค่าของกำลัง 350 ชั้นล่าง และอุณหภูมิหลังดับไฟแล้วได้ ทั้งหมดแสดงในภาพที่ 41-46



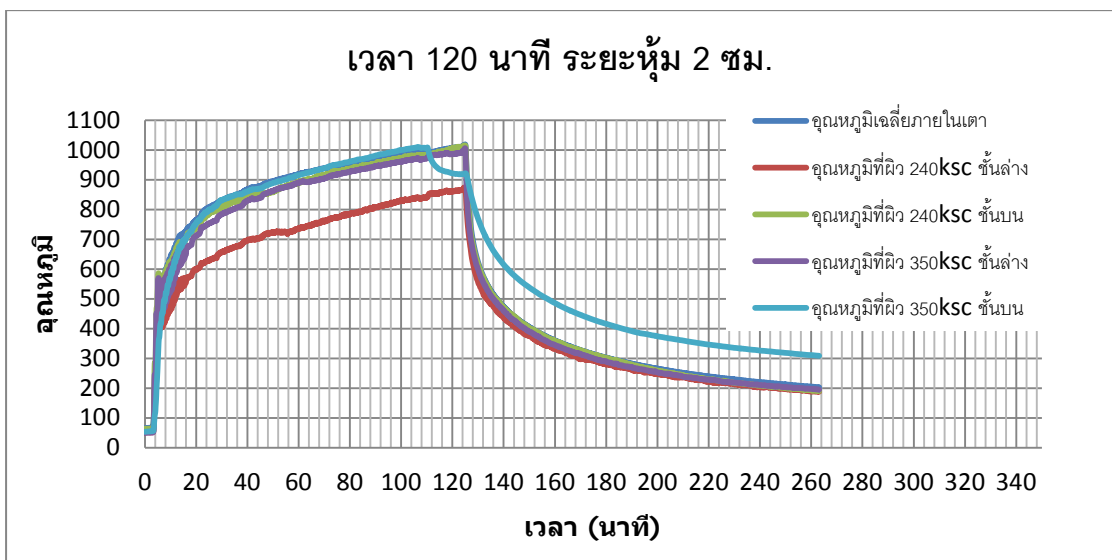
ภาพที่ 41 อุณหภูมิบนผิวชิ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 30 นาที



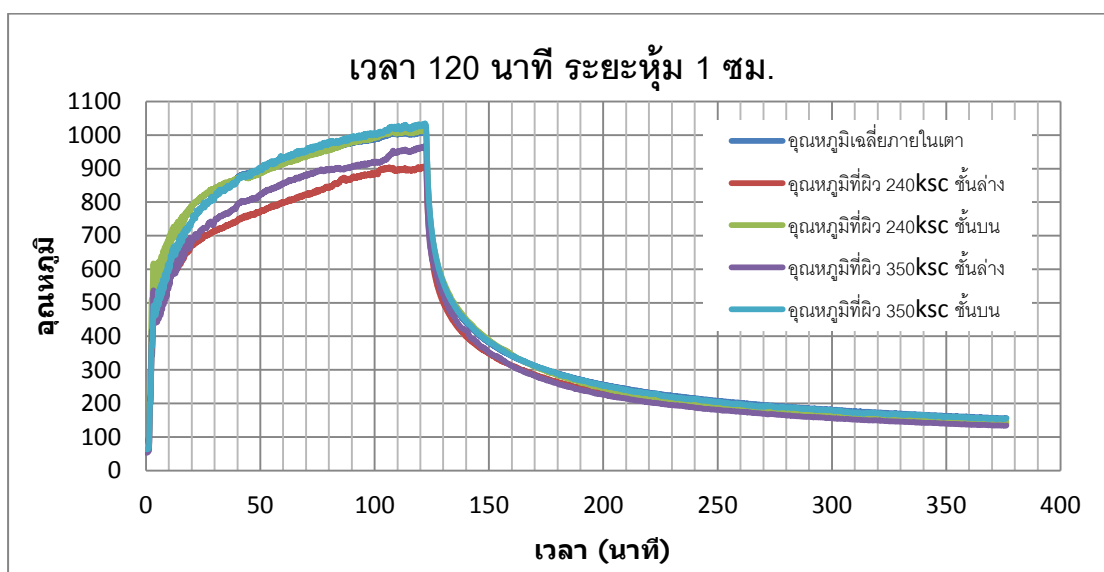
ภาพที่ 42 อุณหภูมิบนผิวชิ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 60 นาที



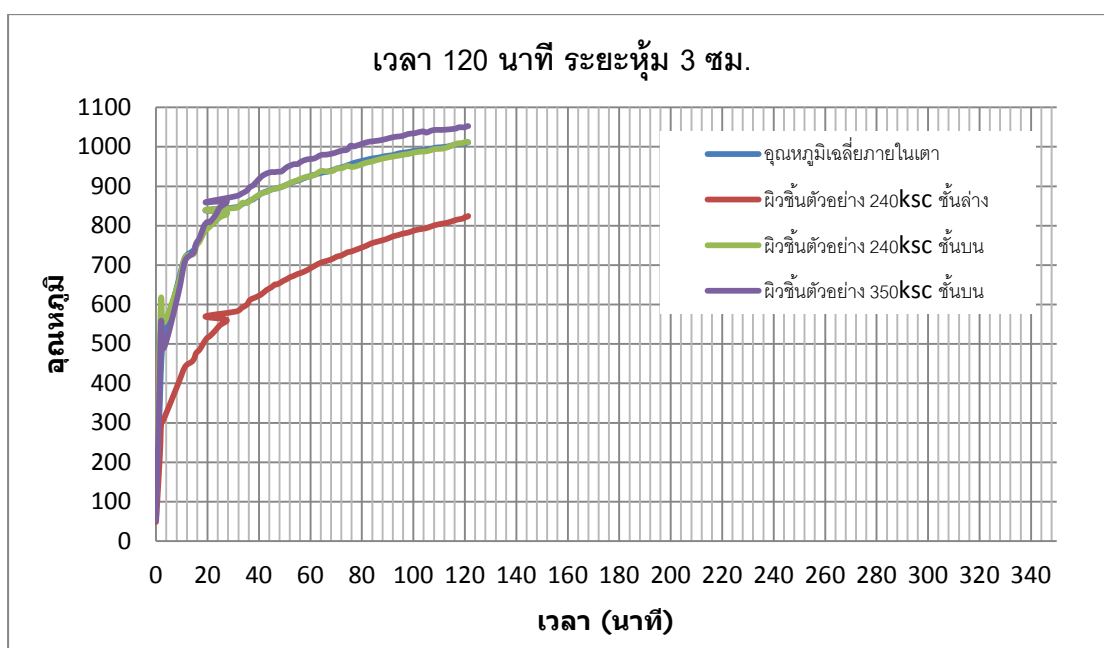
ภาพที่ 43 อุดหนุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 90 นาที



ภาพที่ 44 อุดหนุมิบนผิวขึ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม.



ภาพที่ 45 อุณหภูมิบนผิวชิ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม.



ภาพที่ 46 อุณหภูมิบนผิวชิ้นตัวอย่างที่เวลาเผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม.

สามารถสรุปอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละชั้นตัวอย่างได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 สรุปผลอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวของแต่ละชั้นตัวอย่าง

	อุณหภูมิสูงสุด (°C)						
	เวลา	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที		
	ระยะหุ้ม	2 ซม.	2 ซม.	2 ซม.	1 ซม.	2 ซม.	3 ซม.
ภายในเตา		845	927	979	1009	1019	1011
240 ksc	ชั้นบน	802.5	799	948.9	1015.3	1015.7	1011.9
	ชั้นล่าง	-	-	826	906.5	874	824.7
350 ksc	ชั้นบน	881.4	868.1	952.6	1035.1	1010.3	1052.5
	ชั้นล่าง	-	-	861.9	968	987.2	N.A.

หมายเหตุ

- หมายถึง ไม่มีการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิบนผิวชั้นตัวอย่าง

N.A. หมายถึง ไม่สามารถบันทึกค่าได้

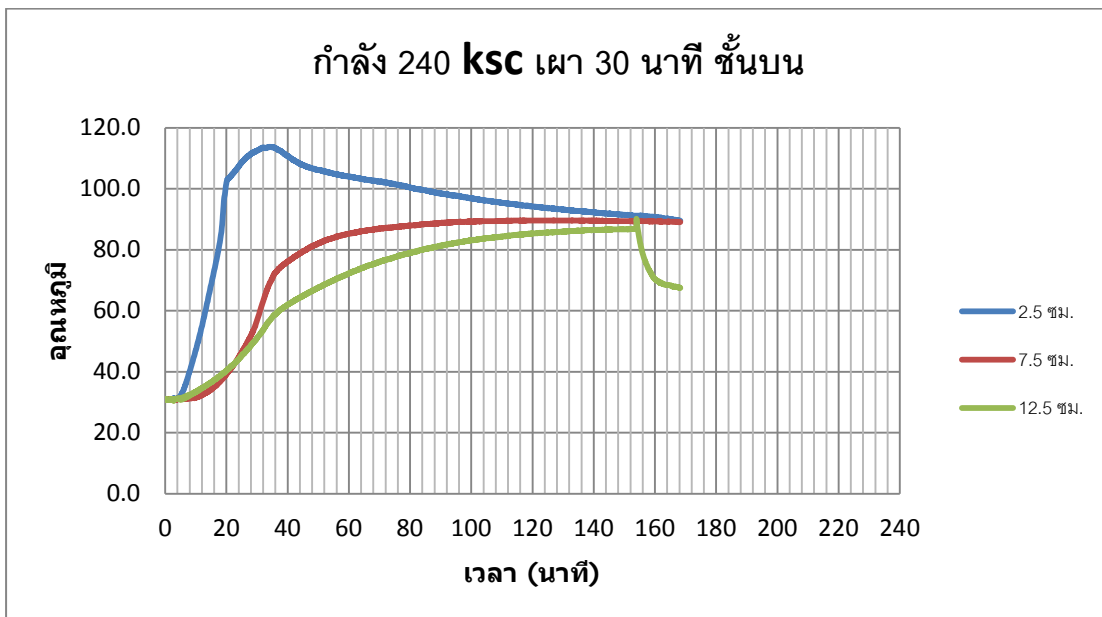
4.2.3. อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง

นอกจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว ยังได้ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิไว้ในชั้นตัวอย่างด้วย โดยติดตั้งไว้ที่ 3 ความลึกจากผิวที่สัมผัสไฟคือ

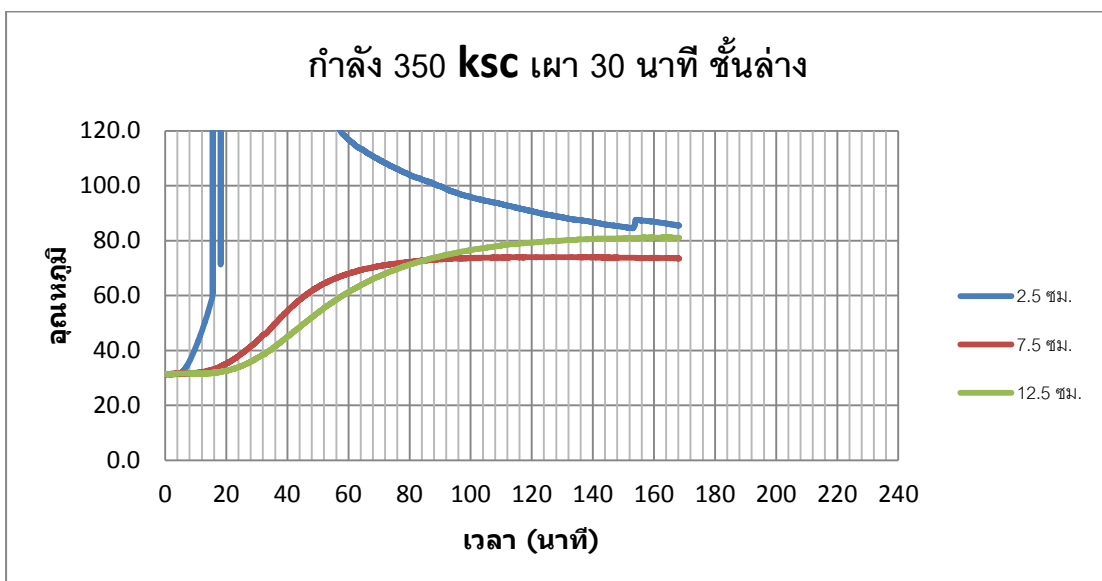
1. 2.5 ซม. จากผิว (ระดับเดียวกับเหล็กเสริมหลักด้านบน)
2. 7.5 ซม. จากผิว (กลางความหนาของชั้นตัวอย่าง)
3. 12.5 ซม. จากผิว (ระดับเดียวกับเหล็กเสริมหลักด้านล่าง)

สำหรับระยะหุ้ม 1 ซม. และ 3 ซม. จะเปลี่ยนจาก 2.5 ซม. จากผิวเป็น 1.5 ซม. และ 3.5 ซม. ตามลำดับ เพื่อให้อยู่ที่ระดับเดียวกับเหล็กเสริมหลัก

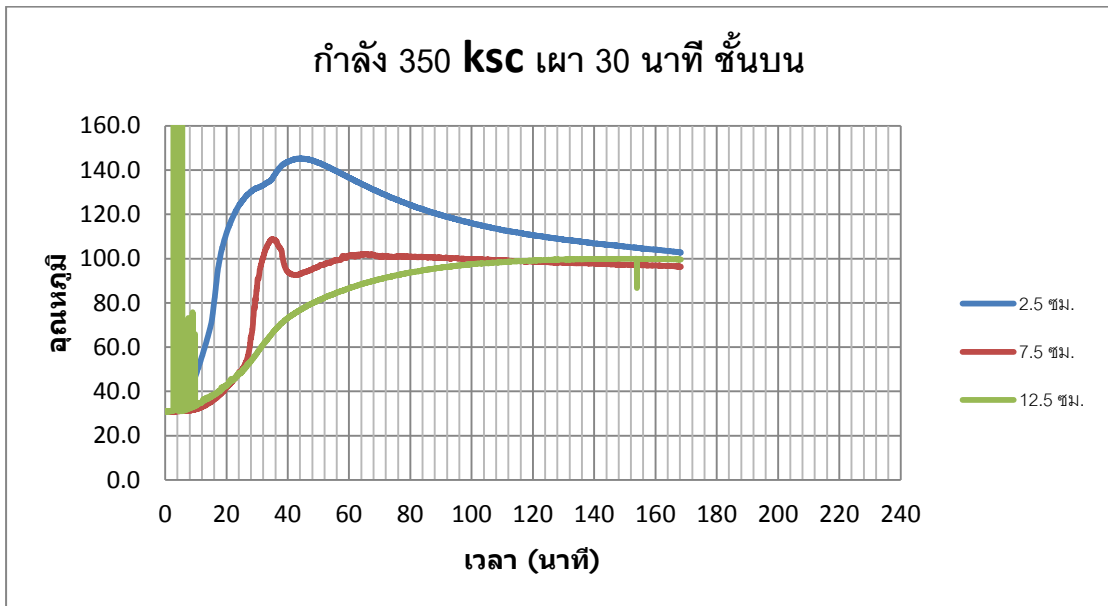
อย่างไรก็ดี ยังพบว่ามีการลัดวงจรของสายวัดอุณหภูมิในหลายชั้นตัวอย่างที่ทำการเผาไฟทำให้ค่าที่ได้ผิดเพี้ยนและอ่านค่าไม่ได้ ทั้งหมดถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 47-68



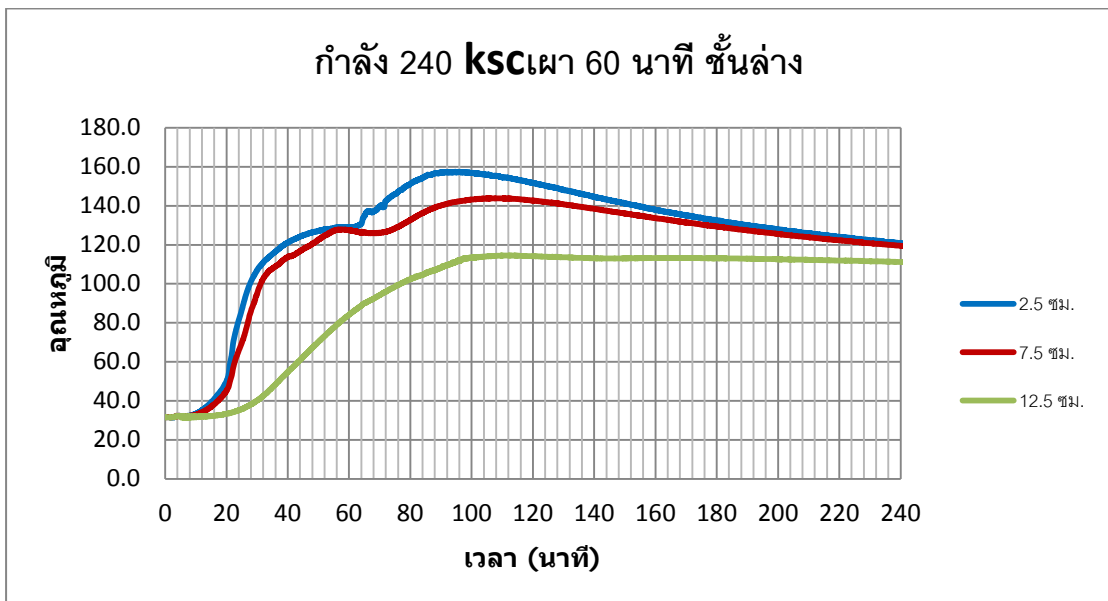
ภาพที่ 47 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 30 นาที 240ksc ชั้นบน



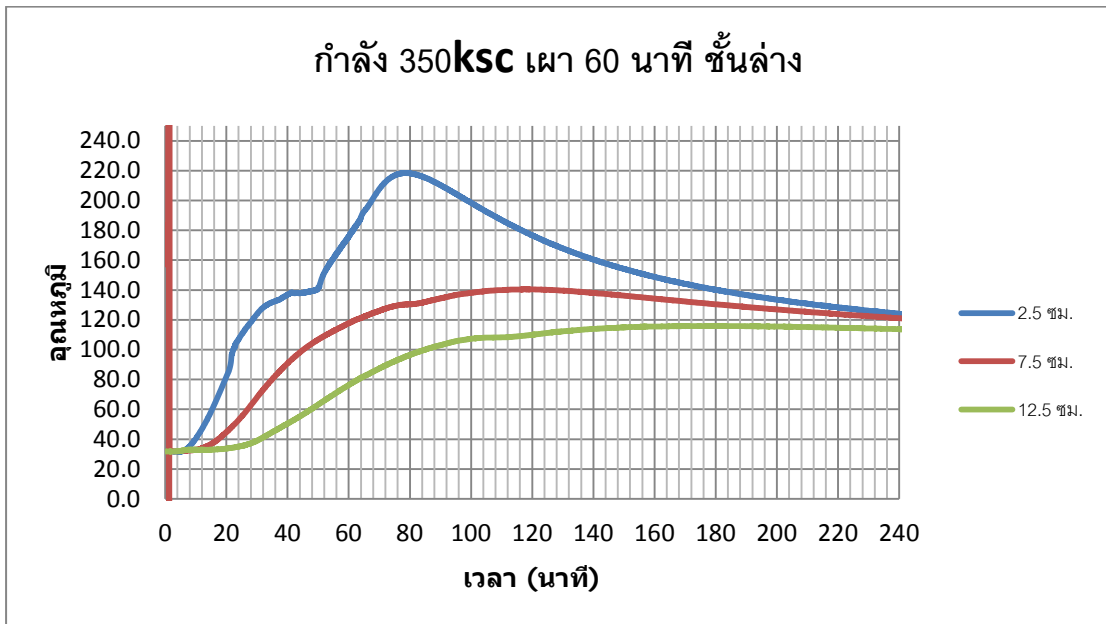
ภาพที่ 48 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 30 นาที 350ksc ชั้นล่าง



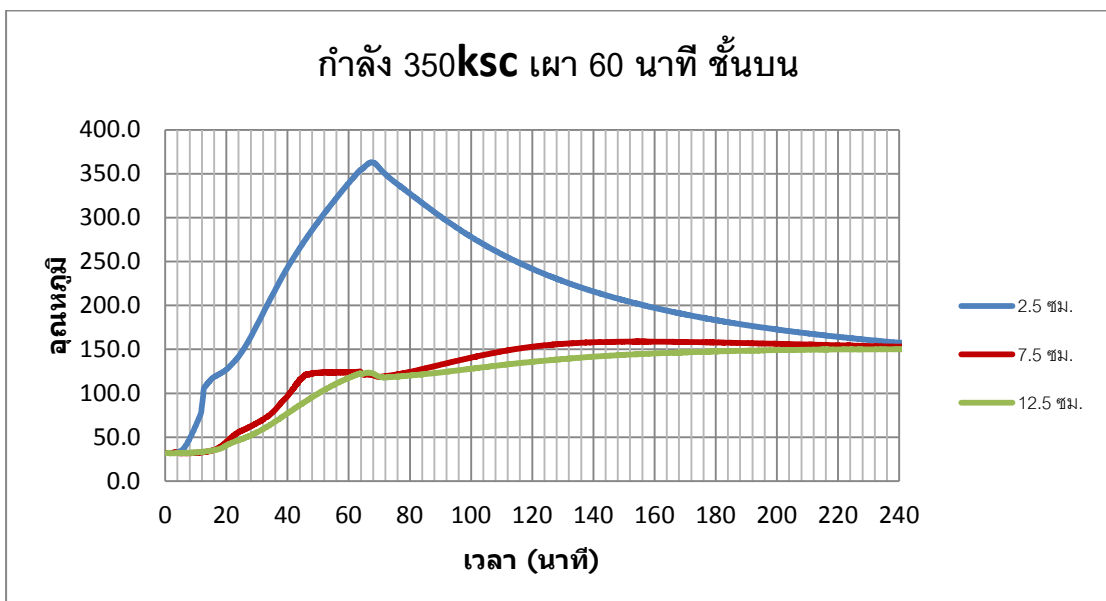
ภาพที่ 49 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 30 นาที 350ksc ชั้นบน



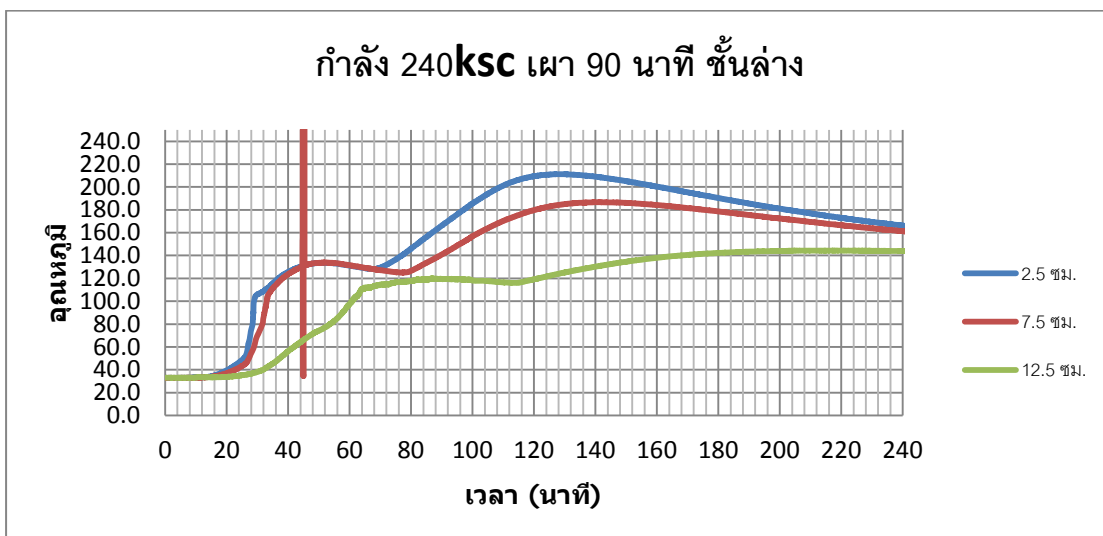
ภาพที่ 50 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 60 นาที 240ksc ชั้นล่าง



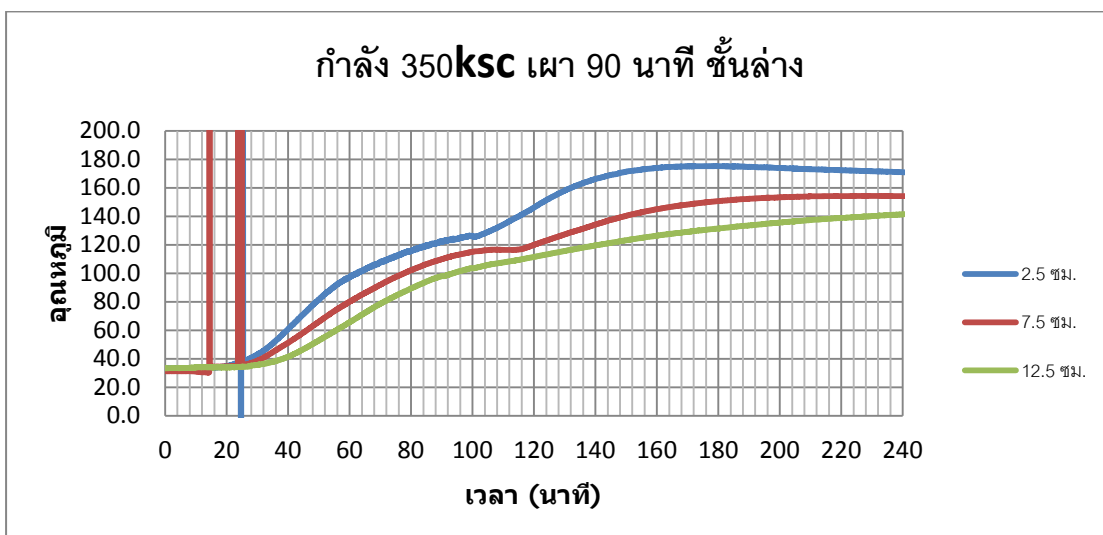
ภาพที่ 51 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 60 นาที 350ksc ชั้นล่าง



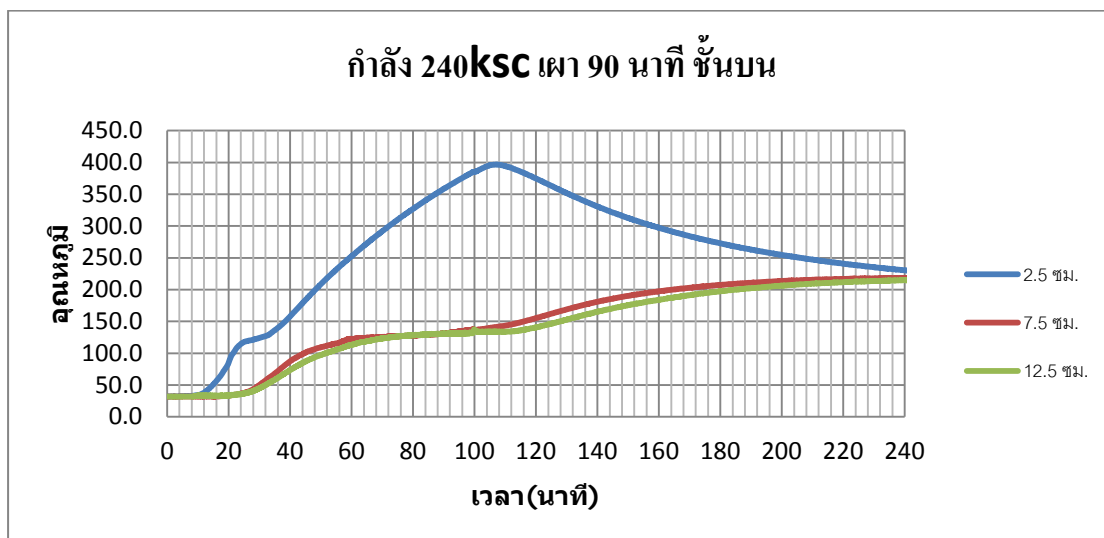
ภาพที่ 52 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 60 นาที 350ksc ชั้นบน



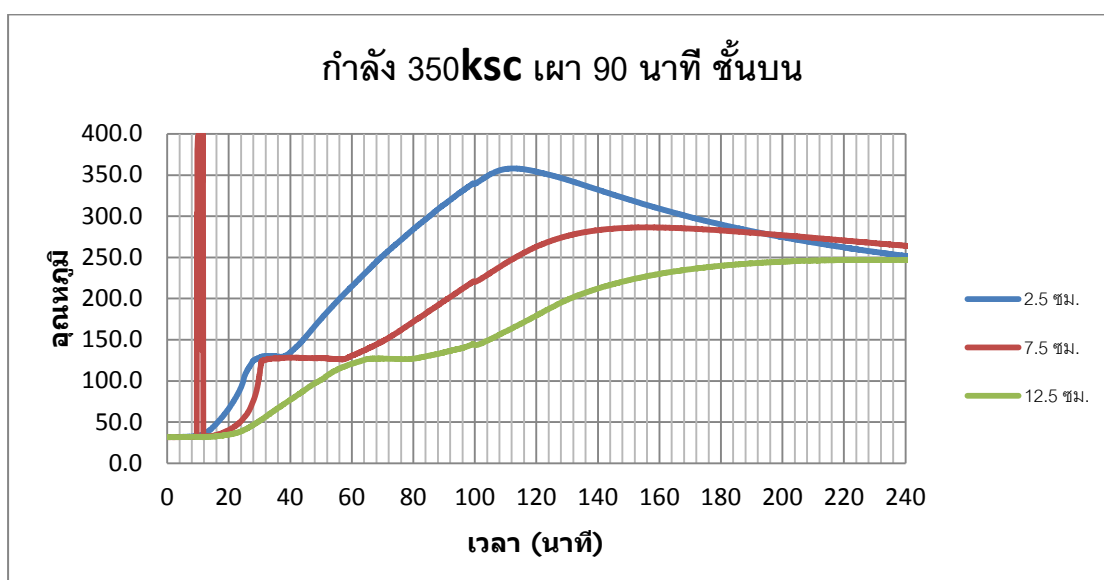
ภาพที่ 53 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 90 นาที 240ksc ชั้นล่าง



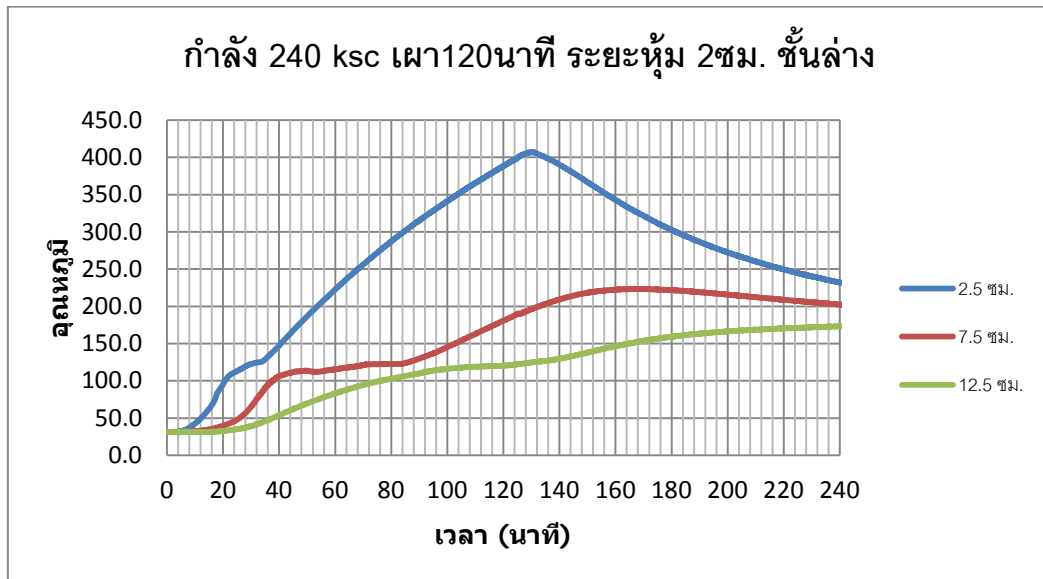
ภาพที่ 54 อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง 90 นาที 350ksc ชั้นล่าง



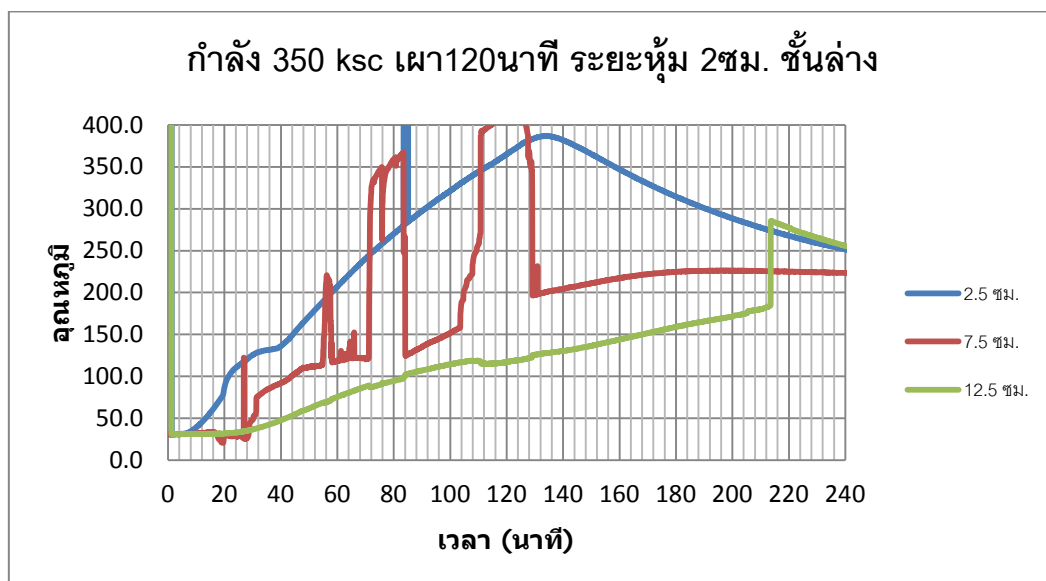
ภาพที่ 55 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 90 นาที 240ksc ชั้นบน



