

สมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์เสริมท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายหลังอุณหภูมิสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

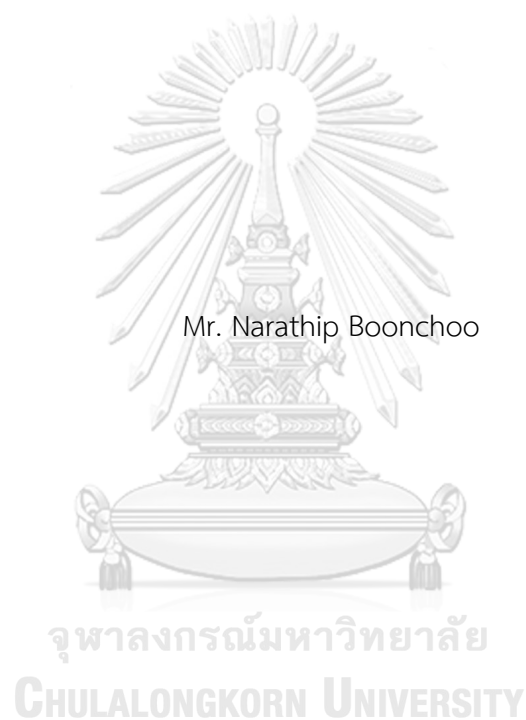
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mechanical properties of mortar reinforced with carbon nanotubes and  
polypropylene fibers after elevated temperatures



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์เสริมท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใย พอลิโพรไพลีนภายหลังอุณหภูมิสูง
โดย	นายนราธิป บุญชู
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิธาน ไพโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิธาน ไพโรจน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรรุญ รุ่งอมรรัตน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิช สรรพกิจทิพากร)	

นราธิป บุญชู : สมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์เสริมท่อานาโนคาร์บอนและเส้นใยโพลีโพรไพลีน  
 ภายหลังจากอุณหภูมิสูง. ( Mechanical properties of mortar reinforced with  
 carbon nanotubes and polypropylene fibers after elevated temperatures )  
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.พิธาน ไพโรจน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้ท่อานาโนคาร์บอนและเส้นใยโพลีโพรไพลีน (PP) ต่อการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยตัวอย่างจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และประเมินความต้านทานต่อสภาวะเพลิงไหม้ โดยทำทดสอบหาค่ากำลังค้ำและตรวจสอบการหลุดลอกของตัวอย่าง ในการศึกษาจะใช้ท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นผสมในปริมาณ 0%, 0.1%, 0.25% และ 0.50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ในขณะที่การผสมเส้นใย PP ในปริมาณร้อยละ 0.2 (โดยปริมาตร) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการหลุดลอกของมอร์ตาร์ สำหรับส่วนผสมที่ไม่มีเส้นใย PP ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการผสมท่อานาโนคาร์บอน 0.1% สามารถเพิ่มกำลังอัดได้ร้อยละ 8 นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมท่อานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.1 มีกำลังอัดมากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.22 MPa หลังจากการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิสูงพบว่ากำลังรับแรงของตัวอย่างมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตัวอย่างสัมผัสกับความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จะพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าคงค้างอยู่ในช่วงร้อยละ 6.63 ถึง 12.60 อย่างไรก็ตามการผสมเส้นใย PP สามารถช่วยลดการหลุดลอกของมอร์ตาร์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5970212421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: CARBON NANOTUBES, POLYPROPYLENE FIBERS, MORTAR,  
MECHANICAL PROPERTIES, SPALLING, FIRE EXPOSURE

Narathip Boonchoo : Mechanical properties of mortar reinforced with carbon nanotubes and polypropylene fibers after elevated temperatures .

Advisor: Asst. Prof. Pitcha Jongvivatsakul, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Pithan Pairojn, Ph.D.

This study aim to investigate the influence of carbon nanotubes and polypropylene (PP) fibers on fire resistance of OPC mortar. The samples were exposed to the high temperatures in the range of 400 to 1,000°C. The resistance to fire of mortars was evaluated using both strengths and spalling tests. In this study, multi-walled carbon nanotube was used as 0%, 0.10%, 0.25% and 0.50% by weight of cement. The PP fiber content of 0.2% (by volume) was added to the mixture to improve the spalling of mortar. For the mixtures made without PP fibers, the results indicated that the addition of 0.1% carbon nanotube can increase the compressive strength by up to 8%. In addition, the mortar made with 0.1% carbon nanotube showed the highest flexural strength of 12.22 MPa. After exposure to elevated temperatures, the decrease in strengths of the sample was observed. Especially at 1,000 °C, the residual compressive strength of mortar is in the range of 6.63 to 12.60%. However, the reduction in spalling of the mortar is reduced by the addition of PP fibers.

Field of Study: Civil Engineering

Academic Year: 2018

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ โครงการแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาฯ สร้างเสริมพลังจุฬาฯ ก้าวสู่ศตวรรษที่ 2 ” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือสำหรับอุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบ และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

นราธิป บุญชู



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) .....	4
2.1.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน .....	4
2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน .....	5
2.1.3 คุณสมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอน .....	8
2.1.4 การใช้ท่อนาโนคาร์บอนในงานคอนกรีต.....	8
2.1.5 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมท่อนาโนคาร์บอนภายหลังสัมผัสความร้อน .....	12
2.1.6 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในซีเมนต์เพสต์ .....	14
2.2 เส้นใยพอลิโพรไพลีน .....	15

2.2.1 การใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนในคอนกรีต.....	16
2.2.2 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายหลังสัมผัสความร้อน. 17	
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 วัสดุและอัตราส่วนผสม .....	20
3.3 กระบวนการทดสอบ .....	24
3.4 ขั้นตอนการผสม.....	25
3.5 การให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่าง.....	28
3.6 การทดสอบ.....	30
3.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	30
3.6.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด .....	31
3.6.3 การทดสอบการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ (Mortar Spalling).....	32
3.6.4 การตรวจสอบองค์ประกอบภายในมอร์ตาร์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด.....	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	34
4.1 กำลังรับแรงอัด.....	34
4.1.1 อิทธิพลของปริมาณฟ่อนาโนคาร์บอนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์.....	35
4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ .....	36
4.1.3 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ .....	38
4.1.4 การวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัด .....	41
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด .....	42
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณฟ่อนาโนคาร์บอนต่อกำลังดัดของมอร์ตาร์.....	42
4.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังดัดของมอร์ตาร์ .....	44
4.2.3 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังดัดของมอร์ตาร์ .....	46



4.2.4 การวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงดัด .....	49
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM .....	50
4.4 การหลุดล่อน.....	54
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
ภาคผนวก ก.....	61
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	73



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนประเภท SWNTs และ MWNTs [12] .....	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนจากกระบวนการผลิตเดียวกันที่ให้คุณสมบัติต่างกัน [13] .....	8
ตารางที่ 2.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์คอมโพสิตและท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติต่างกัน [13]...	9
ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ [14].....	10
ตารางที่ 2.5 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง [14].....	10
ตารางที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดจากงานวิจัยในอดีต [1].....	11
ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา [23].....	12
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีน [28].....	16
ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนในซีเมนต์เพสต์ [5] .....	18
ตารางที่ 2.10 การหลุดล่อนของคอนกรีตหลังการสัมผัสความร้อน [4].....	19
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮบริดจากการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี.....	21
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของทรายละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ .....	21
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย .....	22
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
ตารางที่ 3.5 กรณีศึกษา .....	23
ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์.....	24
ตารางที่ 3.7 จำนวนชิ้นตัวอย่าง .....	25
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	34
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด .....	42
ตารางที่ ก.1 กรณีการทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในน้ำ .....	61

## สารบัญญภาพ

## หน้า

รูปที่ 2.1 แกรฟีน [8].....	4
รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวและแบบผนังหลายชั้น [9].....	5
รูปที่ 2.3 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน [7].....	5
รูปที่ 2.4 เตาปฏิกรณ์สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการ CVD [10] .....	6
รูปที่ 2.5 เตาปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการอาร์คดิสชาร์จ [11]...	7
รูปที่ 2.6 เตาปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์ [10] .....	7
รูปที่ 2.7 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากซีเมนต์คอมโพสิตผสมท่อนาโนคาร์บอนที่มี คุณสมบัติต่างกัน [13] .....	9
รูปที่ 2.8 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมท่อนาโนคาร์บอนต่างกันภายใต้การเผาไฟ [23] .....	13
รูปที่ 2.9 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน [26].....	14
รูปที่ 2.10 ไอโซเทกติก ซินติโอเทกติก และ แอนเทกติก [27].....	15
รูปที่ 2.11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไฟลีน [29] .....	17
รูปที่ 2.12 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไฟลีน [29] .....	17
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ไฮบริด.....	20
รูปที่ 3.2 ท่อนาโนคาร์บอน .....	22
รูปที่ 3.3 เส้นใยพอลิโพรไฟลีน .....	23
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผสม .....	26
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผสมท่อนาโนคาร์บอนกับน้ำ.....	26
รูปที่ 3.6 การผสมด้วย Magnetic stirrers และ Ultra-sonicate .....	27

รูปที่ 3.7 เครื่องปั่นผสมมอร์ตาร์.....	27
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการหล่อลงแบบ .....	27
รูปที่ 3.9 เครื่องอบมอร์ตาร์ก่อนการทดสอบ 1 วัน.....	28
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์เตาทดสอบ .....	28
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งฉนวนเส้นใยเซรามิก .....	29
รูปที่ 3.12 อัตราการให้ความร้อนของเตาไฟฟ้า .....	29
รูปที่ 3.13 ชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ASTM C109 [30].....	30
รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ASTM C109 [30] .....	30
รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังต้านทานแรงตัด ASTM C239 [31] .....	31
รูปที่ 3.16 มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงตัด ASTM C239 [31] .....	31
รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	33
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของปริมาณท่อานาโนคาร์บอนต่อกำลังรับแรงอัด .....	36
รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อานาโนคาร์บอนภายหลังสัมผัสความร้อน... 37	
รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อานาโนคาร์บอน .....	38
รูปที่ 4.4 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัด ณ อุณหภูมิห้อง.....	39
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 40	
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 40	
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส .....	41
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณท่อานาโนคาร์บอนต่อกำลังรับแรงตัด .....	43
รูปที่ 4.9 ลักษณะเนื้อผิวของชิ้นตัวอย่าง CN0.5-P.....	44
รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงดัดค้ำของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อานาโนคาร์บอน.....	45
รูปที่ 4.11 กำลังดัดค้ำของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อานาโนคาร์บอน .....	46
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัด ณ อุณหภูมิห้อง .....	47

รูปที่ 4.13 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	47
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 4.16 การละลายของเส้นใยพอลิโพรไพลีน	49
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของ CN0.1	50
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของ CN0.25	51
รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของ CN0.5	52
รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของ CN0.1-P อุณหภูมิห้อง	53
รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของ CN0.25-P อุณหภูมิห้อง	53
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของ CN0.50-P อุณหภูมิห้อง	54
รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนของตัวอย่างหลังสัมผัสเพลิงไหม้	56
รูปที่ 4.24 ร่องรอยของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.25 ร่องรอยของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	57
รูปที่ ก.1 การตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที	62
รูปที่ ก.2 การตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน	62
รูปที่ ก.3 เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer	63
รูปที่ ก.4 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.1%	65
รูปที่ ก.5 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.25%	66
รูปที่ ก.6 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.5%	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการรับกำลังแรงอัดที่ดี แต่กำลังในการรับแรงดึงกลับไม่สูงเท่าที่ควรเนื่องจากคอนกรีตมีความเปราะ ปัจจุบันได้มีการศึกษาและนำความรู้ทางด้านนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคอนกรีต โดยการผสมสารระดับนาโนลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยในอดีต Kahidan and Shirmohammadian [1] พบว่าเมื่อนำท่อคาร์บอน (carbon nanotube) มาผสมกับมอร์ตาร์จะส่งผลให้กำลังการรับแรงอัดและกำลังการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นกว่ามอร์ตาร์ปกติ เนื่องจากท่อคาร์บอนสามารถช่วยลดรอยแตกภายในซีเมนต์เพสต์ และยังช่วยในการลดรูพรุนภายในซีเมนต์เพสต์ ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ได้ดีขึ้น โดยคุณสมบัติเชิงกลของท่อคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก 100 เท่า มีน้ำหนักเป็น 1 ใน 6 ของเหล็ก [2] มีค่าโมดูลัสอยู่ระหว่าง 1-5 TPa ความหนาแน่นประมาณ 2000 kg/m<sup>3</sup> ค่าการยืดตัว (Elongation) ร้อยละ 20-30 กำลังรับแรงดึง 100 GPa และสามารถทนความร้อนได้ถึง 2800 องศาเซลเซียส [3]

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกของคอนกรีตจากการสัมผัสความร้อนทำให้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตอันได้แก่ ความเครียดเชิงความร้อน (thermal strain) รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเป็นต้น ผลจากการสัมผัสความร้อนนี้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตลดลง การพัฒนาคอนกรีตให้มียกกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงให้มากขึ้นแม้เมื่อสัมผัสความร้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ

การนำท่อคาร์บอนมาผสมกับคอนกรีตร่วมกับวัสดุส่วนผสมอื่น อาทิ เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) เป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา จากงานวิจัยในอดีตพบว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้ การผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงในคอนกรีต 0.2% โดยปริมาตรคอนกรีตสามารถลดการหลุดล่อนของคอนกรีตหลังจากเกิดสภาวะเพลิงไหม้ได้ [4] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านกำลังรับแรงอัดและแรงดัดในคอนกรีตได้ [5]

ด้วยเหตุนี้การศึกษาเรื่องอิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อคุณสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการหลุดล่อนของคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้และที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีน จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องด้วยคุณสมบัติของสารทั้ง 2 คือท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีน ช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่สัมผัสความร้อน งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ทั้งในสภาวะปกติและภายหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน และการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) ต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และพฤติกรรมการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะหลังสัมผัสเพลิงไหม้

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้ใช้ท่อนาโนคาร์บอน ชนิด Multiwall carbon nanotube (MWCNT)
- 2) งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมวัสดุนาโนทั้งในสภาวะปกติและสภาวะหลังสัมผัสความร้อน
- 3) งานวิจัยนี้ศึกษาองค์ประกอบภายในมอร์ตาร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เพื่อดูท่อนาโนคาร์บอนภายในมอร์ตาร์
- 4) งานวิจัยนี้ศึกษาการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ (Mortar Spalling) หลังสัมผัสความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถพัฒนาสัดส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนในมอร์ตาร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลเหมาะสม โดยมีกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่เพิ่มขึ้นกว่ามอร์ตาร์ปกติทั้งในสภาวะปกติและสภาวะหลังสัมผัสเพลิงไหม้

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

- แผนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนดังต่อไปนี้
- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีในอดีตที่เกี่ยวข้อง
  - ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาอัตราส่วนการผสมและวางแผนการทดสอบ
  - ขั้นตอนที่ 3 เตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบกำลังรับแรงของชิ้นตัวอย่างที่สภาวะปกติ

ขั้นตอนที่ 5 เผาชิ้นตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบกำลังรับแรงและพฤติกรรมการหลุดล่อนของชิ้นตัวอย่างภายหลังสัมผัส  
ความร้อน

ขั้นตอนที่ 7 ศึกษาองค์ประกอบภายในมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
กราด

ขั้นตอนที่ 8 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย





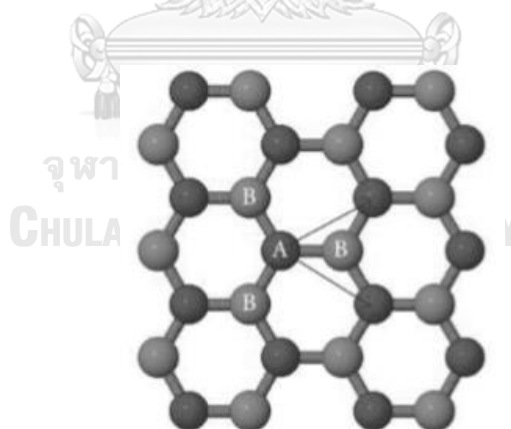
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube)

##### 2.1.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน

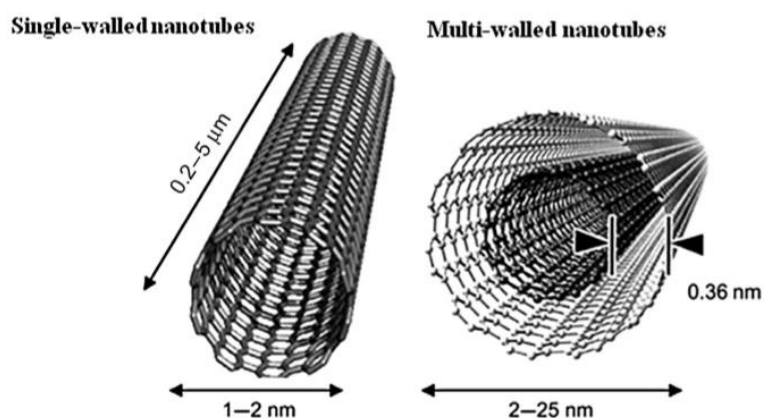
ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นจากธาตุสำคัญพื้นฐานคือ คาร์บอน ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจะทำให้อนุภาคคาร์บอนเชื่อมต่อเป็นรูปทรงลักษณะทรงกระบอกขนาดระดับนาโนเมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 10-15 นาโนเมตร [6] ท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพันธะของไฮบริดออร์บิทัลแบบ  $sp^2$  ของแผ่นแกรฟีน [7] ซึ่งเป็นพันธะโคเวเลนต์ ที่อยู่ระหว่าง  $sp^2$  และ  $sp^3$  มีการโค้งงอท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้เกิดความเครียดของพันธะมากขึ้นอันเนื่องจากการเกิดการเหนียวรั้ง โดยความเครียดที่เกิดขึ้นในพันธะจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการม้วนแผ่นแกรฟีน ซึ่งพิจารณาได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่จะมีความเครียดของพันธะน้อยกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก โดยแลตทิซย่อยของแกรฟีนแทนได้ด้วยแลตทิซแบบสามเหลี่ยมสองรูป โดยแต่ละอะตอมในแลตทิซย่อย (A) จะเชื่อมต่อกับอะตอมเคียงข้าง (B) 3 อะตอม ดังรูปที่ 2.1



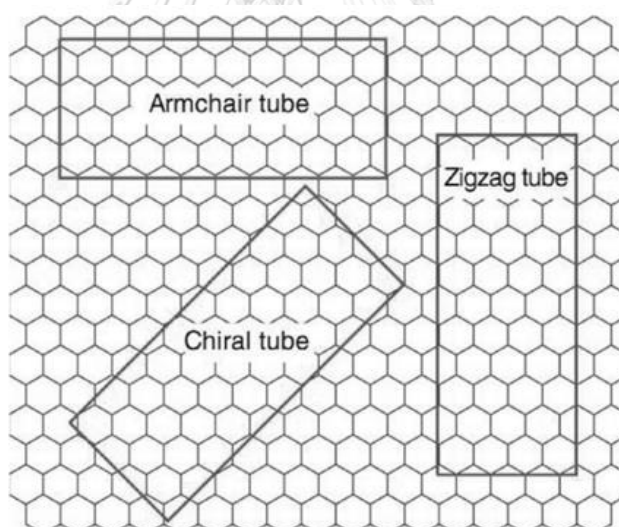
รูปที่ 2.1 แกรฟีน [8]

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักคือ แบบผนังชั้นเดียว (single wall carbon nanotube) และแบบผนังหลายชั้น (multiwall carbon nanotube) ซึ่งรูปทรงกระบอกทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

เนื่องจากสามารถสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัว ทั้งนี้การจัดเรียงตัวสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบอาร์มแชร์ (armchair) ไครอล (chiral) และซิกแซก (zigzag) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวและแบบผนังหลายชั้น [9]



รูปที่ 2.3 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน [7]

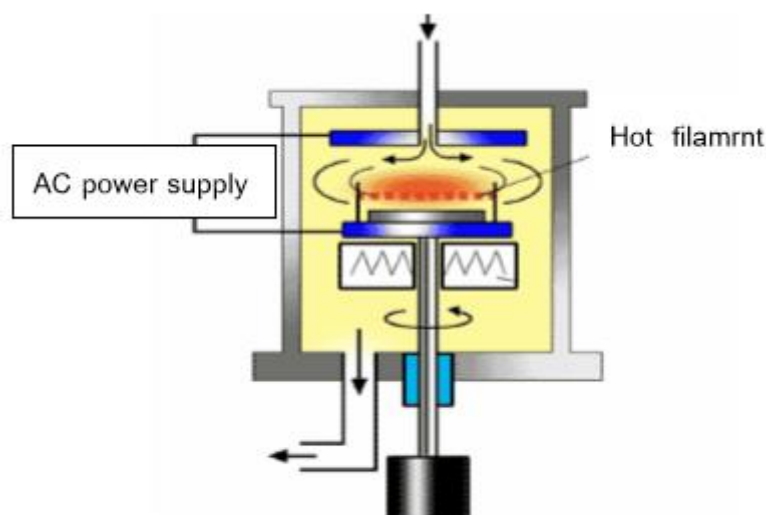
### 2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน มี 3 วิธี ดังต่อไปนี้

#### 1. วิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD)

กระบวนการนี้ใช้วิธีการผ่านแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิด เช่น มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) โพรพิลีน เฮกเซน และ เบนซีน เป็นต้น

