



การใช้เทคนิค FTIR ในการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่า ตำแหน่งพีคที่ 970 ต่อเซนติเมตร สัมพันธ์กับโครงสร้าง Si-O ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่พบในซีเมนต์เพสต์ [4] นอกจากนี้ ตำแหน่งที่ 3640 ต่อเซนติเมตร เป็นตำแหน่งของ OH- ที่สัมพันธ์กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [5] ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ไปด้วยปฏิกิริยาปอซโซลาน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานข้างต้นแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อศึกษาสมบัติทางกลต่างๆ เช่น กำลังอัด กำลังดัด ระยะเวลาการก่อตัว รวมถึงความทนทานของปูนซีเมนต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตในสภาวะต่างๆ แต่ยังไม่พบเห็นการศึกษาสมบัติทางกลร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกัน ทำให้งานวิจัยนี้สนใจในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ ที่สามารถพบการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ โดยนำวัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกัน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เศษแก้ว สีชา และซิลิกาฟุ้ง แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อวัสดุปอซโซลาน 90:10, 80:20 และ 70:30 โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่อายุบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อได้แนวทางในการพัฒนาวัสดุด้านวิศวกรรมโยธาด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้งและวัสดุที่เป็นผลพลอยได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

## 2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### 2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement, PC)

วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.14

#### 2.1.2 เถ้าถ่านหิน (Fly ash, FA)

เถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาได้จาก 2 แหล่ง โดยกำหนดให้เป็นแหล่ง A (FA) และ แหล่ง B (BL)

#### 2.1.3 ผงแก้ว (Glass Powder, GP)

ผงแก้ว จากเศษขวดแก้วสีชาที่ใช้แล้ว นำมาบดละเอียดเป็นผงร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ความถ่วงจำเพาะของผงแก้วมีค่าประมาณ 2.58

#### 2.1.4 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume, SF)

ซิลิกาฟุ้ง เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซิลิกาฟุ้งที่ใช้จะประกอบด้วยออกไซด์หลัก ได้แก่ (SiO<sub>2</sub>) มากกว่าร้อยละ 85 ของปูนซีเมนต์ ลักษณะทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมาก สีเทา ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.72

### 2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

ในงานวิจัยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อวัสดุปอซโซลานเท่ากับ 90:10, 80:20 และ 70:30 โดยน้ำหนัก ขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการผสมปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำที่เตรียมไว้ แล้วผสมต่อให้เป็นเนื้อเดียวกันหลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว เทตัวอย่างลงในแบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และนำไปบ่มด้วยการแช่น้ำ จนครบอายุการทดสอบ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์หลังจากทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นำมาบดให้ละเอียด นำไปศึกษาด้วยเทคนิค FTIR โมเดล BRUKER Tensor27 model ที่ wavenumber 500-4000 ต่อเซนติเมตร โดย

วิเคราะห์ กราฟ FTIR ของซีเมนต์เพสต์ที่มีวัสดุปอซโซลาน (FTIR-CP) และกราฟ FTIR ของซีเมนต์เพสต์

### 2.3 การวิเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

ใช้กราฟ FTIR ของซีเมนต์เพสต์ที่มีวัสดุปอซโซลาน (FTIR-CP) หักลบกับกราฟ FTIR ของซีเมนต์เพสต์ (FTIR-Cement) ซึ่งกราฟที่พบ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ดังสมการที่ 1 และ อธิบายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2

$$(FTIR-P) = (FTIR-CP) - (FTIR\ Cement) \quad \dots (1)$$

$$CSH\ from\ pozzolan = (CSH\ from\ cement + CSH\ from\ pozzolan + Ca(OH)_2) - (CSH\ from\ cement + Ca(OH)_2) \quad \dots (2)$$

### 2.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบซีเมนต์มอร์ต้า

การทดสอบกำลังอัดใช้เป็นซีเมนต์มอร์ต้าที่มีปูนซีเมนต์ต่อวัสดุปอซโซลานเท่ากับ 90:10, 80:20 และ 70:30 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันโดยใช้น้ำแล้วเทเข้าไปแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง บ่มด้วยการแช่น้ำ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14 และ 28 วัน

## 3. ผลการศึกษา

### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค XRF พบว่า เถ้าถ่านหิน FA มีผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 66.583 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C สำหรับ เถ้าถ่านหิน BL มีผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 80.017 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ในขณะที่ซิลิกาฟุ้ง และเศษแก้วมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงเท่ากับร้อยละ 97.957 และ 73.108 ตามลำดับ พบว่าวัสดุปอซโซลานทั้งสี่ชนิดมีซิลิกาในปริมาณสูงมีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานและปูนซีเมนต์