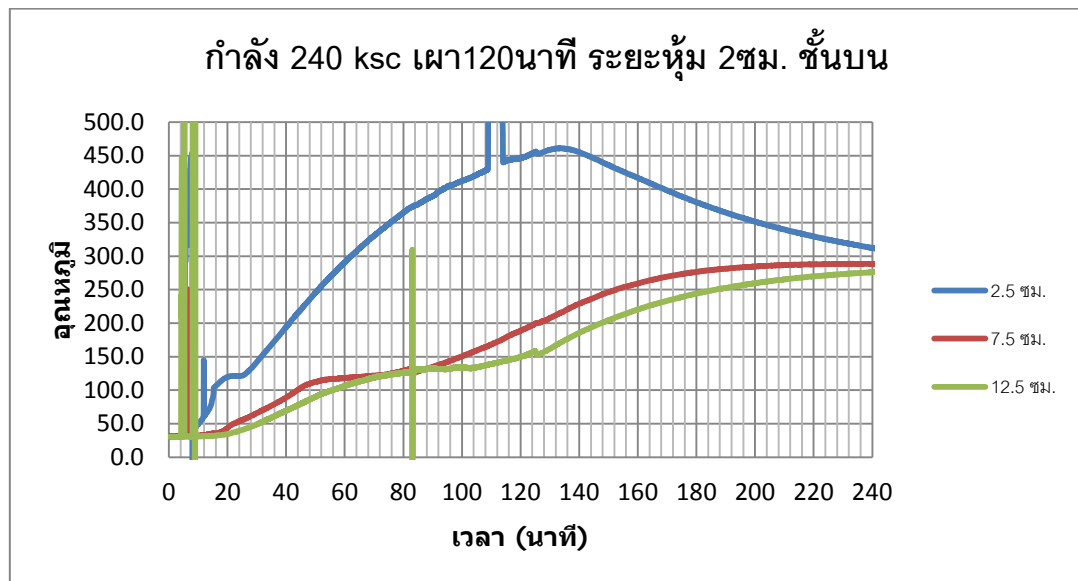
ภาพที่ 56 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 90 นาที 350ksc ชั้นบน



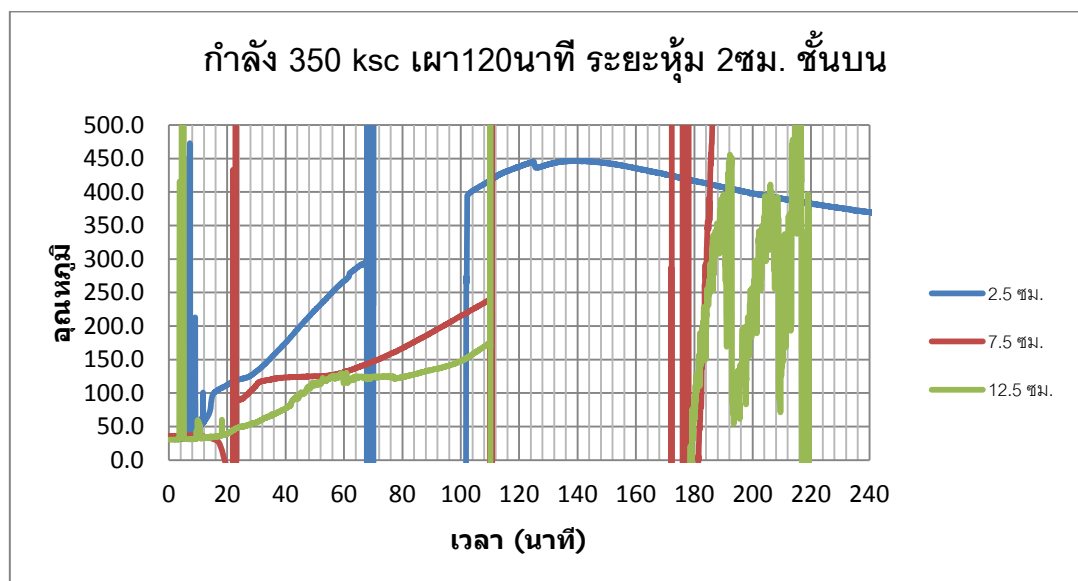
ภาพที่ 57 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 2 ซม.ชั้นล่าง



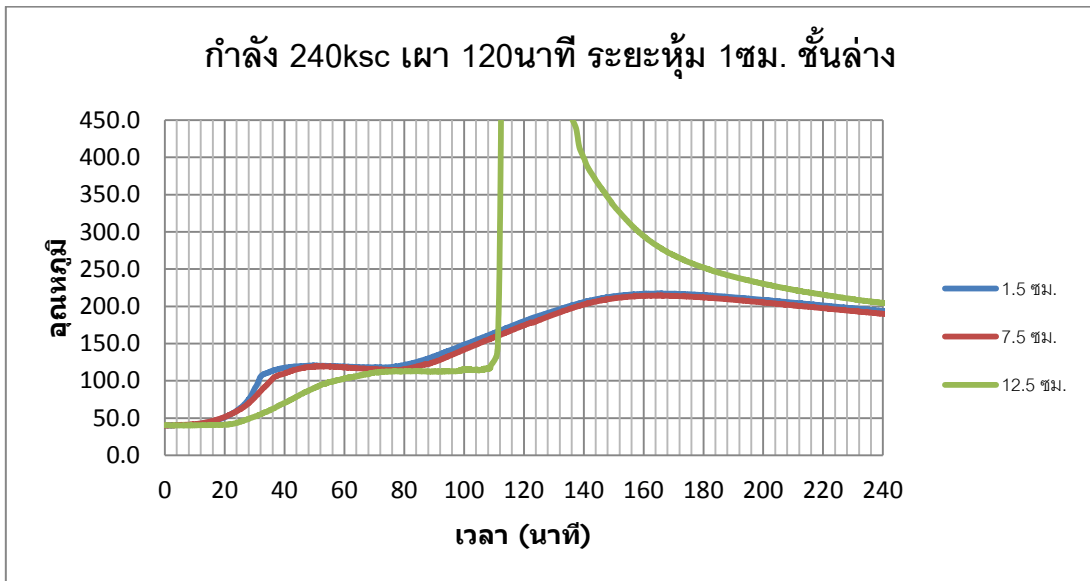
ภาพที่ 58 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 2 ซม.ชั้นล่าง



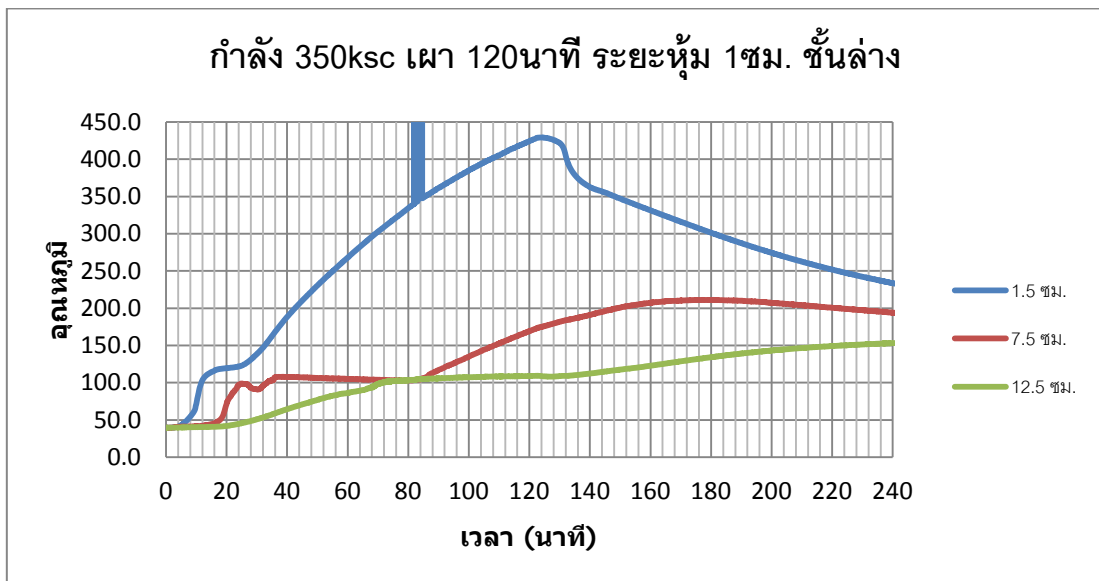
ภาพที่ 59 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน



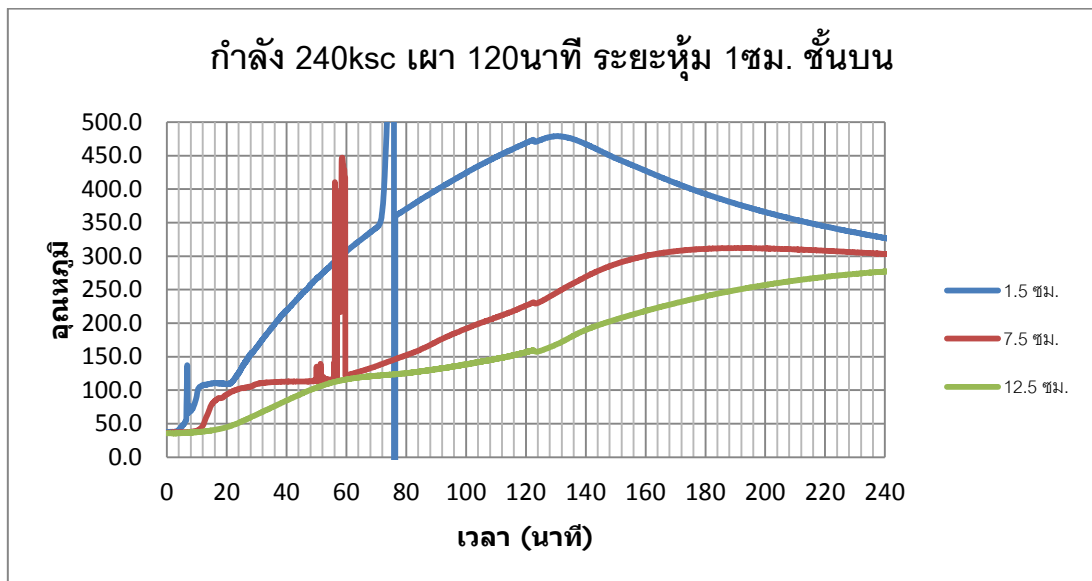
ภาพที่ 60 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 350ksc ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน



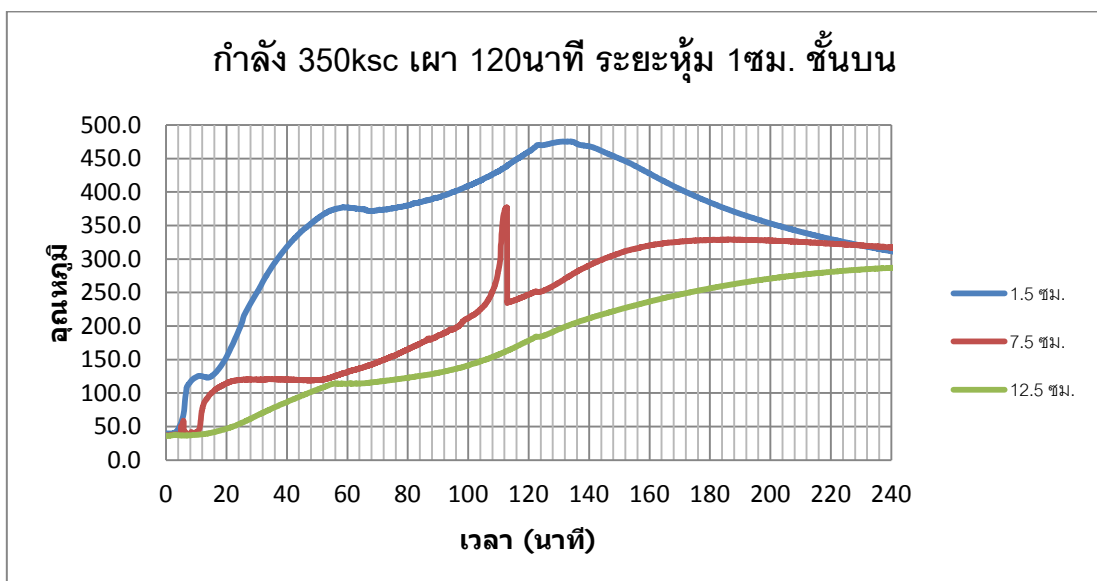
ภาพที่ 61 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง



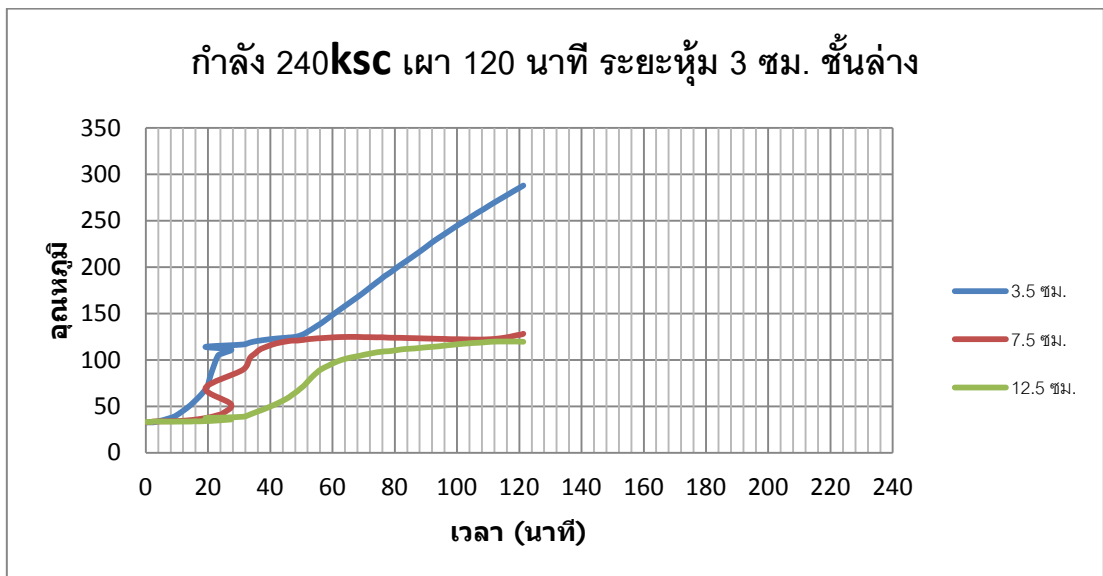
ภาพที่ 62 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 350ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง



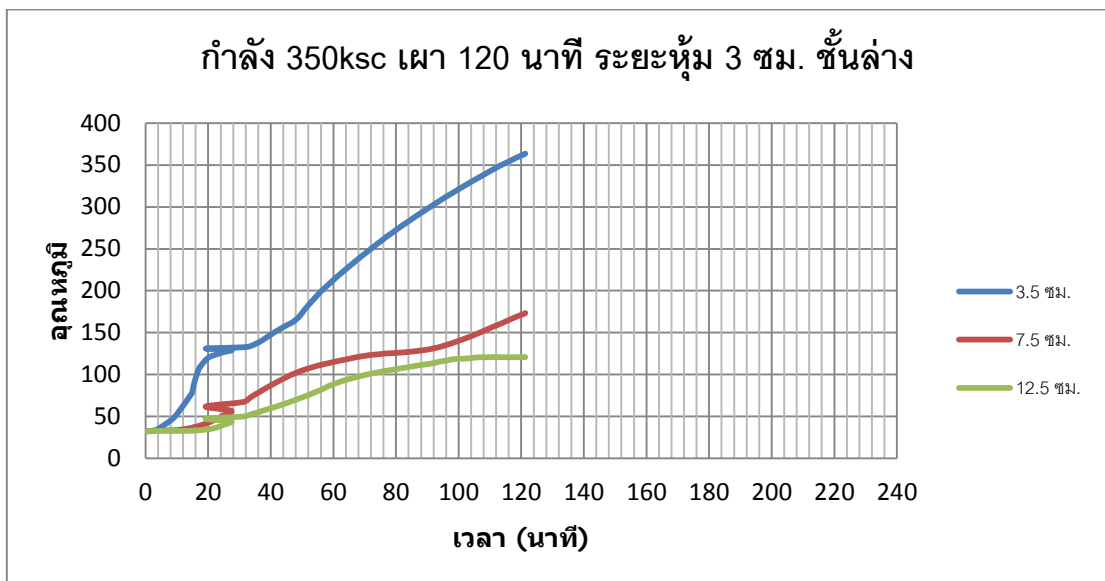
ภาพที่ 63 คุณหมุมภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน



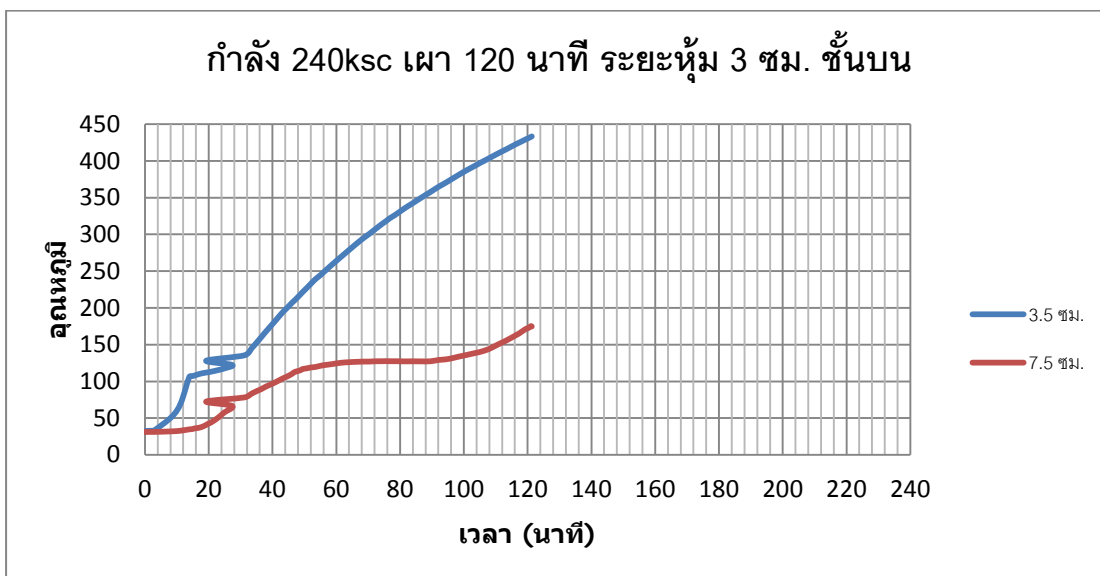
ภาพที่ 64 คุณหมุมภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 350ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน



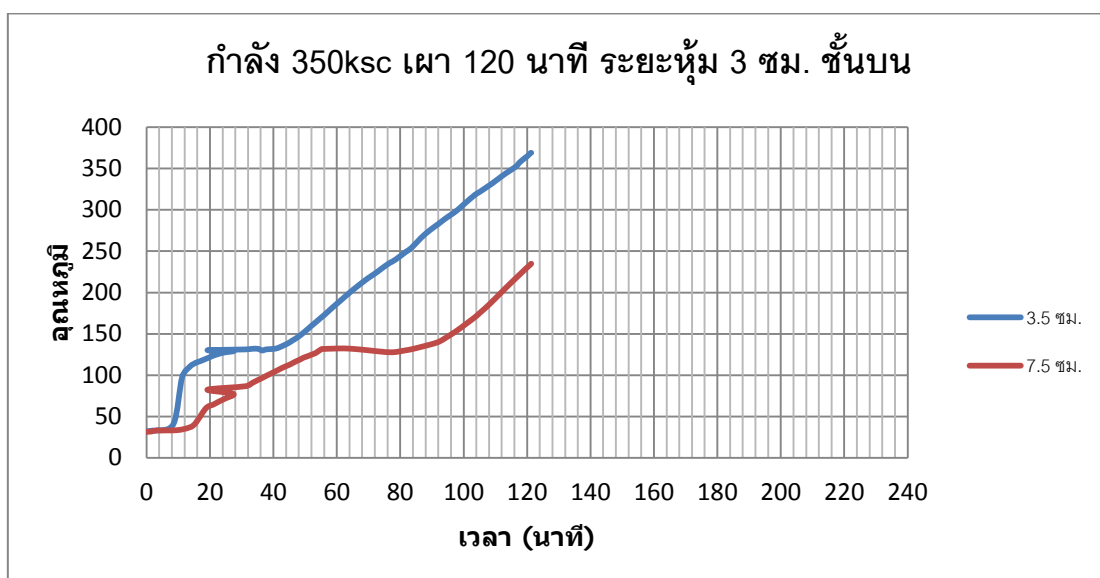
ภาพที่ 65 คุณหมุมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 3 ซม.ชั้นล่าง



ภาพที่ 66 คุณหมุมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 350ksc ระยะหุ้ม 3 ซม.ชั้นล่าง



ภาพที่ 67 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 240ksc ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน



ภาพที่ 68 อุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่าง 120 นาที 350ksc ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน

ตารางที่ 18 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกต่างๆ สำหรับกำลังอัด 240ksc

ความลึก จากผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)							
	30 นาที		60 นาที		90 นาที		120 นาที	
	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง
2.5	108.6	-	-	129.1	358.4	166.3	446.8	388.2
7.5	46.3	-	-	127.5	131	140.9	188.8	180.7
12.5	45.2	-	-	84.1	130.7	119.4	150	120.3

ตารางที่ 19 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 240ksc ระยะหุ้ม 1ซม

ความลึกจาก ผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	
	120 นาที	
	บน	ล่าง
1.5	468.9	180
7.5	226.3	174.4
12.5	156.7	N.A.

ตารางที่ 20 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกสำหรับกำลังอัด 240ksc ระยะหุ้ม 3ซม.

ความลึก จากผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	
	120 นาที	
	บน	ล่าง
3.5	433.3	287.9
7.5	174.6	128.3
12.5	N.A.	119.6

ดังนั้นจึงสามารถสรุปอุณหภูมิภายในเนื้อคอนกรีตแต่ละตัวอย่างได้ โดยสำหรับกำลังอัด 240ksc ระยะหุ้ม 2ซม.เป็นดังตารางที่18 สำหรับระยะหุ้ม 1ซม. และ 3ซม. เป็นดังตารางที่ 19 และ 20 ตามลำดับ

สำหรับกำลังอัด 350ksc ระยะหุ้ม 2ซม.เป็นดังตารางที่21 สำหรับระยะหุ้ม 1ซม. และ 3ซม. เป็นดังตารางที่ 22 และ 23 ตามลำดับ

ตารางที่ 21 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึกต่างๆ สำหรับกำลังอัด 350ksc

ความลึก จากผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)							
	30 นาที		60 นาที		90 นาที		120 นาที	
	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง
2.5	125.7	N.A.	339.6	175.5	314.2	122.4	437.9	365.2
7.5	49.7	38.8	123.7	117.7	196.8	109.9	N.A.	117.2
12.5	48.7	34.4	117.5	76.2	134.7	97.9	N.A.	N.A.

ตารางที่ 22 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 350ksc ระยะหุ้ม 1ซม.

ความลึก จากผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	
	120 นาที	
	บน	ล่าง
1.5	460.2	424.4
7.5	247.1	169.2
12.5	178.3	108.9

ตารางที่ 23 อุณหภูมิสูงสุดของเวลาและความลึก สำหรับกำลังอัด 350ksc ระยะหุ้ม 3ซม.

ความลึก จากผิว (ซม.)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	
	120 นาที	
	บน	ล่าง
3.5	369.0	363.7
7.5	234.9	173.4
12.5	N.A.	120.8

หมายเหตุ

- หมายถึง ไม่ได้ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ
- N.A. หมายถึงเกิดการลัดวงจรของสายวัดอุณหภูมิทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เวลาในการเผาเท่ากัน อุณหภูมิระหว่างชิ้นตัวอย่าง ด้านบนและด้านล่างมีความแตกต่างกันอยู่ประมาณ 150°C อีกทั้งอุณหภูมิภายในเนื้อคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมบน (2.5ซม จากผิว) มีแนวโน้มคล้ายกับอุณหภูมิที่ผิวชิ้นตัวอย่างคือจะเริ่มลดระดับลงภายหลังจากดับไฟในเตา ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิที่กลางความหนา (7.5ซม จากผิว) และ

ที่เหล็กเสริมล่าง (12.5 ซม จากผิว) ที่จะยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆหลังจากดับไฟไปแล้วจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 40 นาที อุณหภูมิจึงจะมีแนวโน้มที่ลดลง

ตารางที่ 24 ผลของความรุนแรงไฟ

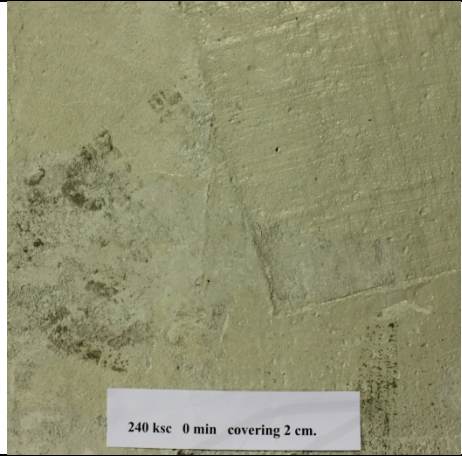
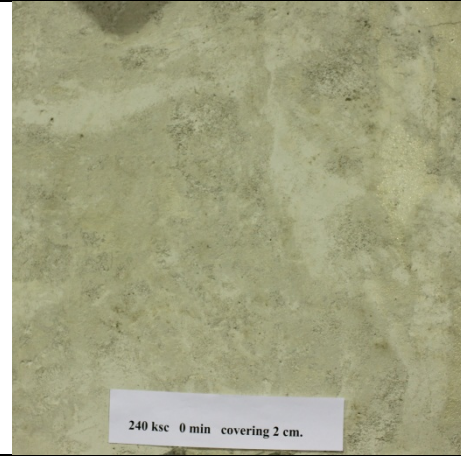

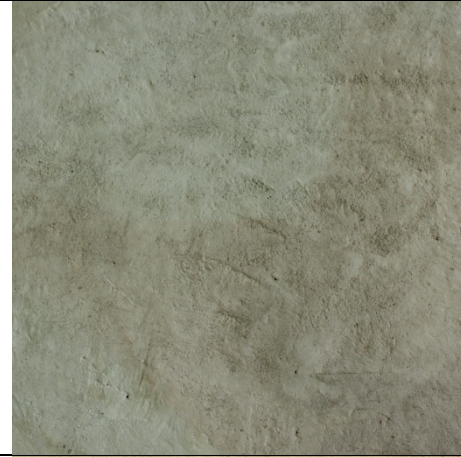
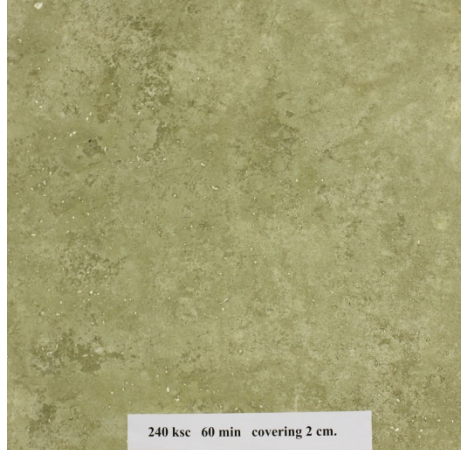
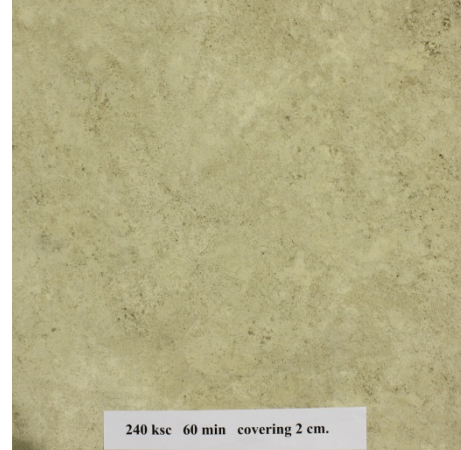
กำลังขึ้น ตัวอย่าง	ความรุนแรงของไฟ (C·นาที)					
	30 นาที		60 นาที		90 นาที	
	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
240ksc	-	1.9×10^4	-	3.9×10^4	6.1×10^4	7.4×10^4
350ksc	-	2.3×10^4	-	4.5×10^4	6.1×10^4	7.3×10^4

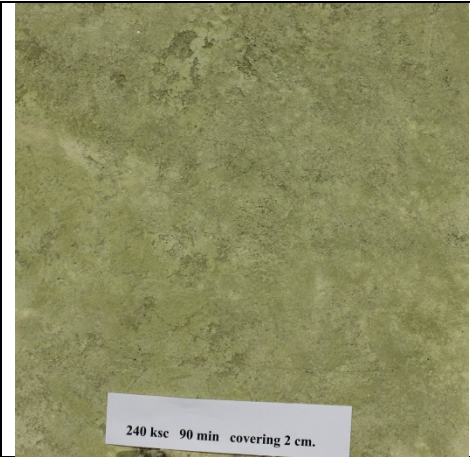
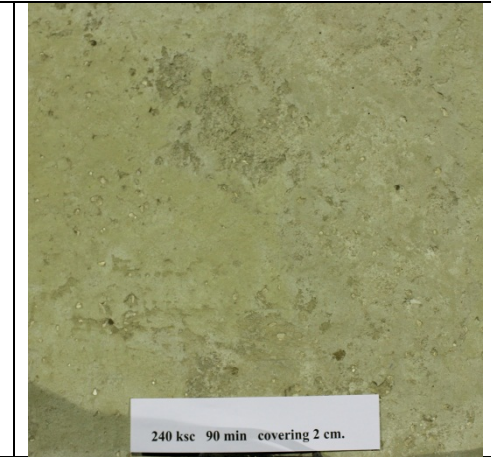
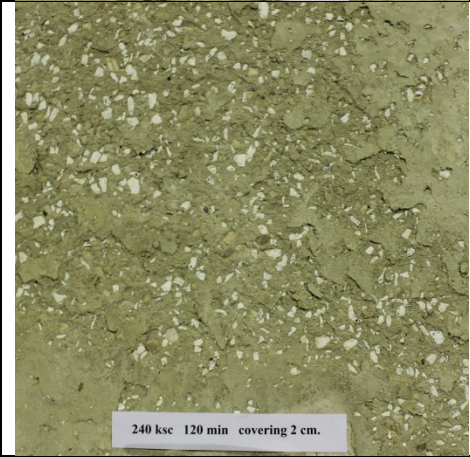
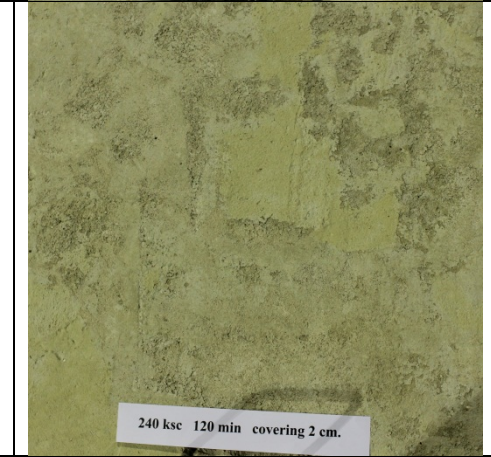
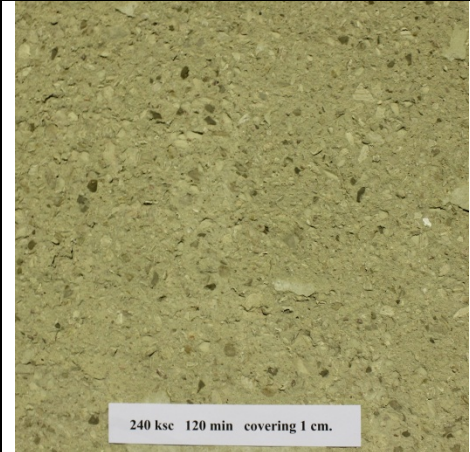
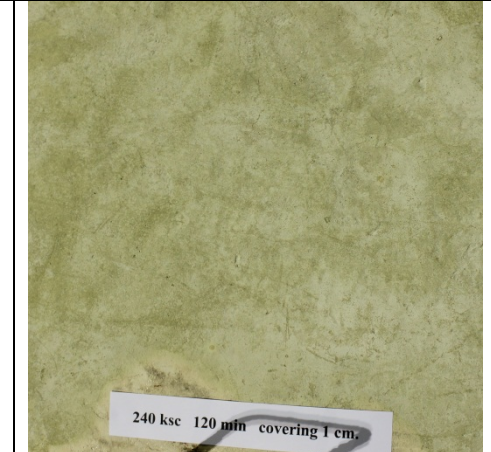
กำลังขึ้น ตัวอย่าง	ความรุนแรงของไฟ (C·นาที)					
	120 นาที					
	ระยะหุ้ม 1 ซม.		ระยะหุ้ม 2 ซม.		ระยะหุ้ม 3 ซม.	
	ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
240ksc	9.25×10^4	1.06×10^5	8.69×10^4	1.05×10^5	7.86×10^4	1.07×10^5
350ksc	9.75×10^4	1.06×10^5	1.02×10^5	1.05×10^5	-	1.11×10^5

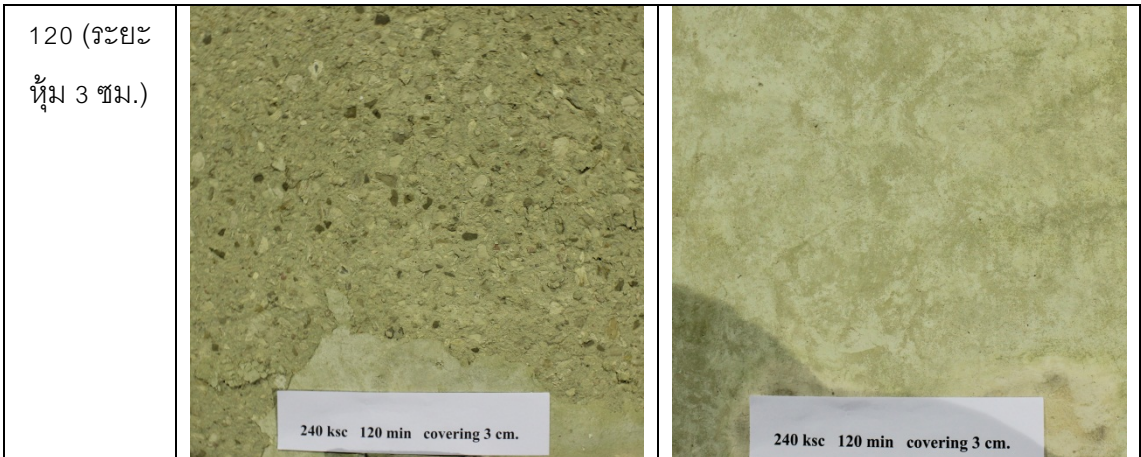
เมื่อหาพื้นที่ได้กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ผิวของแต่ละชั้นตัวอย่างก็จะได้ความรุนแรงไฟ (Fire Severity) ดังแสดงในตารางที่ 24