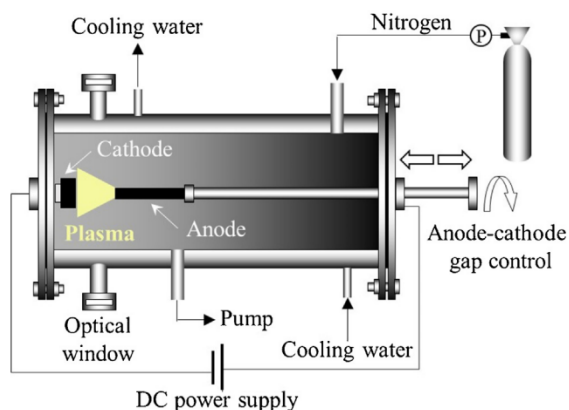
เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 600 - 1200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งกระบวนการนี้มีอนุภาคนาโนของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในองค์ประกอบ จึงทำให้โมเลกุลของแก๊สแตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอน โดยในขั้นตอนการสังเคราะห์ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ ขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนระยะเวลาในการสังเคราะห์



รูปที่ 2.4 เตาปฏิกรณ์สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการ CVD [10]

## 2. วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)

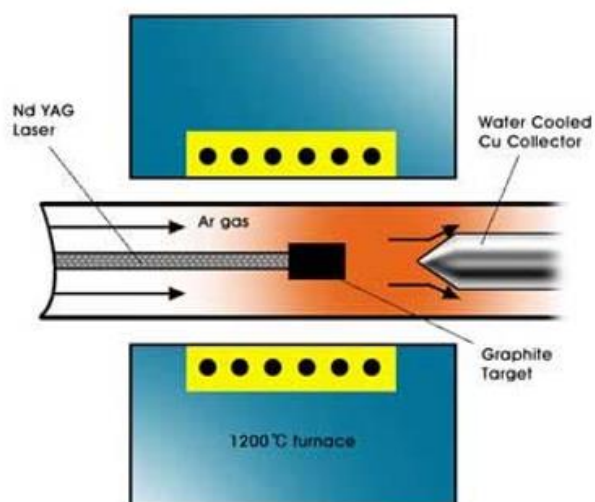
กระบวนการนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 50-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 20-40 โวลต์ ต่อระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่ง ระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 mm ดังรูปที่ 2.5 ภายในระบบบรรจุแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ที่ความดันต่ำ 13,332-66,661 Pa จนทำให้แก๊สเฉื่อยเกิดเป็นสถานะพลาสมา คือสภาพที่ทำให้แก๊สเป็นไอออนมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด โดยกระบวนการนี้ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์มีสถานะเป็นไอ ต่อจากนั้นจึงเกิดการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ในด้านขั้วลบ (Cathode) ในการควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะคะตะลิสต์ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)



รูปที่ 2.5 เตาปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยกระบวนการอาร์คดิสชาร์จ [11]

### 3. วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

การระเหยด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการยิงพัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงไปยังส่วนผสมระหว่างแกรไฟต์และผงโลหะเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังรูปที่ 2.6 โดยภายในบรรจุแก๊สเฉื่อยที่ความดัน 66 kPa และอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์จะให้ปริมาณและคุณภาพของท่อคาร์บอนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูงซึ่งมีราคาสูง



รูปที่ 2.6 เตาปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยกระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์ [10]

### 2.1.3 คุณสมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบผนังชั้นเดียว (single-walled nanotubes; SWNTs) และแบบผนังหลายชั้น (multi-walled nanotubes; MWNTs) รายละเอียดคุณสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนประเภท SWNTs และ MWNTs [12]

คุณสมบัติเชิงกล	SWNTs	MWNTs
โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	1054	1200
กำลังรับแรงดึง (GPa)	150	150
ความหนาแน่น (GPa)	1.33	2.6
การนำความร้อนสูงสุด (W/mK)	6000	6000

### 2.1.4 การใช้ท่อนาโนคาร์บอนในงานคอนกรีต

ในปัจจุบันได้มีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้ผสมคอนกรีตเพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลในด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดย Musso et al. [13] ได้ศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนต่อพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุผสมซีเมนต์ ซึ่งการศึกษาใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันและได้จากกระบวนการผลิตเดียวกันคือวิธี CVD แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ p-CNT, a-CNTs และ f-CNTs ดังแสดงในตารางที่ 2.2

## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

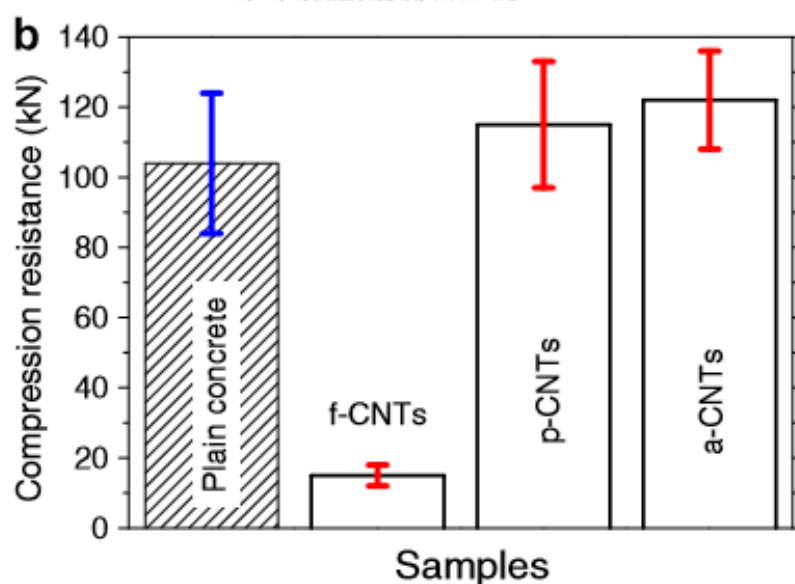
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนจากกระบวนการผลิตเดียวกันที่ให้คุณสมบัติต่างกัน [13]

คุณสมบัติ	p-CNT	a-CNTs	f-CNTs
กระบวนการผลิต	CVD	CVD	CVD
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	40-80	40-80	10-20
ความยาว ( $\mu\text{m}$ )	400-1000	200-400	0.1-10
ความบริสุทธิ์ (wt%)	มากกว่า 92	มากกว่า 99	มากกว่า 95
โลหะออกไซด์ที่ปนเปื้อน (wt%)	น้อยกว่า 6	น้อยกว่า 1	น้อยกว่า 5
กรดคาร์บอกซิลิก -COOH (wt%)	0	0	น้อยกว่า 4

โดยปริมาณท่อานาโนคาร์บอนที่ใช้ในการผสมลงในซีเมนต์คือร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักซีเมนต์ ผลการศึกษาการผสมท่อานาโนคาร์บอนชนิด a-CNTs ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์คอมโพสิตที่ไม่ได้ผสมหรือผสมด้วยท่อานาโนคาร์บอนชนิด p-CNTs และ f-CNTs อันเป็นผลจากความยาวของท่อานาโนคาร์บอน ความบริสุทธิ์ของตัวท่อานาโนคาร์บอนที่มีค่ามาก และสภาวะการเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่ง a-CNTs สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด 10-20% ดังรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์คอมโพสิตและท่อานาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติต่างกัน [13]

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (kN)
ซีเมนต์คอมโพสิตปกติ	104 ± 20
ซีเมนต์คอมโพสิตผสม 0.5 wt.% of p-CNTs	115 ± 18
ซีเมนต์คอมโพสิตผสม 0.5 wt.% of a-CNTs	122 ± 14
ซีเมนต์คอมโพสิตผสม 0.5 wt.% of f-CNTs	15 ± 3



รูปที่ 2.7 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากซีเมนต์คอมโพสิตผสมท่อานาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติต่างกัน [13]

Cui et al. [14] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลในด้านแรงอัดและแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยท่อานาโนคาร์บอนที่อายุ 28 วัน โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์เป็นไปตามตารางที่ 2.4 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนผสมท่อานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักซีเมนต์ ประสิทธิภาพกำลังรับแรงดัดและแรงอัดเพิ่มขึ้น 40.8 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ [14]

ชื่อชนิด	ซีเมนต์	w/c	ท่อนาโนคาร์บอน (%wt)	MPCM (%wt)	สารผสมเพิ่ม (%wt)
0%-MPCM-CP	1	0.35	0	15	0.40
10%-MPCM-CP	1	0.35	0.25	15	0.50
15%-MPCM-CP	1	0.35	0.5	15	0.73
20%-MPCM-CP	1	0.35	1.0	15	0.80

หมายเหตุ MPCM-CP = Microencapsulated phase change material cement paste (% of carbon nanotubes content.)

ตารางที่ 2.5 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง [14]

ชื่อชนิด	กำลังรับแรงดึง (MPa)	ประสิทธิภาพ ที่เพิ่มขึ้น (%)	กำลังรับแรงอัด (MPa)	ประสิทธิภาพ ที่เพิ่มขึ้น (%)
0%-MPCM-CP	4.22	0.0	27.1	0.0
10%-MPCM-CP	5.25	24.4	28.4	4.8
15%-MPCM-CP	5.94	40.8	27.9	3.0
20%-MPCM-CP	5.39	27.7	27.6	1.8

Kahidan et al. [1] ได้ทำการศึกษางานวิจัยในอดีตเพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนลงในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.6 โดยที่อัตราส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนที่ 0.5% ของน้ำหนักซีเมนต์ สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ 19 % และกำลังรับแรงดึงได้ 25% เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปกติ

ตารางที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงจากงานวิจัยในอดีต [1]

งานวิจัย	ประเภท	w/c	s/c	ขนาดชิ้นตัวอย่าง (mm)		คุณสมบัติของ MCNTs		ปริมาณ (wt% cement)	กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น (%)	กำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น (%)
				กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงดึง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	ความยาว ( $\mu$ m)			
Collins et al. [15]	ซีเมนต์เพสต์	0.35	-	N/A	-	10-30	5-15	0.5	8	-
Cwirzen et al. [16]	ซีเมนต์เพสต์	0.3	-	-	10x10x60	10	2-4	0.042	-	10
Musso et al. [17]	ซีเมนต์เพสต์	0.4	-	40x40x160	-	40-80	400-1000	0.5	11	-
Li et al. [18]	มอร์ตาร์	0.45	1.5	40x40x160	40x40x160	10-30	0.5-500	0.5	19	25
Nochiya et al. [19]	มอร์ตาร์	0.5	2.5	50x50x50	-	N/A	N/A	1.0	17	-
Xun et al. [20]	ซีเมนต์เพสต์	0.45	-	50x50x50	-	N/A	N/A	0.1	7	-
Chaipanich et al. [21]	มอร์ตาร์	0.5	3	20x20x20	-	N/A	N/A	1.0	10	-
Xu et al. [22]	มอร์ตาร์	0.2	0.6	70x70x70	40x40x160	10-20	5-15	0.02	15.9	20.7

หมายเหตุ w/c คือ cement/water, s/c คือ sand/cement



### 2.1.5 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมท่อานาโนคาร์บอนภายหลังสัมผัสความร้อน

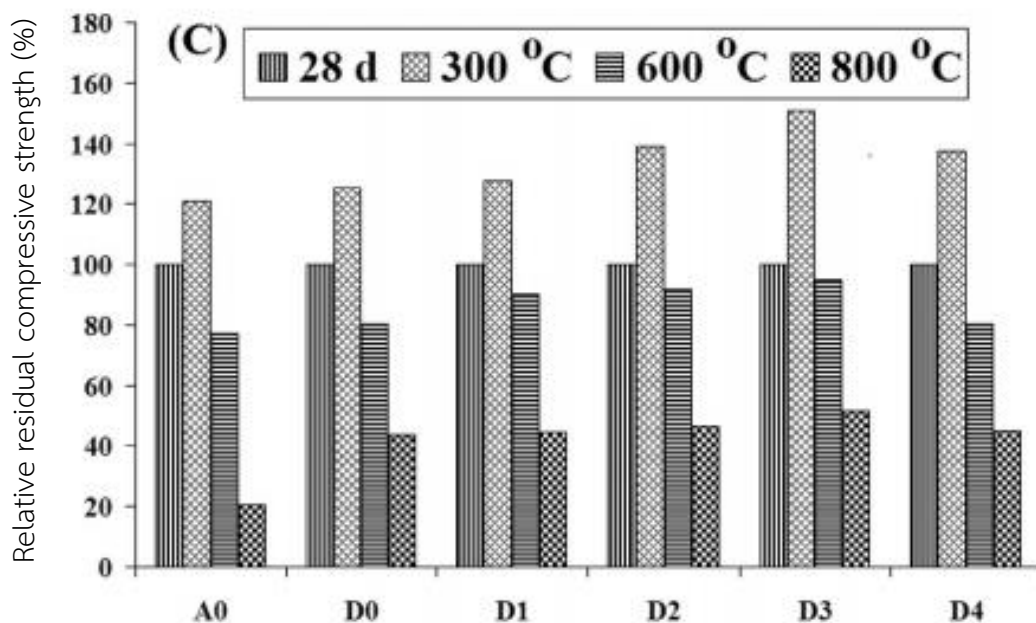
Amin et al. [23] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลต้านกำลังรับแรงอัดหลังสัมผัสความร้อนของซีเมนต์ผสมท่อานาโนคาร์บอน กับ Homra โดย Homra เป็นของเสียที่ได้จากการผลิตอิฐดินเหนียวในอียิปต์ ผลิตภัณฑ์นี้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดต้นทุนพลังงานและมลภาวะ โดย Homra ทำหน้าที่เป็นวัสดุพอซโซลานที่ดีและเป็นสารเติมเต็ม (filler) ในวัสดุผสมซีเมนต์ที่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมรุนแรง เช่น ซัลเฟต และ คลอไรด์ มากขึ้น โดยตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนท่อานาโนคาร์บอนและ Homra ที่ผสมในซีเมนต์เพสต์ โดยท่อานาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-40 nm ความยาว 5-10  $\mu\text{m}$  ความบริสุทธิ์มากกว่า 90% และพื้นที่ผิวสัมผัส 93.81  $\text{m}^2/\text{g}$  และมีสัดส่วนการผสมคือ 0.02, 0.05, 0.1 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา [23]

ชนิด	คุณสมบัติ (mass %)				อัตราส่วน w/s
	OPC	Homra	CNTs	สารผสมเพิ่ม	
A0	100	-	-	-	0.30
D0	70	30	-	-	0.30
D1	70	30	0.02	0.06	0.30
D2	70	30	0.05	0.15	0.30
D3	70	30	0.10	0.30	0.30
D4	70	30	0.20	0.60	0.30

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเป็นดังรูปที่ 2.8 โดยทดสอบการทนไฟที่อุณหภูมิ 300 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่ม Homra 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับทำให้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด โดยอัตราส่วนผสมชนิด D3 (70% OPC-30% Homra-0.1% CNT) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้ ช่วยเพิ่มความกำลังรับแรงอัดหลังการเผาไหม้ได้จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ก่อนที่กำลังรับแรงอัดจะลดลงที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้พบว่าท่อานาโนคาร์บอนไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland) หรือส่วนผสม Homra ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถสรุปได้ว่า ท่อานาโน

คาร์บอนไม่มีผลในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างรอยแตกที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



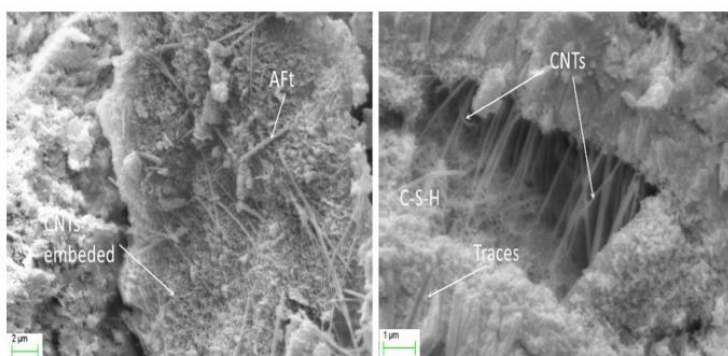
รูปที่ 2.8 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมก่อนนำคาร์บอนต่างกันภายใต้การเผาไฟ [23]

Arash et al. [24] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดก่อนสัมผัสความร้อน และกำลังรับแรงอัดหลังสัมผัสความร้อนของมอร์ตาร์ผสมก่อนนำคาร์บอน โดยก่อนนำคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-15 nm ความยาว 50  $\mu\text{m}$  ความบริสุทธิ์มากกว่า 95% และพื้นที่ผิวสัมผัส 233  $\text{m}^2/\text{g}$  และมีสัดส่วนการผสมคือ 0.05, 0.1 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ ผลทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่อายุมอร์ตาร์ 28 โดยทดสอบการทนไฟที่อุณหภูมิ 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาทีเป็นเวลา 90 นาที พบว่าการเพิ่มก่อนนำคาร์บอนลงในมอร์ตาร์มีคุณสมบัติทางกลด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดที่ดีขึ้นทั้งก่อนสัมผัสความร้อน และหลังสัมผัสความร้อนได้ทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลทดสอบให้ค่ากำลังที่ดีขึ้นเมื่อผสมก่อนนำคาร์บอน เนื่องจากก่อนนำคาร์บอนมีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์จึงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ทั้งนี้ไม่ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ที่การสัมผัส 400 องศาเซลเซียสของมอร์ตาร์ที่มีก่อนนำคาร์บอนผสมอยู่ 0.05 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์

นอกจากนี้ Arash et al. [25] ยังศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ ส่วนผสมท่อนาโนคาร์บอนทั้งก่อนและหลังสัมผัสความร้อน โดยเปรียบเทียบการบ่มที่อายุ 7 วันกับ 28 วัน ทดสอบเผาไฟที่อุณหภูมิ 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที่เป็นเวลา 90 นาที พบว่าการบ่มมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ ณ 28 วันให้กำลังรับแรงอัดดีที่สุดทั้งก่อนและหลังสัมผัสความร้อน และที่การบ่มอายุ 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดดีกว่าที่การบ่มอายุ 7 วันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ยังไม่สมบูรณ์

#### 2.1.6 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในซีเมนต์เพสต์

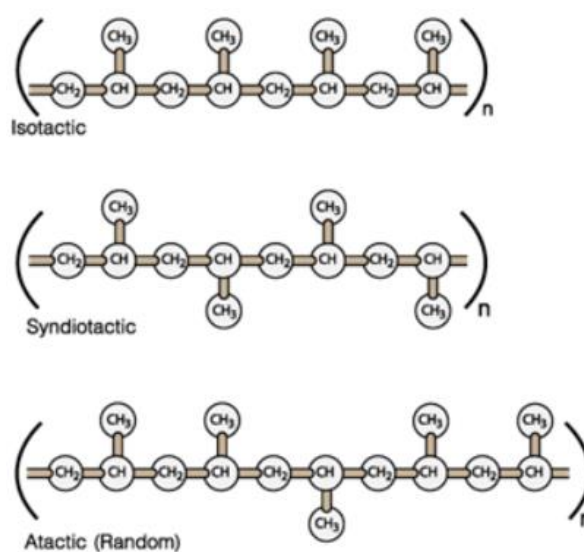
ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์และจะไม่เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุล (Van der Waals) Zhou et al. [26] ศึกษาการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้สารผสมเพิ่มที่ช่วยในการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนภายในซีเมนต์เพสต์ คือ แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO) เป็นสารช่วยกระจายตัวสำหรับท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งตรวจสอบการกระจายตัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวสูงขึ้น ที่สำคัญกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมากขึ้น และพบว่าเมื่อใช้ไฮบริดแกรฟีนออกไซด์ และ ท่อนาโนคาร์บอน (0.02 wt% GO และ 0.04 wt% ท่อนาโนคาร์บอน โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์) และเติมสาร super-plasticizer poly-carboxylate เพิ่มจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของซีเมนต์เพสต์ได้มากถึง 23.9% และ 16.7% ตามลำดับ ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในซีเมนต์เพสต์ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

## 2.2 เส้นใยพอลิโพรไพลีน

เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทโพลีโอเลฟิน ผลิตจากโพรพิลีน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทางเคมีคือ  $(C_3H_6)_n$  และสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของโพลิโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกติก (Isotactic) ซินดีโอแทกติก (Syndiotactic) และ แอแทกติก (Atactic) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ไอโซแทกติก ซินดีโอแทกติก และ แอแทกติก [27]

ไอโซแทกติก และ ซินดีโอแทกติก เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่แทนที่อย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอทั้งโมเลกุล จัดได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความจำเพาะทางสเตอริโอ (stereospecific) ซึ่งอาจเรียกพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวทั้งสองแบบนี้ว่า stereoregular polymers โดย stereoregular polymers มีความหนาแน่น ความเป็นผลึก จุดหลอมเหลวสูง ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 162 องศาเซลเซียสได้ มีความแข็ง มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วนคงตัวไม่เสีรูปง่าย มีความทนทานมาก สามารถทำเป็นบานพับในตัวเมื่อไม่ได้ผสมสีมีลักษณะขาวขุ่น ไม่ทึบแต่ไม่ใส มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง  $0.855 - 0.946 \text{ g/cm}^3$  ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลอยน้ำได้ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูงมีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก ได้แก่ กรด ต่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลาย

อินทรีย์ แต่จะเกิดการพองตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมี ที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีน หรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก เนื่องจากพอลิโพรไพลีนมีคุณสมบัติไม่มีขั้ว สามารถดูดซึมสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นจึงสามารถทนต่อสารที่มีขั้วได้ดีกว่า และพอลิโพรไพลีนจะพองตัว นั่นคือสมบัติทางกายภาพทั่วไปของเส้นใยพอลิโพรไพลีน แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

