โครงงานที่ 825/2562 (วศบ.อุตสาหการ)

การหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีออกแบบการทดลอง

นายชิงเยี่ยม พัฒนศิษฏางกูร รหัสนักศึกษา 570612064

นายณภัทร เกิดกล้า รหัสนักศึกษา 590612054

โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงงาน	การหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีออกแบบการทดลอง
โดย	นายชิงเยี่ยม พัฒนศิษฏางกูร รหัสนักศึกษา 570612064
	นายณภัทร เกิดกล้า รหัสนักศึกษา 590612054
ภาควิชา	วิศวกรรมอุสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุวณิช
ปีการศึกษา	2562

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อนุมัติให้นับโครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

กรรมการสอบโครงงาน

..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุวณิช)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว)

..... กรรมการ
(อ.ดร.ชวิศ บุญมี)

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงงานวิจัยเรื่อง การหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีออกแบบการทดลองสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับ ความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากหลายๆ ฝ่าย ซึ่งหากไม่มีบุคคลเหล่านี้โครงงานวิจัยนี้อาจ ไม่ประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุวนิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ เสนอแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง ตลอดจนคอยให้คำปรึกษาตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนบุคลากรทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทาโครงงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณบริษัททรัพย์แสงดาว จำกัด จังหวัดน่านที่ในความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือ ในการดำเนินการทดลอง

ขอขอบพระคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของทางบริษัททรัพย์แสงดาว จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ในการดำเนินการทำโครงงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ นายรชฏ จิณเสน เจ้าของร้าน ณ เสน ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ บริการอาหารและเครื่องดื่มในระหว่างการดำเนินการทำงาน

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายท่านที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ทางผู้จัดทำโครงงานวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงงานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากโครงงานวิจัยเล่มนี้บกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ทางผู้จัดทำต้องขออภัย และ ขอน้อมรับข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ทุกประการ

ชิงเยี่ยม พัฒนศิษฏางกูร
ณภัทร เกิดกล้า

หัวข้อโครงงาน	การหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีออกแบบการทดลอง
โดย	นายชิงเยี่ยม พัฒนศิษฎางกูร รหัสนักศึกษา 570612064
	นายณภัทร เกิดกล้า รหัสนักศึกษา 590612054
ภาควิชา	วิศวกรรมอุสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุวณิช
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตของแต่ละปัจจัย โดยศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3 ปัจจัย โดยปัจจัยมี 2 ระดับ คือ 2^3 ปัจจัยการทดลอง ได้แก่ ขนาดหินโม่ ชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมเป็นจำนวนการทดลอง 2^3x2 เป็นจำนวนการทดลอง 16 การทดลอง โดยทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ในอัตราส่วนผสมของแต่ละการทดลองเพื่อนำไปทดสอบหาค่าต้านทานแรงกดให้ได้ค่าต้านทานแรงกดที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.)ของแท่งคอนกรีต แล้วนำไปหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่มาจากการทดลองทั้ง 16 การทดลอง โดยทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์การทดลองละ 5 ตัวอย่างรวมเป็นจำนวน 80 ตัวอย่าง โดยใช้ระยะเวลาในการผลิตแท่งคอนกรีตเพื่อให้แข็งตัวจนสามารถนำมาทดสอบได้เป็นระยะเวลา 28 วัน เพื่อสามารถนำไปทดสอบหาค่าต้านทานแรงกด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบค่าต้านทานแรงกดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ไปเข้าในโปรแกรมมินิแทบ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าต้านทานแรงกดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ และหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการนำไปผลิตท่อคอนกรีตเพื่อให้ได้ท่อคอนกรีตที่มีคุณภาพและมีความแข็งแรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.) 128 – 2549 ในเรื่องของการผลิตท่อคอนกรีต

จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญของค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ คือ ขนาดหินโม่ ชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยไม่พบปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลอง โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์คือ หินโม่ขนาด 3/8 นิ้ว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (ดำ) และอัตราส่วนส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ 48.89 เมกะพาสคัล เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมของการทดลองอื่น

Project Title	Determining Appropriate Composition in Precast Concrete Pipe Manufacturing by Design of Experiment
Name	Chingyiam Phatthanasittangkoon code 570612064
	Napat kerdkla code 590612054
Department	Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
Project Advisor	Assistant Professor Anirut Chaijaruwanish, Ph.D.
Academic	2019

ABSTRACT

This research aims to study the appropriate proportions of concrete pipes manufacturing with different factors by using three full factorial experiments with two levels of factors. The 2^3 experimental factors are size of millstone, Portland cement type, and ratio of fly ash to replace cements. The whole experiments are repeated one more time or totally 16 (2^3x2) tests are made. Concrete cubes block, in the mixture ratio of each experiment, are produced to test a compression force and compare their values to the Thai Industrial Standard of concrete cubes. They are built 5 examples per one ratio or totally 80 examples are used to find compression force. A building process of the concrete takes 28 days before the cubes are tested. A program Minitab is simulated to find the factors which effect to compression force of the cubes and the best proportion to make strong and quality concrete as Thai industrial standard 128-2549. The result indicates the size of millstone, the Portland cement type, and the ratio of fly ash to replace cements affected to compression force without correlation among them. From the experiment, the most appropriate ratio is size 3/8 inch of millstone, Portland cement type 3, and 35% of the ratio of fly ash to replace cements with averaged compression force 48.89 MPa.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

สารบัญตาราง ซ

สารบัญภาพ ฌ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

2.2 คอนกรีต 8

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 9

2.4 อนุภาคเถ้าลอย 11

2.5 ทรายสำหรับผสมคอนกรีต 12

2.6 หินสำหรับผสมคอนกรีต 13

2.7 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม 15

บทที่ 3 ระเบียบวิจัยวิธีการทำงาน

3.1 ศึกษาและเก็บข้อมูล 17

3.2 ดำเนินการด้วยการออกแบบการทดลอง 17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 การสุ่มลำดับการทดลองจากโปรแกรมมินิแทบ 18

3.4 การขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 18

3.5 กระบวนการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 20

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) 21

3.7 กระบวนการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยเปรียบเทียบส่วนผสม 21

3.8 กระบวนการผลิตท่อคอนกรีต 22

3.9 ทดสอบท่อคอนกรีต 22

3.10 เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับค่าความต้านทานแรงอัดแตก 23

3.11 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม 23

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 กระบวนการขึ้นรูปแท่งคอนกรีต 24

4.2 กระบวนการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 26

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทบ 29

4.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับค่ามาตรฐาน 35

4.5 การผลิตท่อคอนกรีตอัดแรงเพื่อทดสอบระดับปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ใน Minitab 35

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการทำงาน 42

5.2 ข้อเสนอแนะ 43

5.3 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข 44

บรรณานุกรม 45

ภาคผนวก 46

ประวัติผู้เขียน 51

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

3.1 แสดงปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลอง 17
3.2 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 18
3.3 แสดงชนิดของส่วนผสมที่ทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 19
3.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบจำนวนเต็มด้วยโปรแกรมมินิแทบ 21
4.1 อัตราส่วนผสมในการผลิตแท่งคอนกรีตโดยน้ำหนัก 24
4.2 กระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 25
4.3 แสดงขั้นตอนในการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 27
4.4 ค่าต้านทานแรงกดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ 29
4.5 ค่าประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์ 30
4.6 ความเพียงพอของข้อมูลของแบบจำลอง 32
4.7 ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 32
4.8 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม 35
4.9 แสดงขั้นตอนในการผลิตท่อคอนกรีต 36
4.10 ขั้นตอนในการทดสอบท่อคอนกรีต 39
4.11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบท่อคอนกรีต 40
5.1 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข 43
ก-1 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 1 46
ก-2 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 2 48

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 แสดงปัจจัย กระบวนการ และ ตัวแปรตอบสนอง	5
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	10
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3	10
2.4 อนุภาคเถ้าลอย	11
2.5 ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต	13
2.6 กรวดหินปูนจากโรงโม่	14
2.7 หินกรวดแม่น้ำ	14
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	16
3.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์	18
3.3 เครื่องโม่ปูนสำหรับผสมวัตถุดิบ	19
3.4 อุปกรณ์สำหรับขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์	20
3.5 เครื่องทดสอบค่าต้านทานแรงอัดขนาด 1500 กิโลนิวตัน	20
3.8 เครื่องผลิตท่อคอนกรีต	22
3.9 เครื่องทดสอบแรงอัดแตกของท่อคอนกรีต	23
4.1 แผนภูมิพาเรโตแสดงระดับนัยสำคัญของแต่ละปัจจัย	31
4.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของค่าผลตอบจากการทดสอบ (Residual Plots)	33
4.3 Main Effects Plot	34
4.4 Interaction Plot	34
4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับมาตรฐาน	35
4.6 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าทดสอบท่อคอนกรีต	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงงาน

ในปัจจุบันการแข่งขันทางการตลาดและอุตสาหกรรมมีการแข่งขันที่สูงเนื่องจากมีผู้ประกอบการหรือบริษัทที่เกิดขึ้นใหม่เป็นจำนวนมากและประกอบด้วยเศรษฐกิจที่อยู่อยู่ในสภาวะถดถอย จึงส่งผลให้ผู้ประกอบการที่อยู่ในอุตสาหกรรมต้องพิจารณาเพื่อหาแนวทางการพัฒนาบริษัทของตนเพื่อที่จะอยู่รอดและสามารถเป็นผู้นำในกลุ่มอุตสาหกรรมที่อยู่ได้อย่างยั่งยืน โดยจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นทางการตลาดพบว่าสินค้าที่มีการแข่งขันสูงคือท่อคอนกรีตเนื่องจากลูกค้าหลักที่ซื้อผลิตภัณฑ์ท่อคอนกรีตนั้นเป็นบริษัทรับเหมาขนาดใหญ่ที่มียอดการสั่งซื้อครั้งละมากๆทำให้บริษัทผู้ผลิตต้องการขายสินค้าให้กับลูกค้ากลุ่มนี้ จึงเป็นเหตุให้เกิดการแข่งขันด้านราคาโดยบริษัทรับเหมามีอำนาจในการเลือกซื้อสินค้าจากบริษัทผู้ผลิตที่มีราคาถูกกว่าในคุณภาพที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการแข่งขันทางด้านราคาทำให้กำไรของผู้ผลิตลดลงผู้ผลิตจึงต้องทำการหาวิธีในการลดต้นทุนทางการผลิตลดลงเพื่อที่จะทำให้สามารถต่อสู้กับคู่แข่งในอุตสาหกรรมที่มีอยู่ได้

การศึกษาเรื่องการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยใช้วิธีออกแบบการทดลองโดยวิเคราะห์จากปัจจัยที่คาดว่าจะเป็นตัวแปรในกระบวนการ (Process Variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product Variable) หรือองค์ประกอบของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการผลิต ที่มีการควบคุมการผลิตท่อคอนกรีตเพื่อให้ได้ท่อคอนกรีตที่มีคุณภาพและมีความแข็งแรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.) 128 – 2549 ในเรื่องของการผลิตท่อคอนกรีต ตามทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์จากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเช่น ระยะเวลาการทดลอง ต้นทุนการทดลอง บุคลากร วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และอีกหลายปัจจัย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง หรือ Design Of Experiment (DOE) เพื่อให้ได้ท่อคอนกรีตที่มีความแข็งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 128-2549 ในการผลิตท่อคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สถานที่ศึกษา บริษัท ทรัพย์แสงดาว จำกัด เลขที่ 256 หมู่ 3 ตำบลดู่ใต้ อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติการต้านทานแรงอัดแตกและค่าความต้านแรงอัดสูงสุดของท่อคอนกรีต โดยทำการเปรียบเทียบจากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ที่ใช้ปัจจัยในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ

1.3.3 กำหนดอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ตามปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งประกอบไปด้วย ขนาดหินโม่ ชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้แท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีความแข็งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 128-2549

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตท่อคอนกรีต เพื่อให้ได้ท่อคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงสุดและมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 128-2549

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินการทดลองโครงงานวิจัยเรื่องการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนผสมในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์และระยะเวลาการแข็งตัวเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง ซึ่งจากการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และหิน ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีระยะเวลาในการแข็งตัวจนสามารถนำไปทดสอบในระยะเวลาครบ 28 วัน