ภายหลังจากเผาแล้วเป่าทำความสะอาดด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) กำลังไฟ 580วัตต์ ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตมีผิวหน้าเป็นดังตารางที่ 25 สำหรับกำลังอัดที่ 240ksc และตารางที่ 26 สำหรับกำลังอัดที่ 350ksc

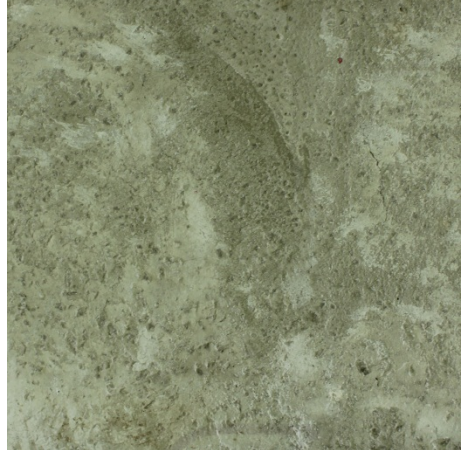
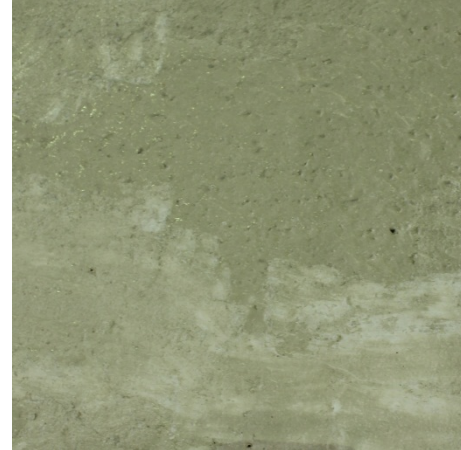


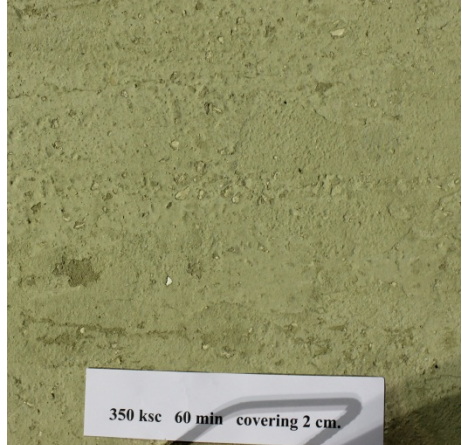
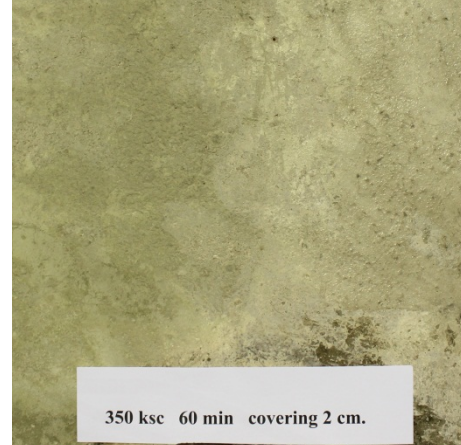
ตารางที่ 25 สภาพผิวคอนกรีตกำลังอัด 240ksc หลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆ

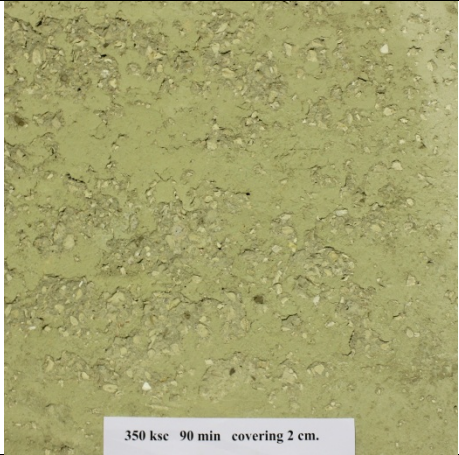
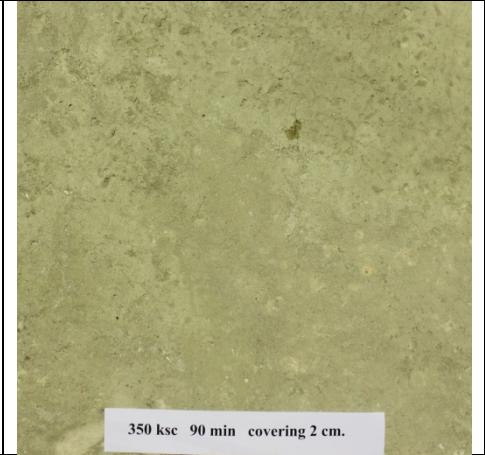
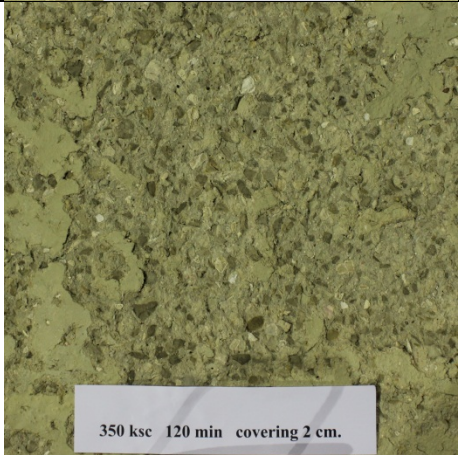
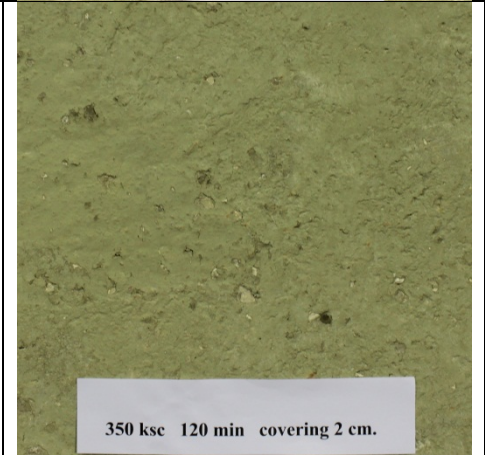
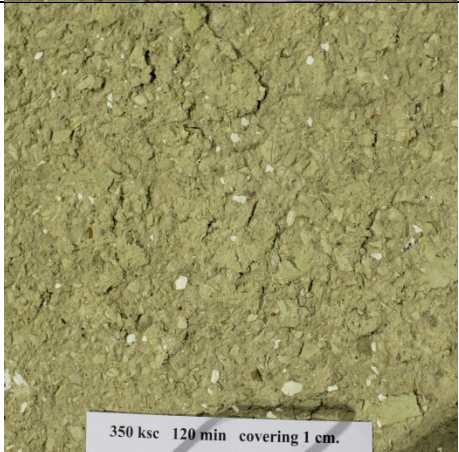
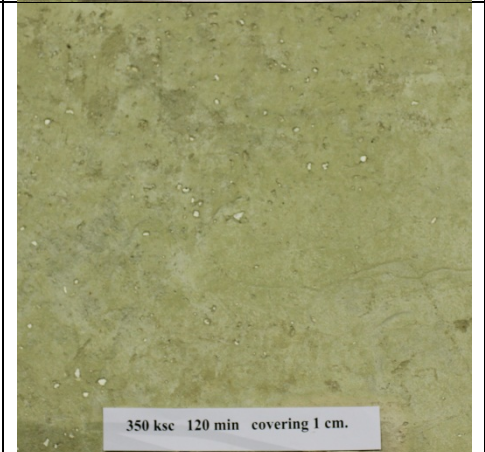
เวลาเผา (นาที)	ชั้นบน	ชั้นล่าง
0	 <p>240 ksc 0 min covering 2 cm.</p>	 <p>240 ksc 0 min covering 2 cm.</p>
30		
60	 <p>240 ksc 60 min covering 2 cm.</p>	 <p>240 ksc 60 min covering 2 cm.</p>

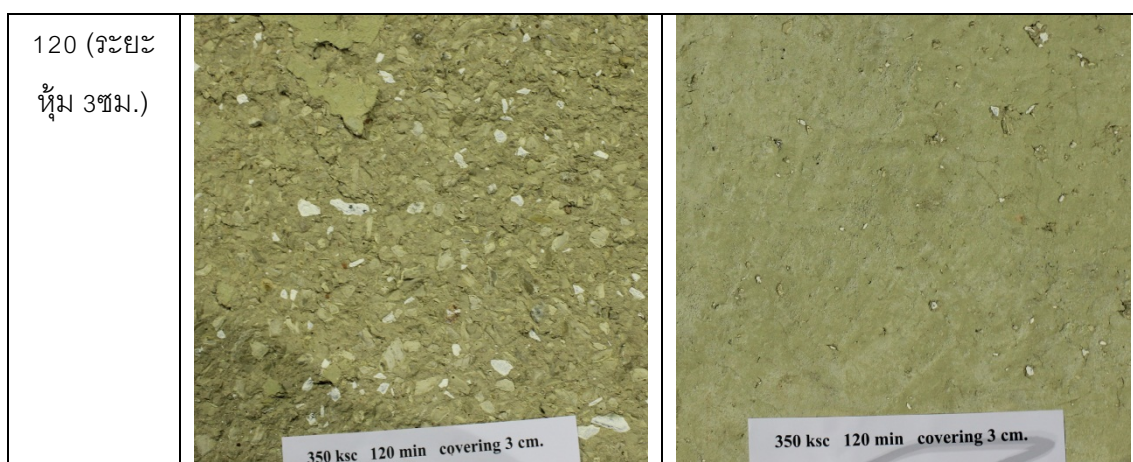
<p>90</p>	 <p>240 ksc 90 min covering 2 cm.</p>	 <p>240 ksc 90 min covering 2 cm.</p>
<p>120 (ទិដ្ឋភាព អ្នកមើល 2 ឆ្នាំ.)</p>	 <p>240 ksc 120 min covering 2 cm.</p>	 <p>240 ksc 120 min covering 2 cm.</p>
<p>120 (ទិដ្ឋភាព អ្នកមើល 1 ឆ្នាំ.)</p>	 <p>240 ksc 120 min covering 1 cm.</p>	 <p>240 ksc 120 min covering 1 cm.</p>



ตารางที่ 26 สภาพผิวคอนกรีตกำลังอัด 350ksc หลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลาเผา	ชั้นบน	ชั้นล่าง
0		
30		
60		

90	 <p data-bbox="560 674 815 707">350 ksc 90 min covering 2 cm.</p>	 <p data-bbox="1031 674 1286 707">350 ksc 90 min covering 2 cm.</p>
120 (ទិសដៅ ផ្ទៃ 2 ឆ្នាំ.)	 <p data-bbox="531 1093 836 1160">350 ksc 120 min covering 2 cm.</p>	 <p data-bbox="1007 1093 1311 1160">350 ksc 120 min covering 2 cm.</p>
120 (ទិសដៅ ផ្ទៃ 1 ឆ្នាំ.)	 <p data-bbox="544 1574 823 1612">350 ksc 120 min covering 1 cm.</p>	 <p data-bbox="1031 1574 1278 1612">350 ksc 120 min covering 1 cm.</p>



4.3. ผลการตรวจสอบสภาพความเสียหาย

4.3.1. การตรวจสอบด้วยสายตา

การตรวจสอบด้วยสายตาจะดูสีผิวของคอนกรีตเมื่อเทียบกับก่อนเผา ลักษณะการหลุดร่อนที่ผิวหน้า ความลึกของความเสียหาย ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 27 และ 28

ตารางที่ 27 ผลการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตาสำหรับกำลังอัด 240ksc

เวลา	ตำแหน่ง	รายละเอียดความเสียหาย				
		สีผิว	ขนาดรอยร้าว (มม.)	การหลุดร่อน	ความลึกโดยเฉลี่ย (มม.)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยมือ)
30	ชั้นบน	ส้มถึงแดง	-	-	-	-
	ชั้นล่าง	ส้มถึงแดง	-	-	-	-
60	ชั้นบน	เทา	-	เล็กน้อย	วัดไม่ได้	4.46
	ชั้นล่าง	ส้มอมแดง	-	-	-	-
90	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	-	เล็กน้อย ไม่เห็นมวลรวม	-	12.3
	ชั้นล่าง	เทาสว่าง(whitish gray)	-	เล็กน้อย	1.19	5
120 ระยะหุ้ม 2 ซม.	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	-	ทั่วผิวหน้า จนเห็นมวลรวม	4.5	72.64
	ชั้นล่าง	เทาอมน้ำตาลแดง	-	ปานกลาง ไม่เห็นมวลรวม	วัดไม่ได้	39.03
120 ระยะหุ้ม 1 ซม.	ชั้นบน	เทาอมแดง	-	ทั่วผิวหน้า จนเห็นมวลรวม	3.53	99.62
	ชั้นล่าง	เทาอมน้ำตาลแดง	-	-	-	-
120 ระยะหุ้ม 3 ซม.	ชั้นบน	เทาอมน้ำตาลแดง	-	ทั่วผิวหน้า จนเห็นมวลรวม	5.32	97.78
	ชั้นล่าง	เทาอมน้ำตาลแดง	-	-	-	-

ตารางที่ 28 ผลการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตาสำหรับกำลังอัด 350ksc

เวลา	ตำแหน่ง	รายละเอียดความเสียหาย				
		สีผิว	ขนาดรอยร้าว(มม.)	การหลุดร่อน	ความลึกโดยเฉลี่ย(มม.)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยมือ)
30	ชั้นบน	สีแดง	-	เล็กน้อย	วัดไม่ได้	3.33
	ชั้นล่าง	ส้มอมแดง	-	-	-	-
60	ชั้นบน	เทา	0.08-0.3	เล็กน้อย	วัดไม่ได้	5.69
	ชั้นล่าง	เทาเข้มปนส้ม	0.08-0.2	เล็กน้อย	วัดไม่ได้	4.31
90	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	0.1-0.5	ปานกลาง เห็นถึงมวลรวม	4.7	43.06
	ชั้นล่าง	เทาสว่าง(whitish gray)	0.05-0.3	เล็กน้อย	1.62	4.93
120 ระยะเวลา หุ้ม 2 ชม.	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	-	ทั่วผิวหน้าจนเห็นมวลรวม	4.84	83.61
	ชั้นล่าง	เทาอมน้ำตาลแดง	-	เล็กน้อย	1.78	2.43
120 ระยะเวลา หุ้ม 1 ชม.	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	-	ทั่วผิวหน้าจนเห็นมวลรวม	6.31	96.2
	ชั้นล่าง	เทาอมน้ำตาลแดง	-	เล็กน้อย	วัดไม่ได้	2.63
120 ระยะเวลา หุ้ม 3 ชม.	ชั้นบน	เทาสว่าง(whitish gray)	-	ทั่วผิวหน้าจนเห็นมวลรวม	6.35	95.34
	ชั้นล่าง	เทาสว่าง(whitish gray)	0.1-0.3	เล็กน้อย	1.47	2.5

รายละเอียดต่างๆสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สี

ที่เวลา 30-60 นาทีผิวหน้าชั้นตัวอย่างได้กลายเป็นสีชมพู/แดงซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเกลือที่มีธาตุเหล็กในมวลรวม และที่ 90 นาที ผิวหน้าชั้นตัวอย่างได้กลายเป็นสีเทาสันนิษฐานว่าเกิดจากมวลรวมที่เป็นหินปูน ซึ่งผิวหน้าบางส่วนที่หลุดร่อนได้เผยให้เห็นถึงมวลรวมหยาบที่กลายเป็นสีขาวด้วยเช่นกัน และสำหรับ 120 นาที ความเป็นสีเทาก็ยิ่งขาวมากขึ้นด้วยข้อสันนิษฐานเดียวกันกับ 90 นาที

2. การหลุดร่อน

เวลา 30-60 นาที

สำหรับชั้นตัวอย่าง 240ksc ไม่ปรากฏการหลุดร่อนให้เห็น แต่สำหรับ 350ksc มีการหลุดร่อนให้เห็นที่ผิวในระดับความลึกที่ต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ พื้นที่ความเสียหายของทั้ง 2 กำลัง เมื่อวัดด้วยมือ มีพื้นที่ความเสียหายไม่เกิน 7% ที่ความเสียหายระดับนี้โปรแกรม Photoshop ไม่สามารถตรวจวัดได้

เวลา 90 นาที

ชิ้นตัวอย่างทั้ง 2 กำลัง ปรากฏการหลุดร่อนให้เห็นซึ่งความลึกที่วัดได้ ชิ้นตัวอย่าง กำลัง 350ksc มีความลึกการหลุดร่อนเฉลี่ยสูงกว่าถึงเกือบ 4 เท่า พื้นที่ความเสียหายของทั้งคู่ เมื่อ วัดด้วยมือ ค่าที่วัดได้ต่ำที่สุดคือ 4.93% ซึ่งโปรแกรม Photoshop ไม่สามารถวัดได้ แต่สำหรับค่าที่ วัดด้วยมือได้สูงสุดคือ 43.06% โปรแกรม Photoshop วัดได้ 57.82%

เวลา 120 นาที

ชิ้นตัวอย่างทั้ง 2 กำลัง ที่ชั้นล่างมีความลึกของการหลุดร่อนมากที่สุดคือ 1.75 มม สำหรับที่อยู่ด้านบนมีความลึกของการหลุดร่อนตั้งแต่ 3.5-6.35 มม โดยที่ชิ้นตัวอย่าง 350ksc มีความลึกของการหลุดร่อนที่มากกว่า และชิ้นตัวอย่าง 240ksc มีบางตัวที่ไม่การหลุดร่อนเลย อีกทั้งชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้มมากจะมีความลึกของการหลุดร่อนที่มากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้ม น้อย สาเหตุที่นั่นอาจเนื่องมาจากชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้มเหล็กที่มากจะเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก ภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้มเหล็กน้อย สำหรับพื้นที่ความเสียหายนั้น ชิ้น ตัวอย่าง 240ksc ชั้นล่างเกือบจะไม่มี ความเสียหายที่ผิวปรากฏ และในชิ้นตัวอย่างที่มีความเสียหายปรากฏนั้นวัดด้วยมือได้ 39.03% โปรแกรมไม่สามารถวัดได้ สำหรับชิ้นตัวอย่าง 350ksc ที่ ชั้นล่างเช่นเดียวกัน มีความเสียหายวัดด้วยมือได้ประมาณ 2.5% โปรแกรมวัดได้ 13-17.76% และ ชิ้นตัวอย่างชั้นบนของทั้ง 2 กำลัง วัดด้วยมือได้มากกว่า 70- 99% และเมื่อใช้โปรแกรมสามารถวัด ได้ 86-99%

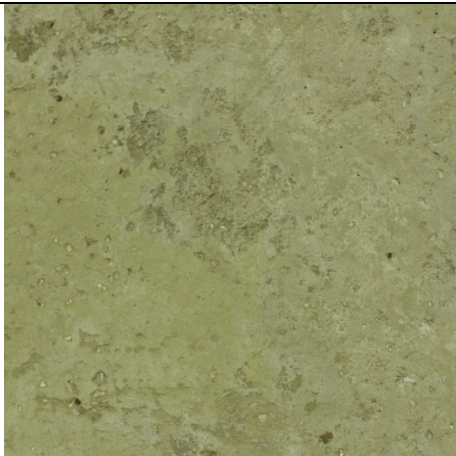
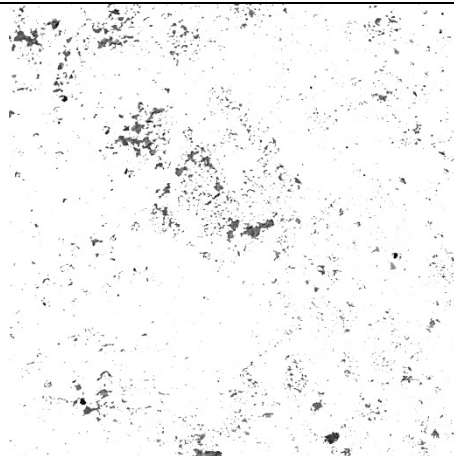
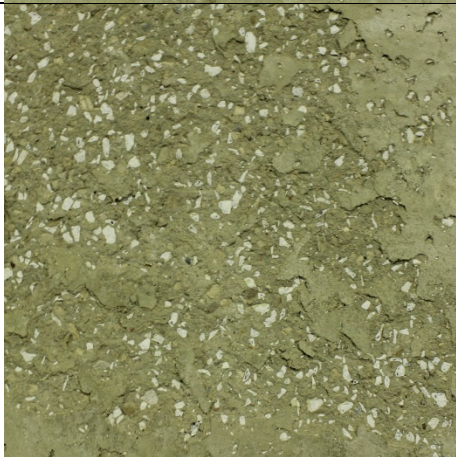
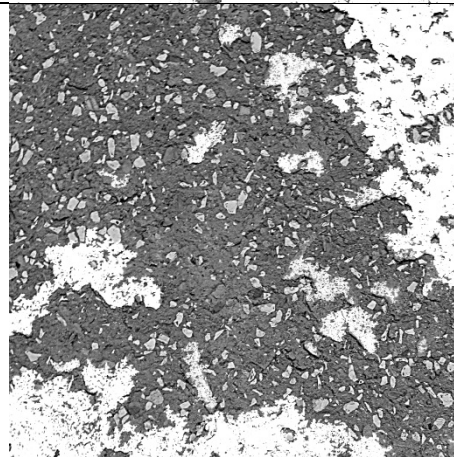

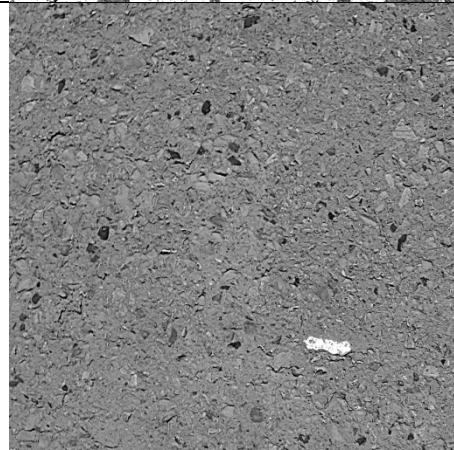
3. รอยร้าว

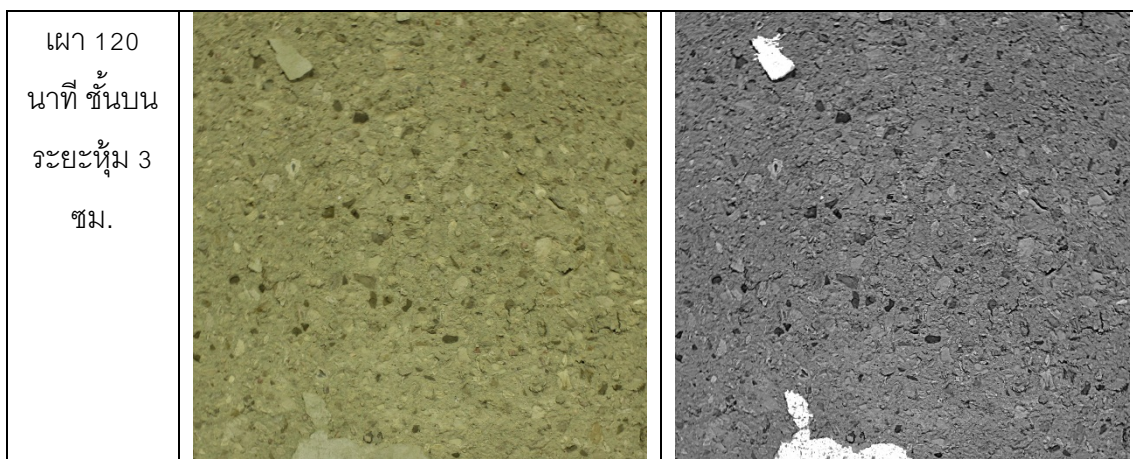
หลังจากนำชิ้นตัวอย่างออกจากเตาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 วัน แล้วทำความสะอาดโดยใช้เครื่องเป่าลมกำลังไฟ 580วัตต์ จากนั้นจึงใช้แถบวัดรอยร้าว วัดขนาด รอยร้าวที่ปรากฏบนผิวชิ้นตัวอย่าง

พบว่าชิ้นตัวอย่างกำลัง 240ksc ไม่ปรากฏรอยร้าวให้เห็น มีเพียงการหลุดร่อนที่ผิวหน้ากระจายไป ทั่วในชิ้นตัวอย่างที่เผาไฟมากกว่า 90 นาที สำหรับตัวอย่างกำลัง 350ksc เริ่มปรากฏรอยร้าว ขนาด 0.08-0.3 มม ที่เวลา 60 นาที และขนาด 0.1-0.5 มม ที่เวลา 90 นาที สำหรับเวลา 120 นาที ไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวได้ เนื่องจากมีการหลุดร่อนอยู่ที่ผิวหน้า


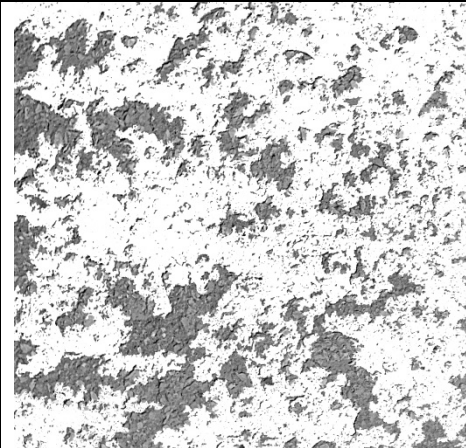
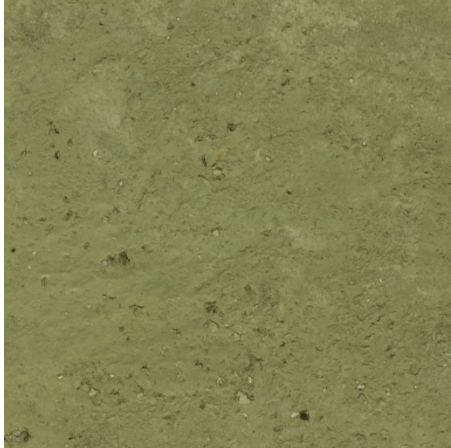

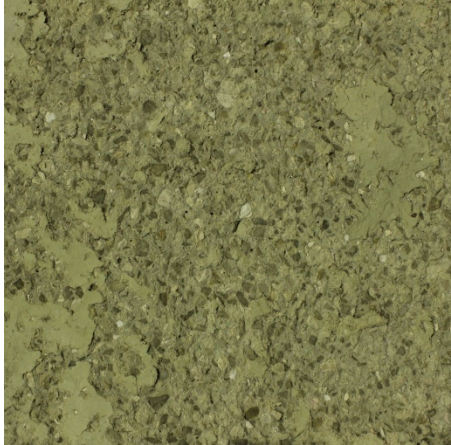
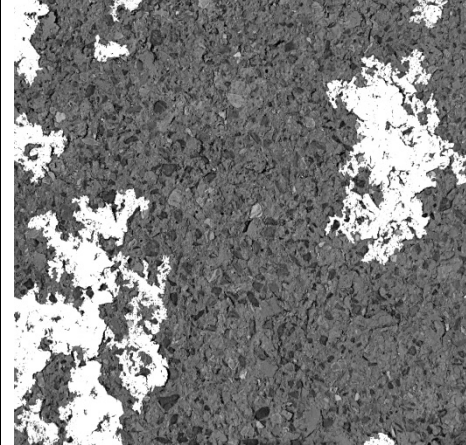
จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาพื้นที่ความเสียหายที่ผิวด้วยโปรแกรม Adobe Phototshop ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้กับทุกชิ้นตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้แสดงเป็นภาพไว้ในตารางที่ 29 และ 30 สำหรับผลการคำนวณได้ผลเป็นดังตารางที่ 31 และ 32


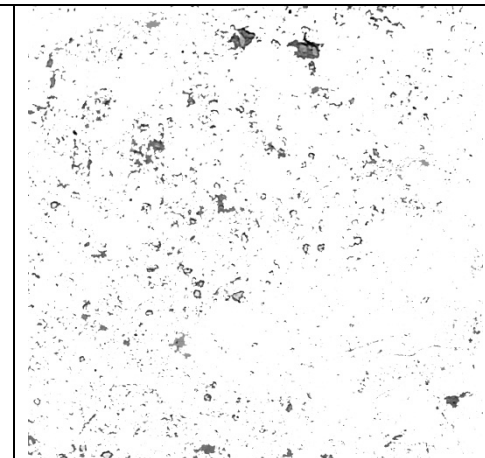
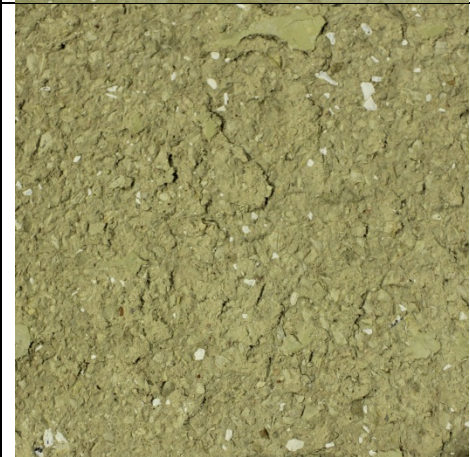
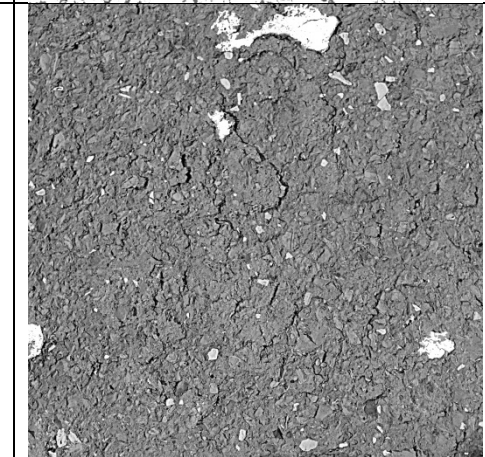
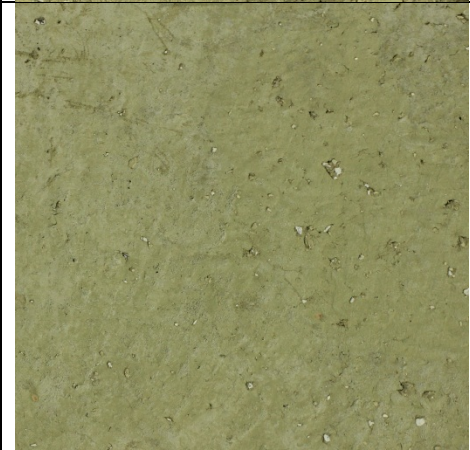

ตารางที่ 29 ภาพผิวก่อนและหลังใช้โปรแกรมในการจำแนกความเสียหาย กำลังอัด 240 ksc

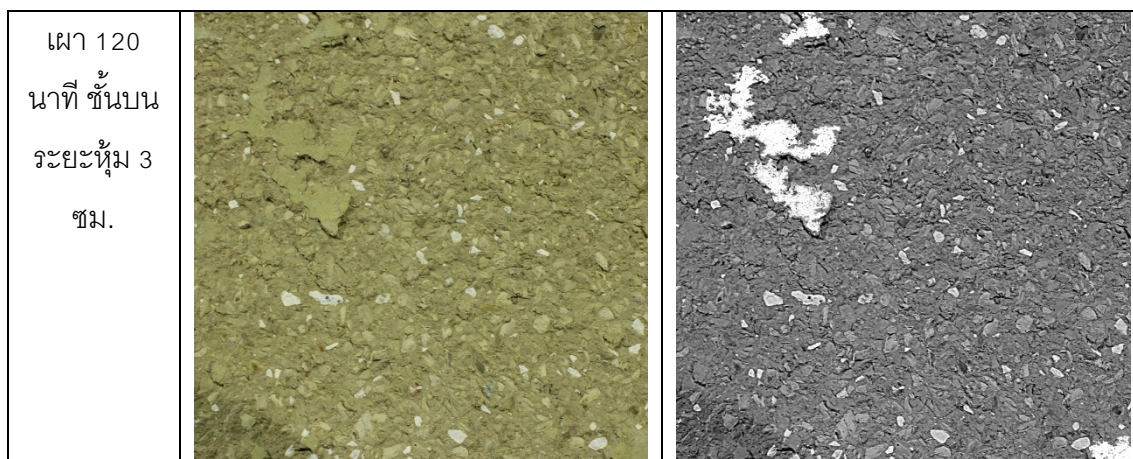
ชนิดตัวอย่าง	ก่อนใช้โปรแกรม	หลังใช้โปรแกรม
ผา 90 นาที่ ชั้นล่าง		
ผา 120 นาที่ ชั้นบน ระยะหุ้ม 2 ซม.		
ผา 120 นาที่ ชั้นบน ระยะหุ้ม 1 ซม.		



ตารางที่ 30 ภาพผิวก่อนและหลังใช้โปรแกรมในการจำแนกความเสียหาย กำลังอัด 350 ksc

ชนิดตัวอย่าง	ก่อนใช้โปรแกรม	หลังใช้โปรแกรม
ผา 90 นาที่ ชั้นบน		
ผา 120 นาที่ ชั้นล่าง ระยะหุ้ม 2 ซม.		
ผา 120 นาที่ ชั้นบน ระยะหุ้ม 2 ซม.		