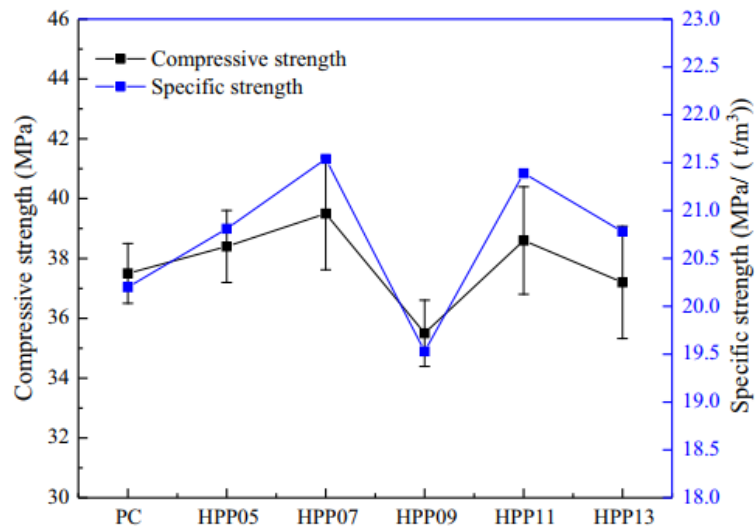
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีน [28]

ชนิด	ความหนาแน่น (t/m <sup>3</sup> )	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	จุดเดือด (°C)	กำลังรับแรงดึง (MPa)	ทนต่อสารอัลคาไล
เส้นใยพอลิโพรไพลีน	0.91	19	0.07	162	600	สูง

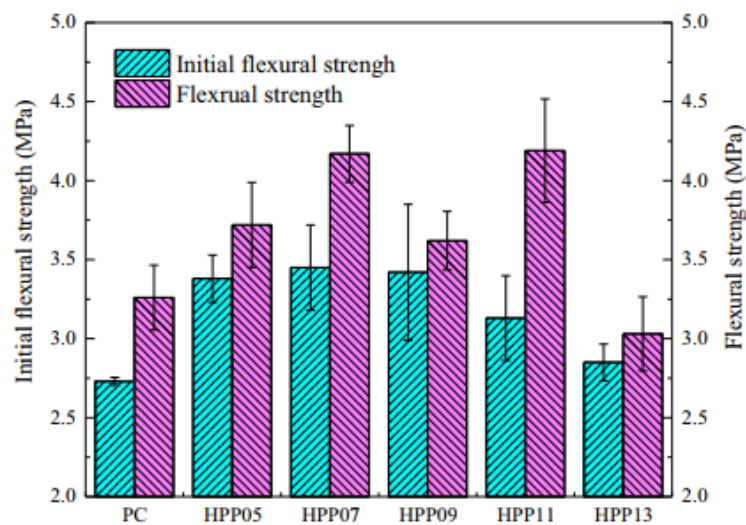
### 2.2.1 การใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนในคอนกรีต

Li et al. [29] ทำการวิจัยคุณสมบัติการรับแรงอัด และคุณสมบัติกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน โดยใช้อัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนเท่ากับ 0.5%, 0.7%, 0.9%, 1.1% และ 1.3% ต่อปริมาตรคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนอยู่ในช่วงระหว่าง 35.5–39.5 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะสังเกตเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนเท่ากับ 0.9% (HPP09) ผลกำลังรับแรงอัดไม่ดีขึ้นเนื่องจากการควบคุมคุณภาพในการบ่มคอนกรีตไม่ดีพอ

อย่างไรก็ตามในการทดสอบคุณสมบัติในการรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนดังรูปที่ 2.12 ค่า Initial flexural strength ของอัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนเท่ากับ 0.7% (HPP07) ให้ค่าสูงถึง 3.45 MPa และมากกว่าค่า Initial flexural strength ของกรณีไม่ผสมเส้นใย (PC) อยู่ 26.4% เนื่องจากคุณสมบัติเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เมื่อคอนกรีตเกิดรอยแยกจะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างรอยแยกจึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น



รูปที่ 2.11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน [29]



รูปที่ 2.12 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน [29]

### 2.2.2 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายหลังสัมผัสความร้อน

Serrano et al. [5] ได้ศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติและภายหลังเกิดเพลิงไหม้ โดยใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนเป็นส่วนผสมที่อัตราส่วน 1% และ 2% ต่อปริมาตรคอนกรีต โดยทดสอบความทนไฟตามมาตรฐาน ISO R-834 สัมผัสความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและทำการวัดอุณหภูมิในชิ้นตัวอย่างทุก ๆ 15, 30, 45 และ 60 นาทีตามลำดับ และเมื่อครบ 1 ชั่วโมงจึงทดสอบกำลังรับแรงอัด จากผลการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 2.9 การใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนที่





อัตราส่วน 1% ให้ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดดีที่สุดในทั้งสภาวะปกติและในสภาวะหลังเกิดเพลิงไหม้ และสังเกตได้ดีกว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยเพิ่มค่าความเครียดสูงสุดที่คอนกรีตรับได้

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนในซีเมนต์เพสต์ [5]

การทดสอบ	ชนิด	กำลังอัดสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )	ความเครียดสูงสุด x 10 <sup>3</sup>
กำลังรับแรงอัด	คอนกรีตปกติ	14.372	3.117
	เส้นใยพอลิโพรไพลีน 1%	25.051	4.222
	เส้นใยพอลิโพรไพลีน 2%	24.933	4.413
กำลังรับแรงอัด ภายหลังสัมผัส เพลิงไหม้	คอนกรีตปกติ	19.556	4.864
	เส้นใยพอลิโพรไพลีน 1%	32.549	5.598
	เส้นใยพอลิโพรไพลีน 2%	28.270	5.832

Pothisiri and Soklin [4] ได้ศึกษาการหลุดล่อนของคอนกรีตหลังจากสัมผัสความร้อนทั้งสี่ด้าน (เปิดผิวด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างด้วยแผ่นฉนวนเส้นใยเซรามิก) ตามเพลิงมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 45 นาที ตารางที่ 2.10 แสดงการหลุดล่อนของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตและค่าอัตราส่วนการลดน้ำหนักภายหลังการทดสอบ โดยจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีเส้นใยพอลิโพรไพลีนในส่วนผสม 0.2% โดยปริมาตรมีการสูญเสียน้ำหนัก 10% และการผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนพร้อมกับคอนกรีตสดหรือพร้อมกับมวลรวมละเอียดส่งผลให้คอนกรีตมีอัตราส่วนการลดน้ำหนักน้อยที่สุด เนื่องจากลำดับขั้นตอนในการผสมทำให้เส้นใยพอลิโพรไพลีนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนพร้อมกับมวลรวมละเอียดใช้ปริมาณสารลดน้ำน้อยกว่าการผสมพร้อมคอนกรีตสดเพื่อให้ได้ค่ายุบตัว (slump) ตามที่กำหนด

ตารางที่ 2.10 การหลุดล่อนของคอนกรีตหลังการสัมผัสความร้อน [4]

ชนิดตัวอย่าง	น้ำหนักที่หายไปหลังจากสัมผัสความร้อน (%)	การหลุดล่อนของคอนกรีต
CT1	13.2	 <p style="text-align: center;">WRR =14.0%      WRR =14.4%      WRR =11.2%</p>
CT2	6.9	 <p style="text-align: center;">WRR =7.3%      WRR =6.2%      WRR =7.2%</p>
CT3	8.2	 <p style="text-align: center;">WRR =9.2%      WRR =7.3%      WRR =8.1%</p>
CT4	6.9	 <p style="text-align: center;">WRR =6.3%      WRR =7.3%      WRR =7.1%</p>

หมายเหตุ ความหมาย CT1:  $ca \rightarrow fa \rightarrow c \rightarrow w \rightarrow sp$ , CT2:  $ca \rightarrow fa \rightarrow c \rightarrow w \rightarrow PP \rightarrow sp$

,CT3:  $ca \rightarrow PP \rightarrow fa \rightarrow c \rightarrow w \rightarrow sp$ , CT4:  $fa \rightarrow PP \rightarrow ca \rightarrow c \rightarrow w \rightarrow sp$ , ca: coarse aggregates, fa: fine aggregates, c: cement, w: water, sp: superplasticizer, PP: polypropylene fibers, w/c เท่ากับ 0.4



## บทที่ 3

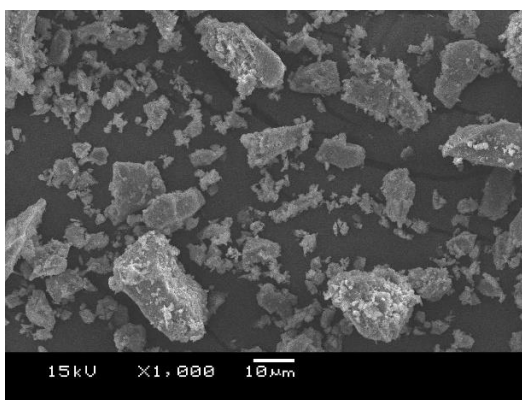
### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาและนำความรู้ทางด้านนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนามอร์ตาร์ โดยการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในมอร์ตาร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้จากงานวิจัยในอดีตพบว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดให้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มกำลังรับแรงแม้ภายหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้จึงประกอบด้วยวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสม คือ ท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีน โดยสามารถแบ่งขึ้นตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม จากนั้นทำการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่าง ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับแรงดัด การศึกษาโครงสร้างวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบการหลุดล่อน (Spalling) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและภายหลังจากการสัมผัสเพลิงไหม้ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

#### 3.2 วัสดุและอัตราส่วนผสม

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ไฮบริด องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ไฮบริด แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยรูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของปูนซีเมนต์ไฮบริด และทรายที่ใช้เป็นทรายละเอียดมีคุณสมบัติของทรายละเอียดคือ ค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความละเอียดดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ไฮบริด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮบริดจากการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
CaO	57.700
SiO <sub>2</sub>	23.600
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.310
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.540
SO <sub>3</sub>	2.760
MgO	1.320
K <sub>2</sub> O	0.599
Na <sub>2</sub> O	0.336
TiO <sub>2</sub>	0.280
Loss of Ignition (LOI)	4.557

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของทรายละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

รายการการทดสอบ	ผลการทดสอบ
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.62
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.64
Apparent Specific Gravity	2.66
Absorption (%)	0.62
Bulk Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	1,664
ค่าโมดูลัสความละเอียด (FM)	2.84

ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นชนิด MWCNT มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยรูปที่ 3.2 แสดงท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ใช้มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.4 โดยรูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเส้นใยพอลิโพรไพลีน

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย

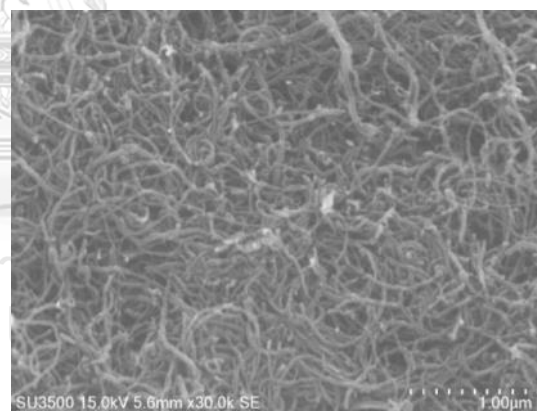
ชนิดท่อนาโนคาร์บอน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	ความยาว ( $\mu\text{m}$ )	ความบริสุทธิ์	ค่าผิวจำเพาะ SSA ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )
MWCNT	20-40	10-30	มากกว่าร้อยละ 95	มากกว่า 100	3,652-3,697

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิพรไพลีนที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิด	ความหนาแน่น ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\mu\text{m}$ )	จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	กำลังรับแรงดึง (MPa)
เส้นใยพอลิพรไพลีน	0.91	12	34	160-170	554



(ก) ภาพถ่ายลักษณะท่อนาโนคาร์บอน

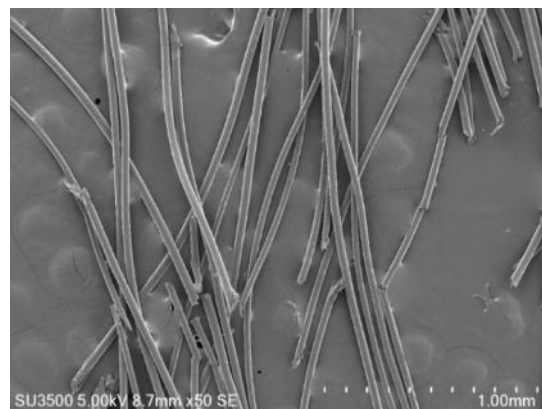


(ข) ภาพถ่ายด้วย SEM

รูปที่ 3.2 ท่อนาโนคาร์บอน



(ก) ภาพถ่ายลักษณะเส้นใยโพลีโพรไพลีน



(ข) ภาพถ่ายด้วย SEM

## รูปที่ 3.3 เส้นใยโพลีโพรไพลีน

ในการทดสอบชิ้นตัวอย่างสามารถแบ่งชิ้นตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 คือชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ปกติที่ไม่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน กลุ่มที่ 2 คือชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนที่อัตราส่วน 0.10%, 0.25% และ 0.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และกลุ่มที่ 3 คือชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนที่อัตราส่วน 0.10%, 0.25% และ 0.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์และเส้นใยโพลีโพรไพลีน 0.2% โดยปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กรณีศึกษา

กลุ่มที่	ชื่อส่วนผสม	ซีเมนต์ (wt% of cement)	ท่อนาโนคาร์บอน (wt% of cement)	เส้นใยโพลีโพรไพลีน (% by volume)
1	CN0	100	-	-
2	CN0.1	100	0.10	-
	CN0.25	100	0.25	-
	CN0.5	100	0.50	-
3	CN0-P	100	-	0.2
	CN0.1-P	100	0.10	0.2
	CN0.25-P	100	0.25	0.2
	CN0.5-P	100	0.50	0.2

หมายเหตุ ความหมาย C คือ cement, N คือ Carbon nanotube, P คือ Polypropylene fiber ; w/c เท่ากับ 0.485 และ s/c เท่ากับ 2.5

ตารางที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ โดยมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ( $w/c$ ) เท่ากับ 0.485 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ ( $s/c$ ) เท่ากับ 2.5 และใส่สารผสมเพิ่ม Sika viscocrete 10 ปริมาณร้อยละ 1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

กลุ่มที่	ชื่อส่วนผสม	ซีเมนต์ ( $\text{kg/m}^3$ )	น้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )	ทราย ( $\text{kg/m}^3$ )	สารผสมเพิ่ม ( $\text{kg/m}^3$ )	ท่อนาโนคาร์บอน ( $\text{kg/m}^3$ )	เส้นใยพอลิโพรไพลีน ( $\text{kg/m}^3$ )
1	CN0	666.7	323.3	1666.7	-	-	-
2	CN0.1	666.7	323.3	1666.7	6.7	0.7	-
	CN0.25	666.7	323.3	1666.7	6.7	1.7	-
	CN0.5	666.7	323.3	1666.7	6.7	3.3	-
3	CN0-P	666.7	323.3	1666.7	6.7	-	1.82
	CN0.1-P	666.7	323.3	1666.7	6.7	0.7	1.82
	CN0.25-P	666.7	323.3	1666.7	6.7	1.7	1.82
	CN0.5-P	666.7	323.3	1666.7	6.7	3.3	1.82

### 3.3 กรณีการทดสอบ

การทดสอบสามารถแบ่งขึ้นตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มแสดงดังตารางที่ 3.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด  $50 \times 50 \times 50$  mm และการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด  $50 \times 50 \times 210$  mm การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นการทดสอบก่อนสัมผัสความร้อน ช่วงที่สองเป็นการทดสอบหลังจากการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ตรวจสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการหล่อขึ้นตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม อัตราส่วนผสมอย่างละ 1 ตัวอย่าง โดยขึ้นตัวอย่างทั้งก่อนสัมผัสความร้อน และหลังสัมผัสความร้อนจะทำการชั่งน้ำหนักมวลรวมเพื่อหามวลที่หายไปหลังจากการสัมผัสความร้อน

ตารางที่ 3.7 จำนวนชิ้นตัวอย่าง

กลุ่มที่	ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด				กำลังรับแรงดัด			
		ก่อน สัมผัส ความ ร้อน	หลังสัมผัสความร้อนที่ อุณหภูมิ (°C)			ก่อน สัมผัส ความ ร้อน	หลังสัมผัสความร้อนที่ อุณหภูมิ (°C)		
			400	600	800		400	600	800
1	CN0	3	3	3	3	3	3	3	3
2	CN0.1								
	CN0.25								
	CN0.5								
3	CN0-P	3	3	3	3	3	3	3	
	CN0.1-P								
	CN0.25-P								
	CN0.5-P								

### 3.4 ขั้นตอนการผสม

เพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวในมอร์ตาร์ที่ดี การผสมมอร์ตาร์เสริมท่อนาโนคาร์บอนจึงมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

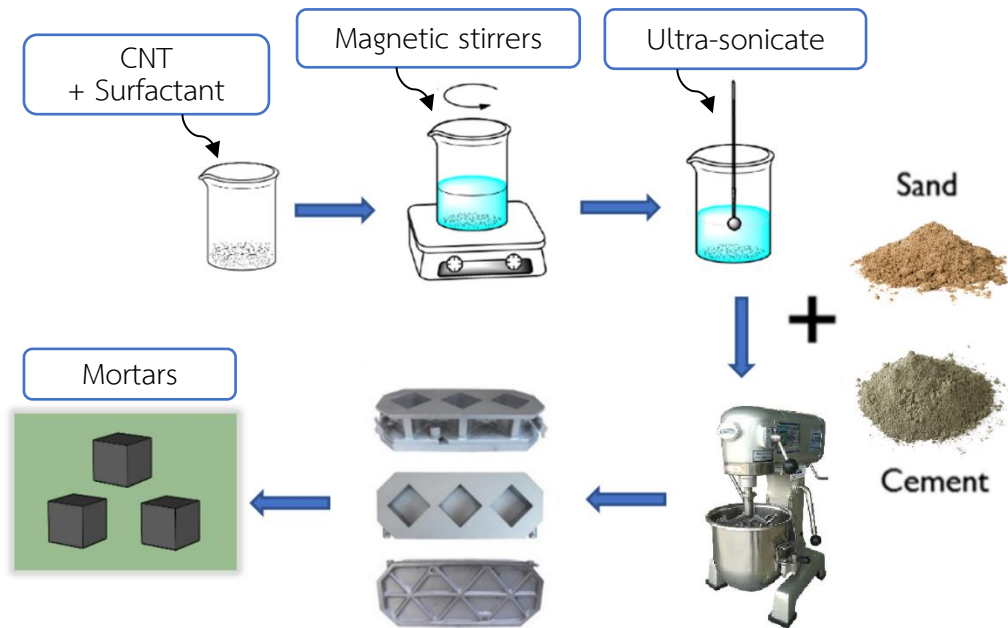
(1) ใส่ท่อนาโนคาร์บอนลงในบีกเกอร์ (รูปที่ 3.5) จากนั้นใส่สารผสมเพิ่ม Sika Viscocrete 10 ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของซีเมนต์ลงในบีกเกอร์ ซึ่งสารผสมเพิ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นสาร Surfactant ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว ช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวในมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก) และหลังจากนั้นจึงเติมน้ำตามปริมาณที่กำหนด

(2) รูปที่ 3.6 แสดงการปั่นโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจึงทำการ Ultra-sonicate เป็นเวลา 30 นาที ด้วยแอมพลิจูด 40 เปอร์เซ็นต์

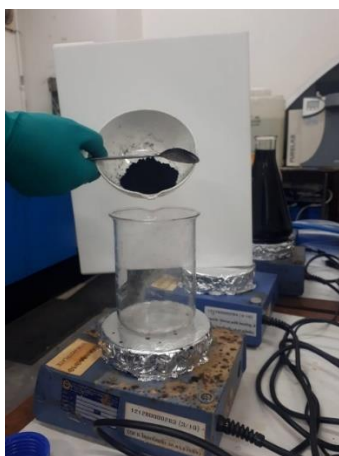
(3) รูปที่ 3.7 แสดงการนำสารที่ได้จากการผสมท่อนาโนคาร์บอน สารผสมเพิ่ม และน้ำ มาผสมรวมกับซีเมนต์และทราย และทำการปั่นผสมเป็นเวลา 4 นาที โดยใช้อัตราส่วนผสมที่มีเส้นใยพอลิโพรไฟลีน จะทำการผสมพร้อมกับผงปูนซีเมนต์กับทรายไปด้วย

(4) รูปที่ 3.8 แสดงเมื่อสิ้นสุดการผสมแล้วจึงเทมอร์ตาร์ลงแบบหล่อ และหลังจากถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน และเมื่อครบกำหนดหลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศา

เซลล์เซียส 1 วันก่อนทำการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้ความชื้นในชั้นตัวอย่างลดลงและมีสภาพใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่อยู่ในสภาวะที่ใช้งาน (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผสม



(ก) ตักท่อนาโนคาร์บอน



(ข) ผสมสารผสมเพิ่ม



(ค) ผสมน้ำ

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผสมท่อนาโนคาร์บอนกับน้ำ



(ก) Magnetic stirrers



(ข) Ultra-sonicate

รูปที่ 3.6 การผสมด้วย Magnetic stirrers และ Ultra-sonicate



รูปที่ 3.7 เครื่องปั่นผสมมอร์ตาร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก) แบบหล่อมอร์ตาร์ทดสอบกำลังรับแรงอัด



(ข) แบบหล่อมอร์ตาร์ทดสอบกำลังรับแรงดึง

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการหล่อลงแบบ





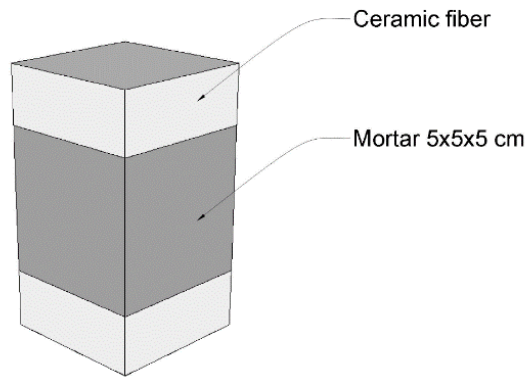
รูปที่ 3.9 เครื่องอบมอร์ตาร์ก่อนการทดสอบ 1 วัน

### 3.5 การให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่าง

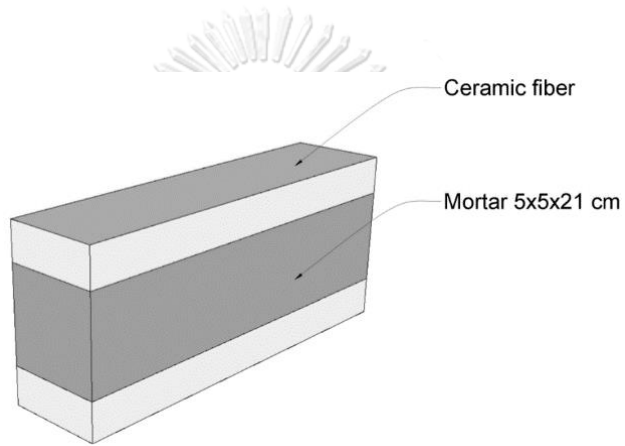
ตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกนำขึ้นจากบ่อต้มก่อนวัดทดสอบ 1 วัน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อนำน้ำออกจากมอร์ตาร์ ทั้งนี้เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่อยู่ในสถานะที่ใช้ งาน จากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปสัมผัสความร้อนก่อนนำมาทดสอบ รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ เตาทดสอบที่ใช้ โดยเป็นเตาไฟฟ้าขนาด 200x200x300 mm สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด 1,100 องศาเซลเซียส โดยให้ชิ้นตัวอย่างสัมผัสกับความร้อนทั้ง 4 ด้าน โดยปิดผิวด้านบนและด้านล่างของ ตัวอย่างด้วยแผ่นฉนวนเส้นใยเซรามิก ดังรูปที่ 3.11 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการให้ความร้อนของเตาไฟฟ้าต่อเวลาเป็นไปตามรูปที่ 3.12 หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบหากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์เตาทดสอบ

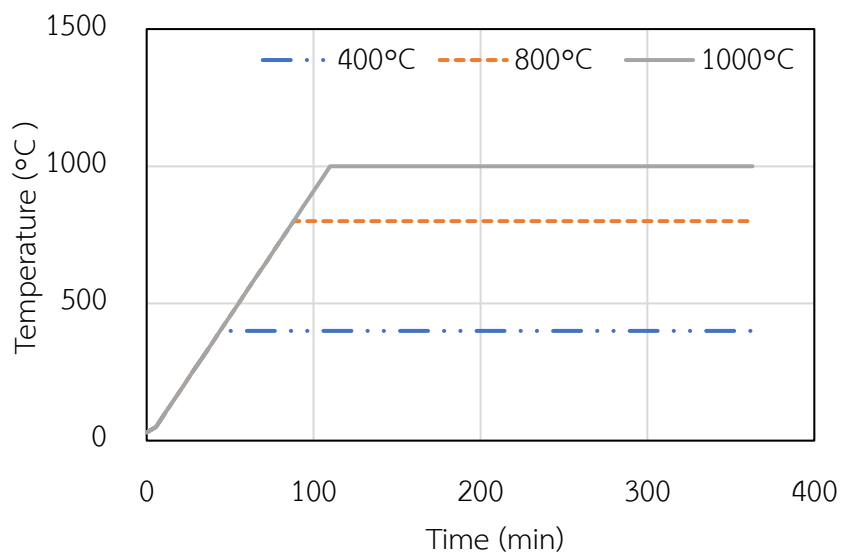


(ก) ชิ้นตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด



(ข) ชิ้นตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด

รูปที่ 3.11 ตำแหน่งฉนวนเส้นใยเซรามิก

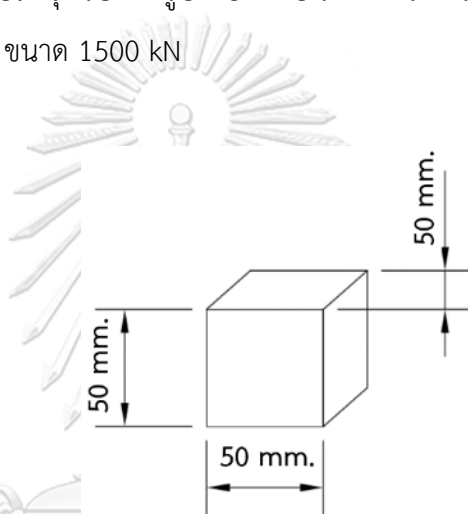


รูปที่ 3.12 อัตราการให้ความร้อนของเตาไฟฟ้า

### 3.6 การทดสอบ

#### 3.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [30] ตัวอย่างมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm ดังรูปที่ 3.13 ก่อนการทดสอบด้านทั้งสี่ของมอร์ตาร์ต้องเรียบเป็นระนาบตั้งฉากกับแนวแกน โดยยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.5 องศา หรือ 1 mm ต่อระยะ 100 mm ทำการวัดขนาดของตัวอย่าง กว้าง ยาว และสูงจำนวนด้านละ 2 ครั้งก่อนหาค่าเฉลี่ย เพื่อในการหาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและปริมาตร หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบโดยทำการกดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบถึงจุดวิบัติดังรูปที่ 3.14 บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด ณ จุดที่ตัวอย่างทดสอบวิบัติด้วยเครื่อง UTM ขนาด 1500 kN



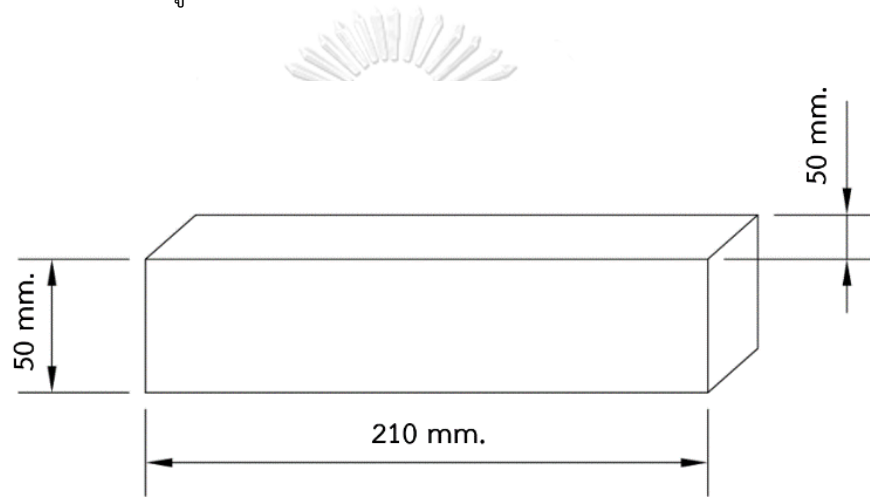
รูปที่ 3.13 ชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ASTM C109 [30]



รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ASTM C109 [30]

### 3.6.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน เป็นการทดสอบหาค่าโมดูลัสของการแตกร้าวโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C239 [31] ใช้ชิ้นตัวอย่างทรงปริซึมขนาด 50x50x210 mm ดังรูปที่ 3.15 ทำการวัดขนาดของตัวอย่างกว้าง ยาว และสูงจำนวนด้านละ 2 ครั้งก่อนหาค่าเฉลี่ย เพื่อในการหาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและปริมาตรของมอร์ตาร์ การทดสอบนี้ใช้วิธีแรงกดหนึ่งจุดที่กึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) โดยจัดตำแหน่ง เครื่องมือตามรูปที่ 3.16 หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ โดยทำการกดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบถึงจุดวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด ณ จุดที่ตัวอย่างทดสอบวิบัติ โดยสามารถหาค่าโมดูลัสของการแตกร้าวได้จากสมการ (1)



รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด ASTM C239 [31]



รูปที่ 3.16 มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงดัด ASTM C239 [31]

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

เมื่อ

$f_r$  คือ กำลังรับแรงดัด (เมกะปาสคาล)

$P$  คือ แรงสูงสุด (นิวตัน)

$L$  คือ ขวางคาน (มิลลิเมตร)

$b$  คือ ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก (มิลลิเมตร)

$d$  คือ ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก (มิลลิเมตร)

### 3.6.3 การทดสอบการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ (Mortar Spalling)

การหลุดล่อนของมอร์ตาร์ในขณะสัมผัสความร้อนอาจส่งผลต่อกำลังค้ำและความสามารถในการทนไฟได้ สำหรับกลไกของการหลุดล่อนประกอบไปด้วยความดันไอน้ำในโพรง และหน่วยแรงเชิงความร้อน (thermal stress) โดยที่ความดันจากไอน้ำที่เปลี่ยนสถานะจากน้ำในโพรงของเนื้อคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประกอบกับหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของมอร์ตาร์ ซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์เกิดการหลุดล่อน การทดสอบหาค่าการหลุดล่อนทำได้โดยการคำนวณหามวลรวมโดยหาน้ำหนักขณะสัมผัสความร้อนและหลังจากสัมผัสความร้อน แล้ววิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของมวลรวมที่หายไปของทั้ง 3 กลุ่มที่ทำการศึกษาดังสมการที่ 2

$$WRR = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ

$WRR$  คือ Weight reduction ratio หรือ เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไป (เปอร์เซ็นต์)

$W_0$  คือ น้ำหนักก่อนสัมผัสความร้อน (กรัม)

$W$  คือ น้ำหนักหลังสัมผัสความร้อน (กรัม)

### 3.6.4 การตรวจสอบองค์ประกอบภายในมอร์ตาร์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพื้นผิวของมอร์ตาร์ เนื่องจากต้องการทราบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในมอร์ตาร์ โดยตัวอย่างทดสอบใช้จากทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างก่อนสัมผัสความร้อน และหลังสัมผัสความร้อน

อย่างละ 1 ตัวอย่าง เพื่อดูโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์ลักษณะการกระจายตัวเมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนในเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกัน รวมถึงการคงอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิสูงรูปที่ 3.17 แสดงเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีน ด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM และการหลุดล่อน (Spalling) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและภายหลังจากการสัมผัสเพลิงไหม้ จากผลการศึกษาสามารถอภิปรายได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [30] โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและภายหลังจากการสัมผัสเพลิงไหม้จำนวน 3 ตัวอย่างต่อกรณีการทดสอบ จากผลการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

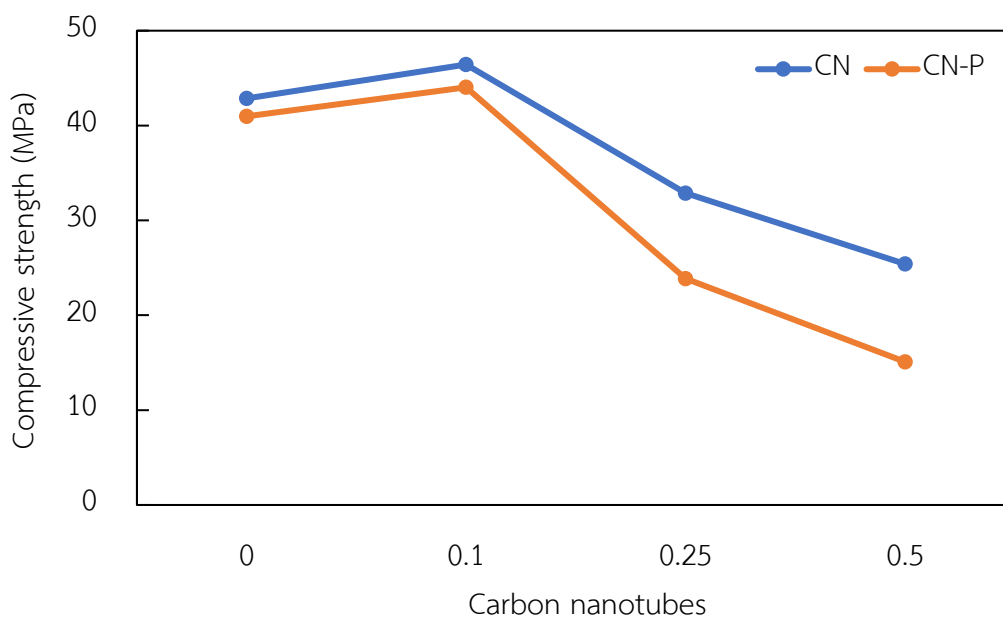
กลุ่มที่	ชื่อส่วนผสม	ท่อนาโนคาร์บอน (wt% of cement)	เส้นใยพอลิโพรไพลีน (% by volume)	กำลังรับแรงอัด (MPa)			
				ก่อนสัมผัสความร้อน	หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ (°C)		
					400	800	1000
1	CN0	-	-	42.9	31.7	19.2	9.0
2	CN0.1	0.10	-	46.4	33.7	22.0	9.8
	CN0.25	0.25		32.9	31.4	16.6	8.8
	CN0.5	0.50		25.4	24.7	8.8	5.7
3	CN0-P	-	0.2	41.0	31.7	18.0	9.9
	CN0.1-P	0.10		44.0	34.4	25.9	11.6
	CN0.25-P	0.25		23.9	23.8	16.4	9.3
	CN0.5-P	0.50		15.1	14.7	7.7	6.8

#### 4.1.1 อิทธิพลของปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าในกรณีของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่สัมผัสความร้อน จากการทดสอบจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า CN0 เพิ่มขึ้น 8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากท่อนานาโนคาร์บอนมีส่วนช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในระดับนาโนจึงส่งผลกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ดีขึ้น แต่การใช้อัตราส่วนผสมของท่อนานาโนคาร์บอนที่มากเกินไปไม่ได้ส่งผลดีต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ชิ้นตัวอย่าง CN0.25 และ CN0.5 กลับมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อน จึงส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของท่อนานาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง [23, 32, 33] ทั้งนี้งานการลดลงของกำลังรับแรงอัดในงานวิจัยนี้ที่ส่วนผสมท่อนานาโนคาร์บอน 0.25 และ 0.5% เกิดจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของ CNT ภายใต้งี้อ่อนไขการใช้สาร Surfactant เพียง 1% ซึ่งอาจเป็นปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวเมื่อปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด

ขณะที่ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่อัตราส่วน 0.2% โดยปริมาตรของมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม CN0-P จะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า CN0-P อยู่ 7 เปอร์เซ็นต์แต่ในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25-P และ CN0.5-P กลับมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างที่ยังไม่ได้ทำการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการใส่ท่อนานาโนคาร์บอนที่มีปริมาณมากขึ้นไม่ส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง





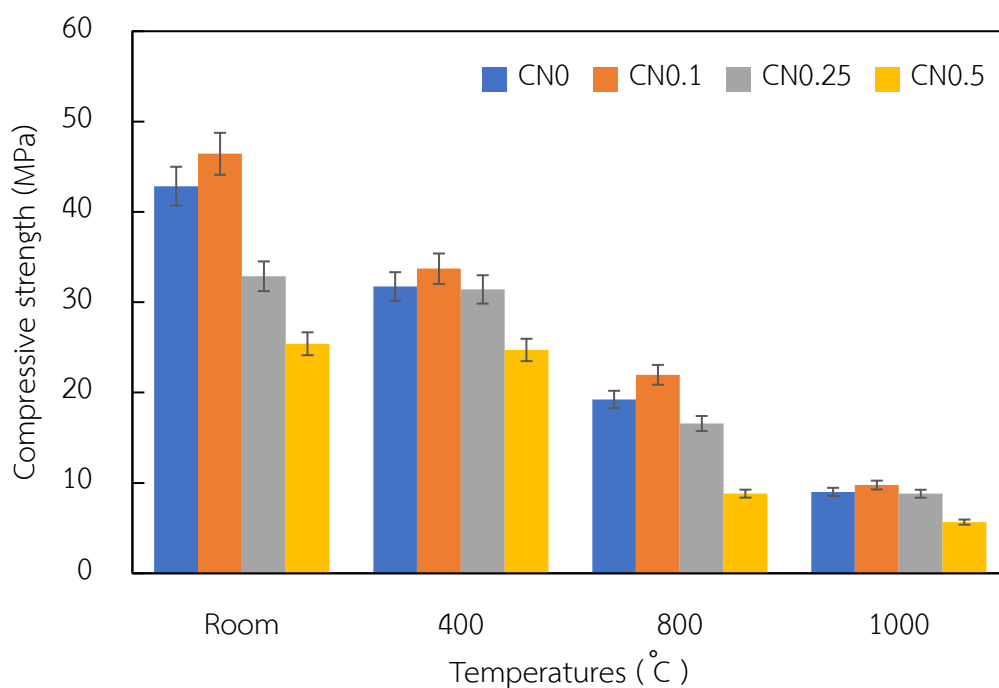
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อกำลังรับแรงอัด

#### 4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

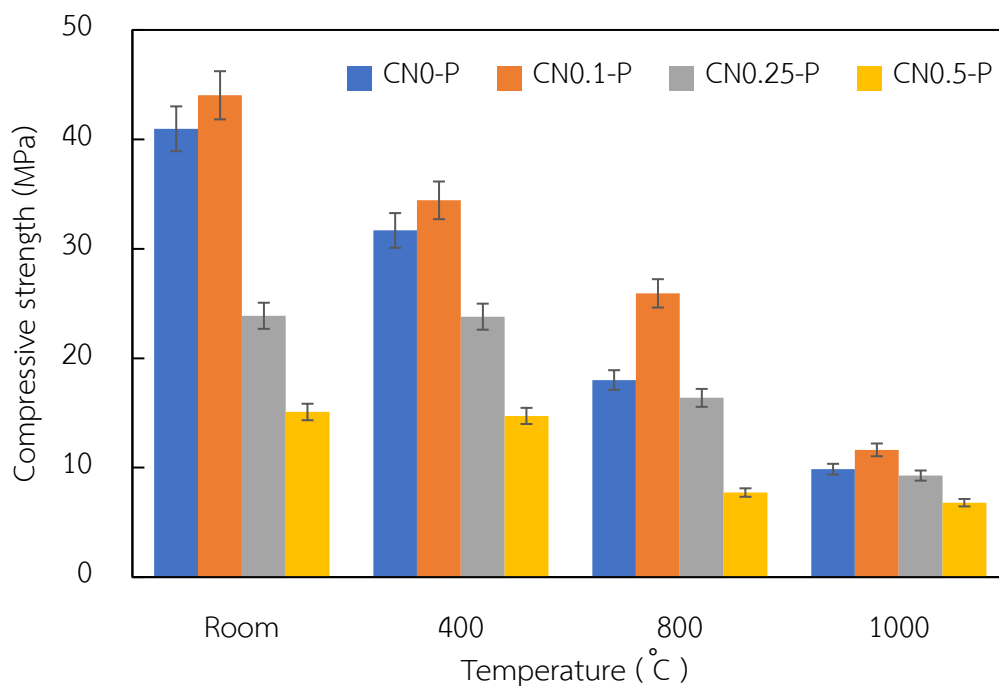
รูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าหลังจากการสัมผัสความร้อน มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน 0.1% (CN0.1) มีค่ากำลังรับแรงอัดคงค้างมากที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสกำลังรับแรงอัดมากขึ้น 6% ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสกำลังรับแรงอัดมากขึ้น 12% และขณะสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสกำลังรับแรงอัดมากขึ้น 8% ตามลำดับเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่าง CN0 จึงกล่าวได้ว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 0.1% ในซีเมนต์มอร์ตาร์ ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดภายในมอร์ตาร์หลังการสัมผัสภาวะเพลิงไหม้ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีจุดเดือดที่สูงจึงยังไม่เกิดการสลายตัวขณะสัมผัสความร้อนจึงยังมีส่วนช่วยการเติมเต็มช่องว่างในระดับนาโนได้ โดยท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุอัดแทรก (Filler) ในวัสดุซีเมนต์ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดก่อนและหลังจากการสัมผัสเพลิงไหม้ของมอร์ตาร์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและมีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีน 0.2% โดยปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยพอลิโพรไพลีนของชิ้นตัวอย่าง CN0.1-P หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ

1000 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มี ส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนหลังจากสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้ จึงกล่าวได้ว่าการที่มอร์ตาร์มีส่วนผสม ของเส้นใยพอลิโพรไพลีนในปริมาณ 0.2% ของปริมาตรช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดภายในมอร์ตาร์หลัง การสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้ได้ โดยเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนในการช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ อีกด้วย (อธิบายในหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป)



รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนภายหลังจากสัมผัสความร้อน



รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยโพลิโพรไพลีนภายหลังสัมผัสความร้อน

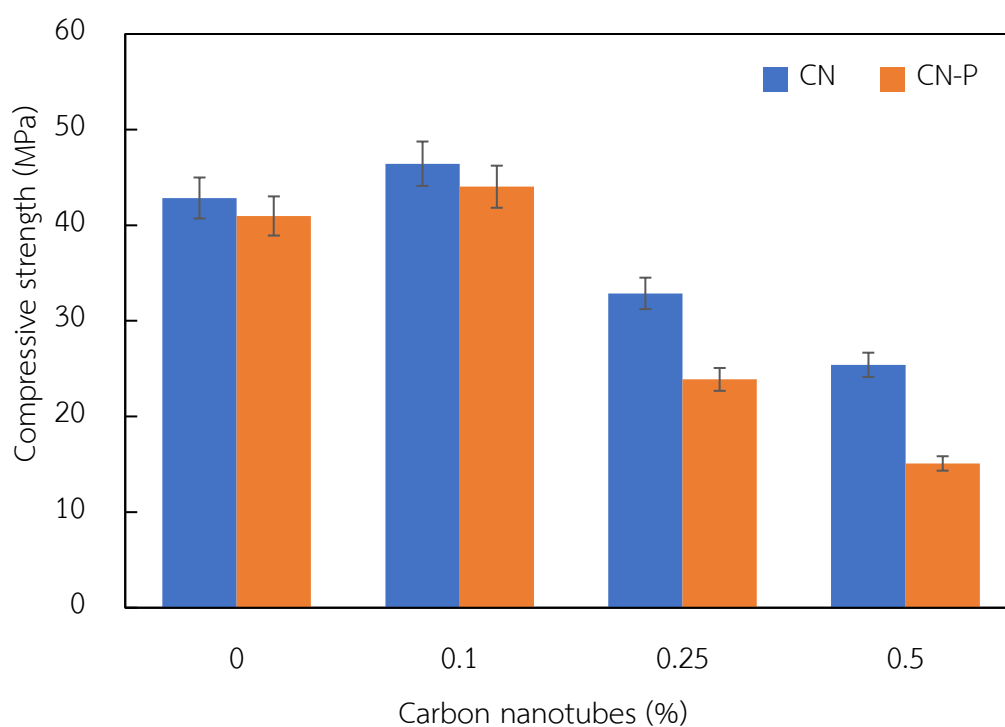
#### 4.1.3 อิทธิพลของการใส่เส้นใยโพลิโพรไพลีนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยโพลิโพรไพลีนมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเส้นใยโพลิโพรไพลีน เนื่องจากการมีเส้นใยโพลิโพรไพลีนไม่ได้ช่วยให้กำลังดีขึ้นก่อนการสัมผัสความร้อน

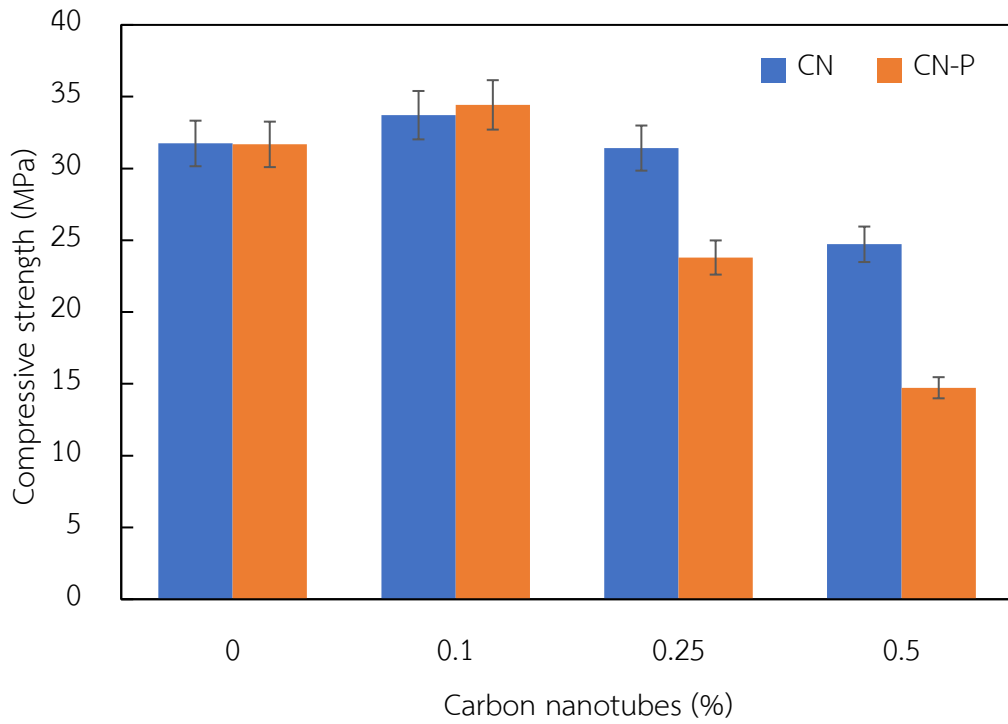
ในการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียสชิ้นตัวอย่าง CN0.25-P และ CN0.5-P มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีเส้นใยโพลิโพรไพลีน ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นอาจส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยและท่อนาโนคาร์บอนแย่ง ทำให้เป็นจุดที่อ่อนแอของโครงสร้างภายในเนื้อมอร์ตาร์ อีกทั้งพฤติกรรมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดเส้นใยไม่ได้มีคุณสมบัติช่วยรับแรงอัดที่ดีแต่จะส่งผลต่อพฤติกรรมในการรับแรงดึง ในการสัมผัสความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียสชิ้นตัวอย่าง CN0.25-P และ CN0.5-P กลับมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่า CN0-P เพียงเล็กน้อยจึงเห็นว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

อย่างไรก็ตามตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า CN0.1 ในสถานะหลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่สุด เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการ

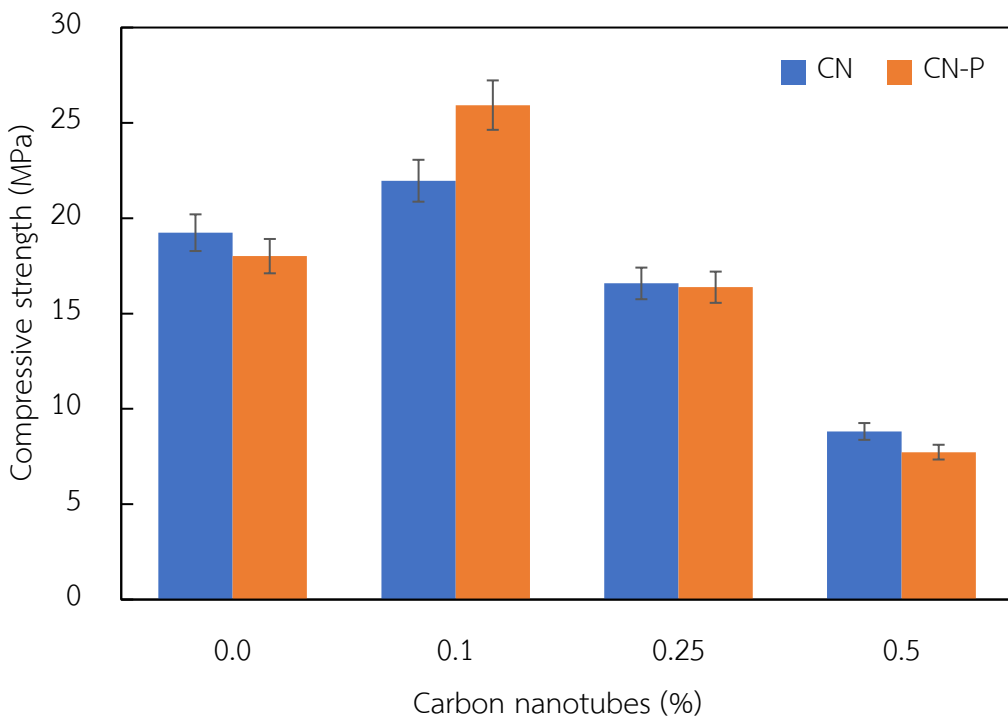
กระจายตัว อีกทั้งการเพิ่มเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนในการช่วยประสานช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นที่มากขึ้น เมื่อเส้นใยเกิดการละลายจะทำปริมาณไอน้ำที่อยู่ภายในสามารถไหลออกมาได้อย่างอิสระตามจุดที่เคยมีเส้นใยอยู่ ซึ่งช่วยลดการเกิดแรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้นได้ จึงช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ อีกทั้งยังทำให้มีกำลังค้ำงเหลืออยู่ภายในชิ้นตัวอย่าง แต่ทั้งนี้ ตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P ในสภาวะก่อนการสัมผัสความร้อนมีกำลังที่ลดลง 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์เล็กน้อยไม่นับสำคัญ ในการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะเห็นว่า กรณีชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีกำลังมากกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนทุกกรณี เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยเกิดการหลุดล่อนที่มากกว่าจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง



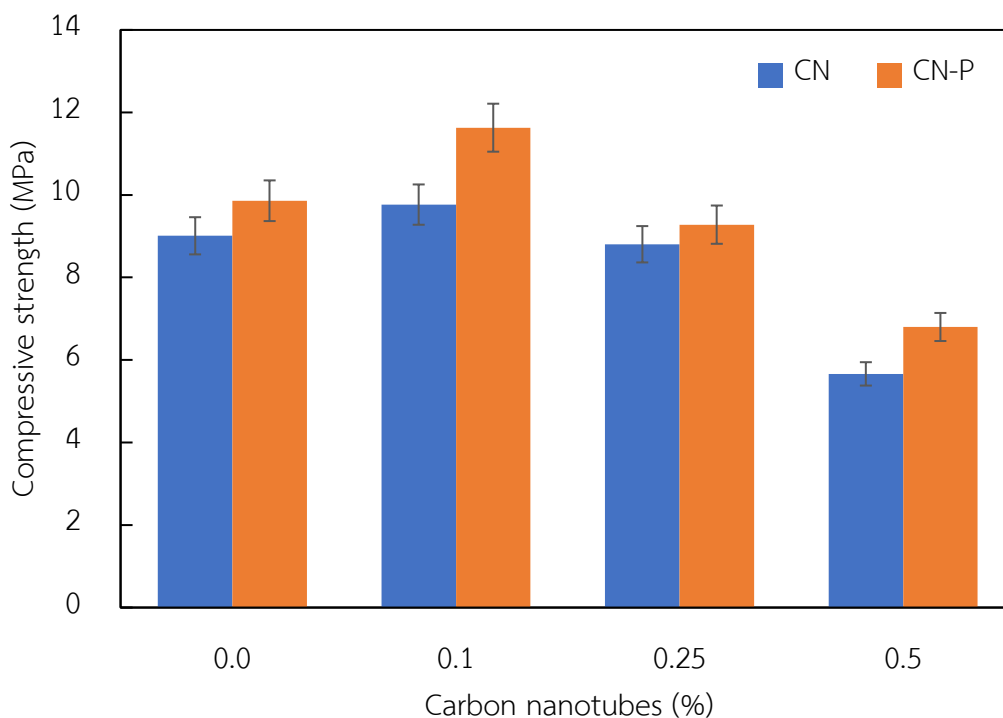
รูปที่ 4.4 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัด ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.1.4 การวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัด

จากตารางที่ 4.1 การทดสอบจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 และ CN0.1-P มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า CN0 ทั้งในสภาวะก่อนสัมผัสความร้อนและหลังจากสัมผัสความร้อน เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีจุดเดือดที่สูง และมีส่วนในการช่วยเติมเต็มรูพรุนภายในมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นที่มากขึ้น [34] และการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนช่วยเพิ่มกำลังค้ำภายในมอร์ตาร์เมื่อเกิดการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด แต่ในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 CN0.5 กลับมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อนจึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ [15] จึงสามารถสรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัดคือ มอร์ตาร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมอยู่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ (CN0.1) และมอร์ตาร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมอยู่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์กับส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีน 0.2% โดยปริมาตรของมอร์ตาร์ (CN0.1-P) ทั้ง 2 อัตราส่วนผสมนี้เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมทั้งในสภาวะปกติและภายหลังสัมผัสความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด

## 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C239 [31] โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและภายหลังจากการสัมผัสเพลิงไหม้ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

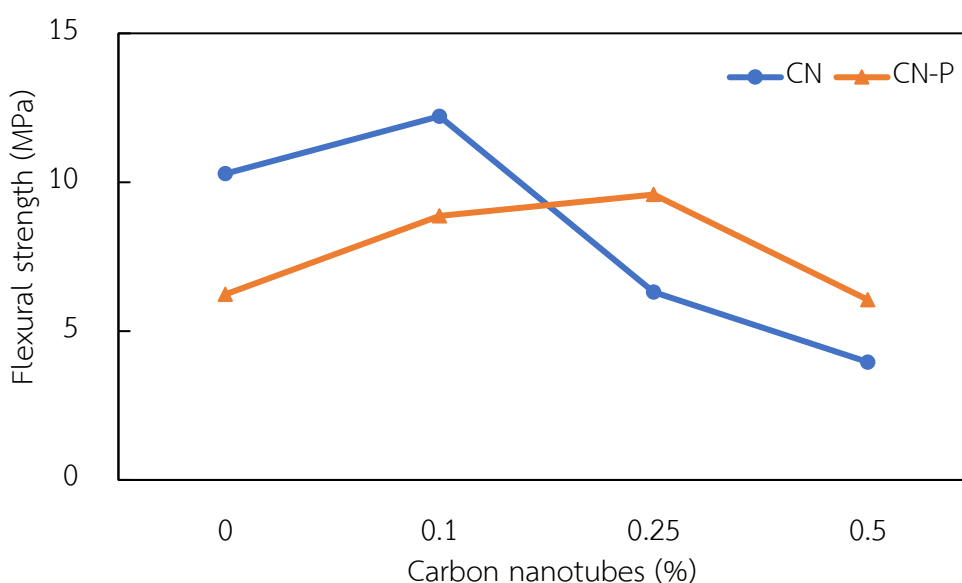
กลุ่มที่	ชื่อ ส่วนผสม	ท่อนานโน คาร์บอน (wt% of cement)	เส้นใยพอลิ โพรไพลีน (% by volume)	กำลังรับแรงดัด (MPa)			
				ก่อน สัมผัส ความ ร้อน	หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ ( ° C )		
					400	800	1000
1	CN0	-	-	10.29	5.11	1.44	0.68
2	CN0.1	0.1	-	12.22	6.41	1.92	0.92
	CN0.25	0.25	-	6.31	2.44	1.07	0.80
	CN0.5	0.5	-	3.96	1.57	0.44	0.40
3	CN0-P	-	0.2	6.24	5.88	1.58	0.94
	CN0.1-P	0.1	0.2	8.86	8.51	2.73	1.25
	CN0.25-P	0.25	0.2	9.59	8.92	2.19	1.18
	CN0.5-P	0.5	0.2	6.05	3.89	1.38	0.65

### 4.2.1 อิทธิพลของปริมาณท่อนานโนคาร์บอนต่อกำลังดัดของมอร์ตาร์

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่าในกรณีของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่สัมผัสความร้อนจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 จะมีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0 อยู่ 16 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของท่อนานโนคาร์บอนที่มีกำลังรับแรงดึงที่สูงอีกทั้งภายในเนื้อมอร์ตาร์มีความพรุนและรอยแตกขนาดเล็กระดับนาโน การมีอยู่ของท่อนานโนคาร์บอนมีส่วนในการช่วยเติมเต็ม และท่อนานโนคาร์บอนคาร์บอนจะเป็นตัวประสานรอยแตกขนาดนาโนที่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 และ CN0.5 กลับมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ลดลงอยู่ 39 และ 62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อน ซึ่งการรวมกลุ่มกันของท่อนาโนคาร์บอนจะทำให้จุดนั้นเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุดจึงส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ นอกจากนี้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากเกินไป [35-37] อาจเข้าไปแทรกตัวและเติมเต็มช่องว่างในวัสดุซีเมนต์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างเพียงพอสำหรับรองรับการเติบโตของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเป็นสาเหตุให้ส่วนผสมมีกำลังรับแรงดัดที่ลดลง อีกทั้งอัตราส่วนผสมของสาร Surfactant อาจมีปริมาณไม่เหมาะสมสำหรับปริมาณท่อนาโนที่เพิ่มขึ้น

การมีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P และ CN0.25-P มีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0-P คือ 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากการเติมเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนช่วยในการประสานรอยแยกที่เกิดขึ้นในตอนทดสอบกำลังรับแรงดัดทำให้ชิ้นตัวอย่างสามารถรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้นไม่เกิดการวิบัติในทันที แต่ในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.5-P กลับมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ลดลง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อนส่งผลให้เป็นจุดที่อ่อนแอเมื่อท่อนาโนคาร์บอนรวมตัวกันไม่เกิดการกระจายตัวที่ดี อีกทั้งลักษณะเนื้อผิวของชิ้นตัวอย่างดูไม่สมบูรณ์มีความพรุนมากอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.9 จากการที่ใช้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากเกินไปจึงส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ลดลง ทั้งนี้ขณะก่อนสัมผัสความร้อนมีพฤติกรรมการรับแรงดัดของ CN0-P และ CN0.1-P ที่ลดลงเมื่อเทียบกับ CN0 เนื่องจากความชื้นของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่นำแช่น้ำก่อนทำการผสมซึ่งอาจส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อกำลังรับแรงดัด



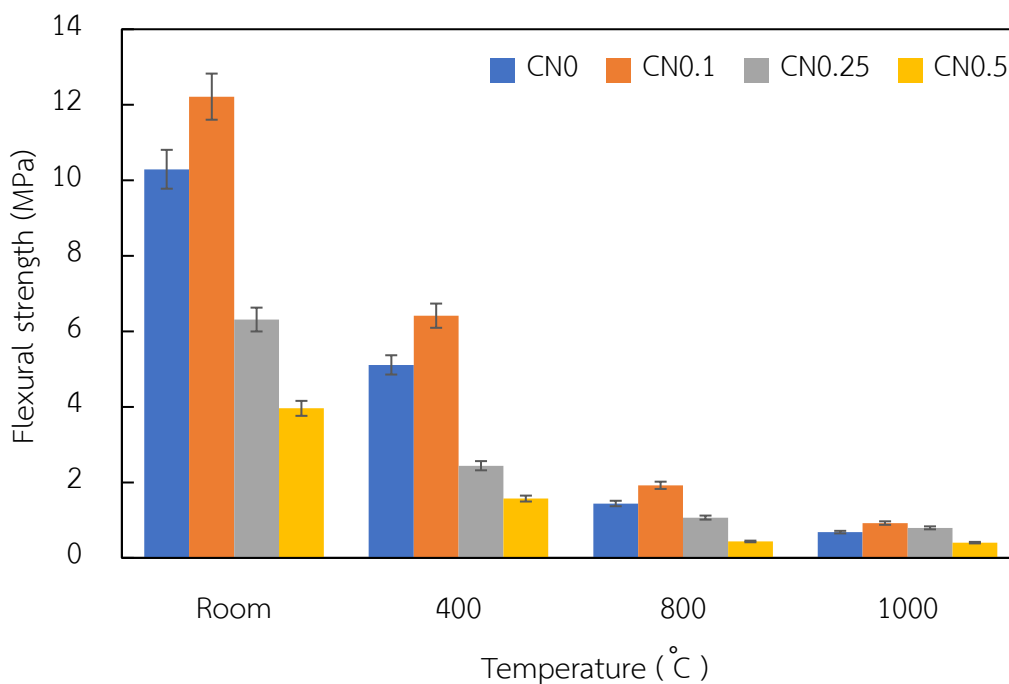


รูปที่ 4.9 ลักษณะเนื้อผิวของชิ้นตัวอย่าง CN0.5-P

#### 4.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังตัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 4.10 แสดงค่ากำลังรับแรงตัดของมอร์ตาร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนภายหลังจากสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงตัดของมอร์ตาร์ที่อุณหภูมิปกติ จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการทดสอบกำลังรับแรงตัดของมอร์ตาร์ผสมของท่อนาโนคาร์บอนการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงตัดคงค้างเหลือมากที่สุดคือ 20% การสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสทำให้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงตัดคงเพิ่มขึ้นถึง 25% และที่การสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 และ CN0.25 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงตัดมากขึ้น 26% และ 14% ตามลำดับเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่าง CN0

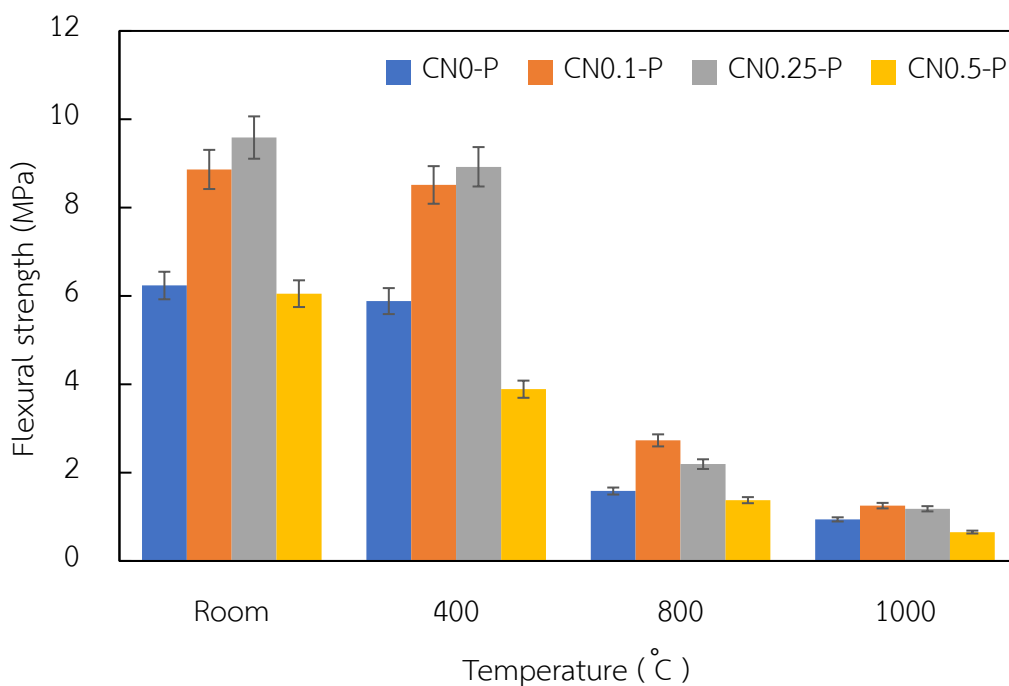
อาจกล่าวได้ว่าการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.1% ของน้ำหนักซีเมนต์ ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงตัดภายในมอร์ตาร์เมื่อเกิดการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด อีกทั้งท่อนาโนคาร์บอนมีจุดเดือดที่สูงจึงยังไม่เกิดการสลายตัวเมื่อสัมผัสความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด แต่ในชิ้นตัวอย่าง CN0.5 หลังสัมผัสความร้อนมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังรับแรงตัดที่มากเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่าง CN0 ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีอีกมอร์ตาร์มีคุณสมบัติรับแรงดึงที่ไม่ดี จึงทำให้จุดที่ท่อนาโนคาร์บอนจับรวมตัวกันจึงเป็นจุดที่อ่อนแอ เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงตัดจึงทำให้ได้รับกำลังรับแรงตัดที่ไม่ดี



รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงดัดคงค้างของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน

รูปที่ 4.11 แสดงค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายหลังการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่อุณหภูมิปกติ จากผลการศึกษการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 31% การสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 42% และที่การสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1-P มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 25% เมื่อเทียบกับขึ้นตัวอย่าง CN0-P

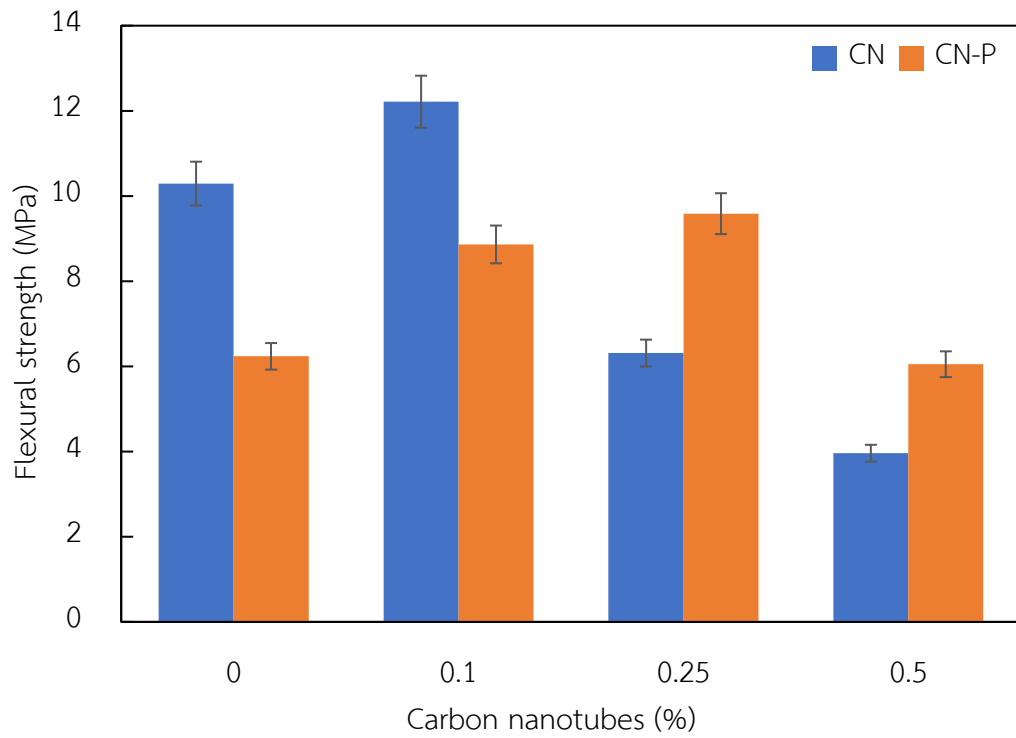
อาจกล่าวได้ว่าการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 0.1% และ 0.25% และมีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยทำให้มีกำลังดัดคงค้างมากขึ้น เมื่อเกิดการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน (ไม่ผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีน) ข้างต้น



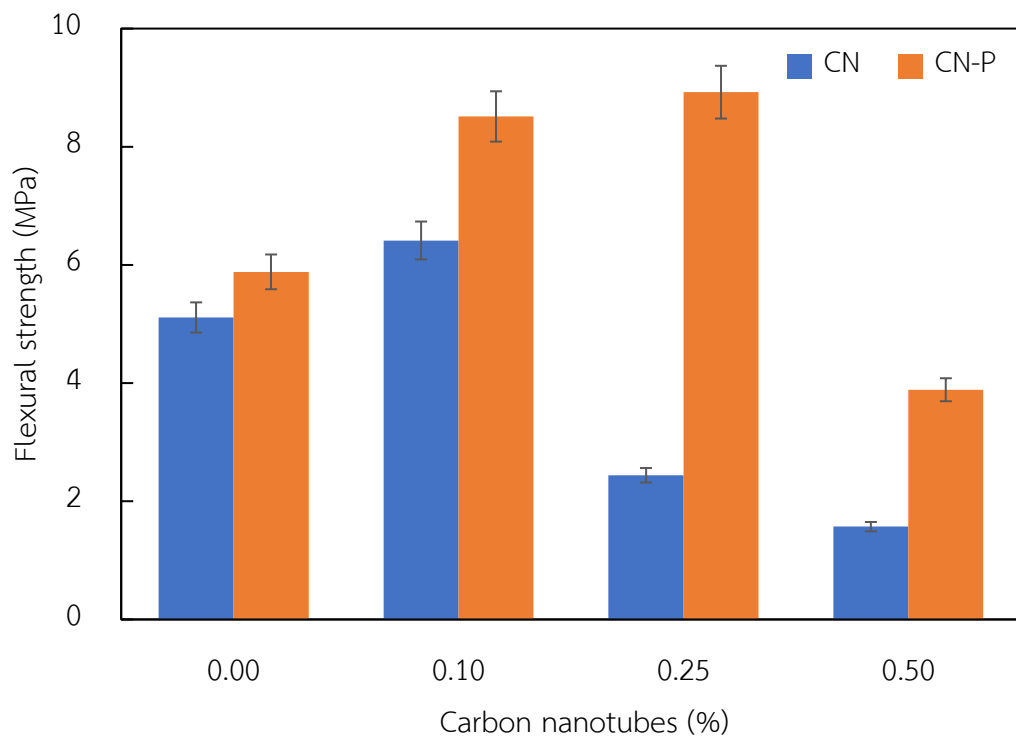
รูปที่ 4.11 กำลังดัดค้ำของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยพอลิโพรไพลีน

#### 4.2.3 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังดัดของมอร์ตาร์

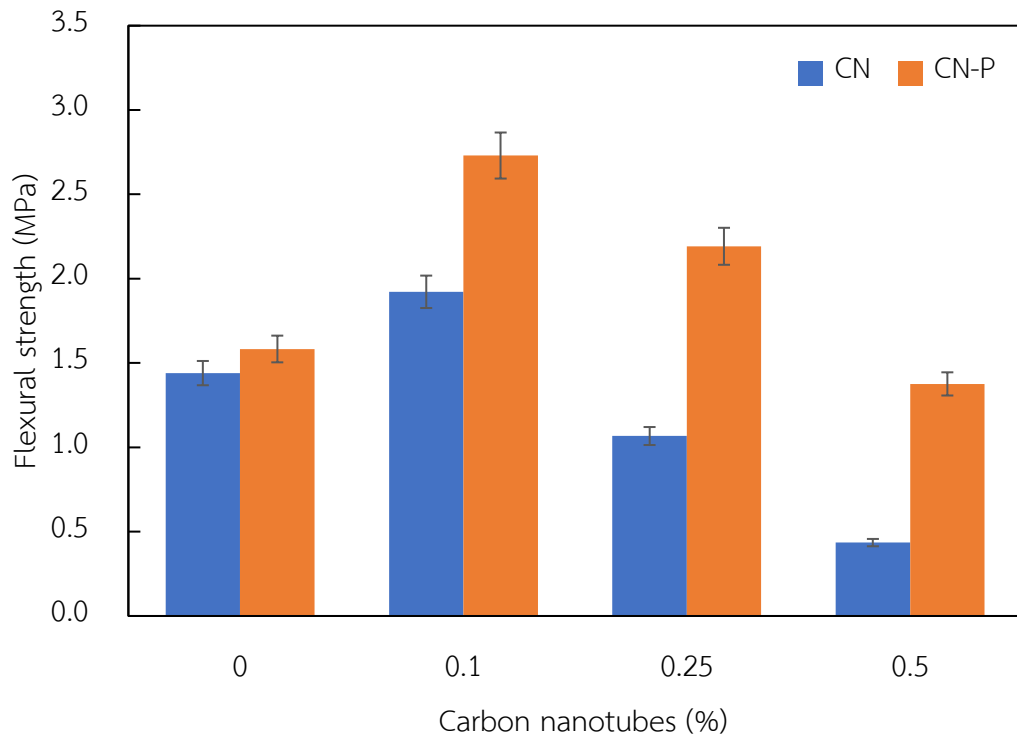
อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนแสดงในรูปที่ 4.12 – 4.15 จากผลการทดสอบจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นพอลิโพรไพลีนมีส่วนในการประสานรอยแตกที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ ดังที่กล่าวไว้ในส่วนของกำลังรับแรงอัด เมื่อเส้นใยเกิดการละลายตัวเมื่อถึงจุดเดือด ณ ตำแหน่งที่เคยมีเส้นใยอยู่เมื่อเกิดการสลายตัวตำแหน่งนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นยาวตรง จึงทำปริมาณไอน้ำที่อยู่ภายในสามารถไหลออกมาได้อย่างอิสระตามจุดที่เคยมีเส้นใยอยู่ [38] ดังรูปที่ 4.16 สามารถอธิบายได้ว่าขณะเกิดการสลายตัวของเส้นใยช่วยลดการเกิดแรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้นได้ เมื่อขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิโพรไพลีน จึงมีส่วนช่วยลดการหลุดล่อนของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ทำให้มีกำลังค้ำเกิดขึ้นส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้น



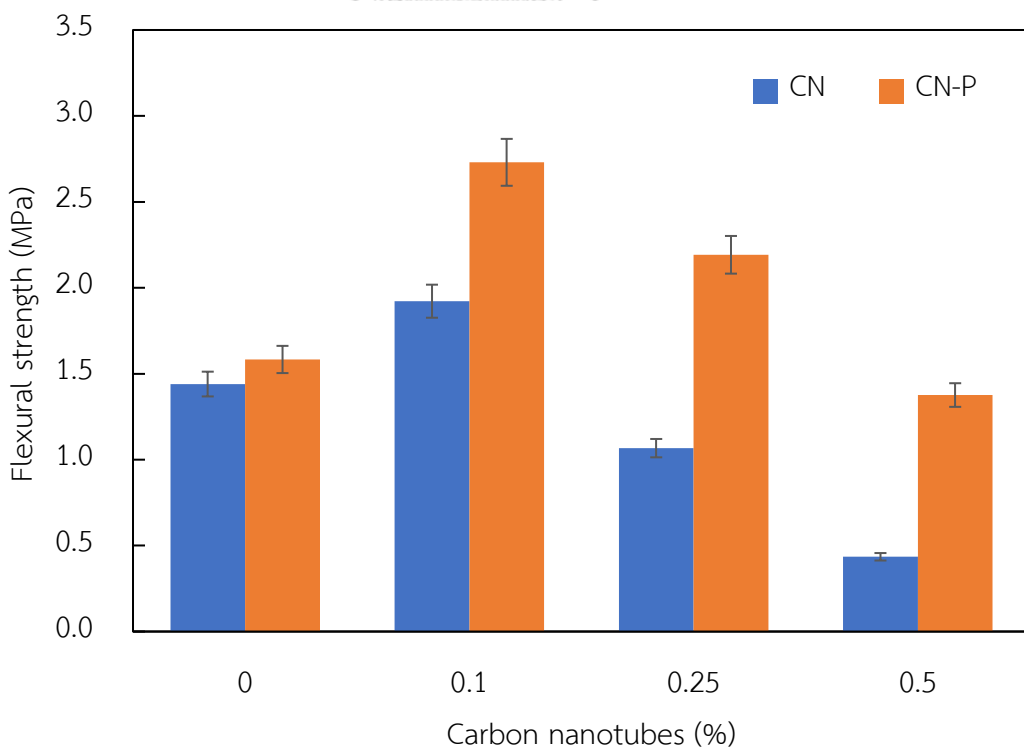
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัด ณ อุณหภูมิห้อง



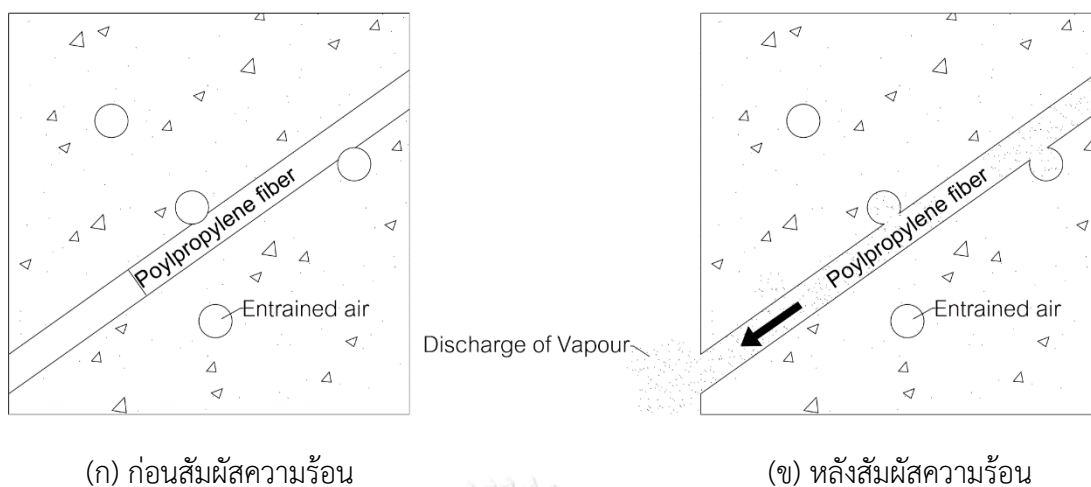
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส



(ก) ก่อนสัมผัสความร้อน

(ข) หลังสัมผัสความร้อน

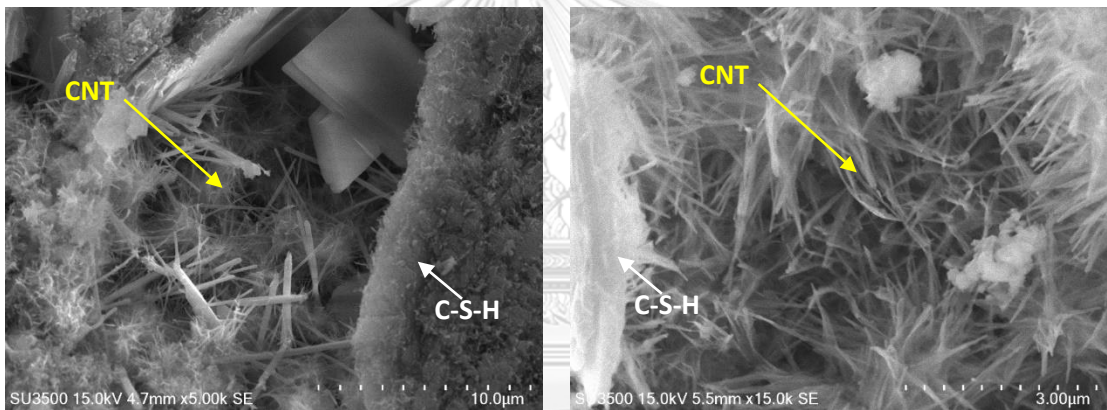
รูปที่ 4.16 การละลายของเส้นใยโพลีโพรไพลีน

#### 4.2.4 การวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงดัด

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่า CN0 ทั้งในสภาวะก่อนสัมผัสความร้อนและหลังจากสัมผัสความร้อน เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีจุดเดือดที่สูงและมีส่วนในการช่วยเติมเต็มรูพรุนภายในมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นที่มากขึ้น และการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอน ช่วยเพิ่มกำลังค้ำภายในมอร์ตาร์เมื่อเกิดการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด การเพิ่มส่วนผสมของเส้นใยโพลีโพรไพลีนในชั้นตัวอย่าง CN0.1-P และ CN0.25-P ช่วยส่งผลต่อพฤติกรรมรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ CN0 หลังจากสัมผัสความร้อนแล้วตามอุณหภูมิที่กำหนด เนื่องจากเส้นใยโพลีโพรไพลีนมีส่วนช่วยลดการหลุดล่อนภายในมอร์ตาร์ แต่ขณะก่อนสัมผัสความร้อนมีพฤติกรรมรับแรงดัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับ CN0 เนื่องจากความชื้นของเส้นใยโพลีโพรไพลีนที่นำแช่น้ำก่อนทำการผสมซึ่งอาจส่งผลต่อชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามในตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 CN0.5 และ CN0.5-P กลับมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ลดลง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อนจึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ จึงพอสรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมในการรับแรงดัดคือ มอร์ตาร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมอยู่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ (CN0.1) และมอร์ตาร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมอยู่ 0.1 และ 0.25 เปอร์เซ็นต์ กับส่วนผสมของเส้นใยโพลีโพรไพลีน 0.2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตร (CN0.1 และ CP0.25-P)

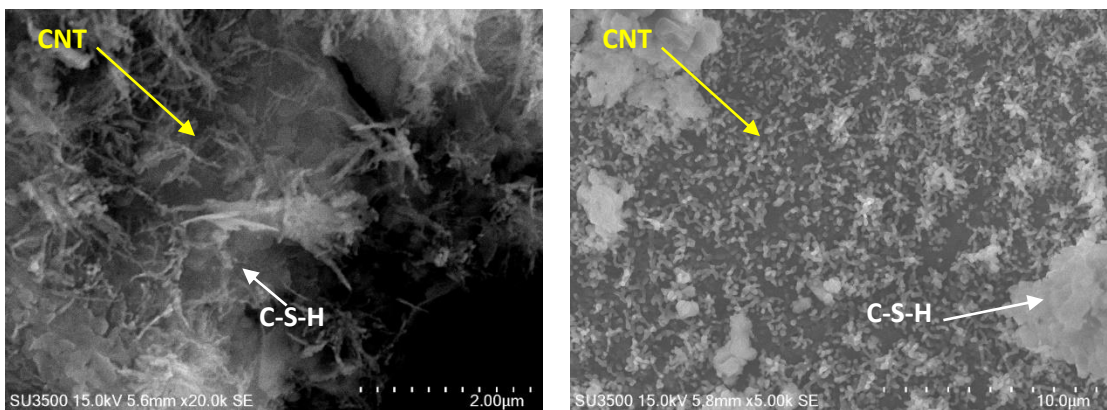
### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM

รูปที่ 4.17 – 4.19 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1, CN0.25 และ CN0.5 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพของตัวอย่างขณะอุณหภูมิห้องพบว่า ท่อนาโนคาร์บอนแทรกอยู่ตามช่องว่างภายในชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ช่วยเติมเต็มรูพรุน และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ยังปรากฏเห็นท่อนาโนคาร์บอนอยู่ภายในชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ และยังคงช่วยเติมเต็มรูพรุนขณะถูกสัมผัสความร้อน แต่ขณะสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียสสังเกตเห็นว่ามอร์ตาร์มีความพรุนภายในที่มากขึ้นเนื่องจากการสัมผัสความร้อน ทั้งนี้ยังสังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะหดลงเนื่องจากการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส



(ก) ก่อนสัมผัสความร้อน (ข) 400 องศาเซลเซียส

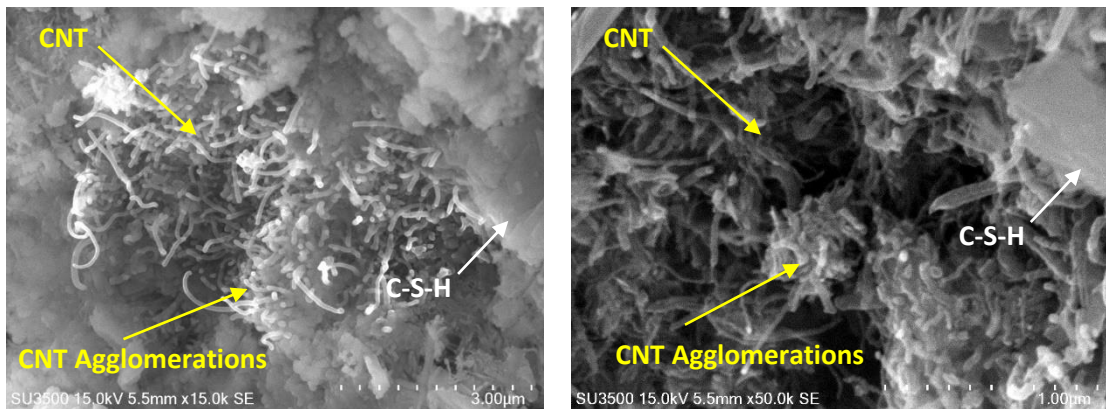
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ค) 800 องศาเซลเซียส

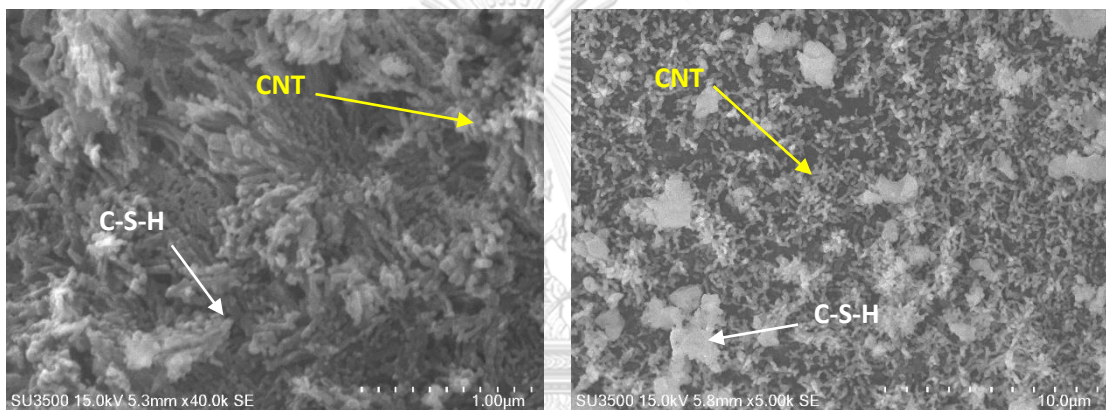
(ง) 1000 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของ CN0.1



(ก) ก่อนสัมผัสความร้อน

(ข) 400 องศาเซลเซียส



(ค) 800 องศาเซลเซียส

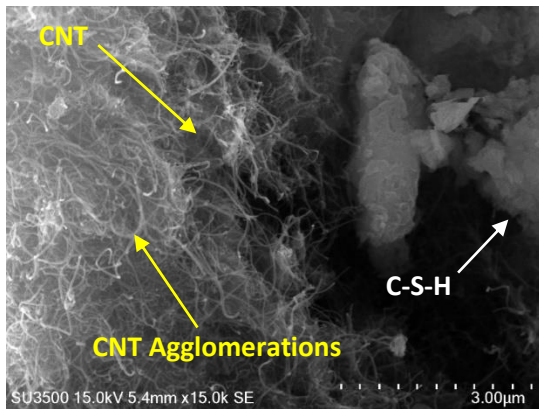
(ง) 1000 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของ CN0.25

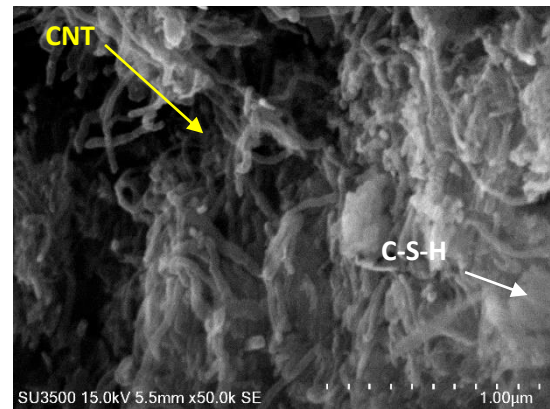
## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อีกทั้งยังสังเกตเห็นว่าที่ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 และ CN0.5 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่มีปริมาณมากขึ้นมีการกระจายตัวที่ไม่ดีนัก มีการรวมตัวและพันกันของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเทียบกับขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 จึงส่งผลต่อกำลังเชิงกลของมอร์ตาร์ดังที่ได้ทดสอบในส่วนของการรับแรงอัดและการรับแรงดัดทั้งก่อนและหลังสัมผัสความร้อน โดยจุดที่มีการรวมตัวของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นจุดที่อ่อนแอของโครงสร้างในมอร์ตาร์ นอกจากนี้การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันแสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในมอร์ตาร์แต่เป็นตัวประสานความพรุนในระดับนาโนที่ดี

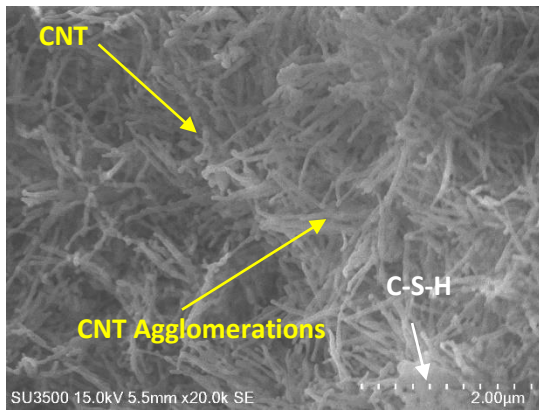




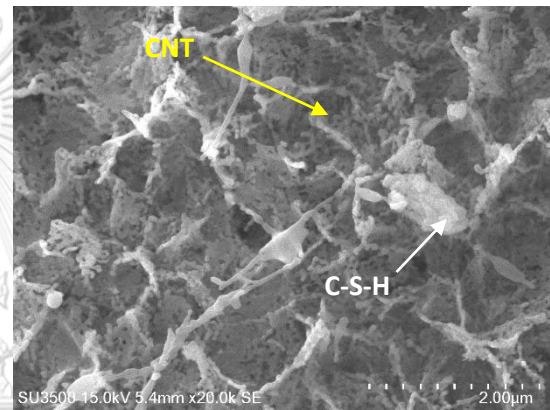
(ก) ก่อนสัมผัสความร้อน



(ข) 400 องศาเซลเซียส



(ค) 800 องศาเซลเซียส



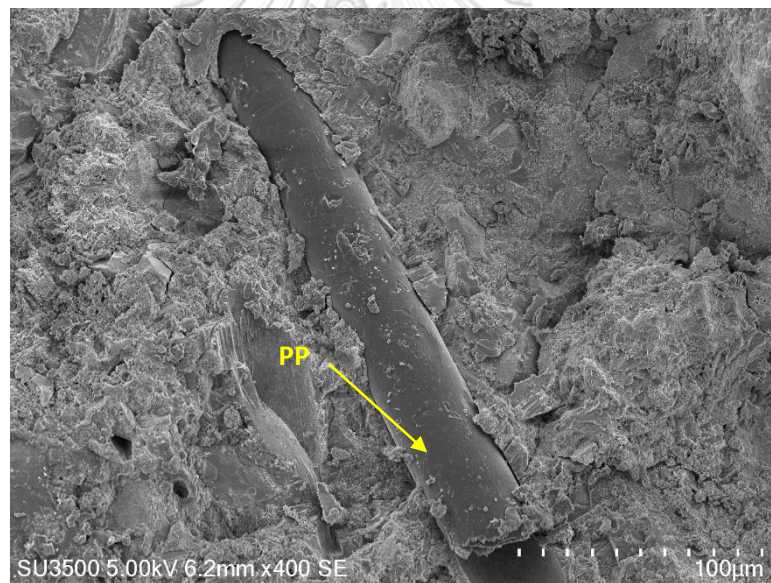
(ง) 1000 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของ CN0.5

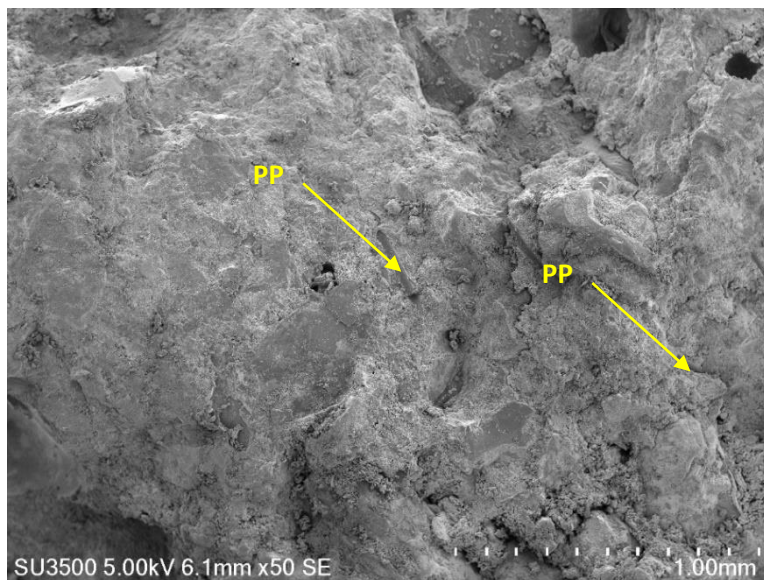
รูปที่ 4.20-4.22 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อmortarของสัดส่วน CN0.1-P, CN0.25-P และ CN0.5-P ตามลำดับ ซึ่งแสดงการมีอยู่ของเส้นใยพอลิโพรไพลีนในชั้นตัวอย่างmortar



รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของ CNO.1-P อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของ CNO.25-P อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของ CN0.5-P อุณหภูมิห้อง

#### 4.4 การหลุดล่อน

รูปที่ 4.23 แสดงค่าการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ที่ผสมปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 0.00%, 0.10%, 0.25% และ 0.50% ของน้ำหนักซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน หลังจากสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าในกรณีของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่สัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวอย่างชิ้นมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่าการหลุดล่อนมากกว่าตัวอย่างชิ้นมอร์ตาร์ CN0 อยู่ 2 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน อีกทั้งที่ 800 และ 1000 องศาเซลเซียสมีการหลุดล่อนที่เท่ากันอาจเป็นเพราะปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เล็กน้อยอาจไม่เห็นความแตกต่างมากนักในการทดสอบการหลุดล่อน

แต่ในชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 และ CN0.5 กลับมีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลง เนื่องจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมีจุดเดือดที่สูงจึงยังไม่เกิดการสลายตัวยังมีส่วนช่วยในการยึดเกาะภายในเนื้อมอร์ตาร์ในระดับนาโน นอกจากนี้เมื่อผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในอัตราส่วน 0.2% โดยปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าชิ้นมอร์ตาร์ CN0-P, CN0.1-P, CN0.25-P และ CN0.5-P มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นมอร์ตาร์ CN0

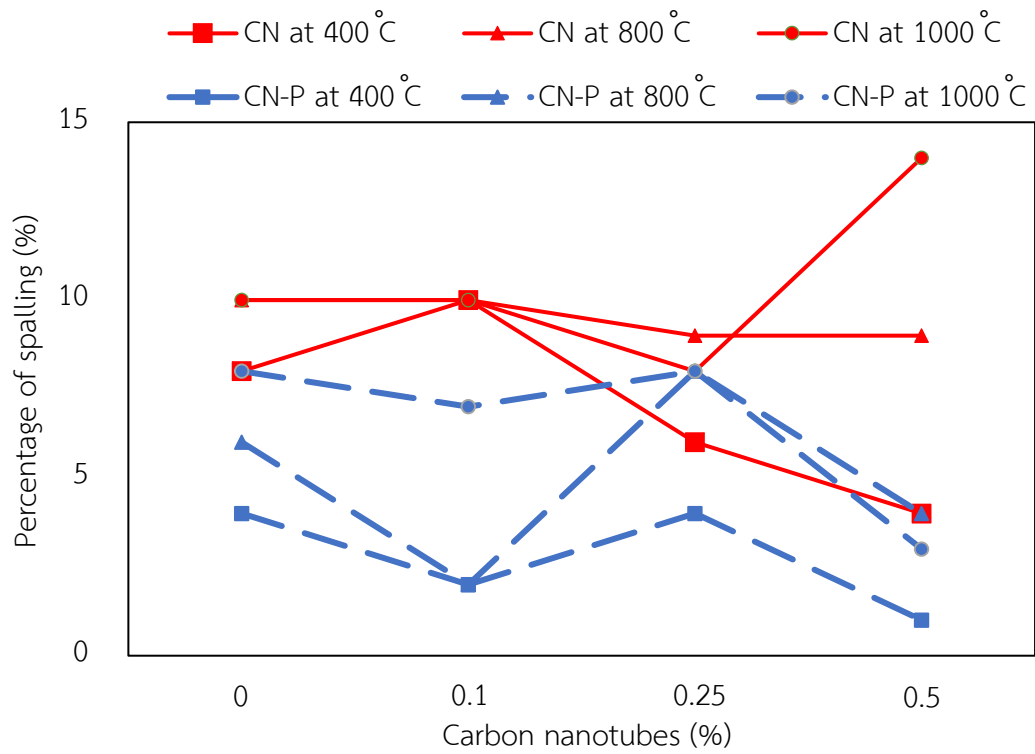
สำหรับมอร์ตาร์ที่สัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสตัวอย่างชิ้นมอร์ตาร์ CN0.1 มีค่าการหลุดล่อนเท่ากับตัวอย่างชิ้นมอร์ตาร์ CN0 ในขณะที่ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 และ CN0.5 มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลง เมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0 และมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเส้น

ใยพอลิโพรไพลีนพบว่าชั้นมอร์ตาร์ CN0-P, CN0.1-P, CN0.25-P และ CN0.5-P มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับชั้นมอร์ตาร์ CN0

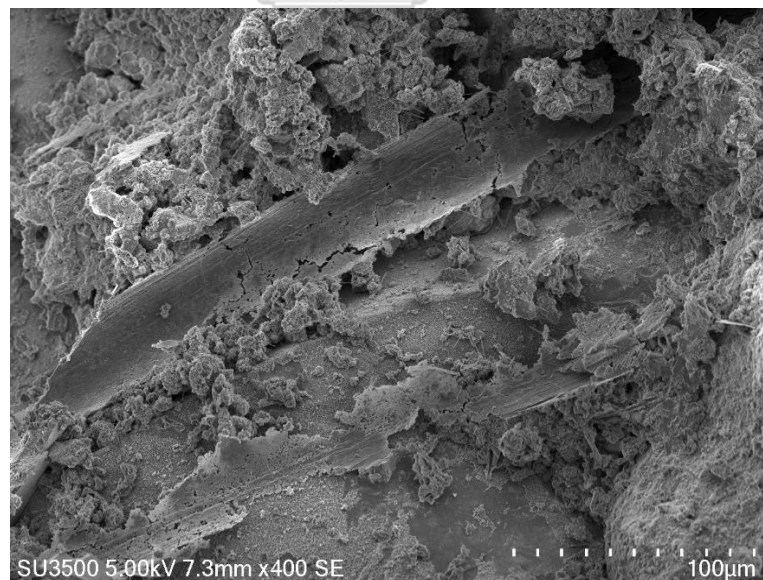
เมื่อมอร์ตาร์สัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ตัวอย่างชั้นมอร์ตาร์ CN0.10 มีค่าการหลุดล่อนเท่ากับตัวอย่างชั้นมอร์ตาร์ CN0 ในชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลง แต่ในชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.5 มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่มากขึ้น เมื่อเทียบจากชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0 และมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนพบว่าชั้นมอร์ตาร์ CN0-P CN0.1-P CN0.25-P และ CN0.5-P มีเปอร์เซ็นต์การหลุดล่อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับชั้นมอร์ตาร์ CN0

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.1 ไม่ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์หลังสัมผัสความร้อน แต่ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.25 ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์หลังสัมผัสความร้อน ในขณะที่ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ CN0.5 ไม่ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์หลังสัมผัสความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส โดยสามารถกล่าวได้ว่าชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่มีอัตราส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน 0.25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ช่วยลดการหลุดล่อนมากที่สุด

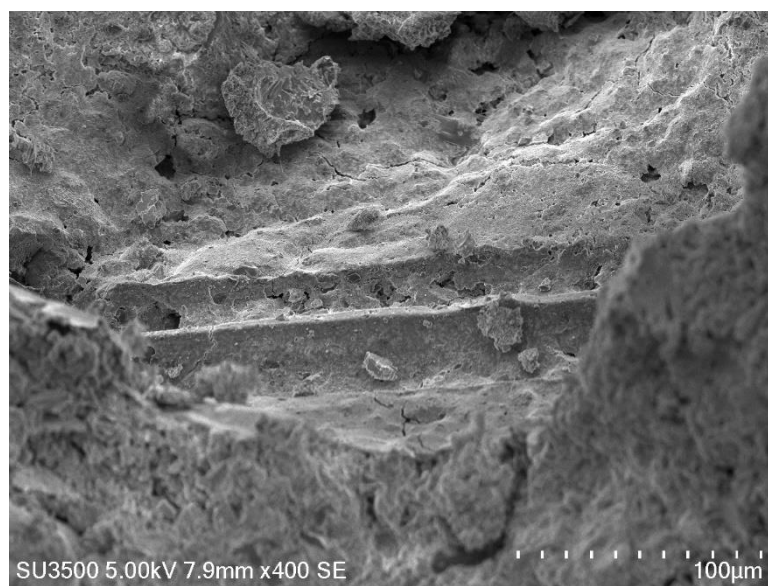
อย่างไรก็ตามเมื่อทำการผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงไปปริมาณ 0.2% โดยปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ขณะสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1000 องศาเซลเซียสตามลำดับเมื่อเทียบกับชั้นมอร์ตาร์ CN0 ซึ่งเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีจุดเดือดที่ 160-170 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการสลายตัวของเส้นใยพอลิโพรไพลีนความดันภายในช่องว่างนั้นจะน้อยกว่าความดันที่เกิดจากภายนอก จึงทำให้การผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงไปมอร์ตาร์ช่วยลดการหลุดล่อนลงอีกด้วย ดังรูป 4.24-4.25 แสดงร่องรอยของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เกิดการเผาไหม้ และสลายตัวไป จึงกล่าวได้ว่าการผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงไปปริมาณ 0.2% โดยปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ช่วยลดการหลุดล่อนของมอร์ตาร์ได้



รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์การหลุดล่อนของตัวอย่างหลังสัมผัสเพลิงไหม้



รูปที่ 4.24 ร่องรอยของเส้นใยพอลิไพโรไฟลีนที่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 ร่องรอยของเส้นใยพอลิเอทรีนที่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



## บทที่ 5

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้ท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และเส้นใยพอลิโพรไพลีน (PP) ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ก่อนและหลังสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้ โดยทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรง ได้แก่ กำลังอัดและกำลังดัด, ตรวจสอบการหลุดล่อนของตัวอย่างโดยการวัดค่าของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการเผา พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของมอร์ตาร์โดยใช้ภาพถ่าย SEM เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสม CNT และ PP หลังการสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้ได้ดีขึ้น โดยหลังจากการทดสอบพบว่าการใช้ CNT ใส่เพิ่มร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้มอร์ตาร์ (CN0.1) มีกำลังอัดและกำลังดัดที่มากที่สุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุม (CNO) ร้อยละ 8 และ 16 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการผสม CNT ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.1 ส่งผลให้สมบัติทางกลของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีจับกลุ่มกันเป็นก้อน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้อัตราส่วนผสมของสาร Surfactant คงที่ที่ปริมาณ 1% ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากเกินไปอาจเข้าไปแทรกตัวและเติมเต็มช่องว่างในวัสดุซีเมนต์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างเพียงพอสำหรับรองรับการเติบโตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นสาเหตุให้ส่วนผสมมีกำลังรับแรงที่ลดลง ในขณะที่การผสมเส้นใย PP เพิ่มในมอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผสมร่วมกับ CNT ในปริมาณร้อยละ 0.5 จากการกระจายตัวที่ไม่ดีของ CNT เมื่อปริมาณมากขึ้น

หลังจากสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้ที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่ากำลังรับแรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าลดลงและยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผสม CN0.1 สามารถต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ได้ดีกว่า CNO ซึ่งจะเห็นได้จากค่ากำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสม CNT เกินกว่าร้อยละ 0.1 ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานเพลิงไหม้ลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงที่สภาวะปกติ ถึงแม้ว่าการผสมเส้นใย PP จะไม่ส่งผลดีต่อความแข็งแรงของมอร์ตาร์ก่อนการเผาอย่างชัดเจน แต่ทว่าส่วนผสมที่มีเส้นใย PP สามารถต้านทานการหลุดล่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูงส่วนผสมที่ใส่ PP และมีปริมาณ CNT ที่เท่ากันมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าอีกทั้งยังมีกำลังดัดที่สูงกว่าส่วนผสมที่ไม่ใส่เส้นใย PP โดยจะเห็นได้

อย่างชัดเจนในส่วนของผลการทดสอบกำลังตัด ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้จากภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของเส้นใย PP หลังสัมผัสสภาวะเพลิงไหม้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรมีการศึกษาสัดส่วนมอร์ตาร์เสริมท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่มีส่วนผสมของสาร Surfactant เนื่องจากผู้วิจัยมีความเห็นว่าการทำ Ultra-sonicate อย่างเดียวเพียงพอที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับในกรณีการผสมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ต่ำกว่า 0.1% ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ดังแสดงในภาคผนวก ก แต่ในกรณีที่การผสมท่อนาโนคาร์บอนเกิน 0.1% ควรใช้ปริมาณของสาร Surfactant ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี







## ภาคผนวก ก

### การตรวจสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในน้ำ

เพื่อเป็นการตรวจสอบเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผสมท่อนาโนคาร์บอนให้เกิดการกระจายตัวที่ดีเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการผสมท่อนาโนคาร์บอนโดยแบ่งเป็นกรณีทดสอบดังตารางที่ ก.1 จากนั้นทำการตรวจสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในน้ำ โดยได้ทำการศึกษา 2 แบบ คือ

- (1) สังเกตการตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 15 นาทีและ 7 วัน
- (2) ทดสอบการดูดซับแสงของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องมือ UV/VIS Spectrophotometer

Spectrophotometer



ตารางที่ ก.1 กรณีการทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในน้ำ

กลุ่มที่	ชื่อส่วนผสม	ท่อนาโนคาร์บอน (wt% of cement)	Magnetic stirrers (นาที)	Ultra-sonicate (นาที)	สารผสมเพิ่ม (wt% of cement)		
1	CN0.1W	0.10	15	-	-		
	CN0.25W	0.25		-	-		
	CN0.5W	0.50		-	-		
2	CN0.1W-So	0.10		30	30	-	
	CN0.25W-So	0.25				-	
	CN0.5W-So	0.50				-	
3	CN0.1W-So-Su	0.10				1	1
	CN0.25W-So-Su	0.25					
	CN0.5W-So-Su	0.50					

หมายเหตุ ความหมาย W คือ Water, CNT คือ Carbon nanotubes, So คือ Sonicate และ Su คือ สารผสมเพิ่ม (Surfactant)

(1) การสังเกตการตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ ก.1 จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการ Ultra-sonicate (CN0.1W, CN0.25W และ CN0.5W) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเพียง 15 นาที จะเกิดตกตะกอนลงสู่ข้างใต้ขวดแก้วทดลอง นอกจากนี้สังเกตเห็นว่าตัวอย่างที่ทำการ Ultra-Sonicate (CN0.1W+So, CN0.25W+So, CN0.5W+So) แล้ว เทียบกับตัวอย่างที่ทำการ Ultra-Sonicate และผสมสารผสมเพิ่ม Surfactant (CN0.1W+So+Su, CN0.25W+So+Su, CN0.5W+So+Su) จะมีสีดำนที่เข้มกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่สารผสมเพิ่ม ขณะปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วันก็ยังสามารถเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ ก.2 อย่างไรก็ตามเพื่อความละเอียดในการบอกความสามารถในการกระจายตัว จึงตรวจสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer อีกครั้ง



รูปที่ ก.1 การตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที



รูปที่ ก.2 การตกตะกอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน

(2) การดูดซับแสงของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องมือ UV/VIS Spectrophotometer

UV/VIS Spectrophotometer (รูป ก.3) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่ง

ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ โดยเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ ก.3 เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer

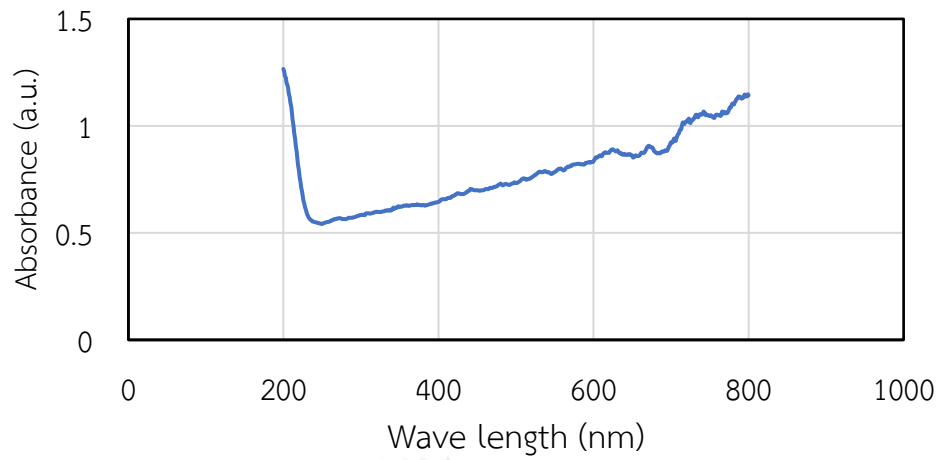
รูปที่ ก.4-ก.6 แสดงการดูดซับของแสง UV ในช่วงคลื่นความยาว 200-800 nm ของตัวอย่าง ทั้ง 3 กลุ่ม สามารถอภิปรายได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการกวนท่อนานาโนคาร์บอนกับน้ำด้วยเครื่อง Magnetic stirrers เป็นระยะเวลา 15 นาที แล้วนำไปทดสอบพบว่ากรณี CN0.1W, CN0.25W และ CN0.5W ให้ค่าการดูดซับของแสงปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 1.26, 1.29 และ 1.767 a.u. ตามลำดับในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm
2. เมื่อทำการกวนท่อนานาโนคาร์บอนกับน้ำด้วยเครื่อง Magnetic stirrers เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นใช้เครื่อง Ultra-sonicate อีกเป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำไปทดสอบพบว่า CN0.1W-So, CN0.25W-So และ CN0.5W-So ให้ค่าการดูดซับของแสงปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 4 a.u. ทั้ง 3

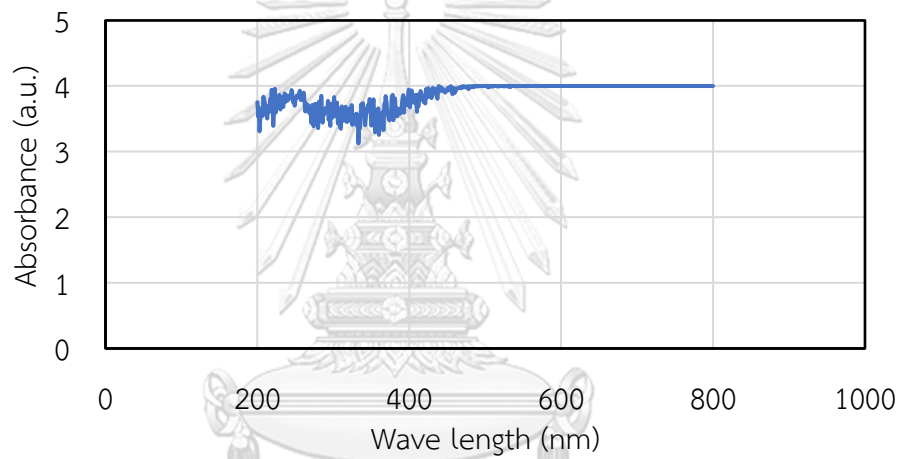
ตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm และให้ค่าการดูดซับของแสงน้อยที่สุดเท่ากับ 3.13, 3.33 และ 3.28 a.u. ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm

3. เมื่อทำการกวนท่อนาโนคาร์บอนกับน้ำและสารผสมเพิ่มด้วยเครื่อง Magnetic stirrers เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นใช้เครื่อง Ultra-sonicate อีกเป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำไปทดสอบพบว่า CN0.1W-So-Su, CN0.25W-So-Su และ CN0.5W-So-Su ให้ค่าการดูดซับของแสงปริมาณมากที่สุด 4 AU ทั้ง 3 ตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm และให้ค่าการดูดซับของแสงน้อยที่สุดเท่ากับ 3.52, 3.51 และ 3.4 a.u. ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm

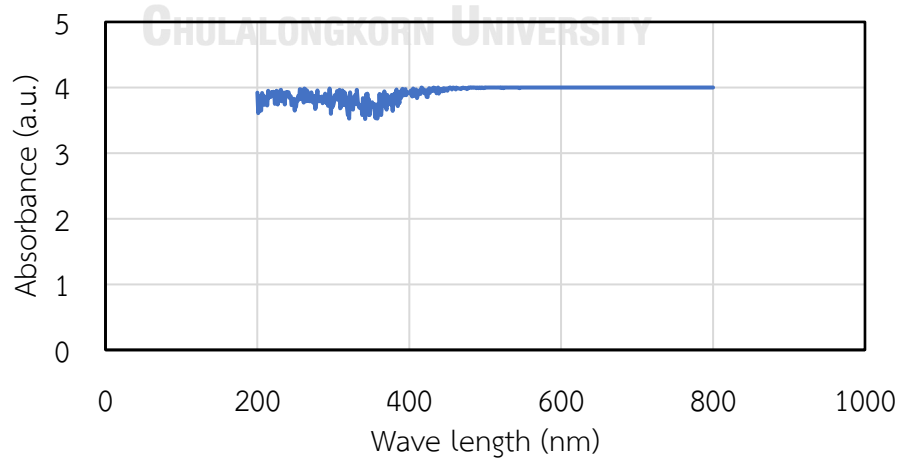
ดังนั้นจากการทดลองด้วยวิธี UV/VIS Spectrophotometer พบว่าเมื่อทำการกวนท่อนาโนคาร์บอนกับน้ำและสารผสมเพิ่มด้วยเครื่อง Magnetic stirrers เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นใช้เครื่อง Ultra-sonicate อีกเป็นระยะเวลา 30 นาทีให้ค่าการกระจายตัวดีที่สุดเนื่องจากมีค่าการดูดซับแสงที่มากกว่าวิธีอื่นๆ และตัวอย่าง CN0.1W-So-Su ให้ค่าการดูดซับแสงที่ดีที่สุด อีกทั้งยังเห็นว่าเมื่อปริมาณสารท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับของแสงจะน้อยลงตามลำดับ ซึ่งช่วยพิสูจน์ได้ว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้นจะเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี



(ก) CN0.1W

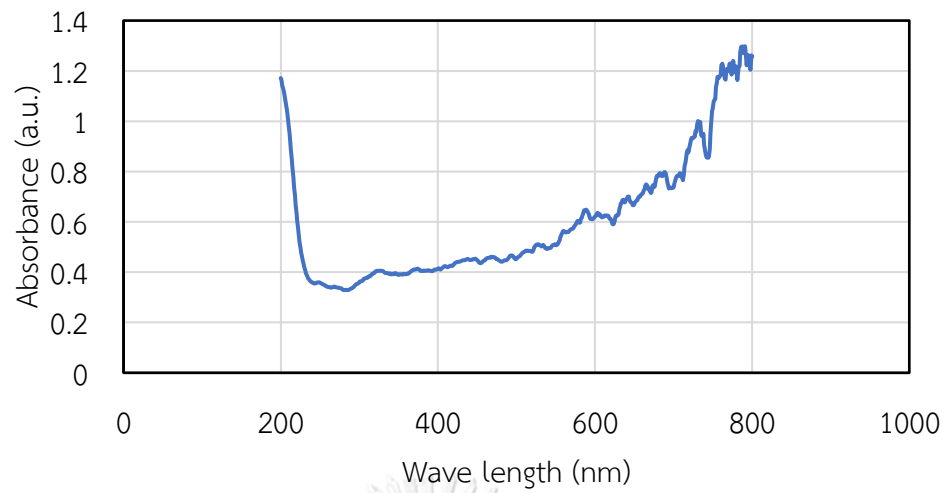


(ข) CN0.1W-So

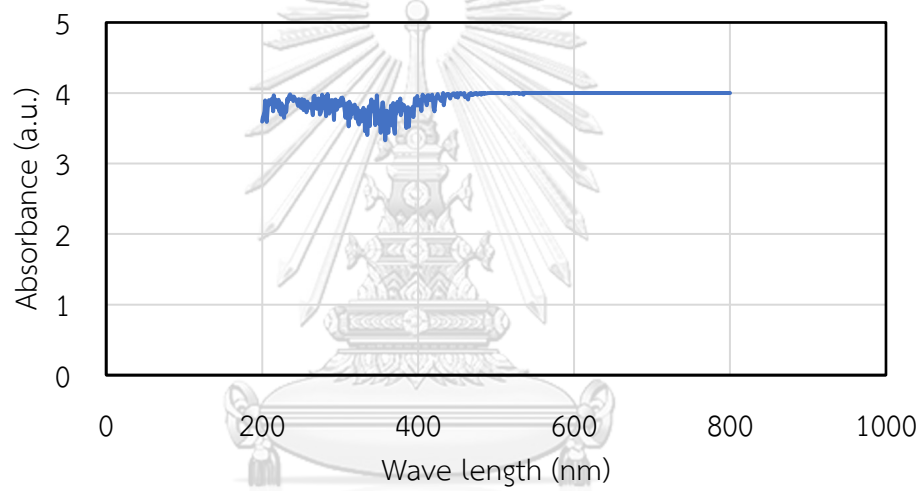


(ค) CN0.1W-So-SF

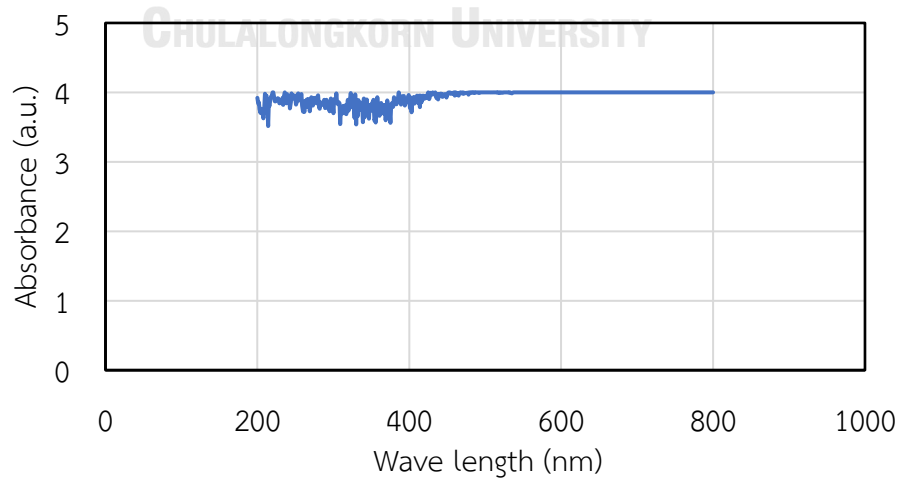
รูปที่ ก.4 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.1%



(ก) CN0.25W

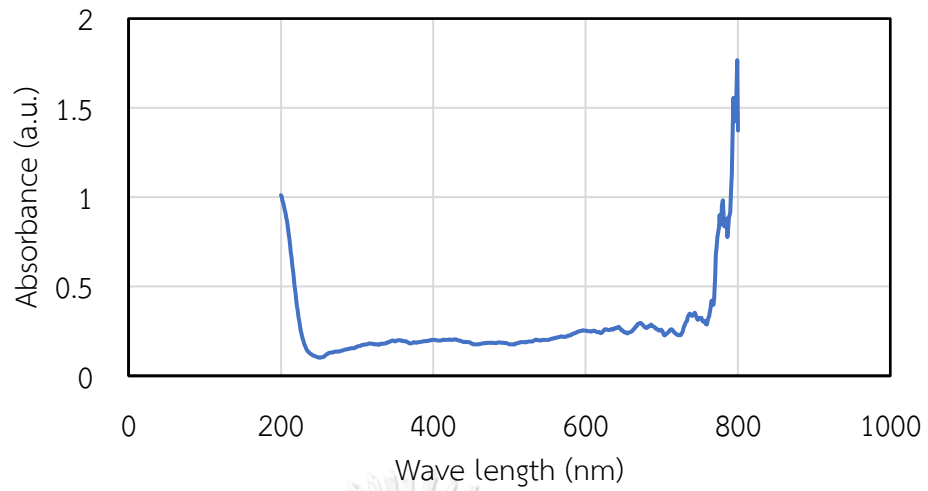


(ข) CN0.25W-So

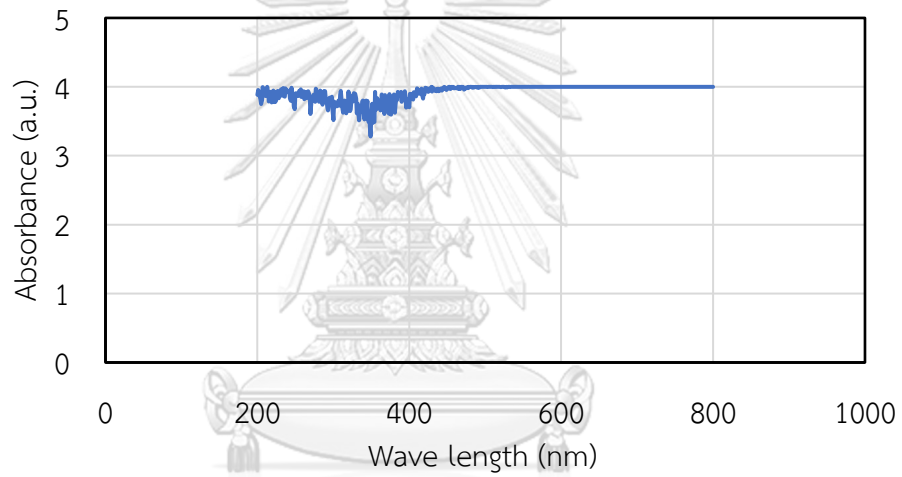


(ค) CN0.25W-So-SF

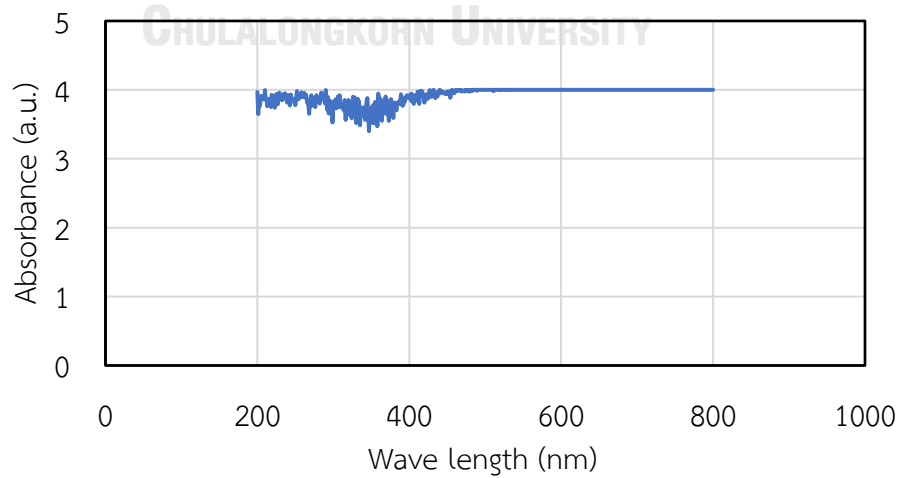
รูปที่ ก.5 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.25%



(ก) CN0.5W



(ข) CN0.5W-So



(ค) CN0.5W-So-SF

รูปที่ ก.6 การดูดซับของแสง UV ของกรณีตัวอย่างที่มีท่อนาโนคาร์บอน 0.5%



## บรรณานุกรม

- [1] A. Kahidan and M. Shirmohammadian, "Properties of Carbon Nanotube (CNT) Reinforced Cement," International Journal of Engineering Research, vol. 5, no. 6, pp. 497-503, 2016.
- [2] R. Kelsall, I. W. Hamley, and M. Geoghegan, Nanoscale science and technology. John Wiley & Sons, 2005.
- [3] A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, A. Nasibulin, E. Kaupinen, P. Mudimela, and V. Penttala, "SEM/AFM studies of cementitious binder modified by MWCNT and nano-sized Fe needles," Materials Characterization, vol. 60, no. 7, pp. 735-740, 2009.
- [4] T. Pothisiri and C. Soklin, "Effects of Mixing Sequence of Polypropylene Fibers on Spalling Resistance of Normal Strength Concrete," Engineering Journal, vol. 18, no. 3, 2014.
- [5] R. Serrano, A. Cobo, M. I. Prieto, and M. de las Nieves González, "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers," Construction and building materials, vol. 122, pp. 302-309, 2016.
- [6] A. L. Pisello et al., "Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 161, pp. 77-88, 2017.
- [7] G. L. Hornyak, J. J. Moore, H. F. Tibbals, and J. Dutta, Fundamentals of nanotechnology. CRC press, 2008.
- [8] D. R. Cooper et al., "Experimental review of graphene," ISRN Condensed Matter Physics, vol. 2012, 2012.
- [9] X. Yu and E. Kwon, "Carbon Nanotube Based Self-sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring," Final Report, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Duluth, 2012.
- [10] M. Daenen, R. De Fouw, B. Hamers, P. Janssen, K. Schouteden, and M. Veld, "The wondrous world of carbon nanotubes," Eindhoven University of

Technology, vol. 27, 2003.

- [11] A. B. Belgacem, I. Hinkov, S. B. Yahia, O. Brinza, and S. Farhat, "Arc discharge boron nitrogen doping of carbon nanotubes," *Materials Today Communications*, vol. 8, pp. 183-195, 2016.
- [12] M. J. O'connell, *Carbon nanotubes: properties and applications*. CRC press, 2006.
- [13] S. Musso, J.-M. Tulliani, G. Ferro, and A. Tagliaferro, "Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites," *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 11, pp. 1985-1990, 2009.
- [14] H. Cui, S. Yang, and S. A. Memon, "Development of carbon nanotube modified cement paste with microencapsulated phase-change material for structural-functional integrated application," *International journal of molecular sciences*, vol. 16, no. 4, pp. 8027-8039, 2015.
- [15] F. Collins, J. Lambert, and W. H. Duan, "The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 2, pp. 201-207, 2012.
- [16] A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, and V. Penttala, "Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites," *Advances in cement research*, vol. 20, no. 2, pp. 65-73, 2008.
- [17] S. Musso, J.-M. Tulliani, G. Ferro, and A. Tagliaferro, "Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites," *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 11-12, pp. 1985-1990, 2009.
- [18] G. Y. Li, P. M. Wang, and X. Zhao, "Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes," *Carbon*, vol. 43, no. 6, pp. 1239-1245, 2005.
- [19] T. Nochaiya, P. Tolkitikul, P. Singjai, and A. Chaipanich, "Microstructure and characterizations of Portland-carbon nanotubes pastes," in *Advanced Materials Research*, 2008, vol. 55, pp. 549-552: Trans Tech Publ.
- [20] X. Yu and E. Kwon, "A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties," *Smart Materials and Structures*, vol. 18, no. 5, p. 055010, 2009.
- [21] A. Chaipanich, T. Nochaiya, W. Wongkeo, and P. Torkittikul, "Compressive

- strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 4-5, pp. 1063-1067, 2010.
- [22] S. Xu, L. Gao, and W. Jin, "Production and mechanical properties of aligned multi-walled carbon nanotubes-M140 composites," *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 52, no. 7, pp. 2119-2127, 2009.
- [23] M. Amin, S. El-Gamal, and F. Hashem, "Fire resistance and mechanical properties of carbon nanotubes–clay bricks wastes (Homra) composites cement," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 237-249, 2015.
- [24] A. Sedaghatdoost and K. Behfarnia, "Mechanical properties of Portland cement mortar containing multi-walled carbon nanotubes at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 482-489, 2018.
- [25] A. Sedaghatdoost, K. Behfarnia, and M. Bayati, "The effect of curing period on the residual strength of Portland cement mortar containing MWCNTs at elevated temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 196, pp. 144-153, 2019.
- [26] C. Zhou, F. Li, J. Hu, M. Ren, J. Wei, and Q. Yu, "Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 336-345, 2017.
- [27] C. Maier and T. Calafut, *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. William Andrew, 1998.
- [28] J.-P. Won, S.-W. Choi, S.-W. Lee, C.-I. Jang, and S.-J. Lee, "Mix proportion and properties of fire-resistant wet-mixed high-strength polypropylene fiber-reinforced sprayed polymer cement composites," *Composite Structures*, vol. 92, no. 9, pp. 2166-2172, 2010.
- [29] J. Li, J. Niu, C. Wan, X. Liu, and Z. Jin, "Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 729-736, 2017.
- [30] ASTM-C109, *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. ASTM International, 2016.
- [31] ASTM-C239, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using*

- Simple Beam with Center-Point Loading)," 2002.
- [32] F. T. Isfahani, W. Li, and E. Redaelli, "Dispersion of multi-walled carbon nanotubes and its effects on the properties of cement composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 74, pp. 154-163, 2016.
- [33] S. El-Gamal, F. Hashem, and M. Amin, "Influence of carbon nanotubes, nanosilica and nanometakaolin on some morphological-mechanical properties of oil well cement pastes subjected to elevated water curing temperature and regular room air curing temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 531-546, 2017.
- [34] T. Nochaiya and A. Chaipanich, "Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials," *Applied Surface Science*, vol. 257, no. 6, pp. 1941-1945, 2011.
- [35] R. Siddique and A. Mehta, "Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 50, pp. 116-129, 2014.
- [36] B. Wang, Y. Han, and S. Liu, "Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 8-12, 2013.
- [37] M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah, "Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 2, pp. 110-115, 2010.
- [38] Y.-S. Heo, J. G. Sanjayan, C.-G. Han, and M.-C. Han, "Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 10, pp. 1547-1554, 2010.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นราธิป บุญชู
วัน เดือน ปี เกิด	15 กุมภาพันธ์ 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราชวิถี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	ปัจจุบันกำลังศึกษา ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 95/2 หมู่ 5 ตำบลสำโรงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270

