

**DEVELOPMENT OF HEMP CONCRETE USING HEMP
SHIV AS COARSE AGGREGATE WITH ALUMINIUM
SULFATE AND CALCIUM HYDROXIDE TREATMENT
AND IMPACT OF FLY ASH ON HEMP CONCRETE**



Saksith Pantawee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้แทนซอฟต์แวร์เป็นมวบรวมหลาย
โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตและแคลคูลัสไฮดรอกซ์ในการ
ปรับปรุงคุณภาพและผลกระทบของข้อมูล
ต่อซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**DEVELOPMENT OF HEMP CONCRETE USING HEMP SHIV
AS COARSE AGGREGATE WITH ALUMINIUM SULFATE
AND CALCIUM HYDROXIDE TREATMENT AND
IMPACT OF FLY ASH ON HEMP CONCRETE**

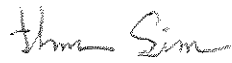
Suranaree University of Technology has approved this thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

Thesis Examining Committee



(Assoc. Prof. Dr. Chatchai Jothityangkoon)

Chairperson



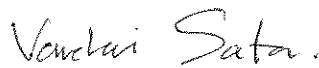
(Asst. Prof. Dr. Theerawat Sinsiri)

Member (Thesis Advisor)



(Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul)

Member



(Assoc. Prof. Dr. Vanchai Sata)

Member




(Asst. Prof. Dr. Mongkol Jirawacharadet)

Member



(Assoc. Prof. Flt. Lt. Dr. Kontorn Chamniprasart)



(Prof. Dr. Santi Maensiri)

Vice Rector for Academic Affairs
and Internationalization

Dean of Institute of Engineering

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี : การพัฒนาเซมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเซมพ์แทนมวลรวมหยาบโดยใช้
อลูมิเนียมซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับปรุงคุณภาพ และผลกระทบของเถ้า
ลอยต่อเซมพ์คอนกรีต (DEVELOPMENT OF HEMP CONCRETE USING HEMP SHIV
AS COARSE AGGREGATE WITH ALUMINIUM SULFATE AND CALCIUM
HYDROXIDE TREATMENT AND IMPACT OF FLY ASH ON HEMP CONCRETE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 121 หน้า


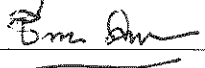
งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอความเป็นไปได้ในการนำแกนเซมพ์มาประยุกต์ใช้เป็นมวลรวม
หยาบในคอนกรีต โดยแกนเซมพ์จะถูกเปลี่ยนรูปของธาตุด้วย อลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และ
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ก่อนที่จะใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตเซมพ์คอนกรีต ในส่วน
ที่ 1 มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2 สัดส่วนแกนเซมพ์ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.16
อัตราส่วนของ $Al_2(SO_4)_3/Ca(OH)_2$ เท่ากับ 1:2 และใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1
โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ในส่วนที่ 2 ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ
10 20 30 40 50 และ 90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ลงในส่วนผสมที่เหมาะสม ทำการ
ทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การหดตัว และการเป็น
ฉนวนความร้อนของเซมพ์คอนกรีต หลังจากถอดแบบ เก็บตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิที่
 23 ± 2 องศาเซลเซียส โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 5 ผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของ
ตัวอย่างทดสอบอย่างน้อยสามตัวอย่าง ทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ
หลังอายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ส่วนค่าการนำความร้อนทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบในส่วนที่ 1 พบว่า ที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดของเซมพ์คอนกรีตอยู่ในช่วง 15.0
ถึง 17.0 เมกะปาสคาล ความหนาแน่น 1420 ถึง 1470 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำ
ร้อยละ 14.5 ถึง 16.5 ค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.30 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และมีค่า
ความเครียดเนื่องจากการหดตัวระหว่าง 1130×10^{-6} ถึง 1400×10^{-6} ที่อายุ 1 ปี ผลการศึกษาชี้ให้เห็น
ว่าการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ในการเปลี่ยนรูปของธาตุ ส่งผลให้กำลังอัดของเซมพ์คอนกรีต
เพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า เมื่อเทียบกับเซมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเซมพ์ที่ไม่ผ่านการเปลี่ยนรูปของธาตุ
การใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของของเซมพ์คอนกรีต และการเพิ่มขึ้น
ของปริมาณ $Al_2(SO_4)_3$ ช่วยเร่งระยะเวลาการก่อตัวและการแข็งตัวของเซมพ์คอนกรีต

ผลการทดสอบในส่วนที่ 2 พบว่า การใช้เถ้าลอยในปริมาณมากส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อ
ตัวและการแข็งตัวของเซมพ์คอนกรีต อีกทั้งยังส่งผลให้กำลังอัดของเซมพ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยใน
ส่วนผสมมีค่าลดลง ค่าความหนาแน่นของเซมพ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยในส่วนผสม อยู่ในช่วง

ระหว่าง 1460 ถึง 1520 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 15.0 ถึง 17.0 ค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.28 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ที่อายุการบ่ม 28 วัน และ มีค่าความเครียดเนื่องจากการหดตัวระหว่าง 1000×10^{-6} ถึง 1200×10^{-6} ที่อายุ 1 ปี

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

SAKSITH PANTAWEE : DEVELOPMENT OF HEMP CONCRETE USING HEMP SHIV AS COARSE AGGREGATE WITH ALUMINIUM SULFATE AND CALCIUM HYDROXIDE TREATMENT AND IMPACT OF FLY ASH ON HEMP CONCRETE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 121 PP.

HEMP SHIV/HEMP CONCRETE/ALUMINIUM SULFATE/ CALCIUM HYDROXIDE/FLY ASH/COMPRESSIVE STRENGTH

This research presents the potential of hemp shiv for use as a coarse aggregate in concrete. Hemp shiv had been mineralized with aluminium sulfate $Al_2(SO_4)_3$ and calcium hydroxide $Ca(OH)_2$ before being used as a coarse aggregate to produce hemp concrete. In part I, the mixture has cement to sand ratio of 1:2, the hemp shiv to cement ratio of 0.16, the $Al_2(SO_4)_3/Ca(OH)_2$ ratio of 1:2, and the amount of super plasticizer of 1% by mass of cement. In part II, Type I Portland cement was replaced using FA 10, 20, 30, 40, 50 and 90% by weight of binder into the appropriate mixture. The setting time, compressive strength, density, water absorption, drying shrinkage, and thermal conductivity of hemp concretes were investigated. After demoulding, they were stored at $23 \pm 2^\circ C$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity. Each test result was represented the mean of at least three specimens. The compressive strength, density, water absorption specimens were investigated at 7, 14, 28 and 56 days. The thermal conductivity of specimens was measured at 28 days of curing.

The results in part I showed that at 28 days the compressive strengths of hemp concrete were in the ranges of 15.0 to 17.0 MPa, densities of 1420 to 1470 kg/m^3 and

water absorptions of 14.5 to 16.5%, the thermal conductivities were in the ranges of 0.22 and 0.30 W/m-K, and the drying shrinkage strains were in the ranges of 1130×10^{-6} and 1400×10^{-6} at 1 year. The results indicated that the application of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for mineralization increased the compressive strength of hemp concrete by four times compared to that with non-mineralized hemp shiv. The use of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ improved the compressive strength of hemp concrete and the increase in the amount of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ also accelerated the setting and hardening of the matrix.

The results in part II showed that the large amount of fly ash delayed the setting and hardening of hemp concrete and also decreased the compressive strength of hemp concrete containing fly ash due to the amount of cement was decreased. The bulk densities of hemp concrete containing fly ash of 10 to 50% were between 1460 and 1520 kg/m^3 , the water absorptions were between 15 and 17%, the average of the thermal conductivities were in the ranges of 0.22 and 0.28 W/m-K at 28 days, and the drying shrinkage strains were in the ranges of 1000×10^{-6} and 1200×10^{-6} at 1 year of curing.

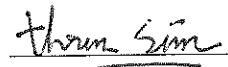
School of Civil Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature



Advisor's Signature



ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank my advisor, Asst. Prof. Dr. Theerawat Sinsiri for his guidance, encouragement, and helpful suggestions during all stages of this thesis. I am very grateful to Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul for serving on my thesis committee and offering his wisdom to my paper writing. I would also like to thank my committee members, Assoc. Prof. Dr. Chatchai Jothityangkoon, Assoc. Prof. Dr. Vanchai Sata and Asst. Prof. Dr. Mongkol Jirawacharadet, for their valuable time, constructive criticisms and suggestions. In addition, I am also very grateful to Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt for offering his wisdom of my paper writing.

I would like to thank the Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), Nakhon Ratchasima, Thailand for financial support. Moreover, I would also like to thank the School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, and Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, for providing faculties and equipment for my research.

Finally, I would like to thank the Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI) of Thailand for the provision of hemp shiv.

Saksith Pantawee

TABLE OF CONTENTS

	Page
ABSTRACT (THAI).....	I
ABSTRACT (ENGLISH).....	III
ACKNOWLEDGEMENT.....	V
TABLE OF CONTENTS.....	VI
LIST OF TABLES.....	X
LIST OF FIGURES.....	XI
SYMBOLS AND ABBREVIATIONS.....	XIII
CHAPTER	
I INTRODUCTION.....	1
1.1 Statement of problem.....	1
1.2 Objective.....	5
1.3 Scope of study.....	6
1.4 Outline of study.....	7
1.5 References.....	8
II THEORETICAL BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW.....	11
2.1 Hemp.....	11
2.1.1 What is “ <i>Hemp</i> ”?	11
2.1.2 Industrial hemp.....	13
2.2 Hemp concrete.....	18

TABLE OF CONTENTS (continued)

	Page
2.3 Aluminium sulfate	19
2.4 Calcium hydroxide.....	20
2.5 Chemical treatments on biomaterials.....	21
2.6 The effect of hemp shiv on mechanical properties of hemp concrete manufactured using cement based binders.....	23
2.7 Pozzolan.....	24
2.8 Fly ash.....	25
2.9 Concrete containing fly ash.....	26
2.10 The effect of high volume fly ash on compressive strength of concrete.....	27
2.11 References.....	29
III EXPERIMENTAL PROGRAM.....	34
3.1 Materials.....	34
3.2 Composition of the mix proportion.....	36
3.3 Specimen preparations.....	38
3.4 Experimental methods.....	39
3.5 References.....	41
IV RESULTS AND DISCUSSIONS.....	42
4.1 SEM micrographs of hemp shiv structure.....	42
4.2 Typical oxide compositions of untreated and $Al_2(SO_4)_3$ treated hemp shiv by X-ray fluorescence (XRF) analysis.....	44

TABLE OF CONTENTS (continued)

	Page
4.3 Cellulose, hemicellulose and lignin contents of hemp shiv.....	45
4.4 X-ray diffractogram of hemp shiv.....	46
PART I: Hemp concrete using hemp shiv as a coarse aggregate.....	48
4.5 Effect of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ treatment on setting time of hemp concrete.....	48
4.6 Compressive strength of hemp concrete	51
4.7 Density of hemp concrete	55
4.8 Water absorption of hemp concrete	57
4.9 Drying shrinkage of hemp concrete	58
4.10 Thermal conductivity of hemp concrete	59
PART II: Impact of fly ash on hemp concrete.....	60
4.11 SEM micrographs of Mae Moh fly ash.....	60
4.12 Oxide compositions of Mae Moh fly ash by X-ray fluorescence (XRF) analysis.....	61
4.13 Setting time of hemp concrete containing fly ash.....	61
4.14 Compressive strength of hemp concrete containing fly ash	64
4.15 Density of hemp concrete containing fly ash.....	68
4.16 Water absorption of hemp concrete containing fly ash.....	69
4.17 Drying shrinkage of hemp concrete containing fly ash	70
4.18 Thermal conductivity of hemp concrete containing fly ash.....	71
4.19 References.....	72

TABLE OF CONTENTS (continued)

	Page
V CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS.....	74
5.1 Conclusions.....	74
5.2 Recommendations.....	76
APPENDICES	
APPENDIX A. SEM micrographs of hemp shiv structure	77
APPENDIX B. Setting time.....	79
APPENDIX C. Compressive strength.....	82
APPENDIX D. Density.....	84
APPENDIX E. Water absorption.....	86
APPENDIX F. List of publications.....	88
BIOGRAPHY.....	121

LIST OF TABLES

Table	Page
3.1 Grading of the air-dried hemp shiv and sand.....	34
3.2 Composition of the mix proportions with different amounts of complex mineralizer.....	37
3.3 Composition of the mix proportions with different amounts of fly ash.....	37
4.1 Typical oxide compositions of untreated and $Al_2(SO_4)_3$ treated hemp shiv.....	44
4.2 The cellulose, hemicellulose and lignin contents of hemp shiv.....	45
4.3 Setting time and slump of hemp concrete.....	48
4.4 Thermal conductivity of hemp concrete at 28 days.....	59
4.5 Typical oxide compositions of Mae Moh fly ash.....	61
4.6 Setting time and slump of hemp concrete containing fly ash.....	62
4.7 Thermal conductivity of hemp concrete containing fly ash at 28 days.....	71

LIST OF FIGURES

Figure	Page
2.1 Cannabis Sativa vs Cannabis Indica: <i>Difference explained in official terms.</i> (Minister of Hemp, 2016).....	12
2.2 Hemp cultivation in the Northern Thailand.....	14
2.3 Application of hemp (Ernest Small and David Marcus, 2002).....	15
2.4 Hemp fibre.....	16
2.5 Hemp “hurd” or “shiv”.....	17
2.6 Lime-hemp or “Hempcrete”.....	18
3.1 Appearance of hemp shiv.....	35
3.2 Schematic of research.....	39
4.1 SEM micrographs of hemp shiv structure.....	43
4.2 X-ray diffractogram of hemp shiv.....	46
4.3 SEM - EDS analysis of HC0 matrix at 28 days.....	50
4.4 Development of compressive strength of hemp concrete.....	51
4.5 SEM micrographs of the control hemp concrete (HCC) matrix.....	52
4.6 SEM micrographs of HC3.....	53
4.7 Density of hemp concrete.....	55
4.8 Distribution of hemp shiv in the hemp concrete matrix.....	56
4.9 Water absorption of hemp concrete.....	57
4.10 Drying shrinkage of hemp concrete.....	58

LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page
4.11 SEM micrographs of Mae Moh fly ash.....	60
4.12 SEM-EDS analysis of hemp concrete containing fly ash at 7 days	63
4.13 Development of compressive strength of hemp concrete containing fly ash....	64
4.14 X-ray diffractogram of hemp concrete containing fly ash.....	65
4.15 SEM micrographs of hemp concrete containing fly ash at 28 days.....	66
4.16 Density of hemp concrete containing fly ash.....	68
4.17 Water absorption of hemp concrete containing fly ash.....	69
4.18 Drying shrinkage of hemp concrete containing fly ash	70

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

°C	=	Degree Celsius
°F	=	Degree Fahrenheit
µm	=	Micron
ρ	=	Density
ACI	=	American Concrete Institute
ADF	=	Acid detergent fibre
ADL	=	Acid detergent lignin
Al ₂ (SO ₄) ₃	=	Aluminium sulfate
ASTM	=	American Society for testing materials
a.u.	=	Arbitrary units
B/S	=	Binder to sand ratio
BS	=	British Standard
C/S	=	Cement to sand ratio
C-S-H	=	Calcium silicate hydrate
C ₂ S	=	Dicalcium silicate
C ₃ A	=	Tricalcium aluminate
Ca	=	Calcium
CaCO ₃	=	Calcium carbonate
CaCl ₂	=	Calcium chloride
CaO	=	Calcium oxide

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS (continued)

Ca(OH)_2	=	Calcium hydroxide
CaSO_4	=	Calcium sulfate
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	=	Gypsum
Cr_2O_3	=	Chromium oxide
EN	=	European standard
FA	=	Fly ash
Fe_2O_3	=	Iron oxide
g/cm^3	=	Gram per cubic centimeter
HVFA	=	High volume fly ash
H_2SO_4	=	Hydrogen sulfate
HF	=	Hemp shiv
hrs	=	Hours
HS/B	=	Hemp shiv to binder ratio
HS/C	=	Hemp shiv to cement ratio
in.	=	Inch
$\text{J/g}^\circ\text{C}$	=	Joule per gram per degree Celsius
k	=	Thermal conductivity
K_2O	=	Potassium oxide
K_2SO_4	=	Potassium sulfate
kg/cm^3	=	Kilogram per cubic centimeter
kg/m^3	=	Kilogram per cubic meter
KHSO_4	=	Potassium bisulfate

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS (continued)

KOH	=	Potassium hydroxide
lb/yd ³	=	Pound per cubic yard
LOI	=	Loss on ignition
m ² /kg	=	Square meter / kilogram
MgO	=	Magnesium oxide
min	=	Minute
mm	=	Millimeter
mm ³ /g	=	Cubic millimeter per gram
MnO ₂	=	Manganese dioxide
MPa	=	Mega Pascal
Na ₂ O	=	Sodium oxide
NaOH	=	Sodium hydroxide
NDF	=	Neutral detergent fibre
NiO	=	Nickel oxide
NO _x	=	Nitrogen oxides
P ₂ O ₅	=	Phosphorus pentoxide
psi	=	Pound square inch
sec	=	Second
SEM	=	Scanning electron microscope
SiO ₂	=	Silicon dioxide
SO ₃	=	Sulfur trioxide
SP	=	Superplasticizer

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS (continued)

THC	=	Tetrahydro cannabinol
TiO ₂	=	Titanium dioxide
UFFA	=	Ultrafine fly ash
W/B	=	Water to binder ratio
W/C	=	Water to cement ratio
W/m-K	=	Watt per meter-Kelvin
XRD	=	X-ray diffraction
XRF	=	X-ray fluorescence

CHAPTER I

INTRODUCTION

1.1 State of problem

Among the new vegetable fibres in use, hemp stands out from the rest because of its availability, low requirements of fertilizer and irrigation, permanent renewal character, good humidity control and ecological balance (Del R. Valle-Zermeno et al., 2016).

“Hemp” refers primarily to *Cannabis sativa L.* (Cannabaceae) (Ernest Small and David Marcus, 2000). The oldest known record of hemp farming goes back 5000 years in China, although hemp industrialization likely extends back to ancient Egypt. Medicinal cannabis is described in print in a Chinese book of medicine, “Herbal,” in the 2nd century B.C (An Old Rippie, 2016). By definition, industrial hemp refers to those strains of *Cannabis sativa L.* containing less than 1% THC (Tetrahydrocannabinol). Most developed countries that permit industrial hemp cultivation limit production to those varieties with less than 0.3% THC (Valerie L. Vantreese, 1998). Currently, hemp is grown in China, Europe (Russia, France, Ukraine, United Kingdom, Germany, Poland, and Finland), and Canada (DeeDee De Miranda, 2011).

Hemp fibre is an organic fibre product of the hemp plant which is specially bred to produce strong fibre and oily seeds appropriate for industrial purposes (Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren, 2012). Industrial hemp is grown for its fibre (outer bark), hurd (woody inner core of the stalk) and seeds (for oil and meal). Hemp stalks

average approximately 20 to 30% bast fibre (the strong woody fibre obtained chiefly from the phloem of plants) (Valerie L. Vantreese, 1998). Hemp fibre has thousands of applications including fabric for home furnishings, automotive interiors, and apparel, as well as other industrial uses such as composites, cordage (such as rope), specialty textiles and specialty papers (including teabag paper, coffee filters, cigarette paper, carbon tissues and condensing tissues) (DeeDee De Miranda, 2011).

A secondary product of the high-quality bast fibre crop is the internal core or “hurd,” consisting of short fibres and cellulosic biomass with a variety of industrial applications (Skaidra Smith-Heisters, 2008). Approximately 70 to 80% of the hemp stalk is composed of hurd or the woody inner portion of the plant. Essentially, hurds are the by-products of extracting the bast fibres from the stalk. Hurd is 50 to 70% cellulose, lending itself to paper, particle board, biodegradable plastics, building materials (thermal and acoustic insulation products), and animal bedding. For example, most of the hemp grown in the United Kingdom is designated for the horse industry (Valerie L. Vantreese, 1998 and Adnan M. Esmail, 2010). The use of the core for building materials extends beyond concrete to acoustic insulation and even to animal bedding. In fact, the use of the hurd in construction is becoming increasingly common in Europe, where hemp is attracting attention from venture capital and large corporations. The core, which was once discarded as a useless component, is now being grown for its great biomass and unique material properties (Adnan M. Esmail, 2010). Hemp hurd or “hemp shiv” is used as aggregate for the manufacture of hemp concrete and there are several studies on “Hempcrete”.

Hempcrete developed in the early 1990s in France is a combination of lime and hemp shiv (Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren, 2012). This material can be used for several applications (wall, floor and roof) by adjusting the composition. It is implemented by casting, spraying or pre-casting. A hempcrete is used with a framework made of steel, concrete or wood. Usually, hempcrete walls are coated on both sides but it can occasionally be bare on the indoor side (Florence Collet, Sylvie Pretot, 2014). Hempcrete has been used more and more in building construction because hemp is a renewable plant, it is recyclable, and it does not degrade over time (Tran Le A.D. et al., 2015)

However, due to the low mechanical performances of hempcrete, it is used for non-load bearing purposes as it has compressive strength of approximately 1 MPa (Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren, 2012). Hempcrete is a bio-based building material made of lime and hemp shiv. With regards to the mechanical properties of cement binder and lime, the compressive strength of cement is higher. The mechanical properties of hempcrete are improved by replacing lime with Portland cement. Cement is a significant component of concrete and is mixed with the other components to increase the mechanical properties of "hemp concrete".

Previous research shows that wood is chemically heterogeneous and its components can be divided into two groups: structural components of high molecular weight-natural polymer substances (cellulose, hemicelluloses and lignin) which are the major cell wall components, and non-structural components of low molecular weight (extractives and inorganic components) (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006). Pehanich reported that there are many chemical components in wood fibre, but the main inhibitor of cement hydration is sugar (Jennifer L. Pehanich,

2004). Building products such as cement bonded wood made from mineral binding materials and wood aggregates are widely developed in many developed countries. Preparing concrete mixtures with wood requires large amounts of water. This water dissolves the extractive materials that retard the hardening of Portland cement. The cement hydration, setting and hardening depend on the wood extract concentration, but does not on the wood species and preparation method (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006).

Several chemical treatments have been applied to the wood fibres before combining them with the cement binder. The compressive strength and other mechanical properties of the treated wood fibre composites are higher than those of the untreated fibres (Ming Liu, 2016). Chemicals such as sodium hydroxide (NaOH) (Reinu E. Abraham et al., 2013; Paul R. Blankenhorn et al., 2001; Sedan D. et al., 2008), calcium chloride (CaCl_2) (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007), and aluminium sulfate [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007; Giedrius Balciunas et al., 2015), sometimes also referred to as mineralization agents (mineralizers), improved compatibility of cement and plant origin aggregates. Complex mineralizers such as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ are also used. When $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ is used as a mineralizer, it impedes the release of sugar from organic aggregates and reduces higrscopicity and water absorption (Giedrius Balciunas et al., 2015). The $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in the form of hydrate is the characteristic of an acidic reaction in water, and calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] is characteristic of an alkaline reaction in water. The mineralization is achieved by enhancing the efficiency of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, neutralizing the acidic environment caused by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and improving the workability of the mixture. Wood aggregate mineralization also leads to improved adhesion between

aggregate and cement binder (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007; Giedrius Balciunas et al., 2015).

The construction industry has responded to the growing demand for sustainable and environmentally friendly building materials. One of such material is hemp-lime concrete, it was good thermal insulation material, excellent hydric properties, great acoustic capabilities, and good fire resistance (Sinka M. et al., 2015). This research aims to develop a mix proportion of the bio-composites using hemp shiv as coarse aggregate. The shiv is mineralized by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, neutralized with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and mixed with sand and cement to make “hemp concrete”, and cement is partially replaced using fly ash to reduce the cost of the hemp concrete. The effects of the chemical treatment on some mechanical properties will be evaluated.

1.2 Objective

The overall purpose of this research was to study the potential of hemp shiv for use as a coarse aggregate in concrete.

This was achieved through the following objectives:

1.2.1 To find an appropriate proportion to improve the hemp shiv with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

1.2.2 To develop hemp concrete to concrete that can be applied in construction such as moderate strength concretes with the compressive strengths are approximately 7 to 17 MPa.

1.2.3 To apply fly ash in hemp concrete.

1.2.4 To support Thailand's hemp planting in the future.

1.3 Scope of study

1.3.1 The binder used in this investigation was Type I Portland cement.

1.3.2 The aggregates used in this study consisted of hemp shiv as coarse aggregate, and sand was used as fine aggregate.

1.3.3 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ were used as complex mineralizers for chemical treatment.

1.3.4 The hemp shiv to cement ratio (HS/C) of 0.16 by weight was selected based on the compatibility of the trial mix. The cement to sand ratio (C/S) was 1:2, the $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ratio was 1:2, the water to cement ratio (W/C) was kept constant of 0.48, and the superplasticizer (SP) content of 1% by weight of cement was also used.

1.3.5 Type I Portland cement was partially replaced by fly ash in the appropriated mix proportion 10, 20, 30, 40, 50 and 90% by mass of binder.

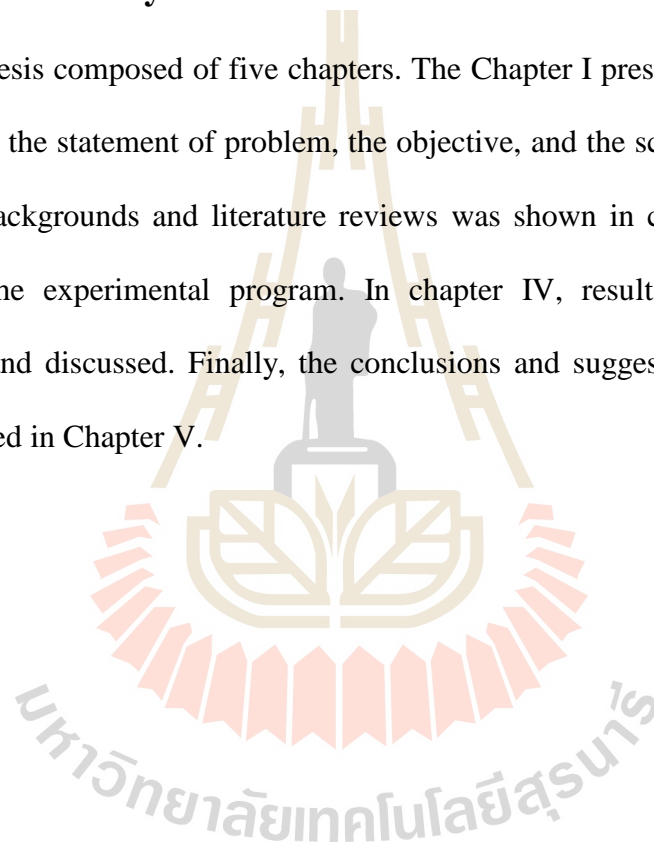
1.3.6 The morphological structure of hemp shiv was studied using a scanning electron microscope (SEM). The chemical compositions of hemp shiv were investigated by X-ray fluorescence (XRF) Energy dispersive spectrometer. The quantity of cellulose, hemicellulose and lignin were determined using the detergent fibre analysis. X-ray diffraction (XRD) analysis was used to determine the crystallinity index of hemp shiv.

1.3.7 The specimens for setting time test were 150×150×150 mm cube. The compressive strength specimens were cast in 100×100×100 mm cube. The water absorption and density specimens were cast in a 50×100 mm cylinder. The drying shrinkage specimens were cast in 75×75×285 mm prisms. The thermal conductivity specimens were cast in 25.4×300×300 mm plate. After demoulding, they were stored

at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity. Each test result represented the mean of at least three specimens. The compressive strength, water absorption and density specimens were investigated at 7, 14, 28 and 56 days, and the thermal conductivity specimens were tested at 28 days of curing.

1.4 Outline of study

This thesis composed of five chapters. The Chapter I presented the introduction of this study; the statement of problem, the objective, and the scope of the study. The theoretical backgrounds and literature reviews was shown in chapter II. Chapter III introduced the experimental program. In chapter IV, results of the study were determined and discussed. Finally, the conclusions and suggestions from this study were presented in Chapter V.



1.5 References

- Adnan M. Esmail (2010), Cannabis Sativa: An optimization study for ROI. **The Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.**
- An Old Rippie (2016). The Ultimate Cannabis. **Indoor Cultivation and usage guide.** 44 pages.
- DeeDee De Miranda (2011). An evaluation of hemp fibre for furnishing applications. **Master Thesis of Science. Colorado State University Fort Collins, Colorado.**
- Del R. Valle-Zermeno, Aubert J.E., Laborel-Preneron A., Formosa J. and Chimenos J.M. (2016). Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties of hemp-magnesium phosphate cements. **Construction and Building Materials.** 105: 62-68.
- Ernest Small and David Marcus. Hemp: A New Crop with New Uses for North America (2002). **Trends in New Crops and New Uses.** 285-326.
- Florence Collet and Sylvie Pretot (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete Wall. **Building and Environment.** 82: 459-466.
- Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite-Lukosiune, Sigitas Vejelis, and Aleksandrs Korjakins (2015). Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products.** 77: 724-734.
- Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene (2006). Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics – Silikaty.** 50 (2): 115-122.

- Jennifer L. Pehanich, Paul R. Blankenhorn and Michael R. Silsbee (2004). Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre–cement composites. **Cement and Concrete Research**. 34: 59-65.
- Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz (2007). Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete. **Bialystok Technical University**. 50 pages.
- Ming Liu, Anne S. Meyer, Dinesh Fernando, Diogo Alexandre Santos Silva, Geoffrey Daniel and Anders Thygesen (2016). Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. **Composites: Part A**. 90: 724-735.
- Paul R. Blankenhorn, Brad D. Blankenhorn, Michael R. Silsbee and Maria DiCola (2001). Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites. **Cement and Concrete Research**. 31: 1049-1055.
- Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren (2012). Is industrial hemp a sustainable construction material?, **Bachelor of Architectural Technology and Construction Management, VIA University College, Horsens, Denmark**.
- Reinu E. Abraham, Colin J. Barrow and Munish Puri (2013). Relationship to reducing sugar production and scanning electron microscope structure to pretreated hemp hurd biomass (*Cannabis sativa*). **Biomass and Bio Energy**. 58: 180-87.
- Sedan D., Pagnoux C., Smith A. and Chotard T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement : Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**. 28: 183-192.

- Sinka M., Sahmenko G., Korjakins A., Radina R. and Bajare D. (2015). Hemp thermal insulation concrete with alternative binders, analysis of their thermal and mechanical properties. **2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. Materials Science and Engineering.** 96: 012029.
- Skaidra Smith-Heisters (2008). Illegally green: Environmental costs of hemp prohibition. 50 pages.
- Tran Le A.D., Samri D., Rahim M., Douzane O., Promis G. and Langlet T. (2015). Effect of temperature-dependent sorption characteristics on the hygrothermal behavior of hemp concrete. **Energy Procedia.** 78: 1449- 1454.
- Valerie L. Vantreese (1998). Industrial Hemp : Global Operations, Local Implications. **Department of Agricultural Economics University of Kentucky, Lexington.** KY 40546-0276.

CHAPTER II

THEORETICAL BACKGROUND AND LITERATURE REVIEWS

This chapter provides the theoretical background and literature reviews of hemp and hemp concrete, aluminium sulfate, calcium hydroxide, chemical treatments was applied to the wood fibres, the effect of hemp shiv on mechanical properties of hemp concrete manufactured using cement based binders, pozzolan, fly ash, concrete containing fly ash, and the effect of high volume fly ash on compressive strength of concrete.