<p>แผ่น 120 นาที่ ชั้นล่าง ระยะหุ้ม 1 ซม.</p>		
<p>แผ่น 120 นาที่ ชั้นบน ระยะหุ้ม 1 ซม.</p>		
<p>แผ่น 120 นาที่ ชั้นล่าง ระยะหุ้ม 3 ซม.</p>		



ตารางที่ 31 ความเสียหายโดยใช้โปรแกรมสำหรับกำลังอัดที่ 240ksc

เวลา	รายละเอียดความเสียหาย		
		ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยโปรแกรม)	ระยะหุ้ม
30	ชั้นบน	-	2 ซม.
	ชั้นล่าง	-	
60	ชั้นบน	-	2 ซม.
	ชั้นล่าง	-	
90	ชั้นบน	-	2 ซม.
	ชั้นล่าง	13.87	
120	ชั้นบน	86.37	2 ซม.
	ชั้นล่าง	-	
120	ชั้นบน	99.96	1 ซม.
	ชั้นล่าง	-	
120	ชั้นบน	98.98	3 ซม.
	ชั้นล่าง	-	

ตารางที่ 32 ความเสียหายโดยใช้โปรแกรมสำหรับกำลังอัดที่ 350ksc

เวลา	รายละเอียดความเสียหาย		
		ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยโปรแกรม)	ระยะหุ้ม
30	ชั้นบน	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	
60	ชั้นบน	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	
90	ชั้นบน	57.82	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	
120	ชั้นบน	90.06	2 ชม.
	ชั้นล่าง	13.52	
120	ชั้นบน	99.16	1 ชม.
	ชั้นล่าง	15.96	
120	ชั้นบน	98.98	3 ชม.
	ชั้นล่าง	17.76	

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการวัดความเสียหายด้วยแผ่นอะคริลิคและด้วยโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ผลเปรียบเทียบร้อยละความเสียหายระหว่างวัดด้วยแผ่นอะคริลิคและโปรแกรม Adobe Photoshop ของชิ้นตัวอย่าง 240ksc

เวลา	รายละเอียดความเสียหาย 240ksc				
		ความลึกโดยเฉลี่ย (มม.)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยแผ่นอะคริลิค)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยโปรแกรม)	ระยะหุ้ม
30	ชั้นบน	-	-	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	-	-	
60	ชั้นบน	วัดไม่ได้	4.46	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	-	-	
90	ชั้นบน	วัดไม่ได้	12.3	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	1.19	5	13.87	
120	ชั้นบน	4.5	72.64	86.37	2 ชม.
	ชั้นล่าง	วัดไม่ได้	39.03	-	
120	ชั้นบน	3.53	99.62	99.96	1 ชม.
	ชั้นล่าง	-	-	-	
120	ชั้นบน	5.32	97.78	98.98	3 ชม.
	ชั้นล่าง	-	-	-	

ตารางที่ 34 ผลเปรียบเทียบร้อยละความเสียหายระหว่างวัดด้วยแผ่นอะคริลิกและโปรแกรม Adobe Photoshop ของชิ้นตัวอย่าง 350ksc

เวลา	รายละเอียดความเสียหาย 350ksc				ระยะหุ้ม
		ความลึกโดยเฉลี่ย (มม.)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยแผ่นอะคริลิก)	ร้อยละความเสียหาย (วัดด้วยโปรแกรม)	
30	ชั้นบน	วัดไม่ได้	3.33	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	-	-	-	
60	ชั้นบน	วัดไม่ได้	5.69	-	2 ชม.
	ชั้นล่าง	วัดไม่ได้	4.31	-	
90	ชั้นบน	4.7	43.06	57.82	2 ชม.
	ชั้นล่าง	1.62	4.93	-	
120	ชั้นบน	4.84	83.61	90.06	2 ชม.
	ชั้นล่าง	1.78	2.43	13.52	
120	ชั้นบน	6.31	96.2	99.16	1 ชม.
	ชั้นล่าง	วัดไม่ได้	2.63	15.96	
120	ชั้นบน	6.35	95.34	98.98	3 ชม.
	ชั้นล่าง	1.47	2.5	17.76	

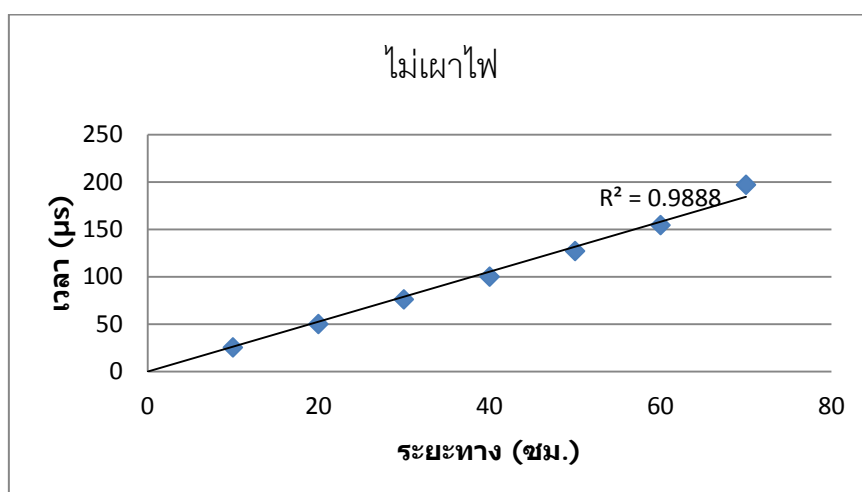
จากผลเปรียบเทียบระหว่างการวัดความเสียหายโดยการใช้มือและโดยโปรแกรมพบว่าการใช้โปรแกรมถึงจะมีความสะดวกและรวดเร็วกว่า แต่ผลที่ได้จะมีค่าที่มากกว่าการวัดด้วยมือประมาณ 4-25% สำหรับที่มีความเสียหายมากกว่า 40% เมื่อวัดด้วยมือ และมากกว่าประมาณ 260% สำหรับความเสียหายที่น้อยกว่า 10% เมื่อวัดด้วยมือ อีกทั้งถ้าชิ้นตัวอย่างมีพื้นที่ความเสียหายที่ไม่สามารถวัดความลึกของการหลุดร่อนได้ โปรแกรม Photoshop ก็ไม่สามารถตรวจวัดความเสียหายได้เช่นกัน

4.3.2. ผลการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

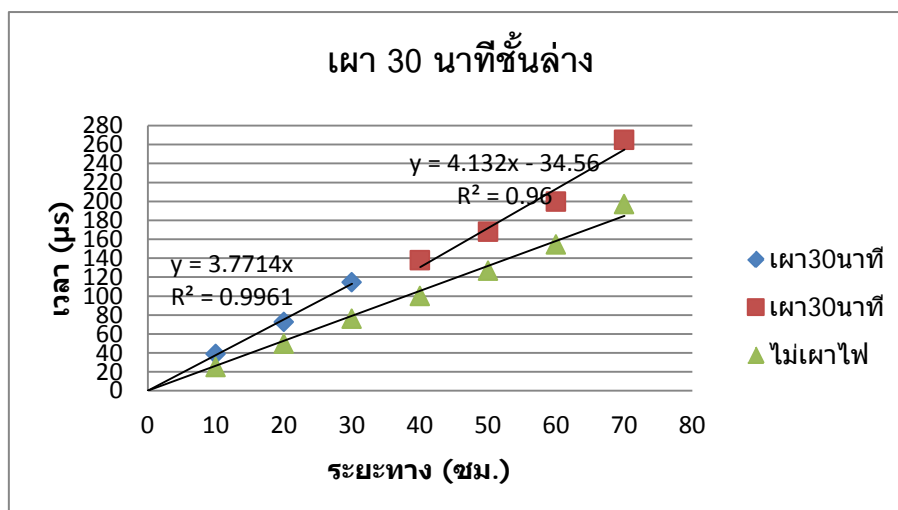
จากการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตาแล้ว จึงมาทำการทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิกจากนั้นนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา เพื่อนำไปทำนายหาความลึกของความเสียหายซึ่งได้แสดงไว้ดังภาพที่ 69-94 ชิ้นตัวอย่างมีจุดทดสอบทั้งสิ้น 8 จุด ดังนั้นจึงมีหลักเกณฑ์ในการสร้างกราฟความสัมพันธ์และการแปรผลดังนี้

1. เลือกเส้นแนวโน้มโดยเปรียบเทียบค่า R^2 ระหว่างการเลือกข้อมูลทั้งหมด กับการจำแนกข้อมูลเป็น 2 ชุด โดยเลือกรูปแบบที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด

2. ตามมาตรฐาน ACI [17] ได้อธิบายการแปรผลไว้คือ “เมื่อความชื้นในช่วงก่อนถึงจุดเปลี่ยนความชื้นมีค่าที่น้อยกว่าช่วงหลังจุดเปลี่ยนความชื้น หมายความว่าคอนกรีตนั้นอาจเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลย แต่ถ้าหากเมื่อความชื้นในช่วงก่อนถึงจุดเปลี่ยนความชื้นมีค่าที่มากกว่าช่วงหลังจุดเปลี่ยนความชื้น ให้คำนวณหาความลึกของความเสียหายได้ดังสมการที่ 3

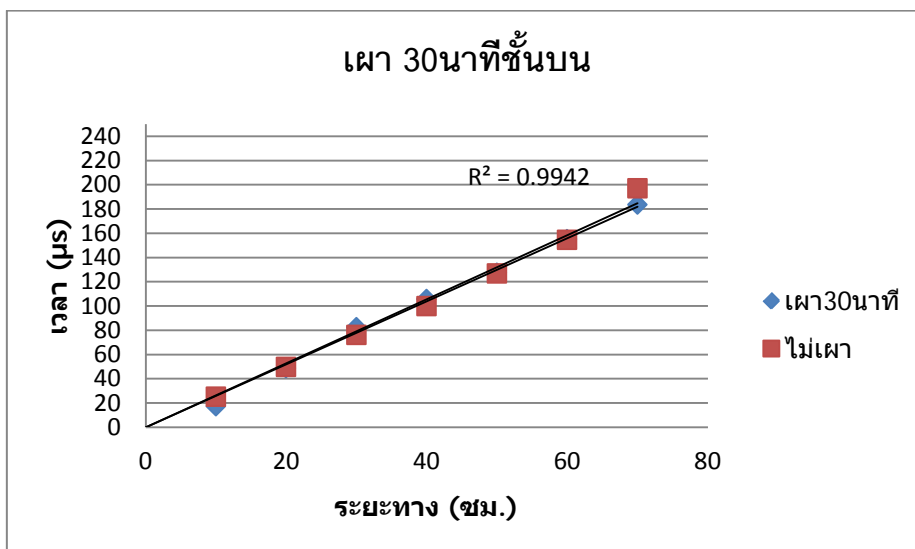


ภาพที่ 69 ผลของกำลังอัด 240ksc ไม่เผาไฟ



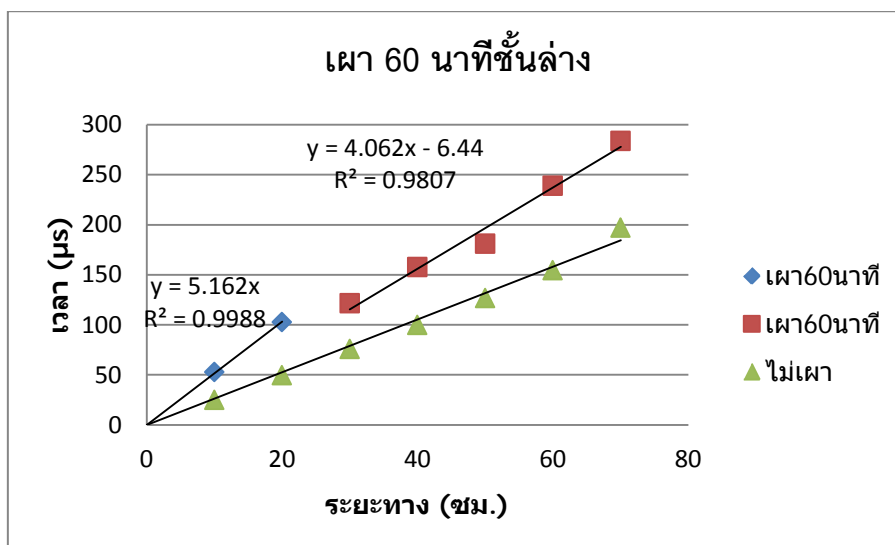
ภาพที่ 70 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 30 นาที ชั้นล่าง

ความชื้นช่วงต้น = 3.7, ความชื้นช่วงปลาย = 4.1 ดังนั้นหมายถึงชั้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมากหรืออาจไม่เกิดความเสียหาย



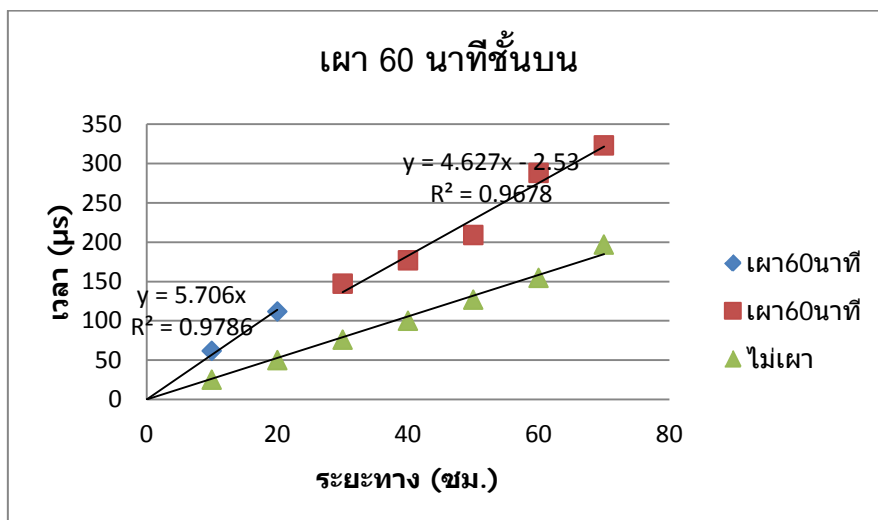
ภาพที่ 71 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 30 นาที ชั้นบน

ตำแหน่งและเส้นกราฟของตัวอย่างที่เผาไฟเกือบจะซ้อนทับกับตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟอย่างสมบูรณ์ หมายถึงชิ้นตัวอย่างอาจเกิดความเสียหายขึ้นน้อยมากหรือไม่มีความเสียหาย



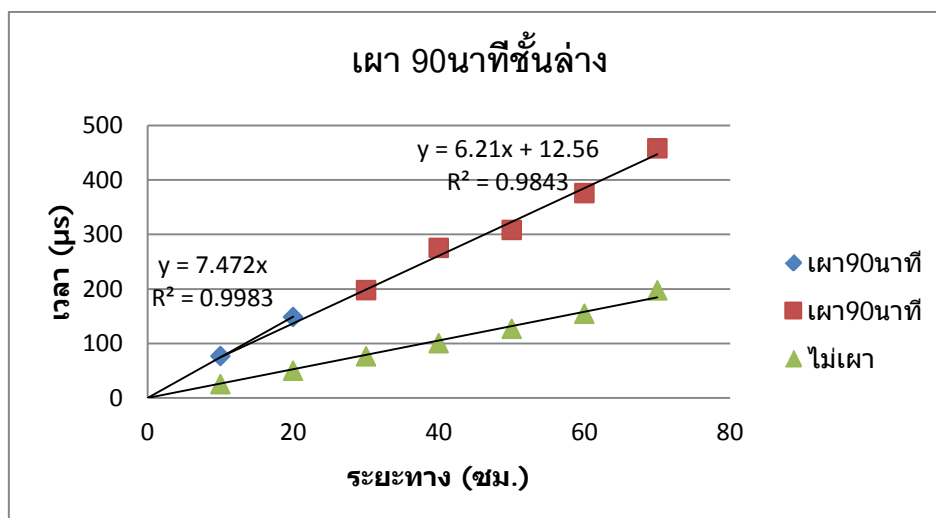
ภาพที่ 72 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 60 นาที ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 5.2, ความชันช่วงปลาย = 4.1 จุดที่กราฟทั้ง 2 เส้นตัดกันมีค่าต่ำกว่า 0 ดังนั้นหมายถึงชิ้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมาก



ภาพที่ 73 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 60 นาที ชั้นบน

ความชันช่วงต้น = 5.7, ความชันช่วงปลาย = 4.6 จุดที่กราฟทั้ง 2 เส้นตัดกันมีค่าต่ำกว่า 0 ดังนั้นหมายถึงขึ้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมาก

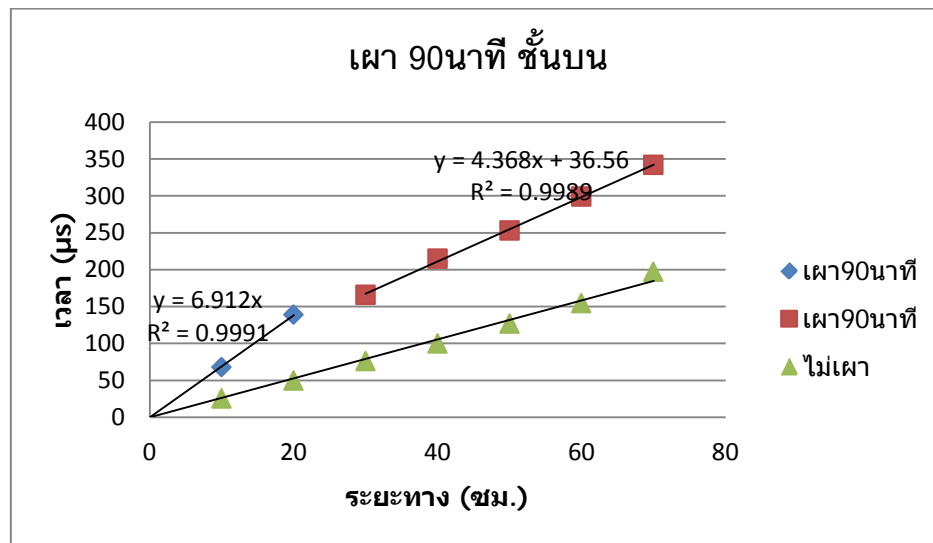


ภาพที่ 74 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 90 นาที ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 7.5, ความชันช่วงปลาย = 6.2 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 9.95 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.13 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.16 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 1.60 \text{ ซม.}$

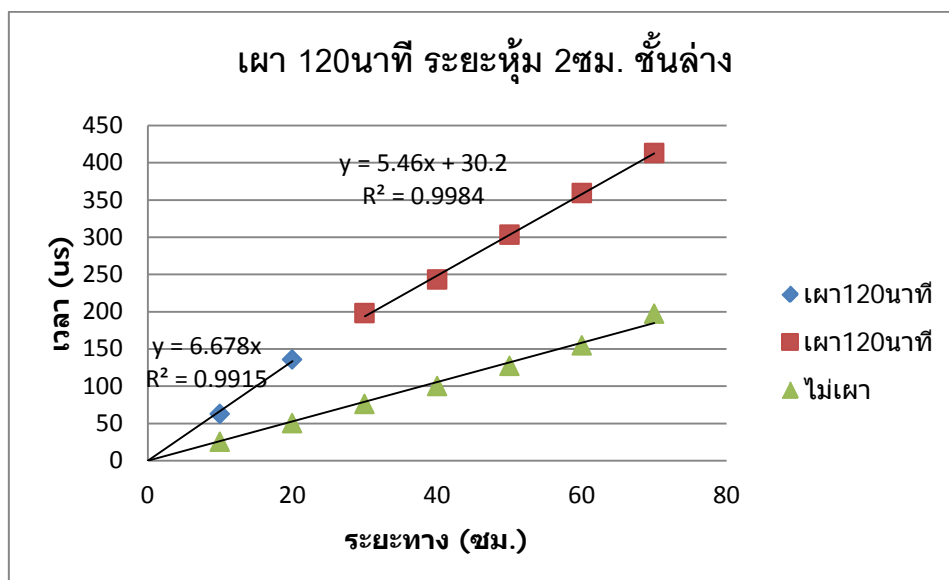


ภาพที่ 75 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 90 นาทึ่ ชั้นบน

ความชันช่วงต้น = 6.9, ความชันช่วงปลาย = 4.4 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 14.37 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.14 \text{ ซม./} \mu\text{s} \quad V_s = 0.23 \text{ ซม./} \mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.41$ ซม.

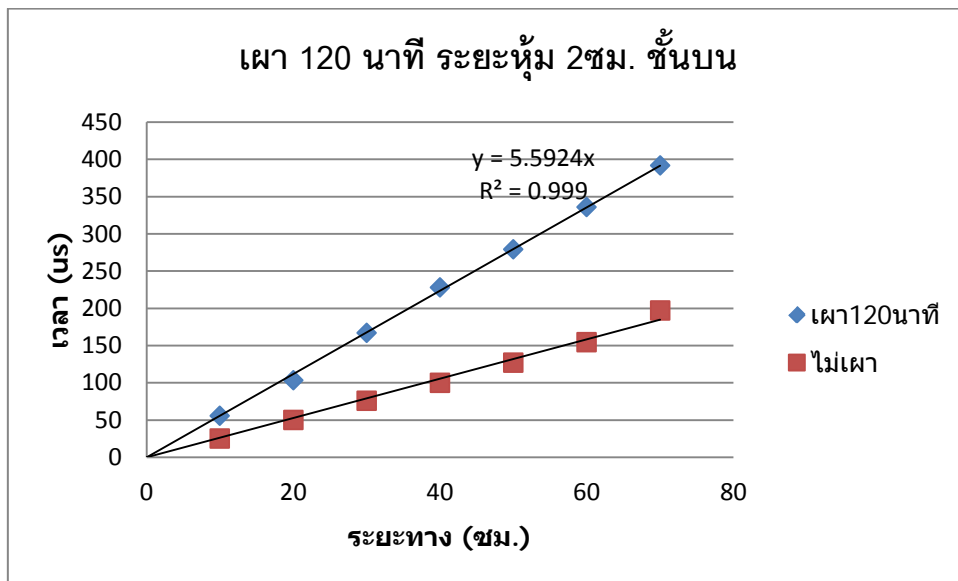


ภาพที่ 76 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาทึ่ ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 6.7, ความชันช่วงปลาย = 5.5 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

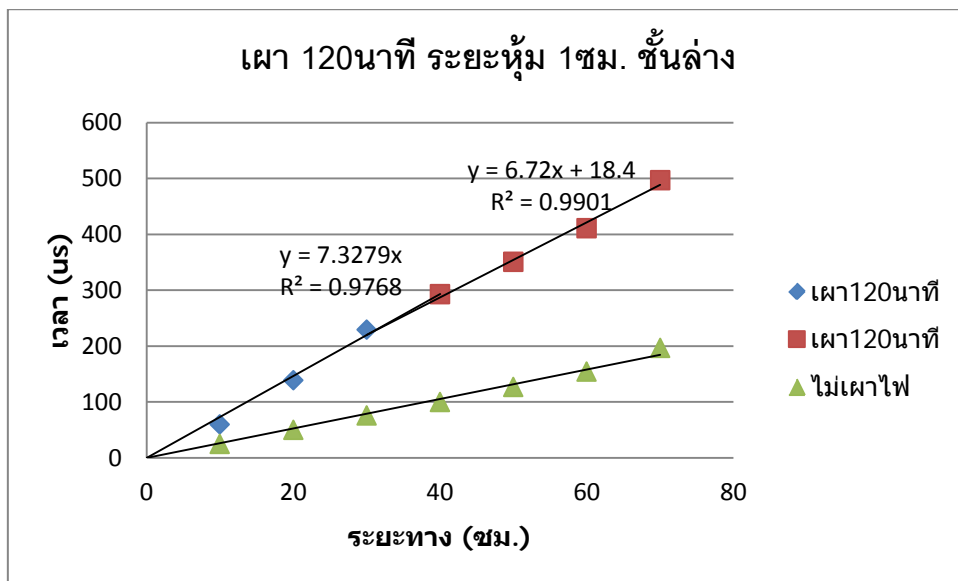
$$X_0 = 24.79 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.15 \text{ ซม./} \mu\text{s} \quad V_s = 0.18 \text{ ซม./} \mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.93$ ซม.



ภาพที่ 77 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาที่ ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน

กราฟของชั้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟไม่พบจุดตัด อีกทั้งมีความชันที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟมาก ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าอาจเกิดความเสียหายขึ้นตลอดความหนาของชั้นตัวอย่าง

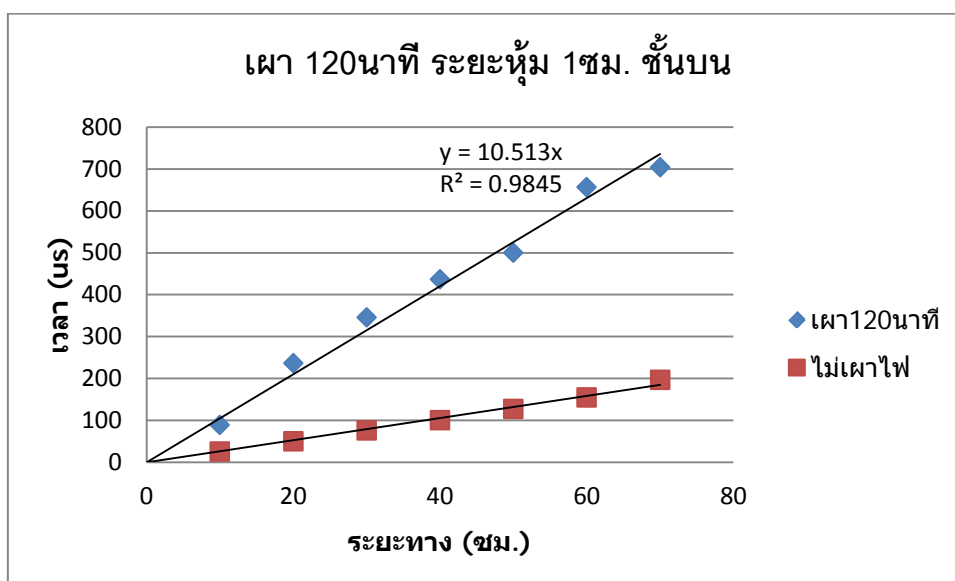


ภาพที่ 78 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาที่ ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 7.3, ความชันช่วงปลาย = 6.7 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

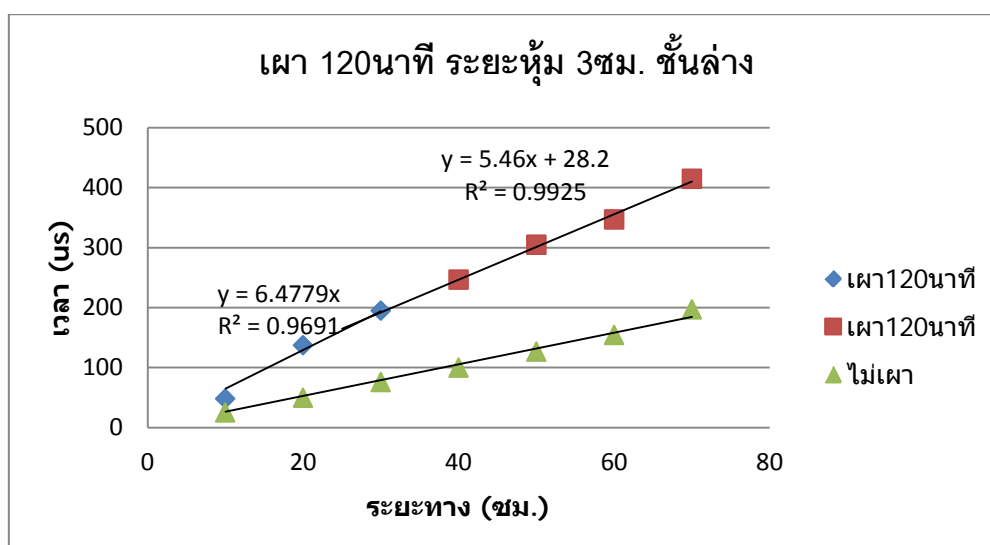
$$X_0 = 30.27 \text{ ซม.} \quad V_0 = 0.14 \text{ ซม./} \mu\text{s} \quad V_s = 0.15 \text{ ซม./} \mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.15 \text{ ซม.}$



ภาพที่ 79 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 1ซม. ชั้นบน

กราฟของชั้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟไม่พบจุดตัด อีกทั้งมีความชันที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟมาก ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าอาจเกิดความเสียหายขึ้นตลอดความหนาของชั้นตัวอย่าง

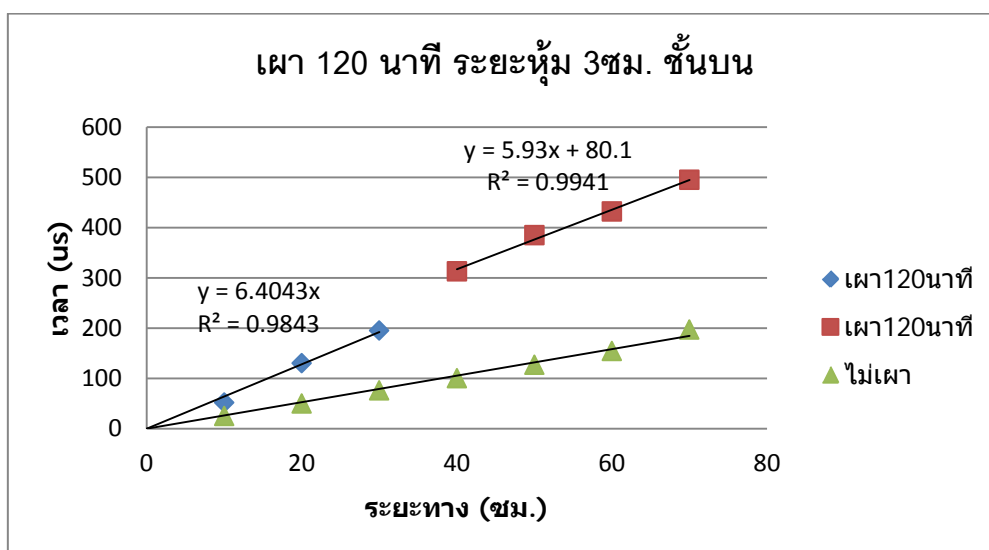


ภาพที่ 80 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 6.5, ความชันช่วงปลาย = 5.5 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

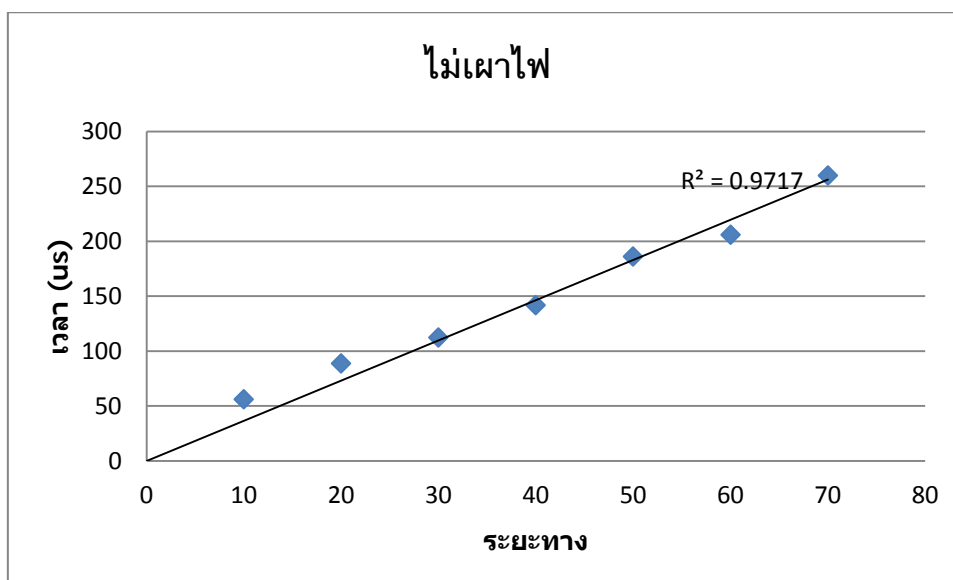
$$X_0 = 27.7 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.15 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.18 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 4.04 \text{ ซม.}$

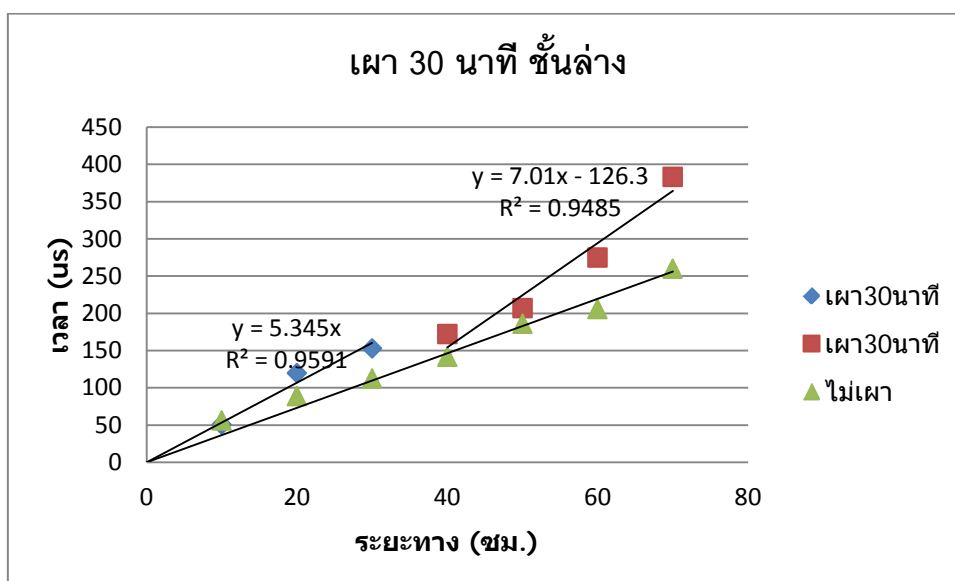


ภาพที่ 81 ผลของกำลังอัด 240ksc เผาไฟ 120 นาที่ ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน

ความชันช่วงต้น = 5.2, ความชันช่วงปลาย = 4.1 จุดที่กราฟทั้ง 2 เส้นตัดกันมีค่าที่สูงมาก เมื่อกำหนดเป็นความเสียหายแล้วมีค่ามากกว่าความหนาของชั้นตัวอย่างและมีความชันที่สูงกว่าชั้นตัวอย่างที่ไม่เผามาก ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าชั้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายมากตลอดความหนาของชั้นตัวอย่าง



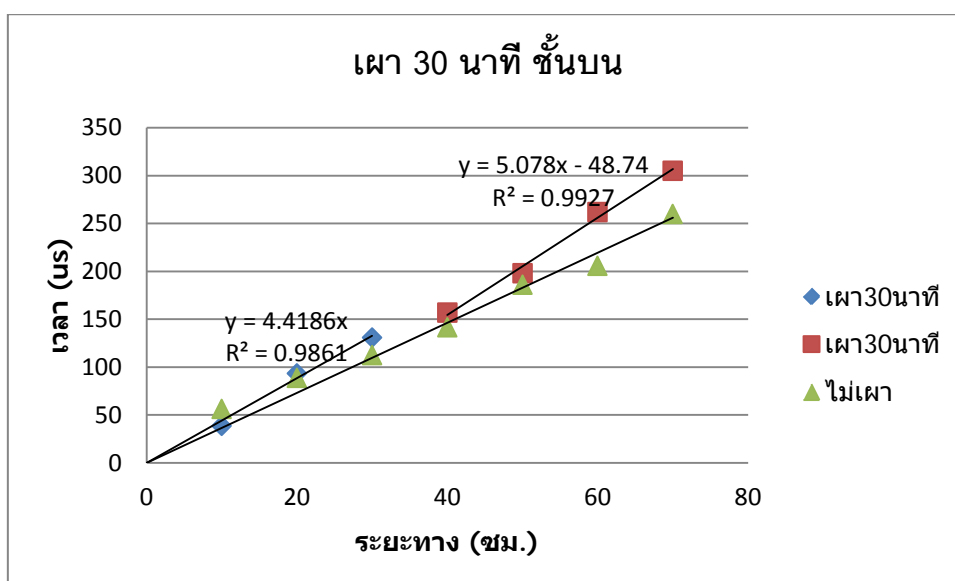
ภาพที่ 82 ผลของกำลังอัด 350ksc ไม่เผาไฟ



ภาพที่ 83 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 30 นาที ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 5.3, ความชันช่วงปลาย = 7.0

