Chulalongkorn University
Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2023

การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน

ปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd

Part of the Civil Engineering Commons, and the Construction Engineering and Management Commons

Recommended Citation
บุญเลิศนิรันดร์, ปิยวัฒน์, "การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน" (2023). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 10261.
https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/10261

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน

นายปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

MACHINE LEARNING BASED APPROACHES FOR ULTIMATE COMPRESSION CAPACITY PREDICTION OF CONCRETE FILL DOUBLE SKIN STEEL TUBE COLUMNS (CFDST)

Mr. Piyawat Boonlertnirun

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty Of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน
โดย	นายปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒสกุล)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์ไชย ธนาพรรวีกิตติ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์ : การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน. (MACHINE LEARNING BASED APPROACHES FOR ULTIMATE COMPRESSION CAPACITY PREDICTION OF CONCRETE FILL DOUBLE SKIN STEEL TUBE COLUMNS (CFDST)) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาวัสดุผสมท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านใน (Concrete Filled Double Skin Steel Tube Columns) หรือ CFDST โดยใช้ความสามารถในการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และค้นหาอัลกอริทึมที่ให้ความแม่นยำมากที่สุดนำมาสร้างโมเดลในการทำนายและเปรียบเทียบความแม่นยำกับการออกแบบมาตรฐาน (Standard Design Code) โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR : Gaussian Process Regression) และเอกตรีมกาเดียนบูสติ่ง (XGBoost : Extreme Gradient Boosting) เป็นอัลกอริทึมหลักและใช้ข้อมูลจากการทดสอบจริงในอดีตและจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS มาเป็นชุดข้อมูลในการฝึกฝนโมเดล โดยข้อมูลนำเข้าประกอบไปด้วย เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกและด้านใน ความหนาท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วันจากการทดสอบโดยกดลูกปูนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 300 มิลลิเมตร กำลังครากของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน และ ความสูงของเสาวัสดุผสม ข้อมูลนำออกคือ กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาวัสดุผสม โดยการสร้างโมเดลสำหรับทำนายกำลังจะแบ่งออกเป็น 2 โมเดลคือโมเดลเสาสั้นและโมเดลเสายาวเนื่องจากพฤติกรรมการวิบัตินั้นแตกต่างกันและเกณฑ์ที่ใช้แบ่งคืออัตราส่วนความชะลูด ผลการทดสอบพบว่าโมเดลเสาสั้นที่ใช้ข้อมูลทั้งหมด 122 ชุดข้อมูล อัลกอริทึมเอกตรีมกาเดียนบูสติ่งให้ความแม่นยำมากกว่ากระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนและการออกแบบมาตรฐาน ขณะที่โมเดลเสายาวที่ใช้ชุดข้อมูลทั้งหมด 181 ชุดข้อมูล ผลการทดสอบพบว่า เอกตรีมการ์เดียนบูสยังคงให้ความแม่นยำมากกว่ากระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนและการออกแบบมาตรฐานเช่นกัน

สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2566	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

6472051421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORD: CFDST, Gaussian process regression (GPR), XGBoost

Piyawat Boonlertnirun : MACHINE LEARNING BASED APPROACHES FOR ULTIMATE COMPRESSION CAPACITY PREDICTION OF CONCRETE FILL DOUBLE SKIN STEEL TUBE COLUMNS (CFDST). Advisor: Assoc. Prof. SAWEKCHAI TANGARAMVONG

This paper presents the machine learning-based methods that construct the accurate model prediction for the maximum compression capacity responses of concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns under uniaxial compression forces. The so-called surrogate-assisted model is generated from the set of training data collected from available experimental results. The dataset is classified into two classes, namely the behaviors of short (section failure) and long (member failure) CFDST columns. Two machine learning, including gaussian process regression (GPR) and extreme gradient boosting (XGBoost), methods are encoded in this study. The input data considers geometry (i.e., external and internal diameters/thicknesses of steel tubes, and column length) and material properties (concrete compressive strength, and yield strengths of external/internal steel tubes) of the columns. The output data is the maximum compression capacity of the CFDST columns. The total training datasets comprise of 122 data from the short column tests and 181 data from the long column tests. The surrogate-assisted models determine the accurate uniaxial compression strengths for both short and long CFDST columns, where the good comparisons with relevant standard design specifications are evidenced. Both long and short columns responses given by the XGboost model are more accurate than those performed by the GPR approach.

Field of Study:	Civil Engineering	Student's Signature ....
Academic Year:	2023	Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือจาก รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย รศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒสกุล ประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.กันต์ไชย ธนาพรรวีกิตติ์ กรรมการสอบ นายอาณัติ สุธา นิสิตปริญญาเอก และ ดร.รัฐ ซู ที่ให้คำปรึกษา ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้โอกาสในการศึกษาแก่ผู้ทำวิจัย

ปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญตาราง .... ฌ

สารบัญรูปภาพ .... ญ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

ที่มาและความสำคัญ 1

วัตถุประสงค์ 1

ขอบเขตการวิจัย 1

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

แผนงานการวิจัย 2

บทที่ 2 3

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

พฤติกรรมของท่อเหล็ก 3

พฤติกรรมของคอนกรีต 5

การทำนายกำลังโดยวิธีการดัดแปลงจาก AISC 5

การทำนายกำลังโดยวิธีการดัดแปลงจาก EC4 8

การทำนายกำลังจากการสร้างโมเดลโดยการเรียนรู้ของเครื่อง 9

อัลกอริทึม Gaussian Processes Regression 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลักการทำงาน Gaussian Processes Regression 10
อัลกอริทึม Extreme Gradient Boosting 11
การวัดผลความแม่นยำ 12
การสร้างชุดข้อมูลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม 13
การคาดการณ์ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของวัสดุ 14
บทที่ 3 18
ระเบียบวิธีวิจัย 18
กล่าวนำ 18
การแปลงค่ากำลังของคอนกรีต 19
การจำแนกเสาสั้นและเสายาวของเสา CFDST สำหรับสร้างโมเดล 19
ข้อมูลจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus 20
การสร้างโมเดลสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST 23
บทที่ 4 25
ผลการศึกษา 25
การทำงานของอัลกอริทึม Gaussian Process Regression 25
การทำงานของอัลกอริทึม Extreme Gradient Boosting 26
ผลการศึกษา 27
ผลการวิจัยของโมเดลเสาสั้น 28
ผลการวิจัยของโมเดลเสายาว 31
บทที่ 5 36
สรุปและอภิปรายผล 36
สรุปการวิจัย 36
ข้อเสนอแนะ 36
การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการทำนายกำลังของเสา CFDST 37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ... 41
ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสายาว ... 41
ผลการทำนายของโมเดลเสายาว ... 48
ผลการทำนายของโมเดลเสาสั้น ... 59
เปรียบเทียบผลจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus กับผลการทดสอบจริง ... 63
บรรณานุกรม ... 65
ประวัติผู้เขียน ... 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์การแบ่งหน้าตัดชะลูด 6

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST........ 18

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ในการแปลงกำลังคอนกรีตแต่ละขนาดโมล 19

ตารางที่ 4 Plasticity properties สำหรับ abaqus 21

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสำหรับเสาสั้น........ 28

ตารางที่ 6 แสดงผลความแม่นยำของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลเสาสั้น........ 28

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสำหรับเสายาว 32

ตารางที่ 8 แสดงผลความแม่นยำของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลเสายาว 33

ตารางที่ 9 แสดงช่วงของชุดข้อมูลที่ทำให้ผลทำนายออกมาดีที่สุดสำหรับโมเดลเสาสั้น 37

ตารางที่ 10 แสดงช่วงของชุดข้อมูลที่ทำให้ผลทำนายออกมาดีที่สุดสำหรับโมเดลเสายาว........ 37

ตารางที่ 11 แสดงค่าเหมาะสมสำหรับเสาสั้น 39

ตารางที่ 12 แสดงค่าเหมาะสมสำหรับเสายาว........ 40

ตารางที่ 13 ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสายาว........ 41

ตารางที่ 14 ผลการทำนายของโมเดลเสายาว........ 48

ตารางที่ 15 ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสาสั้น........ 55

ตารางที่ 16 ผลการทำนายของโมเดลเสาสั้น 59

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบผลการหากำลังรับแรงอัดประลัยโดยโปรแกรมกับผลการทดสอบจริง........ 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 หน้าตัดเสาวัสดุผสม CFDST 3

รูปที่ 2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบของท่อเหล็กที่ใช้ทดสอบแรงดึง T.Ekmekyapar และ H.Ghanim Hasan 2019 4

รูปที่ 3 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบท่อเหล็กเมื่อได้รับแรงดึง X.F.Yan,Y.G.Zhao และ S.Lin 2021 4

รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแบบ Confined และ Unconfined 5

รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของ XGBoost 12

รูปที่ 6 เปรียบเทียบการคาดการณ์กำลังรับแรงอัดของ Confined Concrete และ Unconfined Concrete 14

รูปที่ 7 เปรียบเทียบการคาดการณ์กำลังรับแรงดึงของเหล็ก 17

รูปที่ 8 แสดงภาพหน้าตัดเสา CFDST 18

รูปที่ 9 แสดงชนิดเมสและขนาดเมสของแต่ละส่วนประกอบ 20

รูปที่ 10 แสดงลักษณะการยึดรั้งของการรองรับแรงกดเสา CFDST 21

รูปที่ 11 แสดงลักษณะการวิบัติของเสา CFDST 22

รูปที่ 12 แสดงการรับน้ำหนักจากการจำลองของเสา CFDST 23

รูปที่ 13 แผนภาพแสดงการฝึกฝนชุดข้อมูลของการเรียนรู้ของเครื่อง 23

รูปที่ 14 แผนภาพแสดงการทำนายชุดข้อมูลใหม่ของเสา CFDST 24

รูปที่ 15 แผนภาพการทำงานของโมเดล GPR 25

รูปที่ 16 แผนภาพการทำงานของโมเดล XGBoost 26

รูปที่ 17 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาสั้น 29

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 18 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน AISC สำหรับเสาสั้น 29

รูปที่ 19 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม GPR สำหรับเสาสั้น 30

รูปที่ 20 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม XGBoost สำหรับเสาสั้น ... 30

รูปที่ 21 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของค่าจากการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus 31

รูปที่ 22 แผนภาพแสดงอัตราส่วนระว่างค่าจากการทดลองจริงกับค่าจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus 32

รูปที่ 23 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสายาว 33

รูปที่ 24 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน AISC สำหรับเสายาว 34

รูปที่ 25 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม XGBoost สำหรับเสายาว .. 34

รูปที่ 26 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม GPR สำหรับเสายาว 35

รูปที่ 27 แสดงค่าเหมาะสมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ของอนุภาค เสาสั้น............................ 39

รูปที่ 28 แสดงค่าเหมาะสมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ของอนุภาค เสายาว 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโครงสร้างวัสดุผสมได้รับความนิยมอย่างมากในงานประเภทอาคารสูง สะพาน โครงสร้างขนาดใหญ่ในประเทศไทย เนื่องจากก่อสร้างได้ง่าย ใช้เวลาในการก่อสร้างไม่นานและใช้แรงงานน้อยกว่าโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ยังพบปัญหาในการทำนายหรือคาดการณ์กำลังที่ใช้ออกแบบโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากมีความสลับซับซ้อนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องทำให้วิศวกรออกแบบได้ค่อนข้างช้าและยังมีความแม่นยำที่ไม่มากนัก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเล่มนี้ ที่จะใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการเรียนรู้กำลังรับแรงของโครงสร้างวัสดุผสม โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับอัดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสม (CFDST : Concrete Filled Double Skin Steel Tube) โดยจะใช้อัลกอริทึมกระบวนถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR : Gaussian Process Regression) [1] และเอกตรีมกาเดียนบูสติ่ง (XGBoost : Extreme Gradient Boosting) [2] ในการสร้างโมเดลในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาวัสดุผสม CFDST และนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำกับมาตราฐานการออกแบบ (Standard Design Code) ได้แก่ AISC และ EC4 ข้อดีของการทำนายด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Model) คือสามารถทำนายได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วัตถุประสงค์

1. สร้างแบบจำลองเพื่อช่วยให้วิศวกรออกแบบเสาวัสดุผสม CFDST ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ
2. เพื่อเสนออัลกอริทึมที่มีความแม่นยำมากที่สุดกับชุดข้อมูลสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาวัสดุผสม CFDST

ขอบเขตการวิจัย

การสร้างโมเดลทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาวัสดุผสม CFDST จากการใช้ความสามารถในการเรียนรู้ของเครื่อง โดยงานวิจัยนี้จะใช้ 2 อัลกอริทึมในการสร้างโมเดล ได้แก่ กระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR Gaussian Process Regression) และ เอกตรีมกาเดียนบูสติ่ง (XGBoost :

Extreme Gradient Boosting) และเปรียบเทียบความแม่นยำกับมาตรฐานการออกแบบ (Standard Design Code) เช่น AISC และ EC4 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2: Coefficient of Determination) ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE : Mean Square Error) รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE : Root Mean Square Error) ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD : Mean Absolute Deviation) หรือ (MAE : Mean Absolute Error) เป็นตัววัดความแม่นยำ โดยการสร้างโมเดลของเสา CFDST จะถูกแบ่งออกเป็น 2 โมเดล คือ เสาสั้นและเสายาว เนื่องจากมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่แตกต่างกันและใช้ความชะลูดเป็นเกณฑ์การแบ่ง

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนเครื่อง (Training Data) จะใช้ข้อมูลจากการทดลองจริงในอดีตและจากการจำลองโดยคอมพิวเตอร์โปรแกรมโดยจะมีตัวแปรต้น คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเหล็กด้านนอก เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กด้านใน ความหนาของท่อเหล็กด้านนอก ความหนาเหล็กด้านใน กำลังรับแรงครากของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต f’c ที่วัดจากการกดลูกปูนทรงกระบอกขนาด 150x300 มิลลิเมตร ที่ 28 วัน ชุดข้อมูลที่วัดจากลูกปูนขนาดอื่นจะถูกแปลงโดยการใช้ตัวคูณเพิ่มลด ตัวแปลตามคือ กำลังรับแรงอัดประลัยของเสาวัสดุผสม CFDST

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้โมเดลทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST ที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว
2. ได้อัลกอริทึมที่มีความแม่นยำและเหมาะสมกับชุดข้อมูลในการทำนายกำลังของเสา CFDST

แผนงานการวิจัย

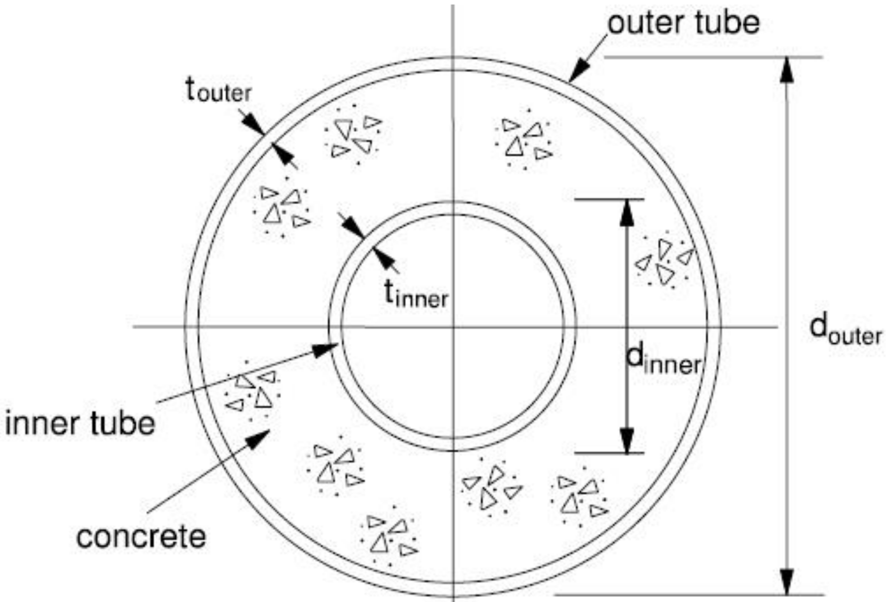
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง งานวิจัย และรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเพื่อนำมาใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกฝน
2. ศึกษาการเขียนโปรแกรม Python และกระบวนการสร้าง Machine Learning
3. สร้างแบบจำลองและแผนภาพการทำงาน
4. ทดสอบแบบจำลอง ประเมินและวัดผลการทดสอบ
5. สรุปผลการทำนายและวิเคราะห์ความแม่นยำ

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เสาวัสดุผสม CFDST ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นท่อเหล็กและคอนกรีตดังรูปที่ 1 ทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาชนิดนี้เกิดจากส่วนที่เป็นเหล็กและคอนกรีต โดยพฤติกรรมของคอนกรีตจะเป็นลักษณะ Confined Concrete เนื่องจากถูกโอบรัดด้วยท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน



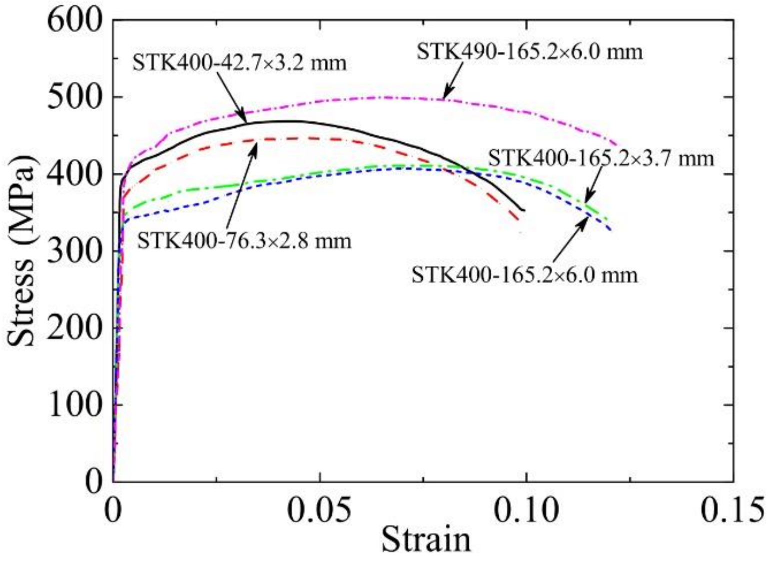
รูปที่ 1 หน้าตัดเสาวัสดุผสม CFDST

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พฤติกรรมของท่อเหล็ก

ท่อเหล็กที่นำมาใช้ในการก่อสร้างเสา CFDST มีหน้าที่เพิ่มความเหนียวให้กับเสาและยังทำให้พฤติกรรมของคอนกรีตเป็น Confined Concrete ซึ่งจะอธิบายต่อในย่อหน้าถัดไป โดยท่อเหล็ก เดิมทีจะเป็นแผ่นเหล็กและถูกนำมาม้วน เชื่อมปิดให้เป็นลักษณะท่อเหล็ก โดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็ก จะทำโดยตัดชิ้นส่วนของแผ่นเหล็กแสดงดังรูปที่ 2 และนำมาวัดขนาดพื้นที่รับแรงดึง หลังจากนั้นนำมาทดสอบ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยมีพฤติกรรมดังรูปที่ 3

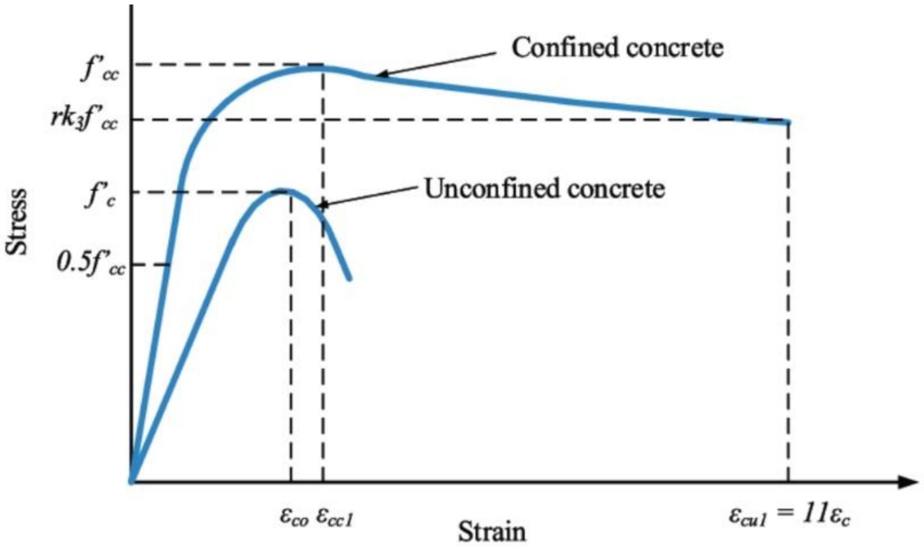
รูปที่ 2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบของท่อเหล็กที่ใช้ทดสอบแรงดึง T.Ekmekyapar และ H.Ghanim Hasan 2019



รูปที่ 3 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบท่อเหล็กเมื่อได้รับแรงดึง X.F.Yan,Y.G.Zhao และ S.Lin 2021

พฤติกรรมของคอนกรีต

คอนกรีตในเสาวัสดุผสม CFDST ที่กล่าวมาข้างต้นจะมีพฤติกรรมเป็นแบบ Confined Concrete เนื่องจากถูกโอบรัดทุกทิศทางโดยท่อเหล็กและจุดรองรับ Support ทำให้คอนกรีตสามารถรองรับน้ำหนักได้มากกว่าปกติ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Confined Concrete เปรียบเทียบกับ Concrete ปกติแสดงดังรูป 4



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแบบ Confined และ Unconfined

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทำนายกำลังโดยวิธีการดัดแปลงจาก AISC

สมการ AISC เดิมทีเป็นการอธิบายเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ถ้าต้องการนำมาใช้กับเสาวัสดุผสม CFDST จำเป็นต้องดัดแปลงสมการ จากเดิมเป็นเหล็กเส้นต้องเปลี่ยนมาเป็นท่อเหล็กรอบนอกและรอบใน โดย AISC มีข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตและเหล็กระบุไว้ดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาวัสดุผสม
2. อัตราส่วนของพื้นที่เหล็กต่อพื้นคอนกรีตต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.004
3. เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภท คือ เสาหน้าตัดอัดแน่น เสาหน้าตัดไม่อัดแน่น เสาหน้าตัดชะรูดโดยสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์การแบ่งหน้าตัดชะลูด				
ชิ้นส่วน	λ	λp	λr	λสูงสุด
ท่อกลมกลวง	D/t	0.07E/Fy	0.11E/Fy	0.45E/Fy

สำหรับเสาหน้าตัดอัดแน่น $\lambda \leq \lambda_p$ รับโมเมนต์

สำหรับเสาหน้าตัดไม่อัดแน่น $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ รับโมเมนต์

สำหรับเสาหน้าตัดชะลูด $\lambda > \lambda_r$ แรงอัด

สำหรับงานวิจัยนี้ เสาที่ไม่ได้รับโมเมนต์ดัด หรือเสาที่ไม่ได้รับแรงเยื้องศูนย์ ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงหน้าตัดอัดแน่นและไม่อัดแน่น แต่ความชะลูดของส่วนประกอบหน้าตัดจำเป็นต้องนำมาพิจารณา ถ้าพบว่าส่วนประกอบของหน้าตัดมีความชะลูด จำเป็นต้องมีการปรับแก้พื้นที่ของหน้าตัด

สมการสำหรับประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของเสา CFDST

กรณีเสาเป็นหน้าตัดไม่ชะลูด

กรณีที่ 1 $P_e < 0.44P_o$

$$(P_u)_{AISC} = 0.877P_e \tag{1}$$

กรณีที่ 2 $P_e \geq 0.44P_o$

$$(P_u)_{AISC} = P_o\left[0.658^{\frac{P_o}{P_e}}\right] \tag{2}$$

โดยที่ Po และ Pe สามารถคำนวณได้จากสมการ (3,4) fsyo และ fsyi คือกำลังรับแรงคราก ของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน Aso และ Asi คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน f_c’ และ A_c คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตตามลำดับ K สำหรับเสายาวที่ใช้ Pined Support มีค่าเท่ากับ 1, L คือความยาวของเสาที่ไม่มีค้ำยัน EIeff สามารถคำนวณได้จากสมการ (5) โดยที่ Eso , Esi คือ Elastic Modulus ของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน และ Ecm สามารถคำนวณได้จากสมการ (6) Kc คำนวณจากสมการ (7) และมีค่ามากสุดเท่ากับ 0.9 ในขณะที่ Wc คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 2300-2500 kg/m^3

$$P_o = f_{syo}A_{so} + 0.95f_c'A_c + f_{syi}A_{si} \tag{3}$$

$$P_e = \frac{\pi^2(EI)_{eff}}{(KL)^2} \tag{4}$$

$$EI_{eff} = E_{so}I_{so} + K_cE_{cm}I_c + E_{si}I_{si} \tag{5}$$

$$E_{cm} = w_c^{1.5}0.043\sqrt{f_c'} \tag{6}$$

$$K_c = 0.6 + 2\left(\frac{A_{so}}{A_c + A_{so}}\right) \leq 0.9 \tag{7}$$

กรณีเสาเป็นหน้าตัดชะลูด

กรณีหน้าตัดชะลูดจำเป็นต้องมีการจำเป็นต้องมีการปรับแก้พื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่มีความชะลูดซึ่งในที่นี้หมายถึงหน้าตัดของท่อเหล็กและสามารถปรับแก้ได้ตามสมการดังนี้

กรณีที่ 1 $\frac{D}{t} \leq 0.11\frac{E}{F_y}$

$$A_e = A_g \tag{8}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กรณีที่ 2 $0.11\frac{E}{F_y} \leq \frac{D}{t} \leq 0.45\frac{E}{F_y}$

$$A_e = \left[\frac{0.038E}{F_y(D/t)} + \frac{2}{3}\right]A_g \tag{9}$$

โดยที่ Ae และ Ag คือ หน้าตัดท่อเหล็กประสิทธิผลหลังจากการปรับแก้และพื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กเดิมตามลำดับ E คือ โมดูลัสอิลาสติกของเหล็ก และ Fy คือกำลังรับแรงครากของท่อเหล็ก เมื่อปรับแก้แล้วให้นำพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลไปคำนวณต่อในสมการดังกรณีที่หน้าตัดไม่ชะลูด

การทำนายกำลังโดยวิธีการดัดแปลงจาก EC4

สมการจาก EUROCODE4 เดิมทีเป็นสมการสำหรับเสาหล่อคอนกรีตในท่อเหล็กชั้นเดียว (CFST: Concrete Filed Steel Tubular) สำหรับ CFDST ต้องมีการดัดแปลงในการเพิ่มท่อเหล็กด้านใน ซึ่งมีกฎเกณฑ์การใช้ เช่น ค่าของ δ ต้องอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.9 และค่า D/t ต้องมีค่าไม่เกิน 90x(235/f_y) โดยที่ δ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$Steel\ \mathrm{contribution\ ratio}\ \delta = \frac{A_{so} f_y D}{P_{pl,Rd}} \tag{10}$$

สามารถจำแนกสมการได้เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 $\bar{\lambda} \leq 0.5$

$$(P_u)_{EC4} = n_a f_{syo} A_{so} + f'_c A_c \left[1 + n_c \left(\frac{t_o}{D_o}\right)\left(\frac{f_{syo}}{f'_c}\right)\right] + n_a f_{syi} A_{si} \tag{11}$$

กรณีที่ 1 $\bar{\lambda} > 0.5$

$$(P_u)_{EC4} = f_{syo} A_{so} + f'_c A_c + f_{syi} A_{si} \tag{12}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ n_a และ n_c คือ ตัวคูณลดเนื่องจากความหนาของผิวสัมผัสระหว่างท่อเหล็กและคอนกรีต และคำนวณได้จากสมการ (13,14)

$$n_a = 0.25(3 + 2\bar{\lambda}) \leq 1.0 \tag{13}$$

$$n_c = 4.9 - 18.5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \geq 0 \tag{14}$$

ขณะที่ $\bar{\lambda}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15) Pcr คำนวณจากสมการ (17) และ EIeff คำนวณจากสมการ (18) โดยที่ Kc = 0.6

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{P_{pl,Rd}}{P_{cr}}} \tag{15}$$

$$P_{pl,Rd} = f_{syo}A_{so} + 0.85f_c'A_c + f_{syi}A_{si} \tag{16}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2(EI)_{eff}}{(KL)^2} \tag{17}$$

$$EI_{eff} = E_{so}I_{so} + K_cE_{cm}I_c + E_{si}I_{si} \tag{18}$$

$$\emptyset = 0.5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0.2\right) + \bar{\lambda}^2\right] \tag{19}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \tag{20}$$

หลังจากได้ค่า Pu จากกรณีที่ 1 และ 2 ให้ทำการตรวจสอบค่า χ หากค่า χ มีค่าน้อยกว่า 1 ให้ทำการคูณค่า Pu ที่ได้ χ เป็นสัมประสิทธิ์เนื่องจากความชะรูดของเสา

การทำนายกำลังจากการสร้างโมเดลโดยการเรียนรู้ของเครื่อง

การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) คือ ความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้คณิตศาสตร์มาสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เพื่อสร้างฟังก์ชันในการทำนาย การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) มีหลายอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ โดยแต่ละอัลกอริทึมจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของข้อมูล โดยงานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึม GPR และ XGBoost เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ข้อมูลสำหรับเรียนรู้น้อยและให้ความแม่นยำสูง อีกทั้งยังสามารถสร้างโมเดลที่มีความซับซ้อนของชุดข้อมูลนำเข้าได้ดี

อัลกอริทึม Gaussian Processes Regression

กระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian Processes) เป็นการเรียนรู้ของเครื่องแบบสามารถที่เรียนรู้ได้ด้วยตัวเองโดยการสุ่มในเชิงสถิติ (Probabilistic Supervised Machine Learning) ที่ถูกใช้การอย่างแพร่หลายในงานด้านกระบวนการถดถอย (Regression) และการจำแนก (Classification)

กระบวนการถดถอยเกาส์เซียน (Gaussian Processes Regression) สามารถนำมาทำโมเดลที่ใช้สำหรับการทำนายที่ทำงานร่วมกับเคอร์เนล (Kernel Equation) สำหรับการเรียนรู้การทำงานของกระบวนเกาส์เซียน (Gaussian Processes) จำเป็นต้องทราบพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ เช่น การแจกแจงปกติหลายตัวแปร (Multivariate Normal Distribution) สมการเคอร์เนล (Kernel Equation)

หลักการทำงาน Gaussian Processes Regression

ในกระบวนการถดถอย สมมุติให้เป็น ฟังก์ชัน f ที่ได้มาจากชุดข้อมูล (Dataset) D ซึ่งเดิมทีกระบวนการถดถอยจะเป็นการสร้างฟังก์ชันที่สอดคล้องกับชุดของข้อมูลที่ให้มา อย่างไรก็ตามฟังก์ชันที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลสามารถมีความเป็นไปได้หลายฟังก์ชันซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยมิติของการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (MVN : Multivariate Normal Distribution) จะเป็นค่าอนันต์ ในการสร้างการถดถอยโมเดลสามารถสร้างได้จากสมการที่ (20)

$$\mathrm{P}(\,\mathrm{f}\,|\,\mathrm{X}\,) = N(\,\mathrm{f}\,|\,\mu, \mathrm{K}\,) \tag{20}$$

เมื่อ $X = [\,X_1, X_2, \ldots, X_n\,]$, $f = [f(X_1), \ldots, f(X_n)]$, $\mu = [\,m(X_1), \ldots, m(X_n)\,]$ และ $K_{ij} = k(X_i, X_j)$ โดยที่ X คือ ชุดข้อมูล m คือ ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน และ K คือ เคอร์เนลฟังก์ชัน สำหรับสมการเคอร์เนลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Rational Quadratic สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21)

$$K(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{d(xi, xj)^2}{2 \propto l^2}\right)^{-\propto} \tag{21}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับการทำนายชุดข้อมูลใหม่จะต้องนำข้อมูลที่ต้องการทำนายเข้าไปรวมในสมการที่ 20 โดยการใช้ Joint Distribution ของข้อมูลฝึกฝน f และ ข้อมูลที่ใช้ทำนาย f_* ซึ่งสามารถทำได้โดยสมการ (22)

$$\begin{bmatrix} f \\ f_* \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} m(x) \\ m(x_*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} K & K_* \\ K_*^T & K_{**} \end{bmatrix}\right) \tag{22}$$

เมื่อ $K = K(X,X)$, $K_* = K(X,X_*)$ และ $K_{**} = K(X_*,X_*)$ และค่าเฉลี่ย ($m(X), m(X_*)$) มีค่าเท่ากับ 0 จะสามารถคำนวณค่า f_* ได้โดยสมการ (23)

$$f_*|f, X, X_* \sim N\,(K_*^T K f, K_{**} - K_*^T K^{-1} K_*) \tag{23}$$

ในความเป็นจริง ไม่สามารถที่จะได้ฟังก์ชันจริงจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มตัวแปรที่เรียกว่า สัญญาณรบกวน (Noisy) เพื่อควบคุมการกระจายตัวของฟังก์ชัน การรบกวนเกาส์เซียน (Gaussian noise) σ_n^2 เมื่อนำมารวมกับสมการที่ใช้ในการนำทายข้อมูลใหม่จะได้ดังสมการที่ (24)

$$\begin{pmatrix} y \\ f_* \end{pmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} K + \sigma_n^2 I & K_* \\ K_*^T & K_{**} \end{bmatrix}\right) \tag{24}$$

สำหรับสมการที่ใช้ในการทำนายข้อมูลใหม่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25)

$$\bar{f}_* | X, y, X_* \sim N\ (\bar{f}_*, cov(f_*)) \tag{25}$$

เมื่อ $\bar{f}_*$ และ $cov(f_*)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26) *และ* (27)

$$\bar{f}_* = K_*^T[K + \sigma_n^2 I]^{-1} y \tag{26}$$

$$cov(f_*) = K_{**} - K_*^T[K + \sigma_n^2 I]^{-1} K_* \tag{27}$$

อัลกอริทึม Extreme Gradient Boosting

เอกตรีมการ์เดียนบูสติ่ง (XGBoost : Extreme Gradient Boosting) เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่นิยมอย่างมากในงานที่ชุดข้อมูลเรียนรู้มีตัวแปรอิสระที่มีความสลับซับซ้อนและยังสามารถนำมาสร้างโมเดลที่ใช้ในการทำนายได้อย่างแม่นยำโดยใช้จำนวนชุดข้อมูลไม่มาก โดยอัลกอริทึมเอกตรีมการ์เดียนบูสติ่ง (XGBoost) ถูกพัฒนามาจากการ์เดียนบูสติ่ง (GBM : Gradient Boosting)

หลักการทำงาน เอกตรีมการ์เดียนบูสติ่ง XGBoost

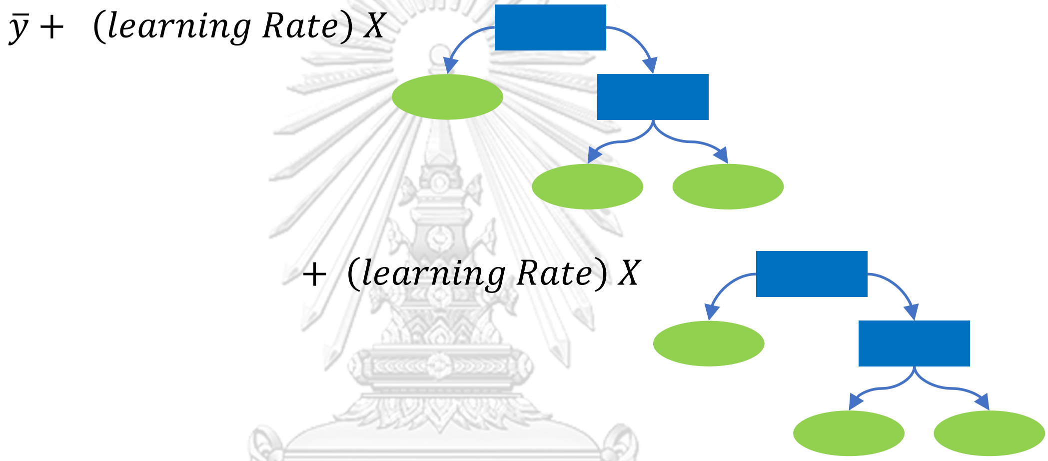
หลักการทำงานของ XGBoost คือ การสร้างต้นไม้ตัดสินใจต่อกันหลายต้น โดยแต่ละต้นจะเรียนรู้จากการผิดพลาด (Residual) ของต้นไม้ตัดสินใจก่อนหน้า โดยการสร้างต้นไม้ตัดสินใจจะใช้ค่า Gain ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (30) เป็นเกณฑ์ในการเลือก Root ดังแผนภาพที่ 5 โดย Learning rate ที่ใช้เท่ากับ 0.2 $\bar{y}$ คือค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST และ γ คือ Regularization เป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยลดค่า Residual ของต้นไม่ตัดสินใจแต่ละต้น เพื่อให้ได้โมเดลที่มีความแม่นยำมากขึ้นและลดการเกิด Over fitting ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$Residual = \bar{y} - p_i \tag{28}$$

$$Similarity\ Score = \frac{(Sum\ of\ Residuals)^2}{Number\ of\ Residuals + \gamma} \tag{29}$$

$$Gain = \sum Similarity\ Score\ of\ leaf - Similarity\ of\ Root \tag{30}$$



รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของ XGBoost

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวัดผลความแม่นยำ

การวัดความแม่นยำค่าที่ได้จากการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST ของแต่ละโมเดล จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2: Coefficient of determination) ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE : Mean Square Error) รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE : Root Mean Square Error) ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD : Mean Absolute Deviation) หรือ (MAE : Mean Absolute Error) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\mathrm{R}^2 = 100\mathrm{x}\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}\right) \tag{31}$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_i')^2 \quad (32)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_i')^2}{N}} \quad (33)$$

$$MAE\ or\ MAD = \frac{\sum_{i=1}^{N}|y_i - y_i'|}{N} \quad (34)$$

โดยที่

y_i คือ ข้อมูลจากการทดลองจริง

y_i' คือ ค่าจากการทำนายโดยโมเดล

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดสอบจริง

N คือ จำนวนชุดข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การสร้างชุดข้อมูลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม

ในการฝึกการเรียนรู้ของเครื่องจำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการเรียนรู้จากการทดสอบจริง เพื่อใช้ในการสร้างโมเดลให้ได้ความแม่นยำใกล้กับกำลังการรับน้ำหนักจริงของเสา แต่ในกรณีที่ข้อมูลที่มีไม่เพียงพอต่อการฝึกฝน จำเป็นต้องมีการสร้างข้อมูลเพิ่มเติม โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Abaqus ในการสร้างแบบจำลองการรับน้ำหนักของเสา CFDST โดยในบทนี้จะพูดถึงการคาดการณ์ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็ก เพื่อใช้ในการระบุคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรม ส่วนระเบียบวิธีการ การตั้งค่าจะอธิบายต่อในบทที่ 3

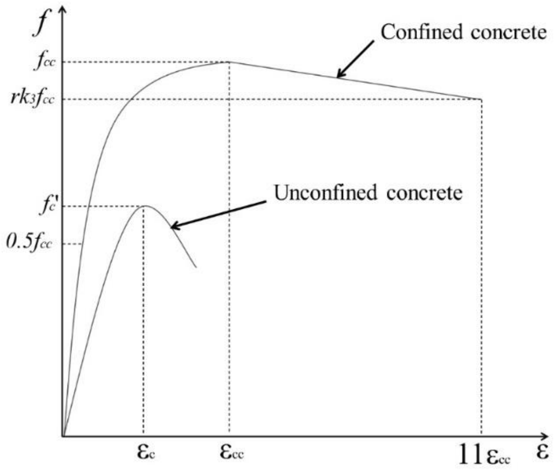
การคาดการณ์ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของวัสดุ

คอนกรีต

ตามที่กล่าวมาข้างต้น พฤติกรรมของคอนกรีตของเสา CFDST จะมีลักษณะเป็น Confined Concrete ทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่ากำลังปกติแบบ Unconfined Concrete และมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 6 ในการจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา CFDST ในโปรแกรม Abaqus จะต้องใส่ค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุสำหรับคอนกรีตที่เป็น Confined Concrete สามารถคาดการณ์กำลังได้จากการนำเสนอของ Mander JB 1928 โดยซึ่งกำหนดไว้ว่าถ้า D_o/t_o มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 คอนกรีตจะมีลักษณะเป็น Confined Concrete กำลังสูงสุดของ Confined Concrete หรือ f_{cc} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 35 โดยที่ f'_c คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต Cylinder ที่ 28 วัน ขณะที่ความเครียดของ Confined Concrete หรือ ε_{cc} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 36 โดยที่ ε_c คือความเครียดของคอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ 0.003 ตามมาตรฐาน ACI

$$f_{cc} = f_c' + k_1 f_1 \tag{35}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c\left(1 + k_1 \frac{f_1}{f'_c}\right) \tag{36}$$



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการคาดการณ์กำลังรับแรงอัดของ Confined Concrete และ Unconfined Concrete

ขณะที่ k1 และ k2 มีค่าเท่ากับ 4.1 และ 20.4 โดยการเสนอของ Richart 1928 ส่วน f1 คือ แรงดันด้านข้างที่ได้จากท่อเหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีโดยคำนวณได้ตามสมการที่ 37 และ 38 เสนอโดย Hu HT 2003 โดยที่ D_O/t_O คืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางกับความหนาท่อเหล็กรอบนอก f_{syo} คือกำลังรับแรงครากของท่อเหล็กรอบนอก

กรณีที่ 1 $21.7 \le D_O/t_O \le 47$

$$f_1 = f_{syo}[0.043646 - 0.000832\left(\frac{D_o}{t_o}\right)] \tag{37}$$

กรณีที่ 2 $47 < D_O/t_O \le 150$

$$f_1 = f_{syo}[0.006421 - 0.000357\left(\frac{D_o}{t_o}\right)] \tag{38}$$

จากรูปที่ 6 จะพบว่าพฤติกรรม Confined Concrete สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เรียกว่า อิลาสติกโซน (Elastic Region) โดยความเค้นจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง $0.5f_{cc}$ ซึ่งถูกเสนอโดย Hu HT 2003 โดยที่ความเครียดจะถูกคำนวณโดย $0.5f_{cc}$/Ecc Ecc คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของ Confined Concrete ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 39 จากมาตรฐาน ACI

$$E_{cc} = 4700\sqrt{f_{cc}} \tag{39}$$

สำหรับส่วนที่ 2 เรียกว่าเป็นพลาสติกโซน (Inelastic Region) ซึ่งความเครียดจะอยู่ระหว่าง $0.5f_{cc}$/Ecc กับ $\mathcal{E}_{cc}$ และความเค้นของ Confined Concrete โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 40 จากการเสนอของ Saenz 1964

$$f' = \frac{E_{cc}\mathcal{E}}{1 + (R + R_E - 2)\left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{cc}}\right) - (2R - 1)\left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{cc}}\right)^2 + R\left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{cc}}\right)^3} \tag{40}$$

โดยที่ $\mathcal{E}$ คือความเครียดในช่วงพาสติกโซน (Inelastic Region) R และ R_E เป็นสัมประสิทธิ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 41 และ 42 กำหนดให้ $R_{\mathcal{E}}$ และ R_{σ} มีค่าเท่ากับ 4 จากการเสนอของ Hu และ Schnobrich

$$R = \frac{R_E(R_\sigma - 1)}{(R_\varepsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\varepsilon} \quad (41)$$

$$R_E = \frac{E_{cc}\varepsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad (42)$$

สำหรับส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่กำลังเริ่มลดลง (Descending region) ซึ่งความเครียดจะอยู่ระหว่าง ε_{cc} กับ $11\varepsilon_{cc}$ และความเค้นสุดท้ายจะมีค่าเท่ากับ rk_3f_{cc} จากการเสนอโดย Hu โดยที่ k3 สามารถคำนวณได้จากสมการ 43 และ 44 โดยที่ r มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ f'c มีค่าน้อยกว่า 125 MPa และมีค่าเท่ากับ 0.5 เมื่อ f'c มีค่ามากกว่า 125 MPa จากการเสนอของ Ellobody และ Young 2006

กรณีที่ 1 $21.7 \le D_o/t_o \le 47$

$$k_3 = 1 \quad (43)$$

กรณีที่ 2 $47 < D_o/t_o \le 150$

$$k_3 = 0.0000339(\frac{D_o}{t_o})^2 - 0.0100085\left(\frac{D_o}{t_o}\right) + 1.3491 \quad (44)$$

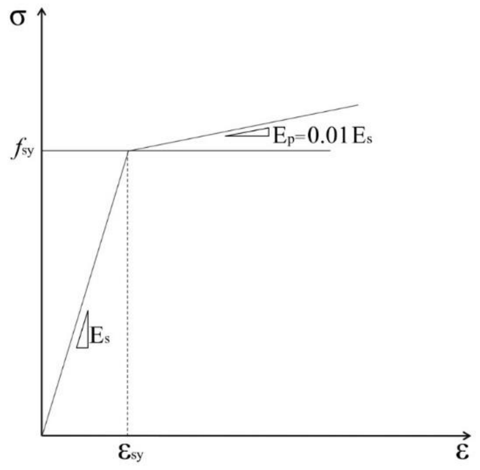
กำลังรับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการ (45) ตามมาตรฐาน

$$f_t = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (45)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เหล็ก

พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กสามารถดูได้จากรูปที่ 3 ในการจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา CFDST ในโปรแกรม Abaqus จะต้องใส่ค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุเช่นเดียวกับคอนกรีต โดย Han และ Huo 2003 ได้เสนอวิธีการคาดการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากกำลังครากของเหล็กดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน



รูปที่ 7 เปรียบเทียบการคาดการณ์กำลังรับแรงดึงของเหล็ก

ส่วนที่ 1 เรียกว่า ส่วนอิลาสติก ความเค้นจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง f_y และความเครียดจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง ε_{sy} โดยหาได้จาก fy/Es และ Es คือ อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กมีค่าเท่ากับ 210000 Mpa ความเค้นในส่วนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 46

โซนที่ 1 $\mathcal{E}_s \leq \mathcal{E}_{sy}$

$$\sigma_e = E_s \mathcal{E}_s \tag{46}$$

ส่วนที่ 2 เรียกว่า ส่วนพลาสติก ความเครียดจะอยู่ระหว่าง ε_{sy} ถึง 0.03 และความเค้นจะอยู่ระหว่าง fy กับ σ_i ที่ความเครียดเท่ากับ 0.03 โมดูลัสพลาสติกมีค่าเท่ากับ $0.01E_s$ โดยความเค้นในส่วนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 47

โซนที่ 2 $\mathcal{E}_s \geq \mathcal{E}_{sy}$

$$\sigma_i = f_y + E_p(\mathcal{E}_s - \mathcal{E}_{sy}) \tag{47}$$

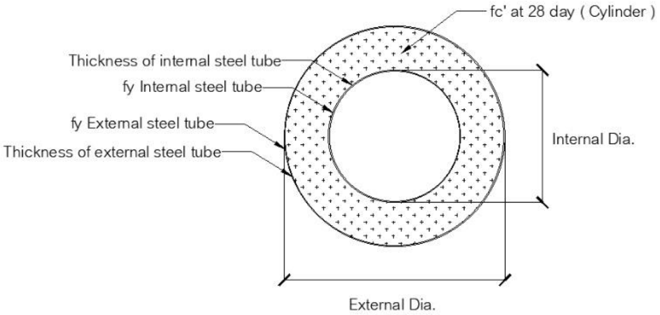
Chulalongkorn University

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

กล่าวนำ

ในการสร้างโมเดลที่ใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST โดยวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) จำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลเพื่อให้อัลกอริทึมใช้เรียนรู้ โดยข้อมูลที่ได้มาจากผลการทดสอบจริงในอดีตและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Abaqus สำหรับเสาวัสดุผสม CFDST การประมาณกำลังรับแรงอัดของเสาขึ้นอยู่ตัวแปรดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 แสดงภาพหน้าตัดเสา CFDST

ตารางแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST	
ตัวแปรต้น In-put	หน่วย Unit
เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก (Ext Dia : External Diameter)	mm
ความหนาของเหล็กรอบนอก (Ext t : Thickness of external steel tube)	mm
กำลังรับแรงครากของเหล็กรอบนอก (fy : External steel tube)	MPa
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (fc’ : at 28 day Cylinder)	MPa
เส้นผ่านศูนย์กลางรอบใน (Int Dia : Internal Diameter)	mm
ความหนาของเหล็กรอบใน (Int t : Thickness of internal steel tube)	mm
กำลังรับแรงครากของเหล็กรอบใน (fy : External steel tube)	MPa
ความสูงเสา (h : Column High)	mm
ตัวแปรตาม Out-put	หน่วย Unit
กำลังรับแรงอัดของเสา CFDST	kN

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การแปลงค่ากำลังของคอนกรีต

ในการรวบรวมชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนจากงานวิจัยจากทั่วโลก ตัวแปรของแต่ละชุดข้อมูลประกอบไปด้วยหน่วยที่แตกต่างกัน ก่อนนำมาใช้งานฝึกฝนการเรียนรู้ของเครื่องจำเป็นต้องแปลงค่าให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันดังตารางที่ 2 สำหรับคอนกรีตสามารถดัดแปลงโดยการคูณด้วยสัมประสิทธ์ดังตารางที่ 3 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ [3]

ตารางที่ 3 สัมประสิทธ์ในการแปลงกำลังคอนกรีตแต่ละขนาดโมล

	Mole Size (mm)	Factor
Cube	100	0.80
	150	0.80
	200	0.83
	300	0.90
Cylinder	Dia150*300	1.00
	Dia100*200	0.97
	Dia200*500	1.05

การสร้างโมเดลสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST จะแบ่งออกเป็น 2 โมเดล คือ โมเดลเสาสั้นและโมเดลเสายาว เนื่องจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักและลักษณะการวิบัติแตกต่างกัน จึงต้องแบ่งชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกฝนโมเดลออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน ถ้าชุดข้อมูลที่มาจากผลการทดสอบในอดีตมีไม่เพียงพอในการฝึกฝนโมเดล จำเป็นต้องสร้างชุดข้อมูลจากการจำลองโดย Computer Software โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Abaqus ดังที่กล่าวไปในบทที่ 2

การจำแนกเสาสั้นและเสายาวของเสา CFDST สำหรับสร้างโมเดล

ความยาวของเสามีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนัก เสาสั้นจะมีลักษณะการวิบัติแบบพังเนื่องจากกำลังของวัสดุ ขณะที่เสายาวจะมีผลจากความชะลูดมาเกี่ยวข้องทำให้การวิบัติเป็นแบบการโก่งเดาะ สำหรับเสาวัสดุผสม CFDST จะใช้ค่าอัตราส่วนความชะลูด Slenderness ratio เป็นเกณฑ์ในการแบ่งเสาสั้นและเสายาว โดยมีสมการดัง (48)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

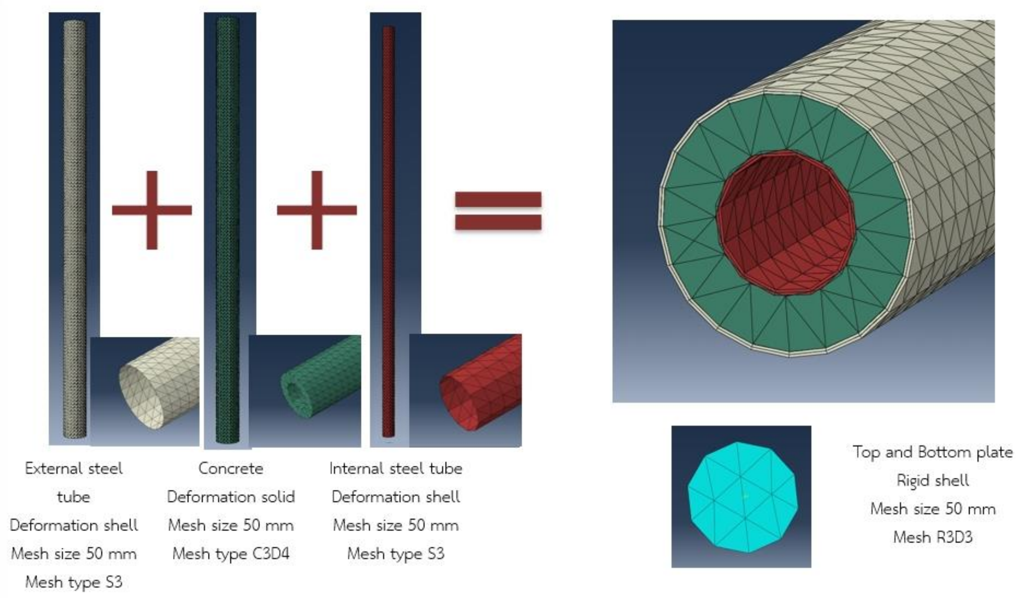
$$\text{Slenderness Ratio} = \frac{Le}{\sqrt{I/A}} \quad (48)$$

โดยเสาสั้นค่า Slenderness Radio มีค่าน้อยกว่า 22 ขณะที่เสายาว Slenderness Radio มีค่ามากกว่า 22 จากการเสนอของ [4]

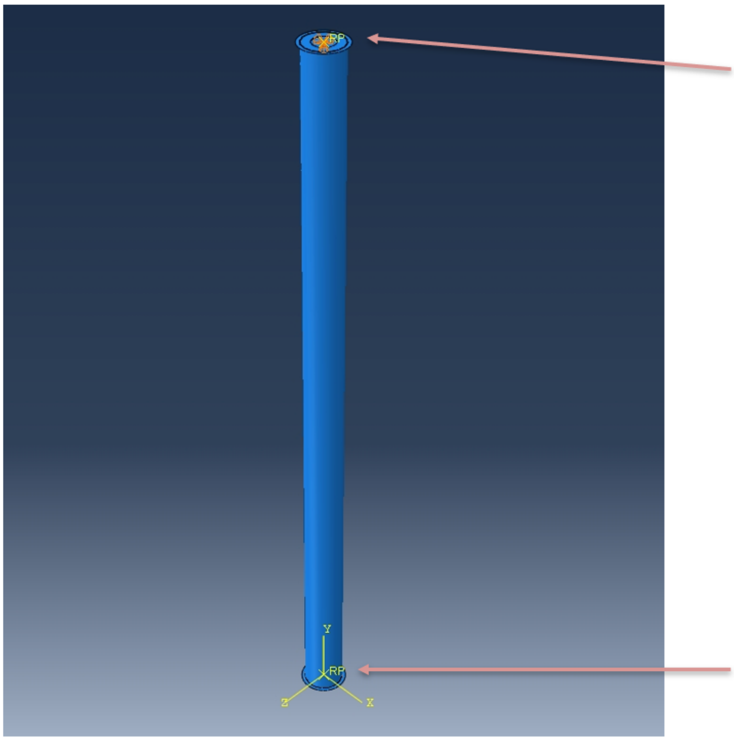
ข้อมูลจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus

การตั้งค่าพื้นฐาน

การจำลองโดยโปรแกรมจะดัดแปลงค่าต่างๆ ตามงานวิจัยของ Zhong Tao ในปี 2013 และ Hassanein ในปี 2014 โดยแบ่งการขึ้นรูปโมเดลออกเป็น 4 ส่วน คือ ท่อเหล็กด้านนอก ท่อเหล็กด้านใน ส่วนที่เป็นคอนกรีต และเป็นแผ่นเหล็กสำหรับกดตัวเสา ดังรูปที่ 8 โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวท่อเหล็กและคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.3 ตามการแนะนำของ Hassanein และกำหนดให้คอนกรีตและแผ่น Plate เป็น Master ขณะที่ท่อเหล็กเป็น Slave และกำหนดขนาดเมสเท่ากับ 50 มิลลิเมตร โดยใช้เมสชนิด C3D4 (The three dimensional, four node , linear tetrahedron solid element) ในส่วนที่เป็นคอนกรีตและใช้เมสชนิด S3 (The three node triangular, general-purpose, finite member strain shell element) ในส่วนที่เป็นท่อเหล็กและแผ่น Plate ในส่วนของเนื้อคอนกรีตจะกำหนดให้เป็น Deformable Solid Element ส่วนท่อเหล็กกำหนดให้เป็น Deformable Shell Element และแผ่นเหล็ก Plate เป็น Rigid Shell Element ลักษณะการยึดหมุนจะเป็นแบบ Pinned Support ทั้งส่วนบนและล่าง



รูปที่ 9 แสดงชนิดเมสและขนาดเมสของแต่ละส่วนประกอบ



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการยึดรั้งของการรองรับแรงกดเสา CFDST

การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

สำหรับคอนกรีต

ในการกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตความหนาแน่นจะใช้เท่ากับ 2.4e-9 N/mm^3 โดยเลือก Mechanical และ Concrete damage plasticity ในช่อง Plasticity จะกำหนดค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4

Plasticity Properties สำหรับ ABUQUS	
Dilation Angle	20
Eccentricity	0.1
Fbo/fco	1.16
K	0.667
Viscosity parameter	0

ตารางที่ 4 Plasticity properties สำหรับ abaqus

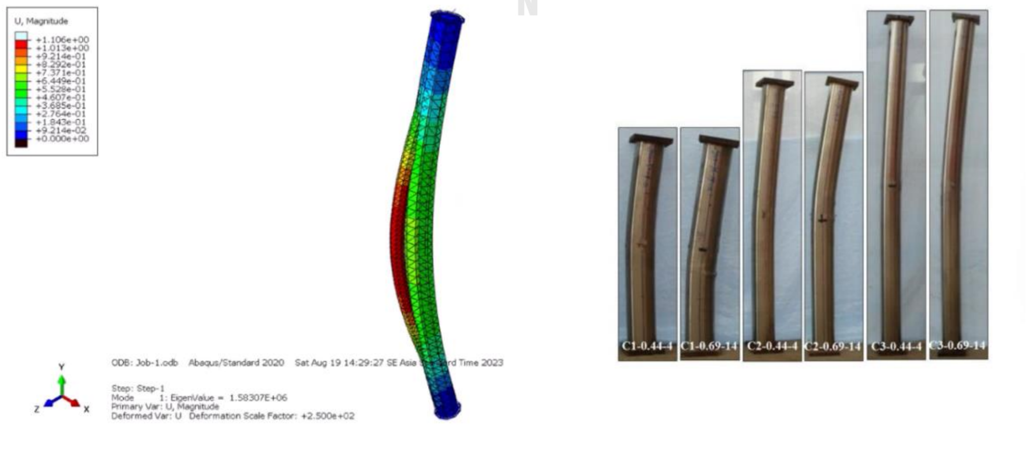
ในช่อง Compressive Behavior จะต้องคำนวณค่า Inelastic Strain และ Yield Strength จากการคาดการณ์พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของคอนกรีตโดยทำได้ตามบทที่ 2 และนำค่าความเค้นและความเครียดตั้งแต่เริ่มเข้าช่วงพลาสติกมาใส่ในช่อง Compressive Behavior โดย Inelastic Strain คำนวณได้จากความเครียดใดๆ ในช่วงพาสติกลบด้วยความเครียด ณ จุดสุดท้ายที่เป็นอิลาสติก (Maximum Elastic Strain) ส่วนในช่อง Tensile Behavior จะใส่ค่า ft ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 45 ลงในช่อง Yield Strength และ Checking Strain คำนวณได้จาก ft/Ecc

สำหรับเหล็ก

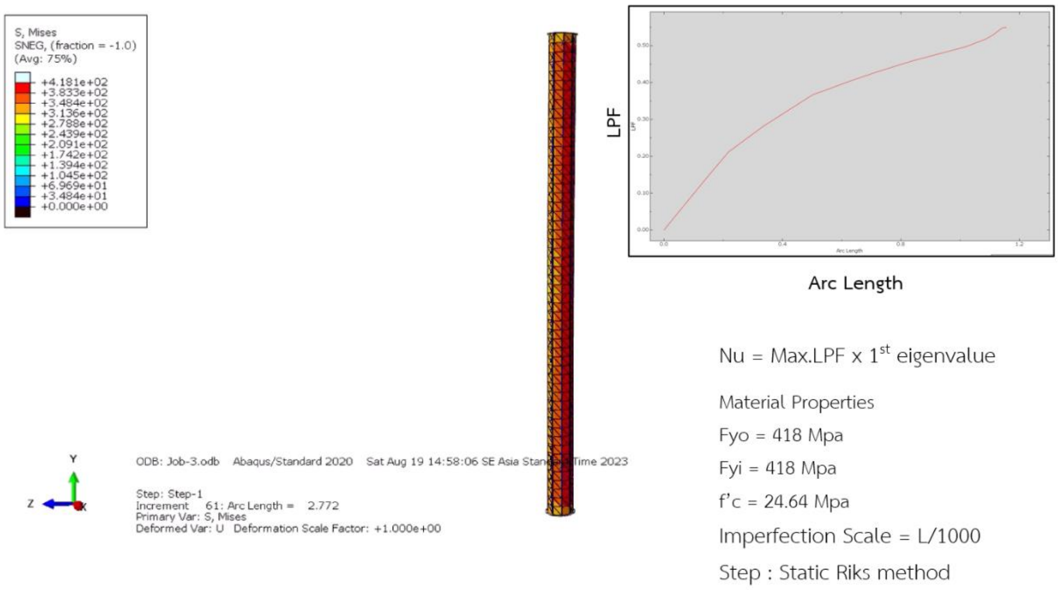
ในการกำหนดคุณสมบัติของเหล็กความหนาแน่นจะใช้เท่ากับ 7.8e-9 N/mm^3 โดยเลือก Mechanical และเลือก Elastic รวมถึงกรอกค่าจากการคาดการณ์ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 47 ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2

วิธีการ Simulation โดย Abaqus

เนื่องจากเสาที่ต้องการจำลองกำลังรับแรงอัดเป็นเสายาว ลักษณะจะเป็นการวิบัติแบบโก่งเดาะ (Buckling) การจำลองจะเริ่มจากการสร้าง Step ที่เป็น Buckle เพื่อหารูปแบบการโก่งเดาะ โดยกำหนดแรง 1 N ที่จุดศูนย์กลางของแผ่น plate ด้านบนเพื่อหา แรงที่ทำให้เกิด 1 st Eigen Value Force ตามรูปที่ 11 หลังจากนั้นจะใช้ Step Riks static เพื่อทำการกดแบบจำลองเสา CFDST เพื่อหากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา โดยกำหนดแรงกดที่ศูนย์กลางของแผ่น plate เท่ากับแรง 1 st Eigen Value Force และใช้ Imperfection Scale เท่ากับ L/1000



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการวิบัติของเสา CFDST

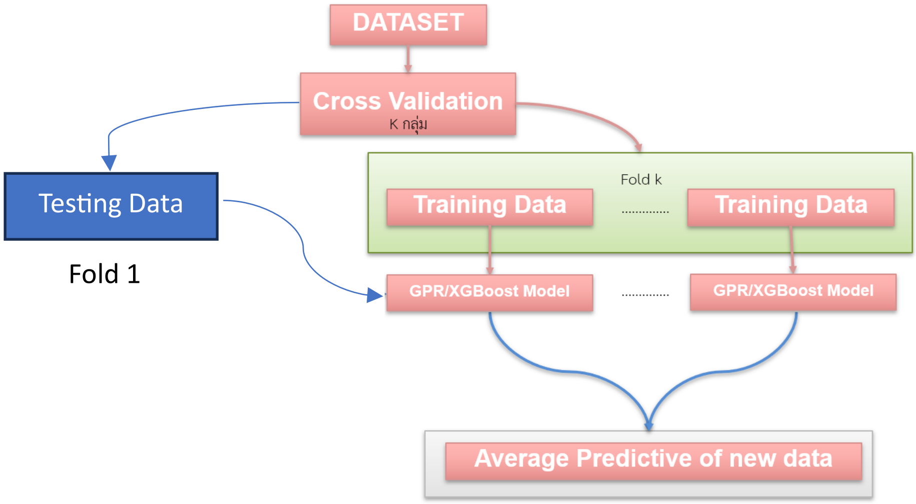


รูปที่ 12 แสดงการรับน้ำหนักจากการจำลองของเสา CFDST

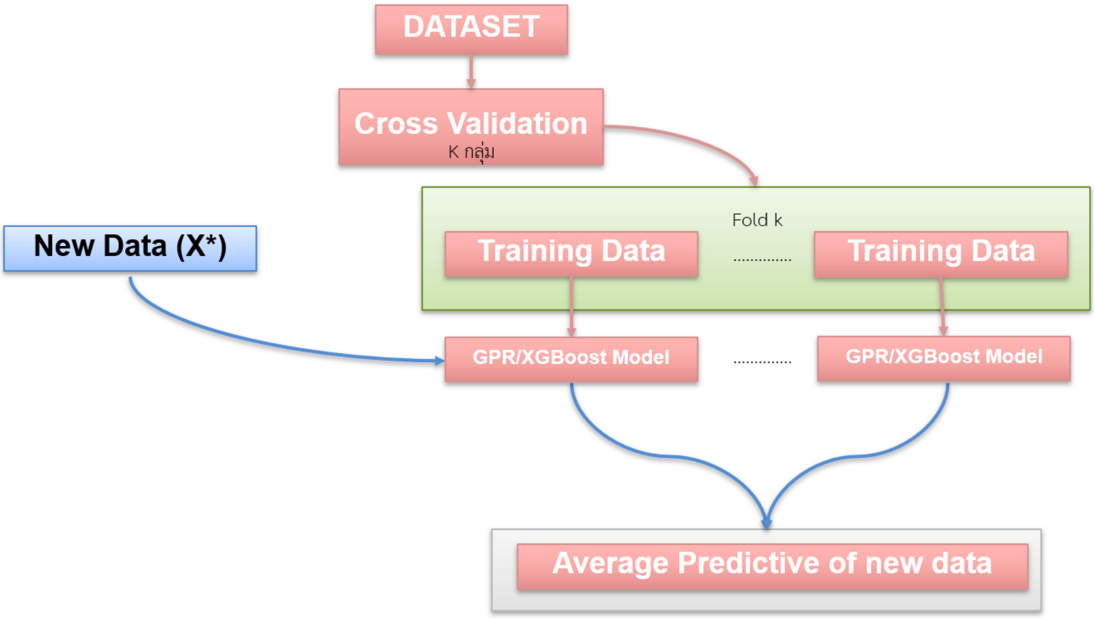
การสร้างโมเดลสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของเสา CFDST

ในงานวิจัยนี้จะสร้างโมเดลจาก 2 อัลกอริทึมได้แก่ GPR และ XGBoost โดยใช้ภาษา Python และ Skit-Learn Library ในการสร้างโมเดลโดยจะแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น K กลุ่มตามรูปภาพที่ 13 โดยจะแบ่งเป็นชุดข้อมูลฝึกฝน K-1 กลุ่มและเป็นชุดข้อมูลทดสอบ 1 กลุ่ม และสร้างโมเดลย่อย K-1 กลุ่ม โดยค่าการทำนายจากชุดข้อมูลทดสอบจะได้จากการเฉลี่ยจากการทำนายในแต่ละโมเดลย่อย และนำมาวัดความแม่นยำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงการฝึกฝนชุดข้อมูลของการเรียนรู้ของเครื่อง



รูปที่ 14 แผนภาพแสดงการทำนายชุดข้อมูลใหม่ของเสา CFDST

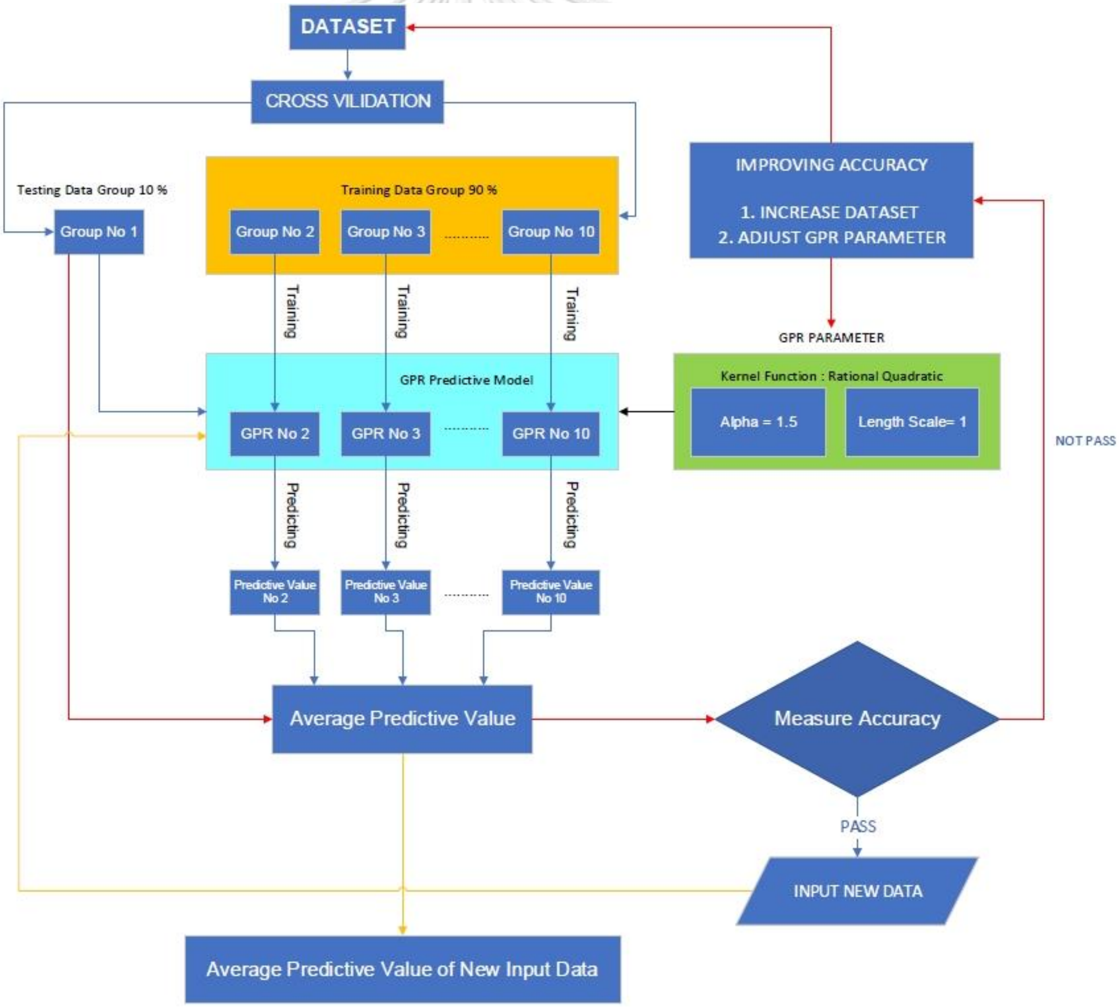
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการศึกษา

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดเสาวัสดุผสม CFDST อันดับแรกต้องทำการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ฝึกฝนโมเดล โดยรวบรวมจากงานวิจัยในอดีตที่เชื่อถือได้หรือสร้างชุดข้อมูลใหม่ขึ้นมาจากการจำลองโดย Computer Software โดยชุดข้อมูลทั้งหมดต้องเป็นหน่วยเดียวกันตารางที่ 2 เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้ไปทิศทางเดียวกัน เมื่อได้โมเดลที่ต้องการแล้วจะต้องทำการเปรียบเทียบผลการทำนายกับการคำนวณแบบ Standard Design Code เพื่อดูว่าโมเดลมีความแม่นยำเพียงพอหรือไม่ โดยขั้นตอนการสร้างโมเดลจะอธิบายในย่อหน้าถัดไป

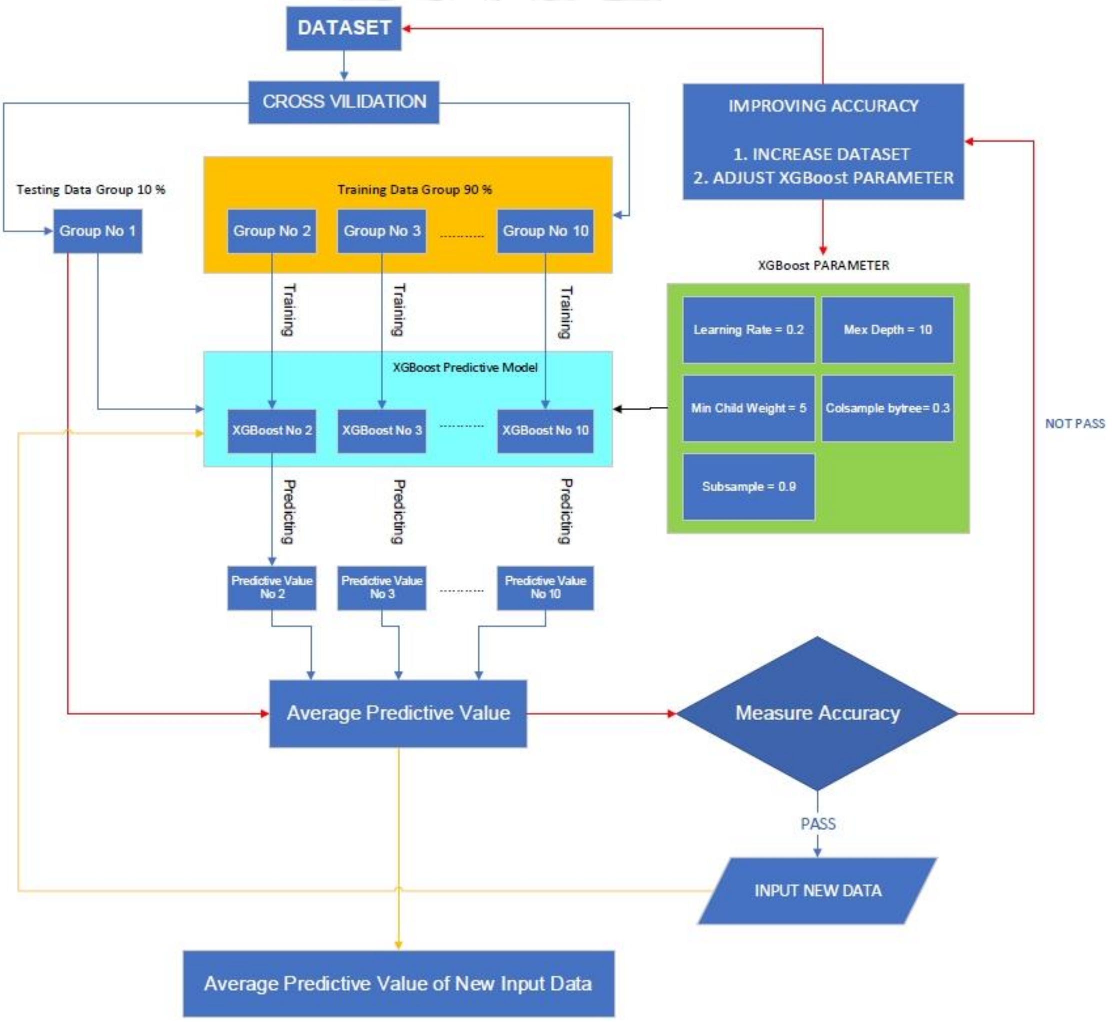
การทำงานของอัลกอริทึม Gaussian Process Regression



รูปที่ 15 แผนภาพการทำงานของโมเดล GPR

การเขียน Code การทำงานของอัลกอริทึม GPR จะใช้ภาษา Python ทำงานเริ่มกับ Library ต่าง ๆ เช่น Scikit learn , Numpy , Pandas โดยเริ่มจากการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มคือข้อมูลสำหรับทดสอบโมเดล (Testing Data) และ โมเดลสำหรับการฝึกฝนข้อมูล (Training Data) โดยใช้สัดส่วน 1:9 โดย Kernel Function ที่เลือกใช้คือ Rational Quadratic Function ตามสมการที่ 21 โดนกำหนดให้ค่า l หรือ Length scale มีค่าเท่ากับ 1 และกำหนดให้ Alpha มีค่าเท่ากับ 1.5 ตามแผนภาพที่ 14 หากทำการฝึกฝนข้อมูลแล้วพบว่าโมเดลที่ได้ยังมีความแม่นยำน้อยการการคำนวณแบบ Standard Design Code สามารถแก้ไขได้โดยการปรับเปลี่ยนค่า Parameter บางตัวในอัลกอริทึมหรือทำการหาชุดข้อมูลฝึกฝนเพิ่ม

การทำงานของอัลกอริทึม Extreme Gradient Boosting



รูปที่ 16 แผนภาพการทำงานของโมเดล XGBoost

การเขียน Code การทำงานของอัลกอริทึม XGBoost จะใช้ภาษา Python และ Library เดียวกับการเขียน Code ของ GPR และใช้หลักการเดียวกันคือการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 10 ส่วนและใช้ 1 ส่วนเป็น ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing Data) และ 9 ส่วนใช้เป็นชุดข้อมูลในการฝึกฝนโมเดล โดยอัลกอริทึม XGBoost จะมี Parameter ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 ตัวดังนี้

Colsample_bytree เป็น Parameter ที่มีค่า 0 ถึง 1 แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ที่ 0.3 หรือ 30% ของชุดข้อมูล ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการแบ่งชุดข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่า Root ที่เหมาะสมให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและป้องกันการเกิด Over Fitting ของต้นไม้ตัดสินใจแต่ละต้น

Learning Rate เป็น Parameter ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่าเท่ากับ 0.2 ที่ใช้ในการย่อส่วนค่าความผิดพลาดของต้นไม้ตัดสินใจแต่ละต้นเพื่อให้โมเดลมีความแม่นยำมากขึ้นและเป็นการป้องกันการเกิด Over Fitting

Max_depth เป็น Parameter ที่ใช้กำหนดจำนวนของต้นไม้ตัดสินใจย่อย โดยค่าที่ควรใช้ประมาณ 10% ของจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมดที่มี โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่าเท่ากับ 10

Subsample เป็น Parameter ที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลเพื่อนำมาฝึกฝนโมเดลโดยงานวิจัยนี้จะใช้เท่ากับ 0.9 หรือ 90 % ของข้อมูลทั้งหมด

Min_Child_Weight เป็น Parameter ที่ใช้คัดสรรใบของต้นไม้ตัดสินใจแต่ละต้นว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงพอหรือไม่ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่าเท่ากับ 5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลทำได้แบบเดียวกันกับการสร้างโมเดลจากอัลกอริทึม GPR คือการปรับเปลี่ยน Parameter บางตัวหรือทำการสร้างข้อมูลให้ครอบคลุมมากขึ้น

ผลการศึกษา

การวัดผลความแม่นยำจากการทำนายในแต่ละโมเดลจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2: Coefficient of determination) ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE : Mean Square Error) รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE : Root Mean Square Error) ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD : Mean Absolute Deviation) หรือ (MAE : Mean Absolute Error) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31-34 ในบทที่ 2 โดยจะทำการเปรียบเทียบโมเดลจากอัลกอริทึมของการเรียนรู้เครื่องได้แก่ GPR และ XGBoost เปรียบเทียบกับการคำนวณตามสมการจากมาตราฐานการออกแบบ (Design Standard Code) ได้แก่ AISC และ EC4 โดยการสร้างโมเดลนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 โมเดล คือ โมเดล

สำหรับทำนายเสาสั้นและโมเดลสำหรับทำนายเสายาว เนื่องจากมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักและลักษณะการวิบัติแตกต่างกัน โดยใช้เกณฑ์การแบ่งชนิดเสา คือ ค่าอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ตามสมการที่ 48 สำหรับเสาสั้นนั้นอัตราส่วนชะลูดจะน้อยกว่า 22 ขณะที่เสายาวจะมีค่ามากกว่า 22

ผลการวิจัยของโมเดลเสาสั้น

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสำหรับเสาสั้น

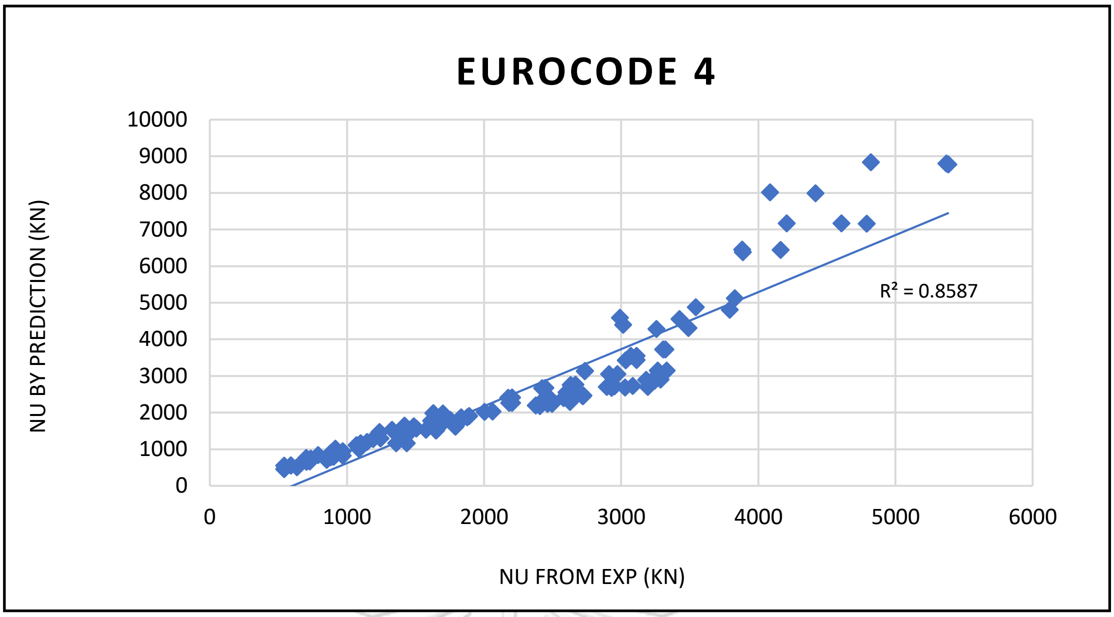
No	Input								Output
	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	High	Nu
	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	Mpa	mm	kN
MAX	603.40	6.77	535.00	402.10	5.77	425.00	141.00	2502.00	5383.50
MIN	114.00	0.90	220.00	33.50	0.90	220.00	18.70	342.00	540.00
AVG	212.31	3.96	362.65	107.06	3.06	358.86	50.78	617.31	2283.79

สำหรับโมเดลเสาสั้นจะใช้ชุดข้อมูลทั้งหมดจำนวน 122 ตัวอย่างและมาจากผลจากการทดลองจริงในอดีตทั้งหมดสามารถดูได้จากตารางที่ 13 โดยมีค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 5 ความแม่นยำของโมเดลเสาสั้นพบว่าการสร้างโมเดลจากการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้อัลกอริทึม Xgboost (R^2 = 97.01%) ให้ความแม่นยำมากกว่าอัลกอริทึม GPR (R^2 = 94.02%) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากมาตรฐานการออกแบบ (Standard Design Code) ได้แก่ AISC (R^2 = 82.94%) และ EC4 (R^2 = 85.82%) พบว่าโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องจากทั้ง 2 อัลกอริทึม GPR และ Xgboost ให้ความแม่นยำมากกว่า ตามตารางที่ 6 และสามารถดูกราฟค่าสหสัมพันธ์ของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลได้จากรูปที่ 15-18 ตามลำดับ

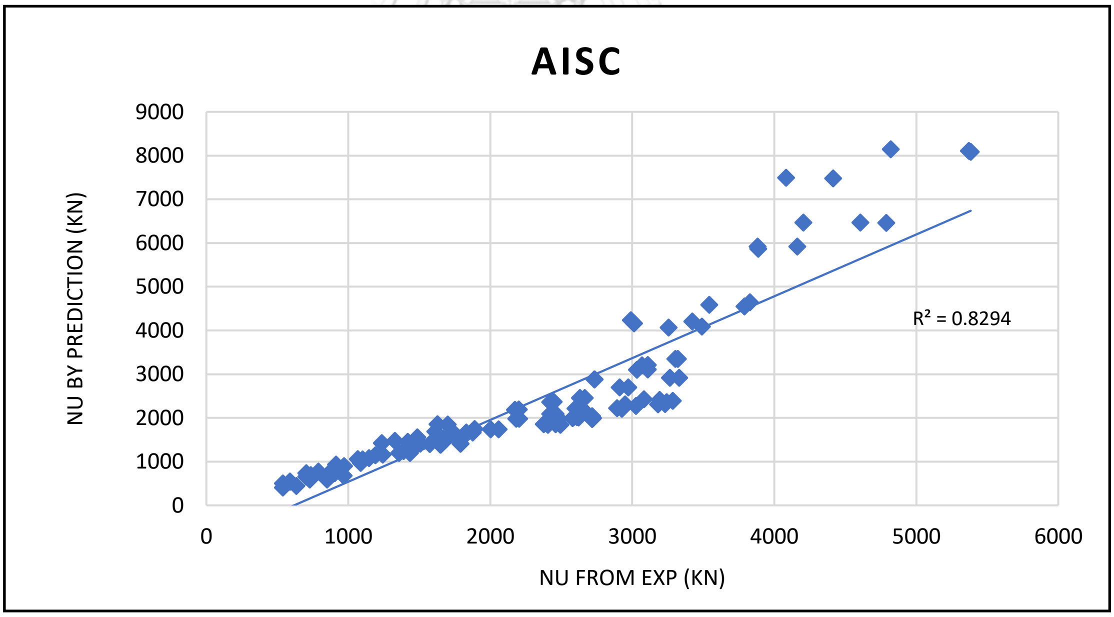
ตารางที่ 6 แสดงผลความแม่นยำของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลเสาสั้น

Accuracy	GPR	XGBoost	AISC	EC4
R2	94.02	97.01	82.94	85.82
MSE	100887.71	38107.24	740305.05	1001733.57
RMSE	317.63	195.21	860.41	1000.87
MAE	223.52	138.11	512.69	487.46

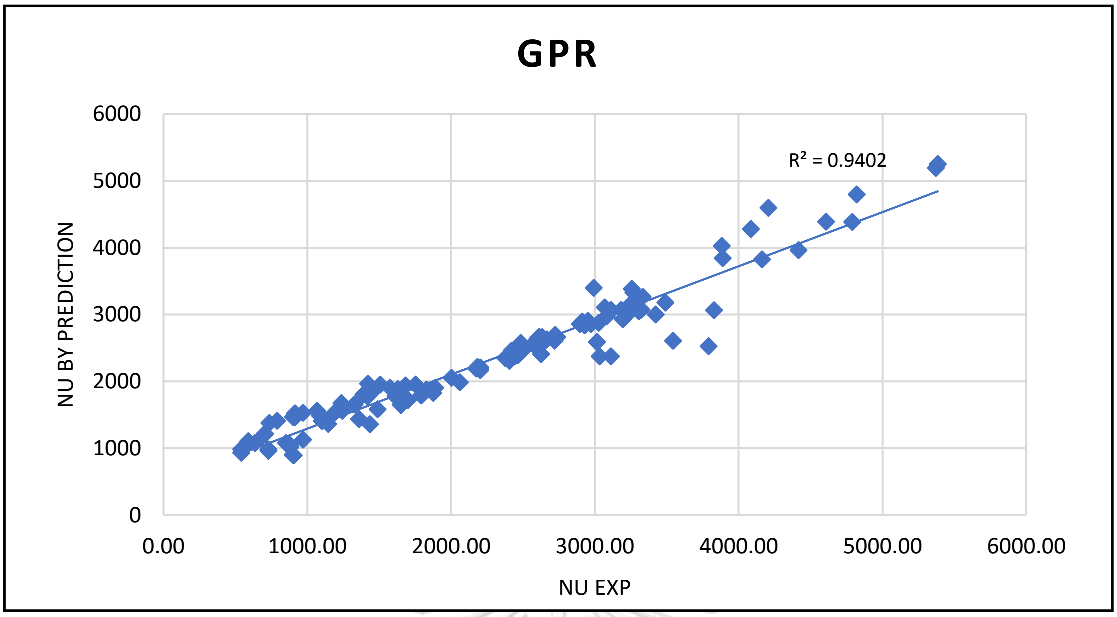
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



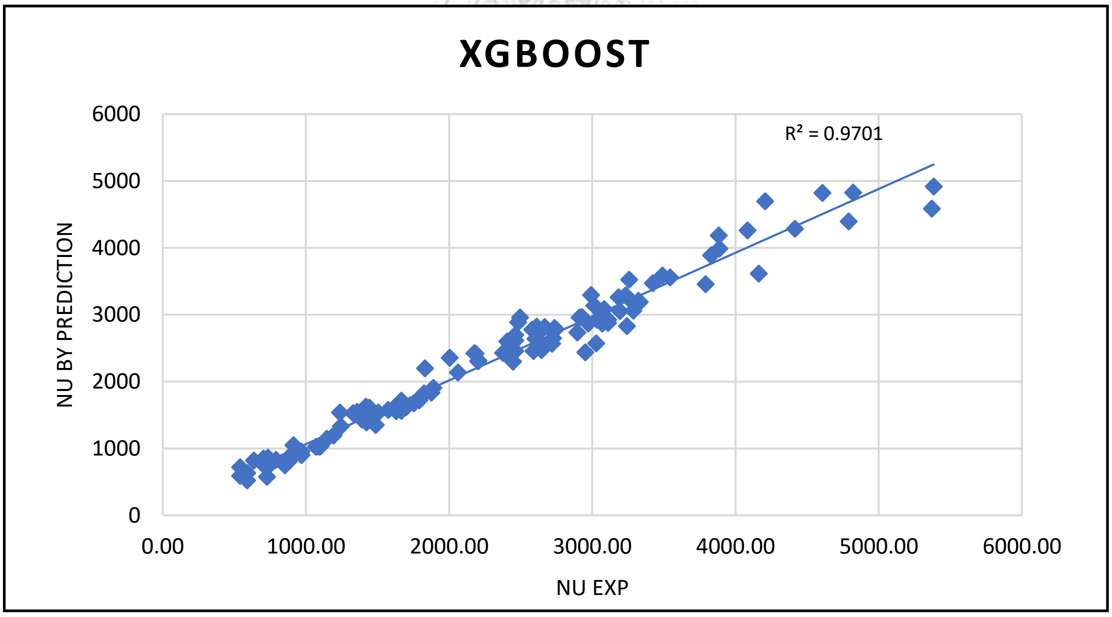
รูปที่ 17 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาสั้น



รูปที่ 18 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน AISC สำหรับเสาสั้น



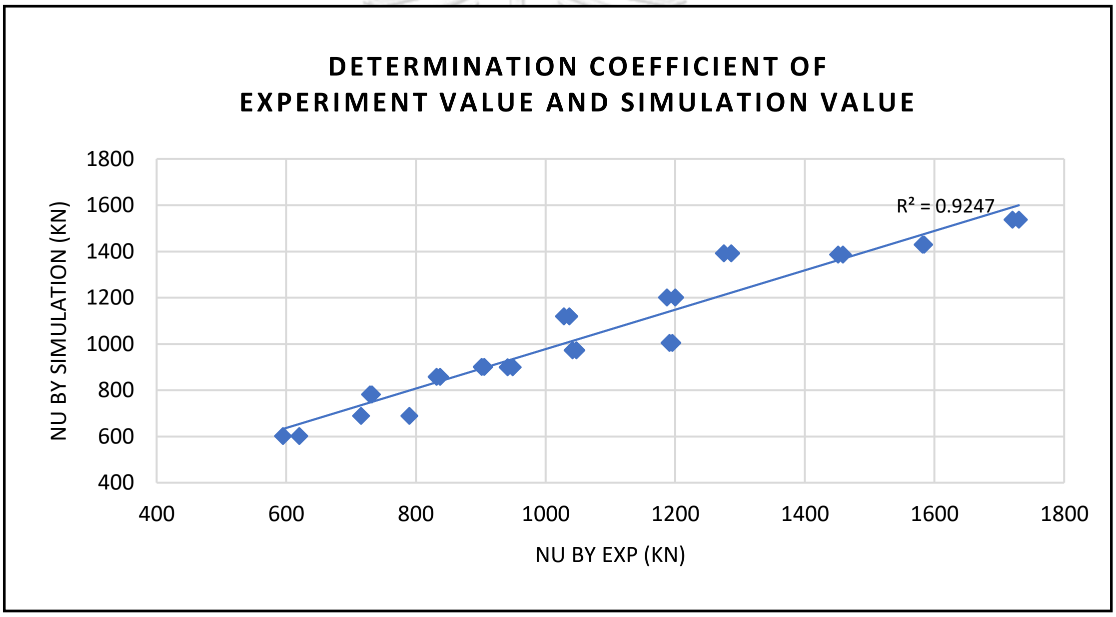
รูปที่ 19 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม GPR สำหรับเสาสั้น



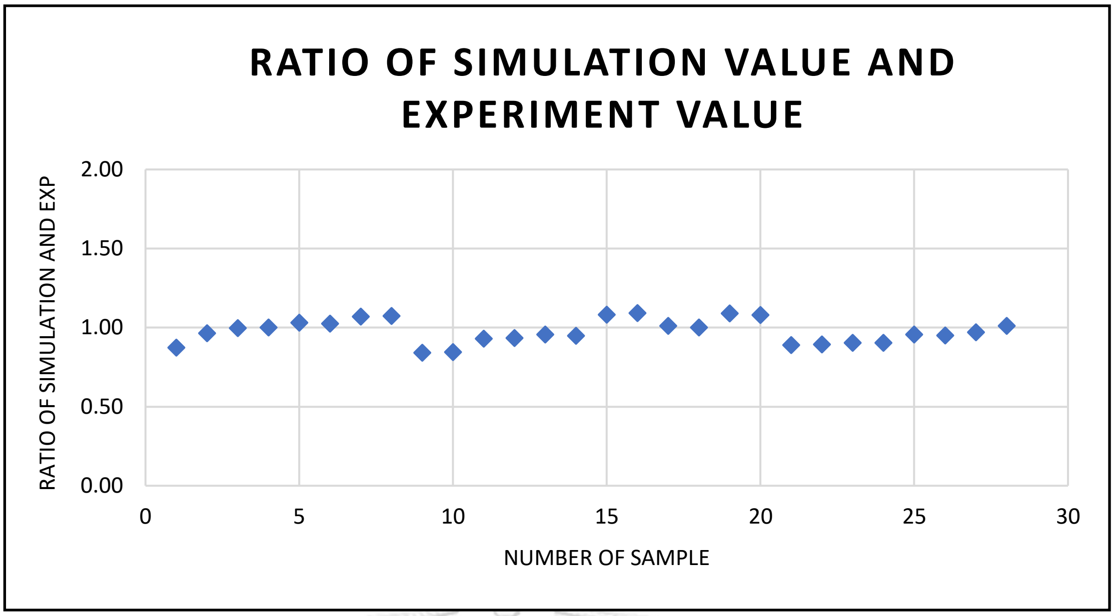
รูปที่ 20 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม XGBoost สำหรับเสาสั้น

ผลการวิจัยของโมเดลเสายาว

สำหรับโมเดลเสายาวจะใช้ชุดข้อมูลทั้งหมดจำนวน 181 ตัวอย่างและมาจากผลจากการทดลองจริงในอดีต 28 ตัวอย่างและมาจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus จำนวน 153 ตัวอย่าง สามารถดูได้จากตารางที่ 11 และมีเฉลี่ยตามตารางที่ 7 ขณะที่ความแม่นยำของการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus เปรียบเทียบกับการทดสอบจริงในอดีตจำนวน 28 ตัวอย่างสามารถดูได้ที่ตารางที่ 15 พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 92.47% ตามภาพที่ 19 MSE ได้เท่ากับ 9631.60 RMSE ได้เท่ากับ 98.14 MAE ได้เท่ากับ 76.59 และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระว่างค่าจากการทดลองจริงกับค่าจากการจำลองโดยโปรแกรมได้ค่าเท่ากับ 0.98 หรือตามภาพที่ 20



รูปที่ 21 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของค่าจากการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus



รูปที่ 22 แผนภาพแสดงอัตราส่วนระว่างค่าจากการทดลองจริงกับค่าจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus

ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสำหรับเสายาว									
No	Input								Output
	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	High	Nu
	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	Mpa	mm	kN
MAX	550.00	10.00	549.00	250.00	10.00	549.00	56.50	6500.00	9882.58
MIN	114.00	1.00	210.00	45.00	1.00	210.00	24.50	1200.00	429.66
AVERAGE	215.27	3.44	378.93	99.75	3.23	384.49	34.69	2752.85	1954.92

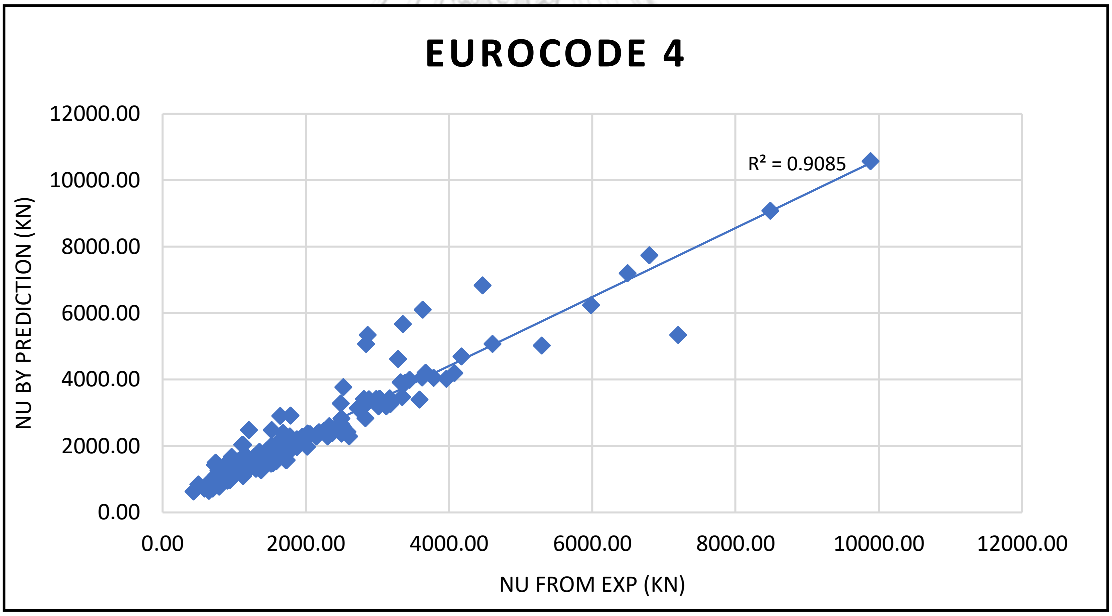
ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสำหรับเสายาว

ความแม่นยำของโมเดลเสายาวพบว่าการสร้างโมเดลจากการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้อัลกอริทึม XGBoost (R^2 = 94.72 %) ให้ความแม่นยำมากกว่าอัลกอริทึม GPR (R^2 = 91.71%) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากมาตรฐานการออกแบบ (Standard Design Code) ได้แก่ AISC (R^2 = 94.15%) และ EC4 (R^2 = 90.85%) พบว่าโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องจากทั้ง 2 อัลกอริทึม

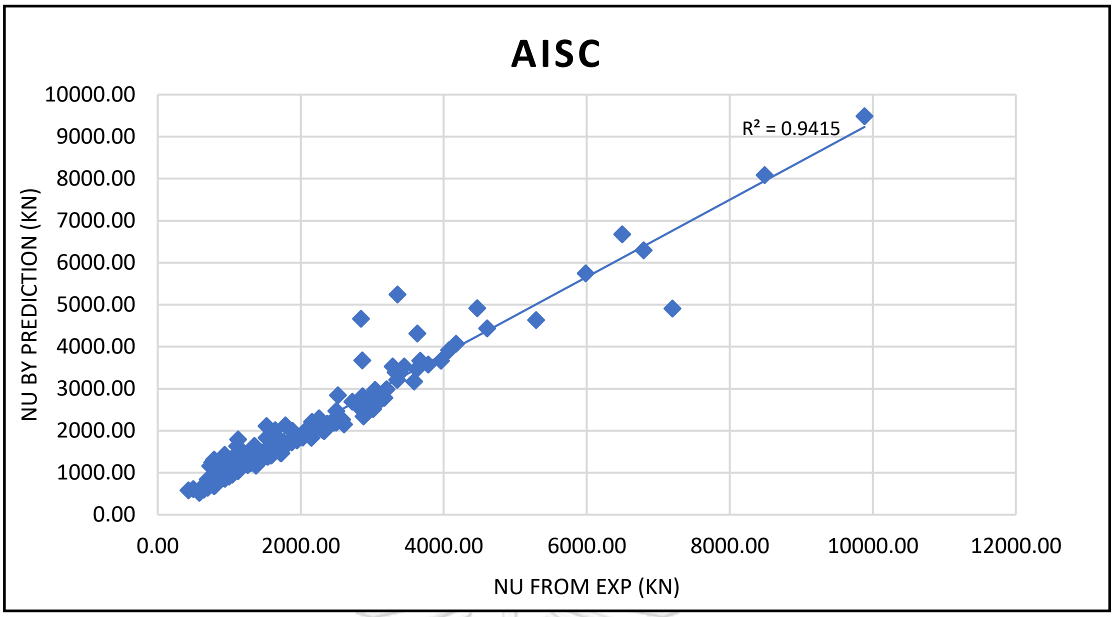
GPR และ XGBoost มีความใกล้เคียงกัน ตามตารางที่ 8 และสามารถดูกราฟค่าสหสัมพันธ์ของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลได้จากรูปที่ 21-24 ตามลำดับ

แสดงผลความแม่นยำของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลเสายาว				
	GPR	XGBoost	AISC	EC4
MSE	205304.06	114204.83	120723.02	335137.50
R2	91.71	94.72	94.15	90.85
RMSE	453.10	337.94	347.45	578.91
MAE	175.04	189.30	197.64	374.79

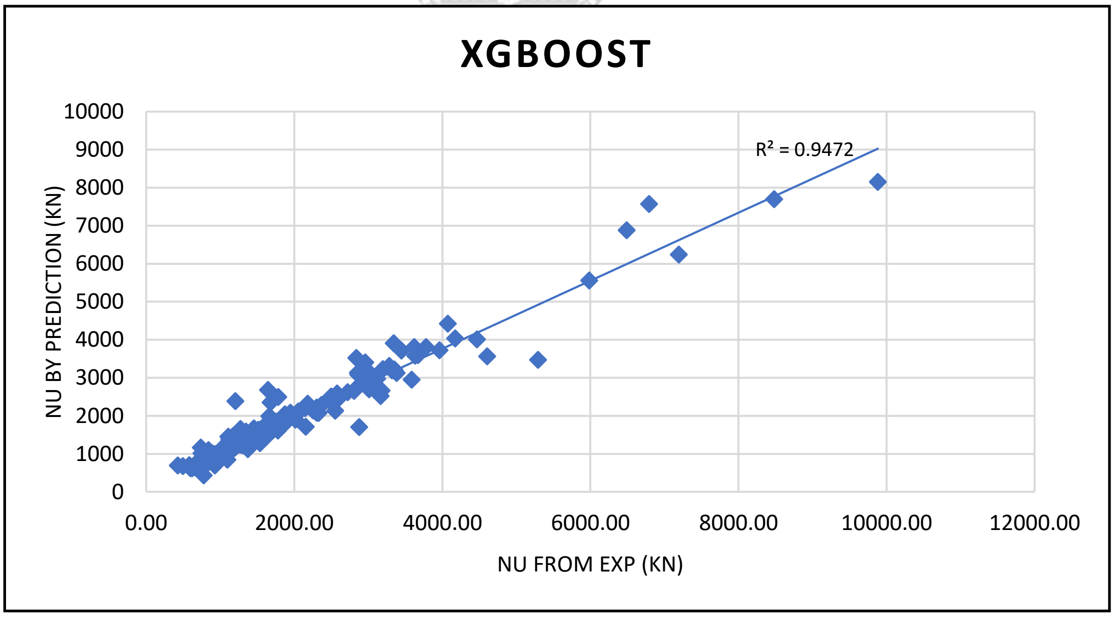
ตารางที่ 8 แสดงผลความแม่นยำของแต่ละวิธีการสร้างโมเดลเสายาว



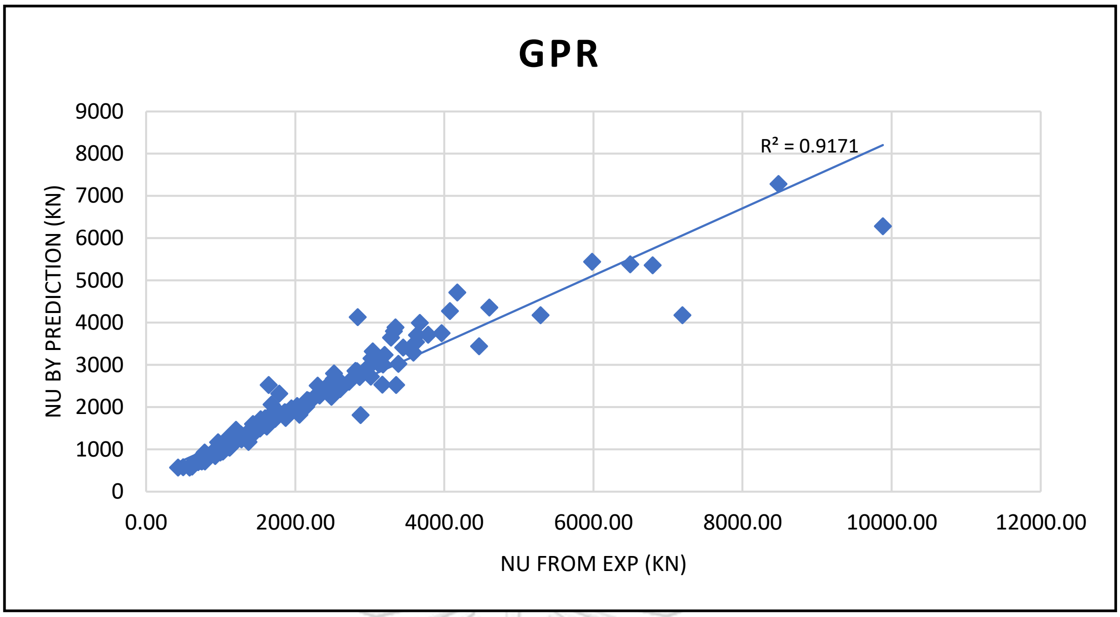
รูปที่ 23 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสายาว



รูปที่ 24 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของการคำนวณโดยใช้มาตรฐาน AISC สำหรับเสายาว



รูปที่ 25 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม XGBoost สำหรับเสายาว



รูปที่ 26 แผนภาพแสดงค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของโมเดลจากอัลกอริทึม GPR สำหรับเสายาว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

สรุปการวิจัย

จากการวิจัยการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาวัสดุผสมท่อเหล็กคู่หล่อคอนกรีตด้านในหรือเสา CFDST โดยใช้อัลกอริทึมกระบวนการถดถอยเกาส์เซียนและเอกตรีมการ์เดียนบูสติ่งพบว่าอัลกอริทึมเอกตรีมการ์เดียนบูสติ่งให้ค่าความแม่นยำมากที่สุดจากการวัดผลจากค่า R^2 (Coefficient of determination) MSE (Mean Square Error) RMSE (Root Mean Square Error) และ MAE (Mean Absolute Error) ตามตารางที่ 6 สำหรับเสาสั้นและตามตารางที่ 8 สำหรับเสายาว โดยแบบจำลองการทำนายโมเดลเสาสั้นการทำนายด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่องให้ความแม่นยำมากกว่าการทำนายด้วยการออกแบบมาตราฐาน AISC และ EC4 ขณะที่แบบจำลองการทำนายโมเดลเสายาวพบว่าการทำนายด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่องและการทำนายโดยวิธีการออกแบบมาตราฐานให้ค่าความแม่นยำที่ใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะ

การใช้งานแบบจำลองในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของเสาวัสดุผสม CFDST ที่ได้จากการเรียนรู้ของเครื่องจะได้ผลลัพธ์ที่ดีในช่วงของชุดข้อมูลฝึกฝนที่มีความหนาแน่นเพียงพอเท่านั้น หากต้องการให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องหาชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกฝนให้ครอบคลุมมากขึ้น สำหรับแบบจำลองของเสาสั้นและเสายาวในงานวิจัยนี้จะให้ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยได้ดีหากชุดข้อมูลนำเข้า (Input Data) อยู่ในช่วงตามตารางที่ 9 สำหรับเสาสั้นและตารางที่ 10 สำหรับเสายาว

	External Diameter	External Thickness	Fyo	Inner Diameter	Inner Thickness	Fyi	F’c	Height
Unit	mm	mm	MPa	mm	mm	MPa	MPa	mm
Max	200	7	500	150	6	500	70	350
Min	100	2	300	30	1	250	20	1000

ตารางที่ 9 แสดงช่วงของชุดข้อมูลที่ทำให้ผลทำนายออกมาดีที่สุดสำหรับโมเดลเสาสั้น

	External Diameter	External Thickness	Fyo	Inner Diameter	Inner Thickness	Fyi	F'c	Height
Unit	mm	mm	MPa	mm	mm	MPa	MPa	mm
Max	400	7	500	150	6	500	50	1000
Min	100	2	200	50	2	200	20	5000

ตารางที่ 10 แสดงช่วงของชุดข้อมูลที่ทำให้ผลทำนายออกมาดีที่สุดสำหรับโมเดลเสายาว

การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการทำนายกำลังของเสา CFDST

จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองในการทำนายกำลังของเสา CFDST อัลกอริทึม XGBoost ให้ความแม่นยำมากที่สุดในช่วงของชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกฝน โดยย่อหน้านี้จะนำเอาแบบจำลองที่ได้จากอัลกอริทึมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการ CLPSO หรือ Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization ในการหาขนาดหน้าตัดเสา CFDST ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ยังคงสามารถรับน้ำหนักที่ต้องการได้

PSO [5] เป็นหลักการที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ถูกคิดค้นในปี 1995 โดย Eberhart และ Kennedy โดยได้รับแรงบันดาลใจมาจากการออกหาอาหารของฝูงนก โดยนกที่ค้นพบที่อยู่ของแหล่งอาหารจะส่งเสียงเรียกนกตัวอื่นๆให้บินเข้าหาแหล่งอาหารที่ตัวมันค้นพบ เปรียบเทียบกับหลักการหาค่าเหมาะสมที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับงานวิจัยนี้ แหล่งอาหารคือขนาดหน้าตัดที่น้อยที่สุดสมการที่ (49) นกหรืออนุภาคจะทำการค้นหาจุดที่ทำให้ขนาดหน้าตัดน้อยที่สุดตามจำนวนรอบที่เราต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ที่ 1000 และ 500 รอบโดยอนุภาคแต่ละตัวจะต้องเข้าเงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ ค่ากำลังจะต้องมากกว่าค่าเป้าหมาย ค่าความชะลูดต้องเข้าเงื่อนไข และ ความหนาของส่วนที่เป็นคอนกรีตต้องมากกว่าระยะที่กำหนด ซึ่งจะอธิบายต่อในย่อหน้าถัดไป PSO หรือ Particle Swarm Optimization ยังคงมีข้อบกพร่องในการค้นหาค่าเหมาะสมเช่นค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดอยู่บ้าง เนื่องจากบางครั้งนกหรืออนุภาคทำการบินไปพบจุดที่เป็น Local Minimum/Maximum แต่เข้าใจผิดคิดว่าเป็น Global Maximum/Minimum ทำให้นกหรืออนุภาคตัวอื่นๆบินเข้ามาหาและทำให้ตกหลุมพลางของจุดที่เป็น Local Minimum/Maximum ด้วยเหตุนี้ในปี 2006 Liang และคณะได้ทำการเสนอหลักการ CLPSO หรือ Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[6] เพื่อทำการปรับปรุงการหาค่าที่ดีที่สุดไม่ให้ตกหลุมจุดที่เป็น Local Minimum/Maximum โดยการเปลี่ยนวิธีการหาค่า Pbest และ Gbest

สมการที่ใช้ในการหาค่า Minimum

$$\textit{CFDST Section Area} = \frac{\pi}{4}\left(x_1^2 - \left(x_2 - 2(x_3)\right)^2\right) \qquad (49)$$

โดยที่

X1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กรอบนอก

X2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กรอบใน

X3 คือ ความหนาของท่อเหล็กรอบใน

หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกอนุภาค

1. กำลังรับแรงอัด (XGBoost) > กำลังรับแรงอัดเป้าหมาย
2. ความกว้างคอนกรีต > ความกว้างคอนกรีตกำหนด
3. ค่าความชะลูด > 22 (เสายาว) หรือ ค่าความชะลูด < 22 (เสาสั้น)

ขอบเขตของอนุภาค

อนุภาคคือตัวแทนของชุดข้อมูลที่เราต้องการหาค่าเหมาะสม (ค่าต่ำสุดของขนาดหน้าตัดเสา CFDST) โดยแต่ละอนุภาคต้องผ่านหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกเพื่อใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด การทำนายกำลังรับแรงอัดโดยใช้อัลกอริทึม XGBoost ที่ถูกสร้างจากชุดข้อมูลตามตารางที่ 11 เสายาว และตารางที่ 13 สำหรับเสาสั้น จะทำนายผลได้ดีในช่วงชุดข้อมูลดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ในการหาค่าเหมาะสมจึงจำเป็นต้องทำการกำหนดขอบเขตของอนุภาคเพื่อให้ได้ค่าจากการทำนายแม่นยำมากที่สุดโดยเสาสั้นจะใช้ค่าจากตารางที่ 9 และเสายาวจะใช้ค่าจากตารางที่ 10

ผลการหาค่าเหมาะสมสำหรับโมเดลเสาสั้น

เป้าหมายที่ต้องการ

1. กำลังที่ต้องการ 2000 kN
2. ความกว้างคอนกรีต 75 mm

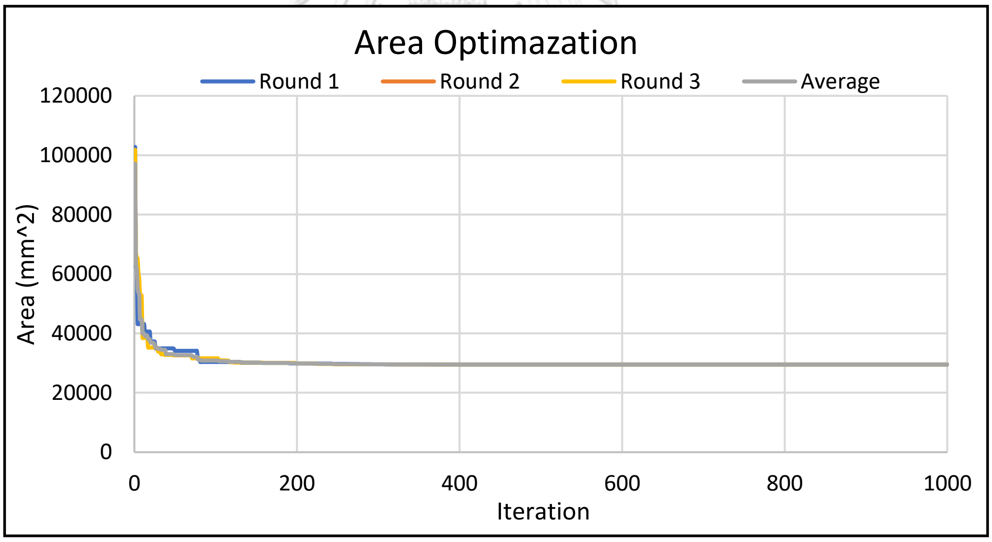
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ความสูง 900 mm
4. กำลังครากของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน 320 MPa
5. กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ 28 วัน Cylinder 29.5 MPa
6. ความชะลูดน้อยกว่า 22 (เสาสั้น)

ผลการหาค่าเหมาสมสำหรับเสาสั้น

No	Ext Dia	Ext t	Inn Dia	Inn t	L/r	Area	Nu	AISC	EC4
	mm	mm	mm	mm		mm^2	kN	kN	kN
1	195.84	6.42	33.00	2.65	18.20	29505.02	2077.12	1986.48	2381.77
2	196.50	6.75	33.00	1.00	18.20	29556.23	2073.16	2003.63	2429.90
3	195.84	6.42	33.00	2.65	18.20	29505.04	2077.12	1986.48	2381.77

ตารางที่ 11 แสดงค่าเหมาะสมสำหรับเสาสั้น



รูปที่ 27 แสดงค่าเหมาะสมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ของอนุภาค เสาสั้น

ผลการหาค่าเหมาะสมสำหรับโมเดลเสายาว

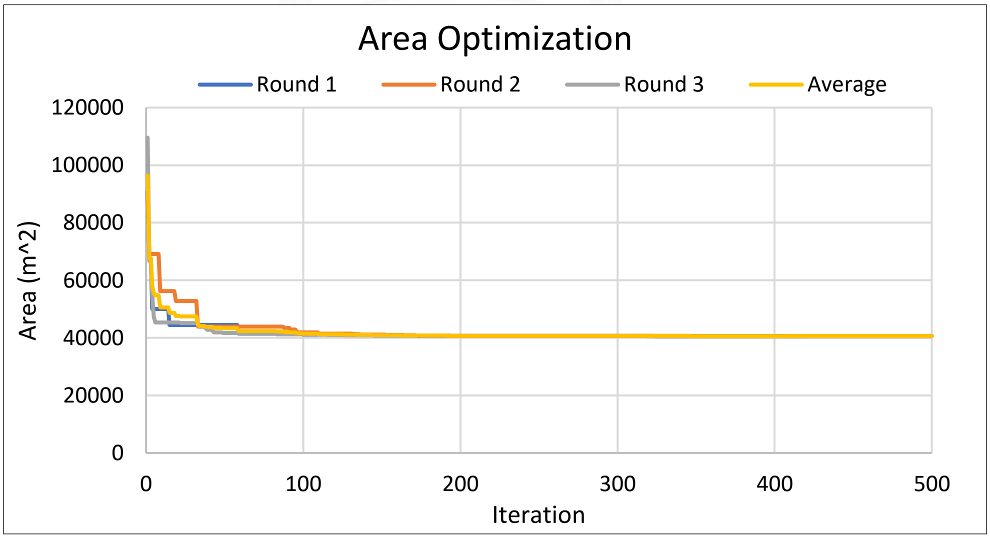
เป้าหมายที่ต้องการ

7. กำลังที่ต้องการ 3000 kN
8. ความกว้างคอนกรีต 75 mm
9. ความสูง 4000 mm
10. กำลังครากของท่อเหล็กด้านนอกและด้านใน 320 MPa
11. กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ 28 วัน Cylinder 46 MPa
12. ความชะลูดมากกว่า 22 (เสายาว)

ผลการหาค่าเหมาสมสำหรับเสายาว

No	Ext Dia	Ext t	Inn Dia	Inn t	L/r	Area	Nu	AISC	EC4
	mm	mm	mm	mm		mm^2	kN	kN	kN
1	235.00	6.50	72.00	6.50	66.04	40619.04	3088.05	2701.30	2588.36
2	235.00	6.50	72.00	6.50	66.04	40619.04	3088.05	2701.30	2588.36
3	235.00	6.50	72.00	6.50	66.04	40619.04	3088.05	2701.30	2588.36

ตารางที่ 12 แสดงค่าเหมาะสมสำหรับเสายาว



รูปที่ 28 แสดงค่าเหมาะสมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ของอนุภาค เสายาว

ภาคผนวก

ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสายาว

ตารางที่ 13 ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสายาว

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
1	[7]	120.00	1.96	311.00	60.00	1.96	380.00	53.12	1324.00	789.90
2		120.00	1.96	311.00	60.00	1.96	380.00	53.12	1324.00	715.40
3	[8]	139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	1500.00	905.50
4		139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	1503.00	901.60
5		139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	2000.00	831.70
6		139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	1998.00	837.40
7		139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	2502.00	732.10
8		139.20	3.00	418.00	76.00	2.00	418.00	24.64	2498.00	729.00
9		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	1497.00	1195.60
10		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	1503.00	1191.20
11		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	1997.00	1047.30
12		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	2000.00	1041.60
13		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	2498.00	941.40
14		152.40	3.00	549.00	76.00	2.00	549.00	24.64	2500.00	949.00
15		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	1504.00	1286.40
16		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	1498.00	1275.10
17		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	2003.00	1187.20
18		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	1998.00	1199.80
19		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	2498.00	1028.00
20		165.10	3.00	516.00	76.00	2.00	516.00	24.64	2502.00	1036.50
21		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	1502.00	1730.00
22		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	1500.00	1720.00
23		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	1998.00	1581.60
24		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	2003.00	1584.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
25		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	2503.00	1451.40
26		193.70	3.50	391.00	76.00	2.00	391.00	24.64	2497.00	1458.70
27	[9]	114.00	3.00	294.50	58.00	3.00	374.50	37.04	1770.00	620.00
28		114.00	3.00	294.50	58.00	3.00	374.50	37.04	1770.00	595.00
29	FEM	200.00	3.00	300.00	114.30	8.00	430.00	36.00	3315.00	1683.15
30	FEM	300.00	5.00	300.00	150.00	5.00	300.00	30.00	3000.00	3346.81
31	FEM	300.00	7.00	300.00	150.00	7.00	300.00	30.00	3000.00	4074.84
32	FEM	400.00	5.00	320.00	150.00	5.00	320.00	35.00	3380.00	5983.66
33	FEM	400.00	7.00	320.00	150.00	7.00	320.00	35.00	3380.00	6493.49
34	FEM	550.00	5.00	330.00	250.00	5.00	330.00	28.00	6000.00	8485.38
35	FEM	550.00	7.00	330.00	250.00	7.00	330.00	28.00	6000.00	9882.58
36	FEM	225.00	2.00	320.00	120.00	2.00	320.00	32.00	3300.00	1273.91
37	FEM	225.00	3.50	320.00	120.00	3.50	320.00	32.00	3300.00	1701.68
38	FEM	180.00	2.50	420.00	60.00	5.00	420.00	29.50	3500.00	1076.62
39	FEM	180.00	8.00	420.00	60.00	8.00	420.00	29.50	3500.00	1644.66
40	FEM	180.00	10.00	420.00	60.00	10.00	420.00	29.50	3500.00	2878.30
41	FEM	220.00	2.00	336.00	80.00	2.00	336.00	27.50	3500.00	1259.77
42	FEM	250.00	2.00	345.00	75.00	2.00	345.00	35.00	3800.00	1874.52
43	FEM	250.00	4.00	345.00	75.00	4.00	345.00	35.00	3800.00	2497.02
44	FEM	250.00	6.00	345.00	75.00	6.00	345.00	35.00	3800.00	3168.98
45	FEM	250.00	2.00	345.00	75.00	3.00	345.00	35.00	3800.00	1949.64
46	FEM	280.00	3.00	385.00	100.00	5.00	385.00	36.00	3000.00	3038.98
47	FEM	280.00	3.00	385.00	100.00	5.00	385.00	36.00	3500.00	3021.88
48	FEM	280.00	3.00	385.00	100.00	5.00	385.00	36.00	4000.00	2984.10
49	FEM	280.00	3.00	385.00	100.00	5.00	385.00	36.00	4500.00	2809.29
50	FEM	300.00	2.00	365.00	150.00	2.00	365.00	45.00	3500.00	2865.56
51	FEM	300.00	4.00	365.00	150.00	2.00	365.00	45.00	3500.00	3324.31
52	FEM	300.00	5.00	365.00	150.00	2.00	365.00	45.00	3500.00	3672.57
53	FEM	300.00	5.00	365.00	150.00	5.00	365.00	45.00	3500.00	4173.14
54	FEM	320.00	4.00	325.00	150.00	2.00	325.00	42.00	3000.00	3964.18

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
55	FEM	320.00	4.00	325.00	150.00	2.00	325.00	42.00	3500.00	3782.55
56	FEM	320.00	4.00	325.00	150.00	2.00	325.00	42.00	4000.00	3622.62
57	FEM	160.00	2.50	346.00	60.00	5.00	346.00	32.00	3000.00	928.53
58	FEM	160.00	5.00	346.00	120.00	5.00	346.00	32.00	2500.00	1177.16
59	FEM	300.00	2.00	390.00	150.00	2.00	390.00	42.00	3000.00	3013.90
60	FEM	300.00	8.00	390.00	150.00	2.00	390.00	42.00	3000.00	2841.02
61	FEM	300.00	10.00	390.00	150.00	2.00	390.00	42.00	3000.00	3354.59
62	FEM	350.00	6.00	395.00	200.00	3.00	395.00	36.50	3500.00	7196.86
63	FEM	160.00	4.00	360.00	80.00	4.00	360.00	29.00	1500.00	787.32
64	FEM	160.00	4.00	360.00	80.00	4.00	360.00	29.00	2000.00	760.00
65	FEM	160.00	4.00	360.00	80.00	4.00	360.00	29.00	2500.00	732.95
66	FEM	160.00	5.00	320.00	60.00	5.00	346.00	32.00	1500.00	935.90
67	FEM	160.00	5.00	320.00	60.00	5.00	346.00	32.00	2000.00	933.85
68	FEM	160.00	5.00	320.00	60.00	5.00	346.00	32.00	2500.00	927.74
69	FEM	200.00	4.00	360.00	100.00	4.00	420.00	29.00	1500.00	2018.94
70	FEM	200.00	4.00	360.00	100.00	4.00	420.00	29.00	2000.00	1873.85
71	FEM	200.00	4.00	360.00	100.00	4.00	420.00	29.00	2500.00	1740.56
72	FEM	130.00	2.00	334.00	50.00	2.00	390.00	42.00	1500.00	747.42
73	FEM	220.00	2.00	320.00	130.00	2.00	320.00	33.60	1500.00	1513.48
74	FEM	220.00	2.00	320.00	130.00	2.00	320.00	33.60	2500.00	1347.01
75	FEM	200.00	3.00	330.00	120.00	5.00	360.00	33.00	1700.00	1758.16
76	FEM	200.00	3.00	330.00	120.00	5.00	360.00	33.00	2250.00	1660.40
77	FEM	200.00	3.00	330.00	120.00	5.00	360.00	33.00	3250.00	1454.48
78	FEM	156.00	2.00	333.00	60.00	2.00	346.00	32.00	2400.00	785.59
79	FEM	195.00	3.50	360.00	100.00	2.50	365.00	29.00	2200.00	1436.02
80	FEM	187.00	2.50	259.00	90.00	3.00	298.00	36.00	1500.00	1302.32
81	FEM	187.00	2.50	259.00	90.00	3.00	298.00	36.00	2000.00	1181.24
82	FEM	187.00	2.50	259.00	90.00	3.00	298.00	36.00	2500.00	1031.58
83	FEM	187.00	2.50	259.00	90.00	3.00	298.00	36.00	2900.00	1030.14
84	FEM	145.00	2.00	370.00	45.00	2.00	370.00	29.50	1500.00	778.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
85	FEM	145.00	2.00	370.00	45.00	2.00	370.00	29.50	3500.00	497.19
86	FEM	165.00	3.00	350.00	85.00	3.00	350.00	27.50	1500.00	1137.56
87	FEM	165.00	3.00	350.00	85.00	3.00	350.00	27.50	2500.00	1028.98
88	FEM	165.00	3.00	350.00	85.00	3.00	350.00	27.50	3500.00	840.49
89	FEM	185.00	3.50	365.00	95.00	3.50	365.00	32.60	1500.00	1620.48
90	FEM	185.00	3.50	365.00	95.00	3.50	365.00	32.60	2500.00	1460.60
91	FEM	185.00	3.50	365.00	95.00	3.50	365.00	32.60	3500.00	1281.81
92	FEM	185.00	3.50	365.00	95.00	3.50	365.00	32.60	4500.00	964.62
93	FEM	180.00	3.00	336.00	95.00	3.00	336.00	24.50	2250.00	1110.72
94	FEM	180.00	6.00	336.00	95.00	6.00	336.00	24.50	2250.00	1123.87
95	FEM	180.00	3.00	336.00	95.00	3.00	336.00	24.50	3000.00	1024.51
96	FEM	180.00	6.00	336.00	95.00	6.00	336.00	24.50	3000.00	1112.39
97	FEM	450.00	5.00	420.00	220.00	5.00	420.00	29.75	6500.00	6793.45
98	FEM	190.00	2.00	345.00	70.00	2.00	345.00	29.50	1200.00	1373.07
99	FEM	190.00	2.00	345.00	70.00	2.00	345.00	29.50	2200.00	1093.91
100	FEM	190.00	2.00	345.00	70.00	2.00	345.00	29.50	3200.00	1043.82
101	FEM	190.00	2.00	345.00	70.00	2.00	345.00	29.50	4200.00	787.22
102	FEM	230.00	3.00	450.00	100.00	3.00	450.00	35.00	1800.00	2555.57
103	FEM	230.00	3.00	450.00	100.00	3.00	450.00	35.00	2800.00	2302.30
104	FEM	230.00	3.00	450.00	100.00	3.00	450.00	35.00	4800.00	1520.57
105	FEM	230.00	3.00	450.00	100.00	3.00	450.00	35.00	5800.00	1205.99
106	FEM	320.00	4.00	425.00	120.00	4.00	425.00	42.50	3300.00	4605.31
107	FEM	320.00	2.00	425.00	120.00	2.00	425.00	42.50	3000.00	3449.33
108	FEM	330.00	4.00	360.00	120.00	4.00	360.00	42.50	2200.00	5293.09
109	FEM	260.00	3.00	485.00	80.00	3.00	485.00	36.50	2700.00	3120.45
110	FEM	260.00	3.00	485.00	80.00	3.00	485.00	36.50	3700.00	3013.92
111	FEM	240.00	2.50	395.00	110.00	2.50	395.00	29.50	2900.00	1859.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
112	FEM	240.00	2.50	395.00	110.00	2.50	395.00	29.50	3900.00	1598.38
113	FEM	250.00	3.00	395.00	110.00	3.00	395.00	29.50	1700.00	2578.79
114	FEM	250.00	3.00	395.00	110.00	3.00	395.00	29.50	2500.00	2369.84
115	FEM	250.00	3.00	395.00	110.00	3.00	395.00	29.50	3500.00	2181.48
116	FEM	120.00	2.00	420.00	60.00	2.00	420.00	24.80	1200.00	643.57
117	FEM	150.00	3.00	390.00	75.00	3.00	390.00	26.50	1300.00	1121.94
118	FEM	150.00	3.00	390.00	75.00	3.00	390.00	26.50	2300.00	997.83
119	FEM	150.00	3.00	390.00	75.00	3.00	390.00	26.50	3300.00	747.33
120	FEM	170.00	3.00	450.00	75.00	3.00	450.00	29.00	1400.00	1539.99
121	FEM	170.00	3.00	450.00	75.00	3.00	450.00	29.00	2400.00	1391.11
122	FEM	170.00	3.00	450.00	75.00	3.00	450.00	29.00	3400.00	1027.83
123	FEM	170.00	3.00	450.00	75.00	3.00	450.00	29.00	4400.00	740.49
124	FEM	220.00	2.00	420.00	80.00	2.00	420.00	28.00	2600.00	1600.55
125	FEM	240.00	3.00	395.00	90.00	3.00	395.00	32.00	1850.00	2496.12
126	FEM	240.00	3.00	395.00	90.00	3.00	395.00	32.00	3850.00	2027.85
127	FEM	220.00	2.00	420.00	80.00	2.00	420.00	28.00	2600.00	1600.55
128	FEM	240.00	3.00	395.00	90.00	3.00	395.00	32.00	1850.00	2496.12
129	FEM	240.00	3.00	395.00	90.00	3.00	395.00	32.00	3850.00	2027.85
130	FEM	280.00	2.00	450.00	100.00	2.00	450.00	29.50	2400.00	2515.09
131	FEM	280.00	2.00	450.00	100.00	2.00	450.00	29.50	3400.00	2467.88
132	FEM	280.00	2.00	450.00	100.00	2.00	450.00	29.50	4400.00	2328.39
133	FEM	300.00	2.00	460.00	100.00	2.00	460.00	35.00	2500.00	3179.97
134	FEM	300.00	2.00	460.00	100.00	2.00	460.00	35.00	3500.00	3133.11
135	FEM	300.00	2.00	460.00	100.00	2.00	460.00	35.00	5500.00	2485.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
136	FEM	120.00	2.00	430.00	45.00	2.00	430.00	32.00	1200.00	700.78
137	FEM	120.00	2.00	430.00	45.00	2.00	430.00	32.00	2200.00	584.67
138	FEM	140.00	2.00	460.00	50.00	2.00	460.00	35.00	1500.00	941.33
139	FEM	140.00	2.00	460.00	50.00	2.00	460.00	35.00	2500.00	800.31
140	FEM	250.00	5.00	390.00	100.00	5.00	390.00	34.00	1600.00	3586.41
141	FEM	250.00	5.00	390.00	100.00	5.00	390.00	34.00	2600.00	3199.78
142	FEM	250.00	5.00	390.00	100.00	5.00	390.00	34.00	3600.00	2959.29
143	FEM	230.00	4.00	395.00	120.00	2.00	395.00	32.00	1700.00	2604.96
144	FEM	230.00	4.00	395.00	120.00	2.00	395.00	32.00	2700.00	2303.82
145	FEM	230.00	4.00	395.00	120.00	2.00	395.00	32.00	3700.00	2147.27
146	FEM	230.00	4.00	395.00	120.00	2.00	395.00	32.00	4700.00	1778.47
147	FEM	240.00	2.00	365.00	150.00	2.00	365.00	56.50	3000.00	2056.70
148	FEM	240.00	4.00	365.00	150.00	4.00	365.00	56.50	3000.00	2722.56
149	FEM	240.00	6.00	365.00	150.00	6.00	365.00	56.50	3000.00	3384.56
150	FEM	280.00	2.00	340.00	180.00	2.00	340.00	56.50	5000.00	1784.76
151	FEM	280.00	4.00	340.00	180.00	4.00	340.00	56.50	5000.00	2521.44
152	FEM	280.00	6.00	340.00	180.00	6.00	340.00	56.50	5000.00	3285.74
153	FEM	320.00	4.00	320.00	130.00	4.00	320.00	56.50	6000.00	2861.60
154	FEM	320.00	6.00	320.00	130.00	6.00	320.00	56.50	6000.00	3632.74
155	FEM	320.00	8.00	320.00	130.00	8.00	320.00	56.50	6000.00	4466.82
156	FEM	150.00	1.00	365.00	120.00	1.00	365.00	56.50	1500.00	429.66
157	FEM	150.00	2.00	365.00	120.00	2.00	365.00	56.50	1500.00	700.74
158	FEM	150.00	3.00	365.00	120.00	3.00	365.00	56.50	1500.00	981.22
159	FEM	150.00	4.00	365.00	120.00	4.00	365.00	56.50	1500.00	1253.48
160	FEM	150.00	5.00	365.00	120.00	5.00	365.00	56.50	1500.00	1536.02
161	FEM	180.00	1.00	340.00	100.00	1.00	340.00	56.50	1800.00	781.85
162	FEM	180.00	2.00	340.00	100.00	2.00	340.00	56.50	1800.00	1096.76
163	FEM	180.00	3.00	340.00	100.00	3.00	340.00	56.50	1800.00	1330.59
164	FEM	180.00	4.00	340.00	100.00	4.00	340.00	56.50	1800.00	1520.85
165	FEM	180.00	1.00	365.00	100.00	1.00	365.00	56.50	1800.00	780.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
166	FEM	180.00	2.00	365.00	100.00	2.00	365.00	56.50	1800.00	1061.31
167	FEM	180.00	3.00	365.00	100.00	3.00	365.00	56.50	1800.00	1350.92
168	FEM	220.00	5.00	400.00	100.00	5.00	400.00	35.00	2000.00	2831.07
169	FEM	220.00	5.00	360.00	100.00	5.00	360.00	35.00	2000.00	2496.10
170	FEM	220.00	5.00	320.00	100.00	5.00	320.00	35.00	2000.00	2254.93
171	FEM	220.00	5.00	300.00	100.00	5.00	300.00	35.00	2000.00	2158.44
172	FEM	220.00	5.00	250.00	100.00	5.00	250.00	35.00	2000.00	1885.23
173	FEM	220.00	5.00	210.00	100.00	5.00	210.00	35.00	2000.00	1663.51
174	FEM	150.00	2.00	344.00	60.00	2.00	344.00	36.00	1500.00	822.29
175	FEM	150.00	2.00	344.00	60.00	2.00	344.00	36.00	2000.00	794.15
176	FEM	150.00	2.00	344.00	60.00	2.00	344.00	36.00	2500.00	743.29
177	FEM	150.00	2.00	344.00	60.00	2.00	344.00	36.00	3000.00	669.25
178	FEM	220.00	3.00	320.00	130.00	3.00	320.00	24.50	2000.00	1528.61
179	FEM	220.00	3.00	320.00	130.00	3.00	320.00	24.50	3000.00	1370.03
180	FEM	220.00	3.00	320.00	130.00	3.00	320.00	24.50	3500.00	1342.30
181	FEM	220.00	3.00	320.00	130.00	3.00	320.00	24.50	4000.00	1269.49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

FEM = ชุดข้อมูลที่มาจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus

ผลการทำนายของโมเดลเสายาว

ตารางที่ 14 ผลการทำนายของโมเดลเสายาว

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
1	789.90	677.70	676.75	715.40	780.93	1.17	1.17	1.10	1.01
2	715.40	677.70	676.75	789.89	764.95	1.06	1.06	0.91	0.94
3	905.50	851.39	864.61	901.98	974.95	1.06	1.05	1.00	0.93
4	901.60	851.30	864.29	905.20	1006.05	1.06	1.04	1.00	0.90
5	831.70	777.11	803.26	837.00	855.63	1.07	1.04	0.99	0.97
6	837.40	777.45	803.53	831.96	829.66	1.08	1.04	1.01	1.01
7	732.10	684.36	730.43	728.09	735.69	1.07	1.00	1.01	1.00
8	729.00	685.15	731.04	733.06	768.68	1.06	1.00	0.99	0.95
9	1195.60	1176.70	1193.40	1192.59	1162.44	1.02	1.00	1.00	1.03
10	1191.20	1176.05	1192.47	1193.91	1161.11	1.01	1.00	1.00	1.03
11	1047.30	1068.29	1106.16	1042.54	1075.18	0.98	0.95	1.00	0.97
12	1041.60	1067.57	1105.58	1046.48	1076.81	0.98	0.94	1.00	0.97
13	941.40	937.10	1003.04	949.11	923.09	1.00	0.94	0.99	1.02
14	949.00	936.54	1002.60	941.16	967.91	1.01	0.95	1.01	0.98
15	1286.40	1252.23	1280.41	1274.95	1294.80	1.03	1.00	1.01	0.99
16	1275.10	1253.18	1281.22	1286.95	1279.21	1.02	1.00	0.99	1.00
17	1187.20	1177.29	1203.79	1198.12	1168.43	1.01	0.99	0.99	1.02
18	1199.80	1178.35	1204.64	1188.55	1167.04	1.02	1.00	1.01	1.03
19	1028.00	1063.36	1112.85	1037.67	1050.35	0.97	0.92	0.99	0.98
20	1036.50	1062.37	1112.06	1026.92	1047.48	0.98	0.93	1.01	0.99
21	1730.00	1489.70	1462.59	1629.92	1705.72	1.16	1.18	1.06	1.01
22	1720.00	1490.23	1462.77	1629.99	1688.50	1.15	1.18	1.06	1.02
23	1581.60	1390.18	1410.35	1585.70	1584.94	1.14	1.12	1.00	1.00
24	1584.10	1389.95	1409.76	1580.35	1588.98	1.14	1.12	1.00	1.00
25	1451.40	1327.60	1344.76	1457.41	1465.43	1.09	1.08	1.00	0.99
26	1458.70	1328.64	1345.61	1452.73	1445.67	1.10	1.08	1.00	1.01
27	620.00	588.57	609.04	595.00	618.28	1.05	1.02	1.04	1.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
28	595.00	588.57	609.04	620.00	628.62	1.01	0.98	0.96	0.95
29	1683.15	1692.28	1799.92	1987.94	2349.46	0.99	0.94	0.85	0.72
30	3346.81	3181.62	3212.06	3918.11	3912.29	1.05	1.04	0.85	0.86
31	4074.84	3848.11	3915.30	4258.95	4419.51	1.06	1.04	0.96	0.92
32	5983.66	5829.09	5744.88	5504.03	5561.83	1.03	1.04	1.09	1.08
33	6493.49	6734.16	6678.39	5407.48	6883.44	0.96	0.97	1.20	0.94
34	8485.38	8124.39	8084.97	7277.65	7694.41	1.04	1.05	1.17	1.10
35	9882.58	9460.89	9484.30	6386.10	8150.26	1.04	1.04	1.55	1.21
36	1273.91	1269.91	1276.83	1324.11	1656.26	1.00	1.00	0.96	0.77
37	1701.68	1655.81	1686.16	1717.12	1605.18	1.03	1.01	0.99	1.06
38	1076.62	964.774	1051.43	1236.78	1028.68	1.12	1.02	0.87	1.05
39	1644.66	1825.93	2011.08	2499.95	2677.03	0.90	0.82	0.66	0.61
40	2878.30	2126.4	2341.55	1821.37	1705.58	1.35	1.23	1.58	1.69
41	1259.77	1167.44	1180.04	1248.58	1246.16	1.08	1.07	1.01	1.01
42	1874.52	1715.11	1720.62	1758.54	2041.25	1.09	1.09	1.07	0.92
43	2497.02	2221.65	2263.36	2436.39	2455.01	1.12	1.10	1.02	1.02
44	3168.98	2709.85	2784.47	2633.97	2518.46	1.17	1.14	1.20	1.26
45	1949.64	1758.7	1770.18	1971.95	2082.22	1.11	1.10	0.99	0.94
46	3038.98	2985.15	2971.24	3168.18	2966.91	1.02	1.02	0.96	1.02
47	3021.88	2841.23	2852.68	3006.13	3126.48	1.06	1.06	1.01	0.97
48	2984.10	2681	2721.75	2911.74	2886.32	1.11	1.10	1.02	1.03
49	2809.29	2505.24	2580.60	2897.05	2652.03	1.12	1.09	0.97	1.06
50	2865.56	2855.47	2818.96	2733.03	3080.79	1.00	1.02	1.05	0.93
51	3324.31	3400.61	3390.62	3607.92	3196.21	0.98	0.98	0.92	1.04
52	3672.57	3667.54	3669.19	3764.66	3598.75	1.00	1.00	0.98	1.02
53	4173.14	4049.17	4072.79	4717.68	4034.14	1.03	1.02	0.88	1.03
54	3964.18	3701.69	3666.95	3881.71	3724.20	1.07	1.08	1.02	1.06
55	3782.55	3603.72	3574.31	3831.68	3810.51	1.05	1.06	0.99	0.99
56	3622.62	3484.6	3470.33	3569.81	3806.02	1.04	1.04	1.01	0.95
57	928.53	823.015	879.62	861.26	692.87	1.13	1.06	1.08	1.34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
58	1177.16	1337.47	1386.92	1201.35	1465.02	0.88	0.85	0.98	0.80
59	3013.90	2887.19	2848.93	3064.42	2851.74	1.04	1.06	0.98	1.06
60	2841.02	4595.65	4668.61	4167.78	3518.98	0.62	0.61	0.68	0.81
61	3354.59	5146.49	5244.69	2566.56	3218.56	0.65	0.64	1.31	1.04
62	7196.86	4845.04	4912.07	4362.09	6237.46	1.49	1.47	1.65	1.15
63	787.32	1285.22	1314.48	876.82	947.62	0.61	0.60	0.90	0.83
64	760.00	1220.34	1244.49	724.71	832.57	0.62	0.61	1.05	0.91
65	732.95	1114.17	1159.96	817.38	757.26	0.66	0.63	0.90	0.97
66	935.90	1406.20	1428.55	975.72	949.45	0.67	0.66	0.96	0.99
67	933.85	1334.11	1355.35	913.02	978.95	0.70	0.69	1.02	0.95
68	927.74	1223.01	1266.71	987.56	884.59	0.76	0.73	0.94	1.05
69	2018.94	1875.14	1883.81	1985.78	1898.54	1.08	1.07	1.02	1.06
70	1873.85	1781.95	1816.78	1878.90	1830.10	1.05	1.03	1.00	1.02
71	1740.56	1703.73	1734.09	1737.30	1743.40	1.02	1.00	1.00	1.00
72	747.42	715.53	715.09	728.68	882.94	1.04	1.05	1.03	0.85
73	1513.48	1423.46	1391.57	1557.31	1627.86	1.06	1.09	0.97	0.93
74	1347.01	1313.16	1307.98	1340.54	1586.44	1.03	1.03	1.00	0.85
75	1758.16	1693.50	1728.56	1800.46	1844.96	1.04	1.02	0.98	0.95
76	1660.40	1637.87	1653.17	1632.85	1773.49	1.01	1.00	1.02	0.94
77	1454.48	1417.45	1476.69	1512.48	1670.90	1.03	0.98	0.96	0.87
78	785.59	739.65	751.74	761.07	772.55	1.06	1.05	1.03	1.02
79	1436.02	1428.40	1438.90	1649.35	1563.45	1.01	1.00	0.87	0.92
80	1302.32	1245.99	1230.33	1381.59	1220.10	1.05	1.06	0.94	1.07
81	1181.24	1184.67	1185.01	1134.35	1145.63	1.00	1.00	1.04	1.03
82	1031.58	1126.61	1129.18	1079.00	1157.41	0.92	0.91	0.96	0.89
83	1030.14	1063.70	1078.06	940.70	985.79	0.97	0.96	1.10	1.04
84	778.27	752.42	753.04	855.56	434.51	1.03	1.03	0.91	1.79
85	497.19	450.25	609.36	579.92	673.76	1.10	0.82	0.86	0.74
86	1137.56	1086.10	1102.09	1132.73	1057.23	1.05	1.03	1.00	1.08
87	1028.98	955.88	983.82	984.14	929.84	1.08	1.05	1.05	1.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
88	840.49	760.45	829.77	854.66	1100.61	1.11	1.01	0.98	0.76
89	1620.48	1548.95	1560.10	1557.41	1438.25	1.05	1.04	1.04	1.13
90	1460.60	1389.43	1418.36	1412.60	1388.92	1.05	1.03	1.03	1.05
91	1281.81	1149.48	1229.53	1237.38	1359.88	1.12	1.04	1.04	0.94
92	964.62	889.733	1252.97	1082.99	1000.56	1.08	0.77	0.89	0.96
93	1110.72	1092.35	1105.02	1118.34	1199.44	1.02	1.01	0.99	0.93
94	1123.87	1752.32	1789.07	1137.03	1376.03	0.64	0.63	0.99	0.82
95	1024.51	974.854	1010.47	1014.47	914.43	1.05	1.01	1.01	1.12
96	1112.39	1555.5	1630.60	1281.63	1449.79	0.72	0.68	0.87	0.77
97	6793.45	6173.49	6296.78	5851.82	7572.23	1.10	1.08	1.16	0.90
98	1373.07	1230.91	1168.57	1186.77	1119.87	1.12	1.18	1.16	1.23
99	1093.91	1087.53	1080.60	1227.93	1172.58	1.01	1.01	0.89	0.93
100	1043.82	933.275	954.29	1011.16	1050.21	1.12	1.09	1.03	0.99
101	787.22	747.92	804.83	963.57	913.35	1.05	0.98	0.82	0.86
102	2555.57	2288.38	2282.93	2493.54	2134.57	1.12	1.12	1.02	1.20
103	2302.30	2077.94	2099.00	2571.62	2081.17	1.11	1.10	0.90	1.11
104	1520.57	1443.62	2113.13	1720.68	1628.99	1.05	0.72	0.88	0.93
105	1205.99	1137.47	1447.28	1449.10	2387.01	1.06	0.83	0.83	0.51
106	4605.31	4460.13	4437.01	4303.78	3561.95	1.03	1.04	1.07	1.29
107	3449.33	3591.33	3530.58	3397.38	3716.17	0.96	0.98	1.02	0.93
108	5293.09	4805.4	4631.74	4280.67	3471.47	1.10	1.14	1.24	1.52
109	3120.45	2787.57	2777.93	3020.42	2971.83	1.12	1.12	1.03	1.05
110	3013.92	2468.64	2517.28	2761.29	2696.95	1.22	1.20	1.09	1.12
111	1859.25	1775.82	1779.37	1943.57	1770.28	1.05	1.04	0.96	1.05
112	1598.38	1563.92	1606.90	1762.82	1732.87	1.02	0.99	0.91	0.92
113	2578.79	2328.14	2268.03	2620.54	2590.36	1.11	1.14	0.98	1.00
114	2369.84	2153.01	2164.77	2368.79	2281.70	1.10	1.09	1.00	1.04
115	2181.48	1962.82	1991.94	2143.37	2317.75	1.11	1.10	1.02	0.94
116	643.57	582.54	592.68	648.56	645.75	1.10	1.09	0.99	1.00
117	1121.94	1018.04	1036.07	1021.08	1059.88	1.10	1.08	1.10	1.06

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
118	997.83	872.615	906.40	877.66	962.18	1.14	1.10	1.14	1.04
119	747.33	658.072	736.19	660.75	1008.77	1.14	1.02	1.13	0.74
120	1539.99	1365.7	1382.09	1551.41	1282.99	1.13	1.11	0.99	1.20
121	1391.11	1183.36	1221.29	1339.12	1227.75	1.18	1.14	1.04	1.13
122	1027.83	917.786	1011.17	1048.29	1078.36	1.12	1.02	0.98	0.95
123	740.49	667.421	858.07	763.40	1165.20	1.11	0.86	0.97	0.64
124	1600.55	1432.28	1428.57	1600.53	1564.99	1.12	1.12	1.00	1.02
125	2496.12	2232.26	2198.68	2496.11	2497.97	1.12	1.14	1.00	1.00
126	2027.85	1790.17	1841.21	2027.83	2028.24	1.13	1.10	1.00	1.00
127	1600.55	1432.28	1428.57	1600.54	1571.36	1.12	1.12	1.00	1.02
128	2496.12	2232.26	2198.68	2496.11	2506.33	1.12	1.14	1.00	1.00
129	2027.85	1790.17	1841.21	2027.82	2027.32	1.13	1.10	1.00	1.00
130	2515.09	2377.09	2348.05	2613.05	2493.71	1.06	1.07	0.96	1.01
131	2467.88	2199.37	2188.14	2466.08	2409.70	1.12	1.13	1.00	1.02
132	2328.39	1959.94	1990.12	2276.07	2072.86	1.19	1.17	1.02	1.12
133	3179.97	3004.45	2952.96	3070.32	2663.33	1.06	1.08	1.04	1.19
134	3133.11	2786.05	2758.74	3116.36	2621.50	1.12	1.14	1.01	1.20
135	2485.76	2165.03	2249.40	2303.20	2455.65	1.15	1.11	1.08	1.01
136	700.78	640.358	644.49	679.80	720.05	1.09	1.09	1.03	0.97
137	584.67	483.659	516.99	569.13	700.19	1.21	1.13	1.03	0.84
138	941.33	849.693	852.04	937.06	996.76	1.11	1.10	1.00	0.94
139	800.31	654.452	695.86	887.17	1026.02	1.22	1.15	0.90	0.78
140	3586.41	3272.99	3171.99	3280.82	2949.41	1.10	1.13	1.09	1.22
141	3199.78	2969.1	2989.37	3271.85	3229.32	1.08	1.07	0.98	0.99
142	2959.29	2664.97	2738.81	3034.76	3399.57	1.11	1.08	0.98	0.87
143	2604.96	2184.01	2151.97	2411.59	2470.17	1.19	1.21	1.08	1.05
144	2303.82	2000.33	2015.76	2408.39	2219.08	1.15	1.14	0.96	1.04
145	2147.27	1771.24	1832.87	2025.06	2203.19	1.21	1.17	1.06	0.97
146	1778.47	1496.31	1617.76	1855.85	1606.54	1.19	1.10	0.96	1.11
147	2056.70	1985.96	1982.06	1928.32	2112.69	1.04	1.04	1.07	0.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
148	2722.56	2654.77	2689.92	2774.07	2624.25	1.03	1.01	0.98	1.04
149	3384.56	3304.27	3371.72	2965.99	3128.96	1.02	1.00	1.14	1.08
150	1784.76	2064.12	2126.84	2253.28	2497.80	0.86	0.84	0.79	0.71
151	2521.44	2704.21	2840.41	2782.41	2453.81	0.93	0.89	0.91	1.03
152	3285.74	3322.92	3526.04	3646.08	3310.25	0.99	0.93	0.90	0.99
153	2861.60	3494.62	3677.67	2885.05	3135.70	0.82	0.78	0.99	0.91
154	3632.74	4059.18	4312.36	3357.93	3579.38	0.89	0.84	1.08	1.01
155	4466.82	4601.42	4918.80	3456.17	4009.55	0.97	0.91	1.29	1.11
156	429.66	575.15	577.72	576.39	694.42	0.75	0.74	0.75	0.62
157	700.74	819.45	838.30	690.33	626.18	0.86	0.84	1.02	1.12
158	981.22	1059.44	1090.62	1020.66	982.25	0.93	0.90	0.96	1.00
159	1253.48	1295.38	1338.23	1233.68	1299.92	0.97	0.94	1.02	0.96
160	1536.02	1527.4	1581.34	1645.81	1629.47	1.01	0.97	0.93	0.94
161	781.85	1119.93	1096.27	828.41	1023.01	0.70	0.71	0.94	0.76
162	1096.76	1354.37	1345.48	1054.88	840.76	0.81	0.82	1.04	1.30
163	1330.59	1583.23	1588.76	1337.71	1228.27	0.84	0.84	0.99	1.08
164	1520.85	1807.58	1826.99	1581.65	1549.13	0.84	0.83	0.96	0.98
165	780.00	1137.27	1114.05	740.13	1016.14	0.69	0.70	1.05	0.77
166	1061.31	1389.81	1381.37	1064.64	964.76	0.76	0.77	1.00	1.10
167	1350.92	1636.96	1642.67	1342.65	1300.73	0.83	0.82	1.01	1.04
168	2831.07	2588.85	2635.44	2866.83	2701.84	1.09	1.07	0.99	1.05
169	2496.10	2432.41	2467.02	2570.61	2356.98	1.03	1.01	0.97	1.06
170	2254.93	2275.48	2296.83	2151.84	2137.29	0.99	0.98	1.05	1.06
171	2158.44	2196.7	2211.06	2053.23	1708.84	0.98	0.98	1.05	1.26
172	1885.23	1998.36	1994.67	1964.05	1819.47	0.94	0.95	0.96	1.04
173	1663.51	1837.67	1819.53	1897.83	1989.51	0.91	0.91	0.88	0.84
174	822.29	844.875	845.39	862.24	768.61	0.97	0.97	0.95	1.07
175	794.15	786.364	791.14	780.21	687.98	1.01	1.00	1.02	1.15
176	743.29	706.025	726.47	738.14	721.95	1.05	1.02	1.01	1.03
177	669.25	615.283	654.56	685.62	736.80	1.09	1.02	0.98	0.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
178	1528.61	1460.12	1477.90	1502.74	1490.72	1.05	1.03	1.02	1.03
179	1370.03	1358.02	1375.92	1413.46	1297.22	1.01	1.00	0.97	1.06
180	1342.30	1280.82	1313.43	1305.56	1331.11	1.05	1.02	1.03	1.01
181	1269.49	1194.75	1244.85	1344.39	1242.25	1.06	1.02	0.94	1.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสาสั้น

ตารางที่ 15 ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลเสาสั้น

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
1	[9]	180.00	3.00	275.90	48.00	3.00	396.10	37.92	540.00	1790.00
2		180.00	3.00	275.90	48.00	3.00	396.10	37.92	540.00	1791.00
3		180.00	3.00	275.90	88.00	3.00	370.20	37.92	540.00	1648.00
4		180.00	3.00	275.90	88.00	3.00	370.20	37.92	540.00	1650.00
5		180.00	3.00	275.90	140.00	3.00	342.00	37.92	540.00	1435.00
6		180.00	3.00	275.90	140.00	3.00	342.00	37.92	540.00	1358.00
7		114.00	3.00	294.50	58.00	3.00	374.50	37.92	342.00	904.00
8		114.00	3.00	294.50	58.00	3.00	374.50	37.92	342.00	898.00
9		240.00	3.00	275.90	114.00	3.00	294.50	37.92	720.00	2421.00
10		240.00	3.00	275.90	114.00	3.00	294.50	37.92	720.00	2460.00
11		300.00	3.00	275.90	165.00	3.00	320.50	37.92	900.00	3331.00
12		300.00	3.00	275.90	165.00	3.00	320.50	37.92	900.00	3266.00
13	[10]	114.30	6.00	454.00	48.30	2.90	425.00	63.40	400.00	1665.00
14		114.30	4.80	416.00	48.30	2.90	425.00	63.40	400.00	1441.00
15		114.30	3.60	453.00	48.30	2.90	425.00	63.40	400.00	1243.00
16		114.30	3.20	430.00	48.30	2.90	425.00	63.40	400.00	1145.00
17		165.10	3.50	433.00	101.60	3.30	394.00	63.40	400.00	1629.00
18		165.10	3.00	395.00	101.60	3.20	394.00	63.40	500.00	1613.00
19		163.80	2.35	395.00	101.60	3.20	394.00	63.40	500.00	1487.00
20		163.00	1.95	395.00	101.60	3.20	394.00	63.40	500.00	1328.00
21		162.50	1.70	395.00	101.60	3.20	394.00	63.40	500.00	1236.00
22	[11]	158.00	0.90	221.00	38.00	0.90	221.00	18.70	450.00	635.00
23		159.00	0.90	221.00	76.00	0.90	221.00	18.70	450.00	540.00
24		158.00	1.50	308.00	39.00	1.50	308.00	18.70	450.00	851.60
25		158.00	1.50	308.00	77.00	1.50	308.00	18.70	450.00	728.10
26		158.00	1.50	308.00	114.00	1.50	308.00	18.70	450.00	589.00
27		158.00	2.14	286.00	40.00	2.14	286.00	18.70	450.00	968.20
28		158.00	2.14	286.00	77.00	2.14	286.00	18.70	450.00	879.10
29		157.00	2.14	286.00	115.00	2.14	286.00	18.70	450.00	703.60
30	[12]	114.50	5.90	454.00	48.40	2.80	425.00	63.40	400.00	1418.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
31		114.60	4.70	416.00	48.40	2.80	425.00	63.40	400.00	1390.00
32		114.40	3.50	453.00	48.40	2.80	425.00	63.40	400.00	1191.00
33		114.20	3.00	430.00	48.40	2.80	425.00	63.40	400.00	1100.00
34		165.10	3.50	433.00	101.80	3.10	410.00	63.40	400.00	1700.00
35	[13]	160.00	1.00	220.00	75.00	1.00	220.00	23.60	400.00	540.00
36		160.00	1.50	255.00	75.00	1.50	255.00	23.60	400.00	728.00
37		160.00	1.50	255.00	112.00	1.50	255.00	23.60	400.00	589.00
38		160.00	2.10	300.00	75.00	2.10	300.00	23.60	400.00	879.00
39		160.00	2.10	300.00	112.00	2.10	300.00	23.60	400.00	703.00
40	[14]	500.20	4.02	366.00	301.60	3.02	366.00	28.00	998.00	4206.00
41		500.30	4.03	366.00	302.10	3.01	366.00	28.00	1001.00	4606.00
42		500.10	4.01	366.00	300.90	3.00	366.00	28.00	1000.00	4789.00
43		498.90	3.01	366.00	299.80	3.00	366.00	28.00	1001.00	4162.00
44		498.50	2.99	366.00	302.10	2.98	366.00	28.00	1002.00	3886.50
45		499.60	3.02	366.00	301.50	2.99	366.00	28.00	1000.00	3882.00
46		601.10	4.01	366.00	401.20	2.98	366.00	28.00	1001.00	5383.50
47		602.30	4.02	366.00	402.10	2.97	366.00	28.00	1003.00	5370.50
48		603.40	3.98	366.00	401.50	3.02	366.00	28.00	1001.00	4820.00
49		601.50	2.98	366.00	399.80	3.01	366.00	28.00	999.00	4415.00
50		601.20	3.02	366.00	400.10	3.02	366.00	28.00	999.00	4084.50
51		400.20	3.01	366.00	241.20	3.01	366.00	28.00	1002.00	3423.00
52		400.60	3.02	366.00	240.50	3.00	366.00	28.00	2003.00	3013.00
53		398.20	3.00	366.00	239.80	3.00	366.00	28.00	2501.00	3256.50
54		401.20	4.00	366.00	240.20	3.00	366.00	28.00	1001.00	3828.00
55		400.70	4.02	366.00	240.10	3.02	366.00	28.00	2005.00	3542.00
56		400.30	4.05	366.00	240.00	3.05	366.00	28.00	2502.00	3790.00
57		401.20	3.02	366.00	240.00	2.99	366.00	28.00	1002.00	2990.00
58		400.10	2.98	366.00	240.20	2.98	366.00	28.00	2498.00	3490.00
59	[15]	190.60	5.15	346.90	34.00	3.08	348.20	37.50	571.80	2718.00
60		190.50	5.13	346.90	33.90	3.10	348.20	37.50	571.50	2724.00
61		190.50	5.15	346.90	59.60	3.32	342.10	37.50	571.50	2718.00
62		188.20	5.04	346.90	59.10	3.28	342.10	37.50	564.60	2482.00
63		190.70	5.11	346.90	101.60	4.03	345.80	37.50	572.10	2626.00
64		189.20	5.08	346.90	101.20	4.05	345.80	37.50	567.60	2462.00
65		188.90	5.09	464.00	33.70	3.09	348.20	37.50	566.70	3182.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
66		188.90	5.12	464.00	33.50	3.06	348.20	37.50	566.70	3232.00
67		191.00	5.15	464.00	59.40	3.31	342.10	37.50	573.00	3286.00
68		190.10	5.11	464.00	59.10	3.29	342.10	37.50	570.30	3242.00
69		190.70	5.15	464.00	101.10	4.10	345.80	37.50	572.10	3082.00
70		190.70	5.09	464.00	100.90	4.07	345.80	37.50	572.10	3192.00
71		190.40	5.15	346.90	59.90	3.33	342.10	29.00	571.20	2460.00
72		190.00	5.11	346.90	59.10	3.31	342.10	29.00	570.00	2494.00
73		189.10	5.10	346.90	59.40	3.35	342.10	37.50	567.30	2623.00
74		190.10	5.07	346.90	59.70	3.35	342.10	37.50	570.30	2588.00
75		189.90	5.12	346.90	58.90	3.31	342.10	51.00	569.70	2950.00
76		188.60	5.08	346.90	58.90	3.33	342.10	51.00	565.80	3026.00
77		190.30	4.26	336.80	59.40	3.36	342.10	37.50	570.90	2376.00
78		190.10	4.21	336.80	59.30	3.30	342.10	37.50	570.30	2406.00
79		189.70	5.12	346.90	59.50	3.32	342.10	37.50	569.10	2611.00
80		188.80	5.08	346.90	59.50	3.31	342.10	37.50	566.40	2579.00
81		189.10	6.77	327.30	59.70	3.34	342.10	37.50	567.30	2894.00
82		188.60	6.73	327.30	59.80	3.33	342.10	37.50	565.80	2928.00
83	[16]	165.20	3.68	357.70	42.50	3.19	409.80	53.70	495.60	2060.00
84		164.90	3.69	357.70	42.70	3.20	409.80	53.70	494.70	2003.00
85		165.00	3.68	357.70	42.60	3.21	409.80	90.70	495.00	2423.00
86		165.10	3.70	357.70	42.70	3.19	409.80	90.70	495.30	2446.00
87		164.80	3.69	357.70	42.60	3.20	409.80	141.00	494.40	3068.00
88		164.90	3.69	357.70	42.50	3.20	409.80	141.00	494.70	3110.00
89		165.00	3.70	357.70	76.00	2.80	385.60	53.70	495.00	1831.00
90		165.00	3.70	357.70	76.20	2.79	385.60	53.70	495.00	1876.00
91		165.10	3.67	357.70	76.10	2.81	385.60	90.70	495.30	2174.00
92		165.20	3.69	357.70	76.40	2.80	385.60	90.70	495.60	2202.00
93		164.80	3.68	357.70	76.30	2.80	385.60	141.00	494.40	2732.00
94		164.70	3.71	357.70	76.10	2.78	385.60	141.00	494.10	2736.00
95		165.30	5.96	347.00	76.10	2.79	385.60	53.70	495.90	2183.00
96		165.00	5.99	347.00	76.20	2.81	385.60	53.70	495.00	2203.00
97		164.90	6.01	347.00	75.90	2.80	385.60	90.70	494.70	2666.00
98		164.80	6.00	347.00	75.80	2.80	385.60	90.70	494.40	2631.00
99		164.90	6.01	347.00	76.00	2.81	385.60	141.00	494.70	3110.00
100		164.80	6.00	347.00	76.10	2.78	385.60	141.00	494.40	3032.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	REF	Ext Dia	Ext t	Fyo	Inn Dia	Inn t	Fyi	fc	high	Nu
101		165.20	5.95	428.60	76.10	2.79	385.60	53.70	495.60	2645.00
102		165.00	5.96	428.60	76.00	2.79	385.60	53.70	495.00	2601.00
103		165.00	5.99	428.60	75.80	2.80	385.60	90.70	495.00	2971.00
104		165.00	6.01	428.60	75.90	2.78	385.60	90.70	495.00	2911.00
105		165.10	5.94	428.60	75.90	2.80	385.60	141.00	495.30	3322.00
106		164.90	6.02	428.60	76.10	2.80	385.60	141.00	494.70	3304.00
107	[17]	114.30	5.85	455.00	60.30	2.52	396.00	39.03	342.90	1421.54
108		114.30	5.85	455.00	60.30	5.77	310.00	39.03	342.90	1574.26
109		114.30	2.73	285.00	60.30	2.52	396.00	39.03	342.90	734.60
110		114.30	2.73	285.00	60.30	5.77	310.00	39.03	342.90	913.07
111		114.30	5.85	455.00	60.30	2.52	396.00	65.30	342.90	1505.67
112		114.30	5.85	455.00	60.30	5.77	310.00	65.30	342.90	1666.41
113		114.30	2.73	285.00	60.30	2.52	396.00	65.30	342.90	899.21
114		114.30	2.73	285.00	60.30	5.77	310.00	65.30	342.90	1088.06
115	[18]	114.30	2.74	355.00	60.30	2.52	396.00	41.58	342.90	789.42
116		114.30	6.11	535.00	60.30	2.52	396.00	41.58	342.90	1681.98
117		114.30	2.74	355.00	60.30	5.77	310.00	41.58	342.90	969.16
118		114.30	6.11	535.00	60.30	5.77	310.00	41.58	342.90	1823.35
119		114.30	2.74	355.00	60.30	2.52	396.00	68.89	342.90	914.32
120		114.30	6.11	535.00	60.30	2.52	396.00	68.89	342.90	1752.89
121		114.30	2.74	355.00	60.30	5.77	310.00	68.89	342.90	1068.06
122		114.30	6.11	535.00	60.30	5.77	310.00	68.89	342.90	1889.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทำนายของโมเดลเสาสั้น

ตารางที่ 16 ผลการทำนายของโมเดลเสาสั้น

Model	Nu	EC4	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
1	1790.00	1620.58	1408.56	1791.00	1745.45	1.10	1.27	1.00	1.03
2	1791.00	1620.58	1408.56	1790.00	1717.98	1.11	1.27	1.00	1.04
3	1648.00	1512.18	1384.01	1650.00	1634.39	1.09	1.19	1.00	1.01
4	1650.00	1512.18	1384.01	1648.00	1641.07	1.09	1.19	1.00	1.01
5	1435.00	1160.65	1196.59	1358.01	1476.59	1.24	1.20	1.06	0.97
6	1358.00	1160.65	1196.59	1435.01	1543.23	1.17	1.13	0.95	0.88
7	904.00	795.42	731.65	898.01	884.39	1.14	1.24	1.01	1.02
8	898.00	795.42	731.65	904.01	908.43	1.13	1.23	0.99	0.99
9	2421.00	2310.25	2090.32	2459.99	2483.41	1.05	1.16	0.98	0.97
10	2460.00	2310.25	2090.32	2420.99	2455.35	1.06	1.18	1.02	1.00
11	3331.00	3147.74	2915.37	3265.98	3184.61	1.06	1.14	1.02	1.05
12	3266.00	3147.74	2915.37	3330.98	3214.13	1.04	1.12	0.98	1.02
13	1665.00	1657.08	1468.17	1707.52	1559.10	1.00	1.13	0.98	1.07
14	1441.00	1410.94	1255.28	1830.42	1606.90	1.02	1.15	0.79	0.90
15	1243.00	1294.67	1159.94	1560.42	1330.42	0.96	1.07	0.80	0.93
16	1145.00	1200.65	1082.27	1367.15	1143.22	0.95	1.06	0.84	1.00
17	1629.00	1988.06	1853.94	1885.94	1553.75	0.82	0.88	0.86	1.05
18	1613.00	1778.42	1687.20	1778.04	1597.70	0.91	0.96	0.91	1.01
19	1487.00	1622.56	1554.97	1583.02	1348.61	0.92	0.96	0.94	1.10
20	1328.00	1527.18	1474.06	1656.61	1526.44	0.87	0.90	0.80	0.87
21	1236.00	1467.80	1423.67	1674.65	1536.53	0.84	0.87	0.74	0.80
22	635.00	503.79	439.02	1078.98	815.16	1.26	1.45	0.59	0.78
23	540.00	453.03	407.74	933.82	589.22	1.19	1.32	0.58	0.92
24	851.60	711.03	591.85	1075.78	747.17	1.20	1.44	0.79	1.14
25	728.10	661.58	585.69	982.58	712.46	1.10	1.24	0.74	1.02
26	589.00	553.71	541.40	1105.45	630.33	1.06	1.09	0.53	0.93
27	968.20	825.21	675.86	1132.62	896.50	1.17	1.43	0.85	1.08
28	879.10	779.91	686.65	1018.08	852.25	1.13	1.28	0.86	1.03
29	703.60	657.54	652.28	1221.74	752.26	1.07	1.08	0.58	0.94
30	1418.00	1642.91	1453.67	1775.27	1622.28	0.86	0.98	0.80	0.87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC4	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
31	1390.00	1398.64	1242.89	1804.51	1428.85	0.99	1.12	0.77	0.97
32	1191.00	1275.81	1142.70	1535.37	1189.92	0.93	1.04	0.78	1.00
33	1100.00	1163.21	1050.25	1407.08	1028.94	0.95	1.05	0.78	1.07
34	1700.00	1979.09	1844.64	1725.54	1617.18	0.86	0.92	0.99	1.05
35	540.00	554.75	499.28	984.79	714.65	0.97	1.08	0.55	0.76
36	728.00	690.46	610.94	961.07	571.80	1.05	1.19	0.76	1.27
37	589.00	557.16	534.26	1090.14	521.42	1.06	1.10	0.54	1.13
38	879.00	893.89	781.36	1047.83	802.14	0.98	1.12	0.84	1.10
39	703.00	758.22	733.37	1206.99	847.64	0.93	0.96	0.58	0.83
40	4206.00	7167.19	6467.87	4596.89	4692.86	0.59	0.65	0.91	0.90
41	4606.00	7166.03	6467.57	4390.61	4820.70	0.64	0.71	1.05	0.96
42	4789.00	7161.82	6459.63	4383.34	4394.49	0.67	0.74	1.09	1.09
43	4162.00	6446.16	5916.18	3826.72	3613.17	0.65	0.70	1.09	1.15
44	3886.50	6383.08	5868.42	3846.17	3988.25	0.61	0.66	1.01	0.97
45	3882.00	6447.26	5919.52	4025.21	4181.69	0.60	0.66	0.96	0.93
46	5383.50	8774.36	8083.16	5251.58	4913.33	0.61	0.67	1.03	1.10
47	5370.50	8803.36	8108.17	5193.48	4583.96	0.61	0.66	1.03	1.17
48	4820.00	8841.44	8145.92	4794.68	4821.64	0.55	0.59	1.01	1.00
49	4415.00	7992.00	7475.32	3963.98	4283.37	0.55	0.59	1.11	1.03
50	4084.50	8012.36	7492.74	4278.27	4259.61	0.51	0.55	0.95	0.96
51	3423.00	4554.22	4207.29	3001.11	3469.43	0.75	0.81	1.14	0.99
52	3013.00	4370.84	4161.09	2589.76	3133.67	0.69	0.72	1.16	0.96
53	3256.50	4173.00	4065.30	3387.30	3524.02	0.78	0.80	0.96	0.92
54	3828.00	5119.05	4645.78	3062.12	3883.81	0.75	0.82	1.25	0.99
55	3542.00	4849.63	4585.20	2608.12	3553.82	0.73	0.77	1.36	1.00
56	3790.00	4687.79	4550.21	2529.82	3455.88	0.81	0.83	1.50	1.10
57	2990.00	4592.70	4233.91	3401.22	3292.60	0.65	0.71	0.88	0.91
58	3490.00	4200.22	4087.31	3180.01	3584.00	0.83	0.85	1.10	0.97
59	2718.00	2443.94	1974.66	2678.69	2754.80	1.11	1.38	1.01	0.99
60	2724.00	2467.93	1992.50	2694.35	2644.42	1.10	1.37	1.01	1.03
61	2718.00	2444.30	2034.67	2608.79	2563.88	1.11	1.34	1.04	1.06
62	2482.00	2373.60	1977.60	2578.27	2885.15	1.05	1.26	0.96	0.86
63	2626.00	2291.24	2067.90	2406.83	2750.87	1.15	1.27	1.09	0.95
64	2462.00	2242.12	2027.99	2393.62	2614.82	1.10	1.21	1.03	0.94
65	3182.00	2890.29	2308.63	3069.35	3257.16	1.10	1.38	1.04	0.98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC4	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
66	3232.00	2899.75	2314.61	3015.61	3288.81	1.11	1.40	1.07	0.98
67	3286.00	2902.10	2388.36	3129.92	3056.85	1.13	1.38	1.05	1.07
68	3242.00	2869.66	2361.88	3143.37	2826.82	1.13	1.37	1.03	1.15
69	3082.00	2723.41	2428.66	2978.75	3080.66	1.13	1.27	1.03	1.00
70	3192.00	2705.18	2411.45	2932.47	3055.17	1.18	1.32	1.09	1.04
71	2460.00	2257.79	1852.85	2497.67	2692.52	1.09	1.33	0.98	0.91
72	2494.00	2242.11	1838.44	2454.34	2955.93	1.11	1.36	1.02	0.84
73	2623.00	2407.19	2005.86	2595.76	2623.79	1.09	1.31	1.01	1.00
74	2588.00	2418.29	2016.15	2600.04	2456.23	1.07	1.28	1.00	1.05
75	2950.00	2719.63	2305.99	2906.73	2433.96	1.08	1.28	1.01	1.21
76	3026.00	2681.58	2275.70	2875.58	2567.91	1.13	1.33	1.05	1.18
77	2376.00	2192.77	1852.29	2353.52	2425.53	1.08	1.28	1.01	0.98
78	2406.00	2174.94	1837.44	2306.85	2596.84	1.11	1.31	1.04	0.93
79	2611.00	2421.95	2016.97	2668.26	2819.54	1.08	1.29	0.98	0.93
80	2579.00	2394.68	1995.54	2538.91	2776.58	1.08	1.29	1.02	0.93
81	2894.00	2698.49	2218.29	2857.26	2734.26	1.07	1.30	1.01	1.06
82	2928.00	2678.53	2203.05	2839.64	2959.52	1.09	1.33	1.03	0.99
83	2060.00	2026.02	1739.43	1988.44	2135.48	1.02	1.18	1.04	0.96
84	2003.00	2022.36	1736.56	2056.50	2352.99	0.99	1.15	0.97	0.85
85	2423.00	2669.51	2363.09	2388.72	2524.72	0.91	1.03	1.01	0.96
86	2446.00	2675.08	2367.23	2378.26	2298.79	0.91	1.03	1.03	1.06
87	3068.00	3548.22	3204.51	3109.57	2867.50	0.86	0.96	0.99	1.07
88	3110.00	3552.96	3208.65	3067.78	2922.54	0.88	0.97	1.01	1.06
89	1831.00	1871.09	1668.56	1876.08	2195.51	0.98	1.10	0.98	0.83
90	1876.00	1869.22	1667.19	1828.65	1830.40	1.00	1.13	1.03	1.02
91	2174.00	2408.11	2186.07	2190.87	2419.44	0.90	0.99	0.99	0.90
92	2202.00	2410.79	2188.41	2168.95	2299.47	0.91	1.01	1.02	0.96
93	2732.00	3131.97	2877.59	2674.42	2755.84	0.87	0.95	1.02	0.99
94	2736.00	3134.08	2878.06	2663.18	2798.89	0.87	0.95	1.03	0.98
95	2183.00	2265.65	1978.14	2216.32	2416.91	0.96	1.10	0.98	0.90
96	2203.00	2264.46	1978.21	2208.47	2311.31	0.97	1.11	1.00	0.95
97	2666.00	2761.57	2459.05	2629.25	2814.24	0.97	1.08	1.01	0.95
98	2631.00	2757.97	2455.78	2662.40	2769.23	0.95	1.07	0.99	0.95
99	3110.00	3435.62	3109.63	2374.56	2876.65	0.91	1.00	1.31	1.08
100	3032.00	3426.19	3101.03	2373.70	2922.68	0.88	0.98	1.28	1.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Nu	EC4	AISC	GPR	Xgb	R EC4	R AISC	R GPR	R Xgb
101	2645.00	2551.84	2213.91	2595.09	2468.37	1.04	1.19	1.02	1.07
102	2601.00	2549.72	2211.96	2641.75	2638.40	1.02	1.18	0.98	0.99
103	2971.00	3052.99	2699.75	2860.13	2865.53	0.97	1.10	1.04	1.04
104	2911.00	3054.45	2700.67	2894.77	2955.87	0.95	1.08	1.01	0.98
105	3322.00	3721.83	3347.94	3074.14	3208.12	0.89	0.99	1.08	1.04
106	3304.00	3723.12	3348.78	3048.28	3160.11	0.89	0.99	1.08	1.05
107	1421.54	1430.01	1277.28	1969.24	1386.90	0.99	1.11	0.72	1.02
108	1574.26	1529.35	1400.89	1903.85	1572.60	1.03	1.12	0.83	1.00
109	734.60	742.61	687.94	1377.91	859.44	0.99	1.07	0.53	0.85
110	913.07	842.70	811.74	1523.12	1048.71	1.08	1.12	0.60	0.87
111	1505.67	1567.54	1410.56	1953.14	1535.07	0.96	1.07	0.77	0.98
112	1666.41	1667.58	1534.12	1902.57	1710.28	1.00	1.09	0.88	0.97
113	899.21	908.79	846.99	1472.62	866.50	0.99	1.06	0.61	1.04
114	1088.06	1009.85	970.69	1491.03	1022.83	1.08	1.12	0.73	1.06
115	789.42	841.13	770.46	1412.13	825.16	0.94	1.02	0.56	0.96
116	1681.98	1663.04	1487.72	1938.30	1649.28	1.01	1.13	0.87	1.02
117	969.16	941.34	894.17	1532.96	949.76	1.03	1.08	0.63	1.02
118	1823.35	1763.18	1611.20	1874.38	1821.41	1.03	1.13	0.97	1.00
119	914.32	1013.30	935.57	1467.38	917.26	0.90	0.98	0.62	1.00
120	1752.89	1803.74	1623.97	1952.20	1673.16	0.97	1.08	0.90	1.05
121	1068.06	1114.53	1059.18	1558.97	1022.60	0.96	1.01	0.69	1.04
122	1889.69	1904.52	1747.41	1904.29	1901.78	0.99	1.08	0.99	0.99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เปรียบเทียบผลจากการจำลองโดยโปรแกรม Abaqus กับผลการทดสอบจริง

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบผลการหากำลังรับแรงอัดประลัยโดยโปรแกรมกับผลการทดสอบจริง

Model	Ext Dia	Ext t	Fyo	fc	Inn Dia	Inn t	Fyi	high	Nu Exp	Nu FEM	EXP/FEM
1	120.00	1.96	311.00	53.12	60.00	1.96	380.00	1324	789.90	689.41	1.15
2	120.00	1.96	311.00	53.12	60.00	1.96	380.00	1324	715.40	689.41	1.04
3	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	1500	905.50	901.75	1.00
4	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	1503	901.60	901.75	1.00
5	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	2000	831.70	857.62	0.97
6	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	1998	837.40	857.62	0.98
7	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	2502	732.10	782.70	0.94
8	139.20	3.00	418.00	24.64	76.00	2.00	418.00	2498	729.00	782.70	0.93
9	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	1497	1195.60	1005.40	1.19
10	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	1503	1191.20	1005.40	1.18
11	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	1997	1047.30	973.34	1.08
12	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	2000	1041.60	973.34	1.07
13	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	2498	941.40	900.14	1.05
14	152.40	3.00	549.00	24.64	76.00	2.00	549.00	2500	949.00	900.14	1.05
15	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	1504	1286.40	1392.15	0.92
16	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	1498	1275.10	1392.15	0.92
17	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	2003	1187.20	1201.00	0.99
18	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	1998	1199.80	1201.00	1.00
19	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	2498	1028.00	1119.60	0.92
20	165.10	3.00	516.00	24.64	76.00	2.00	516.00	2502	1036.50	1119.60	0.93
21	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	1502	1730.00	1537.08	1.13
22	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	1500	1720.00	1537.08	1.12
23	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	1998	1581.60	1430.02	1.11
24	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	2003	1584.10	1430.02	1.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model	Ext Dia	Ext t	Fyo	fc	Inn Dia	Inn t	Fyi	high	Nu Exp	Nu FEM	EXP/FEM
25	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	2503	1451.40	1386.93	1.05
26	193.70	3.50	391.00	24.64	76.00	2.00	391.00	2497	1458.70	1386.93	1.05
27	114.00	3.00	294.50	37.04	58.00	3.00	374.50	1770	620.00	601.64	1.03
28	114.00	3.00	294.50	37.04	58.00	3.00	374.50	1770	595.00	601.64	0.99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. C.E.Rasmussen, C.K.I.W., *Gaussian Processes for Machine Learning*, ed. Vol.2. 2006, MIT press Cambridge.
2. Chen, T. and C. Guestrin, *XGBoost*, in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016. p. 785-794.
3. Elwell, D.J., *Compression Testing of Concrete Cylinders vs. Cubes*. 1995.
4. Hassanein, M.F. and O.F. Kharoob, *Analysis of circular concrete-filled double skin tubular slender columns with external stainless steel tubes.* Thin-Walled Structures, 2014. **79**: p. 23-37.
5. Eberhart, J.K.a.R., *J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.* Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995: p. 1942-1948
6. J. J. Liang, A.K.Q., P. N. Suganthan and S. Baskar, , *Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions.* IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006. **10**: p. 281-295.
7. Han, L.-H., Y.-J. Li, and F.-Y. Liao, *Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading.* Thin-Walled Structures, 2011. **49**(12): p. 1534-1543.
8. Essopjee, Y. and M. Dundu, *Performance of concrete-filled double-skin circular tubes in compression.* Composite Structures, 2015. **133**: p. 1276-1283.
9. Tao, Z., L.-H. Han, and X.-L. Zhao, *Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns.* Journal of Constructional Steel Research, 2004. **60**(8): p. 1129-1158.
10. Zhao, X.-L., L.-W. Tong, and X.-Y. Wang, *CFDST stub columns subjected to large deformation axial loading.* Engineering Structures, 2010. **32**(3): p. 692-703.
11. Uenaka, K., H. Kitoh, and K. Sonoda, *Concrete filled double skin circular stub columns under compression.* Thin-Walled Structures, 2010. **48**(1): p. 19-24.
12. Mohamed Elchalakani, X.-L.Z., Raphael Grzebieta, *Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression.* Thin-Walled Structures, 2002.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

13. Jing Yu Chen, Y.H., *Research on Bearing Capacity of Short Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Columns under Axial Compression.* Advanced Materials Research, 2010: p. 168-170.
14. Chen, J., Y.-Y. Ni, and W.-l. Jin, *Column tests of dodecagonal section double skin concrete-filled steel tubes.* Thin-Walled Structures, 2015. **88**: p. 28-40.
15. Yan, X.-F. and Y.-G. Zhao, *Experimental and numerical studies of circular sandwiched concrete axially loaded CFDST short columns.* Engineering Structures, 2021. **230**.
16. Yan, X.-F., Y.-G. Zhao, and S. Lin, *Compressive behaviour of circular CFDST short columns with high- and ultrahigh-strength concrete.* Thin-Walled Structures, 2021. **164**.
17. Ekmekyapar, T. and H. Ghanim Hasan, *The influence of the inner steel tube on the compression behaviour of the concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns.* Marine Structures, 2019. **66**: p. 197-212.
18. Ekmekyapar, T., et al., *Comparison of classical, double skin and double section CFST stub columns: Experiments and design formulations.* Journal of Constructional Steel Research, 2019. **155**: p. 192-204.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์
วัน เดือน ปี เกิด	8 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University