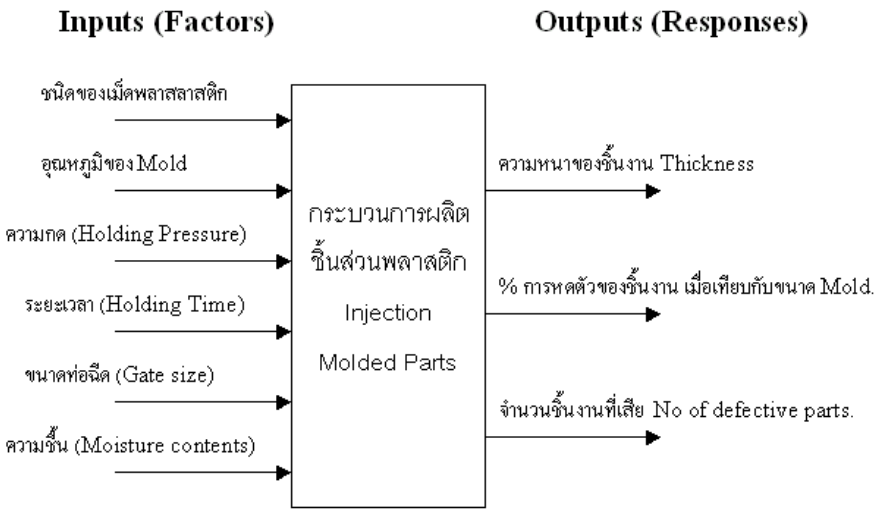
2.1.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment ; DOE) การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถทำการศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าจะทำให้ผลตอบเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลจำนวนมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเองดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (Factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (Response) ที่เกิดขึ้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ

กระบวนการในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วยตัวแปร 2 ประเภทดังนี้ แบ่งตามชนิดของข้อมูลของตัวแปรได้แก่-ตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous Variables) หรือตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Data) เช่นอุณหภูมิความถ่วงจำเพาะขนาดของชิ้นงาน ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง(Discrete Variables) หรือตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Data) เช่น ชนิดของเครื่องจักรระดับของปัจจัยที่สามารถปรับได้ 5 ระดับ ประเภทของวัตถุดิบแบ่งตามความสามารถในการควบคุมปัจจัยในการทดลอง ได้แก่

ตัวแปรที่ควบคุมหรือปรับค่าได้ (Input/Controllable Variables) คือตัวแปรในระบบที่ผลต่อการทดลองและผู้ทดลองสามารถควบคุมระดับของตัวแปรเหล่านี้ได้โดยสามารถปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยให้มีค่าตามต้องการโดยตัวแปรบางตัวสามารถควบคุมได้ง่ายหรือบางตัวแปรอาจควบคุมได้ยากหรืออาจต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการควบคุมในการทำการทดลองจะเลือกศึกษาเฉพาะตัวแปรที่ปรับค่าได้ที่ไม่ถูกเลือกในการศึกษาจะต้องควบคุมให้อยู่ในระดับเท่ากันตลอดทุกการทดลอง

ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Variables) คือตัวแปรในระบบที่เกี่ยวข้องและอาจมีผลต่อการทดลองจะมากหรือน้อยก็ตามแต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมระดับปัจจัยเหล่านี้ได้ในระหว่างการทดลองดังนั้นผลของปัจจัย (ที่ควบคุมไม่ได้) เหล่านี้จะปนเปื้อน (หรือรบกวน) ผลการทดลองส่งผลให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงโดยทั่วไปเรียกอีกอย่างว่าปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) แม้ว่าปัจจัยรบกวนส่วนใหญ่อาจมีผลต่อการทดลองน้อยแต่ถ้ามีจำนวนมากผลกระทบร่วมของปัจจัยเหล่านั้นอาจส่งผลรบกวนต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญได้

ตัวแปรผลตอบของกระบวนการ (Output/Response Variables) คือผลลัพธ์ของกระบวนการหรือจากการทดลองหรือตัวแปรตามที่ขึ้นกับระดับของตัวแปรนำเข้า ในการทดลองเดียวกันอาจมีผลลัพธ์จากการทดลองมากกว่าหนึ่งอย่าง ผู้วิจัยจะต้องเลือกผลตอบจากการทดลองที่เหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ในการศึกษาในกรณีปกติในการวิเคราะห์ผลผู้วิจัยมักเลือกผลตอบเพียงหนึ่งผลตอบ ส่วนกรณีวิเคราะห์ผลโดยมีผลคำตอบมากกว่าหนึ่งผลตอบจะต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้ผลตอบในการทดลองอาจเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณแต่ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติผลตอบเชิงคุณภาพจะต้องแปลงให้เป็นผลตอบเชิงปริมาณ



ภาพ 2.1 แสดงปัจจัย กระบวนการ และ ตัวแปรตอบสนอง

ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะมีผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หรือ (Noise Factor) แทนด้วย $z_1, z_2,..., z_n$ และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) แทนด้วย $x_1, x_2,..., x_n$ โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อบ่งชี้ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ให้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญหลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลองหลักการพื้นฐานที่สำคัญ 3 ประการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองและเป็นหลักการเพื่อช่วยให้ผลการทดลองมีความถูกต้องเที่ยงตรงและแม่นยำมากขึ้นประกอบด้วย การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง การทดลองเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้ดังภาพ 2.1

การสุ่ม (Randomization) หมายถึงการทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระการที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สาหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุการเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองสำหรับปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพในกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผลทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองมีความจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการในแต่ละขั้นตอนของการออกแบบการทดลองอย่างชัดเจนซึ่งขั้นตอนการออกแบบการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการศึกษาปัญหาในขั้นตอนนี้ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไรต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้างเพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจนการศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เกิดการเข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้นและนาไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด

2. ขั้นตอนการกำหนดผลตอบ (Response) ที่ต้องการศึกษาเป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ทำการศึกษาอยู่อาจเป็นผลมาจากการทำ SPC ทั้งนี้ต้องมั่นใจได้ว่าระบบการวัดมีความสามารถเพียงพอเนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบไม่ชัดเจนเพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูงๆเท่านั้นในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

3. การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุมและระดับของปัจจัยเป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือก ปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลตอบ พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้โดยจะต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสภาพการดำเนินการจริงซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญหรือประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหากกำหนดจำนวนปัจจัยและระดับของปัจจัยไม่ครอบคลุมจะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริงในขณะที่การกำหนดปัจจัยมากเกินไปจะส่งผลต่อต้นทุนและเวลาในการทำการทดลองอย่างไรก็ตามกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องจานวนมากผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment) ก่อนที่จะทำการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลตอบ อย่างแท้จริงต่อไป

4. การกำหนดรูปแบบการทดลองเมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้องขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนักผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลองซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่างจานวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (จำนวน Replication) การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่มเป็นต้นโดยแนวทางการเลือกวิธีการออกแบบการทดลองสามารถเลือกได้จากลักษณะของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการที่มีการดำเนินการตามขั้นตอน

5. การทดลองและการเก็บข้อมูลผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูลจะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือและไม่สามารถนำไปวิเคราะห์อะไรได้เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่มจะส่งผลให้อิทธิพลของปัจจัยรบกวนไม่กระจายเฉลี่ยทำให้ผลของการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้าหรือครั้งอื่น (ไม่อิสระต่อกัน) หรือมีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการทดลองเป็นต้น

6. การวิเคราะห์ข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟการวิเคราะห์สมการเส้นถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอต์ฟแวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิดแต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปรความหมายที่ถูกต้องด้วย

7. การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุงเมื่อทราบผลการวิเคราะห์การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือเช่น กราฟเพื่ออธิบายความสัมพันธ์อื่น และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งนี้ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันข้อแนะนำการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริงนอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของ SPC ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

2.1.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^k (Full Factorial Design) กรณีนี้จะเน้นการศึกษาผลของปัจจัย k ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมีการปรับเปลี่ยนระดับจานวนเท่ากัน คือ 2 ระดับดังนั้นจำนวนเงื่อนไขการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนคือ การทดลองเรียกว่าการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^k เป็นกรณีการออกแบบทดลองที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดสำหรับประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรมและในงานศึกษาวิจัยจุดประสงค์ของการออกแบบการทดลองคือเพื่อคัดกรองปัจจัย (Factor Screening Experiment) โดยเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้นและใช้สำหรับสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของกระบวนการการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทุกปัจจัยพร้อมกันทำให้สามารถประมาณค่าผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ถึง k ปัจจัย (Interaction Effect) ครบทุกเทอมได้อย่างอิสระต่อกันจากนั้นคัดกรองเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลอง (Empirical Model) เพื่อใช้สำหรับทำนายผลการทดลองและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน (Optimum Condition) โดยแบบจำลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือแบบเชิงเส้นผสมเทอมผลกระทบร่วม (Linear Model with Interaction Terms) เนื่องจากจำนวนระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีเพียง 2 ระดับจึงสามารถประมาณเฉพาะความสัมพันธ์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมแม้แบบจำลองที่ประกอบด้วยผลกระทบร่วมโดยจะมี

ความสัมพันธ์ใกล้เคียงแบบเส้นโค้งโดยเฉพาะถ้าประกอบด้วยผลกระทบร่วมระดับสูงพื้นผิวผลตอบจะมีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้นแต่โดยปกติในทางปฏิบัติผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยขึ้นไปมักมีผลต่อกระบวนการที่ศึกษาน้อยมากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลมีคุณสมบัติที่ดการออกแบบแฟกทอเรียลมีคุณสมบัติที่ดี

การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^kเมื่อมีจำนวนปัจจัยที่พิจารณาจำนวน k ปัจจัยแต่ละปัจจัยสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 ระดับเรียกว่าระดับสูง (High Level) แทนด้วยเครื่องหมาย“+”และระดับต่ำ (Low Level) แทนด้วยเครื่องหมาย“-”เช่นถ้ามีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัยคือ A และ B ระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัยAจะแทนได้ด้วย A+ และ A- ตามลำดับและระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัยBจะแทนได้ด้วย B+ และ B- ตามลำดับ

การทดลองที่ง่ายที่สุดสาหรับกรณีนี้คือ k=2 หรือมี 2 ปัจจัยซึ่งเรียกว่า 2^2 Factorial Design รูปแบบการทดลอง ซึ่งจะประกอบด้วย 4 ลำดับการทำลอง หรือรอบการทำลอง

กรณีที่มีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไปหรือ $k \geq 3$ การทดลองและการวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนมากขึ้นโดยในกรณีของแฟคทอเรียลซึ่งพิจารณาเพียง 2 ระดับของแต่ละปัจจัยเช่น k=3 รูปแบบการทดลองจะแทนได้ด้วยรูปทรงลูกบาศก์ประกอบด้วยการทดลอง 8 ลำดับการทดลอง (Combinations) หรือ 8 รอบการทำลอง (Runs) (สรรติชัย ชีวสุทธิศิลป์. (2549). Experiment strategies foe engineering. Full Factorial Design. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

2.2 คอนกรีต

คอนกรีตคือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสมอันได้แก่ ทราย หิน หรือกรวดเมื่อน้ามาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะน้าไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่าง ตามต้องการหลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

องค์ประกอบของคอนกรีต คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อน้าส่วนผสม ต่างๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทรายเรียกว่า มอร์ต้า (Mortar) (concrete technology C PAC)

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้างปัจจุบัน เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีตปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่างๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น การผลิตเริ่มต้นด้วยการบดวัตถุดิบให้เป็นผงละเอียด และนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงจนได้เม็ดปูนซีเมนต์ซึ่งจะถูกนำไปบดเป็นปูนซีเมนต์ผง เพื่อบรรจุในถุงหรือขนส่งทางยานพาหนะต่อไป

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราทีพีไอ (สีแดง) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (ORDINARY PORTLAND CEMENT TYPE 1) ผลิตขึ้นโดยให้คุณภาพของปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราทีพีไอ (สีแดง) เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานก่อสร้างงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป เช่น งานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน สนามบิน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงประเภทต่างๆ ดังภาพ 2.2

2.3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 ตราทีพีไอ (สีดำ) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้กำลังอัดเร็วในระยะเวลาสั้น (HIGH EARLY STRENGHT PORTLAND CEMENT) ผลิตขึ้นโดยให้คุณภาพของปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทสาม และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 ตราทีพีไอ (สีดำ) เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องการให้รับน้ำหนักและถอดแบบได้รวดเร็ว ใช้ทำผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงทุกประเภท เช่น เสาเข็ม แผ่นพื้น คาน เสาไฟฟ้า ดังภาพ 2.3 (ธีรพล ,บริษัท บิลค์ เอเชีย จำกัด)

ภาพ 2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

ภาพ 2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3

2.4 อนุภาคเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอย (Fly ash particle) ถือเป็นผลพลอยได้ จากกระบวนการเผาถ่านหินของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นจำนวนมากและถือเป็นขยะอันตรายที่มักส่งผล กระทบต่อปัญหาทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของ มนุษย์โดยเฉพาะในบริเวณใกล้เคียง ตัวอย่างเช่น อนุภาคเถ้าลอยตามภาพ 2.4 ที่เกิดจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปางนั้น มีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปีโดยไม่ได้มีการกำจัด หรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างถูกวิธีจากผลดังกล่าวจึงทำให้นักวิจัยในประเทศไทยได้ตระหนักและสนใจการใช้ ประโยชน์จากผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินมากขึ้น ซึ่งพบว่าใน ปีค.ศ. 2002 มีปริมาณการใช้ผลพลอยได้จาก ถ่านหินสูงถึง 1,800,000 ตันต่อปีหรือคิดเป็นร้อยละ 60 ของที่ผลิตได้ [1-4] โดยประเภทของงานที่ใช้ส่วนใหญ่เพื่อ ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยของ McCarthy และ Dhir (2005) [5] พบว่าอนุภาคเถ้าลอยสามารถใช้ผสม กับสารปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตได้ในปริมาณสูงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถเพิ่มความแข็งแกร่งของคอนกรีต และมี ค่าพลังงานการการประสานตัว (Clinker Energy) ที่ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าลอยประกอบด้วยสารอนินทรีย์หลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide, Fe_2O_3) ประมาณ 35 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (มฆวัน นิลกัณหะ)

ภาพ 2.4 อนุภาคเถ้าลอย

2.5 ทรายสำหรับผสมคอนกรีต

ทรายเป็นหินแข็งที่แตกแยกออกมาจากหินก้อนใหญ่ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เอง ตามธรรมชาติ ทรายมีขนาดระหว่าง 1/12 นิ้ว ถึง 1/400 นิ้ว ถ้ามีขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทรายจะ ประกอบด้วยแร่ควอตซ์หรือหินบะซอลต์ ทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด คือ

1. ทรายแม่น้ำ เป็นทรายที่ได้จากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อยๆ ตกตะกอนสะสมกลายเป็นแหล่งทราย อยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายละเอียดนั้นจะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำลักษณะของทราย แม่น้ำมีลักษณะกลมเกลี้ยง เนื่องจากการพัดพาของน้ำ เม็ดทรายจะเกิดการเสียดสีจนกระทั้งเป็นทรายที่ ทีลักษณะกลมเกลี้ยง ปัจจุบันใช้ทรายชนิดนี้มาก เพราะหาได้ง่ายกว่าทรายบกหากจะนำทรายแม่น้ำขึ้นมาใช้จะต้องได้รับอนุญาตจากกรมที่ดินก่อน ดังภาพ 2.5

2. ทรายบก ทรายบกเป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอนที่ทับถมกัน ของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดินโดย มีซากพืช ซากสัตว์ทับถมกันบริเวณผิวหน้าซึ่งเราเรียกกันว่าหน้าดิน มีความหนาประมาณ 2-10 เมตร ลักษณะของทรายบก มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีแง่มุมแข็งแรงดี เป็นทรายที่เหมาะแก่การผสมคอนกรีต เพราะการแทรกตัวของทรายจะท้าให้ช่องว่างของคอนกรีตลดน้อยลง จะได้คอนกรีตที่ดี ทรายบกมักจะ มีดิน ซากพืชซากสัตว์ปะปนอยู่ เวลาจะน้าทรายไปใช้งาน จะต้องล้างหรือท้าความสะอาดเสียก่อน ทรายบกปัจจุบันเป็นทรายที่หาได้ยาก ชนิดของทรายในการก่อสร้างทั่วไปทรายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น ได้มาจากแม่น้ำ มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

ทรายหยาบ เป็นทรายเม็ดใหญ่ที่มีเหลี่ยมแง่มุมแข็งแรงดี เหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการต้านทานกำลังสูง เช่น อาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างสะพาน เป็นต้น ทรายชนิดนี้มีเปลือกหอยและเศษหินปะปนอยู่ เวลาจะใช้ต้องนำไปร่อนด้วยตะแกรงท้าความสะอาดก่อน

ทรายกลาง เป็นทรายที่มีขนาดปานกลางไม่หยาบไม่ละเอียดนัก เหมาะสำหรับงานปูนทั่วไป เช่น น้ำมาเป็นส่วนผสมของปูนก่อ สำหรับก่ออิฐ หรือใช้เทพื้นคอนกรีตที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก ทรายชนิดนี้เวลาจะใช้ จะต้องร่อนเอาเปลือกหอยและสิ่งอื่นที่ไม่ต้องการออกก่อน

ทรายละเอียด เป็นทรายเม็ดละเอียดมาก นำมาใช้กับงานที่ไม่ต้องใช้กำลังมากนัก เหมาะสำหรับนำมาเป็นส่วนผสมของปูนฉาบผิวหน้า ทำลวด ลายต่างๆ ก่อนใช้จะต้องร่อนสิ่งที่ไม่ต้องการใช้ออกก่อน (ศุภกรณ์ สังข์สกุล)

ภาพ 2.5 ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต

2.6 หินสำหรับผสมคอนกรีต

หินที่สามารถนำมาผสมคอนกรีต จะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีการ นำหินชนิดต่างๆ มาใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่

1. หินตะกอนหรือหินชั้น (Sedimentary Rock) ที่นิยมใช้ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ซึ่งเกิดจากการทับถมตัวของซากสัตว์ทะเลเป็นหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตมากที่สุดในประเทศ มีค่าความแข็งแรง ประมาณ 55-105 กก./ลบ.ซม. และค่าต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) อยู่ระหว่าง 20 - 37 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 2.6

2. หินอัคนี (Igneous Rock) มีความแข็งแรงกว่าหินปูนแต่ไม่มีผู้ผลิตมากนัก เนื่องจากมีต้นทุน การผลิตและค่าสึกหรอสูง มักจะผลิตในท้องที่ที่ไม่สามารถหาแหล่งหินปูนได้ หินอัคนีที่มีการผลิตใน ประเทศ ได้แก่ หินแกรนิต หินแอนดีไซต์หินบะซอลต์ โดยทั่วไปหินอัคนีมีค่าความแข็งแรง ประมาณ 60-190 กก./ลบ.ซม. และค่าต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) อยู่ระหว่าง 10 -30 เปอร์เซ็นต์

3. กรวด (Gravel) เกิดจากการผุพังของหินอัคนีที่พบอยู่ทั่วไปตามแม่น้ำลำธาร สามารถนำมา ผสมคอนกรีตได้ดีเท่าหินชนิดอื่นๆ โดยนำมาร่อนให้มีขนาดและส่วน คละตามมาตรฐาน ในประเทศยัง ไม่นิยมใช้กรวดในการผสมคอนกรีตมากนัก ดังภาพ 2.7

4. หินฝุ่น สำหรับผสมคอนกรีต หินฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงทดสอบ 4.75 มิลลิเมตรได้ สำหรับเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตรับแรง เป็นหินฝุ่นที่เหลือใช้จากการผลิตหินปูนจากโรงโม่

ภาพ 2.6 กรวดหินปูนจากโรงโม่

ภาพ 2.7 หินกรวดแม่น้ำ

2.7 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

1. ซีเมนต์เพสต์หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์มีดังนี้

- เสริมช่องว่างระหว่างมวล
- หล่อลื่นคอนกรีตสดระหว่างเทหล่อ
- เสริมกำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ

- คุณภาพของปูนซีเมนต์
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2. มวลรวม หน้าที่ของมวลรวมมีดังนี้

- เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์
- ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมากคุณสมบัติของมวลรวมที่สำคัญ
- มีความแข็งแรง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
- คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี
- ความต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสี

3. น้ำ หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมี 3 ประการคือ

- ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
- ใช้ผสมท้าคอนกรีต
- ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมท้าคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 3 ประการ

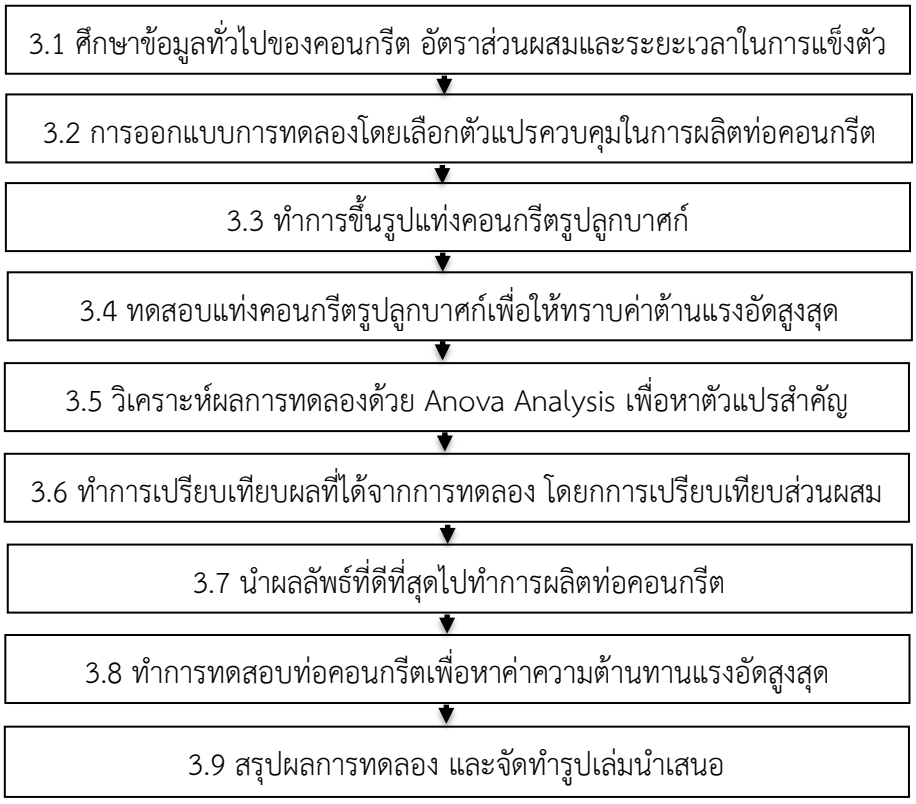
- ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์
- ท้าหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้
- เคลือบ หิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

(เฉลิม สุจริต. วัสดุการกอสรางสถาปัตยกรรม)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทำงาน

ในการศึกษาการหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีการออกแบบ ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าวิธีการดังกล่าวมีประโยชน์ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตท่อคอนกรีต เพื่อทราบส่วนผสมในการใช้ประเภทของส่วนผสมต่าง ๆ ในการผลิตท่อคอนกรีต ในการดำเนินการวิจัย การหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อคอนกรีตโดยวิธีการออกแบบ มีขั้นตอนดังภาพ 3.1



ภาพ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาและเก็บข้อมูล

ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลทั่วไปของคอนกรีต อัตราส่วนผสมในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์และระยะเวลาการแข็งตัวเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองดังตาราง 3.1 ซึ่งจากการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และหิน ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีระยะเวลาในการแข็งตัวจนสามารถนำไปทดสอบในระยะเวลาครบ 28 วัน โดยจากการเลือกระดับปัจจัยในการทดลองของขนาดหินโม่ที่มีขนาด 3/4 และ 3/8 ที่เป็นขนาดที่ใช้ในการผลิตในงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ และชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แดง และดำที่มีการใช้ในการก่อสร้างผลิตภัณฑ์จำพวกท่อ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เป็นอัตราส่วนร้อยละ 70 ที่มากที่สุดและร้อยละ 35น้อยที่สุดเป็นการนำอัตราส่วนเถ้าลอยมาใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยจะทำการเลือกแต่ละปัจจัยจากการทำไปออกแบบการทดลองเพื่อนำไปทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบากศ์

ตาราง 3.1 แสดงปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลอง

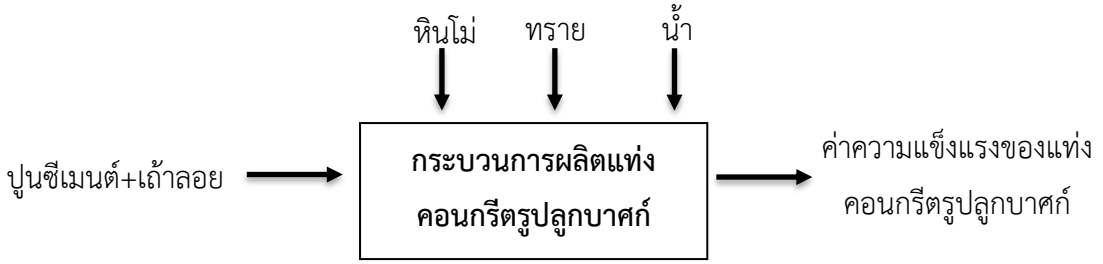
ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
	ต่ำ (-1)	สูง (+1)	
ขนาดหินโม่	3/4	3/8	นิ้ว
ชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	แดง	ดำ	
อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์	35	70	ร้อยละ

3.2 ดำเนินการด้วยการออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลองโดยการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^a) เป็นการทดลองตามปัจจัยที่พิจารณาจำนวน a แต่ละปัจจัยกำหนดให้ปรับเปลี่ยน ได้ 2 ระดับ เรียกว่าระดับสูง (High-level) แทนด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำ (Low level) แทนด้วยเครื่องหมาย “-” โดยออกแบบการทดลองเป็น 2 – Level Factorial Design (2^3) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ดังตาราง 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (ทั้งหมด 16 การทดลอง) โดยแต่ละการทดลองจะใช้ 5 ตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

1.กำหนดตัวแปรต้นให้เป็นขนาดหินโม่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทดสอบค่าความแข็งแรงของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ดังภาพ 3.2

2. กำหนดตัวแปรตามในการวิเคราะห์ข้อมูลให้เป็นค่าความแข็งแรงของที่แท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์สามารถรับได้



ภาพ 3.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

3.3 การสุ่มลำดับการทดลองจากโปรแกรมมินิแทป

ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการสุ่มเพื่อกำจัดผลกระทบและปัจจัยรบกวนที่ไม่ทราบค่าหรือไม่สามารถควบคุมได้ โดยจากการศึกษาและวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผลิตแท่งคอนกรีต สามารถนำไปดำเนินการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน 2^k โดยใช้โปรแกรมมินิแทปในการวิเคราะห์หาลำดับในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ตามหลักการทดลองแบบสุ่ม ดังตาราง 4.4

3.4 การขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

ทำการขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีความยาวทุกด้าน ด้านละ 150 มิลลิเมตร โดยขึ้นรูปในอัตราส่วนของแต่ละปัจจัย ดังตาราง 3.2 และ 3.3 การขึ้นรูป ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรง ไม่แอ่นตัวจนทำให้ชิ้นงานออกมาบิดเบี้ยว เพื่อให้ได้แท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีแกนที่สมมาตรและมีผิวเรียบเสมอกันทุกด้าน ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์โดยมีการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์เบื้องต้นดังภาพ 3.3 และภาพ 3.4 ทำการผลิตในอัตราส่วนละ 5 ตัวอย่าง โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

ตาราง 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์+เถ้าลอย	20
หินโม่	38
ทราย	38
น้ำ	4

ตาราง 3.3 แสดงชนิดของส่วนผสมที่ทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

สูตรผสม	หินโม่ (นิ้ว)	ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์
A	3/4	ประเภท 1 (แดง)	35
B	3/4	ประเภท 1 (แดง)	70
C	3/4	ประเภท 3 (ดำ)	35
D	3/4	ประเภท 3 (ดำ)	70
E	3/8	ประเภท 1 (แดง)	35
F	3/8	ประเภท 1 (แดง)	70
G	3/8	ประเภท 3 (ดำ)	35
H	3/8	ประเภท 3 (ดำ)	70

ภาพ 3.3 เครื่องโม่ปูนสำหรับผสมวัตถุดิบ

ภาพ 3.4 อุปกรณ์สำหรับขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

3.5 กระบวนการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์เพื่อให้ทราบค่าความต้านแรงอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีตขนาด 1,500 กิโลนิวตัน ดังภาพ 3.5 เมื่อแท่งคอนกรีตที่มีอายุครบ 28 วัน

ภาพ 3.5 เครื่องทดสอบค่าต้านทานแรงอัดขนาด 1,500 กิโลนิวตัน

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance : ANOVA) เพื่อหาตัวแปรสำคัญที่ทำให้แท่งคอนกรีตมีความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยเปรียบเทียบส่วนผสมที่เหมาะสมทำให้ได้แท่งคอนกรีตที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดด้วยโปรแกรม Minitab จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็มจะมีปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัยคือ ขนาดของหินโม่ (A) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (B) และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ (C) กำหนดค่าของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+1) และระดับต่ำ (-1) เพื่อเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบ และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ซ้ำ เพื่อลดความแปรปรวนจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการทดลองเนื่องจากเป็นการทดลองที่ทำภายในระยะเวลาเดียวไม่เสร็จสิ้นการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองสำหรับปัจจัยชุดหลักจำนวน 3 ปัจจัยดังตาราง 3.4

ตาราง 3.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบจำนวนเต็มด้วยโปรแกรมมินิแทป

รหัส	A	B	C	ค่าแรงกดเฉลี่ย(kN)
A	-1	-1	-1	
B	-1	-1	1	
C	-1	1	-1	
D	-1	1	1	
E	1	-1	-1	
F	1	-1	1	
G	1	1	-1	
H	1	1	1	

3.7 กระบวนการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยเปรียบเทียบส่วนผสม

หลังจากออกแบบการทดลองโดยทำการทดลองตามขั้นตอนและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดูว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงอัดมากที่สุดในการค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มี

อิทธิพลนั้นสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป (MINITAB) โดยใช้การวิเคราะห์ Anova Analysis ที่ได้นั้นจะแสดงถึงปัจจัยที่ป้อนเข้าสู่การทดลองโดยมีอิทธิพลจากทั้งสองปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) และจะใช้ค่าP-Valueที่น้อยกว่า 0.05 จากตาราง Estimated Effect และ Coefficients เพื่อทำการเลือกปัจจัยทั้งสามได้แก่ ขนาดหินโม่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงอัดมากที่สุดแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง

3.8 กระบวนการผลิตท่อคอนกรีต

ทำการนำผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่ดีที่สุดไปทำการผลิตท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ความยาว 1000 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องผลิตท่อคอนกรีตดังภาพ 3.8 เพื่อนำไปทดสอบหาค่าแรงอัดแตกของท่อคอนกรีต

ภาพ 3.8 เครื่องผลิตท่อคอนกรีต

3.9 ทดสอบท่อคอนกรีต

ทำการทดสอบท่อคอนกรีตทที่ได้จากการผลิตเพื่อหาค่าความต้านแรงอัดแตก และแรงกดสูงสุดที่ท่อคอนกรีตสามารถรับได้ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดท่อคอนกรีต โดยมีการใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแตกของท่อคอนกรีตดังภาพ 3.9 โดยทำการบีบท่อคอนกรีตจำนวน 1 แท่ง

ภาพ 3.9 เครื่องทดสอบแรงอัดแตกของท่อคอนกรีต

3.10 เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับค่าความต้านทานแรงอัดแตก

ทำการเปรียบเทียบและสังเกตผลจากการทดลองกับค่าความต้านทานแรงอัดแตก และแรงกดสูงสุดของท่อคอนกรีตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 128 - 2549

3.11 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม

บทที่4

ผลการดำเนินงาน

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาและทดลองด้านคุณสมบัติของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และวิธีการทดสอบ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของท่อคอนกรีตโดยมีปัจจัยที่นำมาทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ขนาดหินโม่ ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และร้อยละของเถ้าลอยที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการนำไปผลิตท่อคอนกรีต

4.1 กระบวนการขึ้นรูปแท่งคอนกรีต

ทำการขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีขนาดความยาวด้านละ 150 มิลลิเมตร ที่มีลำดับการทดลองและอัตราส่วนผสมของแต่ละสูตรการทดลอง ดังตาราง 4.3 โดยแต่ละการทดลองจะทำการผลิตแท่งคอนกรีตตามอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ดังตาราง 4.1 และแต่ละการทดลองจะสามารถผลิตแท่งคอนกรีตได้จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนในการผลิตแท่งคอนกรีตดังตาราง 4.2

ตาราง 4.1 อัตราส่วนผสมในการผลิตแท่งคอนกรีตโดยน้ำหนัก

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
หินโม่	19
ทรายแม่น้ำ	19
เถ้าลอยและปูนซีเมนต์	10
น้ำ	2
รวม	50

ตาราง 4.2 กระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
1. กระบวนการในการชั่งส่วนผสม 	1. ตราชั่ง 2. ทรายแม่น้ำ 3. หินโม่ขนาด 3/8 และ 3/4 นิ้ว 4. เถ้าลอย 5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (แดง) 6. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 (ดำ) 7. ภาชนะตวงวัตถุดิบ	1. ทำการชั่งอัตราส่วนผสมในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปบาศก์ตามอัตราส่วนดังตาราง 4.1 ด้วยตราชั่งและถังตวงที่เตรียมไว้
2. กระบวนการผสมคอนกรีต 	1. เครื่องผสมคอนกรีต	1. นำส่วนผสมที่จัดเตรียมไว้ใส่ลงไปในโม่ของเครื่องผสมคอนกรีตละรอจนกระทั่งแต่ละส่วนผสมผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตได้จากสีและความชื้นของเนื้อคอนกรีตที่มีความเสมอกันทั้งโม่
3. กระบวนการหล่อคอนกรีตลงในแม่พิมพ์ 	1. แม่พิมพ์เหล็กหล่อ 2. เครื่องเขย่าลูกปูน	1. นำคอนกรีตที่ได้จากเครื่องผสมใส่ลงในแม่พิมพ์เหล็กหล่อโดยแม่พิมพ์เหล็กหล่อจะวางอยู่บนเครื่องเขย่าเพื่อทำให้คอนกรีตอัดแน่นและไล่ฟองอากาศที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตออก 2. ทำการใส่คอนกรีตลงในแม่พิมพ์เหล็กหล่อจนเต็ม 3.นำแม่พิมพ์เหล็กหล่อออกจากเครื่องเขย่า

ตาราง 4.2 ขั้นตอนในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
4. กระบวนการตกแต่งผิว	1. เกรียงฉาบพลาสติก 2. เกรียงขัดมัน 3. แท่งเหล็กปลายแหลม	1. ฉาบผิวหน้าชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์เหล็กหล่อให้เนื้อคอนกรีตเรียบเสมอกับขอบแม่พิมพ์โดยใช้เกรียงพลาสติก 2. ใช้เกรียงขัดมันฉาบผิวหน้าชิ้นงานให้มีความเรียบมากขึ้น 3. เขียนรหัสชิ้นงานลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยใช้แท่งเหล็กปลายแหลม
5. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และการจัดเก็บ	1. ค้อนเหล็ก 2. ประแจ	1. แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยการใช้ประแจคลายน็อตที่ยึดแม่พิมพ์ออก 2. ใช้ค้อนเคาะที่แม่พิมพ์เพื่อให้ชิ้นงานคอนกรีตหลุดออกจากแม่พิมพ์ 3. นำชิ้นงานคอนกรีตไปเก็บรักษาไว้ในสถานที่ที่ได้จัดเตรียมไว้ เพื่อรอการนำไปทำการทดสอบในกระบวนการถัดไป

4.2 กระบวนการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ดังตาราง 4.2 แล้วจะนำแท่งคอนกรีตทั้งหมดไปทำการเก็บรักษาไว้ภายใต้สิ่งแวดล้อมเดียวกันจนกระทั่งแท่งคอนกรีตมีอายุครบ 28 วันตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 128-2549) ได้กำหนดไว้จึงจะสามารถนำแท่งคอนกรีตไปทำการทดสอบค่าความต้านแรงอัดสูงสุดโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงสุด 1,500 กิโลนิวตัน โดยมีรายละเอียดและลำดับขั้นตอนในการทดสอบ ดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 แสดงขั้นตอนในการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
1. นำแท่งคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบ	1. เครื่องทดสอบแรงอัดขนาด 1,500 กิโลนิวตัน 2. แผ่นเหล็กรองชิ้นงานขนาด 20×20 เซนติเมตร	1. วางแท่งคอนกรีตลงบนแท่นกดผิวของแท่งคอนกรีตต้องวางอยู่บนแท่นกดอย่างสนิท และวางอยู่ตรงศูนย์กลางแท่นกดพอดี 2. นำแผ่นโลหะมารองระหว่างแป้นกดกับผิวชิ้นงานด้านบน 3. ปิดแผงตะแกรงเหล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้เศษวัสดุกระเด็นออกมาด้านนอก
2. เริ่มทำการทดสอบแรงอัด	1. เครื่องทดสอบแรงอัด	1. หมุนเข็มแสดงค่าให้มาอยู่ตรงที่ค่าเท่ากับศูนย์ 2. กดปุ่มเดินเครื่องทดสอบแรงกด
3. สังเกตการเปลี่ยนแปลง และค่าบนมาตรวัด	1. เครื่องทดสอบแรงอัด	1. ให้น้ำหนักกดจนกระทั่งแท่งคอนกรีตถึงจุดประลัยหรือจุดสูงสุดที่สามารถรับแรงได้ 2. สังเกตได้จากค่าน้ำหนักที่กดลงบนหน้าจอของเครื่องทดสอบจะเริ่มมีค่าลดลง

ตาราง 4.3 แสดงขั้นตอนในการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
5. จดบันทึกค่า ถ่ายภาพ	1. สมุดบันทึกค่า 2. กล้องถ่ายภาพ	1. จดบันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่แท่งคอนกรีตสามารถรับได้ 2. บันทึกภาพลักษณะการแตกของแท่งคอนกรีต

จากการทดสอบค่าแรงกดบนแท่งคอนกรีตสามารถแสดงผลค่าเฉลี่ยแรงกดสูงสุดของแต่ละการทดลอง (X-Pressure) ในตาราง 4.4 แต่เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นค่าแรงอัดสูงสุดที่มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (KN) แต่ค่าที่ต้องการนำมาวิเคราะห์คือค่าความต้านแรงอัดสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดที่มีหน่วยเป็นเมกะพาสคัล (MPa) จึงต้องทำการการแปลงค่าแรงกดสูงสุด (KN) ให้เป็นค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (MPa) โดยใช้สูตรในการคำนวณ ดังสมการ (1) และจากการคำนวณจะได้ค่าเฉลี่ยความต้านแรงกดสูงสุดของแท่งคอนกรีตแต่ละการทดลอง (Y-Pressure) ดังตาราง 4.4

$$\text{ค่าความต้านทานแรงอัด (MPa)} = \frac{\text{ค่าแรงอัดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ } (\text{นิวตัน})}{\text{พื้นที่หน้าตัดของแท่งคอนกรีต } (\text{ตารางเมตร})} \qquad (1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ ใช้ค่าแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบเท่ากับ 1,000 กิโลนิวตัน

$$\text{ค่าความต้านทานแรงอัด (MPa)} = \frac{\mathbf{1{,}000/1{,}000}\ (\text{นิวตัน})}{\mathbf{0.15*0.15}(\text{ตารางเมตร})} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{0.0225}} = 44.44 \text{ เมกะพาสคัล}$$

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทบ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองหลังจากออกแบบการทดลองโดยทำการทดลองตามขั้นตอนและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงกดแท่งคอนกรีต ขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความต้านแรงกดของแท่งคอนกรีตบ้าง โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) ใช้การวิเคราะห์แบบ Full Factorial ที่มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดของหินโม่ (A) อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ (B) และประเภทของปูนซีเมนต์ (C) โดยแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) โดยมีระดับของปัจจัยแต่ละชนิด (Factor) ลำดับการทำการทดลองแบบสุ่ม (RunOrder) และค่าผลตอบ (Responses) แสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ค่าต้านทานแรงกดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

StdOrder	RunOrder	A (Size of Millstone)	B (Flyash/Cement Ratio)	C (Type of Cement)	X-Pressure (kN)	Y-Pressure (MPa)
14	1	3/8 inch (+1)	35 % (-1)	Black (+1)	1096	48.71
12	2	3/8 inch (+1)	70 % (+1)	Red (-1)	888	39.47
16	3	3/8 inch (+1)	70 % (+1)	Black (+1)	964	42.84
9	4	3/4 inch (-1)	35 % (-1)	Red (-1)	958	42.58
11	5	3/4 inch (-1)	70 % (+1)	Red (-1)	716	31.82
3	6	3/4 inch (-1)	70 % (+1)	Red (-1)	824	36.62
8	7	3/8 inch (+1)	70 % (+1)	Black (+1)	1018	45.24
2	8	3/8 inch (+1)	35 % (-1)	Red (-1)	1066	47.38
6	9	3/8 inch (+1)	35 % (-1)	Black (+1)	1100	48.89
4	10	3/8 inch (+1)	70 % (+1)	Red (-1)	938	41.69
15	11	3/4 inch (-1)	70 % (+1)	Black (+1)	838	37.24
13	12	3/4 inch (-1)	35 % (-1)	Black (+1)	1038	46.13
1	13	3/4 inch (-1)	35 % (-1)	Red (-1)	904	40.18
7	14	3/4 inch (-1)	70 % (+1)	Black (+1)	916	40.71
10	15	3/8 inch (+1)	35 % (-1)	Red (-1)	940	41.78
5	16	3/4 inch (-1)	35 % (-1)	Black (+1)	972	43.2

ตาราง 4.5 ค่าประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์

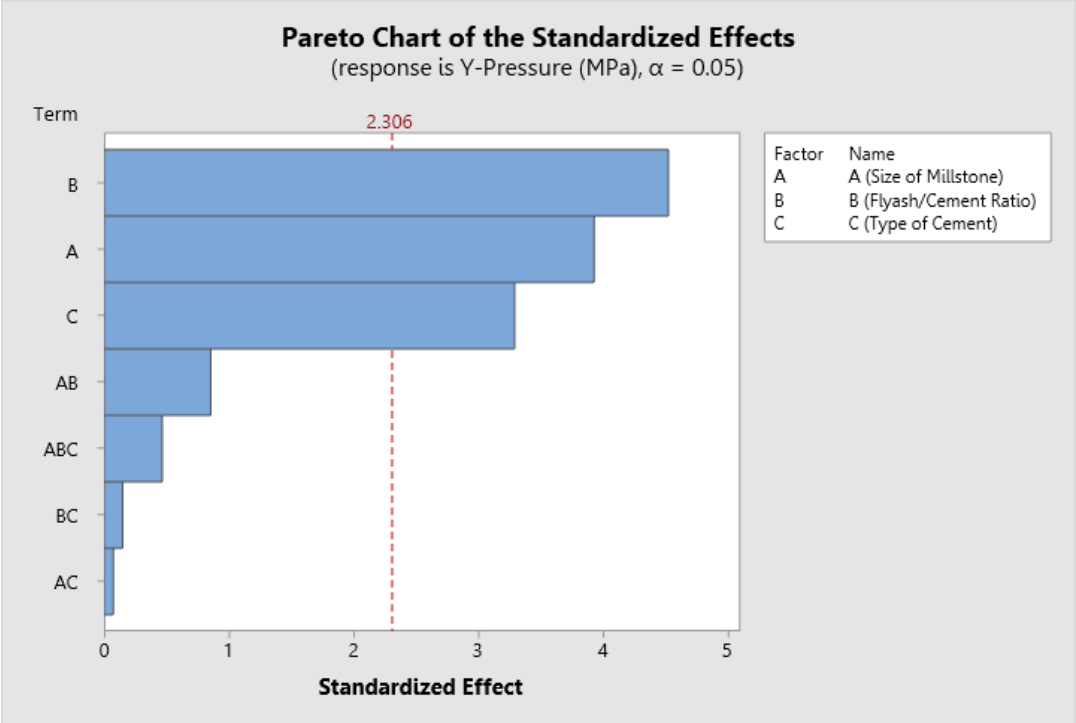
Term	Effect	Coefficients	SE Coefficients	T-Value	P-Value
Constant		42.155	0.598	70.51	0.000
A	4.690	2.345	0.598	3.92	0.004
B	-5.403	-2.701	0.598	-4.52	0.002
C	3.930	1.965	0.598	3.29	0.011
A*B	1.023	0.511	0.598	0.86	0.417
A*C	-0.090	-0.045	0.598	-0.08	0.942
B*C	0.178	0.089	0.598	0.15	0.886
A*B*C	-0.557	-0.279	0.598	-0.47	0.653
	S	R-Square	R-Square (Adj)	R-Square (Pred)	
	2.39148	85.61 %	73.01 %	42.42 %	

4.3.1 จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมมินิแทบ สามารถอธิบายผลที่แสดงดังตาราง 4.5 ได้ว่า ปัจจัยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ขนาดของหินโม่ (A) อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ (B) และประเภทของปูนซีเมนต์ (C) เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความแข็งของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถดูได้จากค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ของแต่ละปัจจัยที่มีค่าเท่ากับ 0.004 0.002 และ 0.011 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) ที่ 0.05 ทั้งสามปัจจัย แต่ไม่มีอันตรกิริยา (Interactions) ใดที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของแท่งคอนกรีต เนื่องจากไม่มีค่าสัดส่วนความน่าจะเป็น (P-Value) ของอันตรกิริยาใดที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) ที่ 0.05 โดยสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) มาทำการเขียนเป็นแบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model) ได้ดังสมการ 2

$$\hat{y} = 42.155 + 2.345\,X_A - 2.701\,X_B + 1.965\,X_C + 0.51\,X_{AB} - 0.045\,X_{AC} + 0.089\,X_{BC} - 0.279\,X_{ABC} \quad (2)$$

โดย $\hat{y}$ = ค่าจากการทดสอบแรงกด (MPa)

X = ตัวแปรของปัจจัยที่สามารถปรับค่าสูง-ต่ำได้ (-1 ,+1)



ภาพ 4.1 แผนภูมิพาเรโตแสดงระดับนัยสำคัญของแต่ละปัจจัย

จากภาพ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าผลกระทบที่แสดงในรูปของกราฟแท่งของปัจจัย A B และ C มีค่าสูงกว่าเส้นระดับนัยสำคัญที่ 2.306 ที่ระดับนัยสำคัญ (Alpha) เท่ากับ 0.05 และจะสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัย A B และ C เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ แต่ปัจจัยร่วม A*B A*C B*C และ A*B*C ซึ่งมีค่าผลกระทบต่ำกว่าเส้นระดับนัยสำคัญที่ 2.306 และมีค่าสัดส่วนความน่าจะเป็น (P-Value) ที่สูงกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยร่วม A*B A*C B*C และ A*B*C เป็นปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญหรือมีผลกระทบในระดับต่ำ จึงควรพิจารณาเพื่อตัดปัจจัยร่วมเหล่านี้ออกเพื่อลดความซับซ้อนลง

4.3.2 การแก้ไขแบบจำลอง โดยการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก และทำการวิเคราะห์เฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จะทำให้ได้แบบจำลองใหม่ที่ทำการแก้ไขแล้วดังสมการ 3

$$\hat{y} = 42.155 + 2.345\,X_A - 2.701\,X_B + 1.965\,X_C \qquad (3)$$

โดย $\hat{y}$ = ค่าจากการทดสอบแรงกด (MPa)

X = ตัวแปรของปัจจัยที่สามารถปรับค่าสูง-ต่ำได้ (-1 ,+1)

4.3.3 ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองหลังจากทำการตัดปัจจัยที่มีผลกระทบในระดับต่ำออก (Appropriateness) เนื่องจากการแก้ไขแบบจำลองอาจส่งผลให้แบบจำลองไม่มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง จึงอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องได้หากนำแบบจำลองไปไปใช้จริง จึงควรทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน โดยสามารถดูได้จากค่า R-Square และ R-Square (Adjust) ดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ความเพียงพอของข้อมูลของแบบจำลอง

S	R-Square	R-Square (Adjust)	R-Square (Pred)
2.06835	83.85 %	79.81 %	71.29 %

จากตาราง 4.6 แสดงถึงค่าร้อยละของความแปรปรวนทั้งหมดของชุดข้อมูลจากการทดลอง (R-Square) ที่มีค่าเท่ากับ 83.85 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแปรปรวนของแบบจำลองที่ทำการปรับปรุง (R-Square Adjust) ที่มีค่าเท่ากับ 79.81 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และดูจากค่าสัดส่วนความน่าจะเป็น (P-Value) ของค่าความเหมาะสมของรูปแบบเชิงเส้น (Lack of Fit) ดังตาราง 4.7 ที่มีค่าเท่ากับ 0.905 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) ที่มีค่าเท่ากับ 0.05 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้ทำการตัดปัจจัยที่ส่งผลกระทบในระดับต่ำนี้มีความเหมาะสม สามารถนำไปใช้ได้

ตาราง 4.7 ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	266.512	88.837	20.77	0.000
Linear	3	266.512	88.837	20.77	0.000
A	1	87.984	87.984	20.57	0.001
B	1	116.748	116.748	27.29	0.000
C	1	61.780	61.780	14.44	0.003
Error	12	51.337	4278		
Lack of Fit	4	5.584	1.396	0.24	0.905
Pure Error	8	45.753	5.719		
Total	15	317.849			

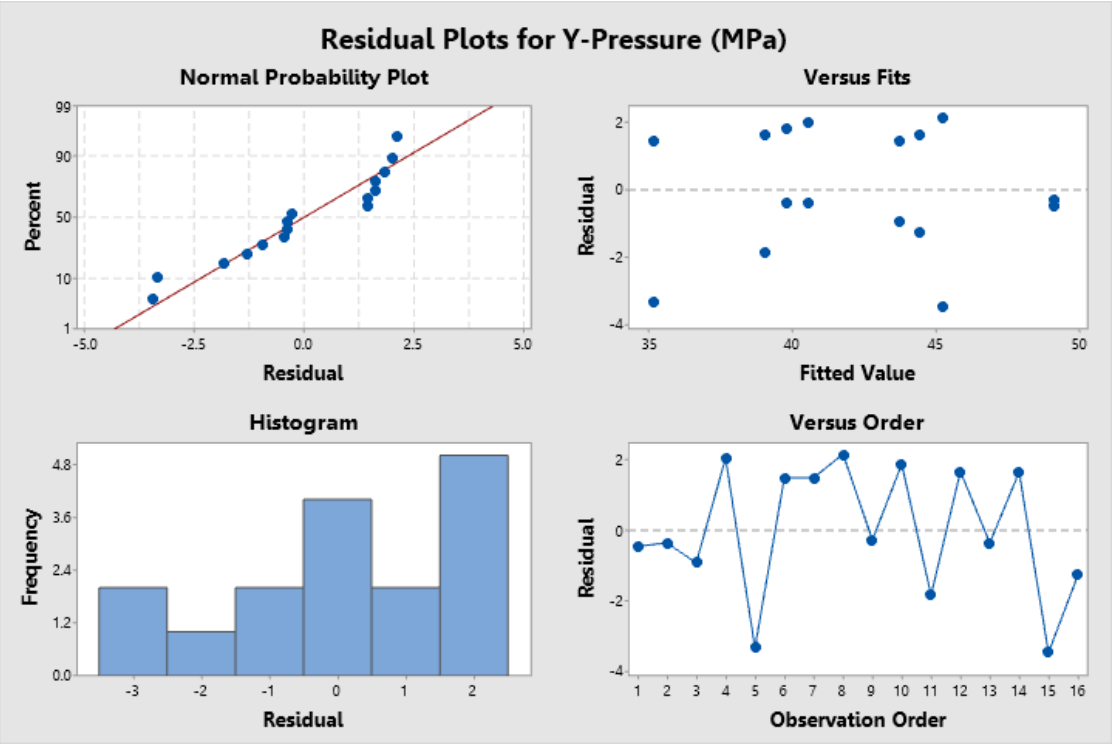
4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลที่ส่งผลต่อค่าต้านทานแรงอัด สามารถอธิบายได้ว่า

1) การวิเคราะห์แบบปกติของส่วนตกค้างกราฟ (Normal Probability) เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวที่เป็นปกติจากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นปกติเนื่องจากกลุ่มของข้อมูลมีการกระจายใกล้เส้นแกน จึงสามารถบ่งบอกได้ว่าข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เพียงพอในจำนวนหนึ่งแต่ควรจะมีการทดลองซ้ำเพิ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือให้มากขึ้นเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

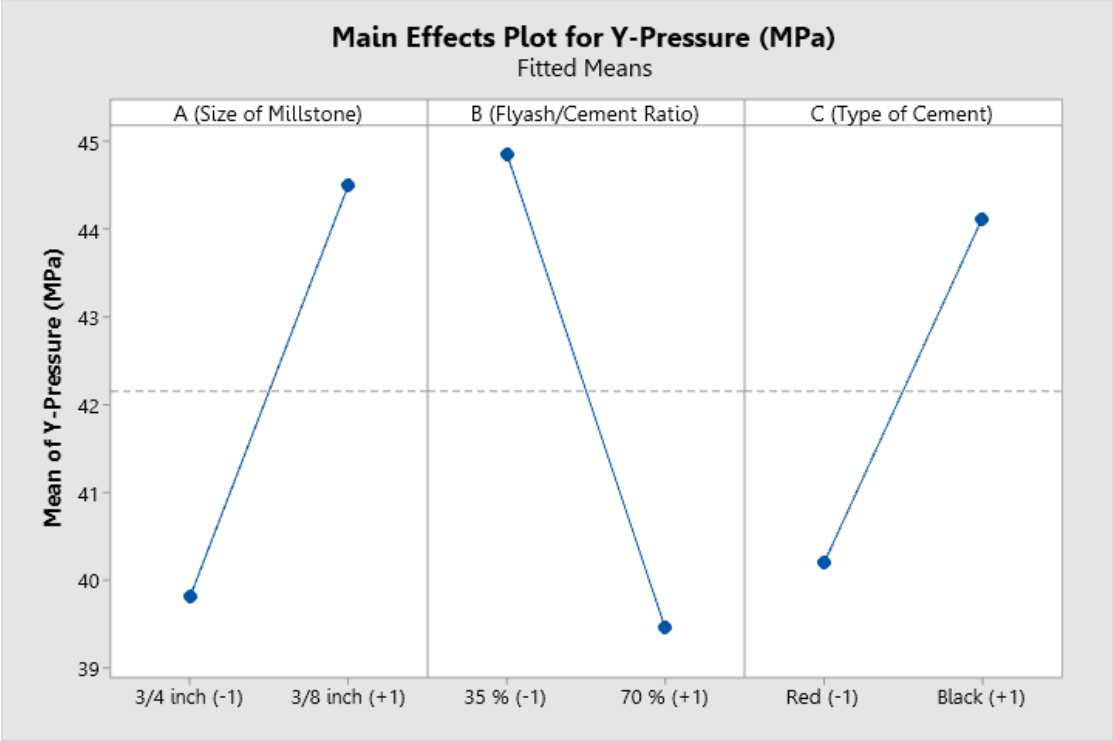
2) กราฟการกระจายตัว (Histogram of the Residuals) พบว่ามีการกระจายตัวของส่วนตกค้างแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

3) การวิเคราะห์ส่วนค้างค่าทำนาย (Residuals versus the Fitted Value) เพื่อตรวจดูค่าความแปรปรวนของข้อมูลจากกราฟลักษณะกราฟมีลักษณะพบว่าไม่มีแนวโน้มซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระดับปัจจัยมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย

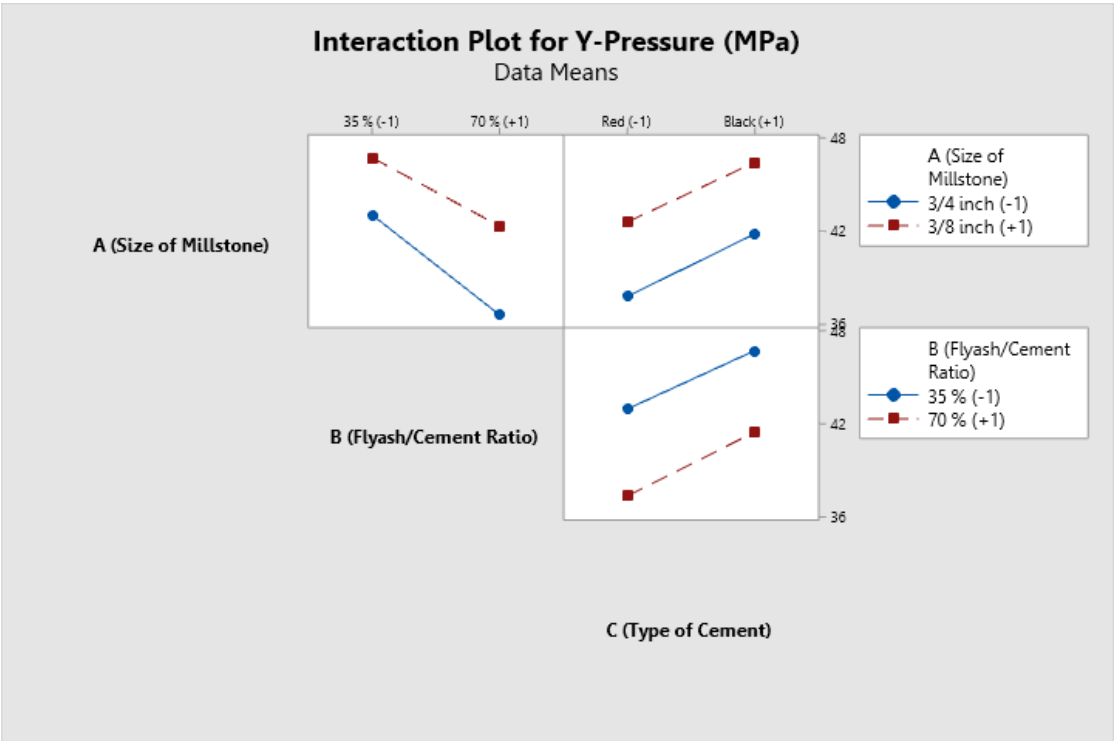
4) การวิเคราะห์ส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Residuals versus Order) เพื่อตรวจดูลักษณะของกราฟว่ามีแนวโน้มหรือรูปแบบอื่นของข้อมูลที่สามารถทำการคาดเดาได้หรือไม่ จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่ากราฟไม่มีแนวโน้มที่สามารถทำการคาดเดาได้ ดังภาพ 4.2



ภาพ 4.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของค่าผลตอบจากการทดสอบ (Residual Plots)



ภาพ 4.3 Main Effects Plot



ภาพ 4.4 Interaction Plot

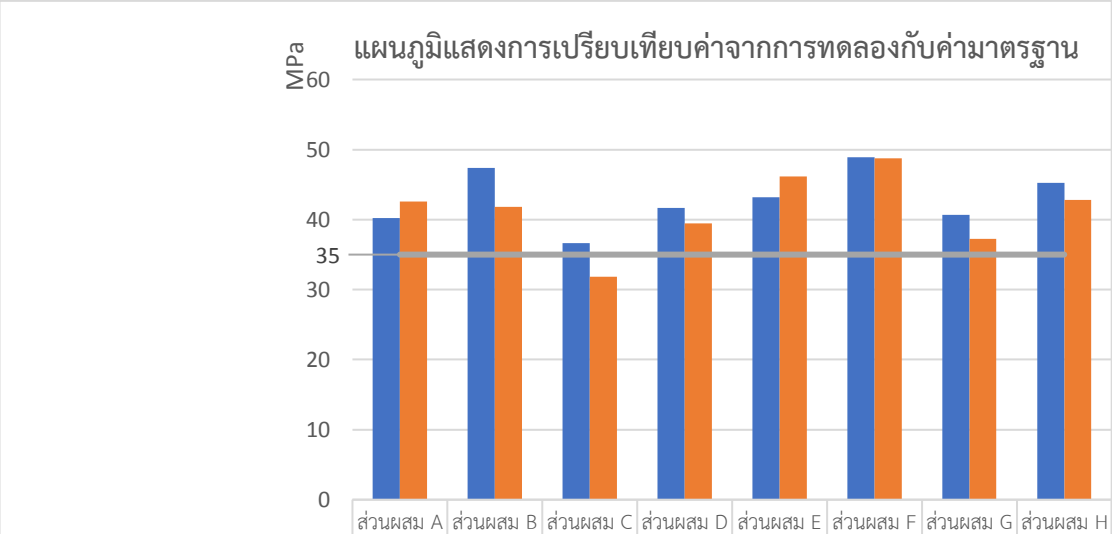
จากภาพ 4.3 และ 4.4 แสดงระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของแท่งคอนกรีตโดยจะทำการเลือกระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ได้ค่าผลตอบที่มีค่าสูงสุดดังนี้ ปัจจัย A และ C เลือกระดับสูง (+1) และ ปัจจัย B เลือกระดับต่ำ (-1) โดยจากภาพ 4.4 จะเห็นได้ว่าปัจจัยแต่ละประเภทดังตาราง 4.8 จะส่งผลซึ่งกันและกันในระดับที่ต่ำมากหรือส่งผลกับค่าความแข็งแรงของแท่งคอนกรีตเพียงเล็กน้อย

ตาราง 4.8 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสม
ขนาดของหินโม่ (A)	3/8 นิ้ว (+1)
ร้อยละเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ (B)	35 เปอร์เซ็นต์ (-1)
ประเภทของปูนซีเมนต์ (C)	ประเภท 1 ปูนดำ (+1)

4.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับค่ามาตรฐาน

หลังจากที่ได้อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ประกอบด้วยระดับของปัจจัยดังตาราง 4.8 จึงนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเรื่องท่อคอนกรีต (มอก 128-2549) ที่กำหนดไว้ว่า ค่าทดสอบความต้านแรงกดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศ์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 35 เมกะพาสคาล (MPa) ดังภาพ 4.5 โดยนำค่าทดสอบความต้านทานแรงกดที่ได้จากแต่ละระดับการทดลอง โดยนำมาหาค่าหาเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัยทั้งซ้ำ 1 และซ้ำ 2 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านแรงกดเฉลี่ยที่มากที่สุดเท่ากับ 48.89 เมกะพาสคาล (MPa) และผ่านมาตรฐาน มอก 128-2549 มาผลิตท่อคอนกรีต



	ส่วนผสม A	ส่วนผสม B	ส่วนผสม C	ส่วนผสม D	ส่วนผสม E	ส่วนผสม F	ส่วนผสม G	ส่วนผสม H
ค่าเฉลี่ยแรงกดซ้ำที่ 1	40.18	47.38	36.62	41.69	43.2	48.89	40.71	45.24
ค่าเฉลี่ยแรงกดซ้ำที่ 2	42.58	41.78	31.82	39.47	46.13	48.71	37.24	42.84
ค่าที่กำหนดตาม มอก.128-2549	35	35	35	35	35	35	35	35

ภาพ 4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับมาตรฐาน

4.5 การผลิตท่อคอนกรีตอัดแรงเพื่อทดสอบระดับปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ใน Minitab

หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม MINITAB แล้ว จะได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ลำดับการทดลองทั้งหมด 16 การทดลองเพื่อนำระดับปัจจัยที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ไปทำการทดลองผลิตท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร โดยทำการทดลองด้วยปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าดีที่สุด คือ ขนาดหินโม่ 3/8 นิ้ว อัตราส่วนเถ้าลอยเทียบปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ประเภท 3 หรือปูนแดง และขั้นตอนทำการทดสอบดังตาราง 4.9 แล้วทดสอบค่าแรงอัดแตกได้ในดังตาราง 4.10

ตาราง 4.9 แสดงขั้นตอนในการผลิตท่อคอนกรีต

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
1. กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ	1. รถตักขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร 2. เครื่องเชื่อมโครงเหล็ก	1.ใช้รถตักขนาดความจุ 1 ลูกบาศก์เมตรตักหินโม่ขนาดและทรายหยาบแม่น้ำไปใส่ไว้ในยุ้งเก็บหินทรายโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่อง คือช่องเก็บหินและช่องเก็บทราย 2. เชื่อมโครงเหล็กที่จะนำไปใส่เป็นไส้ท่อคอนกรีต
2. กระบวนการชั่งตวงวัตถุดิบ	1. กระบะชั่งน้ำหนักหินและทราย 2. ถังชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์และเถ้าลอย 3. ระบบควบคุมการชั่งน้ำหนักอัตโนมัติ 4. สกรูลำเลียงปูนซีเมนต์ 5. สกรูลำเลียงเถ้าลอย 6. ประตูปิด-เปิดช่องเก็บหินและทราย	1. ทำการตั้งค่าน้ำหนักของวัตถุดิบในระบบชั่งอัตโนมัติตามอัตราส่วนที่ต้องการ 2. เมื่อกดปุ่มสั่งงานระบบชั่งจะสั่งการไปส่วนต่างต่างให้ทำการชั่งวัตถุดิบตามน้ำหนักที่ได้ตั้งค่าไว้ 3. ระบบจะหยุดทำงานเมื่อได้น้ำหนักของวัตถุดิบแต่ละชนิดครบตามกำหนด

ตาราง 4.9 แสดงขั้นตอนในการผลิตท่อคอนกรีต (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
3. กระบวนการลำเลียงวัตถุดิบสู่เครื่องผสมคอนกรีต	1. สายพานลำเลียงหินและทราย 2. ลิ้นเปิดถังชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าลอย 3. ปั๊มน้ำขนาด 1/2 แรงม้า	1. กดปุ่มสั่งงานระบบลำเลียงวัตถุดิบ ทรายและหินจะถูกลำเลียงโดยสายพานลำเลียงสู่โม่ของเครื่องผสมคอนกรีต ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจะถูกปล่อยจากถังชั่งที่อยู่เหนือตัวโม่ และน้ำจะถูกลำเลียงจากถังพักสู่ตัวโม่ด้วยปั๊มน้ำที่มีการตั้งเวลาของการจ่ายไว้
4. กระบวนการคลุกเคล้าส่วนผสม	1. เครื่องผสมคอนกรีตขนาด 1/2 ลูกบาศก์เมตร	1. หลังจากส่วนผสมทุกอย่างถูกลำเลียงสู่โม่ของเครื่องผสมคอนกรีตแล้ว เครื่องผสมคอนกรีตจะทำหน้าที่คลุกเคล้าส่วนผสมทุกอย่างให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยใบกวน 4 ใบที่ยึดอยู่บนเพลาหมุนโดยใช้เวลาโดยประมาณ 10 นาที
5. กระบวนการลำเลียงคอนกรีตจากเครื่องผสมสู่ถังพักคอนกรีต	1. สายพานลำเลียงคอนกรีตสู่ถังพักคอนกรีต	1. หลังจากที่ได้ส่วนผสมที่คลุกเคล้ากันอย่างสมบูรณ์ก็จะถูกลำเลียงไปสู่ถังพักคอนกรีตโดยสายพานลำเลียง

ตาราง 4.9 แสดงขั้นตอนในการผลิตท่อคอนกรีต (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
6. กระบวนการอัดขึ้นรูปท่อคอนกรีต 	1. แม่พิมพ์ท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร 2. มอเตอร์สั่นสะเทือน จำนวน 4 ตัว 3. ระบบอัดไฮดรอลิค	1. ทำการปล่อยคอนกรีตลงสู่แม่พิมพ์ 2.เปิดระบบสั่นสะเทือนซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตสามารถไหลลงไปในแม่พิมพ์ได้รวดเร็วขึ้น และไล่ฟองอากาศผสมอยู่ในตัวเนื้อของคอนกรีตออกไป 3. ประกบแม่พิมพ์ในส่วนของปากท่อเข้ากับแม่พิมพ์หลัก จากนั้นใช้ฮดรอลิค กดลงบนแม่พิมพ์เพื่อให้ได้รูปร่างตามแบบและให้เนื้อคอนกรีตอัดกันแน่นมากขึ้น 4. ดันชิ้นงานท่อออกจากแม่พิมพ์ด้วยระบบไฮดรอลิคที่ติดตั้งอยู่บริเวณใต้แม่พิมพ์ โดยให้ตัวชิ้นงานท่อลอยพ้นขอบแม่พิมพ์
7. กระบวนการขนย้ายท่อคอนกรีต 	1. รถเข็นสำหรับขนย้ายท่อคอนกรีต	1. ใช้รถเข็นสำหรับขนย้ายท่อยกชิ้นงานท่อขึ้น จากนั้นจะเข็นท่อที่ขึ้นรูปแล้วไปวางตั้งไว้เพื่อรอการเซ็ตตัวของคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตาราง 4.9 แสดงขั้นตอนในการผลิตท่อคอนกรีต (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
8. กระบวนการจัดเก็บท่อคอนกรีต 	1. รถโฟล์คลิฟท์ขนาด 4 ตัน	1. ใช้รถโฟล์คลิฟท์ขนย้ายท่อคอนกรีตไปวางไว้บริเวณที่ได้จัดเตรียมไว้ เพื่อรอการนำไปทดสอบ

ตาราง 4.10 ขั้นตอนในการทดสอบท่อคอนกรีต

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
1. กระบวนการจัดเตรียม 	1. รถโฟล์คลิฟท์ขนาด 4 ตัน 2. รอกไฟฟ้าขนาด 5 ตัน	1. ใช้รถโฟล์คลิฟท์ขนย้ายท่อคอนกรีตที่จะทำการทดสอบมาวางไว้บริเวณที่จะทำการทดสอบ 2. ใช้รอกไฟฟ้ายกท่อคอนกรีตขึ้นวางบนแท่นรับแรงกด ให้ท่อสัมผัสกับกับแท่นตลอดทั้งท่อน จากนั้นวางแท่นกดลงบริเวณกึ่งกลางของท่อ

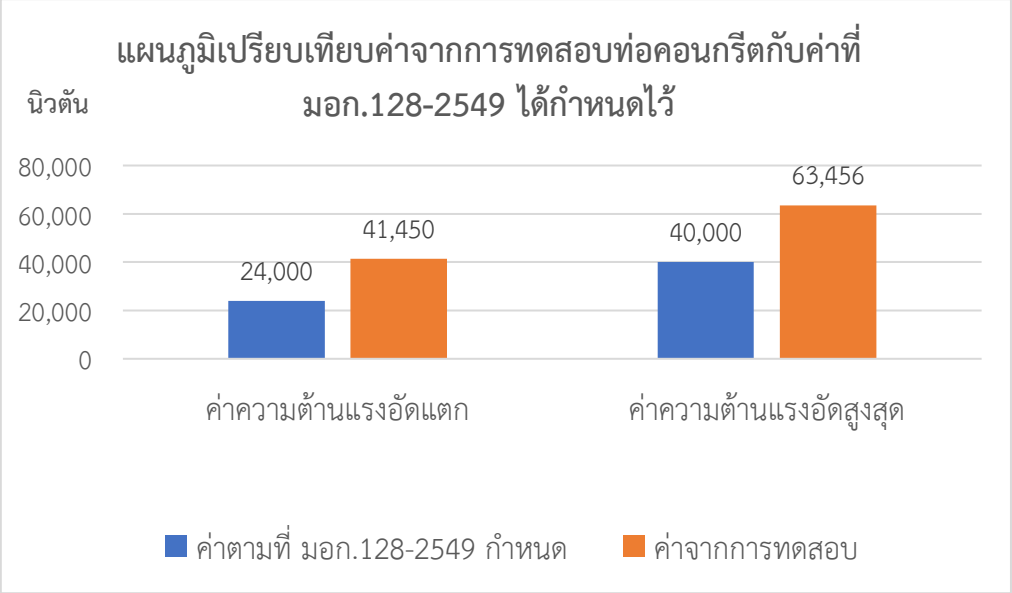
ตาราง 4.10 ขั้นตอนในการทดสอบท่อคอนกรีต (ต่อ)