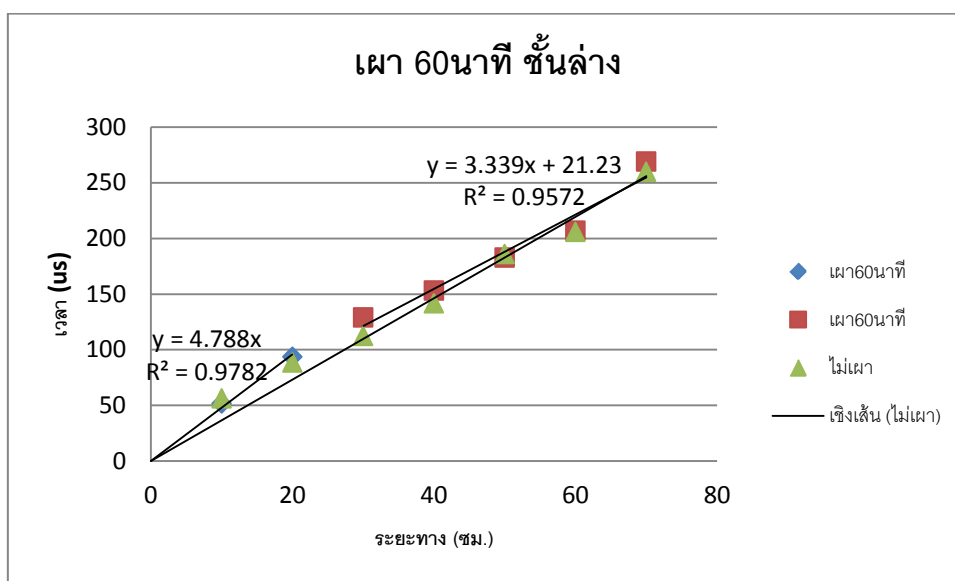
ดังนั้นหมายถึงชั้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมากหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลย



ภาพที่ 84 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 30 นาที ชั้นบน

ความชันช่วงต้น = 4.4, ความชันช่วงปลาย = 4.1

ดังนั้นหมายถึงชั้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมากหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลย

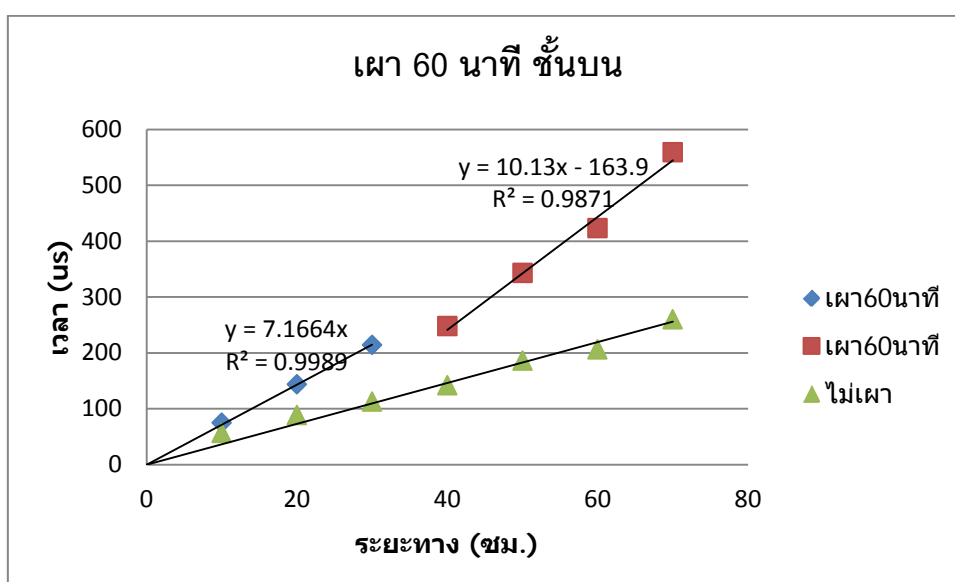


ภาพที่ 85 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 60 นาทิจั้่นล่าง

ความชันช่วงต้น = 4.8, ความชันช่วงปลาย = 3.3 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 14.65 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.21 \text{ ซม./} \mu\text{s} \quad V_s = 0.30 \text{ ซม./} \mu\text{s}$$

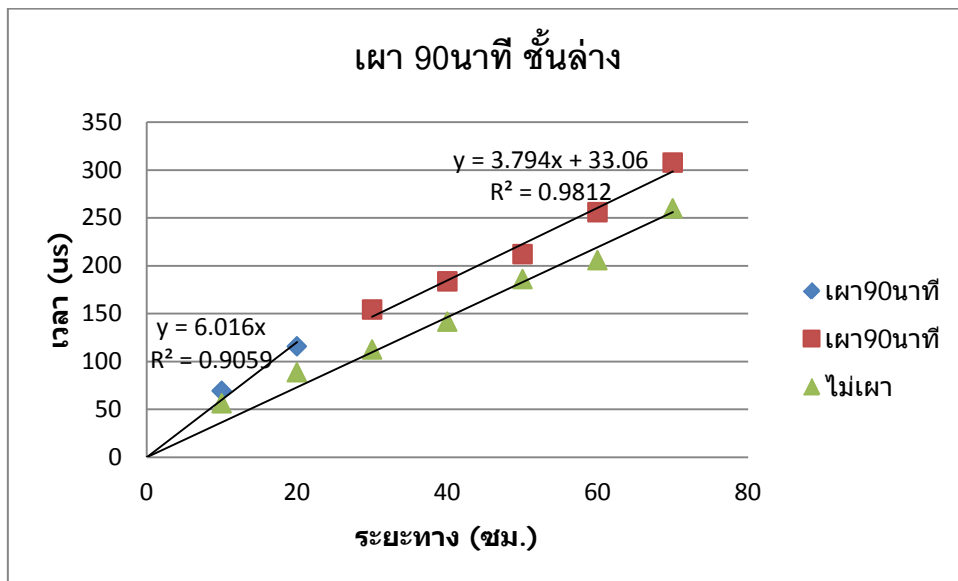
ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.08$ ซม.



ภาพที่ 86 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 60 นาทิจั้่นบน

ความชันช่วงต้น = 7.2, ความชันช่วงปลาย = 10.1

ดังนั้นหมายถึงชั้นตัวอย่างนี้อาจเกิดความเสียหายที่น้อยมากหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลย

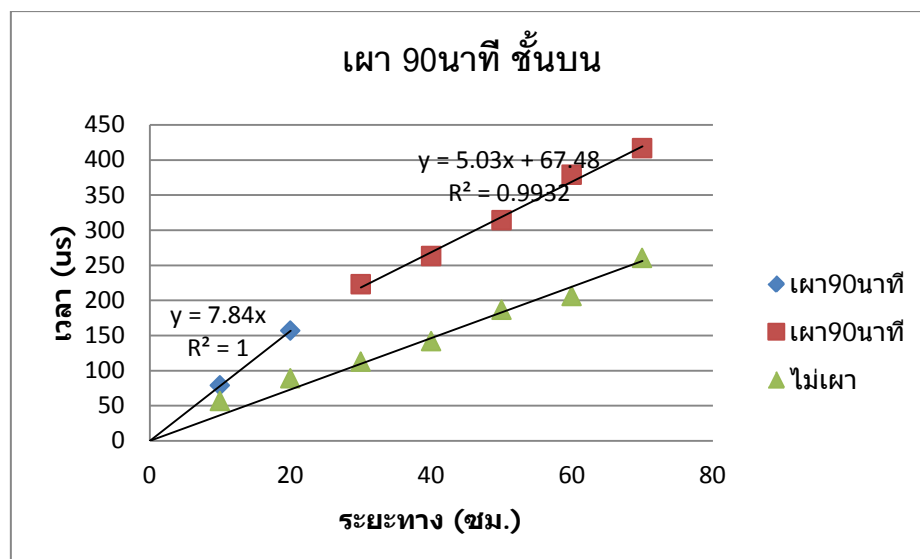


ภาพที่ 87 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 90 นาทึ ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 6.0, ความชันช่วงปลาย = 3.8 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 14.88 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.17 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.26 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.40$ ซม.

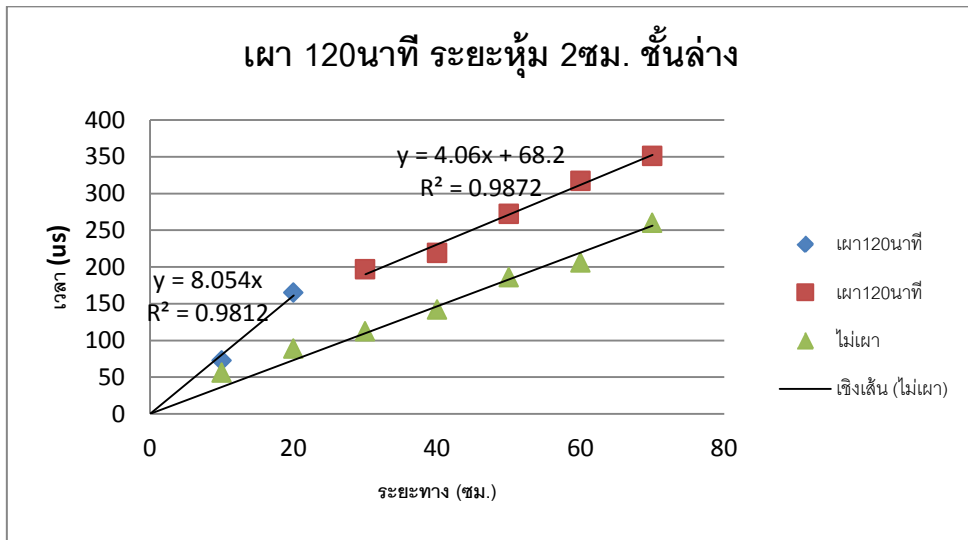


ภาพที่ 88 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 90 นาทึ ชั้นบน

ความชันช่วงต้น = 7.8, ความชันช่วงปลาย = 5.0 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 24.01 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.13 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.20 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 5.61$ ซม.

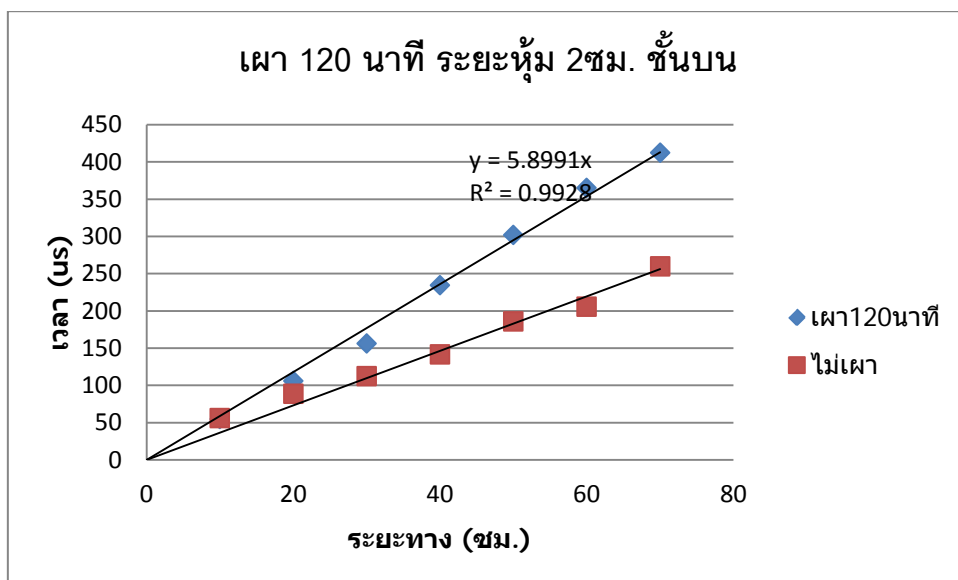


ภาพที่ 89 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 8.1, ความชันช่วงปลาย = 4.1 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

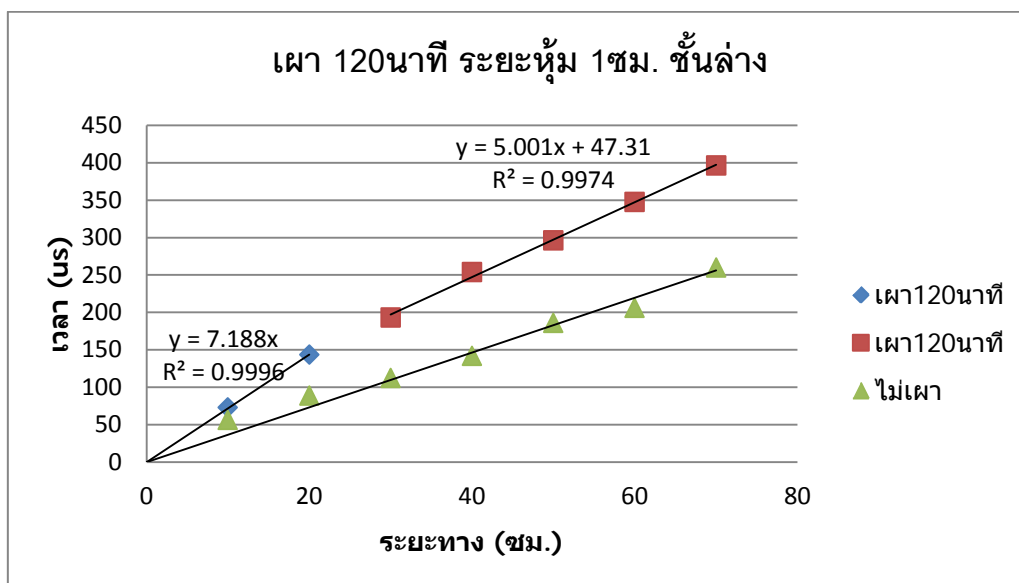
$$X_0 = 17.07 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.12 \text{ ซม./} \mu\text{s} \quad V_s = 0.25 \text{ ซม./} \mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 5.06$ ซม.



ภาพที่ 90 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นบน

กราฟของชั้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟไม่พบจุดตัด อีกทั้งมีความชันที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟมาก ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าอาจเกิดความเสียหายขึ้นตลอดความหนาของชั้นตัวอย่าง

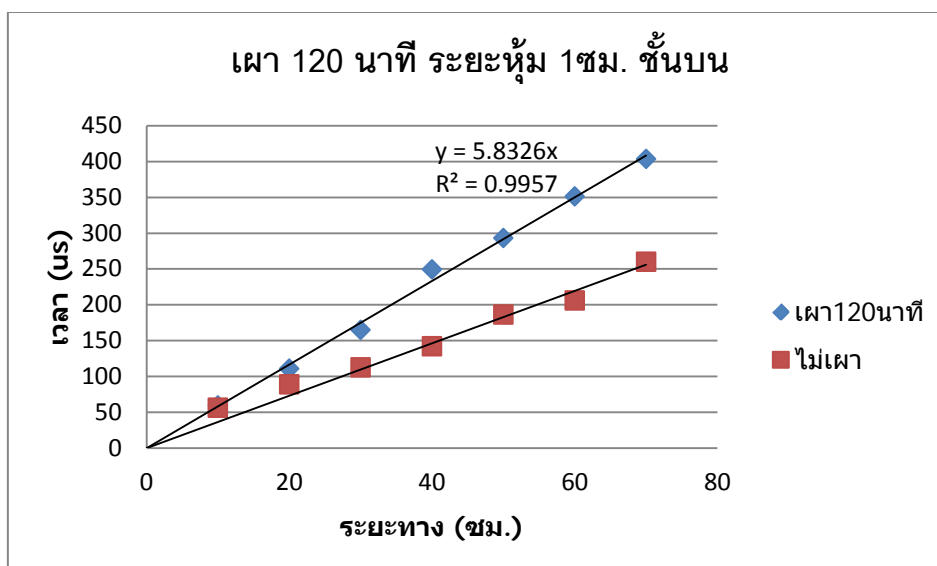


ภาพที่ 91 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 1ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 7.2, ความชันช่วงปลาย = 5.0 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

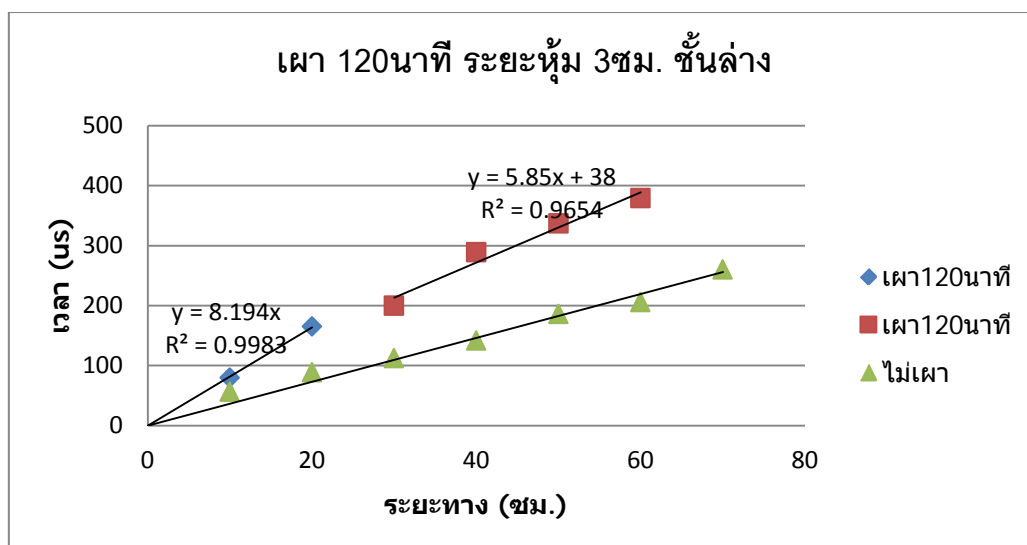
$$X_0 = 21.63 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.14 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.20 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 4.54 \text{ ซม.}$



ภาพที่ 92 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาทึ ระยะหุ้ม 1ซม. ชั้นบน

กราฟของชั้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟไม่พบจุดตัด อีกทั้งมีความชันที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟมาก ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าอาจเกิดความเสียหายขึ้นตลอดความหนาของชั้นตัวอย่าง

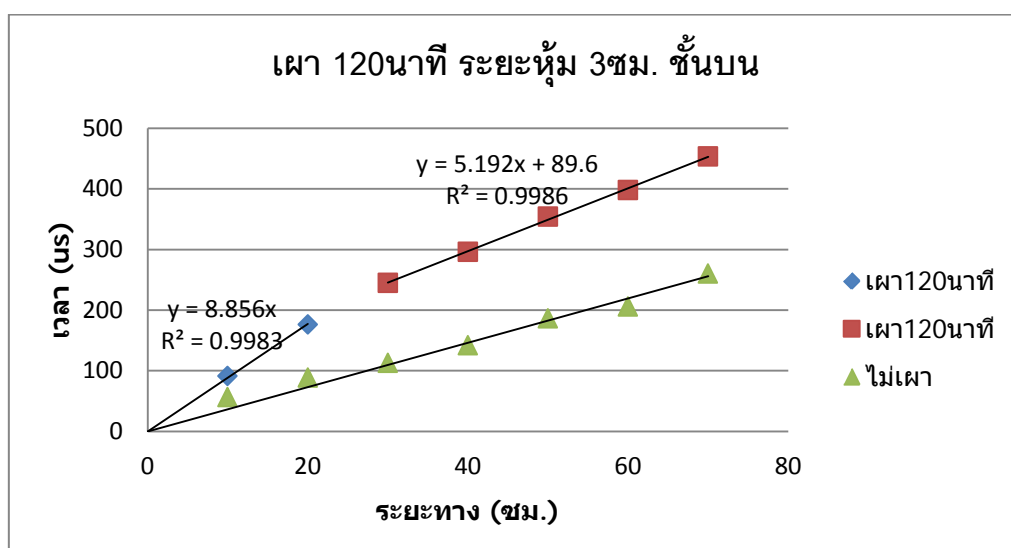


ภาพที่ 93 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นล่าง

ความชันช่วงต้น = 8.2, ความชันช่วงปลาย = 5.9 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 16.21 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.12 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.17 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 3.37$ ซม.



ภาพที่ 94 ผลของกำลังอัด 350ksc เผาไฟ 120 นาที่ ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นบน

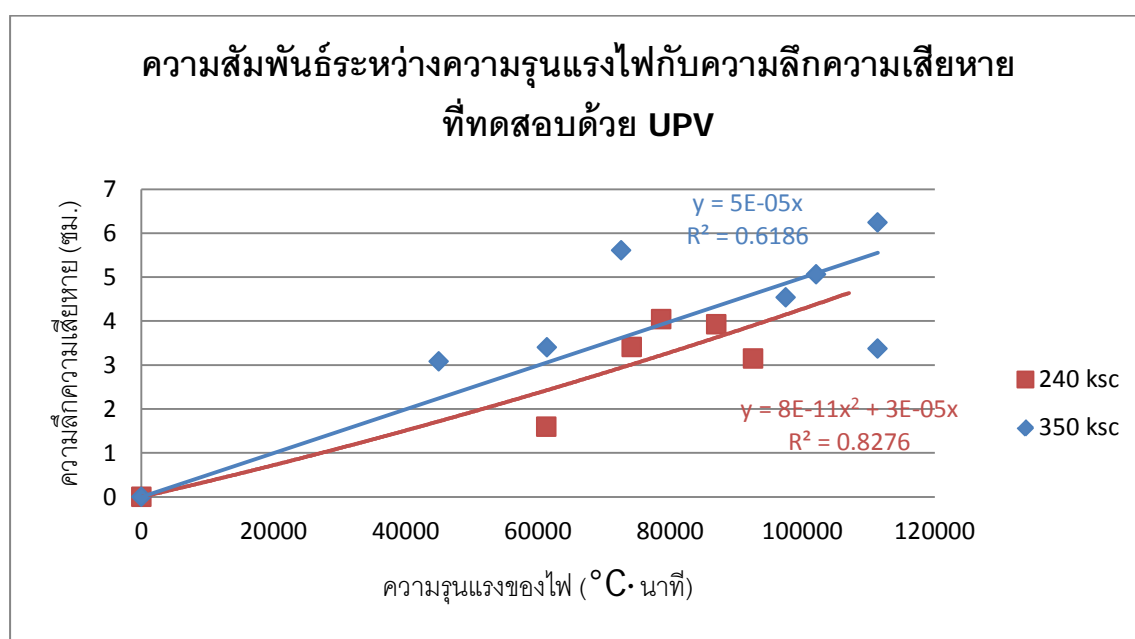
ความชันช่วงต้น = 8.9, ความชันช่วงปลาย = 5.2 ดังนั้นผลการคำนวณคือ

$$X_0 = 24.45 \text{ ซม.} \quad V_d = 0.11 \text{ ซม./}\mu\text{s} \quad V_s = 0.19 \text{ ซม./}\mu\text{s}$$

ดังนั้นความลึกความเสียหาย $D = 6.24$ ซม.

การตรวจสอบชิ้นตัวอย่างด้วยคลื่นอัลตราโซนิกทำเพื่อหาระดับความลึกของความเสียหายของชิ้นตัวอย่าง โดยที่จากผลการทดสอบพบว่า ที่เวลาเผาไฟ 30 และ 60 นาทีไม่สามารถหาจุดเปลี่ยนของความชันได้ ยกเว้นแต่ กำลัง 350ksc เวลาเผา 60 นาทีที่ชั้นล่าง ที่สามารถคำนวณความลึกของความเสียหายได้เท่ากับ 3.08 ซม จากผิว ผลการทดสอบในช่วงนี้จะพบว่าความชันในช่วงต้นมีค่ามากกว่าความชันช่วงปลาย จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย หรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลยก็ได้ สำหรับเวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาทีสามารถหาจุดเปลี่ยนความชันและคำนวณความลึกของความเสียหายได้ แต่สำหรับเวลาเผาไฟ 120 นาทีที่ชิ้นตัวอย่างชั้นล่าง ผลการทดสอบไม่สามารถหาจุดเปลี่ยนความชันได้ แต่พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าเกิดความเสียหายขึ้นตลอดความหนาของชิ้นตัวอย่าง

เมื่อนำผลการคำนวณความลึกความเสียหายมาเปรียบเทียบกับระดับความรุนแรงไฟที่พบ จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 95



ภาพที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและความลึกจากการคำนวณ

จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถสร้างเป็นสมการสำหรับทำนายค่าความลึกความเสียหายจากการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ระดับความรุนแรงไฟได้ดังสมการ 6 และ 7

$$F = (5 \times 10^{-5})D_u \quad (6)$$

$$F = (8 \times 10^{-11})D_u^2 + (3 \times 10^{-5})D_u \quad (7)$$

โดยที่

F = ความรุนแรงไฟ ($^{\circ}\text{C}$ นาที)

D_u = ความลึกที่ได้จากการคำนวณผลจากวิธีคลื่นอัลตราโซนิก (ซม)

โดยที่ สมการ 6 สำหรับชิ้นตัวอย่าง 240ksc และ สมการ 7 สำหรับชิ้นตัวอย่าง 350ksc ทั้งนี้พบว่าชิ้นตัวอย่าง 350ksc มีแนวโน้มที่จะมีผลคำนวณความลึกความเสียหายที่มากกว่าชิ้นตัวอย่าง 240ksc ในระดับความรุนแรงไฟเดียวกัน

4.3.3. ผลการทดสอบด้วยค้อนกระแทก

ภายหลังจากทำการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแล้ว จึงทำการทดสอบด้วยค้อนกระแทก โดยผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 35-38

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240ksc ชั้นล่าง

ค่าเฉลี่ยจากชิ้นตัวอย่าง 240 ksc ชั้นล่าง ระยะหุ้ม 2 cm.				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิในเตา	Q	Q(%)
0	0.00	0.0	0.0	100.0
0	25.00	37.2	35.9	100.0
30	846.80	802.5	34.5	96.1
60	950.34	799.1	33.9	94.4
90	1010.99	838.6	32.3	89.9
120	1054.04	874.0	31.0	86.4

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240ksc ชั้นบน

ค่าเฉลี่ยจากชิ้นตัวอย่าง 240 ksc ชั้นบน ระยะหุ้ม 2 cm.				
เวลา	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิในเตา	Q	Q(%)
0	0.00	0.0	0.0	100.0
0	25.00	37.2	35.9	100.0
30	846.80	802.5	36.2	100.8
60	950.34	799.1	33.1	92.2
90	1010.99	937.3	30.4	84.7
120	1054.04	1007.9	28.6	79.7

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350ksc ชั้นล่าง

ค่าเฉลี่ยจากชิ้นตัวอย่าง 350 ksc ชั้นล่าง ระยะหุ้ม 2 cm.				
เวลา	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิในเตา	Q	Q(%)
0	0.00	0.00	0.0	100.0
0	25.00	37.20	39.3	100.0
30	846.80	878.50	37.4	95.2
60	950.34	868.10	36.1	91.9
90	1010.99	861.50	35.4	90.1
120	1054.04	987.20	31.2	79.4

ตารางที่ 38 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350ksc ชั้นบน

ค่าเฉลี่ยจากชิ้นตัวอย่าง 350 ksc ชั้นที่2 ระยะหุ้ม 2 cm.				
เวลา	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิในเตา	Q	Q(%)
0	0.00	0.00	0.0	100.0
0	25.00	37.20	40.1	100.0
30	846.80	878.50	37.4	93.3
60	950.34	868.10	34.0	84.8
90	1010.99	952.60	30.9	77.1
120	1054.04	1010.30	29.7	74.1

โดยที่ Q คือค่าการสะท้อน

สำหรับผลการทดสอบของระยะหุ้ม 1ซม. และ 3ซม. ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 39 และ 40

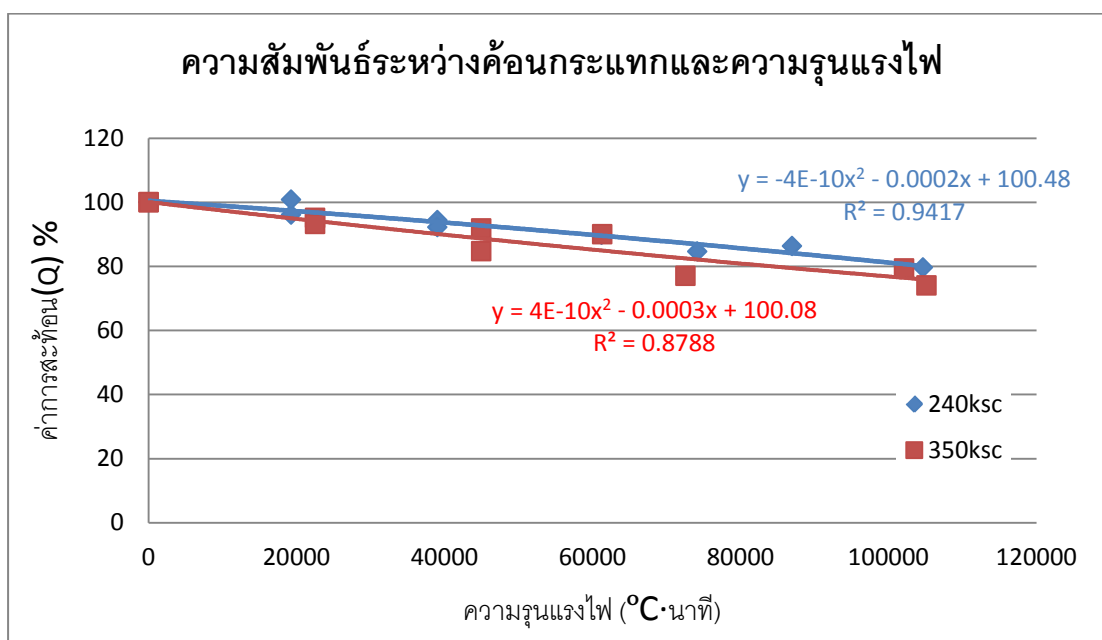
ตารางที่ 39 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 240ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. และ 3 ซม.

ชิ้นตัวอย่าง 240ksc เผา 120 นาที			
ระยะหุ้มและตำแหน่ง	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิไนเตา	Q
ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง	1054.04	906.50	29.2
ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน	1054.04	1014.70	23.8
ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง	1054.04	878.50	28.6
ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน	1054.04	868.10	23.8

ตารางที่ 40 ผลการทดสอบค้อนกระแทก สำหรับกำลังอัด 350ksc ระยะหุ้ม 1 ซม. และ 3 ซม.

