การพัฒนาซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยสำหรับงานพิมพ์สามมิติ
Development of Fiber Reinforced Cement Mortar Suitable for 3D Printing

ศิลา คมขำ[1,*] บูชิต มาโห้[2] และ ปิติ สุคนธสุขกุล[3]

[1,3] ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: s6301081823018@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

ฉ ป ช ป ทธ ฉ ป ถ ปพ น ค ฉ ท พ ป ผ ญ ปท 5 ท ถ น พป ต ป ป ป ท ป 2 20 ถ ท ป นถ ผ ต ผทน ค ฉ ผ ญ ปท 5 ท ถ นถ ผ ธ ป ทป ป น ถท ค ฉ ป นถ ผ ฉ ฉ ถ ถ น ถท ผ ผ นถ ผ ต ผทคป ปฒ ป ถ นถ ผ พ นถ ผ ปถ *viscosity) ธฉ นถ ผ ฉ ผ ฉ ถ ฉ ผ ฉ ถถ พ ช ผ ปพ น ต ป ป ป ท ป 20 ถ ท ต ผท ผ ญ ปท 5 ท น ถ ถ ทป ป ป ท ต ณนทฉ ฉ ฉ ถ ถ น ถท ท น ถ ฉ ท ป น น ถ ธฉ ฉ ถ ฉถถ ฉน ถ ถ ฉ ถค ฉ ท ฉน ถช ท ท ฉน ถช ท ป ป ฉถถ ผ คป ป

ฏ ญ ปท 5 ท ป ป ทป ป น ถท ค ฉ ป ฉ ฉ ถ ถ น ถ ท

Abstract

The objective of the study was to determine the optimum mix proportion of fiber reinforced cement mortar for 3D printing applications. The mortar mixes were prepared with polypropylene micro-fiber varied from 0 to 0.1% and then subjected to series of test related to required properties for cement printing such as printability test, printable time, layer settlement, and time gap together with some basic properties such as flow test, viscosity test, compressive strength test, and flexural strength test. The results indicated the optimum volume fraction of polypropylene micro-fiber of 0.1% which passed the required initial printable time, and time gap. It also yielded the highest compressive and flexural strengths. The printed specimens exhibited slighter lower compressive strength but higher flexural strength than the cast specimens.

Keywords: 3D cement printing, Micro-polypropylene fiber, Open time, Layer settlement, Printable time gap without settlement

1. คำนำ

น ป 5 ท ธ ป ป ท ป ผป ป ปท น]3 ,[4 ป ฉช ธ ป พ ทน ถ ธ ธพ ท ทธน ฉ ญผญ ป ถ ป ฉถ ป ชชผป ถ ป น ป ถ ป 5 ท ท ผ ท ฉ ป ฉช ทปนป ฉ ท ธ ฉพ ท ต ณช ป ป ป นป ฉฉ ป ป น ธน ฉ ป ถ ฉ 8-12 ฉท ป ปคต น ฉ 3 ท น ฉ ป ถ ฉท ป ฉ ฉถ ท ฉ ถ ถ ป ป ผผ ฉ 3 ท ธ ป ฉ ปฉ ปถ น ฉน ฉพ ธ ถค ช ถนฉน ฉ ธ ท น ฉ ฉถ น ป พปฉน ป ฉ ธ ท น ผญผญ ป ปทป ญ ปท 5 ท น ป พ ท ผผ ป น ฉ ผผ]5 ,[6 ถ คป ฉ ฉช ซถ ท พ ป นทถทฉผป ป คป น ปน ถ ถ บปน ธ ฉ น ฉ ค ต ทนญผญ ป ถ ถ ท ฉ ผผ ชฉ ค ถ ผ บ ฉน

5 ท ถ น ป คป ทป ผผน ป ป ปคป ถ ถ ถ ฉ ช ท ป ป น ป 5 ท ท ปฉ ป ฉน คป ถ ฏ ป ปญ ปท ท ทน ป ถ ช น ถค ช ถ ป น ฉ ป ป คฉท ค ฉ ถ *ญ ปท ท น ปค ฉ น ผ ผ ถช ท ป ฉ ผทค ฉ ญ ปท ท ท นพ ป นช ถ ฉช พ น ถท ค ฉ ป ป ฉช ป ป ค ฉ ฉ ฉ ปทป ถฉปปป ช ดป ฉ 5 ท ผฉ ป ฉ ฉท ฉ ดป ต ผทค ฉ ถญ ปท ผ ถ ป ฉ ผ ฉ ป ฉทปนถ พนถ ป น ธ ป ท ปน ป น ถท ฉ ปนถ ปทป