2.1 Hemp

2.1.1 What is “Hemp”?

“Hemp” refers primarily to *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae). The common names hemp and marijuana (much less frequently spelled marihuana) have been applied loosely to all three forms, although historically hemp has been used primarily for the fiber cultigen and its fiber preparations, and marijuana for the drug cultigen and its drug preparations (Ernest Small and David Marcus, 2002). The name “marijuana” is a Mexican slang word. The actual Spanish word for the plant is “canamo.” Prior to the mid-1930s, marijuana was known throughout the world as “hemp” or “cannabis.” Cannabis is the plant’s botanical name and has ancient origins in the Hebrew language. Solid evidence of Hebrew cannabis usage was established in



Sativa



Sativa



Marijuana or Indica

Marijuana or Indica



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

In Thailand, permits to grow, produce, sale or possession of the hemp must be in accordance with the Ministerial Regulations published in the Thai Royal Government Gazette, which states "certified seed" had a THC content of less than 1.0% of dry weight. And there are criteria for analysis as determined.

2.1.2 Industrial hemp

The oldest known record of hemp farming goes back 5000 years in China, although hemp industrialization likely extends back to ancient Egypt. Medicinal cannabis was described in print in a Chinese book of medicine, "Herbal," in the 2nd century B.C. (An Old Rippie, 2016).

Currently, industrial hemp had been grown in China, Europe (Russia, France, Ukraine, United Kingdom, Germany, Poland, Finland, Hungary, Romania, and Canada (DeeDee De Miranda, 2011). In Thailand, the breed of hemp has been developed since 2004 before they were encouraged to grow in 2017 (Figure 2.2).



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Hemp is a multi-functional plant that has been domesticated for bast (phloem) fiber in the stem, a multi-functional fixed oil in the “seeds” (achenes), and an intoxicating resin secreted by epidermal glands (Ernest Small and David Marcus, 2002).

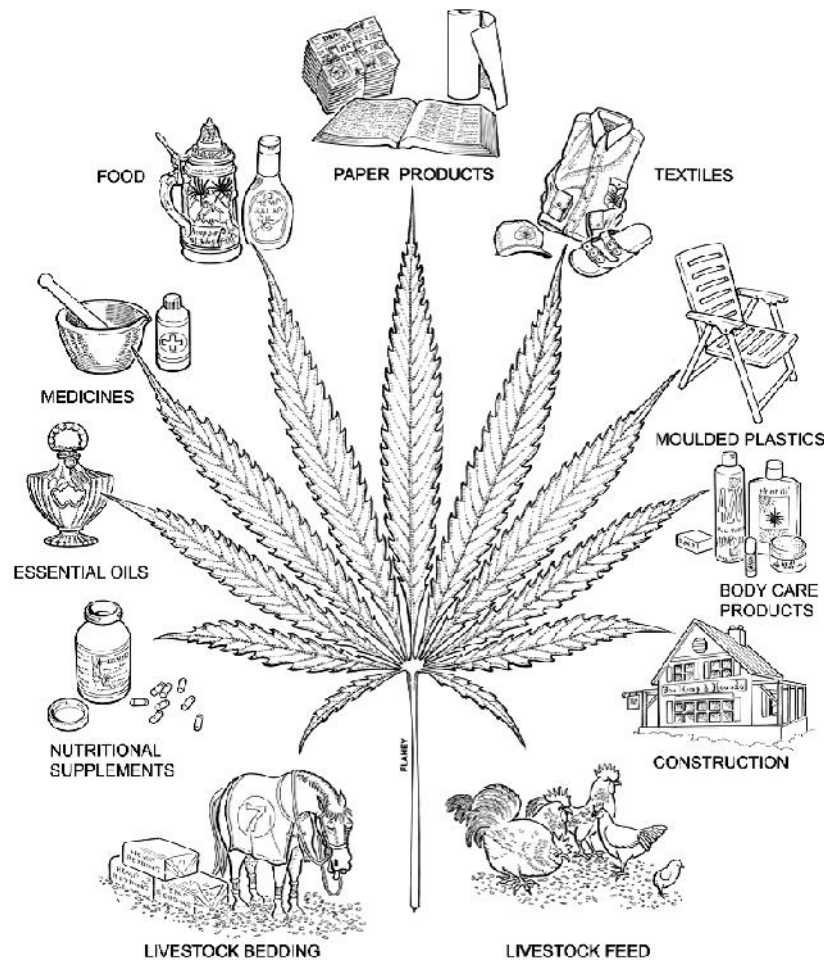


Figure 2.3 Application of hemp (Ernest Small and David Marcus, 2002)

Hemp fibre (Figure 2.4) is an organic fibre product of the hemp plant which is specially bred to produce strong fibre and oily seeds appropriate for industrial purposes (Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren, 2012). Industrial hemp is grown for its fibre (outer bark, Figure 2.4 a.), hurd (woody inner core of the stalk)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



lun

side (Florence Collet and Sylvie Pretot, 2014). Hempcrete has been used more and more in building construction because hemp is a renewable plant, it is recyclable, and it does not degrade over time (Tran A.D. Le. Et al., 2015).

Building with lime-hemp has environmental, economic, and social benefits. Among its features: high carbon sequestration; low toxicity, walls breathability, low embodied energy, good thermal performance, comparable costs to standard building materials and methods, hemp is a valuable new crop for farmers (Paolo Ronchetti, 2007). However, due to the low mechanical performances of hempcrete, it is used for non-load bearing purposes as it has compressive strength of approximately 1 MPa (Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren, 2012). Hempcrete is a bio-based building material made of lime and hemp shiv. With regards to the mechanical properties of cement binder and lime, the compressive strength of cement is higher. The mechanical properties of hempcrete are improved by replacing lime with Portland cement. Cement is a significant component of concrete and is mixed with the other components to increase the mechanical properties of “hemp concrete”.

2.3 Aluminium sulfate

Aluminium sulfate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, is provided in the anhydrous state by heating the crystalline, hydrated salt. After melting in the water of its crystallization, it swells up, and finally leaves a porous, white residue of anhydrous sulfate. The density of the anhydrous sulfate is 2.713 g/cm^3 (17°C), its specific heat (0 to 100°C) is $0.1855 \text{ J/g}^\circ\text{C}$. At a red heat it decomposes, leaving a residue of alumina; decomposition becomes discernible at 770°C . It dissolves slowly in water. A solution of aluminium

sulfate is readily provided by dissolving aluminium hydroxide in dilute sulfuric acid. (http://aluminium.atomistry.com/aluminium_sulfate.html, 2012).

2.4 Calcium hydroxide

Calcium is a chemical element with an atomic number 20 and its symbol is Ca. It is an alkaline earth metal, refined from lime stone. The first step in this process is to heat the limestone, leaving only calcium oxide. After extraction of calcium hydroxide, it is made to react with water. When the reaction is complete, what remain is calcium hydroxide and heat. During the hydration, calcium oxide is broken down into calcium hydroxide a particle which is also called "hydrated lime". In order to maintain the chemical, it must be sealed tightly, because if it is not properly sealed it will absorb carbon dioxide from the air and become calcium carbonate (<http://calcium-hydroxide.weebly.com/>).

Calcium hydroxide is used in a variety of building and paving materials. It can be found in mortar, cement and plaster. When calcium hydroxide is used in mortar it is mixed with sand and water to make a paste to place between the building blocks to hold them together. Once the paste is dry the water has evaporated and only the calcium hydroxide and sand are left behind in a solid state and is somewhat sticky to hold the building blocks in place. Calcium hydroxide is also widely used as a neutralizing agent because it reacts with acids that are formed in the industrial environment and many other situations. For example, you can make acidic soils into neutral soils with the help of calcium hydroxide. The process that occurs is the ion (OH-) in the chemical calcium hydroxide reacts with water in acidic soil, resulting in neutral water (<http://calcium-hydroxide.weebly.com/>).

2.5 Chemical treatments on biomaterials

Previous research shows that wood is chemically heterogeneous and its components can be divided into two groups: structural components of high molecular weight - natural polymer substances (cellulose, hemicelluloses and lignin) which are the major cell wall components, and non-structural components of low molecular weight (extractives and inorganic components). Cellulose is insoluble in water, organic solvents and alkaline solution. It does not mediate under the influence of these materials. Lignin is the most complex polymer and high molecular weight materials. It does not dissolve under the influence of organic solvents, alkaline solutions and water. Hemicelluloses differ from cellulose by containing various sugar units with much shorter chains. It is a group of different polymers made up of 5 and 6 carbon sugars. They are soluble in alkali and some hardwood polyoses are even soluble in water. Disintegration of hemicelluloses to the constituents in the alkaline solution increases the amount of extractives. Hemicelluloses are more reactive than cellulose. The extractives are non-polymeric (except pectins and condensed tannins) and may be separated from the insoluble cell wall materials by solving them in water or organic solvents. (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006).

Pehanich reported that there are many chemical components in wood fibre, but the main inhibitor of cement hydration is sugar (Jennifer L. Pehanich et al., 2004). Building products such as cement bonded wood made from mineral binding materials and wood aggregates are widely developed in many developed countries. Preparing concrete mixtures with wood requires large amounts of water. This water dissolves the extractive materials that retard the hardening of Portland cement (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006).

Vaickelionis and Vaickelioniene found that wood extractives are more dissolved in an alkali solution than water. Hemicellulose disintegrates to turn into soluble sugars under the influence of Ca(OH)_2 , the sugars in the process can retard the hydration reaction of Portland cement. The hydration reaction, setting and hardening of cement depend on wood extract concentration (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006).

Several chemical treatments have been applied to the wood fibres before combining them with the cement binder. The compressive strength and other mechanical properties of the treated wood fibre composites are higher those of the untreated fibres (Jennifer L. Pehanich et al., 2004; Ming Liu et al., 2016). Chemicals such as NaOH (Reinu E. Abraham et al., 2013; Paul R. Blankenhorn et al., 2001; Sedan D. et al., 2008), CaCl_2 (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007), and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007; Giedrius Balciunas et al., 2015), sometimes also referred to as mineralization agents (mineralizers), improve compatibility of cement and plant origin aggregates. Complex mineralizers such as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca(OH)}_2$ (hydrated lime) are also used. When $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ is used as a mineralizer, it impedes the release of sugar from organic aggregates and reduces higroscopicity and water absorption (Giedrius Balciunas et al., 2015). The $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in the form of hydrate is the characteristic of an acidic reaction in water, and Ca(OH)_2 is characteristic of an alkaline reaction in water. The mineralization is achieved by enhancing the efficiency of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, neutralizing the acidic environment caused by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and improving the workability of the mixture. Wood aggregate mineralization also leads to improved adhesion between aggregate and cement binder (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007; Giedrius Balciunas et al., 2015).

The mechanical properties of hemp concrete made with treated hemp shiv are better than untreated. However, the physical and mechanical properties of the hemp concrete depend on the character of reagent used for chemical treatment of the shiv. (Stevulova N., Terpakova E. et al., 2012).

2.6 The effect of hemp shiv on mechanical properties of hemp concrete manufactured using cement based binders

Hemp concrete has high porosity (about 80% in volume). A smaller particle of hemp shiv leads to reduce the porosity of hemp concrete (Laurent Arnaud and Etienne Gourlay, 2011), decreasing the size and length of the shiv slices increased the density and the compressive strength of hemp concrete, and the water absorption decreased (Stevulova N., Kidalova L. et al., 2012). Moreover, the mechanical properties of hemp concrete also depend on curing conditions, age of concrete, kind and content of binder, and hemp shiv characteristics (Laurent Arnaud and Etienne Gourlay, 2011). A casting process of hemp concrete block was different with hemp concrete due to the hemp block should have compacting to improve the compressive strength when increasing the shiv proportion (Pierre Tronet et al., 2016). However, using a hemp material that includes both shiv and fibre in mix proportion of hemp concrete did not improve strength stronger than only using shiv. Hemp concrete cannot be used as a load bearing material, which could improve both the compressive strength and Young's modulus for future applications (Paulien Brigitte de Bruijn, 2009).

A nature of hemp as well as mean particle size of hemp shiv slices influences the behavior of hemp concrete; decreasing the mean particle size of hemp shiv was able to improve the compressive strength of hemp concrete. Properties of hemp bio-

composites predetermine this material as a sustainable which can be applied as a non-load bearing material such as interior panel walls with thermal-insulating properties (Nadezda Stevulova, 2013).

A large amount of hydraulic and hydrated lime as the binder did not significantly affect to the mechanical strength of hemp concrete when compare with using cement in equal quantity which increased double the compressive strength. However, Different binder mixtures containing hydrated lime, hydraulic lime and cement did not significantly affect water sorption properties of the HC (Paulien de Bruijn, 2008).

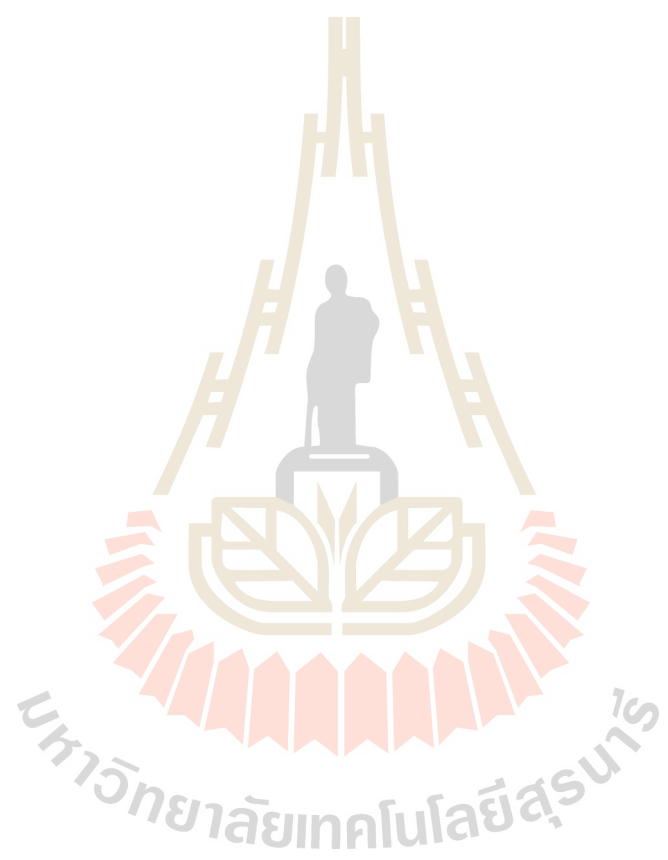
2.7 Pozzolan

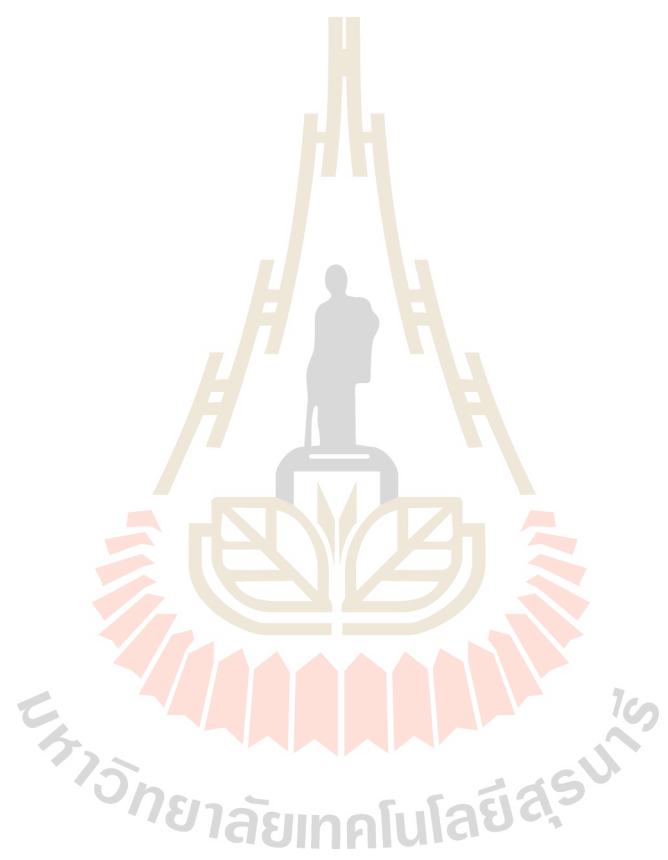
Pozzolan is defined by ASTM C 618 as a siliceous or siliceous and aluminous material which in itself possesses little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties.

Classification

Class N–Raw or calcined natural pozzolans that comply with the applicable requirements for the class as given herein, such as some diatomaceous earths; opaline cherts and shales; tuffs and volcanic ashes or pumicites, calcined or uncalcined; and various materials requiring calcination to induce satisfactory properties, such as some clays and shales.

Class F–Fly ash normally produced from burning anthracite or bituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class fly ash has pozzolanic properties.





2.10 The effect of high volume fly ash on compressive strength of concrete

In current study, possibility of producing concrete using large amounts of waste material, such as a high volume of type F fly ash by replacing cement by mass was investigated.

Fly ash is a by-product of the power plants. It has been accepted as a pozzolanic material that can be used as a mineral admixture in concrete (Xiao-Yong Wang and Ki-Bong Park, 2015). Currently, there are several researchers studied on high volume fly ash concrete (HVFA) made with a fly ash content between 50 and 70% of the total amount of cementitious materials (Xiao-Yong Wang and Ki-Bong Park, 2015; Ignjatovic I., 2017). It is widely used to achieve the sustainable development of concrete industry (Xiao-Yong Wang and Ki-Bong Park, 2015).

Although the compressive strength of HVFA concrete (45% and 55% fly ash) is lower than the normal concrete, the lower binder cement ratio and the water reducing agent is able to improve the compressive strength at late age (Xiao-Yong Wang and Ki-Bong Park, 2015). In addition, the appropriate temperature of curing can effectively promote the early strength development and significantly decrease the chloride permeability of HVFA concrete (Shi Mengxiao et al., 2015).

Furthermore, HVFA concrete containing 39% fly ash and 1 wt% CaCO_3 nanoparticles can also improve the compressive strength higher than the normal concrete at early age and reduce the water absorption. That is an indication that the 1% CaCO_3 nanoparticles addition in HVFA system forms a finer pore structure than HVFA paste alone (Faiz U.A. Shaikh and Steve W.M. Supit, 2014).

Moreover, it is also found that 1% CaCO_3 nanoparticles can improve the microstructure of HVFA by forming additional calcium silicate hydrate gels, and decreases the calcium hydroxide and calcium silicates. Besides, it is also revealed that the addition of CaCO_3 nanoparticles not only led to much dense microstructure in the matrix but also changed the formation of hydration products, hence contributed to the improvement of early-age compressive strength and durability properties of HVFA concretes (Faiz U.A. Shaikh and Steve W.M. Supit, 2014). Further study is the use of ultrafine fly ash (UFFA) on compressive strength of concrete containing high volume class F fly ash as partial replacement of cement.; the results also indicate the effectiveness of UFFA in producing high packing density and in accelerating the pozzolanic activity to produce more C-S-H gel by consuming calcium hydroxide (CH) in high volume fly ash concretes. (Faiz U.A. Shaikh and Steve W.M. Supit, 2015).

Addition of pozzolanic materials into cement mixtures decreases the retarding effect of wood extractives because the specific surface of pozzolanic materials is larger than cement. Besides, the absorption ability of these materials is also higher. Moreover, the amount of free lime bound by pozzolanic material is an indication of pozzolanic activity. (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006).

2.11 References

- Adnan M. Esmail (2010). Cannabis Sativa: An optimization study for ROI. The Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- An Old Rippie (2016). The Ultimate Cannabis. **Indoor Cultivation and usage guide**. 44 pages.
- DeeDee De Miranda (2011). An evaluation of hemp fibre for furnishing applications. **Master Thesis of Science. Colorado State University Fort Collins, Colorado.**
- Ernest Small and David Marcus. Hemp: A New Crop with New Uses for North America (2002). **Trends in New Crops and New Uses**. 285-326.
- Faiz U.A. Shaikh and Steve W.M. Supit (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO_3) nanoparticles. **Construction and Building Materials**. 70: 309-321.
- Faiz U.A. Shaikh and Steve W.M. Supit (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). **Construction and Building Materials**. 82: 192-205.
- Florence Collet and Sylvie Pretot (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete Wall. **Building and Environment**. 82: 459-466.
- Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite-Lukosiune, Sigitas Vejelis, and Aleksandrs Korjakins (2015). Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products**. 77: 724-734.

Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene (2006). Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics – Silikaty**. 50 (2): 115-122.

http://aluminium.atomistry.com/aluminium_sulfate.html (2012). Aluminium sulfate, $Al_2(SO_4)_3$.

<http://calcium-hydroxide.weebly.com/>

Ignjatovic I., Sas Z., Dragas J., Somlai J. and Kovacs T. (2017). Radiological and material characterization of high volume fly ash Concrete. **Journal of Environmental Radioactivity**. 168: 38-45.

Jennifer L. Pehanich, Paul R. Blankenhorn, Michael R. Silsbee (2004). Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre–cement composites. **Cement and Concrete Research**. 34: 59-65.

Laurent Arnaud, Etienne Gourlay (2011). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. **Construction and Building Materials**. 28: 50-56.

Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz (2007). Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete. **Bialystok Technical University**. 50 pages.

Ming Liu, Anne S. Meyer, Dinesh Fernando, Diogo Alexandre Santos Silva, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen (2016). Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. **Composites: Part A**. 90: 724-735.

Minister of Hemp (2016). Cannabis Sativa vs Cannabis Indica: Difference explained in official terms. <https://ministryofhemp.com/hemp/not-marijuana/>

- Nadezda Stevulova, Lucia Kidalova, Julia Cigasova, Jozef Junak Alena Sicakova and Eva Terpakova (2013). Lightweight composites containing hemp hurds. **Procedia Engineering**. 65: 69-74.
- Neville A.M. (1996). Properties of Concrete (4th and final ed.) Malaysia: Longman.
- Paolo Ronchetti (2007). The barriers to the mainstreaming of lime-hemp: a systemic approach . School of Spatial Planning, Department of Environment and Planning, Dublin Institute of Technology.
- Paulien Brigitte de Bruijn, Knut-Hakan Jeppsson, Kenneth Sandin and Christer Nilsson (2009). Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. **Biosystems engineering**. 103: 474-479.
- Paulien de Bruijn (2008). Hemp concretes: Mechanical properties using both shives and fibres. Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences Alnarp, **Swedish University of Agricultural Sciences**. 47 pages.
- Paul R. Blankenhorn, Brad D. Blankenhorn, Michael R. Silsbee, Maria DiCola (2001). Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites. **Cement and Concrete Research**. 31: 1049-1055.
- Pierre Tronet, Thibaut Lecompte, Vincent Picandet and Christophe Baley (2016). Study of lime hemp concrete (LHC) - Mix design, casting process and mechanical behavior. **Cement and Concrete Composites**. 67: 60-72.
- Plamen Ivanov Peev and Jesper Saxgren (2012). Is industrial hemp a sustainable construction material?, **Bachelor of Architectural Technology and Construction Management, VIA University College, Horsens, Denmark**.

- Reinu E. Abraham, Colin J. Barrow, Munish Puri (2013). Relationship to reducing sugar production and scanning electron microscope structure to pretreated hemp hurd biomass (*Cannabis sativa*). **biomass and bio energy**. 58: 180-87.
- Sedan D., Pagnoux C., Smith A., Chotard T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement : Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**. 28: 183-192.
- Shi Mengxiao, Wang Qiang and Zhou Zhikai (2015). Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition. **Construction and Building Materials**. 98: 649-655.
- Skaidra Smith-Heister (2008). Illegally green: Environmental costs of hemp prohibition. 50 pages.
- Stevulova N., Kidalova L., Junak J., Cigasova J. and Terpakova E. (2012). Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites. **Procedia Engineering**. 42: 496-500.
- Stevulova N., Terpakova E., Cigasova J., Junak J. and Kidalova L. (2012). Chemically treated hemp shives as a suitable organic filler for lightweight composites preparing. **Procedia Engineering**. 42: 948-954.
- Tran A.D. Le, Samri D., Rahim M., Douzane O., Promis G., Langlet T. (2015). Effect of temperature-dependent sorption characteristics on the hygrothermal behavior of hemp concrete. **Energy Procedia**. 78: 1449-1454.

Valerie L. Vantreese (1998). Industrial Hemp : Global Operations, Local Implications. **Department of Agricultural Economics University of Kentucky, Lexington.** KY 40546-0276.

Xiao-Yong Wang and Ki-Bong Park (2015). Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. **Construction and Building Materials.** 98: 810-819.



CHAPTER III

EXPERIMENTAL PROGRAM

This chapter explains the details of the experimental program. The study was divided into two parts. In part I, showed the mixed proportions of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate [$Al_2(SO_4)_3$] and hydrated lime [$Ca(OH)_2$] treatment. In part II, showed an appropriate proportion replacing cement with fly ash. All mix proportions were used to study the compressive strength, density, water absorption, drying shrinkage, and thermal conductivity. The morphological structure of hemp shiv was studied using a scanning electron microscope (SEM). The investigation of the chemical composition of hemp shiv used X-ray fluorescence (XRF) Energy dispersive spectrometer. The quantity of cellulose, hemicellulose and lignin were determined using the detergent fibre analysis. X-ray diffraction (XRD) analysis was performed to determine the crystallinity of hemp shiv.

3.1 Materials

The Hemp Shiv (HS) was provided by the Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI) in the Northern Thailand (Figure 3.1). The shiv was stored in polythene bags before the chemical treatment. The shiv was sieved to obtain sample passed the 9.5 mm (3/8 in.) sieve. The used shiv consisted of 35% retained on the 4.75 mm (No. 4) and 65% retained on the 2.36 mm (No.8) sieve. The grading of the air-dried shiv and river sand are given in Table 3.1.



Individual size fraction	Hemp shiv, %	Sand, %
9.50 mm (3/8 in.) to 4.75 mm (No. 4)	35	-
3.75 mm (No. 4) to 2.36 mm (No. 8)	65	-
2.36 mm (No. 8) to 1.18 mm (No. 16)	-	14
1.18 mm (No. 16) to 600 μ m (No. 30)	-	41
600 μ m (No. 30) to Pan	-	45
Total	100	100

In this study, the water content was kept constant with the aid of a superplasticizer. Its specific density was 1.06 kg/litre, and the recommended dosage for concrete was 0.4 to 1.5% by mass of binder.

3.2 Composition of the mix proportion

Based on the literatures (Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz, 2007; Giedrius Balciunas et al., 2015) aluminium sulfate [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] and hydrated lime [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] were used as complex mineralizer for chemical treatment. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in the form of hydrate was used for the characteristic of an acidic reaction in water (pH = 3 to 5) and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was for the characteristic of an alkaline reaction in water (pH = 11 to 12). Primarily, hemp shiv (HS) was mineralized using the solution of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, and the acidic $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ reaction was then neutralized with hydrated lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The total content of mineralizer was increased to 81% (based on HS mass), and the water for the process of preparing the $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ solution was 1.5x that of HS mass. The untreated shiv was used to prepare the control hemp concrete (HCC). The details of the mixes are given in Table 3.2.

In Part I, type I Portland cement have been used as a binder for hemp concrete and has shown improving mechanical strength, but the weakness of the cement is its environmental impact. This impact could be minimized using higher hemp shiv to cement ratio which would mean a lower amount of binder used [19]. In this study, the current hemp shiv to cement ratio (HS/C) of 0.16 by mass was selected based on the compatibility of the trial mix [17, 18, 19]. The cement to sand ratio (C/S) of 1:2 by mass, the water to cement ratio (W/C) of 0.48, and the superplasticizer (SP) content of 1% were used in all mixtures (Table 3.2).

Table 3.2 Composition of the mix proportions with different amounts of complex mineralizer

Mix	HS (kg/m ³)	HS/C	W/C	C/S	SP (%)	Water for mineralization	Complex mineralizer % HS mass	Al ₂ (SO ₄) ₃ (%) HS mass	Ca(OH) ₂ (%) HS mass
HCC	87	0.16	0.48	1:2	1	1.5xHS mass	0	0	0
HC0							18	18	0
HC1							30	10	20
HC2							45	15	30
HC3							54	18	36
HC4							63	21	42
HC5							81	27	54

In Part II, the HC3 was selected as a control sample. Type I Portland cement was partially replaced using fly ash (FA) 10, 20, 30, 40, 50 and 90% by mass of binder are given in Table 3.3.

Table 3.3 Composition of the mix proportions with different amounts of fly ash

Mix	HS (kg/m ³)	HS/B	W/B	B/S	FA (%)	SP (%)	Water for mineralization	Complex mineralizer % HS mass	Al ₂ (SO ₄) ₃ (%) HS mass	Ca(OH) ₂ (%) HS mass
HC3	87	0.16	0.48	1:2	0	1	1.5xHS mass	54	18	36
HCF10					10					
HCF20					20					
HCF30					30					
HCF40					40					
HCF50					50					
HCF90					90					

List of abbreviations

Symbol {0, 1, 2, 3, 4, 5 and 10, 20, 30, 40, 50, 90} {HCC, HC, F}

where;

HCC = Control hemp concrete

HC = Hemp concrete

F = Fly ash

3.3 Specimen preparations

Specimen preparation consists of two stages. The first, HS was mineralized using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ solution in a container. Mixing lasted 3 min and the mass was then left for 15 min so that HS was mineralized [this tends to impede the release of sugar from organic aggregates and reduce the hygroscopicity and water absorption (Giedrius Balciunas et al., 2015)]. Further, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was poured into the container and mixed together for 90 sec.

In the second stage, all of the water was mixed with SP and poured into a mixer. Then, the cement was added and allowed 90 sec for the absorption of the water. The mixer was started and sand was added slowly over a 30 sec period. The process was continued by pouring the HS into the mixer, which was mineralized slowly and mixed into a homogeneous mass over a 150 sec period. Finally, hemp concrete was mixed completely in the mixer before moulding.

3.4 Experimental methods

The schematic of research was showed in Figure 3.2

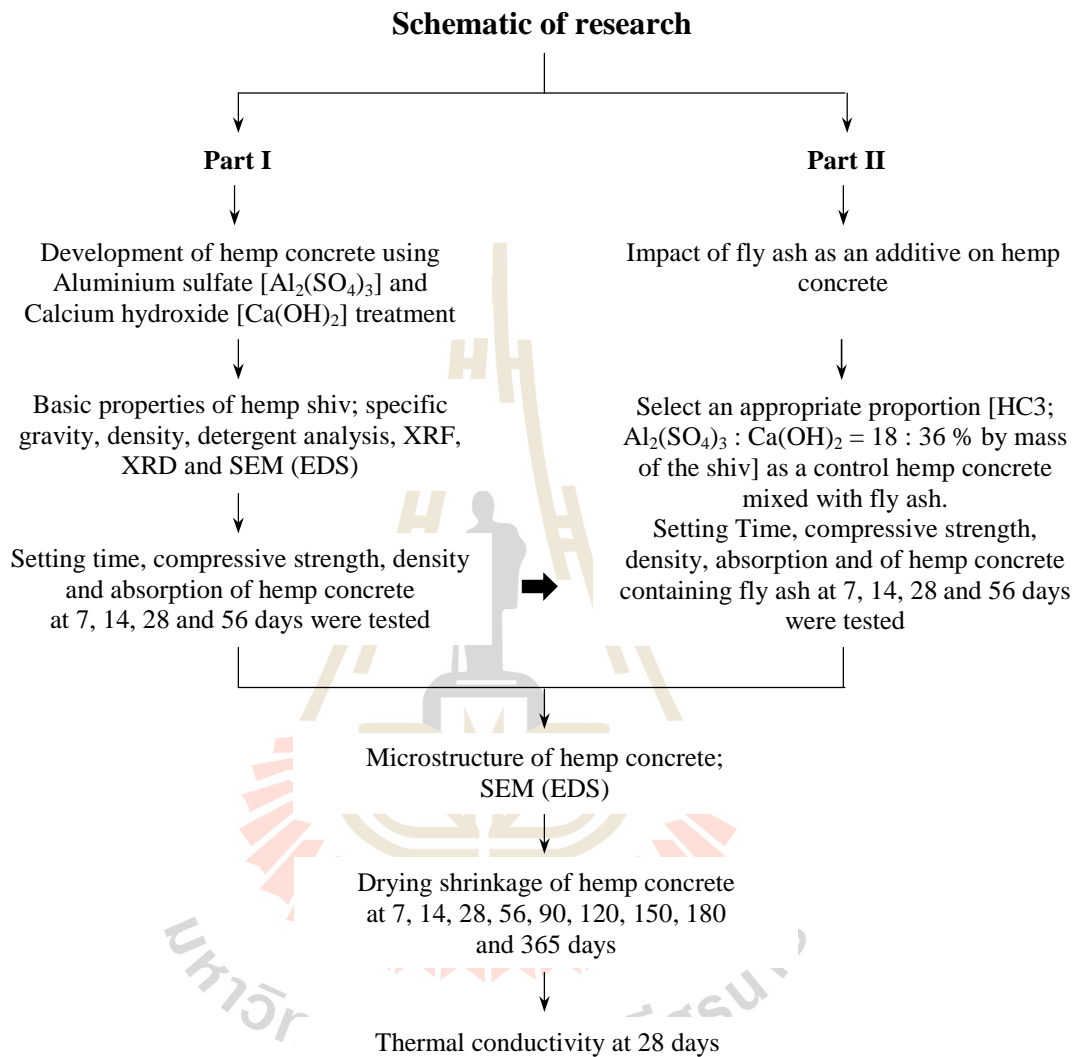


Figure 3.2 Schematic of research

The quantity of cellulose, hemicellulose and lignin were determined using the detergent fibre analysis [acid detergent fibre (ADF), neutral detergent fibre (NDF), acid detergent lignin (ADL), cellulose and hemicellulose based on Goering and Van Soest, 1970; Van Soest et al., 1991; AOAC, 2000].