ชิ้นตัวอย่าง 350ksc เผา 120 นาที			
ระยะหุ้มและตำแหน่ง	อุณหภูมิ(ASTM E119)	อุณหภูมิไนเตา	Q
ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง	1054.04	967.50	31.2
ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน	1054.04	1034.80	25.3
ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง	1054.04	878.50	29.9
ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน	1054.04	868.10	26.3

เมื่อนำอุณหภูมิที่วัดได้จากการเผาไฟและเวลาที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM E119 มาหาความรุนแรงไฟ (Fire Severity) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ลดลงของค่าการสะท้อนกับความรุนแรงไฟ พบว่าชิ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc จะมีเปอร์เซ็นต์ของค่าการสะท้อนลดลงมากกว่า 240ksc ประมาณ 14% และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นตามความรุนแรงไฟที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดจากการหดตัวของซีเมนต์เพลสและการขยายตัวของมวลรวม แต่ที่ความรุนแรงไฟที่เหมาะสมในระดับหนึ่งจะทำให้ค่าจากค้อนกระแทกสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟ ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นดังภาพที่ 96



ภาพที่ 96 ความสัมพันธ์ที่ลดลงระหว่างค่า Rebound Number และความรุนแรงไฟ

ทั้งนี้สมการสำหรับทำนายค่าการสะท้อนสำหรับชิ้นตัวอย่าง 240ksc เป็นไปดังสมการ 8 และชิ้นตัวอย่าง 350ksc เป็นไปดังสมการ 9

$$Q = 0.4F - 0.0002F + 100.48 \quad (8)$$

$$Q = -0.4F^2 - 0.0003F + 100.08 \quad (9)$$

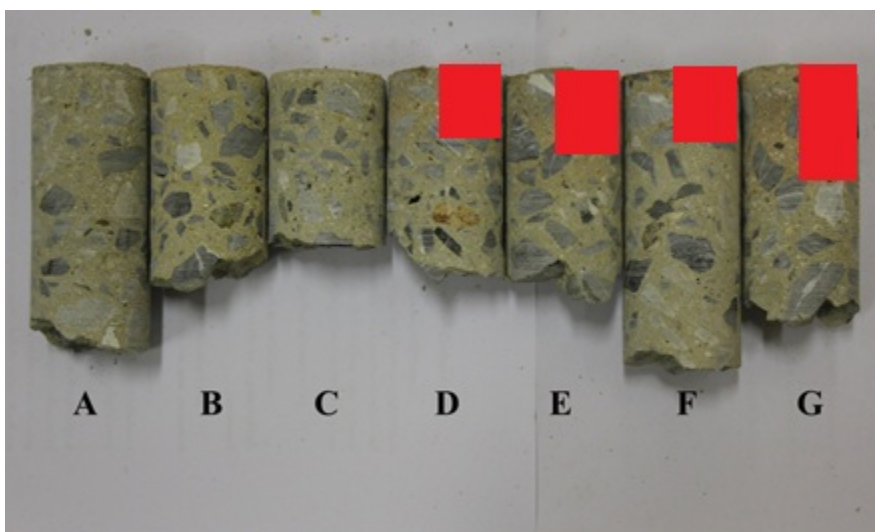
โดยที่

Q = ค่าการสะท้อน

F = ความรุนแรงไฟ (°C นาที)

4.3.4. ผลการเจาะทดสอบ

ทำการเจาะทดสอบชิ้นตัวอย่างเพื่อตรวจวัดระดับความเสียหายโดยตรง โดยระหว่างทดสอบมีบางชิ้นตัวอย่างที่ลูกค้อนแตกหักระหว่างเจาะเนื่องจากผลของไฟ จึงทำให้ไม่สามารถนำไปทดสอบได้ ผลการเจาะทดสอบได้แสดงไว้ดังภาพที่ 97 และ 98 สำหรับกำลังอัด 240ksc และ ภาพที่ 99 และ 100 สำหรับ กำลังอัด 350ksc จากนั้นจึงทำการวัดระยะความเสียหายซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 41 และ 42 สำหรับกำลังอัด 240ksc และ ตารางที่ 43 และ 44 สำหรับกำลังอัด 350ksc



ภาพที่ 97 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 240 ksc ชุดที่ 1

ตารางที่ 41 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 240 ksc ชุดที่ 1

		ความลึกของความเสียหายที่สังเกตได้ (ซม.)					
ชื่อ	A	B	C	D	E	F	G
ครั้งที่วัด	0 นาที	30 นาที		60 นาที		90 นาที	
		ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
1	0.00	0.00	0.00	2.48	3.41	2.29	4.36
2	0.00	0.00	0.00	2.58	3.59	2.36	4.37
3	0.00	0.00	0.00	2.59	3.61	2.45	4.68
4	0.00	0.00	0.00	2.71	3.73	2.62	4.77
เฉลี่ย	0.00	0.00	0.00	2.59	3.58	2.43	4.54



ภาพที่ 98 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 240 ksc ชุดที่ 2

ตารางที่ 42 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 240 ksc ชุดที่ 2

		ความลึกของความเสียหายที่สังเกตได้ (ซม.)					
ชื่อ	A	H	I	J	K	L	M
ครั้งที่วัด	0 นาที	120 นาที					
		ระยะหุ้ม 1 ซม.		ระยะหุ้ม 2 ซม.		ระยะหุ้ม 3 ซม.	
		ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
1	0.00	5.69	15.00	4.93	15.00	5.18	15.00
2	0.00	5.73	15.00	5.04	15.00	5.20	15.00
3	0.00	5.78	15.00	5.07	15.00	5.37	15.00
4	0.00	5.82	15.00	4.79	15.00	5.38	15.00
เฉลี่ย	0.00	5.75	15.00	4.96	15.00	5.28	15.00



ภาพที่ 99 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 350 ksc ชุดที่ 1

ตารางที่ 43 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 350 ksc ชุดที่ 1

ชื่อ	ความลึกของความเสียหายที่สังเกตได้ (ซม.)						
	N	O	P	Q	R	S	T
ครั้งที่วัด	0 นาที	30 นาที		60 นาที		90 นาที	
		ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
1	0.00	0.00	0.00	2.42	2.34	4.02	4.15
2	0.00	0.00	0.00	2.46	2.86	4.09	4.20
3	0.00	0.00	0.00	2.65	2.86	4.24	4.21
4	0.00	0.00	0.00	2.94	3.70	4.28	4.32
เฉลี่ย	0.00	0.00	0.00	2.62	2.94	4.16	4.22

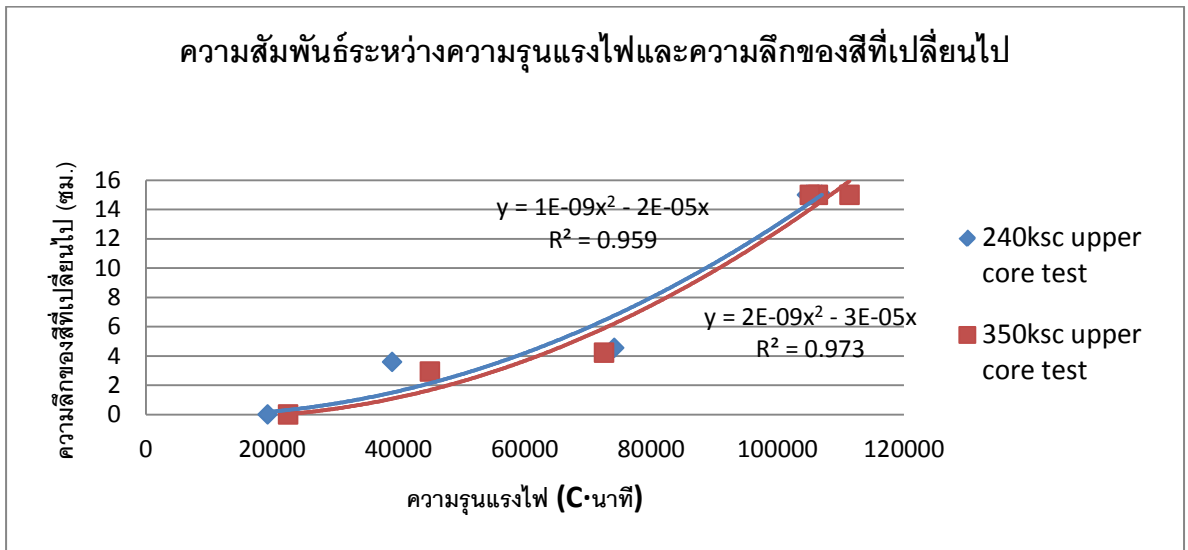


ภาพที่ 100 ผลการเจาะทดสอบสำหรับกำลังอัด 350 ksc ชุดที่ 2

ตารางที่ 44 ผลการวัดความเสียหายสำหรับกำลังอัด 350 ksc ชุดที่ 2

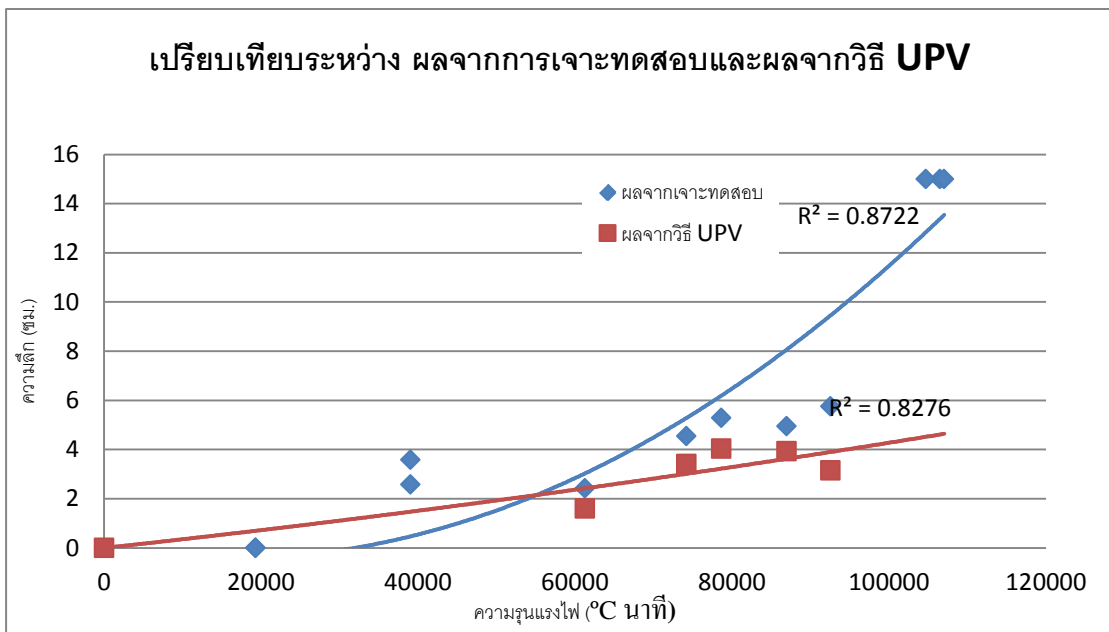
ชื่อ	ความลึกของความเสียหายที่สังเกตได้ (ซม.)						
	N	U	V	W	X	Y	Z
	ครั้งที่วัด	120 นาที					
0 นาที		ระยะหุ้ม 1 ซม.		ระยะหุ้ม 2 ซม.		ระยะหุ้ม 3 ซม.	
		ล่าง	บน	ล่าง	บน	ล่าง	บน
1	0.00	3.52	15.00	6.10	15.00	5.22	15.00
2	0.00	3.10	15.00	6.27	15.00	5.25	15.00
3	0.00	3.65	15.00	6.04	15.00	5.32	15.00
4	0.00	3.59	15.00	6.17	15.00	5.38	15.00
เฉลี่ย	0.00	3.46	15.00	6.14	15.00	5.29	15.00

เมื่อทำการเจาะทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์และระดับความเสียหายของชิ้นตัวอย่าง พบว่า ที่เวลาเผา 30 นาทีไม่พบระดับการเปลี่ยนสีของชิ้นตัวอย่าง ที่เวลาเผา 60 นาทีพบการเปลี่ยนสีของชิ้นตัวอย่างมีความลึกประมาณ 2.5-3.5 ซม. ที่เวลาเผา 90 นาทีพบการเปลี่ยนสีของชิ้นตัวอย่างมีความลึกประมาณ 2.4-4.5 ซม. และที่เวลา 120 นาทีชิ้นตัวอย่างชั้นบนพบการเปลี่ยนสีตลอดความหนาของชิ้นตัวอย่าง และที่ชั้นล่างพบการเปลี่ยนสีมีความลึกประมาณ 3.5-6 ซม. จากผิว ซึ่งแสดงดังภาพที่ 101 เมื่อเทียบกับความรุนแรงไฟ

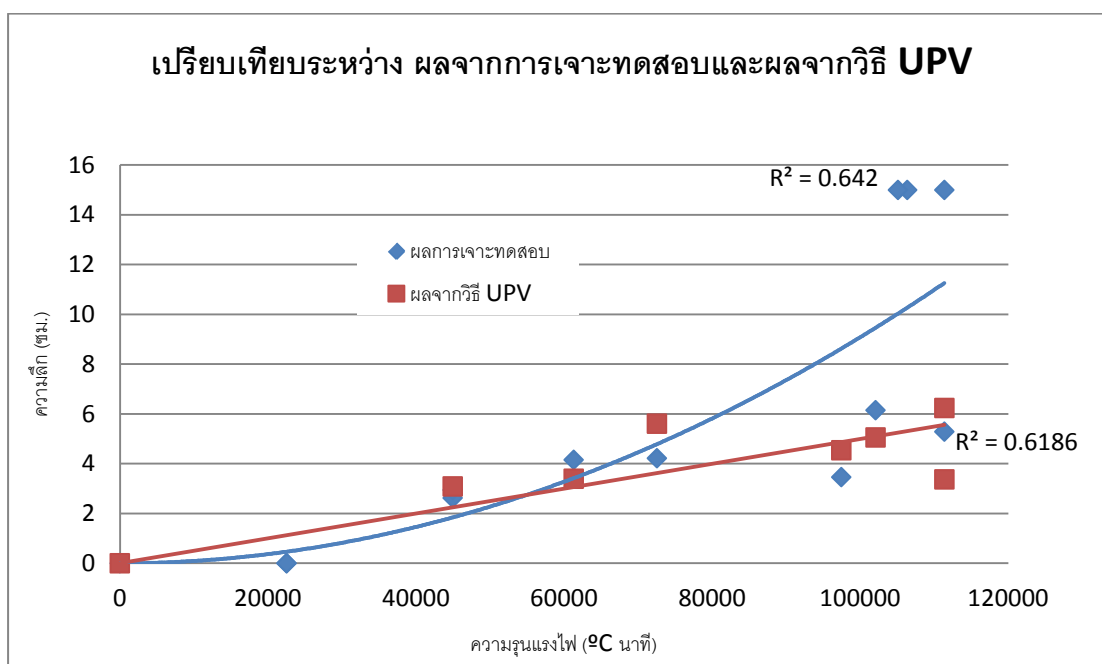


ภาพที่ 101 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความรุนแรงไฟและความลึกของสีที่เปลี่ยนไป

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากการเจาะทดสอบเพื่อสำรวจสีที่เปลี่ยนไปและค่าที่คำนวณได้จากวิธีทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก พบว่าด้วยวิธีการเจาะทดสอบขึ้นตัวอย่างทั้ง 2 กำลัง ค่าความลึกของสีที่เปลี่ยนไปสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 102 สำหรับขึ้นตัวอย่างกำลัง 240ksc และภาพที่ 103 สำหรับขึ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc



ภาพที่ 102 เปรียบเทียบความลึกระหว่างการเจาะทดสอบและทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก สำหรับขึ้นตัวอย่าง 240ksc



ภาพที่ 103 เปรียบเทียบความลึกระหว่างการเจาะทดสอบและทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิค สำหรับชิ้นตัวอย่าง 350ksc

4.3.5. ผลการดึงทดสอบ (Pull off test)

หลังการเจาะทดสอบแล้วจึงทดสอบตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตเดิมด้วยวิธีดึงทดสอบที่ระดับความลึกความลึกต่างๆคือ 0 ซม., 1 ซม., 2 ซม. และ 3 ซม. ซึ่งสกัดโดยสว่านกระแทกและเครื่องเจียร ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 45-70 และภาพที่ 104-127

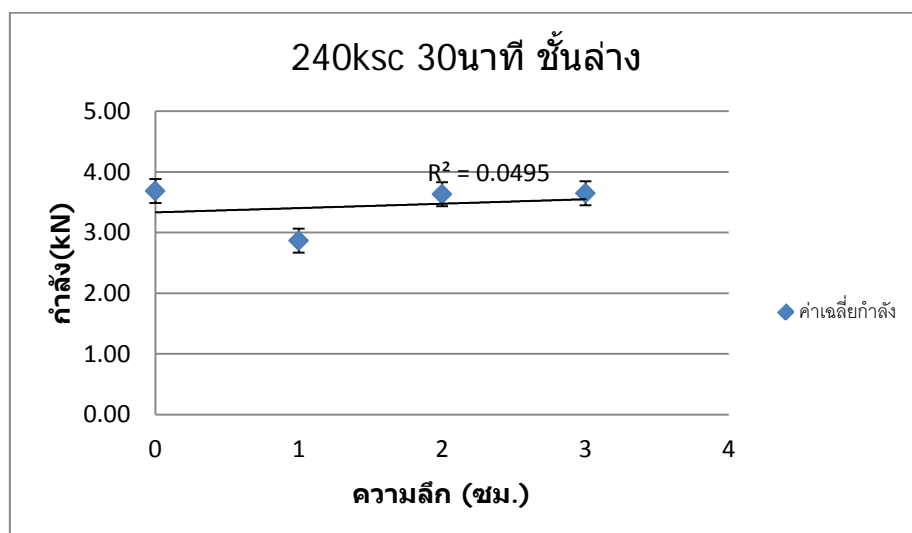
ทั้งนี้ตามมาตรฐานของมยผ. กำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับงานซ่อม(ผิวแกร่ง) คือ 1.4Mpa แต่ตามคู่มือ fib กำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับงานซ่อมของคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้คือ 1.5 Mpa ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในงานวิจัยฉบับนี้จึงยึดถือว่า กำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับงานซ่อม(ผิวแกร่ง)คือ 1.5MPa หรือมีค่าเท่ากับ 3kN เมื่อทดสอบด้วยลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.

ตารางที่ 45 ผลการดิ่งทดสอบ 240ksc ไม่เผาไฟ

240ksc ไม่เผาไฟ	
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)
1	4.35
2	4.90
3	5.80
เฉลี่ย (kN)	5.02
เฉลี่ย (MPa)	2.55

ตารางที่ 46 ผลการดิ่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 30นาที ชั้นล่าง

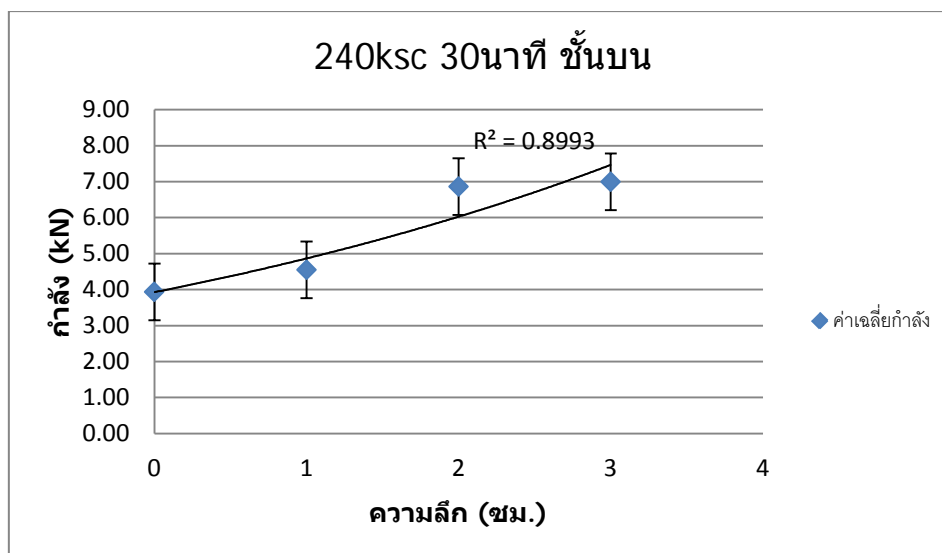
240ksc 30นาที ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	3.30	4.20	3.50	3.15
2	3.35	1.00	3.60	3.70
3	4.40	3.40	3.80	4.10
เฉลี่ย (kN)	3.68	2.87	3.63	3.65
เฉลี่ย (MPa)	1.88	1.46	1.85	1.86



ภาพที่ 104 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 30นาที ชั้นล่าง

ตารางที่ 47 ผลการดั่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 30นาที่ ชั้นบน

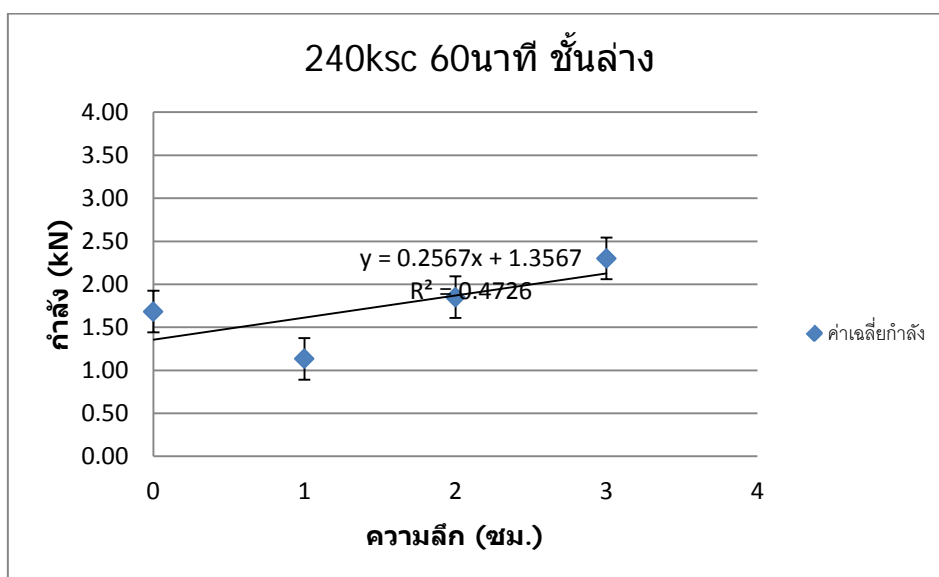
240ksc 30นาที่ ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	3.20	3.25	6.20	7.05
2	4.20	4.00	7.70	6.55
3	4.40	6.40	6.70	7.40
เฉลี่ย (kN)	3.93	4.55	6.87	7.00
เฉลี่ย (MPa)	2.00	2.32	3.50	3.57



ภาพที่ 105 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 30นาที่ ชั้นบน

ตารางที่ 48 ผลการดั่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 60นาที่ ชั้นล่าง

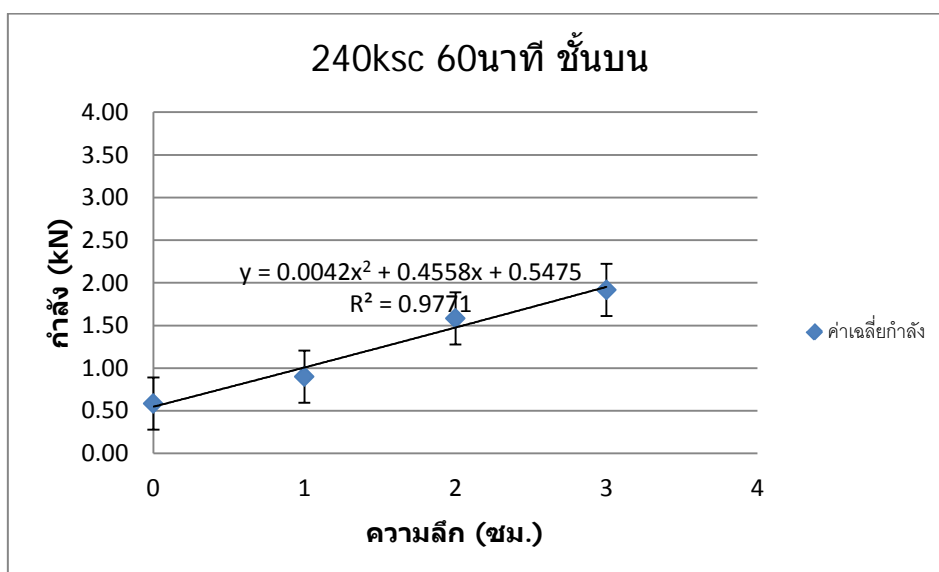
240ksc 60นาที่ ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	1.50	1.85	2.10	2.30
2	1.35	1.10	1.75	2.10
3	2.20	0.45	1.70	2.50
เฉลี่ย (kN)	1.68	1.13	1.85	2.30
เฉลี่ย (MPa)	0.86	0.58	0.94	1.17



ภาพที่ 106 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 60นาที ชั้นล่าง

ตารางที่ 49 ผลการดึงทดสอบ 240ksc เผาไฟ 60นาที ชั้นบน

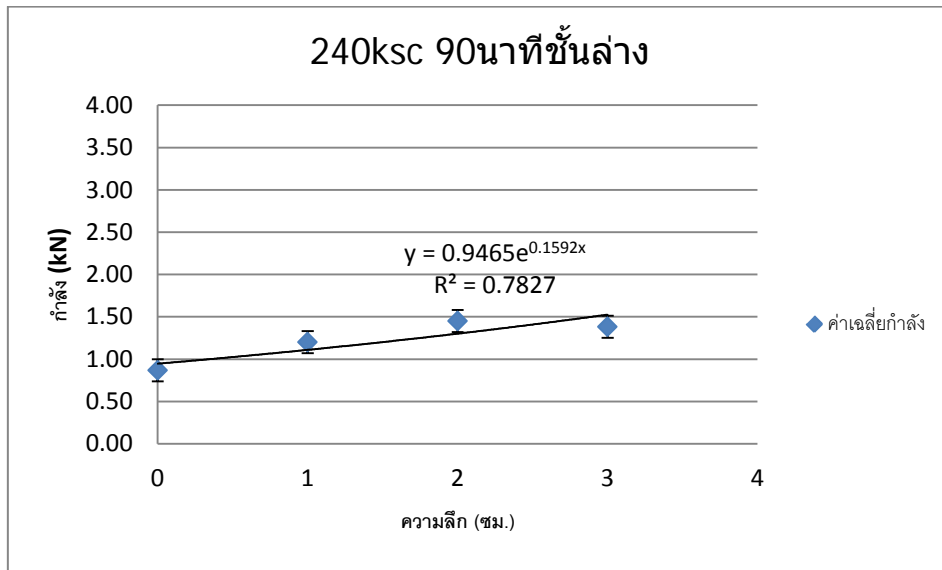
240ksc 60นาที ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.60	1.15	1.40	1.65
2	0.45	0.60	1.65	2.40
3	0.70	0.95	1.70	1.70
เฉลี่ย (kN)	0.58	0.90	1.58	1.92
เฉลี่ย (MPa)	0.30	0.46	0.81	0.98



ภาพที่ 107 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 60นาที ชั้นบน

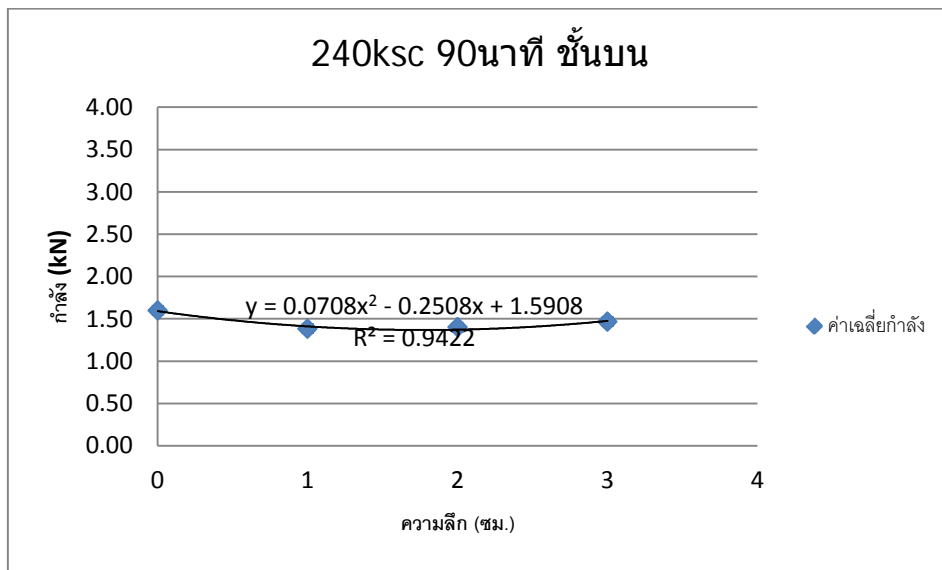
ตารางที่ 50 ผลการดิ่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 90นาที ชั้นล่าง

240ksc 90นาที ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.70	1.15	1.70	1.30
2	0.75	1.25	1.25	1.30
3	1.15	1.20	1.40	1.55
เฉลี่ย (kN)	0.87	1.20	1.45	1.38
เฉลี่ย (MPa)	0.44	0.61	0.74	0.70



ตารางที่ 51 ผลการดั่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 90นาที ชั้นบน

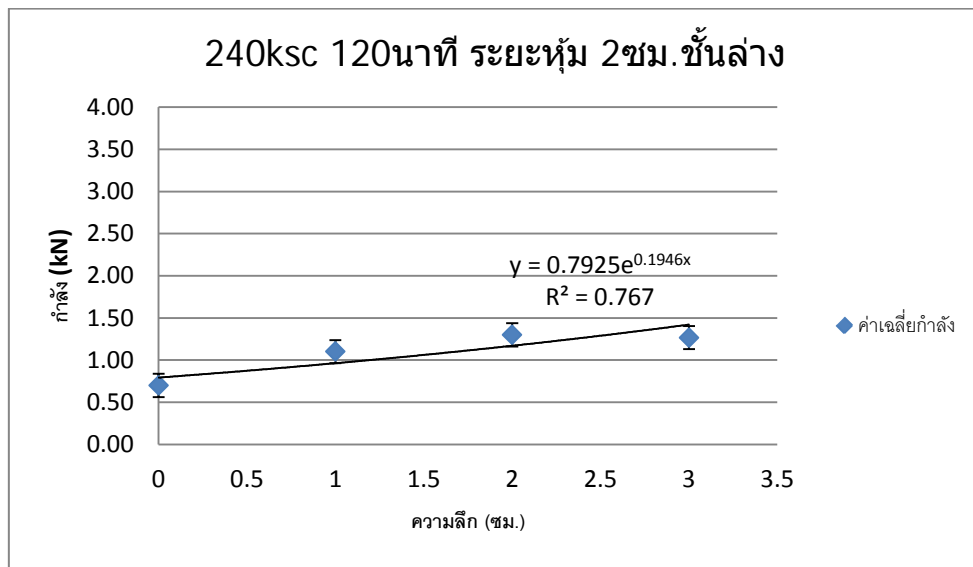
240ksc 90นาที ชั้นบน				
คร้งที่	คววมล็ดก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	1.60	1.50	1.35	1.40
2	1.30	1.15	1.60	1.10
3	1.90	1.50	1.25	1.90
เฉลี่ย (kN)	1.60	1.38	1.40	1.47
เฉลี่ย (MPa)	0.81	0.70	0.71	0.75



ภาพที่ 109 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 90 นาที ชั้นบน

ตารางที่ 52 ผลการดึงทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง

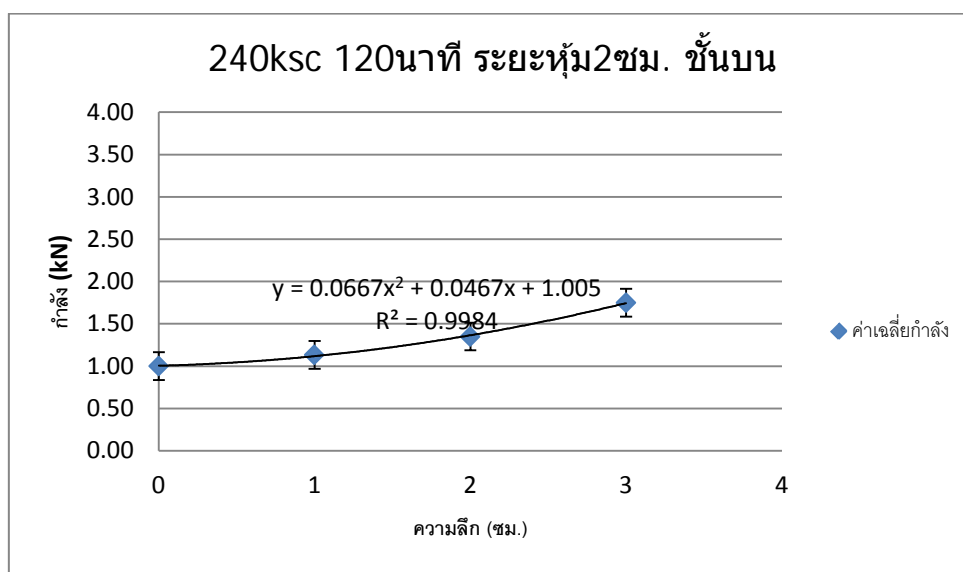
240ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.60	0.90	0.80	1.70
2	0.90	1.10	1.60	0.90
3	0.60	1.30	1.50	1.20
เฉลี่ย (kN)	0.70	1.10	1.30	1.27
เฉลี่ย (MPa)	0.36	0.56	0.66	0.65



ภาพที่ 110 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 2ซม ชั้นล่าง

ตารางที่ 53 ผลการดึงทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นบน

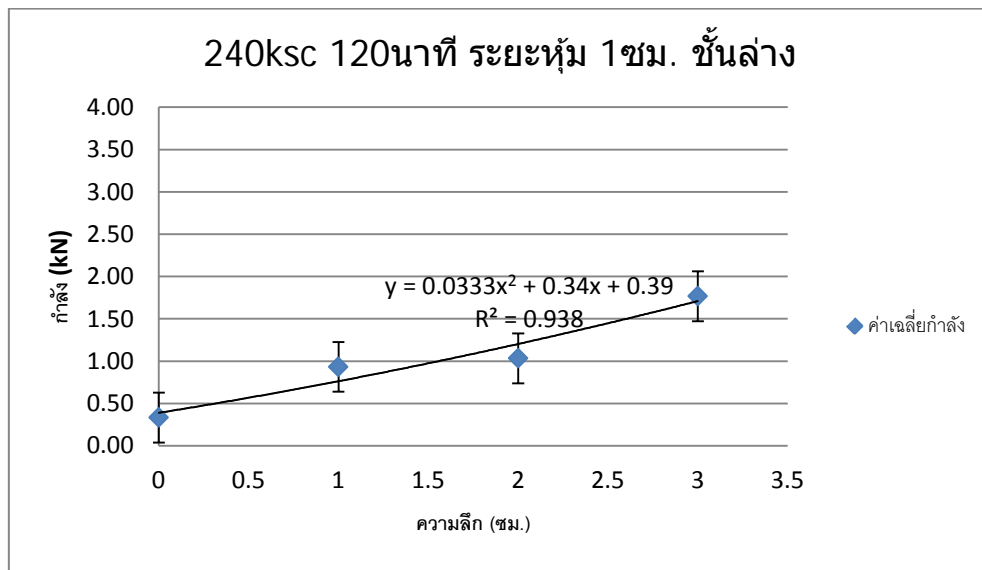
240ksc 120นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	1.10	1.05	1.30	1.60
2	0.90	1.20	1.20	1.90
3	1.00	1.15	1.55	1.75
เฉลี่ย (kN)	1.00	1.13	1.35	1.75
เฉลี่ย (MPa)	0.51	0.58	0.69	0.89



ภาพที่ 111 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 2ชม ชั้นบน

ตารางที่ 54 ผลการดึงทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 1ชม. ชั้นล่าง

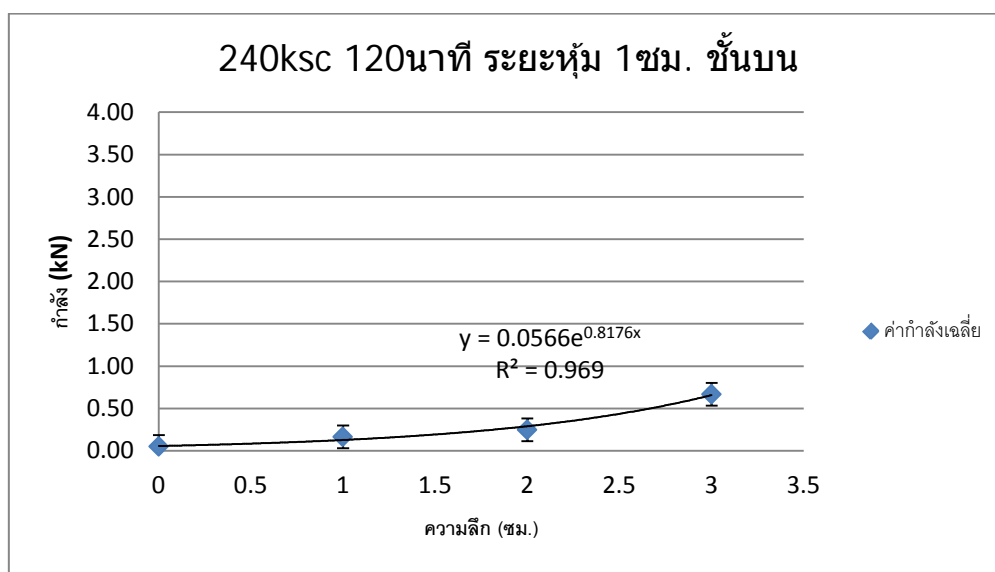
240ksc 120นาที ระยะหุ้ม 1 ชม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ชม.)			
	0	1	2	3
1	0.60	1.10	1.80	1.20
2	0.00	0.50	0.80	1.80
3	0.40	1.20	0.50	2.30
เฉลี่ย (kN)	0.33	0.93	1.03	1.77
เฉลี่ย (MPa)	0.17	0.48	0.53	0.90