ฉ ป ช ป ชฉ ฉปป น ผ ฉ ถ ปพ ค ฉญ ปท ท ต ผท ท 5 ท ธ ป ท ปน ป น ถท ฉ ป ถถ ถ น พป ต ป ผ ป ถ ปพ ป นถ ผ ต ผท ปฒ ปน ฏท ญ ปท 5 ท ป พ ปถ น ถ น ถท ค ฉ ป ฉ ฉ ถ ถ น ถท ปทป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปญ ปทน ปฉ ป ช ป ป ปญ ปท ท ปถ นน 1 (Ordinary Portland Cement) ธ ฉช น ผ 3.15

2.1.2 ซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF)

ญ น ปฉ ป ช ปช คป ถ น 2025/2052µm ปนพ นบ น 42,222 $m^4$1kg ธ ฉช 4042 ฉ ผ น ฉ ถฉ ถฉ ปท ฉน 3

ตารางที่ 1 ฉ ผ น ฉ ค ฉญ *SF) น ป นถ ผ

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3
Silica Fume	38.30	1.17	6098	2065:	1.05

2.1.3 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

ถน ป ช ป น ป น ปพ ปท ฉ ป ผ 38 คป ถ ป 303 ท ธ ฉช 4072

2.1.4 เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน (MFP)

พ ทช ท ป ป ต ป ป ค คป ถ ป พ ท ฉ ป ท ต ผ ทถฉ ถฉ ป ท ฉน 5 ต ป ถฉ ถฉ ป น 3

ตารางที่ 3 ต ผ ทค ฉ ป ป (MFP)

Property	Diameter (µm)	Length *mm)	Specific Gravity	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
MFP	38.30	1.17	6098	2065:	1.05

รูปที่ 1 ป ป

2.1.5 สารลดน้ำ (Water Reducers)

ช ป ถป ต ฉ *Superplasticizer) Type G ญฉ ต ผ ท ถ ป ต ฉธฉ 52

2.1.6 สารเพิ่มความอุ้มน้ำ (Water retention)

ช ป ป น บ ป *Polyethylene glycol) ธ ฉช 302 ชถ 64 68 ฉ ญ ญ

2.2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

ป พ นผค ฉ ต ป ท ต ผ ทค ฉ ท ป 0 ฉ ป ป ท 5 ท ปถ ท ป ปญ ปท ท ปถ ท ถน ¾ ถ ป ป พ ผญ ป ถ ป 32 ถ ป ป ปญ ปท พป ต ป น 2/203 ถ ท ปถ ท ปป ท ถ ป *w/b น ผ 2044 ต ท ถป ปถ G น 3202 ถ ป ป ถ ป *Binder) ต ท ป *Water Retention น น ป น 2.5% ถ ป ป ถ ป ท ปพ ค ฉ ท น ป นถ ผ ถฉถฉท ฉน 6

ตารางที่ 4 ท ปพ ค ฉ ท น ป นถ ผ

ปพ *kg1m^3	ปญ ปท	น	ญ	ป	ถป	PEG	PP
PP0	: 9:	3392	: :	434	8	44	2022
PP25							2045
PP50							2067
PP75							208:
PP100							20 3

2P2 ธฉ ป ป 2.1.6

ท ป ถ ต 2.5 ท ท ป น ป ปนค ฉ ชถ ต 32 ท ท ป น น ป ท ฉน 7 ป น ผปน ป ท ผ ผ น ปพ พ ผป น ถ ฉ ฉค ฉ ปท ฉ ป ท ปฉ ฉ น ค ฉ ปท ฉ ช ปปป ป ต พ ท ฉ ฉค ฉ ปท ฉ ป ผ ค ฉ ป