Chem Com.	FA	BL	SF	GP	PC
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.28	8.82	N/A	2.11	3.99
SiO <sub>2</sub>	35.08	40.71	97.95	73.10	23.56
SO <sub>3</sub>	7.52	0.08	N/A	0.09	5.23
K <sub>2</sub> O	1.48	2.23	0.78	0.17	0.40
CaO	18.73	6.74	0.60	8.40	59.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.21	30.47	0.07	0.53	4.19

### 3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

รูปที่ 1 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่ง FTIR-CP (ฝั่งซ้าย) เป็นโครงสร้างทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ที่มีวัสดุปอซโซลานร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนักที่อายุ 7 และ 28 วัน และ FTIR-P (ฝั่งขวา) เป็นโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น โดย (ก) เถ้าถ่านหิน FA (ข) เถ้าถ่านหิน BL (ค) ซิลิกาฟุ้ง SF และ (ง) เศษแก้ว GP

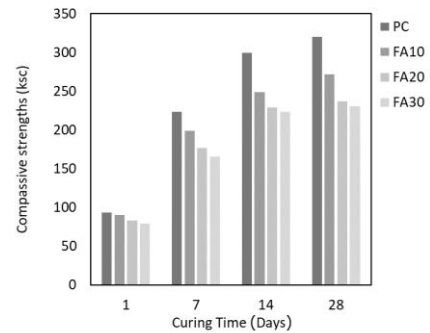
จากรูป FTIR-CP ของการใช้วัสดุปอซโซลาน พบพีคที่ตำแหน่ง 970 ต่อเซนติเมตรซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้าง Si-O ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และพีคที่ตำแหน่ง 3640 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างของ O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงให้เห็นถึงการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตของซีเมนต์เพสต์ที่มีวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และที่ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ไม่ปรากฏพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

สำหรับตัวอย่างที่มีซิลิกาฟุ่มและเศษแก้ว ซึ่งจากองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้งสองชนิดมีซิลิกาที่สูงกว่าจากถ้ำถ่านหิน จึงเป็นไปได้ว่าจะมีซิลิกาที่มากกว่าในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

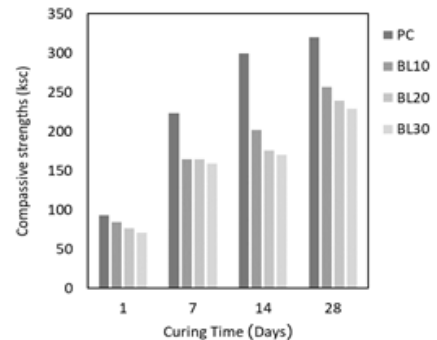
จากรูป FTIR-P พบตำแหน่ง 3640 ต่อเซนติเมตร สัมพันธ์กับโครงสร้าง O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [5-6] และ ตำแหน่งที่ 970 ต่อเซนติเมตร สัมพันธ์กับโครงสร้าง Si-O ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต [5,8] ซึ่งผลของถ้ำถ่านหิน FA เมื่อแทนที่ถ้ำถ่านหินที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนักที่อายุ 7 วัน พบพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และพบความเข้มของพีค CSH ที่ตำแหน่ง 970 ต่อเซนติเมตรมีค่าต่ำ และมีความชัดเจนเมื่อทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่า ยังคงมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่แต่พบพีคของ CSH ที่ชัดเจนขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่อใช้ถ้ำถ่านหิน FA แทนที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลของการใช้ถ้ำถ่านหิน BL ได้ข้อมูลสอดคล้องกับถ้ำถ่านหิน FA ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงของพีค CSH ที่ชัดเจนที่อายุ 28 วัน และยังมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของ F. Deschner et.al., 2012 [8] พบว่า เมื่อมีถ้ำถ่านหินในส่วนผสมการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 วันแรกแต่ยังพบปริมาณของถ้ำถ่านหินและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เมื่อผ่านไป 90 วัน ในส่วนของการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่า ไม่พบพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 28 วัน ซึ่งซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็ก ไม่เป็นผลึก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ สำหรับการใส่เศษแก้ว พบการเปลี่ยนแปลงของพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ชัดเจนเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน ไม่พบพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และพบว่า พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความเข้มมากขึ้น