The morphological structure of hemp shiv was studied using a JEOL JSM-6010LV scanning electron microscope (SEM). The investigation of the chemical composition of hemp shiv used X-ray fluorescence Energy dispersive spectrometer model XGT-5200 (The results are reported based on 100% normalization of oxide compounds).

X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using a Bruker : D2 PHASER X-ray Diffractometer to determine the crystallinity of hemp shiv. The investigation was carried out in the 2θ range of $5-80^\circ$. The Crystallinity Index ($C_r I_{XRD}$) of cellulose was evaluated using Segal empirical method (Segal L. et al., 1959).

The specimen for setting time test was $150 \times 150 \times 150$ mm cube. The test was done in a temperature control $23 \pm 2^\circ\text{C}$ room. For each plot, we determined the times of initial and final settings when the penetration resistance equaled 3.5 and 27.6 MPa, respectively, in accordance with ASTM C 403/C 403M. In this study, the shiv used as a coarse aggregate was softer than the normal aggregate and hence the mixture was used for the determination of setting time directly.

The compressive strength specimens were cast in $100 \times 100 \times 100$ mm cube in accordance with EN 12390-3 (Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens). The water absorption and density specimens were cast in a 50×100 mm cylinder according to ASTM C642-97. The drying shrinkage specimens were cast in $75 \times 75 \times 285$ mm prisms according to ASTM C490-00. The thermal conductivity specimens were cast in $25.4 \times 300 \times 300$ mm plate according to ASTM C518-98. The hemp concrete specimens were demoulded after casting 24 hrs due to the shorter setting time, but the untreated hemp shiv control specimen was demoulded after casting 48 hrs due to its longer hardening time. After demoulding, they were

stored at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity. Each test result represented the average of at least three specimens. The compressive strength, water absorption and density specimens were investigated after 7, 14, 28 and 56 days, and the thermal conductivity specimens were measured at 28 days of curing.

3.5 References

- Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite-Lukosiune, Sigitas Vejelis, and Aleksandrs Korjakins (2015). Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products**. 77: 724-734.
- Goering H. K. and Van Soest P. J. (1970). Forage fiber analyses (Apparatus, reagents, procedures, and some applications). **Animal Science Research Division, Agricultural Research Service**. Jacket No. 387-598.
- Michał Bołtryk and Dorota Małaszkiwicz (2007). Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete. **Bialystok Technical University**, Poland.
- Segal L., Creely J.J., Martin A.E., and Conrad C.M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, 786-794.
- Van Soest P.J., Robertson J.B. and Lewis B.A. (1991). Symposium : Carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle (Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition). **Journal of Dairy Science**. 74(10): 3583-3597

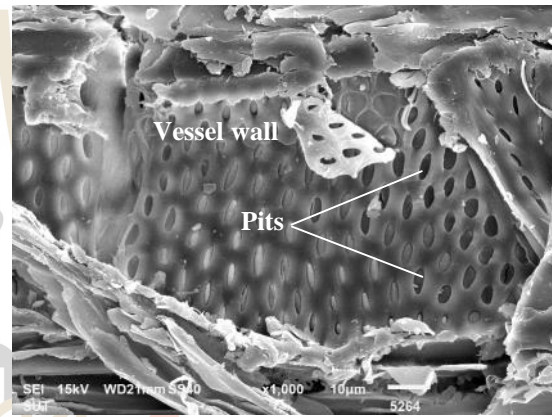
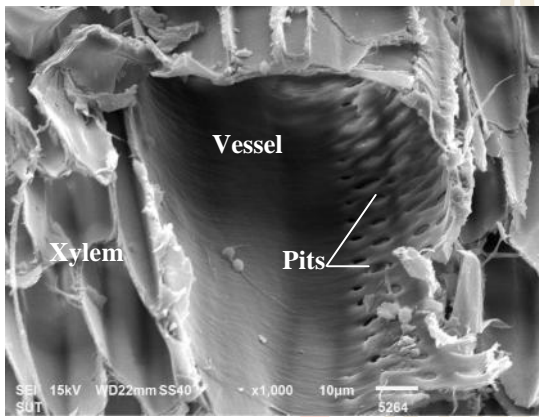
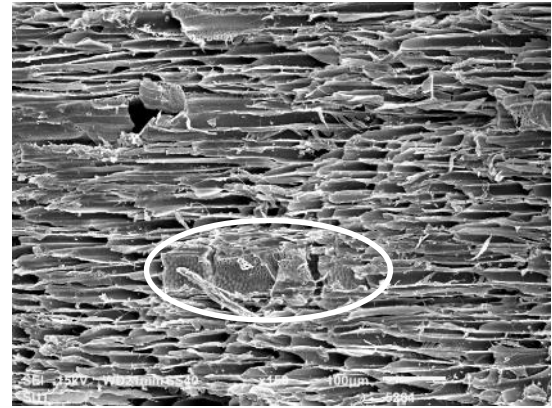
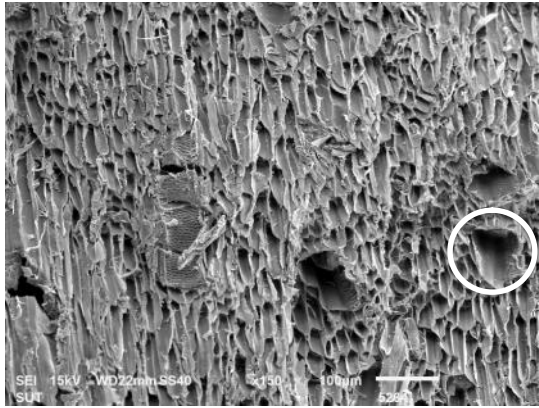
CHAPTER IV

RESULTS AND DISCUSSIONS

This chapter presented the results and discussions of experimental. The study was divided into two parts. Preliminary, the SEM micrographs of hemp shiv structure, typical oxide compositions of the hemp shiv, cellulose hemicellulose and lignin contents, and the crystallinity of hemp shiv were reported. In part I, all mix proportions will be studied on the effect of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treatment on setting time of hemp concrete, compressive strength, density, water absorption, drying shrinkage and thermal conductivity. In part II, the SEM micrographs, oxide compositions of Mae Moh fly ash, and an appropriated mix proportion replacing cement with fly ash were shown. The results of the setting time, compressive strength, density water absorption and thermal conductivity of hemp concrete containing fly ash as an additive were presented and discussed.

4.1 SEM micrographs of hemp shiv structure

SEM micrographs in Figure 4.1 show some parts of the hemp shiv structure. It consisted of a cellular porous microstructure (Figures 4.1a and b). The pores are of two different sizes, the smaller was the so called xylem ray and the bigger was the vessel (Giedrius Balciunas et al., 2015; Indran S. et al., 2014; Herman E. Hayward, 1938), with average diameters of 20 to 50 μm and 50 to 100 μm , respectively.



4.2 Typical oxide compositions of untreated and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ treated hemp shiv by X-ray fluorescence (XRF) analysis

Table 4.1 Typical oxide compositions of untreated and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ treated hemp shiv

Hemp shiv	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO
HS	-	20.24	16.44	7.30	37.15	14.88	3.54	-	0.14	-
Al_0	1.42	14.94	8.27	5.22	22.53	34.12	1.01	2.44	9.13	0.62
Al_{10}	19.94	28.36	17.57	12.16	1.12	14.00	1.29	0.80	4.49	0.18
Al_{15}	19.28	29.08	14.83	15.00	0.96	14.41	1.43	0.47	4.37	0.09
Al_{18}	19.48	30.24	15.89	15.23	0.88	12.10	1.20	0.62	4.16	0.13
Al_{21}	19.21	29.88	14.44	16.86	0.81	11.23	1.35	0.77	5.16	0.17
Al_{27}	18.36	30.64	13.26	19.49	0.89	10.74	1.21	0.61	4.59	0.15

HS –the raw hemp shiv; Al_0 – the hemp shiv test sample was saturated by an amount of water 1.5x that of the hemp shiv mass;

Al_{10} to Al_{27} –the shiv was treated using 10, 15, 18, 21 and 27% of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

As presented in Table 4.1, it was observed that the raw hemp shiv (HS) showed higher potassium oxide (K_2O) content. During testing, hemp shiv test sample (Al_0) was saturated with water for 15 min and washed with water 3 times then placed in the oven at 60°C for 3 days. Using the X-ray fluorescence (XRF) analysis, some K_2O content was found to leach out together with water-soluble materials. Similar to Al_0 , the hemp shiv was treated using different amounts of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ that had a strong decreasing effect on the K_2O content. The use of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for chemical treatment leached out a significant portion of potassium oxide from the shiv. Hence, the result confirmed that K_2O was capable of being washed out with water. Moreover, the chemical treatment using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ led to more leaching of potassium oxide.

In this study, however, the hemp shiv was treated using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ that was not washed out using water but was mixed together with cement mortar immediately after the shiv was treated with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; therefore, K_2O was only leached out on the surface and distributed in the structure of hemp shiv so that reactions with other oxide

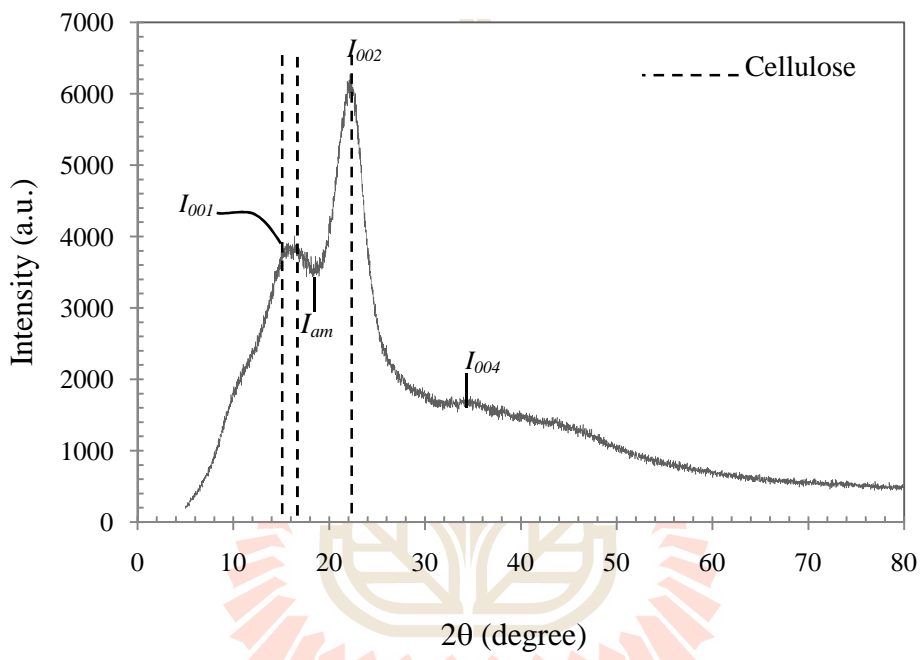
compositions of cement or the $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, which was added for treatment to produce the hydration product, such as syngenite ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Shen C. et al., 1981; Jana Jurisova et al., 2014) and gorgeyite ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Jana Jurisova et al., 2014) could crystallize and lead to an accelerated setting (Shen C. et al., 1981; Paul Wencil Brown, n.d.).

4.3 Cellulose, hemicellulose and lignin contents of hemp shiv

Table 4.2 shows that the hemp shiv (HS) contained approximately 69% of cellulose, 14.20% of hemicellulose and 11.35% of lignin by the mass of shiv. The results show that the treatment with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ also removes a certain portion of lignin covering materials.

Table 4.2 The cellulose, hemicellulose and lignin contents of hemp shiv

	Dry matter	ADF	NDF	Lignin	Cellulose	Hemicellulose
HS	95.45	80.37	94.57	11.35	69.02	14.20
Al ₀	93.79	83.04	96.31	21.92	61.12	13.27
Al ₁₀	94.26	86.78	99.24	20.92	65.86	12.46
Al ₁₅	93.90	84.97	98.96	23.83	61.14	13.99
Al ₁₈	93.79	83.49	98.12	24.50	58.99	14.63
Al ₂₁	93.10	88.97	99.65	26.20	62.77	10.68
Al ₂₇	93.88	84.11	99.42	21.27	62.84	15.31



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

I_{am} is the intensity of diffraction in the same units at $2\theta = 18^\circ$. Using the equation (4.1), the $C_r I_{XRD}$ of approximately 41% was obtained.

The quantity of cellulose can be calculated using the following equation (4.2) (Jianqiang Wei and Christian Meye, 2016):

$$\%C_{rXRD} = [I_{002} / (I_{002} + I_{am})] \times 100 \quad (4.2)$$

where $\%C_{rXRD}$ expresses the quantity of cellulose using X-ray diffractometer. The value of $\%C_{rXRD}$ was approximately 67%, compared to approximately 69% of the results of the detergent analysis. These results indicated that the hemp shiv consisted of both crystalline and non-crystalline (amorphous) phases. From previous investigations (Kabir M.M. et al, 2013; Jianqiang Wei and Christian Meye, 2016; Portland Cement Association, n.d.), the cellulose structure of fibres was distinguished through the crystalline and amorphous phases, whereas the hemicellulose and lignin were completely amorphous. Therefore, the hemp shiv had a region of amorphous material that could react with other chemicals because its freedom, the hydroxyl groups present in the amorphous region could easily combine with water molecules from the atmosphere (Kabir M.M. et al, 2013).

PART I: Hemp concrete using hemp shiv as a coarse aggregate

4.5 Effect of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treatment on setting time of hemp concrete

Table 4.3 presents the setting time of hemp concrete. The HCC required a longer time for setting in comparison with the other specimens that used $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in the treatment process.

Table 4.3 Setting time and slump of hemp concrete

	HCC	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5
Initial setting Time, min	645	260	360	380	320	305	230
Final setting Time, min	2155	525	830	870	620	640	520
Slump, cm	4.5	4	5	11	12	4	3

The initial setting time and final setting time were 645 min (approximately 11 hrs) and 2155 min (approximately 36 hrs), respectively. Certainly, the untreated hemp shiv delayed the setting and hardening of hemp concrete due to the water-solubility of shiv resulting in the retardation of hydration of cement.

The aluminum sulfate solution may be written as follows:



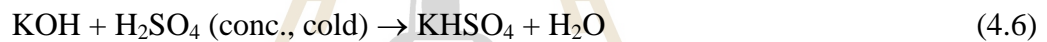
It can leach potassium oxide (K_2O) out onto the surface and distributed it in the structure of hemp shiv. The chemical reaction between K_2O and H_2O describes the presence KOH according to (Howard F. Rase, 2000)



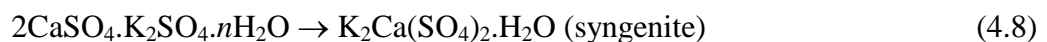
Potassium hydroxide can react with sulfuric acid to produce potassium sulfate and water as follows:



or



Potassium hydroxide can readily react with that calcium sulfate ($CaSO_4$) in the hydration process of cement and/or in the presence of $Al_2(SO_4)_3$ for treatment and $Ca(OH)_2$ for neutralization as follows (Shen C. et al., 1981; Paul Wencil Brown, n.d.):



Previous research indicated that K_2SO_4 can accelerate the setting time of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) to form syngenite (Shen C. et al., 1981), it was formed both on the surface and in the pores of hemp shiv as shown in Figure 4.3. In this study, it

clearly appears that untreated hemp shiv significantly retards the setting of hemp concrete, and the treatments using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in the mix proportion of HC1 to HC5 were able to improve the setting time of hemp concrete compared to that of the control hemp concrete (HCC). In the case of HC0 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 18:0] compared to HC3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 18:36], it was found that by using $\text{Ca}(\text{OH})_2$, retardation of the setting time of hemp concrete was observed.

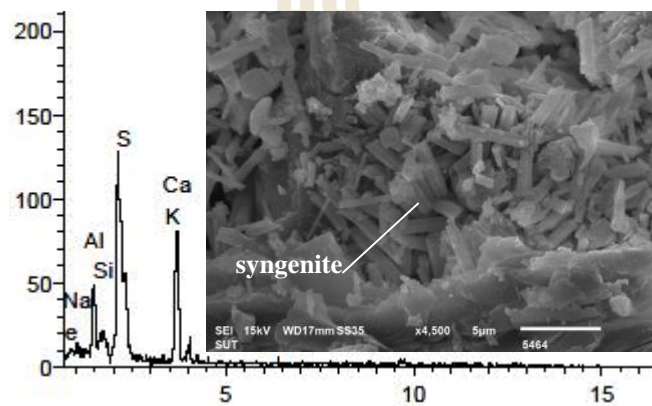


Figure 4.3 SEM - EDS analysis of HC0 matrix at 28 days

The $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ content also affected the workability of hemp concrete, and the HC1 to HC3 increased the slump. In contrast, in the case of HC4 and HC5, increasing the dosage of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ decreased the slump due to the increased fine particle with high surface area.

4.6 Compressive strength of hemp concrete

The development of compressive strength of hemp concrete is illustrated in Figure 4.4. The results showed that the compressive strengths of hemp concrete using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (HC1 to HC5), as well as with only $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (HC0) for treatment were in the ranges of 15.0 and 17.0 MPa at 28 days in contrast to the ranges of 3.0 and 4.0 MPa of the control hemp concrete (HCC). The hemp concrete with treated hemp shiv obtained greater compressive strength than the concrete with untreated hemp shiv. On the other hand, using the untreated hemp shiv affected the compressive strength development of the control hemp concrete, which showed only slightly increased compressive strengths for a longer curing period. The compressive strength at 7 to 56 days of HCC was relatively low compared to those of HC0 to HC5, which achieved 4 times higher compressive strengths than that of HCC.

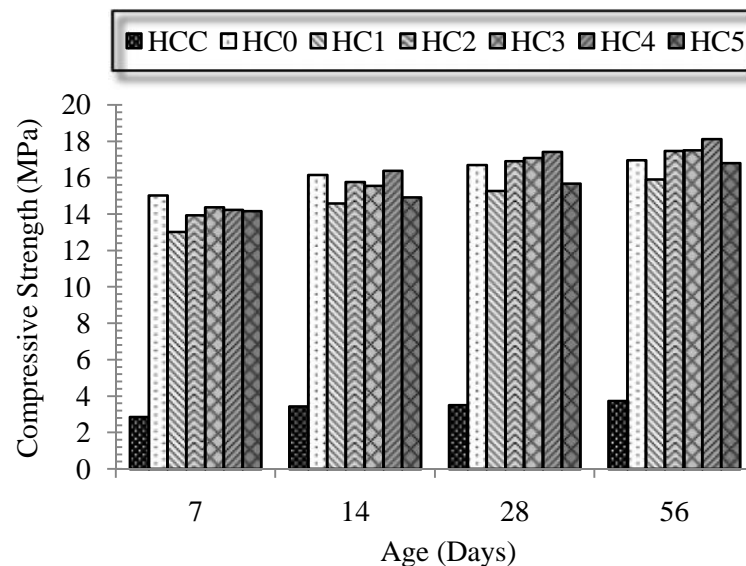
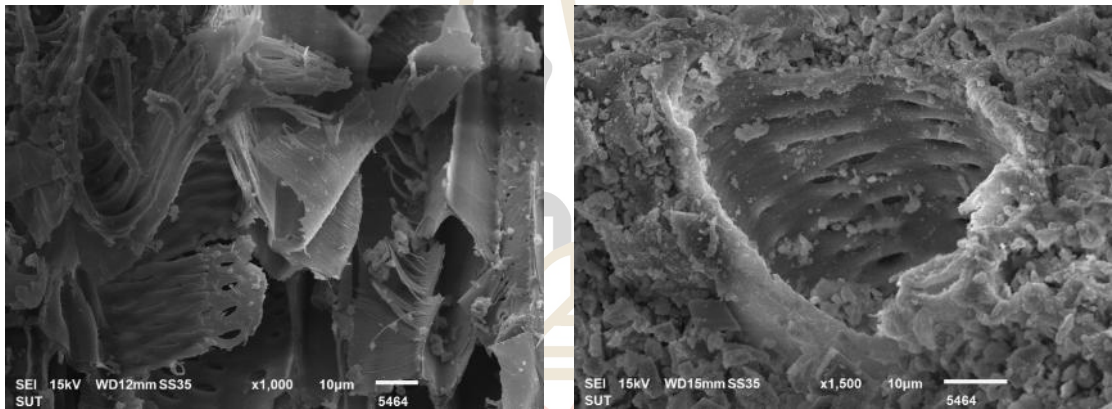
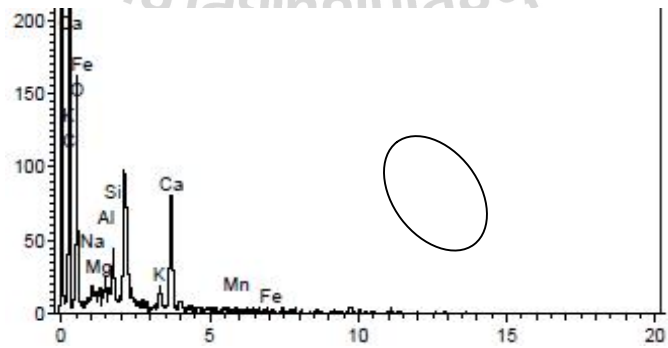
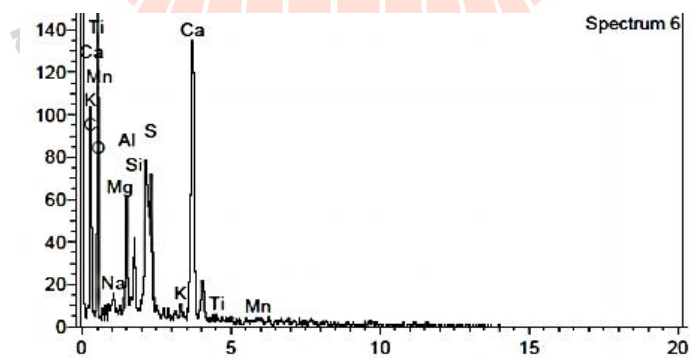
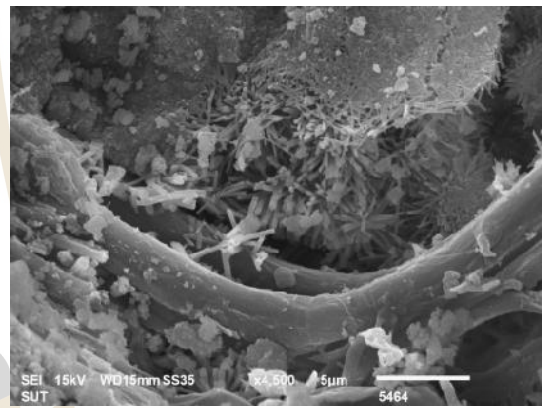
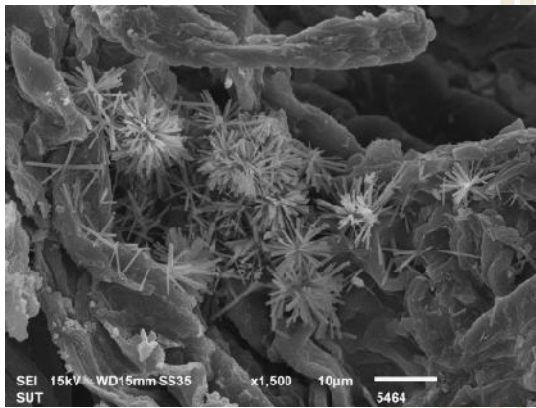


Figure 4.4 Development of compressive strength of hemp concrete



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





Calcium sulfate such as gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), is intentionally added to regulate early hydration reactions to prevent flash setting and improve strength development (Portland Cement Association, n.d.). Thus, in this study, the gypsum obtained from using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for mineralization can react with calcium aluminate in the mixture to form ettringite and filled the pores of shiv to improve the strength of hemp concrete. Furthermore, the syngenite [$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$] from the reaction can also improve the strength of gypsum produced (Shen C., 1981); thus, the strength of the HC0 to HC5 increased compared to that of HCC.

In the case of the HC0 test sample [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 : \text{Ca}(\text{OH})_2 = 18:0$], it was observed that the gypsum product of mineralization and other sulfate compounds also reacted with calcium aluminate from cement to form ettringite without adding $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Using only $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for chemically treated hemp shiv could improve the compressive strength of hemp concrete compared to that of HCC using untreated hemp shiv, and HC1 to HC5 with both $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$. The compressive strength at 7 days of HC0 was higher than that of the hemp concrete treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, but the development slightly decreased during the long curing time. Therefore, it was shown that increasing the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content of this mix slightly improved the compressive strength.

4.7 Density of hemp concrete

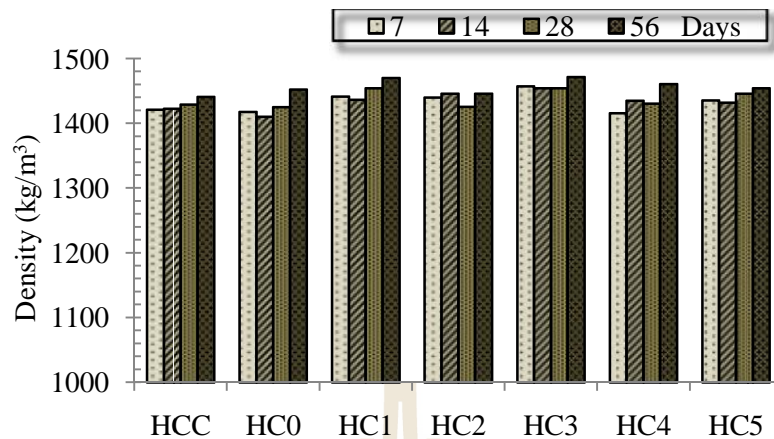



Figure 4.7 Density of hemp concrete

As shown in Figure 4.7 the density of hemp concrete slightly varies with the amount of chemical treatment [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Overall, the bulk density of hemp concrete increased slightly over the curing period. Further, the bulk density did not increase steadily based on the distribution of hemp shiv in the matrix (the samples of the distribution (by cutting) of hemp shiv in the matrix are shown in Figure 4.8). The bulk density of hemp concrete was between 1420 to 1470 kg/m^3 . The addition of hemp shiv reduced the density of concrete because of the low bulk density of hemp shiv of only 120 kg/m^3 , thus they fall about midway between the structural and low-density concretes. Therefore, it can be applied as a moderate strength concrete with the compressive strengths are approximately 7 to 17 MPa and insulation characteristics (according to ACI 213R-87), and it can also be used as a precast wall to reduce the weight of buildings structure.



THAILAND HEMP CONCRETE
Suranaree University of Technology
sinr14@su.technology, sakath.pantawee@gmail.com



Eco-efficient cement and concrete composite
Theerawat Sinsiri and Sakath Pantawee

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.8 Water absorption of hemp concrete

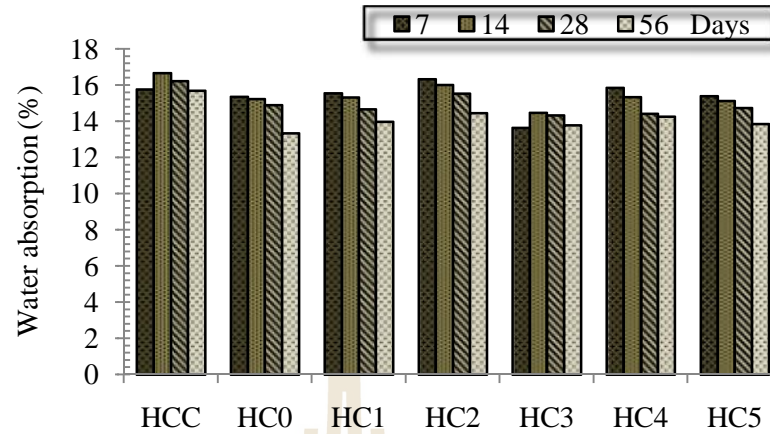


Figure 4.9 Water absorption of hemp concrete

Figure 4.9 shows the results of water absorption of the series of hemp concrete with the varying chemical treatments [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$]. The water absorption of hemp concrete slightly decreased over the period of curing. The decreases in water absorption corresponded to the increases in the bulk density of hemp concrete as expected. The water absorption of hemp concrete was between 14.5 to 16.5%. However, the water absorption does not correlate with increasing the amount of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, because the hemp shiv has high porosity. As a result, the water absorption was similar because of the small amount of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ compared to the hemp shiv and other ingredients as well as the amount of hemp shiv was kept constant.

4.9 Drying shrinkage of hemp concrete

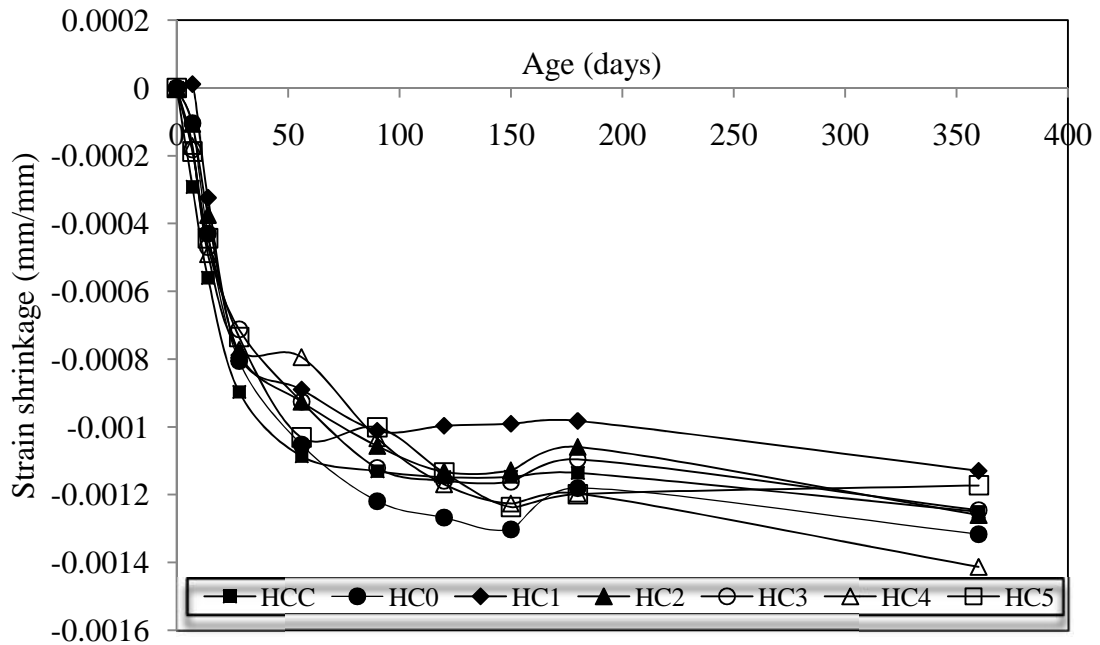


Figure 4.10 Drying shrinkage of hemp concrete

The drying shrinkage strains of hemp concrete at various ages were shown in Figure 4.10. The results showed that shrinkage of hemp concrete by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was not significantly different from that of control hemp concrete (HCC), the drying shrinkage strain increased sharply until 56 days of age due to the water loss, they were in the ranges of 1130×10^{-6} and 1400×10^{-6} mm/mm. The drying shrinkage strain was lower than recommended by ACI 213R-13, which should be between 600×10^{-6} and 1000×10^{-6} . However, it can be improved by a partial or full replacement of the lightweight fines by natural sand usually reduces shrinkage for concretes made with most lightweight aggregates. In this research, the amount of Portland cement should be reduced due to the large amount of the cement resulting in decreased the strain drying shrinkage of concrete, as recommended by ACI 213R.

4.10 Thermal conductivity of hemp concrete

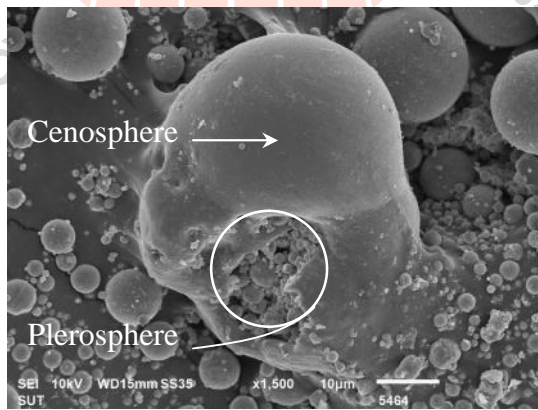
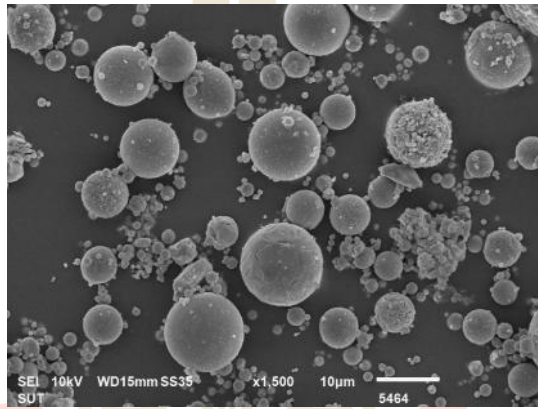
From the observation, it was found that increasing the amount of complex mineralizer resulted in a decrease in the thermal conductivity of hemp concrete. Moreover, when considering HC0 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 : \text{Ca}(\text{OH})_2 = 18:0$] and HC3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 : \text{Ca}(\text{OH})_2 = 18:36$], it was found that the addition of lime alone can reduce the thermal conductivity of concrete as well.

The thermal conductivity of the 25.4×300×300 mm hemp concrete plates were in the ranges of 0.22 and 0.30 W/m-K at 28 days (as shown in Table 4.4), thus it can be classified as a concrete made from the lightweight aggregate, according to ASTM C332-99 with thermal conductivity in the ranges of 0.22 and 0.43 W/m-K at oven dry densities of 800 to 1440 kg/m³.

The thermal conductivities and the densities of hemp concrete were lower than that of normal concrete ($k = 1.442$ W/m-K: $\rho = 2400$ kg/m³), concrete roof tile ($k = 0.993$ W/m-K: $\rho = 2400$ kg/m³), asbestos roof tile ($k = 0.384$ W/m-K to 0.441: $\rho = 1700$ to 2000 kg/m³), common brick ($k = 0.473$ W/m-K: $\rho = 1600$ kg/m³), and cellular lightweight concrete ($k = 0.476$ W/m-K: $\rho = 1280$ kg/m³) (refer to the publication in the Royal Thai Government Gazette 126/122-2552).

Table 4.4 Thermal conductivity of hemp concrete at 28 days

Thermal conductivity (W/m-K)						
HCC	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5
0.262	0.272	0.302	0.260	0.254	0.229	0.219



4.12 Oxide compositions of Mae Moh fly ash by X-ray fluorescence

(XRF) analysis

Typical oxide compositions of Mae Moh fly ash are presented in Table 4.5. The total amount of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ was 65%, and the amount of CaO was higher than 10%. The loss on ignition was 0.98%, which can be classified as Class C in accordance with ASTM C618-99. However, as fly ash is not a specially manufactured product and cannot, therefore, be governed by strict requirements of a standard, this causes the variation in chemical composition (Neville A.M., 1996). It was observed that the original fly ash (OFA) in this study contained a high content of sulfur trioxide (SO_3) of 10.83%. Although the SO_3 content exceeds 5% as defined by the standard; nevertheless, this fly ash have been used in the mix.

Table 4.5 Typical oxide compositions of Mae Moh fly ash

Typical oxide compositions (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2	SO_3	MnO_2	LOI
33.06	16.01	15.90	18.87	3.10	1.52	0.31	10.83	0.16	0.98

4.13 Setting time of hemp concrete containing fly ash

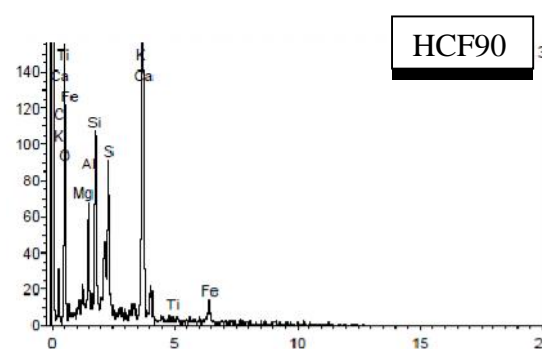
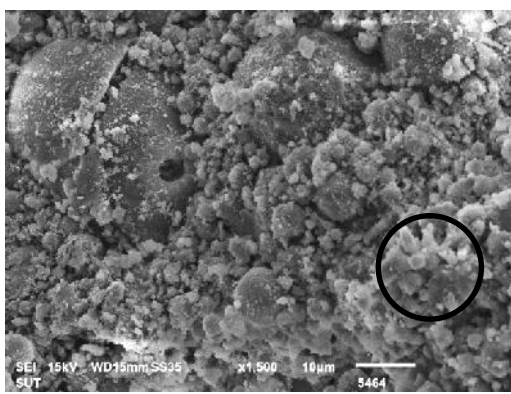
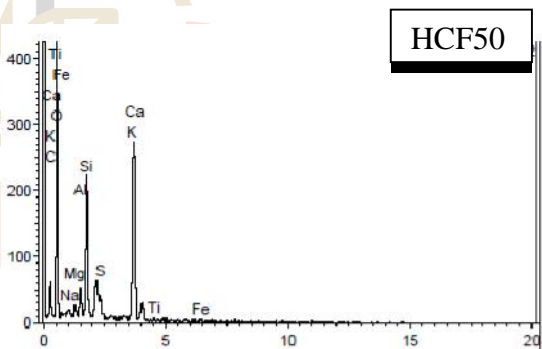
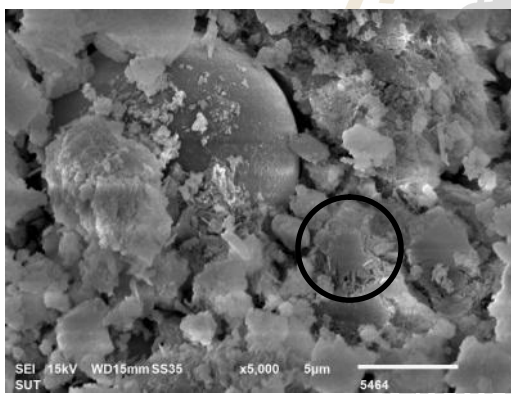
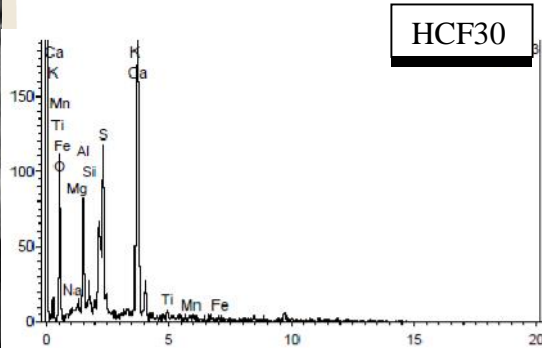
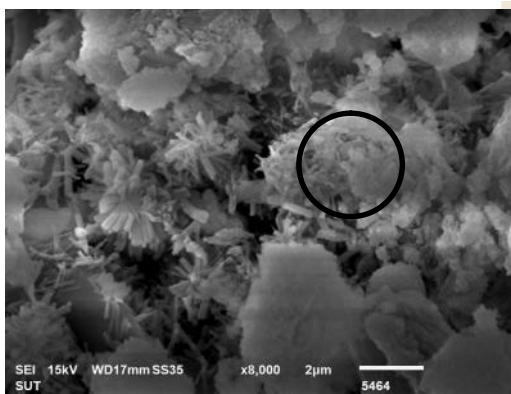
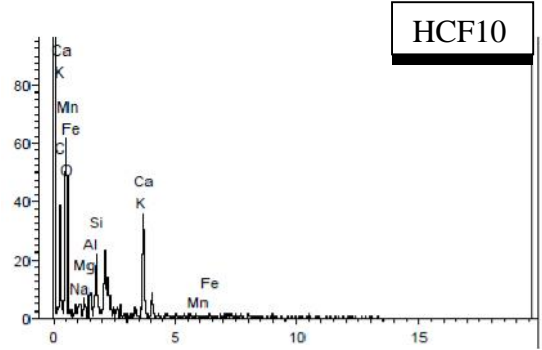
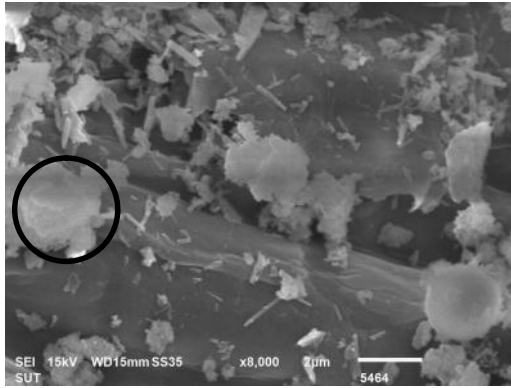
Table 4.6 presents the setting times of hemp concretes containing fly ash. These results indicate that the HCF90 required a long time for setting compared with the other specimens. The initial setting time and final setting time of HCF90 were 510 min (approximately 8 and a half hrs) and 2540 min (approximately 42 hrs), respectively. Certainly, the large amount of fly ash delayed the setting and hardening of hemp concrete due to the amount of cement was decreased. It also results in the

slump increased as well. When considering the concrete containing 10 and 20% fly ash, it was found that the initial and final setting time of HCF10 and HCF20 were very short compared to non-fly ash hemp concrete (HCF0 or HC3) due to the high amount of K_2O and SO_3 are present in the oxides composition of both hemp and fly ash, and lead to accelerated set to the syngenite [$CaK_2(SO_4)_2 \cdot H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$] formation (Paul Wencil Brown, n.d), the syngenite can appear clearly from the age of 7 days (Figure 4.12).

Previous research had reported that the syngenite crystals are capable of causing a loss in plasticity by bridging water-filled spaces (Paul Wencil Brown, n.d), and it can also decrease the retarding effect of wood extractions (Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene, 2006). Moreover, the large amount of SO_3 in the chemical composition of the fly ash results in an increasing ettringite formation during early hydration, and also retards the setting times, and reduces the strength of the concrete (Amin A. Hanhan , 2004). From the observation, during the initial mix, the ingredients rapidly clot. And as we continue to mix, the ingredients will return to the plastic state again. This resulted in a decrease of the compressive strength (Fig. 4.13). For this reason, there should be further studies on fly ash from various sources.

Table 4.6 Setting time and slump of hemp concrete containing fly ash

	HCF10	HCF20	HCF30	HCF40	HCF50	HCF90
Initial setting Time, min	180	190	320	300	370	510
Final setting Time, min	455	450	570	800	870	2540
Slump, cm	12	12.5	17	20.5	21	27



4.14 Compressive strength of hemp concrete containing fly ash

The development of compressive strength of hemp concrete containing fly ash increased with age of curing as shown in Figure 4.13. The results showed that the compressive strength of HCFA10 was highest than the other specimens; it was 5.7 MPa in contrast to the HCF90 of 1.8 MPa at 28 days. Certainly, the large amount of fly ash decreased the compressive strength of hemp concrete containing fly ash due to the amount of cement was decreased.

Figure 4.14 shows the X-ray diffractogram of hemp concretes containing 10, 30, 50, and 90% fly ash at 7, 28, and 56 days. The result showed the peak intensity of calcium hydroxide $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, and calcium silicate oxide $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$. The peak intensity of calcium hydroxide and calcium silicate oxide sharply decreased with increasing the amount of fly ash (Figure 4.14 a). The peak intensity of ettringite slightly increased with age of curing (Figure 4.14 b).

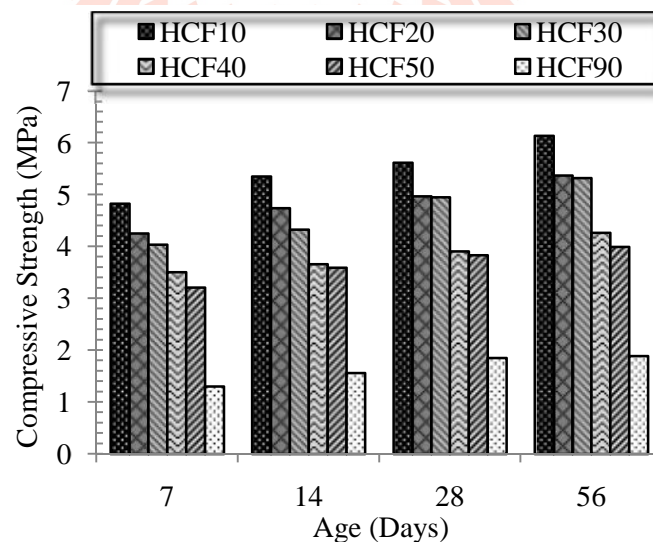
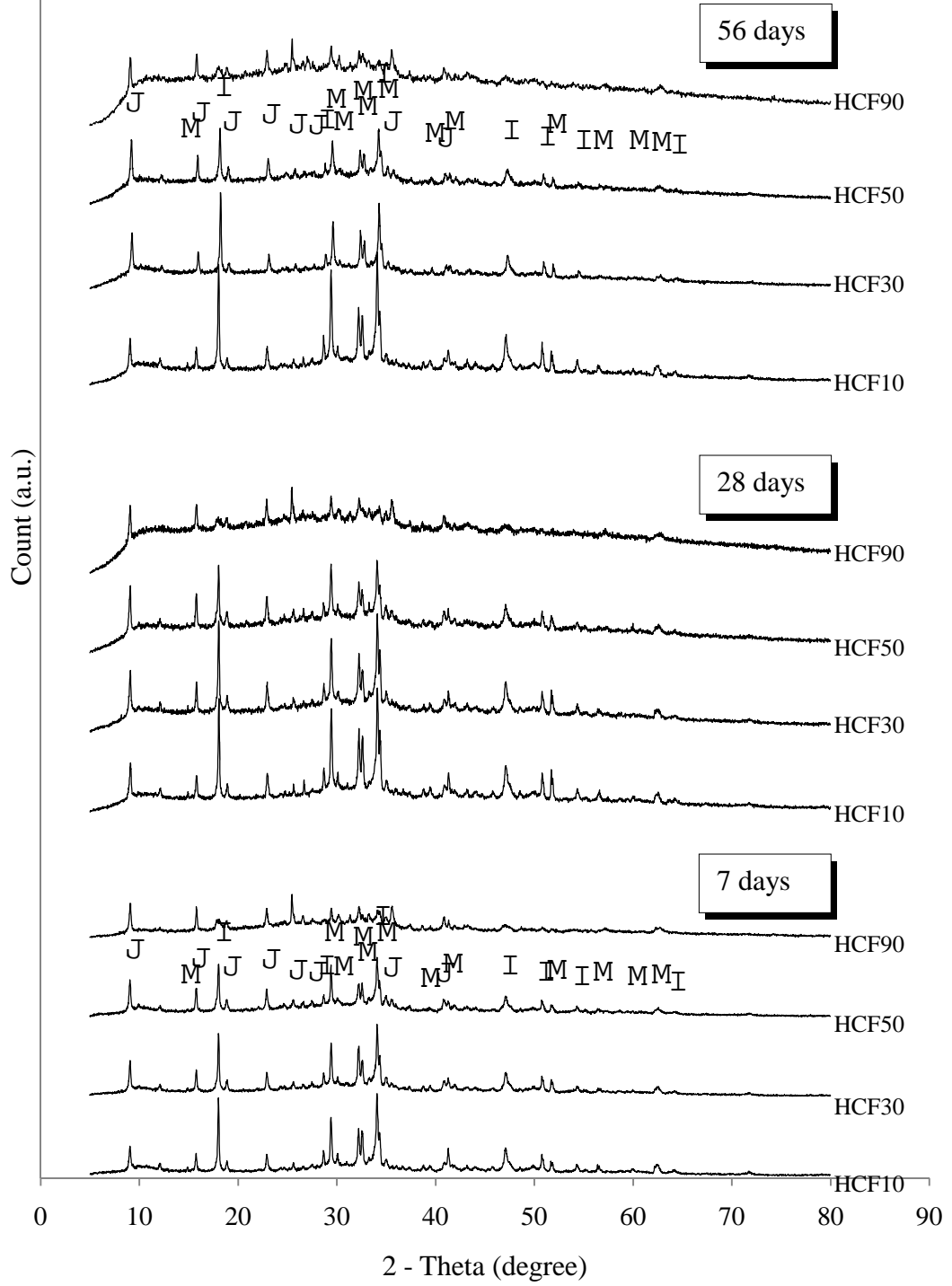


Figure 4.13 Development of compressive strength of hemp concrete containing fly ash

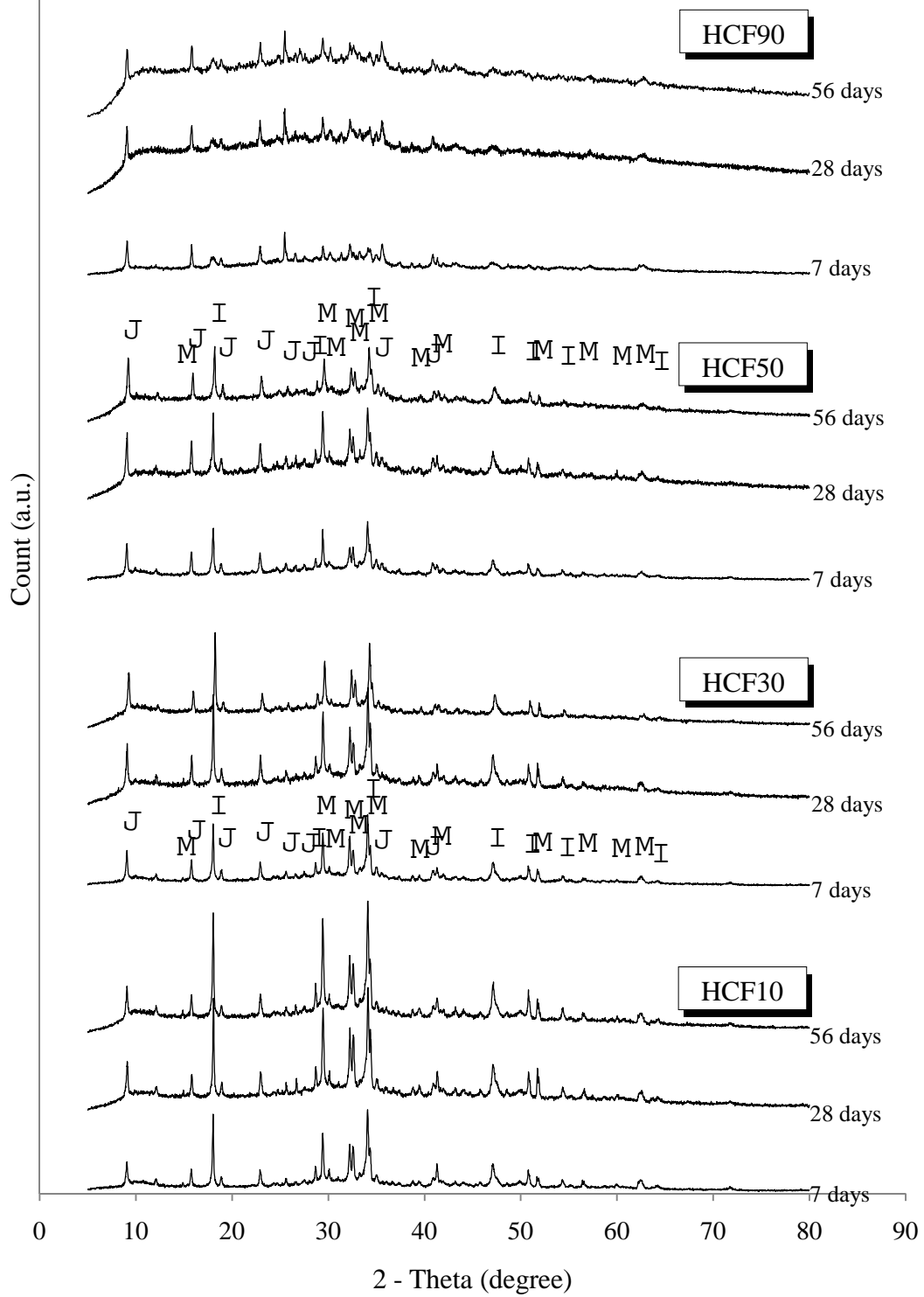
I $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Calcium Hydroxide
 J $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ Ettringite
 M $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ Calcium Silicate Oxide

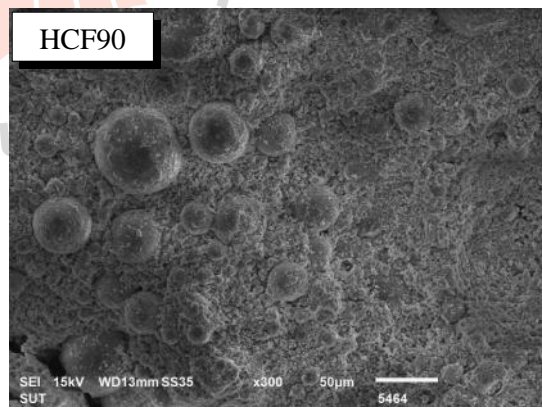
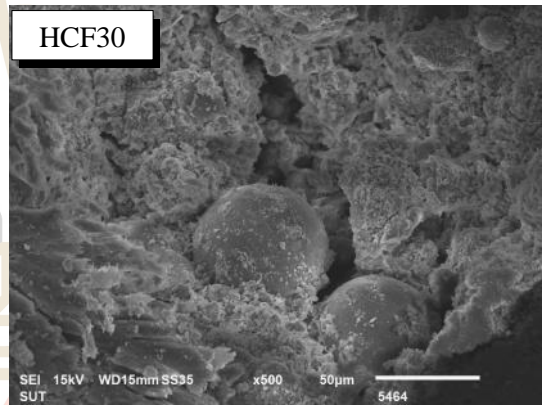
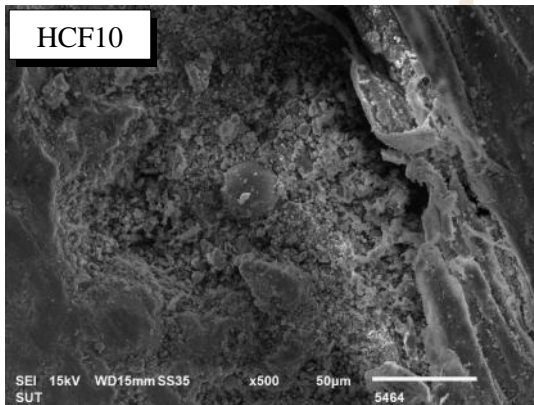
a)



I $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Calcium Hydroxide
 J $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ Ettringite
 M $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ Calcium Silicate Oxide

b)





4.15 Density of hemp concrete containing fly ash

As shown in Figure 4.16, the density of hemp concrete containing fly ash slightly decreased with the higher the amount of fly ash. Overall, the bulk density of hemp concrete decreased slightly over the curing period. Further, the bulk density did not decrease steadily based on the distribution of hemp shiv in the matrix. Although the hemp shiv may reduce the density of hemp concrete; the fly ash also increased the density of hemp concrete compared to non-fly ash hemp concrete due to the small particle size and the spherical shape of fly ash can fill the pore of the shiv, thus increased the density of the concrete. The results showed that the bulk density of hemp concretes containing fly ash of 10 to 50% (HCF10 to HCF50) were between 1460 and 1520 kg/m³.

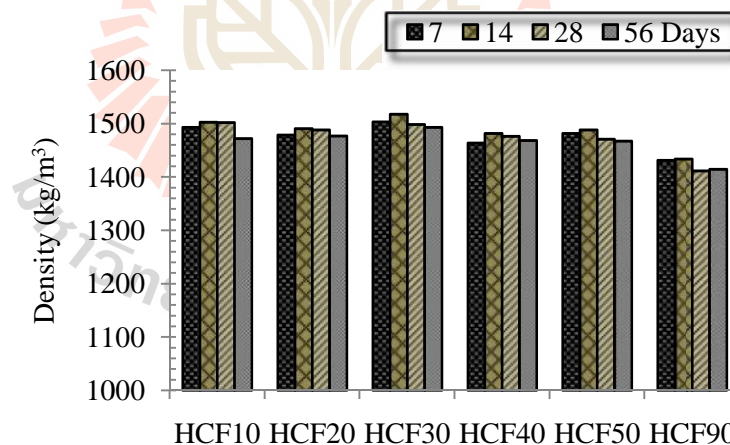


Figure 4.16 Density of hemp concrete containing fly ash

4.16 Water absorption of hemp concrete containing fly ash

Figure 4.17 shows the results of water absorption of the series of hemp concrete containing fly ash with the varying amount of fly ash. The water absorption of hemp concrete decreased over the period of curing. The decreases in water absorption corresponded to the increases in the bulk density of hemp concrete as expected. The water absorption slightly increased compared to non-fly ash hemp concrete. The results showed that the water absorption of hemp concretes containing fly ash of 10 to 50% (HCF10 to HCF50) were between 15 and 17%.

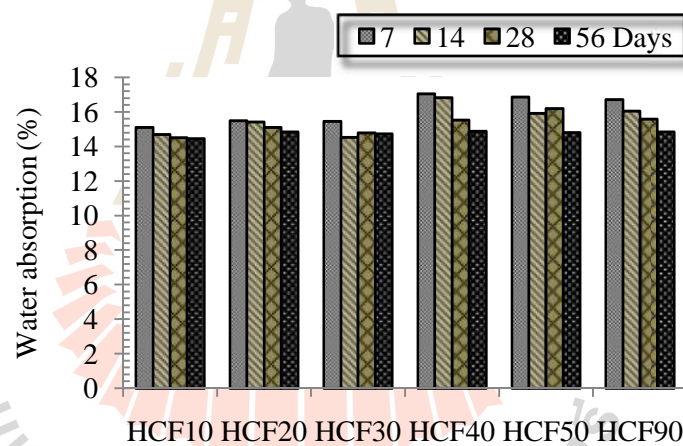


Figure 4.17 Water absorption of hemp concrete containing fly ash

4.17 Drying shrinkage of hemp concrete containing fly ash

The drying shrinkage strains of hemp concrete containing fly ash at various ages is shown in Figure 4.18. The results showed that drying shrinkage strains of the concretes with increasing fly ash were not significantly different from that of control hemp concrete (HCC), the drying shrinkage strains increased sharply until 56 days of age similar to the hemp concrete without fly ash in the mixture due to the water loss and they were in the ranges of 1000×10^{-6} and 1200×10^{-6} . The results also indicated that the fly ash can decrease the strain drying shrinkage strain of hemp concrete, this is consistent with the research that has already been provided (Prinya Chindaprasirt and Chai Jaturapitakkul, 1998).

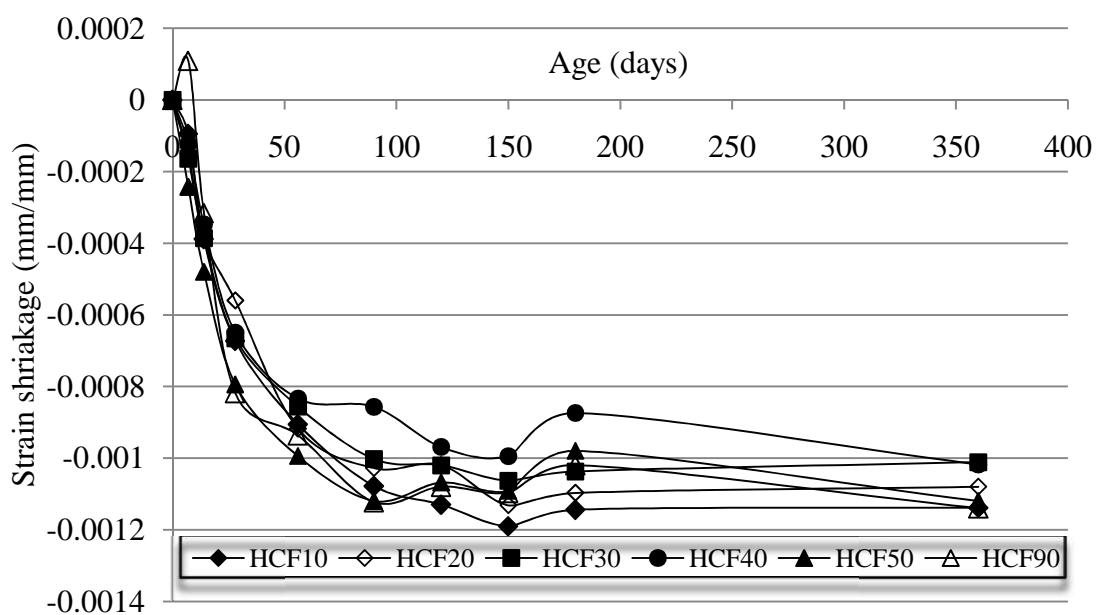


Figure 4.18 Drying shrinkage of hemp concrete containing fly ash

4.18 Thermal conductivity of hemp concrete containing fly ash

The thermal conductivity values of the (25.4×300×300 mm plate) hemp concretes containing fly ash were in the ranges of 0.19 and 0.28 W/m-K at 28 days (as shown in Table 4.7), thus it can be classified as a concrete made from the lightweight aggregate, according to ASTM C332-99 with thermal conductivity in the ranges of 0.22 and 0.43 W/m-K at oven dry densities of 800 to 1440 kg/m³.

From the observation, the increasing the amount of fly ash resulted in an increase in the thermal conductivity of hemp concrete. Moreover, when considering HCF90, it was found that the very high volume of fly ash resulted in a decrease the thermal conductivity of the concrete.

Table 4.7 Thermal conductivity of hemp concrete containing fly ash at 28 days

Thermal conductivity (W/m-K)					
HCF10	HCF20	HCF30	HCF40	HCF50	HCF90
0.217	0.220	0.236	0.241	0.280	0.185

4.19 References

- Amin A. Hanhan (2004). Influence of the SO₃ Content of Cement on the Durability and Strength of Concrete Exposed to Sodium Sulfate Environment. **Master Thesis of Science. University of South Florida.**
- Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite–Lukosiune, Sigitas Vejelis, and Aleksandrs Korjakins (2015). Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products.** 77: 724-734.
- Giedrius Vaickelionis and Rita Vaickelioniene (2006). Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics-Silikaty.** 50(2): 115-122.
- Herman E. Hayward (1938). The structure of economic plants. Chapter VIII, Moraceae, Cannabis sativa. **The University of Chicago, Hempology.org: The study of hemp 1938;** 214-245.
- Howard F. Rase (2000). **Handbook of Commercial Catalysts: Heterogeneous Catalysts.** page 71.
- Indran S., Edwin R. Raj, Sreenivasan V.S. (2014). Characterization of new natural cellulosic fibre from cissus quadrangularis root. **Carbohydrate Polymers.** 110: 423-429.
- Jana Jurisova, Vladimir Danielik, Pavel Fellner, Marek Lencses and Milan Kralik (2014). Phase diagram of the system CaSO₄-K₂SO₄-KNO₃-Ca(NO₃)₂-H₂O. **Acta Chimica Slovaca.** 7(1): 20-24. DOI: 10.2478/acs-2014-0004.

- Jennifer L. Pehanich, Paul R. Blankenhorn and Michael R. Silsbee (2004). Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre-cement composites. **Cement and Concrete Research**. 34: 59-65.
- Jianqiang Wei and Christian Meye (2016). Degradation of natural fibre in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. **Corrosion Science**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.12.004>.
- Kabir M.M., Wang H., Lau K.T. and Cardona F. (2013). Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. **Applied Surface Science**. 276: 13-23.
- Paul Wencil Brown (n.d.). Early-age cement hydration reactions. Department of Materials Science and Materials Research Laboratory, Penn Sylvania State University, University Park, Pa. **Transportation Research Record**. 1284: 53-59.
- Portland Cement Association (n.d.). Ettringite formation and the performance of concrete. **Concrete information**. 16 pages.
- Prinya Chindaprasirt and Chai Jaturapitakkul (1998). Cement, pozzolan and concrete. **Thailand concrete association**. 381 pages.
- Segal L., Creely J.J., Martin A.E., and Conrad C.M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, 786-794.
- Shen C., Mohammed H., Kamar A. (1981). Effect of K_2SO_4 and $CaSO_4$: Dihydrate solutions on crystallization and strength of gypsum. College of Dentistry, University of Florida, Gainesville, Florida. **Gypsum Crystallization**. 60(8): 1410-1417.

CHAPTER V

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

5.1 Conclusions

PART I: Hemp concrete using hemp shiv as a coarse aggregate

The use of treated hemp shiv with aluminium sulfate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as a coarse aggregate produced hemp concretes with the compressive strengths 4 times higher than the compressive strength of the control hemp concrete sample. Within the limit of this study, different amounts of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in various concentrations had minimal influence on the compressive strength of hemp concrete.

Using only $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for chemically treated hemp shiv improved the compressive strength of composites. The increasing amount of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ also accelerated the setting and hardening of the matrix.

This investigation has confirmed that hemp concrete using untreated hemp shiv slowed down the hardening and hydration of cement because of the water-solubility of the shiv distinctly retarded the hydration of cement.

It is clear that untreated hemp shiv sharply slows down the setting time of hemp concrete. Treating the shiv with aluminum sulfate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ resulted in the formation of ettringite formed in the xylem ray and the vessel wall of hemp shiv. The hydration products filled the pores of the shiv. For $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treated samples, the increase in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content retarded the formation of hemp concrete.

The compressive strengths of hemp concrete treated by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ were in the ranges of 15.0 and 17.0 MPa, the bulk densities were between 1420 to 1470 kg/m^3 , the water absorptions were between 14.5 to 16.5%, the thermal conductivity values were in the ranges of 0.22 and 0.30 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ at 28 days, and the drying shrinkage strains were in the ranges of 1130×10^{-6} and 1400×10^{-6} at 1 year. Therefore, it can be applied as a moderate strength concretes with the compressive strengths were approximately 7 to 17 MPa, the bulk densities were between 800 to 1440 kg/m^3 , and insulation characteristics (according to ACI 213R-87), and it can also be used as a precast wall to reduce the weight of buildings structure. Therefore, it can be applied as a moderate strength concretes, and it can also be used as a precast wall to reduce the weight of building.

PART II: Impact of fly ash on hemp concrete

The large amount of fly ash delayed the setting and hardening of hemp concrete due to the amount of cement was decreased.

The large amount of fly ash decreased the compressive strength of hemp concrete due to the amount of cement was decreased.

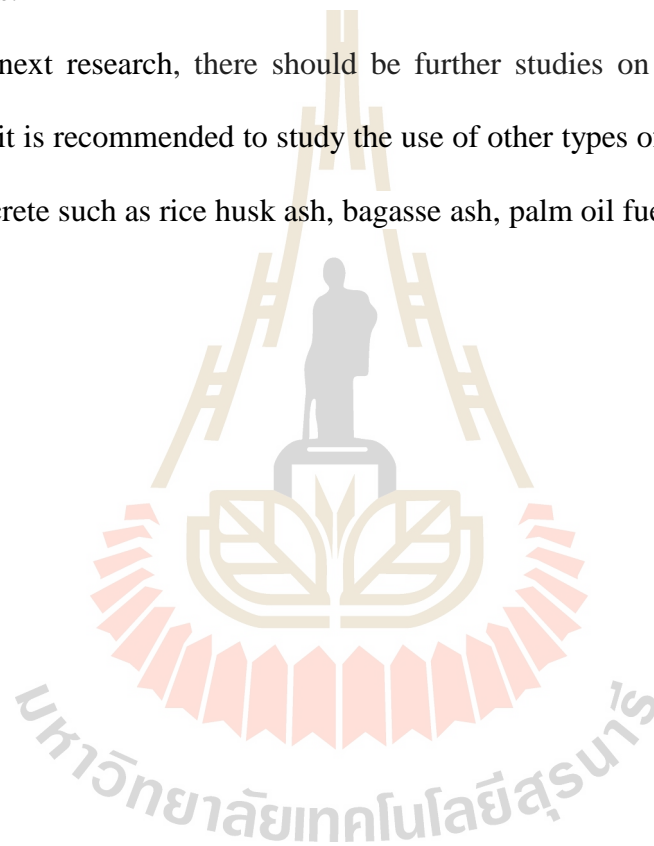
The bulk densities of hemp concrete containing fly ash of 10 to 50% was between 1460 and 1520 kg/m^3 , the water absorptions were between 15 and 17%, the thermal conductivity values were in the ranges of 0.22 and 0.28 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ at 28 days, and the drying shrinkage strains were in the ranges of 1000×10^{-6} and 1200×10^{-6} at 1 year of curing.

5.2 Recommendations

This is a new material, thus, it should be studied around the properties involved, such as tensile strength, flexural strength and durability.

If there is a need to change the lightweight aggregate material from the hemp shiv into another material, the relevant basic properties should be studied to obtain similar results.

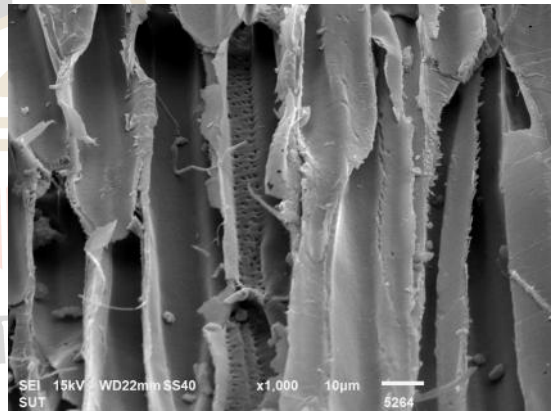
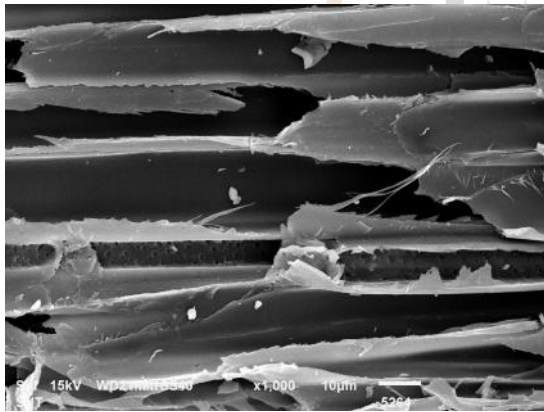
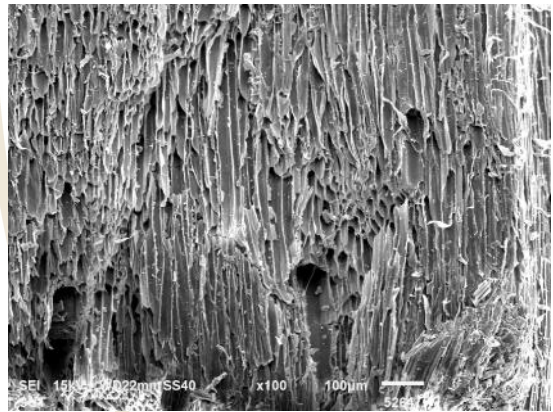
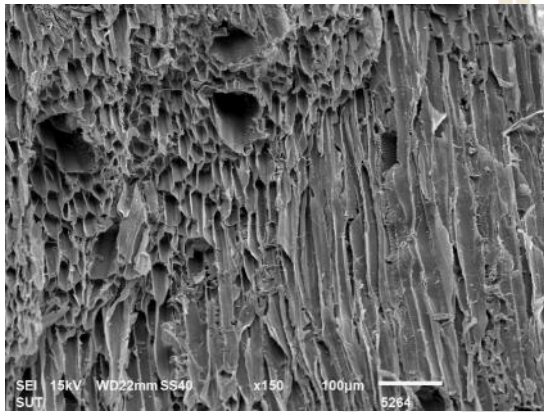
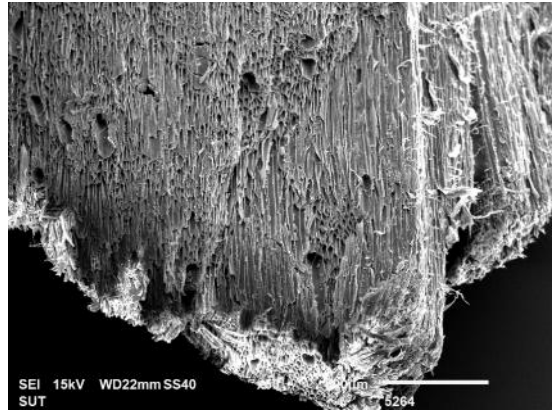
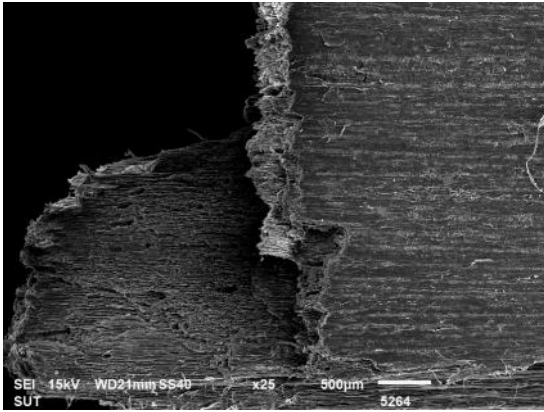
In the next research, there should be further studies on fly ash from various sources, and it is recommended to study the use of other types of pozzolanic materials in hemp concrete such as rice husk ash, bagasse ash, palm oil fuel ash, etc.



APPENDIX A

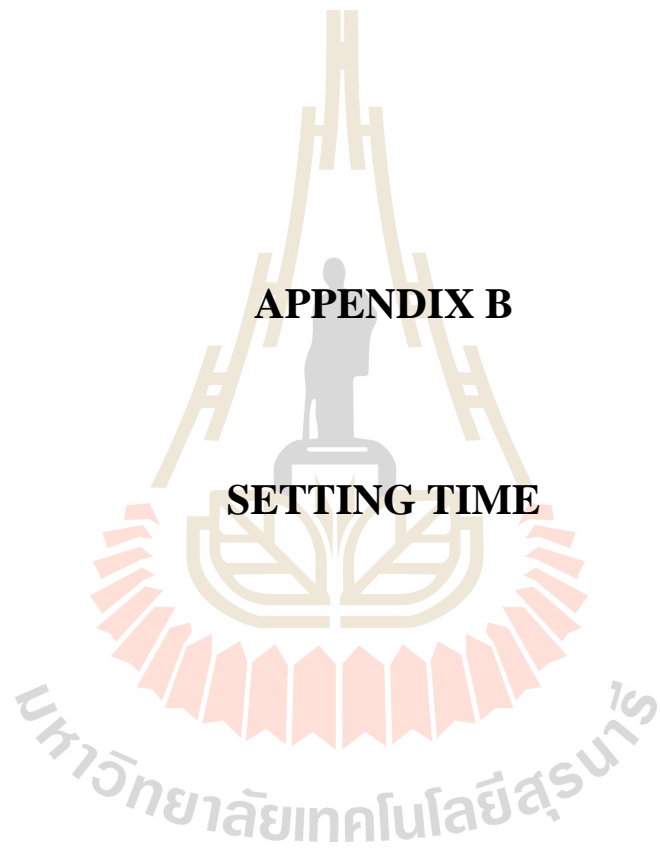
SEM MICROGRAPHS OF HEMP SHIV STRUCTURE

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



APPENDIX B

SETTING TIME



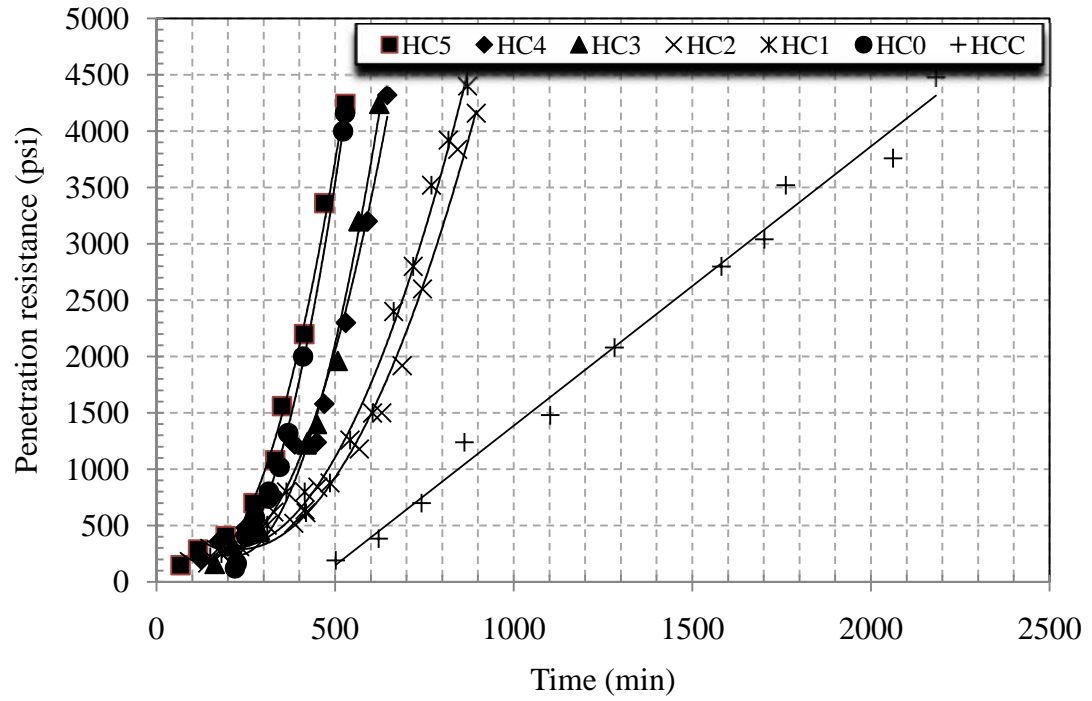


Figure B-1 Setting time of hemp concrete

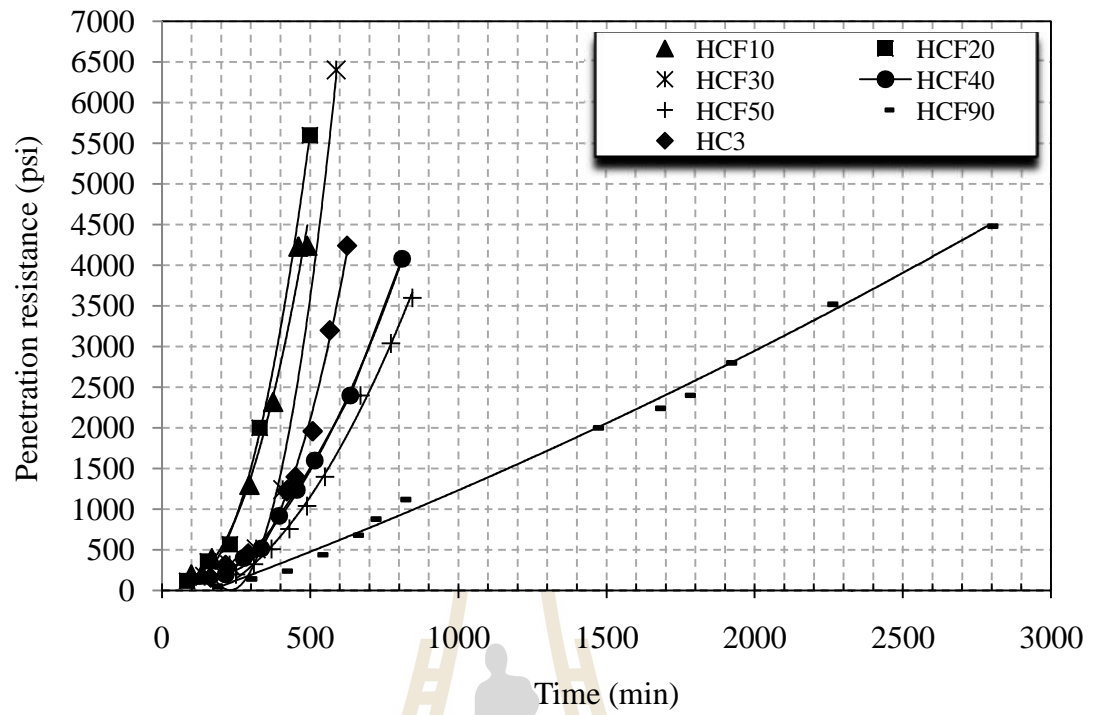


Figure B-2 Setting time of hemp concrete containing fly ash



APPENDIX C

COMPRESSIVE STRENGTH

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Table C-1 Compressive strength of hemp concrete

	Compressive Strength (MPa)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCC	2.85	3.43	3.50	3.74
HC0	15.02	16.15	16.70	17.52
HC1	13.01	14.57	15.27	15.90
HC2	13.93	15.76	16.89	17.46
HC3	14.37	15.55	16.71	17.00
HC4	14.22	16.38	17.40	18.11
HC5	14.16	14.91	15.67	16.79

Table C-2 Compressive strength of hemp concrete containing fly ash

	Compressive Strength (MPa)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCF10	4.83	5.35	5.62	6.14
HCF20	4.26	4.74	4.97	5.37
HCF30	4.04	4.33	4.95	5.32
HCF40	3.51	3.66	3.91	4.27
HCF50	3.21	3.60	3.84	3.99
HCF90	1.30	1.56	1.85	1.89

APPENDIX D

DENSITY

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Table D-1 Density of hemp concrete

	Density (kg/m ³)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCC	1421	1423	1429	1441
HC0	1418	1411	1425	1453
HC1	1442	1437	1455	1470
HC2	1440	1446	1426	1446
HC3	1457	1454	1455	1472
HC4	1416	1435	1431	1461
HC5	1436	1432	1446	1455

Table D-2 Density of hemp concrete containing fly ash

	Density (kg/m ³)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCF10	1493	1502	1502	1472
HCF20	1479	1491	1488	1477
HCF30	1503	1517	1499	1493
HCF40	1464	1482	1476	1469
HCF50	1481	1488	1471	1467
HCF90	1431	1434	1411	1414

APPENDIX E

WATER ABSORPTION

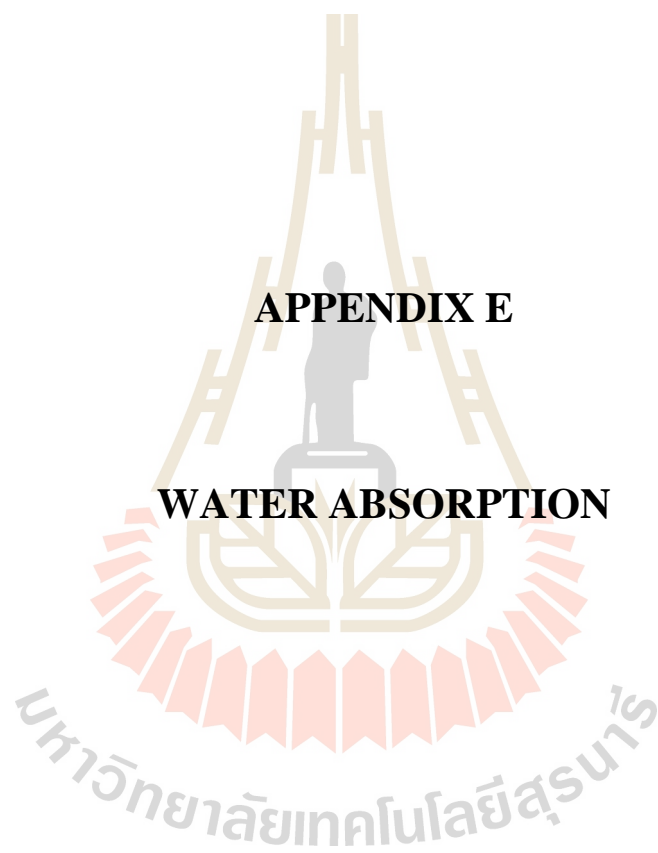


Table E-1 Water absorption of hemp concrete

	Water absorption (%)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCC	15.78	16.67	16.23	15.69
HC0	15.35	15.24	14.90	13.34
HC1	15.56	15.33	14.67	13.97
HC2	16.34	16.02	15.55	14.47
HC3	13.64	14.48	14.33	13.79
HC4	15.86	15.34	14.42	14.26
HC5	15.40	15.13	14.75	13.85

Table E-2 Water absorption of hemp concrete containing fly ash

	Water absorption (%)			
	7 days	14 days	28 days	56 days
HCF10	15.11	14.70	14.51	14.45
HCF20	15.50	15.42	15.10	14.85
HCF30	15.46	14.54	14.78	14.74
HCF40	17.04	16.83	15.54	14.88
HCF50	16.87	15.92	16.19	14.82
HCF90	16.71	16.05	15.59	14.84

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, flanked by two stylized figures. Above the central figure is a large, ornate structure resembling a traditional Thai roof or a ceremonial umbrella. The entire logo is surrounded by a decorative border of small, repeating motifs.

APPENDIX F

LIST OF PUBLICATION

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

List of publications

INTERNATIONAL JOURNAL

Saksith Pantawee, Theerawat Sinsiri, Chai Jaturapitakkul and Prinya Chindaprasirt (2017). Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and hydrated lime $[Ca(OH)_2]$ treatment. **Construction and Building Materials**. 156 (2017): 435–442.

NATIONAL CONFERENCE

Saksith Pantawee, Theerawat Sinsiri, Chai Jaturapitakkul and Prinya Chindaprasirt (2017). Development of hemp concrete. **Eco-efficient cement and concrete composite: Proceeding of the Sustainable infrastructure research and development center, Khon Kaen University**. 15-31.

Saksith Pantawee, Theerawat Sinsiri, Rattapon Somna, Somsong Akkakraisee and Saksiri Kuppatarat (2017). Basic Properties of Concrete Containing Hemp Shiv as Coarse Aggregate. **Innovative concrete for construction materials in the future: Proceeding of the Annual concrete conference ACC12**. MAT-018: 95-101.



Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and hydrated lime $[Ca(OH)_2]$ treatment



Saksith Pantawee^a, Theerawat Sinsiri^{a,*}, Chai Jaturapitakul^b, Prinya Chindaprasirt^c

^a School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 Maha Witthayalai Rd., Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123 Friendship Hwy., Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand

HIGHLIGHTS

- Using $Al_2(SO_4)_3$ for chemically treated hemp shiv improved the compressive strength of composites.
- $Al_2(SO_4)_3$ accelerated the setting and hardening of the matrix.
- Treating the shiv with $Al_2(SO_4)_3$ resulted in the formation of ettringite formed in the pores of hemp shiv.
- Different amounts of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ in various configurations had minimal influence on the compressive strength.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2017

Received in revised form 10 August 2017

Accepted 24 August 2017

Keywords:

Hemp shiv

Hemp concrete

Aluminium sulfate

Calcium hydroxide

Compressive strength

ABSTRACT

This research presents the potential of hemp shiv for use as coarse aggregate in concrete. Hemp shiv was mineralized with aluminium sulfate $Al_2(SO_4)_3$ and calcium hydroxide $Ca(OH)_2$ before being used as a coarse aggregate to produce hemp concrete. The cement to sand ratio was 1:2, the $Al_2(SO_4)_3$ to $Ca(OH)_2$ ratio was 1:2, and the amount of superplasticizer was 1% by mass of cement. The compressive strength, density and water absorption of hemp concretes were tested. The results showed that at 28 days the compressive strength of hemp concrete was in the range of 15.0–17.0 MPa, density of 1420–1470 kg/m³ and water absorption of 14.5–16.5%. The results indicated that the application of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ for mineralization increased the compressive strength of hemp concrete by four times compared to that with non-mineralized hemp shiv. The use of $Al_2(SO_4)_3$ improved the compressive strength of composites and the increase in the amount of $Al_2(SO_4)_3$ also accelerated the setting and hardening of the matrix.

© 2017 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

Among the new vegetable fibres in use, hemp stands out from the rest because of its availability, low requirements of fertilizer and irrigation, permanent renewal character, good humidity control and ecological balance [1].

"Hemp" refers primarily to *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae) [2]. The oldest known record of hemp farming goes back 5000 years in China, although hemp industrialization likely extends back to ancient Egypt. Medicinal cannabis was described in print in a Chinese book of medicine, "Herbal," in the 2nd century BCE [3]. By definition, industrial hemp refers to those strains of *Cannabis sativa*

L. containing less than 1% THC (Tetrahydrocannabinol). Most developed countries that permit industrial hemp cultivation limit production to those varieties with less than 0.3% THC [4]. Currently, hemp is grown in China, Europe (Russia, France, Ukraine, United Kingdom, Germany, Poland, and Finland), and Canada [5].

Hemp fibre is an organic fibre product of the hemp plant which is specially bred to produce strong fibre and oily seeds appropriate for industrial purposes [6]. Industrial hemp is grown for its fibre (outer bark), hurd (woody inner core of the stalk) and seeds (for oil and meal). Hemp stalks average approximately 20–30% bast fibre (the strong woody fibre obtained chiefly from the phloem of plants) [4]. Hemp fibre has thousands of applications including fabric for home furnishings, automotive interiors, and apparel, as well as other industrial uses such as composites, cordage (such as rope), specialty textiles and specialty papers (including teabag

* Corresponding author.

E-mail address: sinsiri@eng.sut.ac.th (T. Sinsiri).

paper, coffee filters, cigarette paper, carbon tissues and condensing tissues) [4,5].

A secondary product of the high-quality bast fibre crop is the internal core or "hurd," consisting of short fibres and cellulosic biomass with a variety of industrial applications [7]. Approximately 70–80% of the hemp stalk is composed of hurd or the woody inner portion of the plant. Essentially, hurds are the by-products of extracting the bast fibres from the stalk. Hurd is 50–70% cellulose, lending itself to paper, particle board, biodegradable plastics, building materials (thermal and acoustic insulation products), and animal bedding. For example, most of the hemp grown in the United Kingdom is designated for the horse industry [4,8]. The use of the core for building materials extends beyond concrete to acoustic insulation and even to animal bedding. In fact, the use of the hurd in construction is becoming increasingly common in Europe, where hemp is attracting attention from venture capital and large corporations. The core, which was once discarded as a useless component, is now being grown for its great biomass and unique material properties [8]. Hemp hurd or "hemp shiv" is used as aggregate for the manufacture of hemp concrete and there are several studies on "Hempcrete".

Hempcrete developed in the early 1990s in France is a combination of lime and hemp shiv [6]. This material can be used for several applications (wall, floor and roof) by adjusting the composition. It is implemented by casting, spraying or pre-casting. A hempcrete is used with a framework made of steel, concrete or wood. Usually, hempcrete walls are coated on both sides but it can occasionally be bare on the indoor side [9]. Hempcrete has been used more and more in building construction because hemp is a renewable plant, it is recyclable, and it does not degrade over time [10].

However, due to the low mechanical performances of hempcrete, it is used for non-load bearing purposes as it has compressive strength of approximately 1 MPa [6]. Hempcrete is a bio-based building material made of lime and hemp shiv. With regards to the mechanical properties of cement binder and lime, the compressive strength of cement is higher. The mechanical properties of hempcrete are improved by replacing lime with Portland cement. Cement is a significant component of concrete and is mixed with the other components to increase the mechanical properties of "hemp concrete".

Previous research shows that wood is chemically heterogeneous and its components can be divided into two groups: structural components of high molecular weight-natural polymer substances (cellulose, hemicelluloses and lignin) which are the major cell wall components, and non-structural components of low molecular weight (extractives and inorganic components) [11]. Pehanich [12] reported that there are many chemical components in wood fibre, but the main inhibitor of cement hydration is sugar. Building products such as cement bonded wood made from mineral binding materials and wood aggregates are widely developed in many developed countries. Preparing concrete mixtures with wood requires large amounts of water. This water dissolves the extractive materials that retard the hardening of Portland cement. The cement hydration, setting and hardening depend on the wood extract concentration, but not on the wood species and preparation method [11].

Several chemical treatments have been applied to the wood fibres before combining them with the cement binder. The compressive strength and other mechanical properties of the treated wood fibre composites are higher those of the untreated fibres [13]. Chemicals such as NaOH [14–16], CaCl₂ [17], and Al₂(SO₄)₃ [17,18], sometimes also referred to as mineralization agents (mineralizers), improve compatibility of cement and plant origin aggregates. Complex mineralizers such as Al₂(SO₄)₃ + Ca(OH)₂ (hydrated lime) are also used. When Al₂(SO₄)₃ is used as a mineralizer, it

impedes the release of sugar from organic aggregates and reduces hygroscopicity and water absorption [18]. The Al₂(SO₄)₃ in the form of hydrate is the characteristic of an acidic reaction in water, and Ca(OH)₂ is characteristic of an alkaline reaction in water. The mineralization is achieved by enhancing the efficiency of Al₂(SO₄)₃, neutralizing the acidic environment caused by Al₂(SO₄)₃ and improving the workability of the mixture. Wood aggregate mineralization also leads to improved adhesion between aggregate and cement binder [17,18].

The construction industry has responded to the growing demand for sustainable and environmentally friendly building materials. One of such material is hemp-lime concrete, it was good thermal insulation material, excellent hydric properties, great acoustic capabilities, and good fire resistance [19]. Therefore, this research aims to develop a mix proportion of the bio-composites using hemp shiv as coarse aggregate. The shiv is mineralized by Al₂(SO₄)₃, neutralized with Ca(OH)₂ and mixed with sand and cement to make "hemp concrete". The effects of the chemical treatment on some mechanical properties were evaluated.

2. Experiments

2.1. Materials

The Hemp Shiv (HS) provided by the Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI) in the Northern Thailand was used as a coarse aggregate. The apparent specific gravity and bulk density (air-dry condition) of hemp shiv were approximately 0.6 and 120 kg/m³, respectively. The air-dried shiv was stored in polythene bags before the chemical treatment. The shiv was sieved to obtain sample passed the 9.5-mm (3/8 in.) sieve. The used shiv consisted of 35% retained on the 4.75-mm (No. 4) and 65% retained on the 2.36 mm (No. 8) sieve. The grading of the air-dried shiv and sand are given in Table 1.

Chemical treatment: Al₂(SO₄)₃ (pH = 3.15) and Ca(OH)₂ [purity of Ca(OH)₂ of 90.2% (ASTM C 25); 3.60% retained on 170 mesh and 8.80% retained on 325 mesh (ASTM C 110), moisture content of 0.33%]; were used for mineralization.

The binder used in this investigation was ordinary Portland cement (Blaine surface area of 348 m²/kg) conformed to the Thai Industrial Standard for Portland cement type I TIS 15-2012, ASTM C 150 Type I and the British Standard B.S.12 (for ordinary Portland cement).

In this study, the water content was kept constant with the aid of a superplasticizer. Its specific density was 1.06 kg/l, and the recommended dosage for concrete was 0.4–1.5% by mass of binder.

2.2. Composition of the mix proportion

Based on the literatures [17,18], aluminum sulfate (Al₂(SO₄)₃) and hydrated lime (Ca(OH)₂) were used as complex mineralizer for chemical treatment. Al₂(SO₄)₃ in the form of hydrate is used for the characteristic of an acidic reaction in water (pH = 3–5) and Ca(OH)₂ is for the characteristic of an alkaline reaction in

Table 1
Grading of the air-dried hemp shiv and sand.

Individual size fraction	Hemp shiv, %	Sand, %
9.50 mm (3/8 in.) to 4.75 mm (No. 4)	35	–
3.75 mm (No. 4) to 2.36 mm (No. 8)	65	–
2.36 mm (No. 8) to 1.18 mm (No. 16)	–	14
1.18 mm (No. 16) to 600 μm (No. 30)	–	41
600 μm (No. 30) to Pan	–	45
Total	100	100

water (pH = 11–12). Primarily, HS was mineralized using the solution of $Al_2(SO_4)_3$, and the acidic $Al_2(SO_4)_3$ reaction and was then neutralized with hydrated lime $Ca(OH)_2$. The total content of mineralizer was increased to 81% (based on HS mass), and the water for the process of preparing the $Al_2(SO_4)_3$ solution was 1.5x that of HS mass. The untreated shiv was used to prepare the control hemp concrete (HCC). The details of the mixes are given in Table 2.

Cement has been used as a binder for hemp concrete and has shown improving mechanical strength, but the weakness of the cement is its environmental impact. This impact could be minimized using higher hemp shiv to cement ratio which would mean a lower amount of binder used [19]. In this study, the current hemp shiv to cement ratio (HS/C) of 0.16 by mass was selected based on the compatibility of the trial mix [17–19], and the cement to sand ratio (C/S) of 1:2 by mass, the water-cement ratio (W/C) of 0.48, and the superplasticizer (SP) content of 1% were used in all mixtures (Table 2).

2.3. Specimen preparations

Specimen preparation consists of two stages. The first, HS was mineralized using $Al_2(SO_4)_3$ solution in a container. Mixing lasted 3 min and the mass was then left for 15 min so that HS was mineralized (this tends to impede the release of sugar from organic aggregates and reduce the hygroscopicity and water absorption [18]). Further, $Ca(OH)_2$ was poured into the container and mixed together for 90 s.

In the second stage, all of the water was mixed with SP and poured into a mixer. Then, the cement was added and 90 s were allowed for the absorption of the water. The mixer was started and sand was added slowly over a 30 s period. The process was continued by pouring the HS into the mixer, which was mineralized slowly and mixed into a homogeneous mass over a 150 s period. Finally, hemp concrete was mixed completely in the mixer before moulding.

2.4. Experimental methods

The morphological structure of hemp shiv was studied using a JEOL JSM-6010LV scanning electron microscope (SEM). The investigation of the chemical composition of hemp shiv used X-ray Fluorescence Energy dispersive spectrometer model XGT-5200. (The results are reported based on 100% normalization of oxide compounds).

The quantity of cellulose, hemicellulose and lignin were determined using the detergent fibre analysis (acid detergent fibre (ADF), neutral detergent fibre (NDF), acid detergent lignin (ADL), cellulose and hemicellulose based on Georing and Van Soest (1970), Van Soest (1991) and AOAC (2000)).

X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using a Bruker: D2 PHASER X-ray Diffractometer to determine the crystallinity of hemp shiv. The investigation was carried out in the 2θ range of 5–80°. The Crystallinity Index ($C_{I_{XRD}}$) of cellulose was evaluated using Segal empirical method [20] as follows:

$$C_{I_{XRD}} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100 \quad (1)$$

In this equation, $C_{I_{XRD}}$ expresses the relative degree of crystallinity, I_{002} is the maximum intensity (in arbitrary units) of the 002 lattice diffraction at $2\theta = 22.5^\circ$, and I_{am} is the intensity of diffraction in the same units at $2\theta = 18^\circ$.

The specimen for setting time test was $150 \times 150 \times 150$ mm cube. The test was done in a temperature control $23 \pm 2^\circ C$ room. For each plot, we determined the times of initial and final settings when the penetration resistance equaled 3.5 and 27.6 MPa, respectively, in accordance with ASTM C 403/C 403 M. In this study, the shiv used as a coarse aggregate was softer than the normal aggregate and hence the mixture was used for the determination of setting time directly.

The compressive strength specimen was cast in $100 \times 100 \times 100$ mm cube in accordance with EN 12390-3 (Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens). The water absorption and density specimens were cast in a 50×100 mm cylinder according to ASTM C642-97. The hemp concrete specimens were demoulded after 24 h due to the shorter setting time, but the untreated hemp shiv control specimen was demoulded after 48 h due to its longer hardening time. After demoulding, they were stored at $23 \pm 2^\circ C$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity. Each test result represented the mean of at least three specimens. The samples were tested after 7, 14, 28 and 56 days of curing.

3. Results and discussions

3.1. SEM micrographs of hemp shiv structure

SEM micrographs in Fig. 1 show some parts of the hemp shiv structure. It consisted of a cellular porous microstructure (Fig. 1a and b). The pores are of two different sizes, the smaller was the so called xylem ray and the bigger was the vessel [18,21,22], with average diameters of 20–50 μm and 50–100 μm , respectively.

From Fig. 1c and d, the vessel wall had a pit aligned in the plane parallel to the growth direction; the pit apertures in the vessel wall are elliptical in shape. The pattern of the pits was quite uniform and appeared in only part of the wall of vessel. The average length of the major axis was 5 μm and of the minor axis was 3 μm .

3.2. Typical oxide compositions of the hemp shiv by X-ray Fluorescence (XRF) analysis

As presented in Table 3, it was observed that the raw hemp shiv (HS) showed higher potassium oxide (K_2O) content. During testing, hemp shiv test sample (Al_0) was saturated with water for 15 min and washed with water 3 times then placed in the oven at $60^\circ C$ for 3 days. Using the X-ray Fluorescence (XRF) analysis, some K_2O content was found to leach out together with water-soluble materials. Similar to Al_0 , the hemp shiv was treated using different amounts of $Al_2(SO_4)_3$ that had a strong decreasing effect on the K_2O content. The use of $Al_2(SO_4)_3$ for chemical treatment leached out a

Table 2
Composition of the mix proportions with different amounts of complex mineralizer.

Mix	HS kg/m ³	HS/C	W/C	C/S	SP (%)	Water for mineralization	Complex mineralizer% HS mass	$Al_2(SO_4)_3$ % HS mass	$Ca(OH)_2$ % HS mass
HCC	87	0.16	0.48	1:2	1	1.5xHS mass	0	0	0
HC0							18	18	0
HC1							30	10	20
HC2							45	15	30
HC3							54	18	36
HC4							63	21	42
HC5							81	27	54

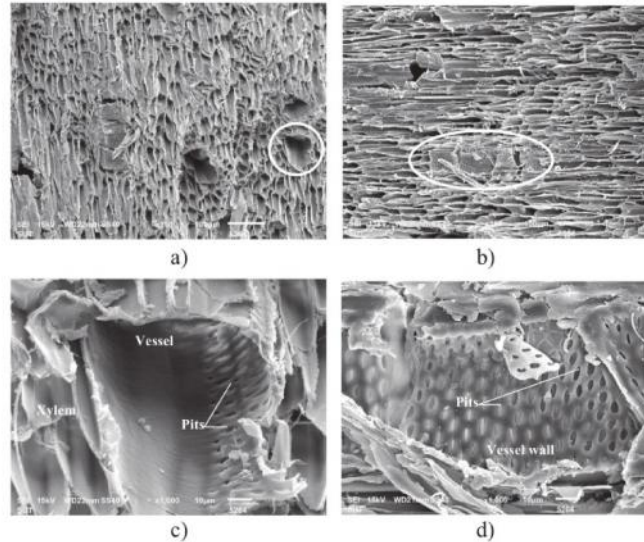


Fig. 1. SEM micrographs of hemp shiv structure.

Table 3
Typical oxide compositions of untreated and $Al_2(SO_4)_3$ treated hemp shiv.

Hemp shiv	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO	CuO
HS	–	20.24	16.44	7.30	37.15	14.88	3.54	–	0.14	–	–
Al_0	1.42	14.94	8.27	5.22	22.53	34.12	1.01	2.44	9.13	0.62	0.32
Al_{10}	19.94	28.36	17.57	12.16	1.12	14.00	1.29	0.80	4.49	0.18	0.12
Al_{15}	19.28	29.08	14.83	15.00	0.96	14.41	1.43	0.47	4.37	0.09	0.10
Al_{18}	19.48	30.24	15.89	15.23	0.88	12.10	1.20	0.62	4.16	0.13	0.08
Al_{21}	19.21	29.88	14.44	16.86	0.81	11.23	1.35	0.77	5.16	0.17	0.12
Al_{27}	18.36	30.64	13.26	19.49	0.89	10.74	1.21	0.61	4.59	0.15	0.08

HS – the raw hemp shiv; Al_0 – the hemp shiv test sample was saturated by an amount of water 1.5x that of the hemp shiv mass; Al_{10} to Al_{27} – the shiv was treated using 10, 15, 18, 21 and 27% of $Al_2(SO_4)_3$.

significant portion of potassium oxide from the shiv. Hence, the result confirmed that K_2O was capable of being washed out with water. Moreover, the chemical treatment using $Al_2(SO_4)_3$ led to more leaching of potassium oxide.

In this study, however, the hemp shiv was treated using $Al_2(SO_4)_3$ that was not washed out using water but was mixed together with cement mortar immediately after the shiv was treated with $Al_2(SO_4)_3$; therefore, K_2O only was leached out on the surface and distributed in the structure of hemp shiv so that reactions with other oxide compositions of cement or the $Al_2(SO_4)_3$, which was added for treatment to produce the hydration product, such as syngenite ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$) [23,24] and gorgeyite ($K_2SO_4 \cdot 5CaSO_4 \cdot H_2O$) [24] could crystallize and lead to an accelerated setting [23,25].

3.3. The cellulose, hemicellulose and lignin contents

Table 4 shows that the hemp shiv (HS) contained approximately 69% of cellulose, 14.20% of hemicellulose and 11.35% of lignin by the mass of shiv. The results show that the treatment with $Al_2(SO_4)_3$ also removes a certain portion of lignin covering materials.

3.4. X-ray diffractogram of hemp shiv

Fig. 2 shows the X-ray diffractogram of hemp shiv. The first two peaks occurred at $2\theta = 15.0^\circ$ and $2\theta = 16.5^\circ$, and the major peak at $2\theta = 22.5^\circ$. These peaks are attributed to crystallographic plane of the cellulose.

Using Eq. (1), the C_{XRD} of approximately 49% was obtained. The quantity of cellulose can be calculated using the following equation [27]:

$$\%C_{XRD} = [I_{002} / (I_{002} + I_{am})] \times 100 \quad (2)$$

where $\%C_{XRD}$ expresses the quantity of cellulose using X-ray Diffractometer. The value of $\%C_{XRD}$ was approximately 67%, compared to approximately 69% of the results of Detergent analysis. These results indicated that the hemp shiv consisted of both crystalline and non-crystalline (amorphous) phases. From previous investigations [26–28], the cellulose structure of fibres was distinguished through the crystalline and amorphous phases, whereas the hemicellulose and lignin were completely amorphous. Therefore, the hemp shiv had a region of amorphous material that could react with other chemicals because its freedom, the hydroxyl

Table 4
The cellulose, hemicellulose and lignin contents.

	Dry matter	ADF	NDF	Lignin	Cellulose	Hemicellulose
HS	95.45	80.37	94.57	11.35	69.02	14.20
Al ₀	93.79	83.04	96.31	21.92	61.12	13.27
Al ₁₀	94.26	86.78	99.24	20.92	65.86	12.46
Al ₁₅	93.90	84.97	98.96	23.83	61.14	13.99
Al ₁₈	93.79	83.49	98.12	24.50	58.99	14.63
Al ₂₁	93.10	88.97	99.65	26.20	62.77	10.68
Al ₂₇	93.88	84.11	99.42	21.27	62.84	15.31

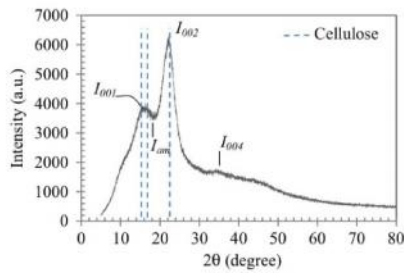


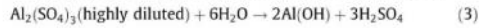
Fig. 2. X-ray diffractogram of hemp shiv.

groups present in the amorphous region could easily combine with water molecules from the atmosphere [26].

3.5. Effect of Al₂(SO₄)₃ and Ca(OH)₂ treatment on setting time of hemp concrete

Table 5 presents the setting time of hemp concrete. The HCC required a longer time for setting in comparison with the other specimens that used Al₂(SO₄)₃ in the treatment process. The initial setting time and final setting time were 645 min (approximately 11 h) and 2155 min (approximately 36 h), respectively. Certainly, the untreated hemp shiv delayed the setting and hardening of hemp concrete due to the water-solubility of shiv resulting in the retardation of hydration of cement.

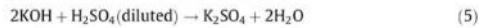
The aluminum sulfate solution may be written as follows:



It can leach potassium oxide (K₂O) out onto the surface and distributed it in the structure of hemp shiv. The chemical reaction between K₂O and H₂O describes the presence KOH according to [29]



Potassium hydroxide can react with sulfuric acid to produce potassium sulfate and water as follows:



or



Table 5
Setting time of hemp concrete.

	HCC	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5
Initial setting Time, min	645	260	360	380	320	305	230
Final setting Time, min	2155	525	830	870	620	640	520
Slump, cm	4.5	4	5	11	12	4	3

Potassium hydroxide can readily react with that calcium sulfate (CaSO₄) in the hydration process of cement and/or in the presence of Al₂(SO₄)₃ for treatment and Ca(OH)₂ for neutralization as follows [23,25]:

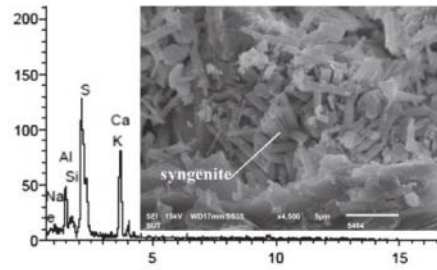
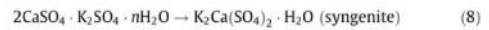


Fig. 3. SEM - EDS analysis of HCO matrix at 28 days.

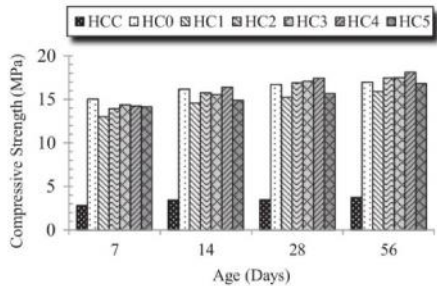


Fig. 4. Development of compressive strength of hemp concrete.

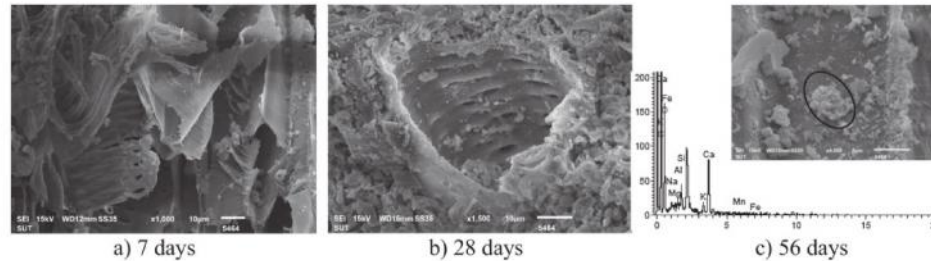


Fig. 5. SEM micrographs of the control hemp concrete (HCC) matrix.



Fig. 6. SEM micrographs of HC3 matrix.

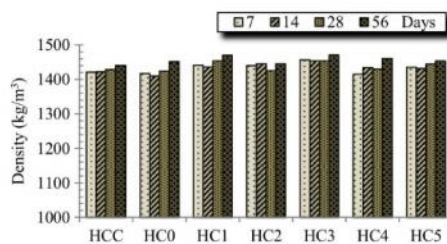


Fig. 7. Density of hemp concrete.

Previous research indicated that K_2SO_4 can accelerate the setting time of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) to form syngenite [23], it was formed both on the surface and in the pores of hemp shiv as shown in Fig. 3. In this study, it clearly appears that untreated hemp shiv significantly retards the setting of hemp concrete, and the treatments using $Al_2(SO_4)_3$ in the mix proportion of HC1 to HC5 were able to improve the setting time of hemp concrete compared to that of the control hemp concrete (HCC). In the case of HC0 [$Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2 = 18:0$] compared to HC3 [$Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2 = 18:36$], it was found that by using $Ca(OH)_2$, retardation of the setting time of hemp concrete was observed.

The $Al_2(SO_4)_3$ content also affected the workability of hemp concrete, and the HC1 to HC3 increased the slump. In contrast, in the case of HC4 and HC5, increasing the dosage of $Ca(OH)_2$ decreased the slump due to the increased fine particle with high surface area.

3.6. Compressive strength

The development of compressive strength of hemp concrete is illustrated in Fig. 4. The results showed that the compressive strengths of hemp concrete using $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ (HC1 to HC5), as well as with only $Al_2(SO_4)_3$ (HC0) for treatment were in the ranges of 15.0 and 17.0 MPa at 28 days in contrast to the ranges of 3.0 and 4.0 MPa of the control hemp concrete (HCC). The hemp concrete with treated hemp shiv obtained greater compressive strength than the concrete with untreated hemp shiv. On the other hand, using the untreated hemp shiv affected the compressive strength development of the control hemp concrete, which showed only slightly increased compressive strengths for a longer curing period. The compressive strength at 7–56 days of HCC was relatively low compared to those of HC0 to HC5, which achieved 4 times higher compressive strengths than that of HCC.

The regression results of chemical composition of hemp shiv by the detergent method (Table 4) and the analysis of crystallinity by XRD (Fig. 2) explained that the main component in the structure of the hemp was cellulose composing mainly of glucose, which can delay matrix formation and affect the reaction of cement hydration [11,12].

The results of SEM of hemp concretes at the ages of 7, 28 and 56 days are shown in Figs. 5 and 6. HCC did not exhibit the formation of ettringite (Fig. 5a and b) in the matrix. In contrast, HC3 exhibited formation of ettringite distributed throughout the entire xylem ray and vessel (Fig. 6a and b). In the vessel wall of treated hemp shiv, there also appeared to be the formation of ettringite (Fig. 6c), but not in the untreated hemp shiv (Fig. 5c). The results thus indicated that the application of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ for chemical treatment increased the hydration of the matrix with



Fig. 8. Distribution of hemp shiv in the hemp concrete matrix.

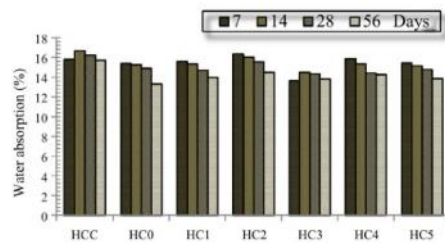


Fig. 9. Water absorption of hemp concrete.

increased ettringite and resulted in the increased compressive strengths.

Calcium sulfate such as gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), is intentionally added to regulate early hydration reactions to prevent flash setting and improve strength development [28]. Thus, in this study, the gypsum obtained from using $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for mineralization can react with calcium aluminate in the mixture to form ettringite and filled the pores of shiv to improve the strength of hemp concrete. Furthermore, the syngenite $[\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ from the reaction can also improve the strength of gypsum produced [23]; thus, the strength of the HCO to HC5 increased compared to that of HCC.

In the case of the HCO test sample $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3:\text{Ca}(\text{OH})_2 = 18:0]$, it was observed that the gypsum product of mineralization and other sulfate compounds also reacted with calcium aluminate from cement to form ettringite without adding $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Using only $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ for chemically treated hemp shiv could improve the compressive strength of hemp concrete compared to that of HCC using untreated hemp shiv, and HC1 to HC5 with both $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$. The compressive strength at 7 days of HCO was higher than that of the hemp concrete treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, but the development slightly decreased during the long curing time. Therefore, it was shown that increasing the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content of this mix slightly improved the compressive strength.

3.7. Density

As shown in Fig. 7 the density of concrete slightly varies with the amount of chemical treatment $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Overall, the bulk density of hemp concrete increased slightly over the curing period. Further, the bulk density did not increase steadily based on the distribution of hemp shiv in the matrix (the samples of the distribution (by cutting) of hemp shiv in the matrix are shown in Fig. 8). The bulk density of hemp concrete was between 1420 and 1470 kg/m^3 . The addition of hemp shiv reduced the density of concrete because of the low bulk density of hemp shiv of only 120 kg/m^3 , thus they fall about midway between the structural and low-density concretes. Therefore, it can be applied as a

moderate strength concretes with the compressive strengths are approximately 7–17 MPa and insulation characteristics (according to ACI 213R-87), and it can also be used as a precast wall to reduce the weight of buildings structure.

3.8. Water absorption

Fig. 9 shows the results of water absorption of the series of hemp concrete with the varying chemical treatments [$Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$]. The water absorption of hemp concrete slightly decreased over the period of curing. The decreases in water absorption corresponded to the increases in the bulk density of hemp concrete as expected. The water absorption of hemp concrete was between 14.5 and 16.5%. However, the water absorption does not correlate with increasing the amount of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$, because the hemp shiv has high porosity. As a result, the water absorption was similar because of the small amount of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ compared to the hemp shiv and other ingredients as well as the amount of hemp shiv was kept constant.

4. Conclusion

The use of treated hemp shiv with $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ as a coarse aggregate produced hemp concretes with compressive strength 4 times higher than the compressive strength of the control sample. Within the limit of this study, different amounts of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ in various configurations had minimal influence on the compressive strength of hemp concrete.

Using only $Al_2(SO_4)_3$ for chemically treated hemp shiv improved the compressive strength of composites. The increasing amount of $Al_2(SO_4)_3$ accelerated the setting and hardening of the matrix.

This investigation has confirmed that hemp concrete using untreated hemp shiv slowed down the hardening and hydration of cement because of the water-solubility of the shiv district retarded the hydration of cement.

It is clear that untreated hemp shiv sharply slows down the setting time of hemp concrete. Treating the shiv with aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3$ resulted in the formation of ettringite formed in the xylem ray and the vessel wall of hemp shiv. The hydration products filled the pores of the shiv. $Ca(OH)_2$ treated samples, the increase in $Ca(OH)_2$ content retarded the formation of hemp concrete.

Suggestion

This is a new material, thus, it should be studied around the properties involved.

Acknowledgements

This work was supported by the Suranaree University of Technology, the Rajamangala University of Technology Isan (Nakhon-ratchasima), King Mongkut's University of technology Thonburi – Thailand, and the Thailand Research Fund (TRF) and Khon Kaen University under TRF Senior Research Scholar contract no. RTA5780004 – Thailand. We would like to thank the Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI) of Thailand for the provision of hemp shiv.

References

- [1] Del R. Valle-Zermeno, J.E. Aubert, A. Laborel-Preneron, J. Formosa, J.M. Chimenos, Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties

- of hemp-magnesium phosphate cements, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 62–68.
- [2] Ernest Small, David Marcus, Hemp: A New Crop with New Uses for North America, *Trends in New Crops and New Uses* 2002, 285–326.
- [3] An Old Rippie, The ultimate cannabis. Indoor cultivation and usage guide 2016, 44 pages.
- [4] Valerie L. Vantrees, *Industrial Hemp: Global operations, Local implications*. Department of Agricultural Economics University of Kentucky, Lexington 1998; KY 40546-0276.
- [5] DeeDee De Miranda, An Evaluation of Hemp Fibre for Furnishing Applications, Colorado State University Fort Collins, Colorado, 2011.
- [6] Plamen Ivanov Peev, Jesper Saxgren, Is industrial hemp a sustainable construction material?, *Architectural Technology and Construction Management*, VIA University College, Horsens, Denmark 2012.
- [7] Skaidra Smith-Heisters, *Illegally green: Environmental costs of hemp prohibition* 2008, 50 pages.
- [8] Adnan M. Esmail, *Cannabis Sativa: An Optimization Study for ROI*, The Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [9] Florence Collet, Sylvie Pretot, Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall, *Build. Environ.* 82 (2014) 459–466.
- [10] A.D. Tran Le, D. Samri, M. Rahim, O. Douzane, G. Promis, T. Langlet, Effect of temperature-dependent sorption characteristics on the hygrothermal behavior of hemp concrete, *Energy Procedia* 78 (2015) 1449–1454.
- [11] Giedrius Vaickelionis, Rita Vaickelioniene, Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives, *Ceramics-Silikaty* 50 (2) (2006) 115–122.
- [12] Jennifer L. Pehanich, Paul R. Blankenhorn, Michael R. Silsbee, Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre-cement composites, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 59–65.
- [13] Ming Liu, Anne S. Meyer, Dinesh Fernando, Diogo Alexandre Santos Silva, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen, Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites, *Compos.: Part A* 90 (2016) 724–735.
- [14] Reinu E. Abraham, Colin J. Barrow, Munish Puri, Relationship to reducing sugar production and scanning electron microscope structure to pretreated hemp hurd biomass (*Cannabis sativa*), *Biomass Bio Energy* 58 (2013) 180–187.
- [15] Paul R. Blankenhorn, Brad D. Blankenhorn, Michael R. Silsbee, Maria DiCola, Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1049–1055.
- [16] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction, *J. Eur. Ceramic Soc.* 28 (2008) 183–192.
- [17] Michał Boltryk, Dorota Małaszkiewicz, Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete, *Białystok Technical University* 2007, 50 pages.
- [18] Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekūnaite-Lukosiune, Sigita Vejelis, Aleksandrs Korjajins, Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material, *Ind. Crops Prod.* 77 (2015) 724–734.
- [19] M. Sinka, G. Sahnenko, A. Korjajins, R. Radina, D. Bajare, Hemp thermal insulation concrete with alternative binders, analysis of their thermal and mechanical properties, 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, *Materials Science and Engineering* 2015, 96, 012029.
- [20] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, C.M. Conrad, An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer, *Text. Res. J.* (1959) 786–794.
- [21] S. Indran, R. Edwin Raj, V.S. Sreenivasan, Characterization of new natural cellulosic fibre from *Cissus quadrangularis* root, *Carbohydr. Polym.* 110 (2014) 423–429.
- [22] Herman E. Hayward, The structure of economic plants, Chapter VIII, *Moraceae, Cannabis sativa*. The University of Chicago, Hempology.org: The study of hemp 1938, 214–245.
- [23] C. Shen, H. Mohammed, A. Kamar, Effect of K_2SO_4 and $CaSO_4$: Dihydrate solutions on crystallization and strength of gypsum, *College of Dentistry, University of Florida, Gainesville, Florida, Gypsum Crystallization* 1981, 60(8), 1410–1417.
- [24] Jana Jurisova, Vladimir Danielik, Pavel Fellner, Marek Lencses, Milan Kralik, Phase diagram of the system $CaSO_4-K_2SO_4-KNO_3-Ca(NO_3)_2-H_2O$, *Acta Chim. Slovaca* 7 (1) (2014) 20–24, <http://dx.doi.org/10.2478/acs-2014-0004>.
- [25] Paul Wencil Brown, Early-age cement hydration reactions, Department of Materials Science and Materials Research Laboratory, Penn State University, University Park, Pa. *Transportation Research Record*, 1284, 53–59.
- [26] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, Effects of chemical treatments on hemp fibre structure, *Appl. Surf. Sci.* 276 (2013) 13–23.
- [27] Jianqiang Wei, Christian Meye, Degradation of natural fibre in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite, *Corrosion Sci.*, doi: 10.1016/j.corsci.2016.12.004.
- [28] Ettringite formation and the performance of concrete. *Concrete information*, Portland Cement Association, 16 pages.
- [29] Howard F. Rase, *Handbook of Commercial Catalysts: Heterogeneous Catalysts* 2000, page 71.

คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตที่ผสมแกนเฮมพ์แทนมวลรวมหยาบ
Basic Properties of Concrete Containing Hemp Shives as Coarse Aggregate

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)¹

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Teerawat Sinsiri)²

รัฐพล สมณา (Rattapon Somna)³

สมทรง อรรถไกรสิทธิ์ (Somsong Akkakraisee)³

ศักดิ์ศิริ คุปตรัตน์ (Saksiri Kuppatarat)⁴

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sacred13@hotmail.com

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sinsiri@g.sut.ac.th

³ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา rattapon.so@rmuti.ac.th

³ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา emailsomsong@gmail.com

⁴ นักวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Saksiri_sk@hotmail.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮมพ์มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต แกนเฮมพ์จะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อผลิตเป็นเฮมพ์คอนกรีต ใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2 อัตราส่วน $Al_2(SO_4)_3/Ca(OH)_2$ เท่ากับ 1:2 และใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำการศึกษา ค่ากำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และค่าการดูดซึมน้ำ ผลการทดสอบพบว่าเฮมพ์คอนกรีตมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 160 ถึง 180 กก./ตร.ซม. หน่วยน้ำหนัก 1400 ถึง 1500 กก./ลบ.ม. และค่าการดูดซึมน้ำ 14.5 ถึง 16.5% ที่อายุ 28 วัน จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ เพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น โดยมากกว่าเฮมพ์คอนกรีตควบคุม ที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า

ABSTRACT: This research presents the possibility of hemp shives to be used as coarse aggregate in proportion of concrete. Hemp shives were mineralized with aluminium sulphate $Al_2(SO_4)_3$ and calcium hydroxide $Ca(OH)_2$ before used as coarse aggregate to produce hemp concrete. The ratio between cement and sand was 1:2, $Al_2(SO_4)_3/Ca(OH)_2$ was 1:2, and amount of super plasticizer was 1% by weight of cement. The compressive strength, unit weight and water absorption were investigated. The results found that the compressive strength of the hemp concrete was in the range 160 to 180 ksc, the unit weight of 1400 to 1500 kg/m³ and the water absorption of 14.5 to 16.5% at 28 days. The results indicated the application of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ for mineralizing increased 4 times compressive strength of control hemp concrete compared to not mineralized hemp shives.

KEYWORDS: Hemp shives, Hemp concrete, Aluminium sulphate, Calcium hydroxide, Compressive strength

1. บทนำ

เฮมพ์ (Hemp) หรือ “กัญชง” มีลักษณะใบและลำต้นใกล้เคียงกับกัญชามาก (ภาพที่ 1) ทำให้การแยกแยะด้วยสายตาต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ ทางพฤกษศาสตร์ เฮมพ์ มีชื่อเรียกว่า *Cannabis sativa* L. subsp. *sativa* ส่วนกัญชา (Marijuana) มีชื่อว่า *Cannabis sativa* L. subsp. *Indica* พืชทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบของสารกลุ่ม

cannabinoids ที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท ได้แก่ Tetrahydrocannabinol (THC) ออกฤทธิ์กระตุ้นประสาท ทำให้มีอาการตื้นเต้น ช่างพูด หัวเราะ และยังมีสาร Cannabidiol (CBD) ออกฤทธิ์ยับยั้งฤทธิ์ที่ทำให้เกิดอาการกระวนกระวาย (anxiety effect) สาร THC ในกัญชามีปริมาณสูงถึง 5 ถึง 15% และมีปริมาณ THC สูงกว่า CBD

ในขณะที่เฮมพ์มีปริมาณ THC เพียงประมาณ 0 ถึง 1.0% และมีสัดส่วน CBD:THC มากกว่า 2:1 [1]

การปลูกและใช้เส้นใยจากเฮมพ์ในประเทศไทยยังอยู่ในวงจำกัดเฉพาะชาวไทยภูเขาเผ่าม้ง เนื่องจากคณะกรรมการควบคุมยาเสพติดให้โทษ กำหนดให้เฮมพ์เป็นพืชเสพติดประเภท 5 ตามพระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 แต่ต่อมาในปีพุทธศักราช 2547 สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ มีพระราชประสงค์ที่จะให้มีการศึกษาและส่งเสริมเกษตรกรชาวไทยภูเขาปลูกเฮมพ์ เพื่อใช้ในครัวเรือนและจำหน่ายสู่ตลาด เป็นการส่งเสริมอาชีพและสร้างรายได้ ขณะเดียวกันจากการศึกษาของมูลนิธิโครงการหลวง สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) สามารถปลูก พัฒนา และคัดเลือกสายพันธุ์เฮมพ์ให้มีสารเสพติดต่ำและสามารถขึ้นทะเบียนรับรองสายพันธุ์ได้

การขออนุญาตปลูก และการขออนุญาตผลิต จำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครองเฮมพ์นั้น ต้องเป็นไปตามกฎกระทรวงที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ที่ระบุให้ “เมล็ดพันธุ์รับรอง” มีปริมาณ THC ได้น้อยกว่า 1.0% ของน้ำหนักแห้ง และมีหลักเกณฑ์การตรวจวิเคราะห์ตามที่กำหนด [11]



ภาพที่ 1 ลักษณะของใบและลำต้นเฮมพ์ [1]

ผลิตภัณฑ์จากเมล็ดเฮมพ์สามารถนำไปทำเป็นโปรตีนผง แคมพู เครื่องสำอาง สบู่ โปรตีนเฮมพ์ น้ำมันเฮมพ์ ไอศกรีมเฮมพ์ น้ำมันหอมระเหย ขน และเค้กเฮมพ์ ผลิตภัณฑ์จากเส้นใยเฮมพ์สามารถนำไปทำเป็นเสื้อผ้า หมวก ผ้าเช็ดตัว กระเป๋า รองเท้า วัสดุทดแทนสิ่งทอ เสื่อเกราะกันกระสุน ส่วนผลิตภัณฑ์จากแกนเฮมพ์สามารถทำเป็นกระดานหรือ

บอร์ด กระเป๋าดินทาง ของใส่แผ่นซีดี กระดาษ คอนโซลรถยนต์ เฮมพ์กรีต ฉนวนกันความร้อน และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เนื่องจาก ต้นหรือแกนเฮมพ์ มีความแข็งแรง มีรูพรุนภายในที่สามารถระบายอากาศได้ดี น้ำหนักเบา [2]



ภาพที่ 2 แกนเฮมพ์ที่ผ่านการย่อย (Hemp shives)

ในการเก็บเกี่ยวเฮมพ์ จะมีปริมาณแกนเฮมพ์ (Hemp shives) ประมาณ 70 ถึง 80% ของผลผลิต [3] ในต่างประเทศ มีการนำแกนเฮมพ์มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวาง โดยนำแกนเฮมพ์ (ภาพที่ 2) มาผสมรวมกับปูนขาว เรียกว่า เฮมพ์กรีต (Hempcrete) ซึ่งก็คือวัสดุผสมชีวภาพ (Biocomposites) [4, 5] ด้วยวิธีอัดขึ้นรูปเพื่อใช้ทำผนังบ้าน หรือทำเป็นบล็อกก่อผนัง และอื่นๆ [6]

แต่ในการนำวัสดุผสมชีวภาพมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต จะต้องผ่านกระบวนการบางอย่างเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะของเส้นใยธรรมชาติให้ดีขึ้นและเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากโดยธรรมชาติของเส้นใยธรรมชาติจะมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากเส้นใยคือ เซลลูโลส (Celluloses) ลิกนิน (Lignin) และเพกติน (Pectin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การยึดเกาะไม่ดี อันเป็นผลมาจากการที่วัสดุชีวภาพดูดซึมความชื้นเอาไว้ และส่งผลถึงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุผสมให้ลดน้อยลงไปด้วย [5]

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยใช้อลูมิเนียมซิลเฟต และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [7] ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อนำไปใช้งานก่อสร้างได้จริง และเป็นการรองรับการปลูกเฮมพ์ในอนาคต

2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) หทรายจากแหล่ง จังหวัดนครราชสีมา
- 3) แกนเฮมพ์ จากศูนย์วิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ร่อนผ่านตะแกรง ใช้ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 และ เบอร์ 8 (35:65)
- 4) อลูมิเนียมซัลเฟต [Aluminium sulphate $Al_2(SO_4)_3$]
- 5) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Calcium hydroxide $Ca(OH)_2$]
- 6) สารลดน้ำจำนวนมาก (Super plasticizer)
- 7) น้ำสะอาด

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

- 1) ใช้สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายแห้ง = 1:2
- 2) อัตราส่วนระหว่างเฮมพ์ต่อซีเมนต์ H/C = 0.16
- 3) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ W/C = 0.48
- 4) ใช้น้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักเฮมพ์ ละลาย $Al_2(SO_4)_3$
- 5) ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
- 6) สัดส่วนระหว่าง $Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2$ = 1:2 และใช้

ปริมาณสารประกอบเพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ 0 30 45 54 63 และ 81 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแกนเฮมพ์ ดังแสดงในตารางที่ 1 [7]

ตารางที่ 1 สัดส่วนระหว่าง $Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2$ [7]

สัญลักษณ์	ปริมาณสารประกอบ (%)	$Al_2(SO_4)_3$	$Ca(OH)_2$
HCC	0	-	-
HC1	30	10	20
HC2	45	15	30
HC3	54	18	36
HC4	63	21	42
HC5	81	27	54

การเตรียมตัวอย่าง จะใช้น้ำสะอาดละลาย $Al_2(SO_4)_3$ จากนั้นนำไปผสมกับแกนเฮมพ์ 3 นาที ทิ้งไว้ 15 นาที แล้วจึงนำไปผสมกับ $Ca(OH)_2$ อีก 90 วินาที ทันทีที่ขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพเฮมพ์เสร็จสิ้นลง ให้เริ่มเทน้ำผสมสารลดน้ำจำนวนมาก ใส่ลงในโมที่มีกรเตรียมปูนซีเมนต์ไว้แล้ว ปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไปในปูนซีเมนต์ 90 วินาที จึงเริ่มเปิดโม ระหว่างนั้นค่อยๆ เททรายลงไปจนได้เนื้อมอร์ตาร์ที่ดี แล้วจึงทยอยเทแกนเฮมพ์ลงในโม ผสมให้เสร็จภายในเวลา 3 นาที

2.3 การทดสอบ

- 1) ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแกนเฮมพ์
- 2) ทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต (Hemp concrete) ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ $23 \pm 2^\circ C$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$

3. ผลการศึกษา

3.1 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแกนเฮมพ์

- 1) ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยการวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence analysis (XRF) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเฮมพ์

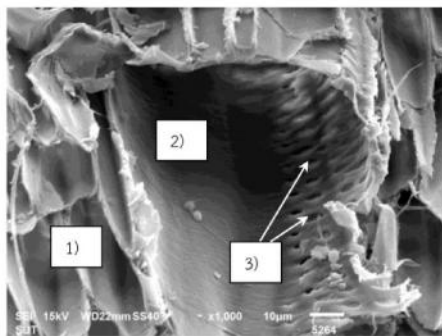
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณสารประกอบ (%)	
	ก่อนแช่	หลังแช่ด้วย $Al_2(SO_4)_3^*$
CaO	34.118	12.100
SiO ₂	14.940	30.242
Al ₂ O ₃	1.416	19.480
Fe ₂ O ₃	9.128	4.162
K ₂ O	22.526	0.876
SO ₃	5.216	15.227
P ₂ O ₅	8.271	15.885
TiO ₂	1.005	1.203
Cr ₂ O ₃	2.439	0.624
NiO	0.621	0.126
CuO	0.319	0.075

* เป็นตัวอย่างการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ของ HC3 เพียงตัวอย่างเดียว เนื่องจาก HC1 ถึง HC5 มีปริมาณออกไซด์เพิ่ม-ลดใกล้เคียงกัน ยกเว้น HCC ที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

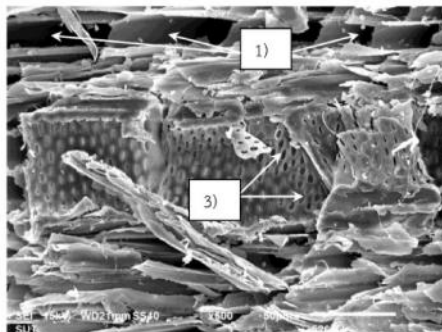
จากตารางที่ 2 พบว่าแกนเฮมพ์มีออกไซด์หลายอย่าง เช่นเดียวกับออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ประมาณ 60% อีกทั้งยังมีปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ค่อนข้างสูงมาก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ทำให้ปริมาณ K₂O ลดลงได้ เมื่อเทียบกับปริมาณออกไซด์โดยรวม

2) จากการวิเคราะห์ โดยวิธี Detergent analysis พบว่าแกนเฮมพ์ มีปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 60 ถึง 66% เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 11 ถึง 15% และ ลิกนิน (Lignin) 21 ถึง 26%

3) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [Scanning Electron Microscope (SEM)] ดังแสดงในภาพที่ 3 ก) และ ข)



ก)



ข)

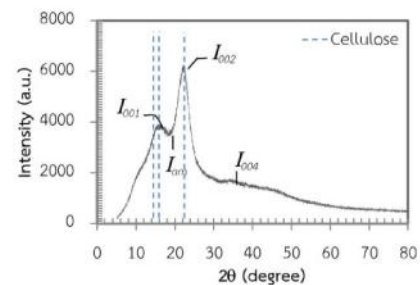
ภาพที่ 3 ภาพขยายแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค SEM

ก) ภาคตัดขวาง ข) ภาคตัดตามยาว

ภาพที่ 3 ก) และ ข) แสดงภาพขยายของแกนเฮมพ์ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ แกนเฮมพ์มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน กลวงยาว (โดยจะมีรูพรุนที่เป็นของไซเลม เรย์ (Xylem ray) เรียงติดกัน 1) และมีรูพรุนขนาด

ใหญ่กว่าที่เรียกว่า เวสเซล (Vessel 2); [8]) ที่ผิวของผนังเวสเซล ยังมีรูพรุนทางด้านข้างลักษณะเป็นวงรี 3) อีกด้วย ที่พอสังเกตเห็นได้ ไซเลมเรย์ มีความกว้างประมาณ 20 ถึง 50 ไมครอน ส่วนเวสเซล มีความกว้างประมาณ 50 ถึง 80 ไมครอน และเมื่อพิจารณาความถ่วงจำเพาะของแกนเฮมพ์ประมาณ 0.6 และมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 120 กก./ลบ.ม. คุณสมบัติเหล่านี้จะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักคอนกรีตลดลงได้

4) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction analysis (XRD) แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 X-ray diffractogram of hemp shives

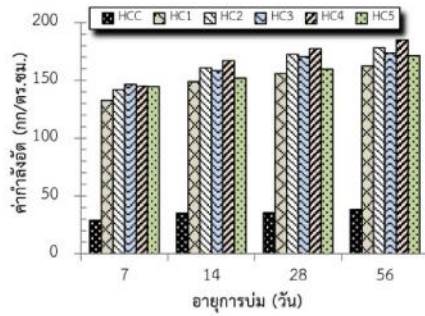
จากภาพที่ 4 ในการหาค่าความเป็นผลึกของเซลลูโลส จากผลการทดสอบ XRD (Crystallinity Index; CPI_{XRD}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1); [9]

$$CPI_{XRD}(\%) = (I_{002} - I_{001}) / I_{002} \times 100 \quad (1)$$

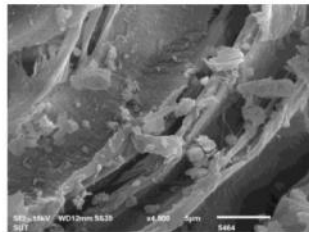
โดยที่ I_{002} คือ จุดสูงสุดของความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสี X ที่ 2θ จากผลการทดสอบนี้มีค่า 22.8 องศา และเมื่อพิจารณา I_{001} คือ จุดที่มีความเข้มของการเลี้ยวเบนที่ถูกกำหนดที่ 18 องศา [9] จากการคำนวณได้ค่าดัชนีความเป็นผลึกจากผลทดสอบ XRD ประมาณ 39.5%

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในแกนเฮมพ์ ที่ส่วนหนึ่งมีความเป็นผลึก (Crystallinity) และยังมีส่วนที่มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในส่วนของ เฮมิเซลลูโลสและ ลิกนิน จะอยู่ในอสัณฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] บ่งชี้ว่าแกนเฮมพ์มีองค์ประกอบที่ไม่ปิดกั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์รวมอยู่ด้วย

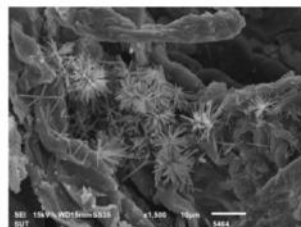
3.2 กำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต



ภาพที่ 5 กำลังอัดและอายุการบ่มของเฮมพ์คอนกรีต



ก)



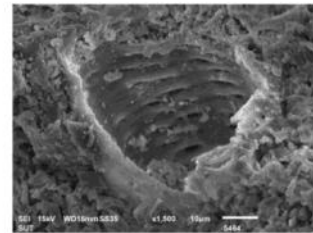
ข)

ภาพที่ 6 ภาพขยายแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค SEM

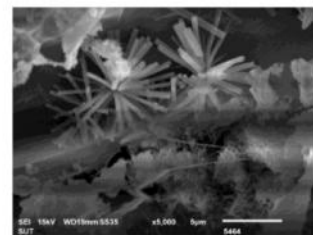
ก) HCC ข) HC3 ที่อายุ 7 วัน

จากผลการทดสอบค่ากำลังอัด ที่ อายุ 28 วัน ของเฮมพ์คอนกรีตควบคุม (HCC) ที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดต่ำมาก โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 40 กก./ตร.ซม. ส่วน HC1 ถึง HC5 ที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ที่มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่าง 160 ถึง 180 กก./ตร.ซม. ดังแสดงในภาพ ที่ 5

การพัฒนากำลังอัดจาก 7 ถึง 56 วันของ HCC ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ HC1 ถึง HC5 ที่มีการพัฒนากำลังอัดมากกว่า HCC ถึง 4 เท่า จากภาพขยายโดย SEM พบว่าจาก 7 ถึง 28 วัน HCC ไม่พบ Ettringite [ภาพที่ 6 ก) และ ข)] ต่างจาก HC1 ถึง HC5 ที่พบ Ettringite ค่อนข้างมากทั้งใน โซลิม เรย์ และเวสเซล [ภาพที่ 7 ก) และ ข)]



ก)



ข)

ภาพที่ 7 ภาพขยายแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค SEM

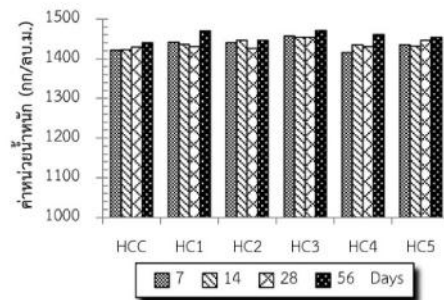
ก) HCC ข) HC3 ที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ โดยวิธี Detergent analysis และผลวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD รวมทั้งภาพถ่าย SEM สามารถอธิบายได้ว่าส่วนประกอบหลักในโครงสร้างของแกนเฮมพ์ มีเซลลูโลสที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ซึ่งสามารถทำให้หน่วงการก่อตัว อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ [12, 13] หากใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ มาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต (HCC) โดยสังเกตจากการพัฒนากำลังอัดในภาพที่ 5 และข้อมูลเพิ่มเติมในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัว	ระยะเวลาการก่อตัว
	ขั้นต้น (นาทีก)	ขั้นสุดท้าย (นาทีก)
HCC	510	1800
HC3	170	490

จากตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่างเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HCC) ในส่วนผสม ส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวชัดเจน โดยมีระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น 510 นาที (8 ชั่วโมง 30 นาที) และใช้ระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายนานถึง 1800 นาที (30 ชั่วโมง) ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างที่ใช้แกนเฮมพ์ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HC3) อย่างชัดเจน

3.3 หน่วยน้ำหนักของเฮมพ์คอนกรีต

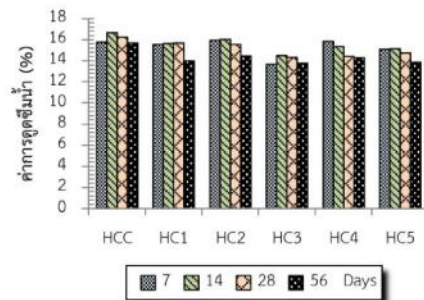
ภาพที่ 8 หน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มของเฮมพ์คอนกรีต

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเฮมพ์คอนกรีต พบว่าทั้งหมดมีค่าหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 1400 ถึง 1500 กก./ลบ.ม. เนื่องจากใช้ปริมาณแกนเฮมพ์เท่ากัน และหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุ 56 วัน ดังแสดงในภาพที่ 8 อย่างไรก็ตาม ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าไม่คงที่ตามอายุการบ่มและการแปรผันปริมาณสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากการกระจายตัวของแกนเฮมพ์ไม่สม่ำเสมอ

ตัวอย่างการกระจายตัวของเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต (โดยการตัดแต่ง) แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการกระจายตัวของเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต

3.4 ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต

ภาพที่ 10 ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต

ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต พบว่าทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าหน่วยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยมีค่าการดูดซึมน้ำ ประมาณ 14.5 ถึง 16.5% ที่อายุ 28 วัน และมีค่าลดลงเมื่ออายุ 56 วัน

4. สรุปผลการศึกษา

การปรับปรุงคุณภาพแกนเซมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น มากกว่าเซมพ์คอนกรีตที่ไม่ผ่านการควบคุมคุณภาพถึง 4 เท่า แต่สัดส่วนของ $Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2$ มีผลต่อค่ากำลังอัดไม่มาก

เซมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเซมพ์ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 160 ถึง 180 กก./ตร.ซม. หน่วงน้ำหนัก 1400 ถึง 1500 กก./ลบ.ม. และค่าการดูดซึมน้ำ 14.5 ถึง 16.5% ที่อายุ 28 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

ในด้าน การส่งเสริมองค์ความรู้ และห้องปฏิบัติการทดสอบต่างๆ สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ในความอนุเคราะห์แกนเซมพ์ และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย คุณกฤติพงศ์ โบสถ์จะโปะ คุณจักรกฤษณ์ ธนะเมณีวุฒิ และชาวคณะฯ ผู้ช่วยวิจัยอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

คุณแพรวพรรณ เครื่องมังกร นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครราชสีมา ในข้อมูลการวิเคราะห์ Detergent method

คุณเกวลี พร้อมพิพัฒน์พร (SEM), คุณยุธิกา สร้อยระย้า (XRD), คุณนุชรี เวชวิทย์กุล (TGA) และคุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ (XRF) นักวิทยาศาสตร์ ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการวิเคราะห์และแนะนำแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), กันยายน 2553. โครงการจัดทำยุทธศาสตร์การพัฒนาเซมพ์ (แผนปฏิบัติการพัฒนาเซมพ์บนพื้นที่สูงภาคเหนือ ระยะ 5 ปี พ.ศ. 2553-2557).
- [2] ธงชัย พุ่มพวง, 31 สิงหาคม 2558. เซมพ์ พืชเส้นใยธรรมชาติ ส่งเสริมการปลูก มุ่งสู่เชิงพาณิชย์. มติชน เทคโนโลยีชาวบ้าน.

- [3] Valerie L. Vantreese, July 1998. Industrial Hemp Global Operations. Local Implications Department of Agricultural Economics University of Kentucky.
- [4] americanlimetechnology, What is Hempcrete. <http://www.americanlimetechnology.com/what-is-hempcrete/>
- [5] ดร.วันดี ธรรมจารี, April-May 2013. วัสดุผสมชีวภาพ (biocomposites). Bio & Nano, Vol.40 No.228. www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownload5/tn228B_p034-37.pdf
- [6] Dave Burkey, 30 March 2016. Some Interesting Facts About Hempcrete As a Building Material. National Hemp Association (NHF).
- [7] Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite-Lukosiune, Sigita Vejelis, Aleksandrs Korjajins, 2015. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. Industrial Crops and Products, 77 : 724-734.
- [8] Herman E. Hayward, 1938. The Structure of Economic Plants, Chapter VIII, MORACEAE, CANNARIS SATIVA, The University of Chicago, p.214-245.
- [9] Dasong Dai, Mizi Fan, 2010. Characteristic and Performance of Elementary Hemp Fibre. Materials Sciences and Applications, Scientific Research, 1 : p.336-342.
- [10] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, Jr. and C.M. Conrad, October 1959. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. Textile Research Journal, p.336-342.
- [11] ราชกิจจานุเบกษา, 6 มกราคม 2560. กฎกระทรวง การขออนุญาต และการอนุญาตผลิต จำหน่าย นำเข้า ส่งออก หรือมีไว้ในครอบครอง ซึ่งยาเสพติดให้โทษในประเภท 4 หรือในประเภท 5 พ.ศ. 2559.
- [12] Diana Ciolacu, Florin Ciolacu and Valentin I. Popa, July 2010. Amorphous Cellulose – Structure and Characterization. Cellulose Chemistry and Technology, 45 (1-2), 13-21 (2011)
- [13] H. V. Lee, S. B. A. Hamid, and S. K. Zain, Conversion of Lignocellulosic Biomass to Nanocellulose: Structure and Chemical Process, Nanotechnology & Catalysis Research Centre (NANOCAT), 3rd Floor, Block A, Institute of Postgraduate Studies (IPS), University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia.

การพัฒนาเฮมพ์คอนกรีต (คอนกรีตผสมแกนกัญชง)

Development of hemp concrete

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹, ธีรวินทร์ ลินศิริ², ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³, ปริญา จินดาประเสริฐ⁴

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี saksit.pantawee@gmail.com

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sinsiri@sut.ac.th

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี choijot@kmutt.ac.th

⁴ ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮมพ์มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต แกนเฮมพ์จะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย อลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อผลิตเป็นเฮมพ์คอนกรีต จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ เพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น โดยมากกว่าเฮมพ์คอนกรีตควบคุมที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า

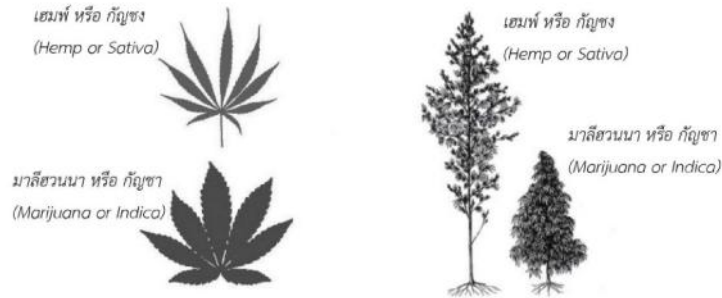
คำสำคัญ: แกนเฮมพ์; เฮมพ์คอนกรีต; อลูมิเนียมซัลเฟต; แคลเซียมไฮดรอกไซด์; กำลังอัด

Abstract : This research presents the potential of hemp shiv for use as coarse aggregate in concrete. Hemp shiv was mineralized with aluminium sulfate $Al_2(SO_4)_3$ and calcium hydroxide $Ca(OH)_2$ before being used as a coarse aggregate to produce hemp concrete. The results indicated that the application of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ for mineralization increased the compressive strength of hemp concrete by four times compared to that with non-mineralized hemp shiv.

Keywords: Hemp shiv; Hemp concrete; Aluminium sulfate; Calcium hydroxide; Compressive strength

1. บทนำ

เฮมพ์ (Hemp) หรือ “กัญชง” มีลักษณะใบและลำต้นใกล้เคียงกับกัญชามาก (ภาพที่ 1) ทำให้การแยกแยะด้วยสายตาต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ ทางพฤกษศาสตร์ เฮมพ์ มีชื่อเรียกว่า *Cannabis sativa L. subsp. sativa* ส่วนกัญชา (Marijuana) มีชื่อว่า *Cannabis sativa L. subsp. Indica* พืชทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบของสารกลุ่ม cannabinoids ที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท ได้แก่ Tetrahydrocannabinol (THC) ออกฤทธิ์กระตุ้นประสาท ทำให้มีอาการตื่นเต้น ช่างพูด หัวเราะ และยังมีสาร Cannabidiol (CBD) ออกฤทธิ์ยับยั้งฤทธิ์ที่ทำให้เกิดอาการกระวนกระวาย (anxiety effect) ในกัญชามีสาร THC ประมาณ 5 ถึง 15% และมีปริมาณ THC สูงกว่า CBD ในขณะที่เฮมพ์มีปริมาณ THC เพียงประมาณ 0 ถึง 1.0% และมีสัดส่วน CBD:THC มากกว่า 2:1 [1] ในปัจจุบันมีการปลูกเฮมพ์เพื่อใช้งานอุตสาหกรรมต่างๆ ในหลายประเทศ เช่น ประเทศจีน และหลายประเทศในทวีปยุโรป (รัสเซีย ฝรั่งเศส ยูเครน อังฤษ เยอรมัน โปแลนด์ และ ฟินแลนด์) รวมทั้งประเทศแคนาดา เป็นต้น [2].



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะใบและลำต้นของเฮมพ์และกัญชา [3]

ในประเทศไทยการปลูกและใช้เส้นใยจากเฮมพ์ยังอยู่ในวงจำกัดเฉพาะชาวไทยภูเขาเผ่าม้ง เนื่องจากคณะกรรมการควบคุมยาเสพติดให้โทษ กำหนดให้เฮมพ์เป็นพืชเสพติดประเภท 5 ตามพระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 แต่ต่อมาในปีพุทธศักราช 2547 สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์พระบรมราชินีนาถ มีพระราชประสงค์ให้มีการศึกษาและส่งเสริมเกษตรกรชาวไทยภูเขาปลูกเฮมพ์ เพื่อใช้ในครัวเรือนและจำหน่ายสู่ตลาด รวมทั้งเป็นการส่งเสริมอาชีพและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร [1] ขณะเดียวกันได้มีการศึกษาและวิจัยโดยมูลนิธิโครงการหลวง สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) จนสามารถปลูก พัฒนา และคัดเลือกสายพันธุ์เฮมพ์ให้มีสารเสพติดต่ำและสามารถขึ้นทะเบียนรับรองสายพันธุ์ได้

ภายหลังได้มีกฎกระทรวง ที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 6 มกราคม 2560 เรื่อง การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต จำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครองเฮมพ์นั้น ต้องเป็นไปตามกฎกระทรวงที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ที่ระบุให้ “เมล็ดพันธุ์รับรอง” มีปริมาณ THC ได้น้อยกว่า 1.0% ของน้ำหนักแห้ง และมีหลักเกณฑ์การตรวจวิเคราะห์ตามที่กำหนด ทั้งนี้ ตามที่คณะกรรมการประกาศกำหนด โดยการตรวจวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ และเป็นพันธุ์พืชที่ขึ้นทะเบียนตามกฎหมายว่าด้วยพันธุ์พืช ซึ่งผลิตโดยผู้รับอนุญาตผลิตยาเสพติดให้โทษในประเภท 5 เฉพาะเฮมพ์ [4]

เฮมพ์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน เช่น เมล็ด เปลือก และแกนของลำต้น ผลผลิตที่เป็นเมล็ดสามารถนำไปทำเป็นโปรตีนผง แชมพู เครื่องสำอาง สบู่ โปรตีนเฮมพ์ น้ำมันเฮมพ์ ไอศกรีมเฮมพ์ น้ำมันหอมระเหย ขนم และเค้กเฮมพ์ ในส่วนผลผลิตจากเส้นใยเฮมพ์ในการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งจะได้ปริมาณเส้นใยประมาณ 20 ถึง 30% [5] (ภาพที่ 2 (ก)) สามารถนำไปทำเป็นเสื้อผ้า หมวก ผ้าเช็ดตัว กระเป๋า รองเท้า วัสดุทดแทนสิ่งทอ เสื่อเกราะกันกระสุน เป็นต้น และสำหรับผลผลิตในส่วนที่เป็นลำต้นหรือแกนเฮมพ์ (ภาพที่ 2 (ข)) สามารถทำเป็นกระดาษหรือบอร์ด กระเป๋าเดินทาง ซองใส่แผ่นซีดี กระดาษ คอนโซลรถยนต์ เฮมพ์กรีต ฉนวนกันความร้อน และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เนื่องจากลำต้นหรือแกนเฮมพ์ มีความแข็งแรง มีรูพรุนภายในที่สามารถระบายอากาศได้ดี และมีน้ำหนักเบา [6]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 ผลผลิตจากเฮมพ์ (Hemp shiv) ; (ก) เส้นใยเฮมพ์ (ข) แกนเฮมพ์ที่ผ่านการย่อย

ในการเก็บเกี่ยวเฮมพ์ จะมีปริมาณแกนเฮมพ์ (Hemp shiv) ประมาณ 70 ถึง 80% ของผลผลิต [5] ในต่างประเทศมีการนำแกนเฮมพ์มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวาง โดยนำแกนเฮมพ์มาผสมรวมกับปูนขาว เรียกว่า เฮมพ์กรีต (Hempcrete) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในประเทศฝรั่งเศส ในช่วงต้นคริสต์ศักราช 1990 [7] เฮมพ์กรีตสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้หลายประเภท เช่น ผนัง พื้น และหลังคา โดยใช้วิธีการอัดเข้าแบบหล่อ หล่อเป็นบล็อก หรือโดยการฉีดยก โดยทั่วไปผนังเฮมพ์กรีตจะถูกฉาบทั้งสองด้าน แต่บางครั้งอาจมีการใช้งานในรูปแบบผนังเปลือย (Bare wall) ภายในตัวอาคาร [8] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเฮมพ์กรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ค่อนข้างต่ำ เพียงประมาณ 10 กก./ตร.ซม. จึงนิยมใช้ในงานผนังแบบไม่รับน้ำหนัก [7]

ในการนำวัสดุผสมชีวภาพมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบางอย่างเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ดีขึ้นและเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากวัสดุเหล่านี้จะมีองค์ประกอบของ เซลลูโลส (Celluloses) ลิกนิน (Lignin) และเพกติน (Pectin) รวมทั้งเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การยึดเกาะไม่ดี เนื่องจากวัสดุชีวภาพดูดซับความชื้นไว้ และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมให้ลดลงไปด้วย [9] โดยอาจใช้สารเคมีได้หลากหลายชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) [10,11,12] แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) [13] หรือ อลูมิเนียมซัลเฟต (Al₂(SO₄)₃) [13,14] เป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะช่วยปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุชีวภาพให้ดีขึ้น และเมื่อนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้นตามไปด้วย

เนื่องจากเฮมพ์คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุผสมชีวภาพที่ทำจากปูนขาวและแกนเฮมพ์ จึงอาจจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยเลือกใช้ อลูมิเนียมซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานก่อสร้างได้จริง และเป็นการรองรับการปลูกเฮมพ์ในอนาคต

2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) แกนเฮมพ์จากศูนย์วิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (The Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI)) มีความถ่วงจำเพาะ 0.6 และความหนาแน่นเหมารวม (แบบแห้ง) 120 กก./ลบ.ม. โดยทำการร่อนผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว และใช้ส่วนที่ค้ำเบอร์ 4 (35%) และส่วนที่ค้ำเบอร์ 8 (65%) ขนาดคละของแกนเฮมพ์และทราย แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดคละของแกนเฮมพ์และทราย (สภาวะแห้งในอากาศ)

Individual size fraction	Hemp shiv, %	Sand, %
9.50 mm (3/8 in.) to 4.75 mm (No. 4)	35	-
3.75 mm (No. 4) to 2.36 mm (No. 8)	65	-
2.36 mm (No. 8) to 1.18 mm (No. 16)	-	14
1.18 mm (No. 16) to 600 μ m (No. 30)	-	41
600 μ m (No. 30) to Pan	-	45
Total	100	100

2) อลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ (pH = 3.15) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ (purity of $Ca(OH)_2$ of 90.2% (ASTM C 25); 3.60% retained on 170 mesh and 8.80% retained on 325 mesh (ASTM C 110), moisture content of 0.33%) ในการปรับปรุงคุณภาพ

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Blaine surface area of $348 \text{ m}^2/\text{kg}$) Conformed to the Thai Industrial Standard for Portland cement type I TIS 15-2012, ASTM C 150 Type I and the British Standard B.S.12 (for Ordinary Portland cement)

4) น้ำสะอาด

5) สารลดน้ำจำนวนมาก

2.2 สัดส่วนผสม

ใช้อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$; pH = 3 ถึง 5) ในการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ก่อนที่จะปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$; pH = 11 ถึง 12) [13,14] และใช้น้ำสำหรับกระบวนการเตรียมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 1.5 เท่าโดยน้ำหนักของแกนเฮมพ์ (HS)

ในการศึกษานี้เป็นการปรับปรุงสัดส่วนผสม [14] โดยใช้อัตราส่วนเฮมพ์ต่อซีเมนต์ (HS/C) = 0.16

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย (C/S) = 1:2

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) = 0.48

และใช้สารลดน้ำจำนวนมาก (SP) 1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

(แสดงไว้ในตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมโดยใช้ปริมาณสารประกอบต่างกัน

Mix	HS (kg/m ³)	HS/C	W/C	C/S	SP (%)	Water for mineralization	Complex mineralizer (% HS mass)	Al ₂ (SO ₄) ₃ (%) HS mass	Ca(OH) ₂ (%) HS mass
HCC	87	0.16	0.48	1:2	1	1.5xHS mass	0	0	0
HC0							18	18	0
HC1							30	10	20
HC2							45	15	30
HC3							54	18	36
HC4							63	21	42
HC5							81	27	54

2.3 การเตรียมตัวอย่าง

ทำการเตรียมสารละลายยอลูมิเนียมซัลเฟต โดยใช้ น้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักแกนเฮมพ์ จากนั้นนำไปผสมกับแกนเฮมพ์ในภาชนะ 3 นาที ที่ 15 นาที หลังจากนั้นนำ Ca(OH)₂ เทลงไป คลุกเคล้าให้เข้ากันภายในเวลา 90 วินาที ทันทีที่ขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์เสร็จสิ้นลง ให้เริ่มเทน้ำผสมสารลดน้ำจำนวนมาก ใส่ลงในไม้ที่มีการเตรียมปูนซีเมนต์ไว้แล้ว ปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไปในปูนซีเมนต์ 90 วินาที จึงเริ่มเปิดไม้ ระหว่างนั้นค่อยๆ เททรายลงไปจนได้เนื้อออร์ตาร์ที่ดี แล้วจึงทยอยเทแกนเฮมพ์ลงในไม้ ผสมให้เสร็จภายในเวลา 3 นาที จากนั้นเทลงแบบหล่อต่างๆ เพื่อทำการทดสอบต่อไป

2.4 การทดสอบ

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแกนเฮมพ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM-6010LV scanning electron microscope (SEM) และทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเฮมพ์ โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายแสง X-ray Fluorescence XGT-5200 (ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกรายงานตามมาตรฐานของสารประกอบออกไซด์ 100%)

วิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินโดยใช้วิธี Detergent fibre analysis (acid detergent fibre (ADF), neutral detergent fibre (NDF), acid detergent lignin (ADL), cellulose and hemicellulose based on Georing and Van Soest (1970), Van Soest (1991) and AOAC (2000))

การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction (XRD) analysis) ใช้ Bruce: D2 PHASER X-ray Diffractometer เพื่อตรวจสอบความเป็นผลึกของแกนเฮมพ์ การตรวจสอบได้ดำเนินการในช่วง 2θ ที่ 5 ถึง 80° ทำการคำนวณดัชนีความเป็นผลึกโดยเทคนิค XRD ($C_r I_{XRD}$) ของเซลลูโลส โดยใช้ Segal empirical method [15] ดังสมการ

$$C_r I_{XRD} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

C, I_{XRD} คือ ค่าดัชนีความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

I_{002} คือ ความเข้มสูงสุดของการกระจายตัวของรังสีที่ตำแหน่ง 002 ที่ $2\theta = 22.5^\circ$

I_{am} คือ ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสี ที่ $2\theta = 18^\circ$

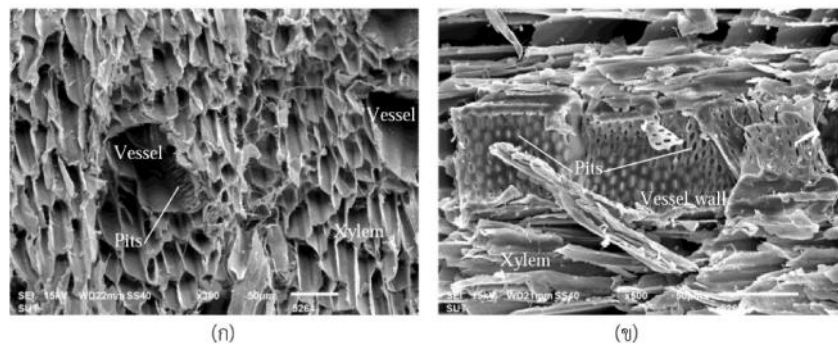
ตัวอย่างสำหรับการทดสอบระยะเวลาการก่อดำใช้ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ลบ.ซม. โดยควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ตรวจสอบค่าการก่อดำเริ่มต้นและขั้นสุดท้ายเมื่อความต้านทานการจมตัวของเข็ม เท่ากับ 500 และ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ (ตามมาตราฐาน ASTM C 403/C 403M) แต่ในการศึกษานี้ แกนเซมท์จะไม่ถูกร้อนออกโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 4 ตามที่มาตรฐานกำหนด โดยทำการตั้งสมมุติฐานว่าแกนเซมท์มีขนาดเล็กและมีความอ่อนกว่าหินที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป

ใช้ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลบ.ซม. (ตามมาตราฐาน EN 12390-3) ตัวอย่างทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นทรงกระบอกขนาด 5×10 ซม. (ตามมาตราฐาน ASTM C 642-97) ทำการถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง (ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้แกนเซมท์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จะใช้ระยะเวลาในการถอดแบบ 48 ชั่วโมง) บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ ทำการทดสอบเมื่ออายุครบ 7 14 28 และ 56 วัน

3. ผลทดสอบและการอภิปรายผลทดสอบ

3.1. โครงสร้างจุลภาคของแกนเซมท์

ในภาพที่ 3 แสดงภาพถ่ายของแกนเซมท์ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ แกนเซมท์มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน กลวงยาว (โดยจะมีรูพรุนที่เป็นของ ไชเลม เรย์ (Xylem ray) เรียงติดกัน และมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าที่เรียกว่า เวสเซล (Vessel); [14,16,17]) ไชเลมเรย์มีความกว้างประมาณ 20 ถึง 50 ไมครอน ส่วนเวสเซลมีความกว้างประมาณ 50 ถึง 80 ไมครอน



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายแกนเซมท์ ด้วยเทคนิค SEM; (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ภาคตัดตามยาว

จากภาพที่ 3 (ก) และ (ข) ผงของเวสเซลมีรูพรุนขนาดเล็กลักษณะเป็นวงรีเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอขนานไปในทิศทางการเจริญเติบโตของเฮมพ์ โดยมีความยาวเฉลี่ยของแกนหลักประมาณ 5 ไมครอน ส่วนแกนรองยาวประมาณ 3 ไมครอน

3.2. ปริมาณสารประกอบของแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

จากตารางที่ 3 พบว่าแกนเฮมพ์ก่อนการปรับปรุงคุณภาพ (HS) มีปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ที่สูง แต่เมื่อนำแกนเฮมพ์แช่น้ำ (Al_0) เป็นเวลา 15 นาที ทำการล้างด้วยน้ำเปล่า 3 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีปริมาณ K_2O บางส่วนถูกชะละลายปนออกมากับน้ำได้ และเมื่อทำการทดสอบวิธีเดียวกับ Al_0 แต่ทำการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ในปริมาณต่างๆ พบว่ามีการลดลงอย่างมากของปริมาณ K_2O ดังนั้นผลการทดสอบยังยืนยันได้ว่า K_2O ในองค์ประกอบทางเคมีของแกนเฮมพ์ ถูกชะล้างออกด้วยน้ำได้บางส่วน ยิ่งไปกว่านั้นการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์โดยใช้ $Al_2(SO_4)_3$ แล้วล้างออกด้วยน้ำ สามารถชะล้างโพแทสเซียมออกไซด์ออกได้เกือบทั้งหมด

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของแกนเฮมพ์ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วย $Al_2(SO_4)_3$

Hemp shiv	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO	CuO
HS	-	20.24	16.44	7.30	37.15	14.88	3.54	-	0.14	-	-
Al_0	1.42	14.94	8.27	5.22	22.53	34.12	1.01	2.44	9.13	0.62	0.32
Al_{10}	19.94	28.36	17.57	12.16	1.12	14.00	1.29	0.80	4.49	0.18	0.12
Al_{15}	19.28	29.08	14.83	15.00	0.96	14.41	1.43	0.47	4.37	0.09	0.10
Al_{18}	19.48	30.24	15.89	15.23	0.88	12.10	1.20	0.62	4.16	0.13	0.08
Al_{21}	19.21	29.88	14.44	16.86	0.81	11.23	1.35	0.77	5.16	0.17	0.12
Al_{27}	18.36	30.64	13.26	19.49	0.89	10.74	1.21	0.61	4.59	0.15	0.08

HS –the raw hemp shiv; Al_0 – the hemp shiv test sample was saturated by an amount of water 1.5x that of the hemp shiv mass; Al_{10} to Al_{27} –the shiv was treated using 10, 15, 18, 21 and 27% of $Al_2(SO_4)_3$

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้ใช้แกนเฮมพ์ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย $Al_2(SO_4)_3$ และไม่ได้ล้างออกด้วยน้ำ แต่จะทำการผสมกับมอร์ตาร์ทันทีหลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้น K_2O เพียงแค่ถูกชะออกมาที่ผิวและกระจายอยู่ในโครงสร้างของแกนเฮมพ์เท่านั้น เพื่อที่ทำการปฏิกิริยากับออกไซด์อื่นๆ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ หรือทำปฏิกิริยากับ $Al_2(SO_4)_3$ ซึ่งถูกเพิ่มเข้าไประหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งสามารถทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เช่น ซินจิวไนท์ (syngenite; $K_2Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$) [18,19] และ จอร์จีไยท์ (gorgeyite; $K_2SO_4 \cdot 5CaSO_4 \cdot H_2O$) [19] โดยจะเกิดกระบวนการตกผลึกและสามารถเร่งการก่อตัวได้ [18,20]

3.3. ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของแกนเฮมพ์

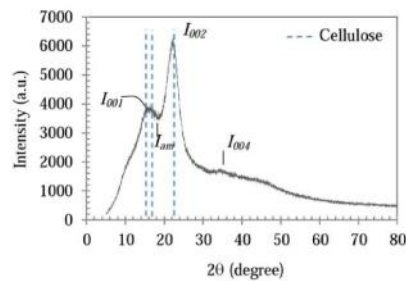
แกนเฮมพ์มีเซลลูโลสประมาณ 69% เฮมิเซลลูโลส 14% และลิกนิน 11% โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี detergent analysis พบว่าการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ส่งผลให้สัดส่วนของลิกนินเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของแกนเฮมพ์

	Dry matter	ADF	NDF	Lignin	Cellulose	Hemicellulose
HS	95.45	80.37	94.57	11.35	69.02	14.20
Al ₀	93.79	83.04	96.31	21.92	61.12	13.27
Al ₁₀	94.26	86.78	99.24	20.92	65.86	12.46
Al ₁₅	93.90	84.97	98.96	23.83	61.14	13.99
Al ₁₈	93.79	83.49	98.12	24.50	58.99	14.63
Al ₂₁	93.10	88.97	99.65	26.20	62.77	10.68
Al ₂₇	93.88	84.11	99.42	21.27	62.84	15.31

3.4. ดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสของแกนเฮมพ์

จากกราฟการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (แสดงในภาพที่ 4) พบว่า จุดยอดของกราฟตำแหน่ง I_{001} อยู่ระหว่าง $2\theta = 15.0^\circ$ และ $2\theta = 16.5^\circ$ และจุดยอดของกราฟตำแหน่งสูงสุด (I_{002}) ปรากฏที่ $2\theta = 22.5^\circ$ จุดยอดเหล่านี้สามารถบ่งบอกถึงความเป็นผลึกของเซลลูโลสได้



ภาพที่ 4 X-ray diffractogram of hemp shiv

จากสมการที่ (1) พบว่าดัชนีความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค XRD; C_{XRD} มีค่าประมาณ 49% และเมื่อลองทำการคำนวณหาปริมาณเซลลูโลสโดยใช้ [21] ตามสมการที่ (2);

$$\%C_{XRD} = [I_{002} / (I_{002} + I_{001})] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ $\%C_{r,XRD}$ คือ ปริมาณเซลลูโลสโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction จากการคำนวณพบว่าปริมาณเซลลูโลสอยู่ที่ประมาณ 67% ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเซลลูโลส 69% โดยการวิเคราะห์ด้วย Detergent method ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณเซลลูโลสในแกนเฮมพ์มีทั้งอยู่ในรูปของผลึก (crystallinity) และไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [21,22,23] ที่พบว่าโครงสร้างของเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาตินั้นจะอยู่ในรูปของผลึกและอสัณฐาน ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะเป็นเพียงอสัณฐาน ดังนั้นแกนเฮมพ์จึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ ได้ [22] และบ่งชี้ว่าแกนเฮมพ์มีองค์ประกอบที่ไม่ปิดกั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์รวมอยู่ด้วย

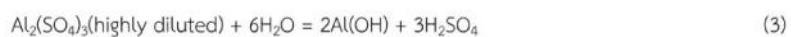
3.5. ผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์โดยใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ต่อการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต

ตารางที่ 5 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต จะเห็นได้ว่าเฮมพ์คอนกรีตควบคุม (HCC) ใช้เวลาการก่อตัวนานมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างเฮมพ์คอนกรีตอื่นๆ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย $Al_2(SO_4)_3$ โดยที่ HCC มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 645 นาที (ประมาณ 11 ชั่วโมง) และใช้เวลาการก่อตัวขั้นสุดท้าย 2155 นาที (ประมาณ 36 ชั่วโมง) ดังนั้นหากนำแกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาใช้ในการผลิตเฮมพ์คอนกรีตจะส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ เนื่องจากสารประกอบบางอย่างที่สามารถละลายน้ำได้ของแกนเฮมพ์

ตารางที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต

	HCC	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5
Initial setting Time, min	645	260	360	380	320	305	230
Final setting Time, min	2155	525	830	870	620	640	520
Slump, cm	4.5	4	5	11	12	4	3

เมื่อพิจารณาสมการเคมีของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต ตามสมการที่ (3):



และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ [24] จะอยู่ในรูปของสารละลายที่สามารถชะออกสู่พื้นผิวและกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของแกนเฮมพ์ได้ (สมการที่ 4)



โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับกรดซิลิฟริกได้ ตามสมการที่ (5) และ (6)



หรือ



ดังนั้น โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และ/หรือ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดังสมการที่ (7) และ (8) [18, 20] :

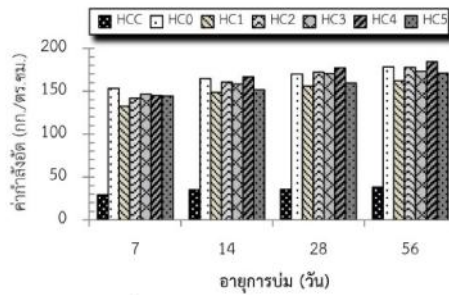


โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้ระบุว่า K_2SO_4 สามารถเร่งระยะเวลาการก่อตัวของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ได้ [18] สำหรับในการศึกษานี้พบว่าแกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์โดยใช้ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ในส่วนผสมของ HC1 ถึง HC5 สามารถปรับปรุงระยะเวลาการก่อตัวให้ดีขึ้น ส่วนในกรณีของตัวอย่างทดสอบ HCO [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 18:0] เมื่อเปรียบเทียบกับ HC3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 18:36] บ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวได้

นอกจากนี้ปริมาณที่เหมาะสมของ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ยังช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ (workability) ของเฮมพ์คอนกรีตโดยสังเกตจาก HC1 ถึง HC3 ที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกรณีของ HC4 และ HC5 ที่มีการเพิ่ม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวลดลงเนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่มีพื้นที่ผิวสูง

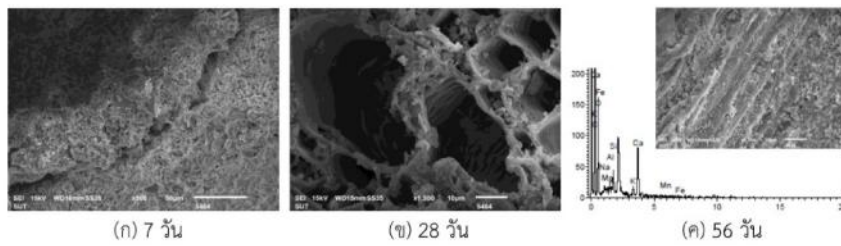
3.6. ค่ากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต

จากกราฟการพัฒนา กำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต ดังภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HC1 ถึง HC5) มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 150 ถึง 180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่เฮมพ์คอนกรีตควบคุม (HCC) มีกำลังอัดเพียงประมาณ 30 ถึง 40 กก./ตร.ซม. ดังนั้นการใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในส่วนผสมส่งผลให้ค่ากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และการใช้เฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพยังส่งผลต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเฮมพ์คอนกรีตควบคุมที่มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุการบ่มจาก 7 ถึง 56 วัน ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยของ HC1 จนถึง HC5 สูงกว่า HCC ถึง 4 เท่า

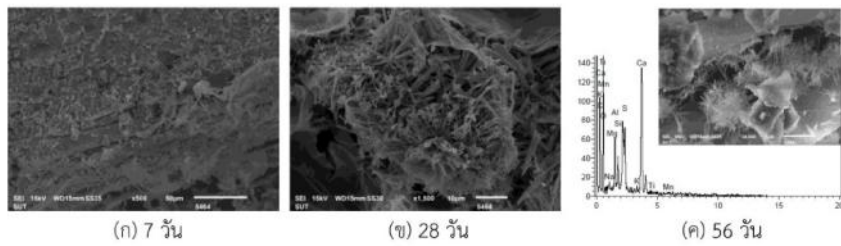


ภาพที่ 5 กำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต

และเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4) และดัชนีความเป็นผลึก โดยเทคนิค XRD (ภาพที่ 4) สามารถอธิบายได้ว่าองค์ประกอบหลักของโครงสร้างของแกนเฮมพ์ คือ เซลลูโลส ที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งสามารถหน่วงการแข็งตัวและยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [25, 26]



ภาพที่ 6 ภาพขยายของ HCC



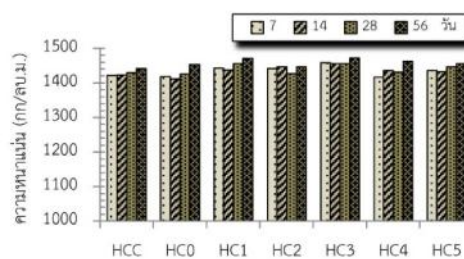
ภาพที่ 7 ภาพขยายของ HC3

จากผลทดสอบ SEM ของเอมพ์คอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 56 วัน แสดงในภาพ 6 และ 7 พบว่า HCC ไม่พบเอททรินใจท์ (Ettringite) เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต (ภาพที่ 6 (ก) และ (ข)) ในทางตรงกันข้าม HC3 มีผลึกของเอททรินใจท์ เกิดขึ้นทั้งในไซเลมเรย์และเวสเซล (ภาพที่ 7 (ก) และ (ข)) นอกจากนี้บนผนังของไซเลมเรย์และเวสเซลของแกนเอมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีการสร้างผลึกเอททรินใจท์ขึ้น (ภาพที่ 7 (ค)) แต่จะไม่เกิดขึ้นกับแกนเอมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (ภาพที่ 6 (ค)) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ในการปรับปรุงคุณภาพแกนเอมพ์ก่อนใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยการสร้างเอททรินใจท์ขึ้นในช่องว่างภายในอนุภาคของแกนเอมพ์ ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพที่อยู่ในรูปของ ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) สามารถควบคุมการปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นได้ โดยป้องกันการเกิดแฟลชเซ็ท (Flash set) และช่วยปรับปรุงการพัฒนากำลังอัดได้ [23] ดังนั้นจากการศึกษานี้ยิปซัมที่ได้จากการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ในการปรับปรุงคุณภาพแกนเอมพ์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตในส่วนผสมเพื่อสร้างเอททรินใจท์ และเติมเต็มช่องว่างภายในอนุภาคของแกนเอมพ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของแกนเอมพ์ นอกจากนี้ syngenite ($K_2Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของยิปซัมให้เพิ่มขึ้น [18] ดังนั้นความแข็งแรงของ HC1 ถึง HC5 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับ HCC

ในกรณีของตัวอย่างทดสอบ HC0 ($Al_2(SO_4)_3 : Ca(OH)_2 = 18:0$) พบว่ายิปซัมที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและสารประกอบซัลเฟตอื่นๆ ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตที่อยู่ในปูนซีเมนต์เพื่อสร้างเอททรินใจท์ได้โดยไม่ต้องเพิ่ม $Ca(OH)_2$ ในส่วนผสม โดยที่ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันของ HC0 สูงกว่าเอมพ์คอนกรีตที่ใช้ $Ca(OH)_2$ ในส่วนผสม แต่อัตราการพัฒนากำลังอัดจะลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ HC1 ถึง HC5 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดได้เล็กน้อย

3.7. ความหนาแน่นของเอมพ์คอนกรีต



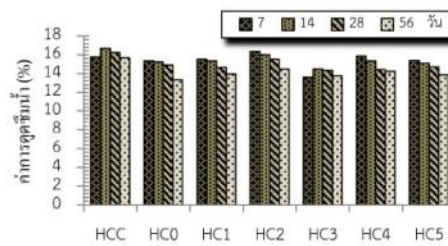
ภาพที่ 8 ความหนาแน่นของเอมพ์คอนกรีต

จากผลการทดสอบในภาพที่ 8 พบว่าความหนาแน่นของเฮมพ์คอนกรีตและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 1420 ถึง 1470 กก./ลบ.ม ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตแตกต่างกันเล็กน้อยตามปริมาณของ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ และสรุปได้ว่าเมื่อใช้แกนเฮมพ์แทนมวลรวมหยาบในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเฮมพ์มีความหนาแน่นเพียงประมาณ 120 กก./ลบ.ม. (ตัวอย่างการกระจายตัวของแกนเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต (โดยการตัดแต่ง แสดงในภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 การกระจายตัวของแกนเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต

3.8. ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต



ภาพที่ 10 ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต

ค่าการดูดซึมน้ำของแอมท์คอนกรีตอยู่ระหว่าง 14.5 ถึง 16.5% ดังแสดงในภาพที่ 10 และพบว่าทั้งแอมท์คอนกรีตที่ใช้แกนแอมท์ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มมากขึ้น แต่การลดลงของค่าการดูดซึมน้ำไม่ค่อยคงที่เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของแกนแอมท์ในเนื้อคอนกรีต

4. สรุป

การใช้แกนแอมท์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ แทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมแอมท์คอนกรีตส่งผลให้ค่ากำลังอัดมากกว่าแอมท์คอนกรีตที่ใช้แกนแอมท์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า แต่การใช้ปริมาณ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ในปริมาณที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของแอมท์คอนกรีตไม่มากนัก

เห็นได้ชัดว่าแกนแอมท์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเกิดการหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต

การใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ในการปรับปรุงคุณภาพช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของวัสดุคอมโพสิตให้ดีขึ้น และปริมาณที่เหมาะสมของ $Al_2(SO_4)_3$ ยังช่วยปรับปรุงระยะเวลาการก่อตัวและการแข็งตัวให้ดีขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพแกนแอมท์ $Al_2(SO_4)_3$ ส่งผลให้เกิดการสร้างผลึกของ ettringite ขึ้นได้ทั้งในไซเลมเรย์และบนผนังของเวสเซลของแกนแอมท์ ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของแกนแอมท์ จึงส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ $Ca(OH)_2$ ในปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัว

การใช้แกนแอมท์แทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงเนื่องจากแกนแอมท์มีน้ำหนักเบาและมีรูพรุนสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ในด้านการส่งเสริมองค์ความรู้และห้องปฏิบัติการทดสอบต่างๆ สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ในความอนุเคราะห์แกนแอมท์และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

คุณกฤตพิงศ์ โปสถ์จะโปะ คุณจักรกฤษณ์ ณะมนณีวุฒิ และชาวคณะฯ ผู้ช่วยวิจัยอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี คุณแพรวพรรณ เครื่องมั่งกร นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครราชสีมา ในข้อมูลการวิเคราะห์ Detergent method คุณเกวลี พร้อมพิพัฒน์พร (SEM), คุณยูธิกา สร้อยระย้า (XRD), คุณนุชจรี เวชวิริยกุล (TGA) และคุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ (XRF) นักวิทยาศาสตร์ ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการวิเคราะห์และแนะนำแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), กันยายน 2553. โครงการจัดทำยุทธศาสตร์การพัฒนาเอมพ์ (แผนปฏิบัติการพัฒนาเอมพ์บนพื้นที่สูงภาคเหนือ ระยะ 5 ปี พ.ศ. 2553-2557).
- [2] DeeDee De Miranda. An evaluation of hemp fibre for furnishing applications. Colorado State University Fort Collins, Colorado 2011.
- [3] Minister of Hemp. Cannabis Sativa vs Cannabis Indica: Difference explained in official terms. 2016. <https://ministryofhemp.com/hemp/not-marijuana/>
- [4] ราชกิจจานุเบกษา. 6 มกราคม 2560. กฎกระทรวง การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต จำหน่าย นำเข้า ส่งออก หรือมีไว้ในครอบครองซึ่งยาเสพติดให้โทษในประเภท 4 หรือในประเภท 5 พ.ศ. 2559.
- [5] Valerie L. Vantreesse. Industrial hemp: Global operations, Local implications. Department of Agricultural Economics University of Kentucky, Lexington 1998; KY 40546-0276.
- [6] ธงชัย คุ้มพวง. เอมพ์ พืชเส้นใยธรรมชาติ ส่งเสริมการปลูก มุ่งสู่เชิงพาณิชย์, มติชน เทคโนโลยีชาวบ้าน 2558.
- [7] Plamen Ivanov Peev, Jesper Saxgren. Is industrial hemp a sustainable construction material?, Architectural Technology and Construction Management, VIA University College, Horsens, Denmark 2012.
- [8] Florence Collet, Sylvie Pretot. Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall, Building and Environment 2014; 82: 459-466.
- [9] ดร.วันดี ธรรมจารี. วัสดุผสมชีวภาพ (biocomposites). Bio & Nano 2558; 228(40).
- [10] Reinu E. Abraham, Colin J. Barrow, Munish Puri. Relationship to reducing sugar production and scanning electron microscope structure to pretreated hemp hurd biomass (Cannabis sativa). Biomass and Bio Energy 2013; 58: 180-87.
- [11] Paul R. Blankenhorn, Brad D. Blankenhorn, Michael R. Silsbee, Maria DiCola. Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites. Cement and Concrete Research 2001; 31: 1049-1055.
- [12] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. Journal of The European Ceramic Society 2008; 28: 183-192.
- [13] Michał Bołtryk, Dorota Małaszkiwicz. Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete. Białystok Technical University 2007; 50 pages.
- [14] Giedrius Balciunas, Ina Pundiene, Lina Lekunaite-Lukosiune, Sigita Vejetis, Aleksandrs Korjakins. Impact of hemp shiv aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. Industrial Crops and Products 2015; 77: 724-734.
- [15] L. Segal, J. J. Creely, A. E. M. Martin, Jr., and C. M. Conrad. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. Textile Research Journal 1959; 786-794.
- [16] S. Indran, R. Edwin Raj, V.S. Sreenivasan. Characterization of new natural cellulosic fibre from cissus quadrangularis root. Carbohydrate Polymers 2014; 110: 423-429
- [17] Herman E. Hayward. The structure of economic plants, Chapter VIII, Moraceae, Cannabis sativa. The University of Chicago, Hempology.org: The study of hemp 1938; 214-245.
- [18] C. Shen, H. Mohammed, and A. Kamar. Effect of K_2SO_4 and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ dihydrate solutions on crystallization and strength of gypsum. College of Dentistry, University of Florida, Gainesville, Florida. Gypsum Crystallization 1981; 60(8): 1410-1417.

- [19] Jana Jurisova, Vladimir Danielik, Pavel Fellner, Marek Lencses, Milan Kralik. Phase diagram of the system $\text{CaSO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-KNO}_3\text{-Ca(NO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$. *Acta Chimica Slovaca* 2014; 7(1): 20-24. DOI: 10.2478/acs-2014-0004.
- [20] Paul Wencil Brown. Early-age cement hydration reactions. Department of Materials Science and Materials Research Laboratory, Penn Sylvania State University , University Park, Pa. *Transportation Research Record*; 1284: 53-59.
- [21] Jianqiang Wei, Christian Meye. Degradation of natural fibre in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. *Corrosion Science*; <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.12.004>.
- [22] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona. Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. *Applied Surface Science* 2013; 276: 13-23.
- [23] Ettringite formation and the performance of concrete. *Concrete information*, Portland Cement Association, 16 pages.
- [24] Howard F. Rase. *Handbook of Commercial Catalysts: Heterogeneous Catalysts* 2000; page 71.
- [25] Giedrius Vaickelionis, Rita Vaickelioniene. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. *Ceramics-Silikaty* 2006; 50(2): 115-122.
- [26] Jennifer L. Pehanich, Paul R. Blankenhorn, Michael R. Silsbee. Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre-cement composites. *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 59-65.

BIOGRAPHY

Mr. Saksith Pantawee was born on August 13, 1976 in Roi-Et, Thailand. He received his bachelor degree in Civil Engineering from Rajamangala Institute of Technology Nakhon Rachasima in 2002. In 2006, he enrolled in the Master degree in the school of Civil Engineering at Suranaree University of Technology and obtained his degree in Civil Engineering in 2008. During his Ph.D. study, he published 1-international paper and 2-national conference. He is currently working as a full-time lecturer in the school of Civil Engineering at the Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Rachasima.