2.3.3 การทดสอบช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว

ฉ ฉ ถ ถ น ถท *Printable time gap without settlement) ธฉ ฉช ป ท ป ป ป ชปธฉ น ธ ป ท ปท ถ ถ น ถ น ถท ค ฉ ป ท ป ป ป น นถ ผ ถ นถ ฉ ท ฉ 52 ญปท ท น ฉค ฉ 37 ท ช ปพ ถ ท ฉ ป ธฉ ทป *Tint) ค ฉ ปพ ปป ปถ ป นป นน 2 ช ปป ปท นผผป ป ถ น ฉค ฉ 37 ท ช ปพ ป ป ป ปน 7 ป น ถ ถ ฉค ฉท ฉ ท ปน ฉ ปน ฉท น นถ ผท ชป นฉท ฉ ป ถ น ถท ปถ ทฉ ท ท ฉ ป ธฉ นท ฉ ป ถ น ถท ป ฉช ป ป ค ฉท ฉ ปธถ ป ฉ ฉ ถ ถ น ถท

2.3.4 การทดสอบความหนืด

น นถ ผ ปถ ปบ ฉ ปถ ค ฉ ท ผ ต ผท ป น ค ฉ ผ 5 ท น ป ต ผท ป น ค ฉ ผ 5 ท น นถ ผ ถ ฉนถ ผ ปถ (viscometer) ถ ค นถ ผ ผ 6 คป ถ 50 ท ป นถ ผน 8 ผท ป น ปถ ฉผถค ฉ ฉนถ ผ ฉ 10-90 % ค ฉ ฉ นถ ผ น นถ ผน 32 ป น ผปน นช ฉนถ ผ ผ ป นถ ผ ถ น ป ถช ฉ ถ ปถ ป ป mPa.s ชฉท ฉน ฉ ป น ผ Shear stress ถ น *4 น *5

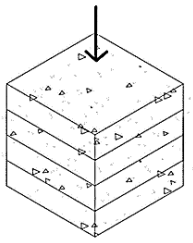
Shear stress = Viscosity x Shear rate *4

$$\text{Shear rate} = \frac{\pi DN}{60h} \quad *3$$

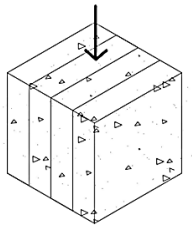
D คป ถค ฉ ปพ ป ป ฉค ฉค น ป นถ ผ, N ผ ป ป ผท ป น *rpm), h ค ฉค น ป นถ ผ

2.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ป นถ ผ ฉ ผ ฉ ถน นถ ผนฉช ท ฉน ถช ท ฉน ถช ถ ท ฉน ถช ช น นถ ผ 4 ผผ ผผ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ ผผน 4 ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ถฉ น 4 ถ ท ฉน ถช ผผ คป ถ 7x5x5 ญปท ท ท ท ฒ ป ASTM C 32 *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) [6 ป ปค ฉท ฉน ถ ช น ทถท ฉถ ฉทถ ป ท ป น ฉ ผ คป ถ ป 7x5x5 ญปท ท ถ ท ฉนฉ 4 ผผน นถ ผ ผ 9 ป ถ ฉนถ ผ Universal Testing Machine (UTM)



*a) ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ

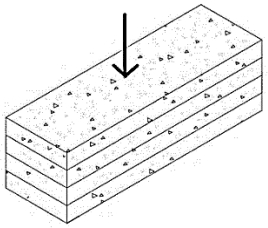


(b) ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ

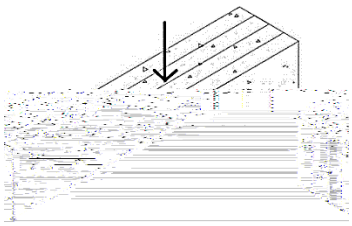
รูปที่ 2 ผผ นถ ผ ฉ ถค ฉท ฉน ถช

2.3.6 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ป นถ ผ ฉ ผ ฉถถน นถ ผนฉช ท ฉน ถช ท ฉน ถช ถ ท ฉน ถช ช น นถ ผ 4 ผผ ป ถ ผ นถ ผ ฉ ผ ฉ ถ ถฉถฉ น 5 ถ ท ฉน ถช ผผ คป ถ 6x4x16 ญปท ท ท ท ฒ ป ASTM C 348-21 (Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars) [7 ป ปค ฉท ฉน ถ ช น ทถท ฉถ ฉทถ ป ท คป ถ ป ทถ ป 6x4 ญปท ท 38 ญปท ท ถ ท ฉนฉ 4 ผผ น ผ ถ ท น นถ ผ ผ 9 ป ถ ฉนถ ผ Universal Testing Machine (UTM)