### 3.3 ผลการทดสอบกำลังอัด

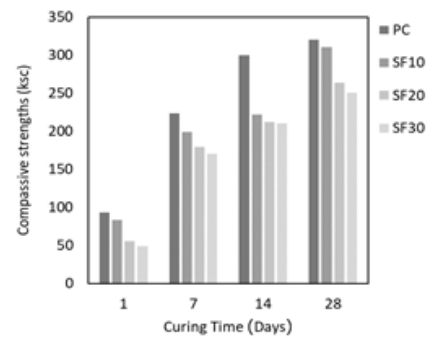
รูปที่ 2 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน (ก) ถ้ำถ่านหิน FA (ข) ถ้ำถ่านหิน BL (ค) ซิลิกาฟุ่ม SF และ (ง) เศษแก้วสีชา GP จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อร้อยละการแทนที่วัสดุปอซโซลานเพิ่มมากขึ้นกำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง และเนื่องจากในช่วงอายุก่อน 28 วัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังไม่มากพอในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อเปรียบเทียบชนิดของปอซโซลาน พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่าการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ การใช้ถ้ำถ่านหินแหล่ง BL ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลขององค์ประกอบทางเคมีที่ซิลิกาฟุ่มมีซิลิกาในปริมาณสูงที่สุด และมีความไม่เป็นผลึกที่สามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว อีกทั้งขนาดที่เล็กของซิลิกาฟุ่มยังช่วยเติมเต็มในช่องว่างให้ซีเมนต์มอร์ตาร์แน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูง ในขณะที่เดียวกับ ถ้ำถ่านหินแหล่ง BL มีซิลิกาต่ำที่สุดทำให้มีปริมาณซิลิกาน้อยส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น



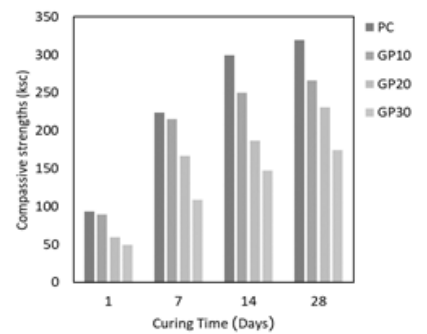
(ก)



(ข)

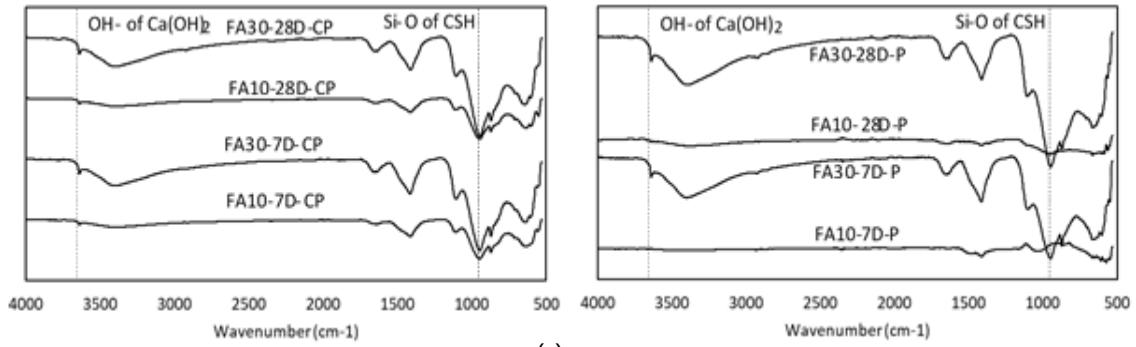


(ค)

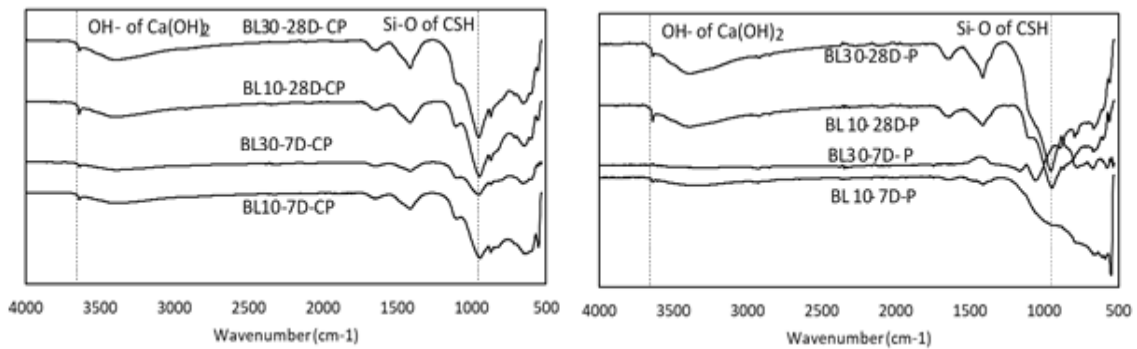


(ง)

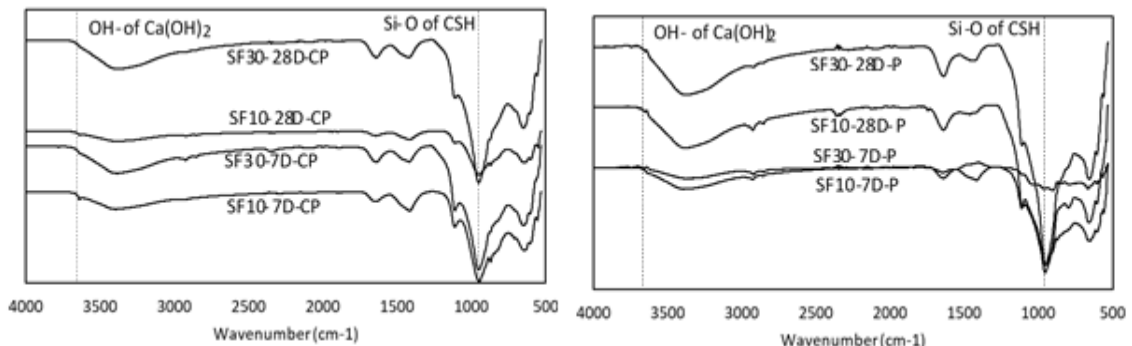
รูปที่ 2 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน (ก) ถ้ำถ่านหิน FA (ข) ถ้ำถ่านหิน BL (ค) ซิลิกาฟุ่ม SF (ง) เศษแก้วสีชา GP



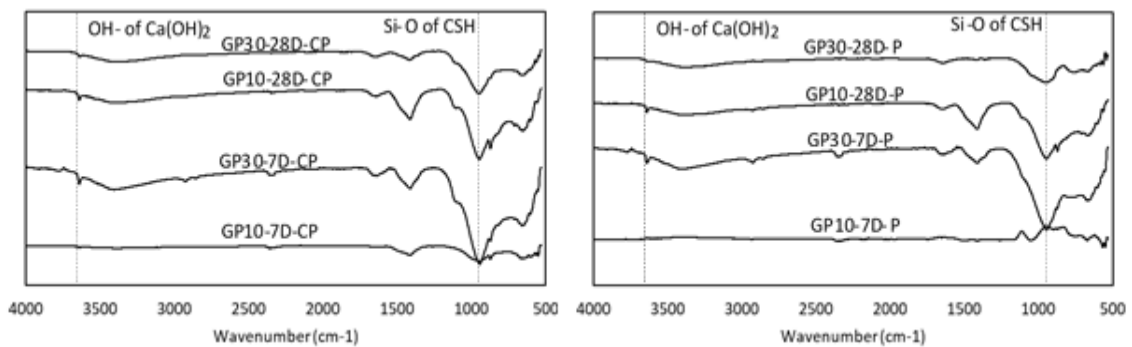
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคFTIR  
(ก) แก้วถ่านหิน FA (ข) แก้วถ่านหิน BL (ค) ซิลิกาฟุ่ม SF (ง) เศษแก้วสีชา GP

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ด้วยเทคนิค FTIR เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกัน สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

1. เทคนิค FTIR ของซีเมนต์เพสต์ พบพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น และเมื่อหักลบกับพีค FTIR ของปูนซีเมนต์ พบพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน และไม่ปรากฏพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วันของซิลิกาฟุ่มและเศษแก้ว แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้น

2. กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และเมื่อมีร้อยละการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้น กำลังอัดมีค่าลดลง โดยการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM C618-08a, 2010, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", Annual Book ASTM Standard, Pennsylvania (USA), ASTM International, 4 p
- [2] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555, *หนังสือปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต*, พิมพ์ครั้งที่ 7, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.), กรุงเทพฯ, 381 หน้า.
- [3] ภัสดา ภูพูล, *พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว* (มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2558), หน้า 3.
- [4] Somna, K., Bumrongjaroen, W., *Effect of external and internal Calcium in Fly Ash on Geopolymer Formation*, Developments in Strategic Materials and Computational Design II: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 32, 2011
- [5] Somna, K., Jaturapitakkul, C., and Kajitvichyanukul, P., 2011, "Microstructure of Calcium Carbide Residue-Ground Fly Ash Paste", *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, March, pp. 298-304.
- [6] Anu Jose, M.R. Nivitha, J. Murali Krishnan, R.G. Robinson, 2020, Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy, *Construction and Building Materials*, Volume 263, 10 December 2020, 120136
- [7] Ruben Snellings, Gilles Mertens, Biliana Gasharova, Krassimir Garbev, Jan Elsen, 2010, The pozzolanic reaction between clinoptilolite and portlandite: a time and spatially resolved IR study, *European Journal of Mineralogy* (2010) 22 (6): 767–777.
- [8] F. Deschner, F. Winnefeld, B. Lothenbach, S. Seufert, P. Schwesig, S. Dittrich, F. Goetz-Neunhoeffler, J. Neubauer, *Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash*, *Cem. Concr. Res.*, 42 (10) (2012), pp. 1389-1400