กระบวนการ	อุปกรณ์	วิธีการทำ
2. กระบวนการทดสอบความแข็งของท่อคอนกรีต	1. เครื่องทดสอบแรงกดสำหรับท่อคอนกรีตขนาด 300-1,500 มิลลิเมตร	1. เริ่มทำการให้แรงกดลงบนท่อโดยเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งตรวจพบรอบแตกบนผิวท่อ ทำการจดบันทึกค่าน้ำหนักกดเป็นค่าความต้านแรงอัดแตก แล้วทำการเพิ่มน้ำหนักกดอย่างต่อเนื่องจนท่อถึงจุดสูงสุดที่สามารถรับแรงได้ โดยจะสังเกตุได้จากค่าที่แสดงบนหน้าปัดแสดงผลจะเริ่มลดลง จดบันทึกเป็นค่าความต้านแรงกดสูงสุด

ตาราง 4.11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบท่อคอนกรีต

ค่าแรงอัดขณะแตก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)(kg/cm²)	ค่าความต้านแรงอัดแตก (นิวตัน) (N)	ค่าแรงอัดสูงสุด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) (kg/cm²)	ค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (นิวตัน) (N)
55	41,450	80	63,456

จากผลการทดลองดังตาราง 4.11 สามารถยืนยันผลของการทดลองด้วยปัจจัยที่ดีที่สุดได้ เนื่องจาก ค่าความต้านแรงอัดแตกมีค่าเท่ากับ 41,450 นิวตัน ซึ่งมากกกว่า 24,000 นิวตัน ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.)128-2549 และค่าความต้านแรงอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 63,456 นิวตัน ซึ่งมากกกว่า 40,000 นิวตัน ดังภาพ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงอัดแตก และค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด กับค่าทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.)128-2549 สรุปได้ว่า สามารถใช้ผลที่ได้จากการทดสอบค่าต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์จากระดับปัจจัยของแต่ละการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง มาทำการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ได้ผลการทดสอบท่อคอนกรีตที่มีค่าความต้านแรงอัดแตก และค่าความต้านแรงอัดสูงสุด ที่ผ่านเงื่อนไขของมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.) 128-2549



ภาพ 4.6 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าทดสอบท่อคอนกรีต

บทที่5

สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาส่วนผสมที่เหมาะสมให้การผลิตท่อคอนกรีตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองโดยมุ่งเน้นให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตท่อคอนกรีต โดยออกแบบการทดลอง DOE ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการดำเนินงาน ปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน และข้อเสนอในการทำโครงงาน

5.1 สรุปผลการทำงาน

จากการทดลองพบว่าการออกแบบการทดลองในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองโดยมีการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองออกเป็น 3 ปัจจัยโดยมีปัจจัยละ 2 ระดับคือ 2^3 คือ 8 การทดลองซึ่งประกอบด้วย ขนาดของหินโม่ อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ และประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำรวมเป็น 16 การทดลอง ในการเตรียมการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์นั้นจะผลิตออกมาในอัตราส่วนที่คิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักประกอบด้วย หินโม่ 38 เปอร์เซ็นต์ ทราย 38 เปอร์เซ็นต์ ปูนซีเมนต์+เถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ (โดยเทียบเป็นร้อยละของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์รวมกัน) และน้ำ 4 เปอร์เซ็นต์โดยทำการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ในการทดลองละ 5 ตัวอย่างรวมเป็น 80 ตัวอย่างโดยใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ก่อนทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 28 วันตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ถึงสามารถทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์เมื่อทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดแล้วให้นำค่าที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแต่ละค่าไปแปลงจากหน่วยที่ได้จากเครื่องทดสอบคือกิโลนิวตันเป็นเมกะพาสคัล แล้วจึงนำค่าทดสอบทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบค่าต้านทานแรงอัด ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนและปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ในโปรแกรมมินิแทป โดยได้ผลตอบออกมาคือมีระดับปัจจัยที่ส่งผลอย่าง

มีนัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตแท่งคอนกรีตคือ หินโม่ อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ และชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่า P-Value เท่ากับ 0.004 0.002 และ 0.011 ตามลำดับที่ช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทปที่มีระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์คือการทดลองที่ 6 โดยมีระดับปัจจัยคือ ขนาดหินโม่ 3/8 นิ้ว อัตราส่วนเถ้าลอนแทนที่ปูนซีเมนต์ 35 เปอร์เซ็นต์ และประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (ดำ) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าต้านทานแรงอัดที่ 49.1663 เมกะพาสคัล เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมของลูกปูนที่จะนำไปผลิตท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ยาว 1 เมตรต้องสามารถรับค่าต้านแรงอัดอย่างน้อย 35 เมกะพาสคัลถึงจะสามารถสรุปได้ว่า แท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์นั้นผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมแล้วนำอัตราส่วนที่ผลิตแท่งคอนกรีตนี้ไปผลิตท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตรยาว 1เมตร เพื่อนำไปทดสอบค่าต้านทานแรงอัดแตกของท่อคอนกรีตที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรมมินิแทป

เมื่อทำการทดสอบผลิตท่อคอนกรีตขนาด 40 เซนติเมตรยาว 1 เมตรพบว่าค่าความต้านแรงอัดแตกมีค่าเท่ากับ 41,450 นิวตัน ซึ่งมากกกว่า 24,000 นิวตัน และค่าความต้านแรงอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 63,456 นิวตัน ซึ่งมากกกว่า 40,000 นิวตัน ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 128-2549 จึงสามารถสรุปได้ว่า การทดลองนั้นสามารถยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองโดยใช้ค่าความต้านแรงอัดแตกที่เป็นเงื่อนไขของการผลิตท่อคอนกรีตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 128-2549

5.2 ข้อเสนอแนะ

อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองนี้ มีค่าผลจากการทดสอบที่สูงกว่าค่าตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ค่อนข้างมาก และยังเป็นอัตราส่วนผสมที่มีต้นทุนที่สูงที่สุด เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มีต้นทุนที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เช่น หินโม่ขนาด 3/8 นิ้วที่มีต้นทุนที่สูงกว่าหินโม่ขนาด 3/4 นิ้ว ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ปูนดำที่ใช้มีต้นทุนที่สูงกว่าปูนแดง เป็นต้น ส่วนผสมที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์คอนกรีตประเภทอื่นที่ต้องการค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าท่อคอนกรีต เช่น เสาไฟฟ้า หรือคานสะพาน เป็นต้น จึงขอเสนอว่า ในการผลิตท่อคอนกรีตควรเลือกค่าความแข็งแรงที่มีค่ามากกว่าค่าที่ทางมาตรฐานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ แต่มีต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต่ำที่สุดเป็นหลัก จึงจะสามารถผลิตท่อคอนกรีตให้ได้ตามมาตรฐาน (มอก.128-2549) และยังช่วยลดต้นทุนทางการผลิตท่อคอนกรีตได้

5.3 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

ปัญหาที่พบและวิธีการดำเนินการแก้ไขสามารถสรุปได้ดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

ปัญหาและอุปสรรคที่พบ	แนวทางการแก้ไขปัญหา
แม่พิมพ์ของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดลองที่มีขนาดที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน มีโอกาสทำให้ค่าผลตอบเกิดความคลาดเลื่อนได้	ใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากการวัดจริงของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์แต่ละชิ้นมาใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีตที่มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

บริษัท ทีพีไอ โพลิน “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์”.[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา บริษัท ทีพีไอโพลิน จำกัด (มหาชน).https://www.tpipolene.co.th/th/cement-th/structural/item. (4 ตุลาคม 2562)

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ“ชนิดและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์”.[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ.http://www.saranukromthai.or.th/sub.(4ตุลาคม 2562)

บุรฉัตรฉัตรวีระ.“การออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ”.[ระบบออนไลน์ แหล่งที่มาวารสารวิทยาศาสตร์.ภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ,2538 (9 กันยายน 2562)

วีระชัย อารีรักษ์ “การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จโดยวิธีซิก ซิกม่า”.[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2560

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบ

ตาราง ก-1 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 1

รหัสชิ้นงาน	วันที่ผลิต (ว/ด/ป)	วันที่ทดสอบ (ว/ด/ป)	ขนาดหิน (นิ้ว)	ชนิดปูนซีเมนต์	ร้อยละเถ้าลอย	ค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)
A1	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	1,000
A2	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	820
A3	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	1,000
A4	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	850
A5	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	950
B1	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	740
B2	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	810
B3	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	890
B4	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	860
B5	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	820
C1	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	850
C2	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	1,150
C3	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	950
C4	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	1,000
C5	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	910
D1	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	900
D2	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	1,030
D3	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	720
D4	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	950
D5	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	980

ตาราง ก-1 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 1 (ต่อ)

รหัสชิ้นงาน	วันที่ผลิต (ว/ด/ป)	วันที่ทดสอบ (ว/ด/ป)	ขนาดหิน (นิ้ว)	ชนิดปูนซีเมนต์	ร้อยละเถ้าลอย	ค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)
E1	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	1,240
E2	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	1,180
E3	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	900
E4	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	940
E5	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	1,070
F1	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	860
F2	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	1,090
F3	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	950
F4	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	840
F5	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	950
G1	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,170
G2	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,180
G3	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,030
G4	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,100
G5	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,020
H1	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,000
H2	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,160
H3	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,000
H4	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,070
H5	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	860

ตาราง ก-2 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 2

รหัสชิ้นงาน	วันที่ผลิต (ว/ด/ป)	วันที่ทดสอบ (ว/ด/ป)	ขนาดหิน (นิ้ว)	ชนิดปูนซีเมนต์	ร้อยละเถ้าลอย	ค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)
A1	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	960
A2	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	940
A3	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	870
A4	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	1,020
A5	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	35	1,000
B1	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	670
B2	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	730
B3	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	710
B4	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	770
B5	8/11/62	5/12/62	3/4	แดง	70	700
C1	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	980
C2	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	900
C3	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	1,160
C4	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	1,070
C5	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	35	1,080
D1	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	860
D2	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	770
D3	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	890
D4	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	940
D5	8/11/62	5/12/62	3/4	ดำ	70	730

ตาราง ก-2 ตารางแสดงผลการวัดค่าแรงกดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงกด ซ้ำที่ 2 (ต่อ)

รหัสชิ้นงาน	วันที่ผลิต (ว/ด/ป)	วันที่ทดสอบ (ว/ด/ป)	ขนาดหิน (นิ้ว)	ชนิดปูนซีเมนต์	ร้อยละเถ้าลอย	ค่าความต้านแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)
E1	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	880
E2	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	910
E3	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	1,030
E4	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	990
E5	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	35	890
F1	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	780
F2	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	740
F3	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	1,020
F4	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	970
F5	8/11/62	5/12/62	3/8	แดง	70	930
G1	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,010
G2	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,050
G3	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,140
G4	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,130
G5	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	35	1,150
H1	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	920
H2	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	910
H3	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,100
H4	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	860
H5	8/11/62	5/12/62	3/8	ดำ	70	1,030

ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล : นายชิงเยี่ยม พัฒนศิษฏางกูร

รหัสนักศึกษา : 570612064

วัน เดือน ปี เกิด : 10 พฤศจิกายน 2537

ประวัติการศึกษา: กำลังศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

ที่อยู่ปัจจุบัน : 256 หมู่ 3 ตำบล ดู่ใต้ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน 55000

เบอร์โทรศัพท์ : 064-3342999

ชื่อสกุล : นายณภัทร เกิดกล้า

รหัสนักศึกษา : 590612054

วัน เดือน ปี เกิด : 7 เมษายน 2540

ประวัติการศึกษา: กำลังศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

ที่อยู่ปัจจุบัน : 4/20 ถ.วรวิชัย ตำบล ในเวียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน 55000

เบอร์โทรศัพท์ : 093-2407982