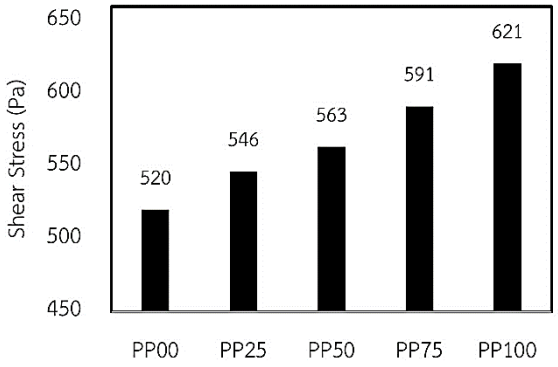


*a) ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ



*b ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ

ท ป ผผ ฉ ถณฌช ฉพ ท ฉ 5 ท ถฉปปชฉ
ถ น ถ ปพ ผ 4 ฉ น
ท ป น ฉ ป ถป ป ปพ ช ถป ปถ G
ป ฉช ถป ปถป

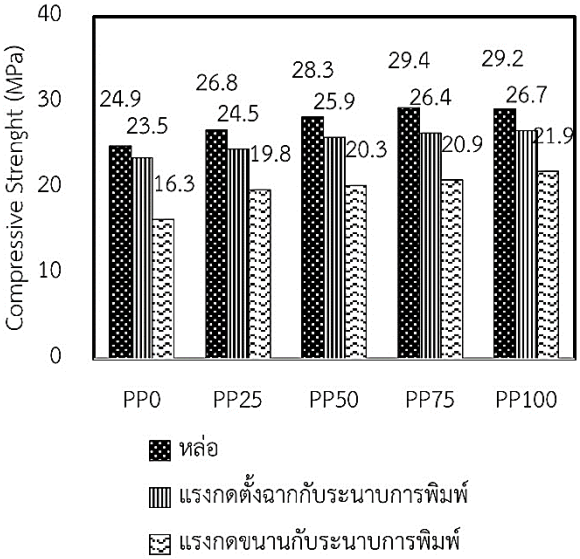


รูปที่ 11 ปถค ฉ ท ท ปถน ทป ป

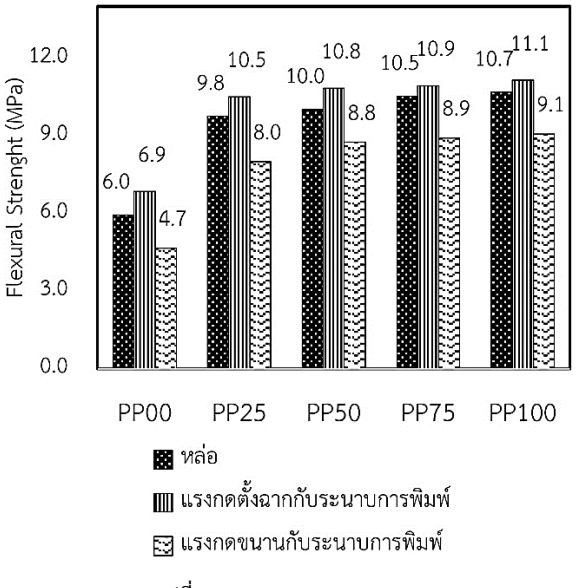
3.5 การทดสอบทดสอบกำลังรับแรงอัด

ช น 34 ถฉพ นถ ผ ฉ ผ ฉ ถค ฉ ท ผ ฉ ป 5 ท ท ท ฒ ป ASTM C 109 ท ฉนป นถ ผ นฉ ท ฉน ถช ท ฉน ถช ถ ท ฉน ถ ช น นถ ผ 4 ผผ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ช พ นถ ผ ผ ฉ ผ ฉ ถค ฉ ท คป ปน ท ฉ ต ป ป ป ปพ ช ต ป ท ปพ ผ ฉ ผ ฉ ถค ฉท ฉน ถช ท ฉน ถช ป ฉช ท ฉน ถช ป ค ฉ ฉ ถ ป ฉ ป ถ ผ ต พ พ ค ฉ ป ท ป ช ธ ฌญ ปนผ ป ถ ช น ป ป ถ ป * ธ น ช ป ป ถ ป นฉ ป ฉ ฉ ป ท ป ฉน พ ท ค ถ ปน ฉ ถ ป ฉ ป ถ ฉ ฉพ ฉ ผ ฉ ถ ถ ค ฉท ฉน ถช ถ ฉ

ช น 34 ช ต ฉ ผ ฉ ถค ฉท ฉน ถช ฉท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ ผท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ผ ท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ ฉ ผ ฉ ถน ฉ ท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ป ฉช นถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ช ถ ฉช ป ปน น ฉ ถ ป ผ ท ค ฉ ป ญฌผ ต ท ค ฉ ป ฉ ถ ป นท น ถ ท ผ ต ท ค ฉ ป ถฉ น 36 ฉพ ฉ ผ ฉ ถค ฉท ฉ ถ ท ฉ



รูปที่ 12 ฉ ผ ฉ ถค ฉ ท



รูปที่ 13 ฉ ผ ฉ ถค ฉ ท



รูปที่ 14 ต ท ค ฉท ฉน ถช a) นถ ผ ถ ฉ ถทฉช ผ ป ผ b) นถ ผ ถ ฉ ถคป ป ผ ป ผ

3.6 การทดสอบทดสอบกำลังรับแรงดัด

ช น 35 ถฉพ นถ ผ ฉ ผ ฉถถค ฉ ท ผ ฉ ป 3 ท ท ท ฒ ป ASTM C 348-21 ช พ นถ ผ ผ

ฉ ผ ฉถถค ฉ ท คป ปน ท ฉ ต ป
ป ป ปพ ช ต ป ท ปพ ผ
ฉ ผ ฉถถค ฉท ฉน ถช นนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉ
ช ผ ป ผ ท ฉน ถช ท ฉ
น ถช นนถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ
ป ป ฉช ต ป ป ปท ฉ ฉพ ป ป ป
ท ฉท ท ป น ป ธ ผ ฉถฉ ถ ฉ
นบ ฉพ ฉ ผ ฉถถน คป
ช น 35 ช ต ฉ ผ ฉถถค ฉท ฉน ถช
ฉท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ
ผท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ ผ
ท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ ฉ ผ
ฉถถน ฉ ท ฉนนถ ผ ถ ป ฉ ถคป ป ผ ป ผ

4. สรุป

30ถ ป พ ผ ต ป ป ฉพ
พค ฉ ท ถ ฉ
40ถ ป ผ ผ ต ป
ป ฉพ ท ป ถ ฉ ถ ปพ
PP100 ทป ป ป น ถน 98 ป น ผ น
ถ ปพ ผ 4 ฉ
50ถ ป ฉ ฉ ถ ถ น ถท ผ
ต ป ป ฉพ ท ฉ ฉ
ถ ถ น ถท ถ ฉ ถ ปพ PP100 ฉ ฉ
ถ ถ น ถท ท น ถน : ป น
60ถ ป ปถค ฉ ท ผ ต ป
ป ฉพ ท ปถ คป ป
ต ป ป ฉพ ท ปถน
ทป ป คปถ
70ถ ป ฉ ผ ฉ ถ ผ ต ป ป
ฉพ ท ฉ ผ ฉ ถ คป ถ ฉ ถช ท ฉน ถ
ช ฉ ผ ฉ ถ น ถ
80ถ ป ฉ ผ ฉถถ ผ ต ป ป
ฉพ ท ฉ ผ ฉถถ คป ถ ฉ ผ ฉถถช ท ฉ
น ถช นนถ ผ ถ ป ฉ ถทฉช ผ ป ผ
ท ฉน ถช ป

กิตติกรรมประกาศ

ฉ ป ช ป ถ ผนป ถ ปป น ช ฉ ปผ ปป
ช ป ท ช ป ฉ ป ช ฉ ท ฎฎ คน ผ 0 0
108/2565 ค ค ผ ต บ ต ท
น น ป ช ป ป ค ค ผ ต
ท ช ถ 0 ท ปบ ค ช น ฉ ป ช น ป ป
ป ถ ปปฉ ป ช ท ถชป ป ป น ฉ ผ ฉ ค
ค ผ ฉท ฉ ถ ช ฉชป นฉฉ ป ช ป ช ผ ต

เอกสารอ้างอิง

[1] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10.
[2] Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 66–72.
[3] Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231.
[4] Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., Gibb, A., Thorpe, T. (2009). Fabricating construction components using layer manufacturing technology. Proc Int Conf Glob Innov Constr, *Loughborough*, pp 512–520.
[5] ASTM C452 1 C452M-43, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 4243, www.astm.org
[6] ASTM C32 1 C32 M-43, Standard Test Method for