ภาพที่ 112 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง

ตารางที่ 55 ผลการดั่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน

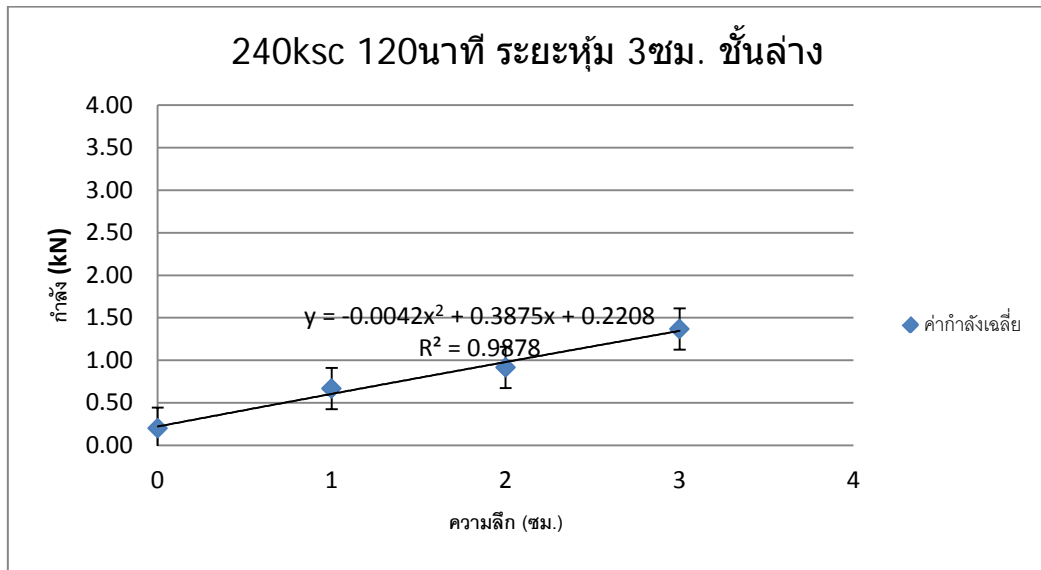
240ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน				
ครั่งที่	คววมล็ด(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.00	0.20	0.40	0.70
2	0.15	0.30	0.10	0.65
3	0.00	0.00	0.25	0.65
เฉลี่ย (kN)	0.05	0.17	0.25	0.67
เฉลี่ย (MPa)	0.03	0.08	0.13	0.34



ภาพที่ 113 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน

ตารางที่ 56 ผลการดื่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง

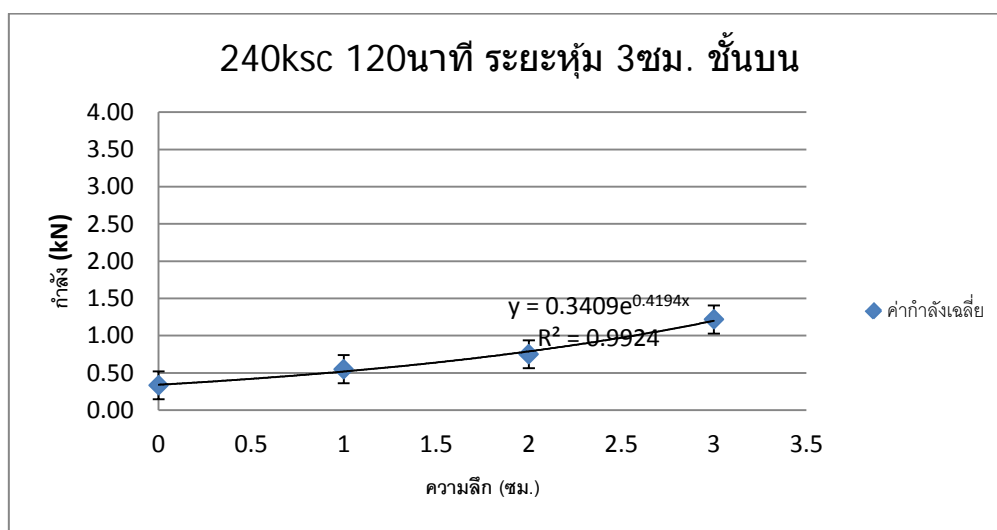
240ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	คววมลึ้ก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.60	0.50	0.80	1.40
2	0.00	0.70	0.95	1.40
3	0.00	0.80	1.00	1.30
เฉลี้ (kN)	0.20	0.67	0.92	1.37
เฉลี้ (MPa)	0.10	0.34	0.47	0.70



ภาพที่ 114 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง

ตารางที่ 57 ผลการดั่งทดสอบ 240ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน

240ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน				
ครั่งที่	คววมล็ดก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.40	0.60	0.80	1.40
2	0.30	0.50	0.70	0.90
3	0.30	0.55	0.75	1.35
เจลลลย (kN)	0.33	0.55	0.75	1.22
เจลลลย (MPa)	0.17	0.28	0.38	0.62



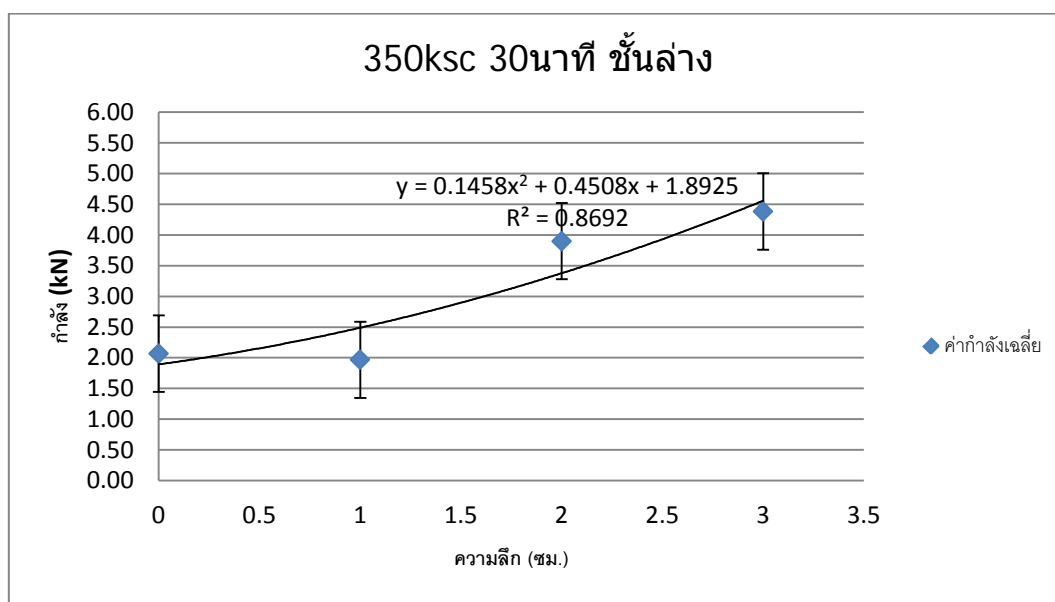
ภาพที่ 115 แนวโน้มของข้อมูล 240ksc เฝ้า 120นาที ระยะหุ้ม 3ซม ชั้นบน

ตารางที่ 58 ผลการดิ่งทดสอบ 240ksc ไม่เผาไฟ

350ksc ไม่เผาไฟ	
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)
1	6.50
2	7.30
3	7.10
เฉลี่ย (kN)	6.97
เฉลี่ย (MPa)	3.55

ตารางที่ 59 ผลการดิ่งทดสอบ 350ksc เฝ้าไฟ 30นาที ชั้นล่าง

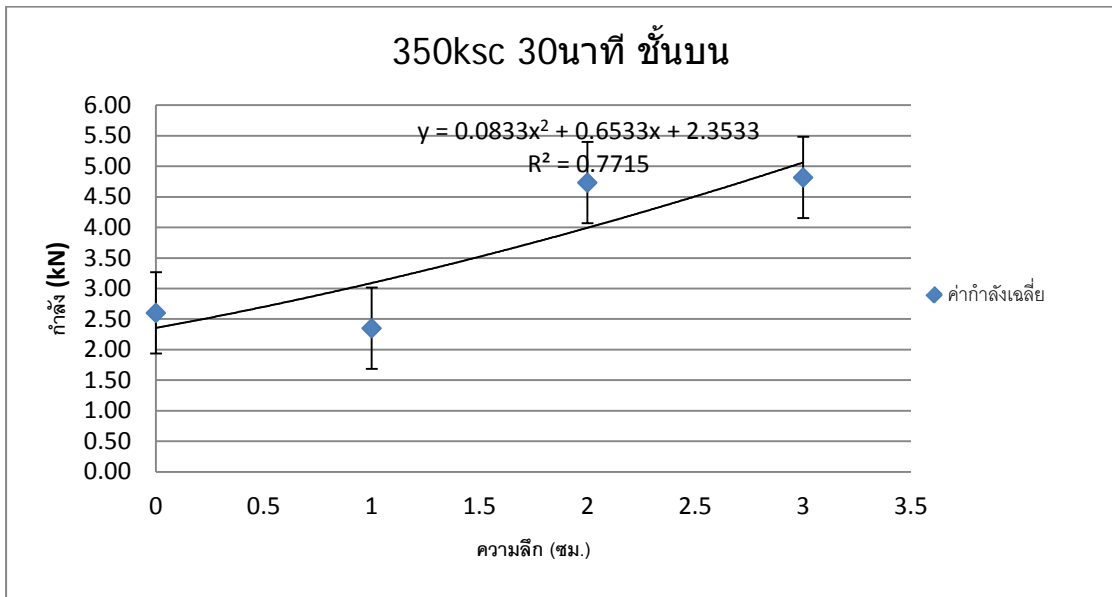
350ksc 30นาที ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	1.40	2.90	4.70	6.15
2	2.40	1.20	4.60	1.40
3	2.40	1.80	2.40	5.60
เฉลี่ย (kN)	2.07	1.97	3.90	4.38
เฉลี่ย (MPa)	1.05	1.00	1.99	2.23



ภาพที่ 116 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 30 นาที ชั้นล่าง

ตารางที่ 60 ผลการดึงทดสอบ 350ksc เผาไฟ 30 นาที ชั้นบน

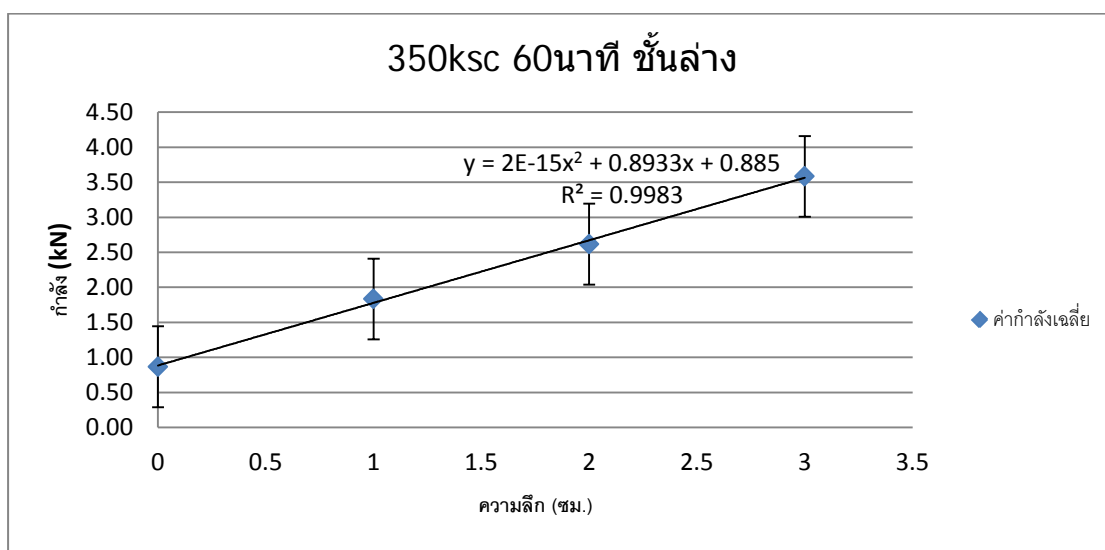
350ksc 30 นาที ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	2.60	2.60	4.85	4.85
2	2.30	2.15	4.35	5.95
3	2.90	2.30	5.00	3.65
เฉลี่ย (kN)	2.60	2.35	4.73	4.82
เฉลี่ย (MPa)	1.32	1.20	2.41	2.45



ภาพที่ 117 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 30นาที ชั้นบน

ตารางที่ 61 ผลการดิ่งทดสอบ 350ksc เผาไฟ 60นาที ชั้นล่าง

350ksc 60นาที ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.90	1.50	2.40	3.25
2	1.00	3.10	2.60	4.10
3	0.70	0.90	2.85	3.40
เฉลี่ย (kN)	0.87	1.83	2.62	3.58
เฉลี่ย (MPa)	0.44	0.93	1.33	1.82

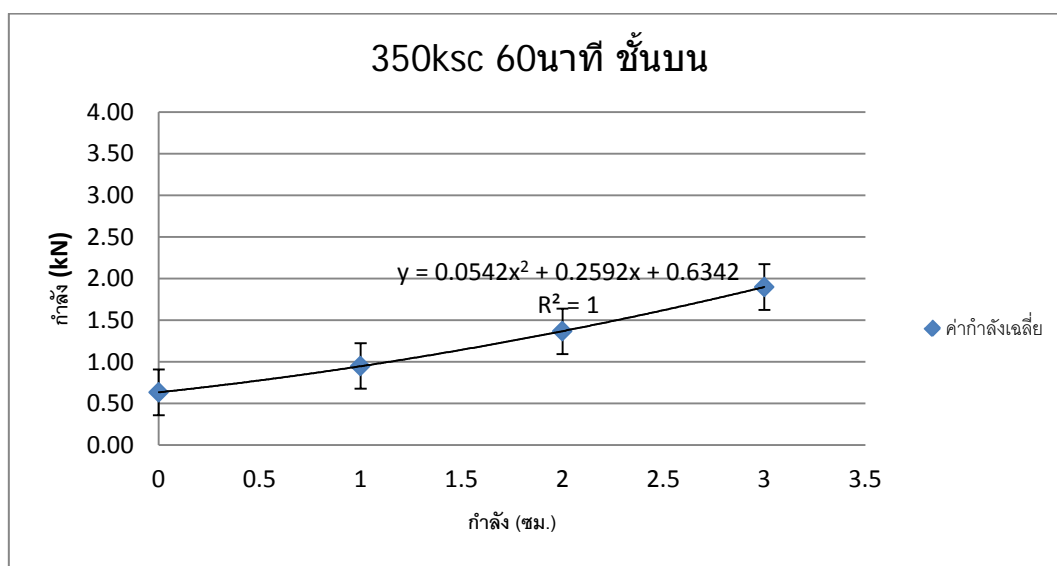


ภาพที่ 118 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 60 นาที ชั้นล่าง

ตารางที่ 62 ผลการดึงทดสอบ 350ksc เผาไฟ 60 นาที ชั้นบน

350ksc 60 นาที ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.20	1.00	1.25	1.70
2	0.60	1.00	1.55	1.90
3	1.10	0.85	1.30	2.10
เฉลี่ย (kN)	0.63	0.95	1.37	1.90
เฉลี่ย (MPa)	0.32	0.48	0.70	0.97

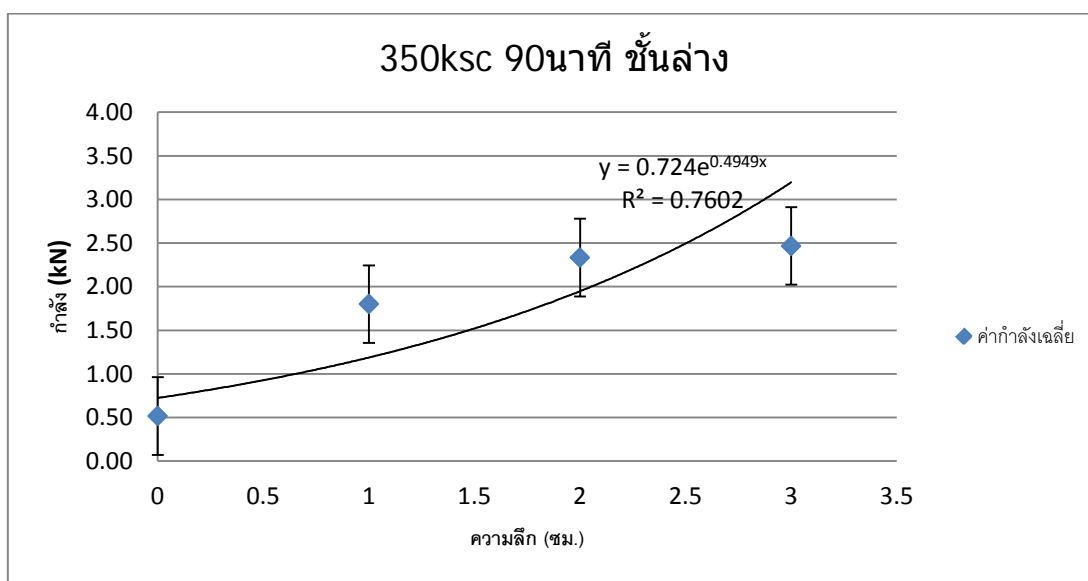
*ที่ชั้นตัวอย่างนี้ได้ทำการทดสอบที่ความลึก 5 ซม ด้วย ซึ่งได้ค่าทดสอบคือ 3.05 kN



ภาพที่ 119 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 60 นาที ชั้นบน

ตารางที่ 63 ผลการดิ่งทดสอบ 350ksc เผาไฟ 90 นาที ชั้นล่าง

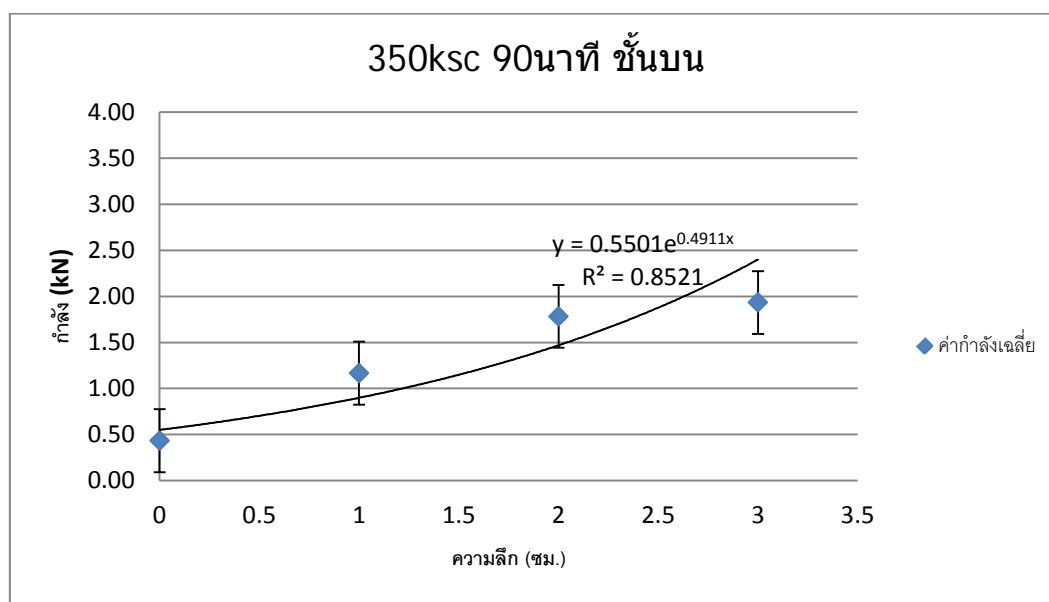
350ksc 90 นาที ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.85	1.70	3.20	1.50
2	0.70	1.80	2.00	3.25
3	0.00	1.90	1.80	2.65
เฉลี่ย (kN)	0.52	1.80	2.33	2.47
เฉลี่ย (MPa)	0.26	0.92	1.19	1.26



ภาพที่ 120 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 90 นาที ชั้นล่าง

ตารางที่ 64 ผลการดึงทดสอบ 350ksc เผาไฟ 90 นาที ชั้นบน

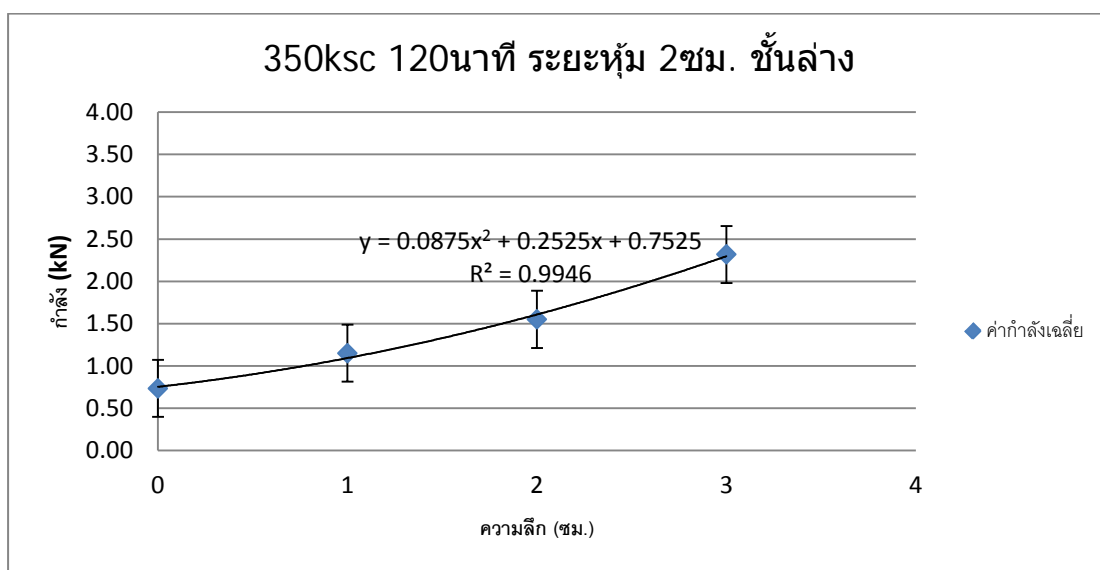
350ksc 90 นาที ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.00	1.10	1.95	2.30
2	0.50	1.30	1.90	2.00
3	0.80	1.10	1.50	1.50
เฉลี่ย (kN)	0.43	1.17	1.78	1.93
เฉลี่ย (MPa)	0.22	0.59	0.91	0.98



ภาพที่ 121 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 90 นาที ชั้นบน

ตารางที่ 65 ผลการดิ่งทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง

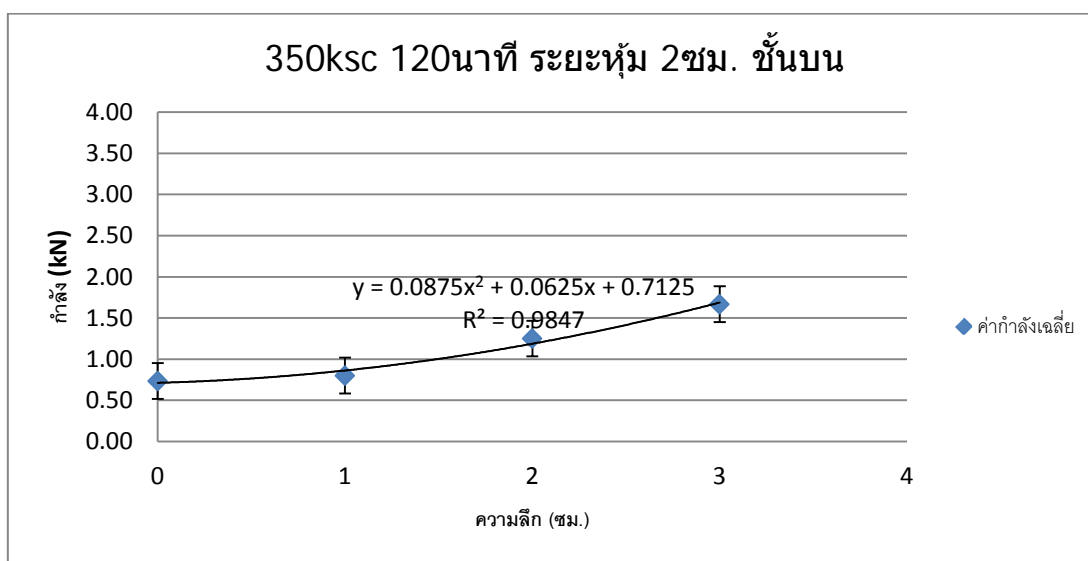
350ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	1.00	1.00	1.20	2.20
2	0.50	1.30	2.20	2.40
3	0.70	1.15	1.25	2.35
เฉลี่ย (kN)	0.73	1.15	1.55	2.32
เฉลี่ย (MPa)	0.37	0.59	0.79	1.18



ภาพที่ 122 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 2ซม ชั้นล่าง

ตารางที่ 66 ผลการดึงทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 2ซม. ชั้นบน

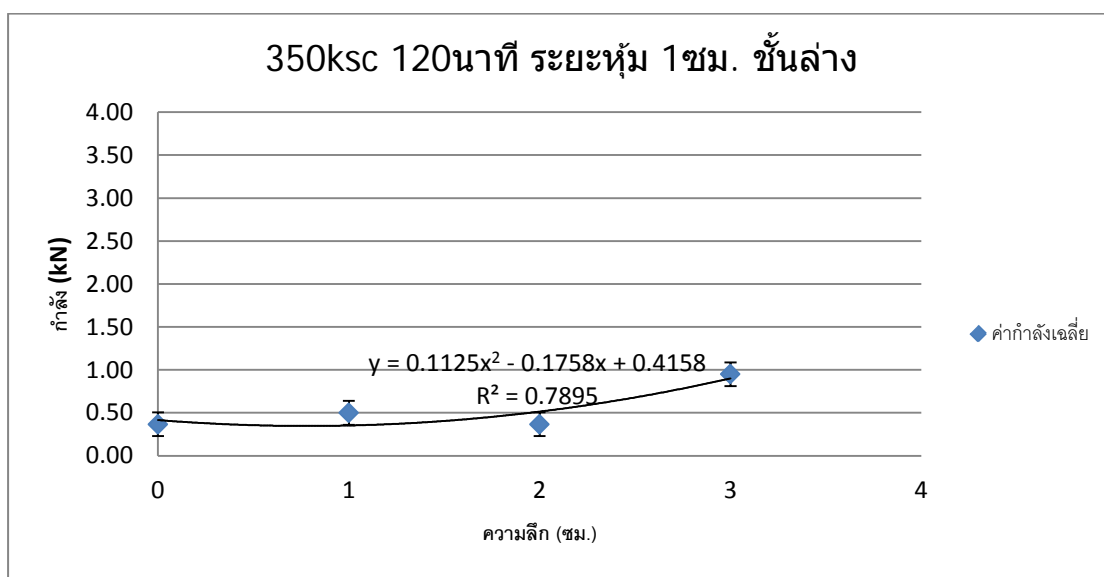
350ksc 120นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.50	0.70	1.20	1.95
2	0.90	0.80	1.20	1.60
3	0.80	0.90	1.35	1.45
เฉลี่ย (kN)	0.73	0.80	1.25	1.67
เฉลี่ย (MPa)	0.37	0.41	0.64	0.85



ภาพที่ 123 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 2 ซม. ชั้นบน

ตารางที่ 67 ผลการดัดทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง

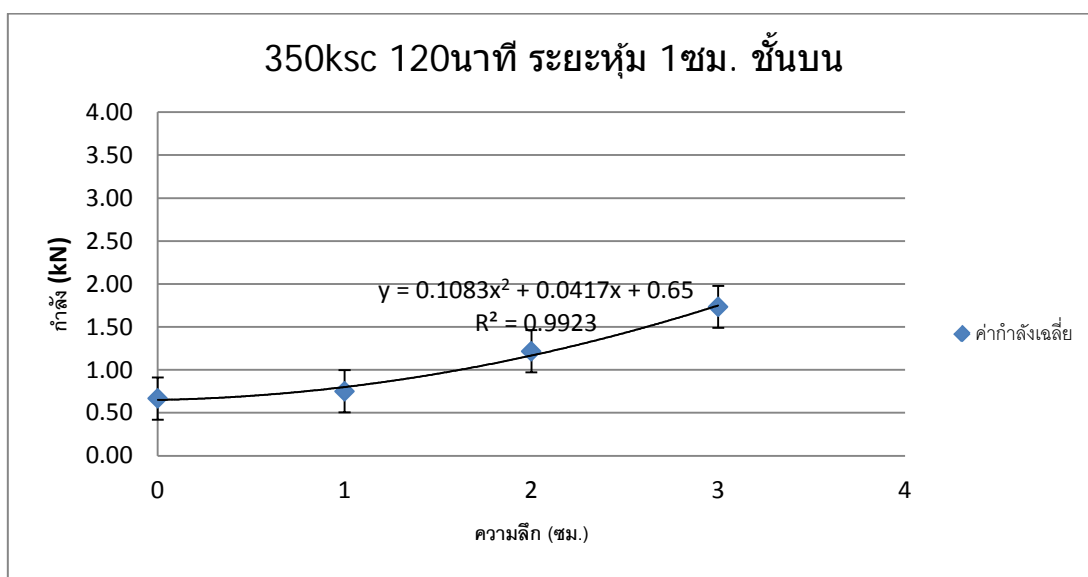
350ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.40	0.75	0.20	1.00
2	0.25	0.30	0.60	0.90
3	0.45	0.45	0.30	0.95
เฉลี่ย (kN)	0.37	0.50	0.37	0.95
เฉลี่ย (MPa)	0.19	0.25	0.19	0.48



ภาพที่ 124 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นล่าง

ตารางที่ 68 ผลการดัดทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน

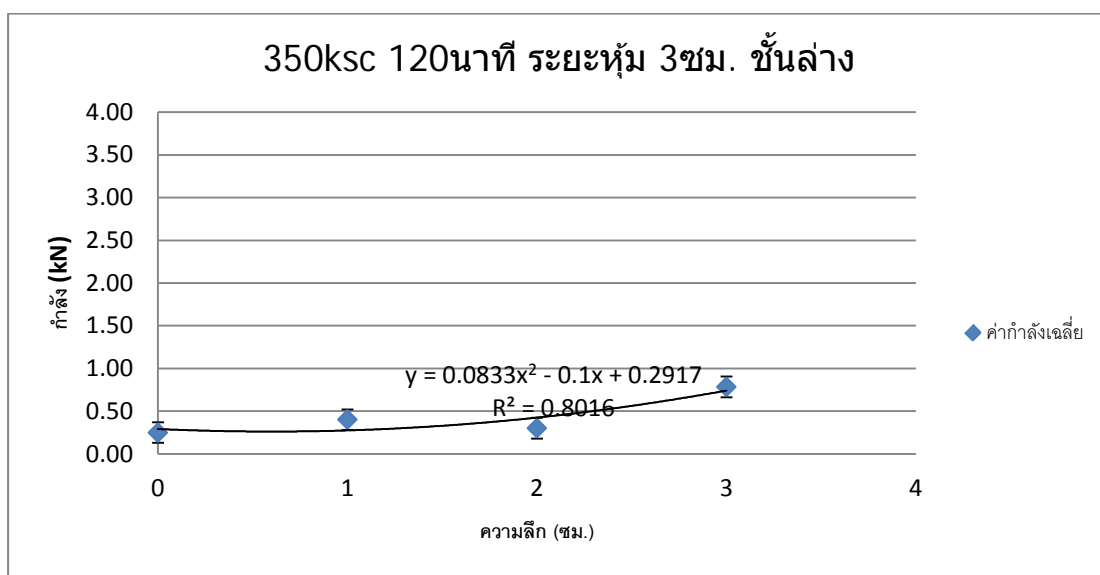
350ksc 120 นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.10	0.00	1.40	1.60
2	1.20	1.25	1.00	1.30
3	0.70	1.00	1.25	2.30
เฉลี่ย (kN)	0.67	0.75	1.22	1.73
เฉลี่ย (MPa)	0.34	0.38	0.62	0.88



ภาพที่ 125 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 1 ซม. ชั้นบน

ตารางที่ 69 ผลการดิ่งทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง

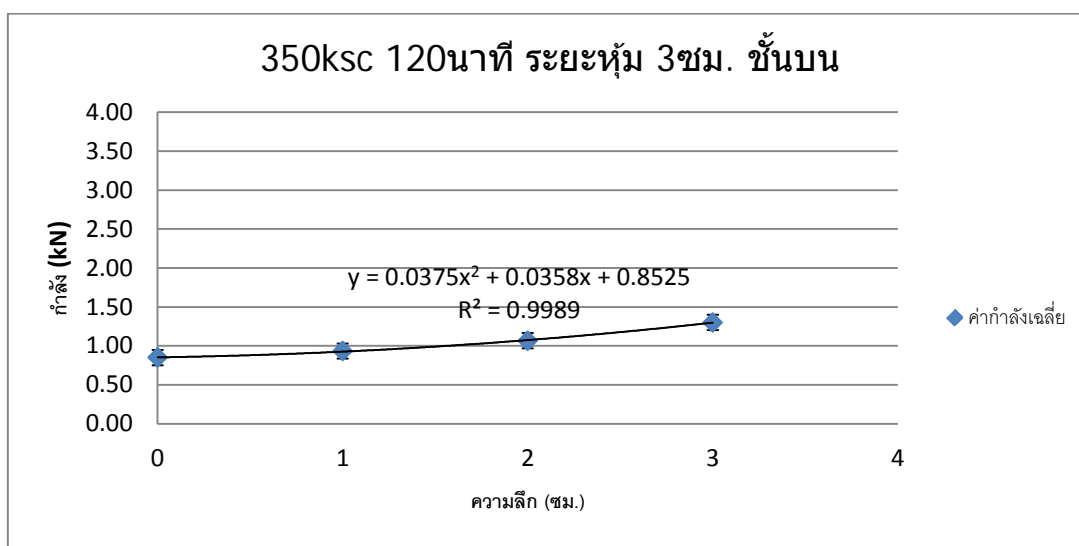
350ksc 120นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นล่าง				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.30	0.80	0.20	0.80
2	0.35	0.00	0.40	0.60
3	0.10	0.40	0.30	0.95
เฉลี่ย (kN)	0.25	0.40	0.30	0.78
เฉลี่ย (MPa)	0.13	0.20	0.15	0.40



