

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น
ของดินเหนียวด้วย Gaussian Model กรณีศึกษา จังหวัดปทุมธานี
Analysis of the Dry Density–Moisture Content Relationship
of Clay Soil Using a Gaussian Model: A Case Study in
Pathum Thani, Thailand

รัตน์โชติ ทองป้อง¹ และภัทราภรณ์ เหนือศรี^{2*}

Rattanachot Thongpong¹ and Pattaraporn Nueasri^{2*}

¹สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

²สาขาวิศวกรรมการจัดการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

¹Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology

²Department of Management Engineering, Faculty of Industrial Technology

Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage, Pathum Thani Province

*Corresponding author email: pattaraporn.nuea@vru.ac.th

Received 14 Mar 2025 Revised 01 May 2025 Accepted 28 May 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินเหนียวโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี โดยใช้วิธี Modified Proctor Compaction Test และเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยข้อมูลถูกเก็บรวบรวมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการเตรียมตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C และทำการบดและร่อนเพื่อคัดเลือกรูปร่างที่มีขนาดเฉพาะ จากนั้นใช้แม่พิมพ์บรรจุดินและทำการอัดดินในลำดับขั้นเพื่อลดช่องว่างและเพิ่มความหนาแน่นของดิน ข้อมูลจากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ

หนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังใช้การวิเคราะห์โมเดลการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression), Gaussian Model และ Logistic Model เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม ผลการทดสอบพบว่า Gaussian Model เป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งตามค่าความชื้น เนื่องจากมีค่า RMSE และ MAE ต่ำที่สุด โดย Gaussian Model สามารถให้ค่าพยากรณ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Peak Dry Density) เท่ากับ 1.505 g/cm^3 และค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เท่ากับ 9% การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ของการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินเหนียวในบริเวณที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยการเลือกใช้ Gaussian Model ช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำและสอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและวางแผนงานก่อสร้างในพื้นที่ศึกษาต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ความหนาแน่นแห้ง ความชื้นที่เหมาะสม ดินเหนียว โมเดลการพยากรณ์

Abstract

This study investigates the relationship between dry density and moisture content of clay soil using a mathematical modeling approach, with a focus on a case study in Pathum Thani Province, Thailand. The Modified Proctor Compaction Test was employed to obtain data under controlled laboratory conditions. Soil samples were collected from the field, oven-dried at 105°C, ground, and sieved to achieve uniform particle sizes. These samples were then compacted in standard molds in multiple layers to reduce voids and increase density. Statistical analysis, including Analysis of Variance (ANOVA), was conducted to examine trends and determine the optimum moisture content for compaction. Predictive models including Polynomial Regression, the Gaussian Model, and the Logistic Model were applied to estimate dry density based on varying moisture contents. The Gaussian Model demonstrated the highest predictive accuracy, supported by the lowest values of RMSE and MAE. It predicted a peak dry density of 1.505 g/cm³ at an optimum moisture content of 9 percent. The findings are consistent with previous research and suggest that the Gaussian Model is well suited for analyzing the compaction characteristics of clay soils. The results can be applied to geotechnical engineering design and construction planning in regions with similar soil profiles.

Keywords: Dry Density, Optimum Moisture Content, Clay Soil, Prediction Models

1. บทนำ

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางโยธา ดินเป็นวัสดุที่มีความหลากหลายทางธรณีวิทยา ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อความเสถียรและประสิทธิภาพของโครงสร้างที่สร้างขึ้นบนดินนั้น ดินเหนียวเป็นหนึ่งในชนิดของดินที่มีความสำคัญ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่นและความสามารถในการรับน้ำหนักดี ปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น การก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งที่ตั้งอยู่บนพื้นที่ดินเหนียวอ่อน ซึ่งยังไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติดินก่อนดำเนินการก่อสร้าง อาจส่งผลให้เกิดการยุบตัวได้ หากไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติอย่างเหมาะสม (Tang AM, 2009 และ Wang & Zhang, 2020) ในเขตจังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย ดินเหนียวเป็นวัสดุพื้นฐานที่พบได้อย่างแพร่หลาย ความเข้าใจในคุณสมบัติของดินเหนียวในพื้นที่นี้จึงเป็นเรื่องที่สำคัญในการออกแบบและวางแผนการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย การประเมินค่าความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวสามารถช่วยให้เราเข้าใจถึงความสามารถในการรับน้ำหนักและความเสถียรของดิน ทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของดินได้อย่างเหมาะสม (Jiang , 2019) ดินเหนียวมีความสามารถในการยึดเกาะสูงและมีอัตราการดูดซับน้ำที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับดินชนิดอื่น ความเข้าใจในคุณสมบัติของดินเหนียวในเขตจังหวัดปทุมธานีจึงเป็นเรื่องที่สำคัญในการวางแผนการก่อสร้างที่มีความปลอดภัยและยั่งยืน การใช้วิธี Modified Compaction ตามมาตรฐาน ASTM D1557 เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และประเมินค่าความหนาแน่นแห้งของดินเหนียว ซึ่งสามารถช่วยให้เราเข้าใจถึงคุณสมบัติของดินและทำการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้เหมาะสมกับการใช้งานทางวิศวกรรมโยธา (ASTM, 2021) จากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยวิธีการถมดินแบบปรับปรุงความหนาแน่น (Modified Compaction) สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและลดความเสี่ยงในการยุบตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินเหนียวและเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง ในพื้นที่ ๓ ไร่ ๓ งาน ๓๐ ตารางวา กรมที่ดินจังหวัดปทุมธานี โดยใช้วิธี Modified Compaction ตามมาตรฐาน ASTM D1557 เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินในการใช้งานทางวิศวกรรมโยธา ผลการวิเคราะห์จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบและวางแผนงานก่อสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดิน และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานดินในการก่อสร้างโครงสร้างขนาดเล็กถึงขนาดกลาง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการอัดแน่นของดิน (Soil Compaction Theory) การอัดแน่นของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้เม็ดดินชิดกันมากขึ้น เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของดิน การอัดแน่นช่วยลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินและเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน วิธี Modified Compaction เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติการอัดแน่นของดิน โดยใช้แรงอัดและจำนวนครั้งในการกระทบที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ASTM D1557 สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นแห้ง (Dry Density, ρ_d) (Lambe & Whitman, 1969) ดังสมการที่ 1

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_d = ความหนาแน่นแห้ง (g/cm³)

ρ = ความหนาแน่นรวม (g/cm³)

w = ความชื้น (เป็นอัตราส่วน)

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้ง (Moisture-Density Relationship) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้งเป็นเรื่องสำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) คือค่าความชื้นที่ทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Mitchell & Soga, 2005) การศึกษาความสัมพันธ์นี้ช่วยให้เราสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้เหมาะสมกับการใช้งานทางวิศวกรรมโยธา ซึ่งสามารถคำนวณจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น หรือจากสมการที่ 2

$$\rho_{dmax} = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1 + w_{opt} \cdot G_s} \quad (2)$$

โดยที่ ρ_{dmax} = ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (g/cm³)

G_s = ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm³)

w_{opt} = ความชื้นที่เหมาะสม (เป็นอัตราส่วน)

2.3 ทฤษฎีการยุบตัวของดิน (Soil Consolidation Theory) การยุบตัวของดินเกิดขึ้นเมื่อดินถูกกดทับและน้ำในช่องว่างของดินถูกกดให้ออกมา การยุบตัวมีผลต่อความเสถียรของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา โดยสมการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์การยุบตัวของดินคือสมการของ Terzaghi (Terzaghi, 1943) แสดงดังสมการที่ 3

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

โดยที่ σ' = ความดันสมบูรณ์ (effective stress)

σ = ความดันทั้งหมด (total stress)

u = ความดันน้ำในช่องว่าง (pore water pressure)

2.4 ทฤษฎีการรับน้ำหนักของดิน (Soil Bearing Capacity Theory) ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบฐานรากของโครงสร้าง ทฤษฎีนี้ช่วยให้เราสามารถคำนวณและประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของดินได้ (Meyerhof, 1951) โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักของดินมีดังสมการที่ 4

$$q_u = cN_c + \sigma'N_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (4)$$

โดยที่ q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของดิน

c = ความต้านทานเฉือนของดิน

σ' = ความดันสมบูรณ์

γ = น้ำหนักของดิน

B = ความกว้างของฐานราก

N_c, N_q, N_γ = ปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนัก

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling) การเก็บตัวอย่างดินเป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินการวิจัย โดยเลือกพื้นที่การศึกษาในตำบลแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานีที่เป็นพื้นที่ดินเหนียว จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินจากความลึกต่าง ๆ ทำการเก็บตัวอย่างดินจาก 5 จุด ข้อมูลทดสอบ โดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างดิน เพื่อนำมาตรวจสอบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน (Soil Sample Preparation) เมื่อได้ตัวอย่างดินจำนวน 5 ตัวอย่างต่อหลุมจากพื้นที่ศึกษาแล้ว ตัวอย่างดินจะถูกนำมาทำการเตรียมในห้องปฏิบัติการโดยการอบดินให้แห้งที่อุณหภูมิ $105^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$ เพื่อขจัดความชื้น และบดดินให้เป็นเม็ดละเอียดผ่านเครื่องบด (Mechanical Grinder) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เช่น เครื่องชั่งน้ำหนัก, เตาอบ และเครื่องบด ได้รับการสอบเทียบ ก่อนการใช้งานตามระเบียบปฏิบัติของห้องปฏิบัติการ และมีการตรวจสอบ ค่าความแม่นยำและความเที่ยง โดยการทดสอบซ้ำอย่าง

น้อย 3 ครั้งต่อค่าที่วัด หลังจากนั้นตัวอย่างดินจะถูกเก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทเพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นจากอากาศ

3.3 การทดสอบความหนาแน่นแห้ง (Dry Density Test) การทดสอบความหนาแน่นแห้งจะดำเนินการโดยใช้วิธี Modified Compaction ตามมาตรฐาน ASTM D1557 การทดสอบนี้จะทำโดยการบรรจุดินในแม่พิมพ์จำนวนทั้งหมด 5 ชุดข้อมูล ชุดละ 5 ครั้งการทดลอง (รวมทั้งหมด 25 ครั้ง) แล้วทำการอัดดินด้วยแรงอัดที่กำหนดในมาตรฐาน หลังจากนั้นจะทำการชั่งน้ำหนักแม่พิมพ์ที่บรรจุดินไว้และคำนวณความหนาแน่นแห้งของดิน แสดงดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 การทดสอบ Water Content Determination โดยใช้วิธี Modified Compaction ของชุดที่ 1

Water Content Determination					
Assume water content (%)	2	4	6	8	10
Wt. of Can+Wet soil	136.50	137.00	135.50	135.50	135.50
Wt. of Can+Dry soil	126.00	124.00	122.00	120.00	119.00
Wt. of Can	24	24	24	24	24
Wt. of Water	10.50	13	13.5	15.5	16.5
Wt. of Dry soil	102	100	98	96	95
Water Content	10.294	13.000	13.776	16.146	17.368

ตารางที่ 2 การทดสอบ Density Determination โดยใช้วิธี Modified Compaction ของชุดที่ 1

Density Determination					
Assume Water Content (%)	2	4	6	8	10
Wt. of soil+Mold	10007.00	9660.00	9922.00	9855.00	9799.50
Wt. of Mold	5924.00	5924.00	5924.00	5924.00	5924.00
Water Content	10.294	13.000	13.776	16.146	17.368
Wt. of Soil in Mold	4083	3736	3998	3931	3875.5
Wet Density	1.421	1.760	1.884	1.852	1.826
Dry Density	1.288	1.558	1.656	1.595	1.556

จากข้อมูลในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดค่าความชื้นและความหนาแน่นสำหรับตัวอย่างดินหลายตัวอย่าง ผู้วิจัยจะนำไปหาค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสมของดินในพื้นที่ศึกษาต่อไป จากการทดสอบความหนาแน่นแห้ง (Dry Density Test) ของตัวอย่างดินเหนียวจำนวน 5 ชุดข้อมูล โดยใช้วิธี Modified Compaction ตามมาตรฐาน ASTM D1557 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับความชื้นของดิน โดยค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของดินเหนียวในพื้นที่ศึกษาอยู่ที่ประมาณ 1.48 g/cm^3 ถึง 1.50 g/cm^3 เมื่อความชื้นอยู่ในช่วง 0.12 ถึง 0.15 (เป็นอัตราส่วน) ผลการทดสอบนี้เป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวในพื้นที่ศึกษา

3.4 การทดสอบความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content Test) การทดสอบความชื้นที่เหมาะสมผู้วิจัยจะดำเนินการร่วมกับการทดสอบความหนาแน่นแห้ง โดยการเติมน้ำในตัวอย่างดินแล้วทำการอัดดินในแม่พิมพ์ตามขั้นตอนการทดสอบความหนาแน่นแห้ง การทำซ้ำการทดสอบนี้หลายครั้งด้วยปริมาณน้ำที่แตกต่างกันเพื่อหาค่าความชื้นที่ทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (OMC) ซึ่งสามารถคำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น (หน่วย g/cm³)

No.	Assume Water Content	Dry Density	Water Content
1	2	1.288	10.294
	4	1.558	13.000
	6	1.656	13.776
	8	1.595	16.146
	10	1.556	17.368
2	2	1.305	8.906
	4	1.589	10.784
	6	1.678	12.286
	8	1.611	14.948
	10	1.572	16.146
3	2	1.301	9.223
	4	1.581	11.330
	6	1.673	12.626
	8	1.620	14.359
	10	1.580	15.544
4	2	1.287	9.709
	4	1.625	11.527
	6	1.675	13.131
	8	1.556	14.359
	10	1.518	15.026
5	2	1.292	9.223
	4	1.628	11.330
	6	1.682	12.626
	8	1.556	14.359
	10	1.511	15.544

จากตารางที่ 3 Assume Water Content ที่ดีที่สุดคือ 6% ในทุกกรณี เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด การเก็บข้อมูลชุดที่ 5 ที่ Assume Water Content เท่ากับ 6% เป็นชุดที่ให้ผลดีที่สุดในการหานี้ โดยให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.682 g/cm^3 ที่ Water Content เท่ากับ 12.626% แสดงว่าการบดอัดดินเหนียวที่มีความชื้นราว 12.5–13.0% จะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งเป็นสภาวะที่ดินมีความสามารถในการรับน้ำหนักดีที่สุดตามหลัก Modified Compaction Test

4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เครื่องมือสถิติ และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการใช้กราฟ วิเคราะห์ Residual Plots เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม (Jiang, 2019) แสดงดังภาพที่ 1

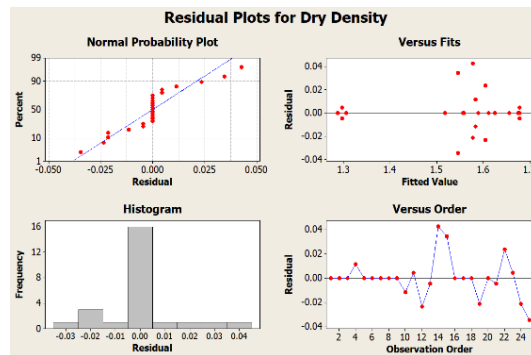
One-way ANOVA: Dry Density versus Water Content

Source	DF	SS	MS	F	P
Water Content	17	0.421936	0.024820	26.48	0.000
Error	7	0.006561	0.000937		
Total	24	0.428497			

S = 0.03062 R-Sq = 98.47% R-Sq(adj) = 94.75%

ภาพที่ 1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ ANOVA

จากภาพที่ 1 แสดงค่าความแปรปรวนของ Water Content และ Error โดยค่า F-statistic = 26.48 และ P-value = 0.000 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง Water Content และ Dry Density ค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.05 (0.000) แสดงว่าผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือสูง และมีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่าความชื้นและความหนาแน่นแห้ง ความแม่นยำของโมเดล ค่า R-Squared (R-Sq) = 98.47% และ Adjusted R-Squared (R-Sq(adj)) = 94.75% แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ใช้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นแห้งได้มากถึง 98.47% ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แสดงถึงความแม่นยำของโมเดล ข้อมูลช่วงความเชื่อมั่นแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ และการวิเคราะห์ Residual Plots แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 Residual Plots

จากภาพที่ 2 การวิเคราะห์ Residual Plots แสดงการแจกแจงของ Residuals กับ การแจกแจงปกติ Residuals กระจายตัวแบบสุ่มรอบเส้นแนวนอน แสดงว่าโมเดลเข้ากับ ข้อมูลได้ดี การแจกแจงความถี่ของ Residuals Histogram มีการแจกแจงปกติ Versus Order กราฟนี้แสดงว่า Residuals กระจายตัวแบบสุ่มรอบเส้นแนวนอน แสดงว่า Residuals มีความเป็นอิสระ

4.2 การใช้สมการการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression), Gaussian Model และ Logistic Model เพื่อหาความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้นำข้อมูลข้างต้น วิเคราะห์หาสมการถดถอยเชิงพหุนาม พบว่าสมการ Polynomial Regression Analysis ซึ่งใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ ยกกำลังสอง สมการที่ได้

$$\text{Dry Density} = 0.3394 + 0.02976 \times (\text{Water Content})^2 - 0.000144 \times (\text{Water Content})^4 + 0.000000 \times (\text{Water Content})^6$$

จากผลการวิเคราะห์ Polynomial Regression Analysis พบว่าความชื้นนี้มีความสัมพันธ์เชิงพหุนามกับค่าความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวในพื้นที่ศึกษา โดยสมการพหุนามระดับที่สามสามารถอธิบายความแปรปรวนของความหนาแน่นแห้งได้ถึง 80.5% ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของโมเดล การวิเคราะห์ ANOVA และ Sequential ANOVA ชี้ให้เห็นว่าตัวแปรเชิงเส้น กำลังสอง และกำลังสามมีความสำคัญในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้ง การแปลความหมายของสมการ ค่าคงที่ (0.3394) เป็นค่าความหนาแน่นแห้งที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีปริมาณน้ำ (Water Content = 0) ตัวแปรกำลังสอง

$(0.02976 \times \text{Water Content}^2)$ แสดงถึงแนวโน้มของความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในรูปของกำลังสอง

ตัวแปรกำลังสี่ $(-0.000144 \times \text{Water Content}^4)$ แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งที่เริ่มลดลงเมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น ตัวแปรกำลังหก $(0.000000 \times \text{Water Content}^6)$ ค่าของสัมประสิทธิ์เป็น 0 หมายความว่าองค์ประกอบนี้ไม่มีผลกระทบต่อสมการ

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่หลังจากถึงจุดหนึ่งแล้ว ความหนาแน่นแห้งจะเริ่มลดลงซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความหนาแน่นแห้งของดิน (ตามหลักของ Proctor Compaction Test)

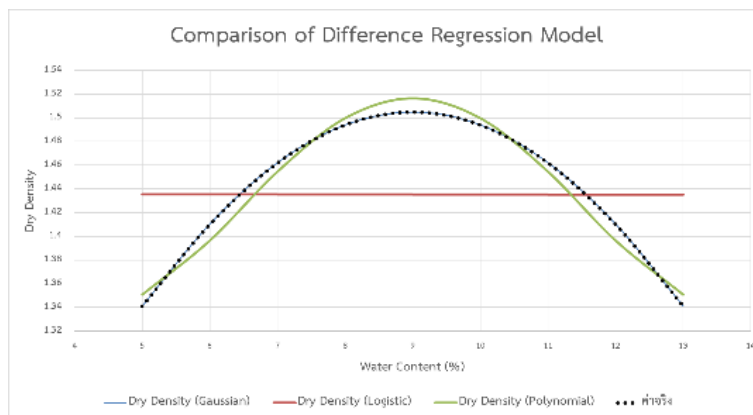
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัย และการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสมต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความเสถียรของดิน ผลการวิเคราะห์จะถูกใช้เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินในการใช้งานทางวิศวกรรมโยธาและการออกแบบโครงสร้าง

ผู้วิจัยทำการใช้สมการข้างต้น เพื่อหาค่าพยากรณ์ของค่าความหนาแน่น โดยจะใช้ Curve Fitting เพื่อปรับปรุงโมเดลใหม่และเปรียบเทียบ Polynomial Regression, Gaussian Model และ Logistic Model เพื่อดูว่าโมเดลใดพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งได้แม่นยำที่สุด Fit Gaussian Model เพื่อจับแนวโน้มแบบโค้งระฆัง Fit Logistic Model เพื่อดูแนวโน้มที่มีขีดจำกัด เปรียบเทียบผลลัพธ์กับ Polynomial Regression เดิม สร้างกราฟแสดงแนวโน้มของค่าความหนาแน่นแห้งตามค่าความชื้น แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้ง (หน่วย g/cm^3)

Water Content (%)	Dry Density Gaussian	Dry Density Logistic	Dry Density Polynomial
5	1.3409	1.4355	1.35081
6	1.4103	1.4355	1.3965
7	1.4621	1.4355	1.4546
8	1.4940	1.4355	1.4997
9	1.5048	1.4355	1.5165
10	1.4940	1.4355	1.4997
11	1.4621	1.4355	1.4546
12	1.4103	1.4355	1.3965
13	1.3409	1.4355	1.3508

จากตารางที่ 4 พบว่า Gaussian Model ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Peak Dry Density) = 1.505 g/cm^3 ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) = 9% และแนวโน้มของค่าพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งแต่ละรูปแบบแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แนวโน้มเปรียบเทียบผลลัพธ์

ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและค่าความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีมีลักษณะเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำ (Bell-shaped curve) อย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบโมเดลทางคณิตศาสตร์หลายแบบ ได้แก่

- 1) Polynomial Regression โมเดลเดิม ใช้เส้นโค้งพหุนามในการประมาณค่า ใช้สมการพหุนามดีกรี 4 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มีความสามารถในการประมาณค่าที่ดี แต่การพยากรณ์ค่าที่อยู่นอกช่วงข้อมูลอาจเกิด Overfitting ได้
- 2) Gaussian Model ได้โค้งระฆังที่เหมาะสมกับข้อมูล เป็นฟังก์ชันรูปโดมที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีจุดสูงสุดชัดเจน โมเดลนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินได้ดี และเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์
- 3) Logistic Model ค่าพารามิเตอร์อาจยังไม่แม่นยำพอต้องปรับค่าเริ่มต้น โดยปกติใช้กับข้อมูลที่มีขีดจำกัดบนและล่าง แต่ในกรณีนี้ผลลัพธ์ที่ได้เกือบเป็นค่าคงที่ ค่า Upper Bound ของ Logistic Model อยู่ที่ 2.871 g/cm^3 ซึ่งสูงกว่าค่าจริงมาก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์มีขนาดเล็กมาก ทำให้ต้องปรับปรุงโมเดลเพิ่มเติมเพื่อให้พยากรณ์ได้แม่นยำขึ้น ผู้วิจัยได้คำนวณการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้ง (หน่วย g/cm^3)

Water Content (%)	ค่าจริง Modified (PCT)	Polynomial	Gaussian
5	1.341	1.3508	1.3409
6	1.410	1.3965	1.4103
7	1.462	1.4546	1.4621
8	1.494	1.4997	1.4940
9	1.505	1.5165	1.5048
10	1.494	1.4997	1.4940
11	1.462	1.4546	1.4621
12	1.410	1.3965	1.4103
13	1.341	1.3508	1.3409

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งที่ทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของแต่ละโมเดล เพื่อสนับสนุนผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม ได้แก่ Gaussian, Logistic และ Polynomial โดยใช้ค่าชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ ค่า RMSE (Root Mean Square Error) ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยก

กำลังสอง และค่า MAE (Mean Absolute Error) ค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ แสดงดังตารางที่ 6 และการเปรียบเทียบรูปแบบการพยากรณ์ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

Model	RMSE (g/cm ³)	MAE (g/cm ³)
Gaussian	0.0061	0.0049
Polynomial	0.0103	0.0082
Logistic	0.0482	0.0471

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบรูปแบบการพยากรณ์

Polynomial Regression	Gaussian
$Pd = aW^4 + bW^3 + cW^2 + dW + e$	$Pd = A \cdot e^{-\frac{(w-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
ข้อดี - สามารถป้อนข้อมูลให้เข้าใกล้ค่าจริงได้ดี - คำนวณง่าย และสามารถใช้งานใน Excel ได้	ข้อดี - เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีจุดสูงสุดชัดเจน - ใช้ได้ดีเมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบ Normal
ข้อเสีย - อาจเกิด Overfitting - เมื่อค่าความขึ้นเกินช่วงข้อมูล อาจให้ค่าผิดพลาดมาก	ข้อเสีย - ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้เหมาะสม - คำนวณซับซ้อนกว่า Polynomial Regression

ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน พบว่า Gaussian Model มีค่า RMSE และ MAE ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับ Polynomial และ Logistic Model ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำสูงในการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้ง และสนับสนุนข้อสรุปที่ว่า Gaussian Model เป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานในกรณีศึกษา

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี โดยใช้วิธีการ Modified Proctor Compaction Test และการวิเคราะห์ทางสถิติจากโมเดลการพยากรณ์ เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ของแต่ละโมเดล ในการศึกษาทำการทดสอบความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสมถูกดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้มาตรฐาน ASTM D1557 (Modified Compaction) ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้น และสร้างกราฟแสดงแนวโน้มของข้อมูล ข้อมูลจากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม การใช้สมการการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression), Gaussian Model และ Logistic Model เป็นเครื่องมือในการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบ สมการการถดถอยเชิงพหุนามที่ได้มีรูปแบบดังนี้ $\text{Dry Density} = -0.3394 + 0.02976 \times \text{Water Content}^2 - 0.000144 \times \text{Water Content}^4 + 0.000000 \times \text{Water Content}^6$

ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบโมเดลต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า Gaussian Model เป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ค่าความหนาแน่นแห้งตามค่าความชื้น เนื่องจากสามารถจับแนวโน้มแบบโค้งระฆังได้อย่างแม่นยำ โดย Gaussian Model ให้ค่าพยากรณ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Peak Dry Density) เท่ากับ 1.505 g/cm^3 และค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เท่ากับ 9

การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ของการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินเหนียวในบริเวณที่มีลักษณะคล้ายกัน (Tang AM, 2009 และ Wang & Zhang, 2020) นอกจากนี้ผลการทดสอบยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jiang, 2019) ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่าความชื้น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า Gaussian Model เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการคาดการณ์พฤติกรรมของดินเหนียว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและวางแผนงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีลักษณะดินเหนียวที่คล้ายคลึงกัน เช่น การใช้โมเดล Gaussian ในการประมาณค่าความหนาแน่นแห้งจากความชื้นเริ่มต้น เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบฐานราก นอกจากนี้ยัง

สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งศึกษาในพื้นที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือ ในอนาคตอาจมีการศึกษาปัจจัยอื่นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความละเอียดและความแม่นยำของโมเดลมากยิ่งขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มุ่งเน้นเฉพาะดินเหนียวซึ่งมีลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ความสามารถในการอุ้มน้ำสูง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามความชื้น และความสัมพันธ์แบบโค้งระฆัง (bell-shaped curve) ระหว่างค่าความชื้นกับความหนาแน่นแห้ง หากนำแบบจำลอง Gaussian หรือ Polynomial Regression ที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลดินเหนียวไปใช้กับ ดินประเภทอื่น อาจส่งผลต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ ในการศึกษาครั้งถัดไป ควรศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สถิติขั้นสูง เช่น Principal Component Analysis (PCA), Cluster Analysis และ Multivariate Regression การวิเคราะห์สถิติขั้นสูงจะช่วยให้สามารถสรุปและประเมินข้อมูลได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำมากขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. (2021). *ASTM D1557- 12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. ASTM International.
- Jiang, Y., Xu, X., & Liu, Y. (2019). Influence of moisture content on the compaction properties of clayey soils. *Geotechnical Research*, 12(3), 245-258.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Eslami, J., & Défossez, P. (2009). Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma*, 148(3–4), 282–290.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.

Wang, Z., & Zhang, L. (2020). *Soil mechanics and foundation engineering*. Springer.