ภาพที่ 126 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 3ซม ชั้นล่าง

ตารางที่ 70 ผลการดัดทดสอบ 350ksc เผาไฟ 120นาที ระยะหุ้ม 3ซม. ชั้นบน

350ksc 120นาที ระยะหุ้ม 3 ซม. ชั้นบน				
ครั้งที่	ความลึก(ซม.)			
	0	1	2	3
1	0.45	0.90	0.90	1.35
2	1.40	1.40	1.10	1.25
3	0.70	0.50	1.20	1.32
เฉลี่ย (kN)	0.85	0.93	1.07	1.30
เฉลี่ย (MPa)	0.43	0.48	0.54	0.66



ภาพที่ 127 แนวโน้มของข้อมูล 350ksc เผา 120นาที ระยะหุ้ม 3ซม ชั้นบน

ผลการดิ่งทดสอบสำหรับผิวแกร่งตามมาตรฐาน fib มีค่า 1.5 เมกาปาสคาล (MPa) หรือ 3.0 กิโลนิวตัน (kN) สำหรับพื้นผิวถูกเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ซึ่งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

ที่เวลาเผา 30 นาที

ผลดิ่งทดสอบที่ระยะ 0 ซม จากผิวจะได้ค่าที่ต่ำกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้เผา แต่สำหรับชิ้นตัวอย่าง 240ksc ค่าที่ได้ก็สามารถเรียกได้ว่าเป็นผิวแกร่ง เพราะมีค่าที่มากกว่า 3.0 kN แต่สำหรับชิ้นตัวอย่าง 350ksc ผิวแกร่งดังกล่าวจะอยู่ลึกลงไป 2 ซม จากผิว

ที่เวลาเผา 60 นาที

ที่ทุกๆระยะที่สกัดผิวสำหรับไม่พบค่าทดสอบที่มากกว่า 3.0 kN ยกเว้นแต่ที่ชิ้นตัวอย่าง 350ksc ชั้นล่าง ที่จะพบค่าที่มากกว่าที่ระดับความลึก 3 ซม จากผิว และที่ชิ้นตัวอย่างบนที่ระดับความลึก 5 ซม จากผิว

ที่เวลาเผา 90 และ 120 นาที

ชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นทุกระดับความลึกไม่พบค่าทดสอบที่มากกว่า 3.0 kN แต่สามารถสังเกตได้ว่าค่าทดสอบจะเพิ่มมากขึ้นตามระดับความลึกของผิวที่สกัด และชิ้นตัวอย่าง 350ksc ค่าทดสอบจะมากกว่าชิ้นตัวอย่าง 240ksc เล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ดึงทดสอบและระดับความลึกของสีที่เปลี่ยนไปจากการเจาะทดสอบ พบว่าที่ระดับความลึกของสีที่เปลี่ยนไปนั้นมีค่าที่น้อยกว่าความลึกที่จะพบผิวแกร่ง สาเหตุอาจเป็นเพราะการเปลี่ยนสีเกิดการจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในคอนกรีตซึ่งแน่นอนว่าสีที่เปลี่ยนไปนี้ไม่ใช่ผิวแกร่ง อีกทั้งระดับความลึกที่มากกว่าระดับสีที่เปลี่ยนไปก็อาจมีรอยร้าวขนาดเล็กอยู่ทำให้ค่าดึงทดสอบที่ได้ไม่เพียงพอที่จะเป็นผิวแกร่ง

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกพบว่าความลึกที่ได้น้อยกว่าความลึกของการเปลี่ยนสีที่ได้จากการเจาะทดสอบและยังน้อยกว่าความลึกของผิวแกร่ง ดังนั้นแล้วในหัวข้อวิเคราะห์ผลจะใช้ผลของการดึงทดสอบในการประมาณค่าความลึกของผิวแกร่ง แต่อย่างไรก็ดีการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้นก็ยังคงให้ค่าประมาณสำหรับความลึกที่เสียหายเพื่อเป็นแนวทางสำหรับประเมินความเสียหายได้ในระดับหนึ่ง

4.3.6. ผลการซ่อมแซม

ทำการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม 3 ชนิดบนชิ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc เฝ้าไฟเป็นเวลา 60 นาที ชั้นบน ผลการดึงทดสอบเป็นไปตามตารางที่ และผลการดึงทดสอบเมื่อซ่อมด้วยวัสดุซ่อมค. บนผิวของชิ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc ไม่เฝ้าไฟเป็นไปตามตารางที่ 71 และ 72

ตารางที่ 71 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีดึงทดสอบบนผิวที่ถูกเฝ้าไฟ

วัสดุซ่อม	กำลังดึงทดสอบ (kN)
ก.	1.2
ข.	1.6
ค.	1.8

ตารางที่ 72 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีดึงทดสอบบนผิวที่ไม่ถูกเฝ้าไฟ

วัสดุซ่อม	กำลังดึงทดสอบ (kN)
ค.	> 6

ภายหลังจากซ่อมแซมแล้วทดสอบด้วยวิธีดึงทดสอบ เมื่อนำค่าที่ได้เทียบกับค่าดึงทดสอบที่ผิว 0 ซม. ของชิ้นตัวอย่างก่อนการซ่อม ค่าที่ได้จากภายหลังจากซ่อมมีค่าที่สูงกว่า

ประมาณ 200% โดยการซ่อมด้วยวัสดุอีพ็อกซีโมอร์ตาแบบฉาบซ่อมให้ค่าที่มากที่สุด แต่ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับผิวแกร่ง(1.4Mpa สำหรับมาตรฐาน มยผ. และ 1.5MPa สำหรับมาตรฐาน fib) และสำหรับค่าดึงทดสอบการซ่อมบนผิวที่ไม่เสียหายจากไฟให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าทดสอบที่ผิว 0 ซม.

4.4. การจำแนกระดับความเสียหาย

4.4.1. การพินิจด้วยสายตา

ในการพิจารณาด้วยสายตาเป็นการตรวจสอบที่ง่ายและสะดวกที่สุด ดังนั้นจึงนำการตรวจสอบนี้มาใช้ในการจำแนกระดับความเสียหาย

1. สี

สีผิวของชิ้นตัวอย่าง เป็นสิ่งแรกที่พบเห็นภายหลังจากนำชิ้นตัวอย่างออกจากเตา อีกทั้งยังเป็นการจำแนกลักษณะที่ง่ายและสะดวกที่สุดเพราะไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ใดๆเพิ่ม นอกจากการสังเกตด้วยตาเปล่า

2. การหลุดร่อน

การพิจารณาการหลุดร่อนด้วยตาเปล่าก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ง่ายในการตรวจสอบ ดังนั้นในการจำแนกระดับความเสียหายด้วยการตรวจสอบด้วยสายตานี้จึงใช้ 2 ลักษณะความเสียหายเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา

4.4.2. การทดสอบในที่

ในการตรวจสอบด้วยสายตานั้น แม้จะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และรวดเร็วในการตรวจสอบ แต่บางครั้งหากต้องการตรวจสอบที่ชัดเจนและให้รายละเอียดที่มากขึ้น การทดสอบในที่จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

1. ร้อยละความเสียหาย

วิธีตรวจวัดพื้นที่ความเสียหาย เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถวัดความเสียหายแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงร้อยละของความเสียหายต่อพื้นที่ทั้งหมด โดยสามารถตรวจสอบได้ด้วย 2 วิธี คือวัด แผ่นอะคริลิค และด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งวิธีแรกนั้นให้ค่าที่ดีกว่า แต่ด้วยวิธีโปรแกรมสำเร็จรูปแล้วนั้นจะให้ความสะดวกมากกว่า

2. ร้อยละของค่าการสะท้อน

วิธีนี้จะให้ผลของความแกร่งที่ผิวค้ำของคอนกรีต อีกทั้งยังสามารถแปรไปเป็นค่ากำลังได้หากมีผลการทดสอบกดขึ้นตัวอย่างที่ถูกเพลิงไหม้

3. ความลึกของสีที่เปลี่ยนไป

จากผลการทดสอบระหว่างวิธีคลื่นอัลตราโซนิคกับการเจาะทดสอบนั้น การเจาะทดสอบให้ค่าความลึกของสีที่เปลี่ยนไปชัดเจนมากกว่าถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะไม่ใช้ระดับความเสียหายทั้งหมดเมื่อเทียบกับผลการดึงทดสอบก็ตาม แต่ระดับความลึกของสีที่เปลี่ยนไปนี้ก็เพียงพอสำหรับที่จะประมาณความลึกของความเสียหายได้

เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะพบว่าความเสียหายที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาทีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งสีที่เปลี่ยนไปหรือลักษณะการหลุดร่อน ดังนั้นจึงจำแนกระดับความเสียหายของระยะเวลาในการเผาออกเป็น 2 ระดับด้วยกัน สำหรับความเสียหายที่ระยะเวลา 90 และ 120 นาทีนั้นมีลักษณะของสีที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการหลุดร่อนแล้วพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ระยะเวลา 120 นาทีนั้นเกิดความเสียหายที่รุนแรงตลอดผิวขึ้นตัวอย่าง ดังนั้นจึงจำแนกระดับความเสียหายของระยะเวลาทั้ง 2 ออกเป็น 2 ระดับ

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงสามารถจำแนกระดับความเสียหายออกได้เป็น 5 ระดับ โดยแต่ละระดับจะมีรายละเอียดของการทดสอบในที่ที่แตกต่างกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 73

ตารางที่ 73 การจำแนกระดับความเสียหาย

ระดับ	ตรวจสอบด้วยสายตา		การทดสอบในที่			
	สี	หลุดร่อน	ร้อยละความเสียหาย		ร้อยละของ Rebound Number	ความลึกของสีที่เปลี่ยนไป (ซม)
			วัดด้วยมือ	โปรแกรม		
0	ไม่ถูกไฟเผา					
1	ส้ม/แดง	ไม่มี	<5	วัดไม่ได้	95-100	0
2	ส้ม/แดง,เทาเล็กน้อย	เล็กน้อย	<10	วัดไม่ได้	85-93	<4
3	เทาสว่าง	ปานกลาง	10-45	<60	80-85	4-5
4	เทาอมน้ำตาลแดง	ทั่วทั้งผิว	มากกว่า 50	มากกว่า 50	<80	>15

โดยที่

ระดับที่ 0 หมายถึง ไม่มีความเสียหาย

ระดับที่ 1 หมายถึง เกิดความเสียหายที่น้อยมาก

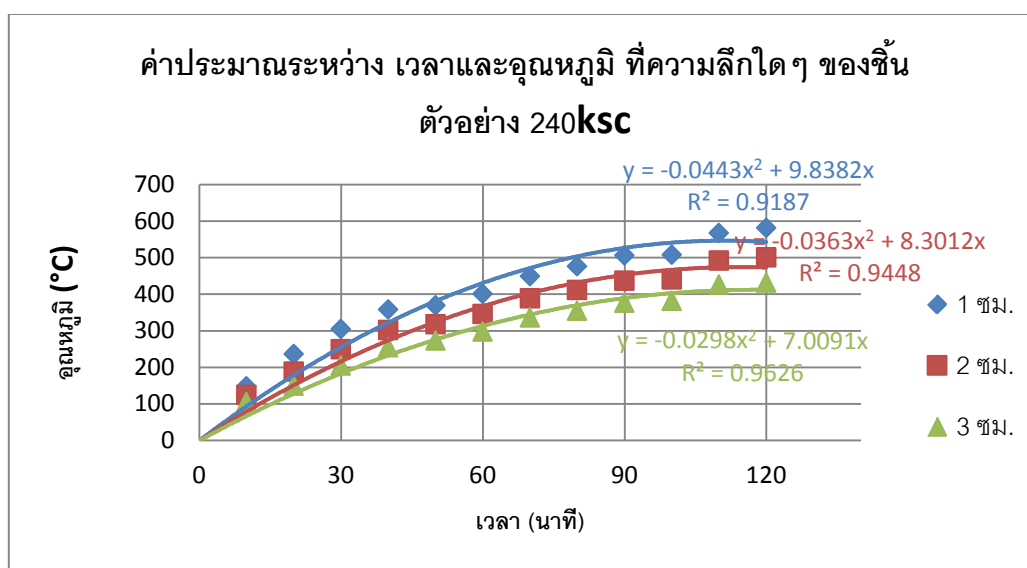
ระดับที่ 2 หมายถึง เกิดความเสียหายเล็กน้อย

ระดับที่ 3 หมายถึง เกิดความเสียหายปานกลาง

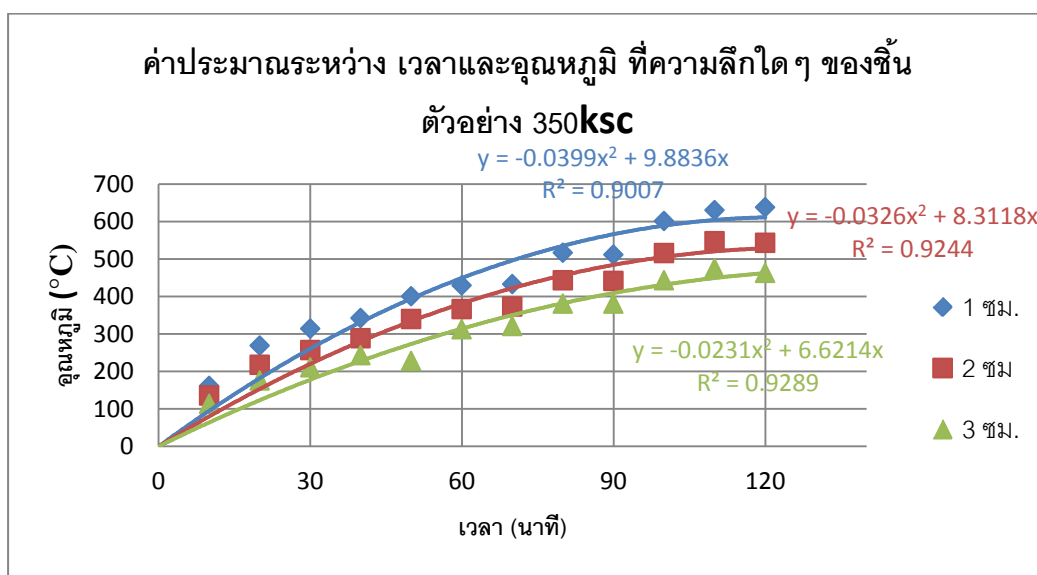
ระดับที่ 4 หมายถึง เกิดความเสียหายรุนแรง

4.5. การประมาณหาความลึกของกำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซม

เมื่อนำผลของอุณหภูมิภายในที่ตรวจวัดได้จากสายวัดอุณหภูมิของที่มีความลึก 1.5, 2.5, 3.5, 7.5 และ 12.5 ของชิ้นตัวอย่างมาหาเส้นแนวโน้มระหว่างอุณหภูมิและความลึก ที่ทุกๆเวลา 10 นาที ตั้งแต่ 0-120 นาที จากนั้นจึงนำเส้นแนวโน้มดังกล่าวมาทำนายอุณหภูมิของความลึกที่ระยะ 1, 2 และ 3 ซม. จากผิว ซึ่งผลดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 128 และ 129

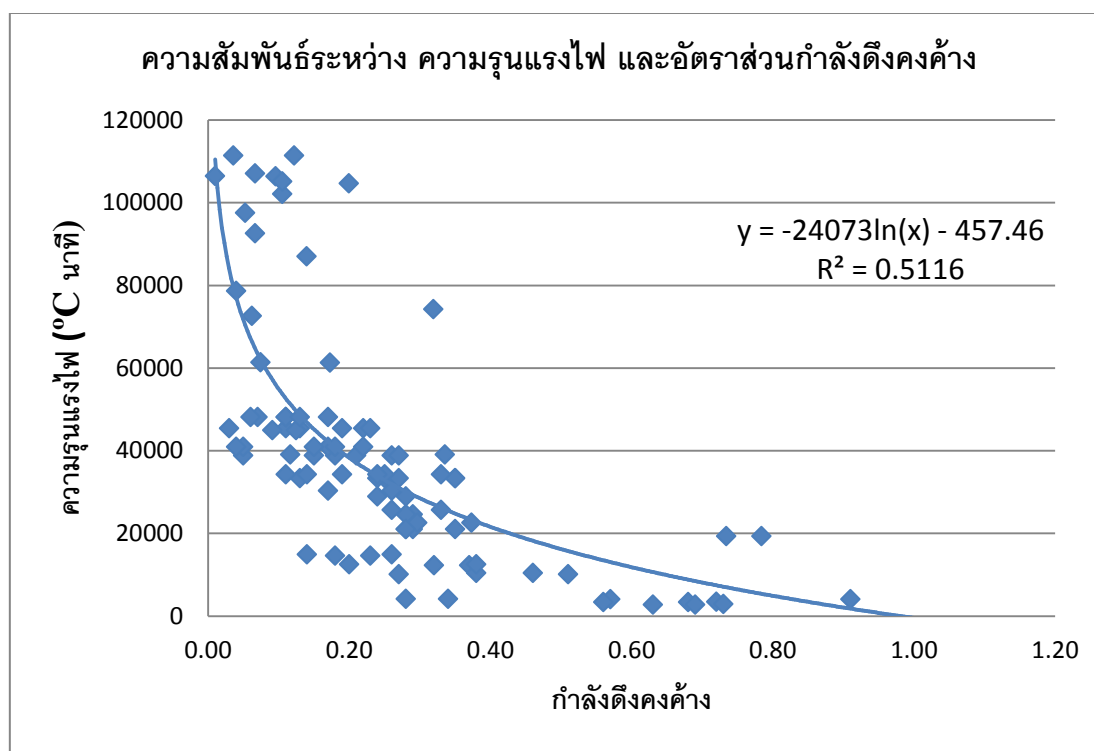


ภาพที่ 128 ค่าประมาณระหว่างเวลาและอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่าง 240ksc ที่ความลึกใดๆ



ภาพที่ 129 ค่าประมาณระหว่างเวลาและอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่าง 350ksc ที่ความลึกใดๆ

จากผลการประมาณดังกล่าวได้นำไปคำนวณหาความรุนแรงไฟที่ระยะเวลาและความลึกต่างๆ จากนั้นจึงนำความรุนแรงของไฟนี้ไปสร้างความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างกำลังติดตั้งแผงไฟและกำลังติดตั้งก่อนแผงไฟ ที่ระดับความลึกที่ติดตั้งทดสอบ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงออกมาได้ดังภาพที่ 130



ภาพที่ 130 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและอัตราส่วนกำลังติดตั้ง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและอัตราส่วนความเค้นนี้สามารถอธิบายได้
ดังสมการ 10

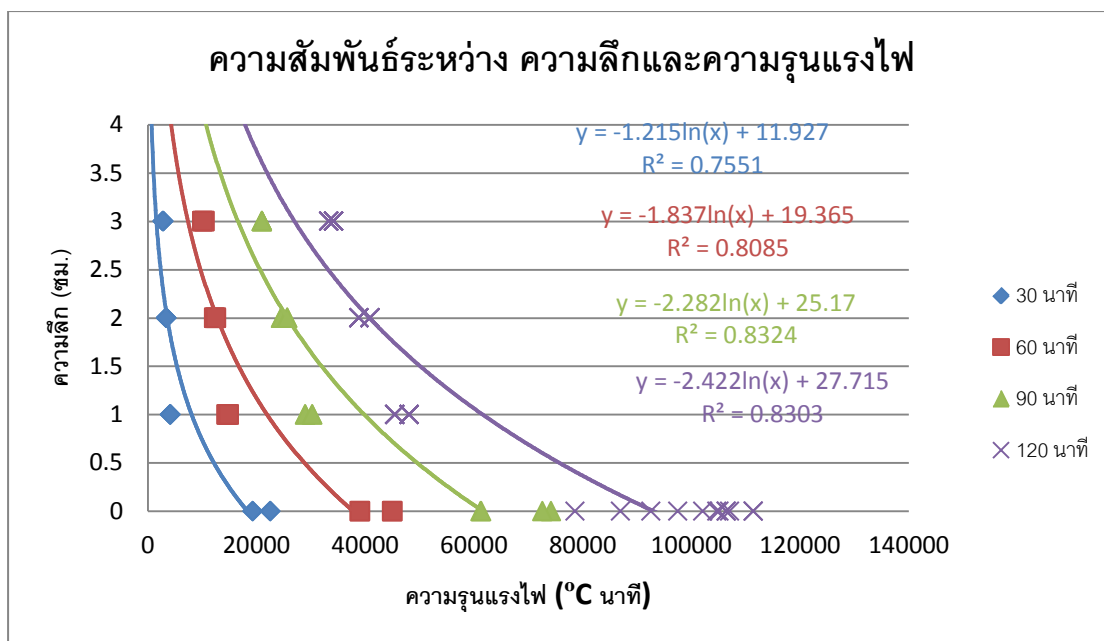
$$F = -24073 \ln(R) - 457.46 \quad (10)$$

โดยที่

F = ความรุนแรงไฟ (°C นาที)

R = อัตราส่วนกำลังดึงคงค้าง ระหว่างกำลังดึงของชิ้นตัวอย่างที่เวลาเผาไฟใดๆ
กับกำลังดึงของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ถูกเผาไฟ

จากนั้นนำความรุนแรงไฟจากการประมาณมาสร้างความสัมพันธ์กับระดับความลึกต่างๆที่ทำการทดสอบด้วยวิธีดึงทดสอบ ตามระยะเวลาที่เผาไฟต่างๆ ซึ่งผลความสัมพันธ์เป็นไปดังภาพที่
131



ภาพที่ 131 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ดึงทดสอบกับความรุนแรงไฟที่ระยะเวลาเผาไฟต่างๆ

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงสมการสำหรับเวลาเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาที แสดงเป็นสมการ 11-14 ตามลำดับ

$$D = -1.215 \ln(F) + 11.927 \quad (11)$$

$$D = -1.837 \ln(F) + 19.365 \quad (12)$$

$$D = -2.282 \ln(F) + 25.17 \quad (13)$$

$$D = -2.422 \ln(F) + 27.715 \quad (14)$$

โดยที่

D = ความลึกของกำลังดิ่งทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซม (ซม)

F = ความรุนแรงไฟ ($^{\circ}\text{C}$ นาที)

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทราบอัตราส่วนกำลังดิ่งค้างที่ต้องการ (กำลังดิ่งทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซม/กำลังดิ่งทดสอบของคอนกรีตที่ไม่ถูกเผาไฟ) ก็จะสามารถหาความรุนแรงไฟที่ต้องการได้จากสมการที่ 9 และเมื่อทราบถึงความรุนแรงไฟก็สามารถหาความลึกของกำลังดิ่งทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซมได้โดยเลือกใช้สมการจากเวลาที่ถูกเพลิงไหม้

บทที่ 5

สรุปผล

1. สีของชิ้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีส้ม/แดงที่เวลาเผา 30 นาที แล้วจึงเปลี่ยนไปเป็นสีเทาสว่างเมื่อระยะเวลา 90-120 นาที
2. การหลุดร่อนของชิ้นตัวอย่างจะเริ่มพบเห็นได้ที่ระยะเวลาในการเผา 60 นาที และความรุนแรงจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาจนกระทั่งเกิดการหลุดร่อนทั่วผิวหน้าที่เวลาเผา 120 นาที และชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้มต่างๆกันก็จะมีลักษณะการหลุดร่อนที่เหมือนกัน
3. ชิ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc จะมีความสึกของการหลุดร่อนที่มากกว่าชิ้นตัวอย่าง 240ksc และชิ้นตัวอย่างที่มีระยะหุ้มเหล็กที่มากที่สุดก็จะมีความสึกของการหลุดร่อนที่มากที่สุด
4. การใช้แผ่นอะคริลิคตรวจวัดพื้นที่รอยร้าวจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
5. โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถตรวจวัดค่าได้ดี (เมื่อเทียบกับการตรวจสอบด้วยแผ่นอะคริลิค) บนชิ้นตัวอย่างที่มีเสียหายปานกลางจนถึงมาก
6. จะไม่พบรอยร้าวบนชิ้นตัวอย่างกำลัง 240ksc แต่จะพบที่ตัวอย่างกำลัง 360ksc ตั้งแต่ระยะเวลาเผา 60 นาทีเป็นต้นไป แต่ที่ระยะเวลาเผา 120 นาทีจะไม่สามารถพบรอยร้าวได้เนื่องจากเกิดการหลุดร่อนขึ้นทั่วผิวหน้า
7. ชิ้นตัวอย่างกำลัง 350ksc จะมีค่าการสะท้อนคงค้างที่น้อยกว่าชิ้นตัวอย่าง 240ksc ที่ระยะเวลาในการเผาหรือความรุนแรงไฟเดียวกัน
8. ความสึกของความเสียหายที่ได้จากการคำนวณความด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าที่น้อยกว่าระดับความสึกของสีที่เปลี่ยนไปจากการเจาะทดสอบ
10. ผลการดึงทดสอบที่ระดับความลึกเดียวกันมีแนวโน้มที่จะจะมีค่าที่ลดลงเมื่อเวลาในการเผาหรือความรุนแรงไฟเพิ่มขึ้น
11. ผลการดึงทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก ที่เวลาในการเผาหรือความรุนแรงไฟเดียวกัน
12. เพื่อความปลอดภัยในการใช้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงไฟและอัตราส่วนกำลังดึงคงค้าง ควรเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) เป็นดังสมการที่ 15

$$F = \phi(-24073 \ln(R) - 457.46) \quad (15)$$

โดยที่

$\emptyset =$ อัตราส่วนปลอดภัย ที่ $0 < \emptyset < 1$

F = ความรุนแรงไฟ ($^{\circ}\text{C}$ นาที)

R = อัตราส่วนกำลังติดตั้งค้าง

13. เนื่องจากเหตุการณ์เพลิงไหม้จริงไม่ได้มีพฤติกรรมเป็นไปตามกราฟไฟมาตรฐานของ ASTM E119 ดังนั้น เวลาที่ใช้ในเหตุการณ์เพลิงไหม้จริงจะต้องถูกเปลี่ยนด้วยหลักของ เวลาเทียบเท่า (time equivalent) ก่อนจึงจะสามารถนำมาเลือกใช้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความรุนแรงไฟได้

รายการอ้างอิง

1. Thanyawat Pothisiri and Pattamad Panedpojaman , Modeling of bonding between steel rebar and concrete at elevated temperatures , Construction and Building (Materials 27 2012): 130-140
2. กรมโยธาธิการและผังเมือง, มยผ. 1901-51, มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมอาคาร.กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย,2551.
3. ASTM Designation, E119-10, Standard Test Methods for Fire tests of Building Construction and Materials, 2010.
4. กรมโยธาธิการและผังเมือง, มยผ. 1501-51ถึง1507-51, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย . กรุงเทพฯ : กระทรวงมหาดไทย ,2551.
5. ASTM Designation, C1538-04, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by Direct tension (Pull-off Method),2004.
6. Narendra Gosain, Effects of Fire on Concrete Evaluation and repair, Concrete international (April 2006): 67-71
7. Omer Arioiz, Effects of elevated temperature on properties of concrete, Fire Safety Journal (2007): 516-522
8. Powers T.C. Physical properties of cement paste. In Chemistry of Cement, Vol.II, Proceeding of the Fourth International Symposium, 2-7 October, 1960, Washington DC, Nation Bureau of Standards Monograph 43-Vol.II, 577, US Government Printing Office
9. Bennetts I.D. , Elevated temperature behavior of concrete and reinforcing steel, Report No. MRL/PS23/81/001, BHP Melbourne Research Laboratories, Clayton, Victoria, Australia, 1981
10. รศ.ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ ,Effects of Fire on Concrete ,การบรรยายการตรวจสอบและแนวทางการแก้ไขอาคารหลังอัคคีภัย (2009)

11. Harmathy T.Z. , Effect of moisture on the fire endurance of building elements. In
Moisture in Materials in Relation to Fire Tests, ASTM STP 385, Philadelphia PA,
(1965): 74
12. FIB, Working Party 4.3-1, Fire design of concrete structures materials, structures and
modeling, April 2007
13. K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal 38 (2003):
103-106
14. Brue Eillingwood and T.D. Lin., Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams
during Fires, ACSE, Journal of Structural Division 117 (February 1991): 440-458
15. FIB, Task Group 4.3, Fire design of concrete structures structural behavior and
assessment, July 2008
16. Technical Report No.68, Assessment, Design and Repair of Fire-damaged Concrete
Structures
17. ACI 228.2R-98, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures,
2004
18. Michael Y.L. Chew, The Assessment of Fire Damaged Concrete, Building and
Environment, Vol.28, No.1, Printed in Great Britain (1993): 97-102
19. M. Yaqub and C.G. Bailey, Repair of fire damaged circular reinforced concrete
columns with FRP composites, Journal of Construction and Building Materials 25
(2011): 359-370
20. พรวรรณ ภูษิต และ สุวัชร ตันวัฒนะประทีป, พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเสริม
เหล็กหลังถูกเพลิงไหม้กับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, วิทยานิพนธ์ นิสิตปริญญาตรี,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010
21. Ingberg S.H., et al., Combustible Content in Buildings, BMS 149, Washington,
D.C.:National Bureau of Standard,1957.

22. กรมโยธาธิการและผังเมือง, มยผ. 1508-51, มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย . กรุงเทพฯ : กระทรวงมหาดไทย,2551.
23. Peter H. Emmons, Concrete Repair and Maintenance, แปลโดย สืบศักดิ์ พรหมบุญและคณะ
24. Unified Facilities Criteria (UFC), Operation & Maintenance Concrete crack and Partial-Depth spall repair, American Concrete Pavement Association, May 2004
25. BS EN 1504-10:2003, Product and systems for the protection and repair of concrete structures, Part 10: Site application of products and systems and quality control of the work, 2003
26. ACI Committee 546, Concrete Repair Guide, ACI 546R-04, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
27. กรมโยธาธิการและผังเมือง, มยผ. 1552-51, มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร . กรุงเทพฯ : กระทรวงมหาดไทย,2551.
28. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, July 2002. Concrete Repair and maintenance illustrated, problem analysis, repair strategy, techniques ; Peter H. Emmons
29. ASTM International, 2008 Annual Book ASTM Standards Section4_Construction. ,vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 2008

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติวัสดุซ่อม

- วัสดุซ่อม ก. Sika MonoTop -412 TH
ประเภท ซีเมนต์มอร์ต้า
คุณสมบัติ

ตารางที่ 74 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ก.

	1วัน	7วัน	28วัน
กำลังรับแรงอัด	~ 15 MPa	~ 40 MPa	~ 50 MPa
กำลังรับแรงดัด	~ 4 MPa	~ 6 MPa	~ 8 MPa

การหดตัว ~500 $\mu\text{m}/\text{m}$ @ 20°C 65% relative humidity at 28 days

- วัสดุซ่อม ข. Sikadur -31 CF normal
ประเภท อีพ็อกซีมอร์ต้า
คุณสมบัติ

ตารางที่ 75 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ข.

กำลังรับแรงอัด	อุณหภูมิการบ่ม			
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C	+30°C
1วัน		25 - 35 MPa	45 - 55 MPa	50 - 60 MPa
3วัน		40 - 50 MPa	55 - 65 MPa	60 - 70 MPa
7วัน		50 - 60 MPa	60 - 70 MPa	60 - 70 MPa

กำลังรับแรงดัด	อุณหภูมิการบ่ม			
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C	+30°C
1วัน		11 - 17 MPa	20 - 30 MPa	20 - 30 MPa
3วัน		20 - 30 MPa	25 - 35 MPa	25 - 35 MPa
7วัน		25 - 35 MPa	30 - 40 MPa	30 - 40 MPa

กำลังรับแรงดึง	อุณหภูมิการบ่ม		
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C
1 วัน	2 - 6 MPa	6 - 10 MPa	9 - 15 MPa
3 วัน	9 - 15 MPa	17 - 23 MPa	17 - 23 MPa
7 วัน	14 - 20 MPa	18 - 24 MPa	19 - 25 MPa

กำลังยึดเหนี่ยว

เวลา	อุณหภูมิ	พื้นผิว	กำลังยึดเหนี่ยว
1 วัน	+10°C	คอนกรีตแห้ง	> 4 MPa *
1 วัน	+10°C	คอนกรีตชื้น	> 4 MPa *
1 วัน	+10°C	เหล็ก	6 - 10 MPa
3 วัน	+10°C	เหล็ก	10 - 14 MPa
3 วัน	+23°C	เหล็ก	11 - 15 MPa
3 วัน	+30°C	เหล็ก	13 - 17 MPa

*หมายถึงวินาทีที่คอนกรีต 100%

3. วัสดุซ่อม ค. Sikadur -41 CF normal

ประเภท อีพ็อกซีมอร์ตาร์

คุณสมบัติ

ตารางที่ 76 คุณสมบัติของวัสดุซ่อม ค.

กำลังรับแรงอัด	อุณหภูมิการบ่ม		
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C
1 วัน	13 - 23 MPa	57 - 67 MPa	67 - 77 MPa
3 วัน	45 - 55 MPa	74 - 84 MPa	76 - 86 MPa
7 วัน	59 - 69 MPa	77 - 87 MPa	77 - 87 MPa

กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัด	อุณหภูมิการบ่ม		
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C
1 วัน	6 - 12 MPa	7 - 27 MPa	20 - 30 MPa
3 วัน	14 - 24 MPa	21 - 31 MPa	25 - 35 MPa
7 วัน	26 - 36 MPa	33 - 43 MPa	33 - 43 MPa

กำลังรับแรงดึง	อุณหภูมิการบ่ม		
	ระยะเวลาบ่ม	+10°C	+23°C
1วัน	2 - 6 MPa	13 - 19 MPa	12 - 22 MPa
3วัน	12 - 18 MPa	15 - 21 MPa	14 - 24 MPa
7วัน	13 - 19 MPa	16 - 22 MPa	16 - 26 MPa

กำลังยึดเหนี่ยว

เวลา	อุณหภูมิ	พื้นผิว	กำลังยึดเหนี่ยว
7 วัน	+10°C	คอนกรีตแห้ง	> 4 MPa *
7 วัน	+10°C	คอนกรีตชื้น	> 4 MPa *
7 วัน	+10°C	เหล็ก	4 - 8 MPa
7 วัน	+23°C	เหล็ก	13 - 17 MPa

*หมายถึง วิบัติที่คอนกรีต 100%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2530 เข้ารับการศึกษาระดับประถมที่โรงเรียนศึกษาสมุทรอันนุสรณ์ ระดับมัธยมที่โรงเรียนมัธยมวัดมกุฎกษัตริย์ และสอบเทียบเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2552 ภายหลังจากเข้าทำงานได้ 1 ปี จึงได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท ที่สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย