

## การประมาณค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานด้วยดัชนีสมบัติของดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น Estimation of Standard Penetration Number with Index Properties of Cohesive Soil

ฐิติศักดิ์ ชัชวาล<sup>1</sup> อัครณัย ทาภา<sup>1</sup> อภิชาติ คำภาหาล้า<sup>2\*</sup> ภาณุมาศ เรืองทิพย์<sup>2</sup> โกมลย์ ชัยรัตนงามเดช<sup>3</sup> และ อนุกุล อ่างบุญตา<sup>4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น

<sup>2</sup> สถาบันระบบรางแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.นครราชสีมา

<sup>3</sup> บริษัท เอ็ม เอ คอนซัลแตนท์ จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร

<sup>4</sup> สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 4 (เพชรบุรี) กรมทางหลวงชนบท จ.เพชรบุรี

\*Corresponding author; E-mail address: apichit.ku@rmuti.ac.th

### บทคัดย่อ

ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบตอกทะลุทะลวงมาตรฐาน ซึ่งเป็นการทดสอบหนึ่งในการเจาะสำรวจชั้นดินทางวิศวกรรม ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานสามารถนำไปแบ่งประเภทของชั้นดินตามความแข็งหรืออ่อน และ แน่นหรือหลวม สำหรับดินที่มีความเชื่อมโยงแน่นและดินไม่มีความเชื่อมโยงแน่น ตามลำดับ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานสามารถแปลงเป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ กำลังรับแรงแบกทานของชั้นดิน หรือ ค่าการทรุดตัวของฐานรากได้อย่างคร่าว ๆ บทความนี้ นำเสนอการประมาณค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานของดินที่มีความเชื่อมโยงแน่นด้วยดัชนีสมบัติ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ และ วิธีทางสถิติ ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีความสัมพันธ์กับดัชนีสมบัติอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากการศึกษาสามารถประมาณค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานจากดัชนีสมบัติของดินได้อย่างแม่นยำ มีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.996

คำสำคัญ: ตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน, ดัชนีสมบัติ, การเจาะสำรวจชั้นดินทางวิศวกรรม, ความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์, การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

### Abstract

The standard penetration number is obtained from the standard penetration test, which is one of the soil engineering investigations. The standard penetration number can be used to classify soil according to soft or hard and loose or dense for cohesive and cohesionless soil, respectively. In addition, it can approximately represent the undrained shear strength, bearing capacity, and settlement of the foundations. This article presents the estimations of the standard penetration number of cohesive soil with standard properties, using empirical relationships and statistical methods. The results show that the standard penetration number has a statistically significant relationship with basic soil properties. Also, this study can

successfully and precisely estimate the standard penetration number with an R-squared of 0.996

Keywords: Number standard penetration, Index properties, Soil engineering investigations, Empirical relationship, Multiple regression analysis

### 1. บทนำ

ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (Number Standard Penetration,  $N_{SPT}$ ) ได้จากการทดสอบตอกทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เป็นค่าที่สามารถรู้ความแข็ง อ่อน ของชั้นดินได้ทันที อีกทั้งยังสามารถแปลงเป็นค่ากำลังของดิน โดยความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ (Empirical relationship) สำหรับนำไปใช้ออกแบบฐานราก เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียว [1] ความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่าง  $N_{SPT}$  กับดัชนีความชื้นเหลว (CI), กำลังอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) [2], ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_{SPT}$  กับโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ, ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_{SPT}$  กับโมดูลัสแบบระบายน้ำ [3] ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_{SPT}$  กับค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวเชิงปริมาตร [4] และความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N_{SPT}$  กับมุมเสียดทานภายในของดิน (Angle of internal friction) [5] เป็นต้น นอกจากนี้ มีหลายความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ ที่สามารถคำนวณหาได้จากค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (Number Standard Penetration,  $N_{SPT}$ ) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดด้านข้างของดิน [6] และการประมาณกำลังรับแรงแบกทาน [5,7] เป็นต้น

ในงานก่อสร้างที่มีปริมาณมาก เช่น งานถนน หรืองานทางรถไฟ จำเป็นต้องมีการเจาะสำรวจเป็นจำนวนมาก ตลอดเส้นทางของการก่อสร้าง ทำให้การเก็บข้อมูลคุณสมบัติของดินในแต่ละหลุม อย่างละเอียดตลอดความลึก เป็นไปได้ยาก บางครั้ง เพื่อความรวดเร็วในการเจาะสำรวจ จึงใช้วิธีทำ

การทดสอบหาลักษณะของดินเมื่อเปลี่ยนลักษณะของชั้นดิน แทนการทดสอบทุกระยะ 1.0-1.5 เมตร ในขณะที่สามารถเก็บตัวอย่างดินแปรสภาพได้ตลอดความลึกของการเจาะสำรวจ ดังนั้น หากทำการประมาณค่าในความลึกที่ไม่ได้ทำการทดสอบ ด้วยพารามิเตอร์พื้นฐาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ นำเชื่อถือยิ่งขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าตัวเลขหาลักษณะของดินด้วยดัชนีสมบัติ (Index properties of soil) ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก (Unit weight,  $\gamma$ ) ความชื้นหรือปริมาณน้ำในมวลดิน (Water Content,  $w$ ) ชีตจำกัดความเหลว (Liquid Limit,  $LL$ ) ชีตจำกัดพลาสติก (Plastic Limit,  $PL$ ) ดัชนีพลาสติก (Plastic Index,  $PI$ ) ดัชนีความชื้นเหลว (Consistency Index,  $CI$ ) เป็นต้น ผลจากการวิจัยนี้ จะทำให้สามารถประมาณค่าตัวเลขหาลักษณะของดินได้จากพารามิเตอร์พื้นฐานที่สามารถหาได้จากการทดสอบในตัวอย่างแปรสภาพ ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินแบบแปรสภาพตลอดความลึก

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การเจาะสำรวจชั้นดิน

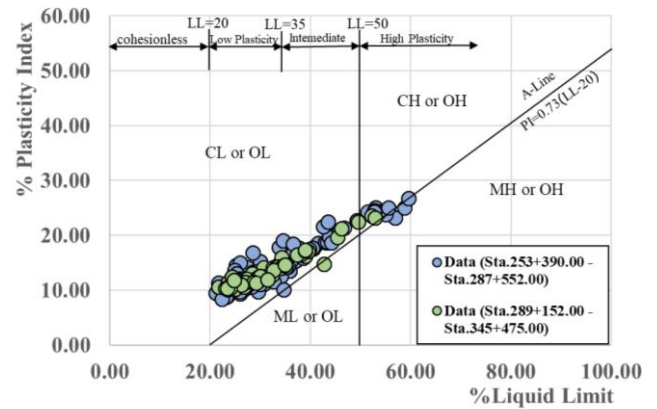
การศึกษาใช้ผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (boring log) จากโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ระยะที่สอง ช่วงจังหวัดนครราชสีมา - หอนงคาย ตั้งแต่ Sta 253+030 - Sta 326+052 เป็นระยะทางทั้งหมด 73.022 กิโลเมตร จำนวน 200 หลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่โครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ระยะที่สอง ช่วงจังหวัดนครราชสีมา - หอนงคาย [8]

### 2.2 ประเภทของดิน

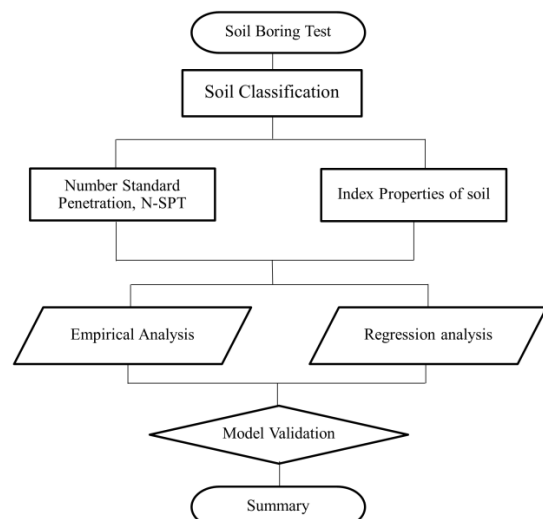
การจำแนกประเภทของดินตัวอย่างตลอดระยะทางหลุมเจาะและตลอดช่วงความลึกจะถูกจำแนกตามระบบ USCS โดยพบว่าดินตัวอย่างมีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ประมาณ 20 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปจำแนกโดยแผนภูมิ Casagrande จำแนกได้เป็นดินเหนียววมตัวต่ำ (CL) และดินเหนียววมตัวสูง (CH) (อยู่บนเส้น A-Line) นอกจากนี้ ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ที่มีค่ามากกว่า 20 ยังเป็นตัวบ่งบอกว่าดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงผลการจำแนกดินด้วยแผนภูมิ Casagrande

### 2.3 การประมาณค่าตัวเลขหาลักษณะของดิน

ค่าตัวเลขหาลักษณะของดิน ( $N_{SPT}$ ) ประมาณได้ด้วย 2 วิธี ได้แก่ 1. การประมาณค่าเชิงประสบการณ์ (Empirical estimation) และ 2. การวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอย (Regression for statistic estimation) การสร้างสมการเชิงประสบการณ์และสมการการถดถอยของตัวเลขหาลักษณะของดิน ประมาณได้จากข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของดินในช่วง Sta 253+930.00 ถึง Sta 287+552.00 จำนวน 266 ข้อมูล และใช้ข้อมูลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการในช่วง Sta 289+152.00 ถึง Sta 345+475.00 จำนวน 123 ข้อมูล และขั้นตอนวิธีการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Flow Chart For N-SPT

2.4 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple regression analysis)

Multiple regression analysis (MLR) เป็นวิธีทางสถิติวิธีหนึ่ง โดยการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) ตามสมการเชิงเส้นในข้อมูลที่สังเกตได้ โมเดล MLR คือ

$$y_i = b_0 + b_1(x_{i,1}) + b_2(x_{i,2}) + \dots + b_k(x_{i,k}) + e_i \quad (1)$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable),  $x_{i,1}$  คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable),  $b_k$  คือ the vector of regression coefficients,  $e_i$  คือ ความคลาดเคลื่อนจากการสุ่ม และ  $b_0$  คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย

2.5 การวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีทางสถิติ (Performance Evaluation)

สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ จะถูกนำมาวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีทางสถิติ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ( $R^2$ ), ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) พารามิเตอร์เหล่านี้คำนวณได้ดังสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 4 ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - t)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \left| \frac{t_i - td_i}{t_i} \right| \right) \times 100 \quad (4)$$

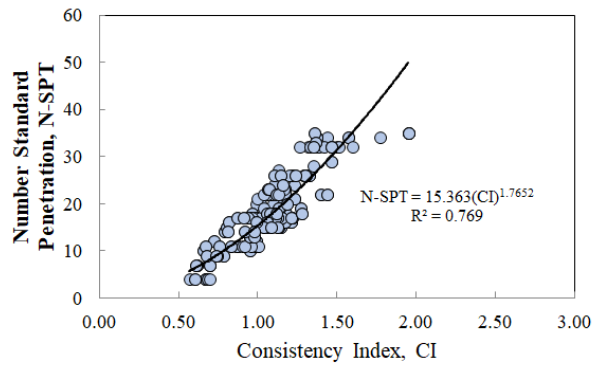
เมื่อ  $t_i$  คือ ผลการทดสอบค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (experimental),  $td_i$  คือ ผลการทำนายค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (predicted),  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด,  $t$  คือ ค่าเฉลี่ยผลของการทำนาย (predicted) และ  $SD$  คือ ค่า standard deviation

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานและค่าดัชนีความชื้นเหลว (Consistency index) จากรูปพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นตาม Consistency index ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานและค่า Consistency index สามารถประมาณได้จากสมการยกกำลัง มีค่าความแม่นยำ  $R^2$  เท่ากับ 0.769 ดังแสดงในสมการที่ 5

$$N_{SPT} = 15.363(CI)^{1.765} \quad (5)$$

เมื่อ  $N_{SPT}$  คือ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน และ  $CI$  คือ ดัชนีความชื้นเหลว

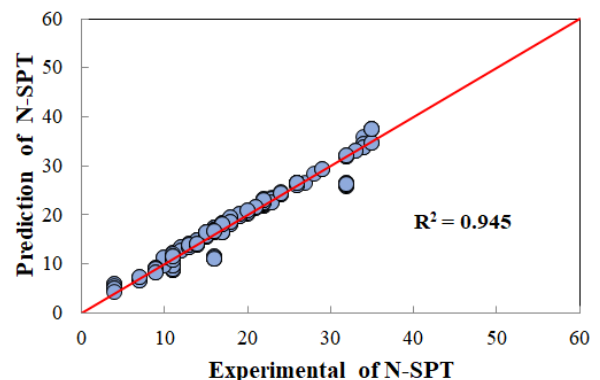


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-SPT และ CI

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression analysis) จากรูปพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับตัวแปรตามได้แก่ ซีดจำกัดเหลว, ซีดจำกัดพลาสติก, ปริมาณน้ำธรรมชาติ และหน่วยน้ำหนัก โดยสามารถอธิบายได้จากค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่าความแม่นยำ  $R^2$  เท่ากับ 0.945 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรตามมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวแปรอิสระ [9-10] ดังแสดงในสมการที่ 6 ค่าทางสถิติแสดงในตารางที่ 1

$$N_{SPT} = 5.958(\gamma) + 0.371(PL) - 0.123(LL) - 0.200(w_n) - 97.003 \quad (6)$$

เมื่อ  $N_{SPT}$  คือ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน,  $LL$  คือ ซีดจำกัดเหลว,  $PL$  คือ ซีดจำกัดพลาสติก,  $w_n$  คือ ปริมาณน้ำธรรมชาติ และ  $\gamma$  คือ หน่วยน้ำหนักหนัก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression analysis)

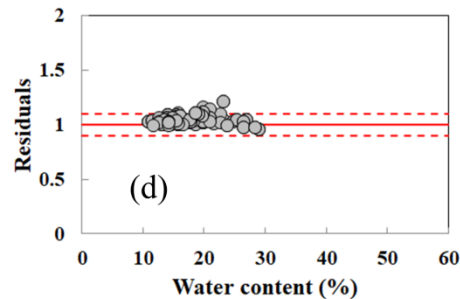
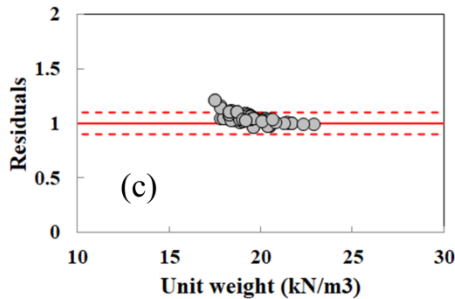
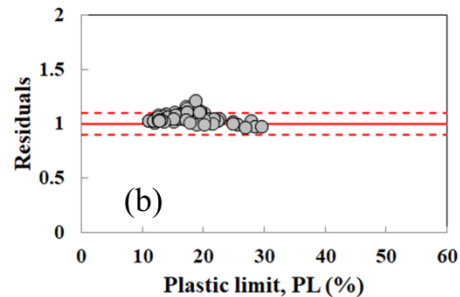
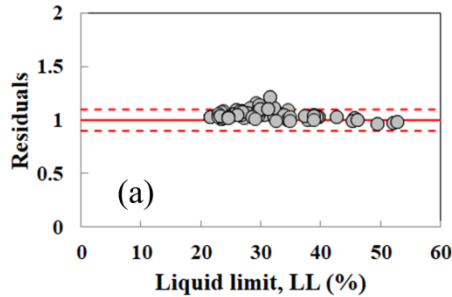
ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานทางสถิติด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

No	$\beta_i$	ตัวแปร	Unit	T-statistic	P-value < 0.05

1	-97.003	ค่าคงที่	-	-31.024	$1.53 \times 10^{-89}$
2	-0.123	LL	%	-3.026	0.0027
3	0.371	PL	%	4.380	$1.72 \times 10^{-5}$
4	-0.200	$w_n$	%	-4.815	$2.50 \times 10^{-6}$
5	5.958	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	37.039	$6.50 \times 10^{-106}$

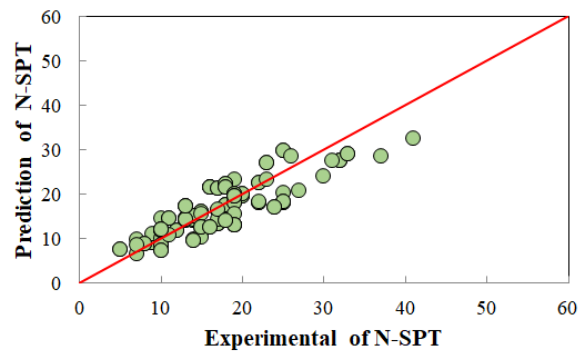
$R^2=0.945$ ,  $Adj. R^2= 0.944$ , F- statistic = 1131.83

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Residuals  $N_{predic}/N_{exp}$  และ (a) Liquid limit, (b) Plastic limit, (c) ค่า Unit weight และ (d) Water content จากรูปพบว่า เส้นแนวโน้มสำหรับชุดข้อมูลแต่ละชุดมีค่าเข้าใกล้ 1 โดยค่าสัดส่วนค่าทะเลวลมาตรฐานจากสมการที่นำเสนอมีค่าทะเลวลมาตรฐานจากการตรวจสอบ  $N_{predic}/N_{exp}$  มีค่า Percentile อยู่ที่ร้อยละ 10 นั้นหมายความว่า ค่า  $N_{predic}/N_{exp}$  มีมากกว่า 1 อยู่ร้อยละ 90 ทำให้สมการที่นำเสนอมีความใกล้เคียงกับค่าทดสอบและมีความปลอดภัยในการใช้งาน

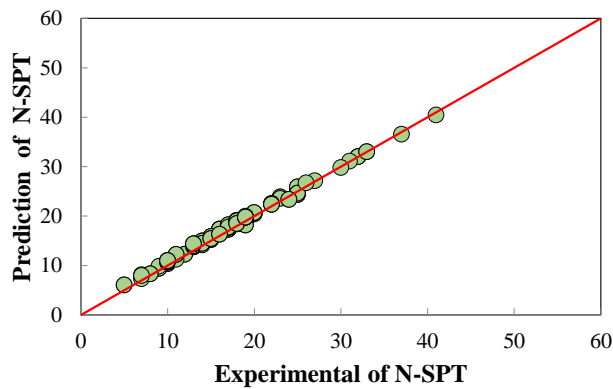


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Residuals  $N_{predic}/N_{exp}$  และ (a) Liquid limit, (b) Plastic limit, (c) ค่า Unit weight และ (d) Water content

รูปที่ 7(a) และ 7(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ของ Empirical estimation (7a) และ MLR (7b) จากรูปพบว่า สมการที่นำเสนอด้วยโมเดล MLR (สมการที่ 3) มีค่าตัวเลขทะเลวลมาตรฐานใกล้เคียงกับค่าที่นำมาตรวจสอบมากกว่า สมการเชิงประสภการณ์ (Empirical estimation) โดยโมเดล MLR มีค่าความแม่นยำ  $R^2$  เท่ากับ 0.996 มากกว่าสมการเชิงประสภการณ์ ( $R^2$  เท่ากับ 0.723) จากลักษณะดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ดัชนีสมบัติของดิน (ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และปริมาณน้ำธรรมชาติ) เป็นเพียงพารามิเตอร์หนึ่งในการประมาณค่าทะเลวลมาตรฐาน เพื่อให้สมการมีความถูกต้องแม่นยำควรใช้หน่วยน้ำหนักมวลวิเคราะห์ร่วมกับดัชนีสมบัติของดิน โดยค่าทางสถิติระหว่างค่าการทำนายและค่าการตรวจสอบของ N-SPT แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 7(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีเชิงประสภการณ์



รูปที่ 7(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยโมเดล MLR

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างค่าการทำนายและค่าการทดสอบของตัวเลขหุละลงมาตรฐาน

Model	R-Squared	RMSE	MAPE
Empirical Equation	0.723	9.19	0.039
Regression analysis	0.996	5.89	0.025

#### 4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการประมาณค่าของตัวเลขหุละลงมาตรฐานด้วยดัชนีสมบัติของดินที่มีความเชื่อมโยงกัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ค่าหุละลงมาตรฐานสามารถประมาณได้จากดัชนีสมบัติของดิน เช่น ซีดจำกัดเหลว ซีดจำกัดพลาสติก ปริมาณน้ำธรรมชาติ และหน่วยน้ำหนัก
- การวิเคราะห์สมการการถดถอย (MLR) มีค่าทางสถิติแม่นยำกว่าสมการเชิงประสพการณ์
- สมการที่นำเสนอสามารถนำไปประมาณค่าหุละลงมาตรฐานของดินที่มีความเชื่อมโยงกัน (Cohesive soil) ที่มีค่า LL อยู่ระหว่าง 20 ถึง 60 เปอร์เซนต์

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และสถาบันระบบรางแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Géotechnique*, Vol. 5, No. 4, pp. 297-326
- SZECHY, K., and VARGA, L. (1978). *Foundation Engineering—Soil Exploration and Spread Foundation*, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.
- Stroud, M.A. and Butler, F.G. (1975). The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials, Conf. on the engineering behaviour of glacial materials, Univ. of Birmingham, pp. 124-135. U.K.
- Salgado, R. (2007). *The Engineering of Foundation*, MCGraw-Hill
- Meyerhof, G.G., 1956. Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.82, No. SM1, pp. 1-19.
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Géotechnique*, Vol. 5, No. 4, pp. 297-326
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H., (1974). *Foundation Engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley and Sons, New York, NY.
- การรถไฟแห่งประเทศไทย. (2563). เอกสารข้อเท็จจริงโครงการ (Fact Sheet). เอกสารเบื้องต้นของโครงการ, หน้า 1-7
- Abrouguia, R., Gabsib, K., Mercatorisc, B., Khemisa, C., Amamia, R. and Chehaibia, S. (2019). Prediction of organic potato yield using tillage systems and soil properties artificial neural network (ANN) and multiple linear regressions (MLR). *Soil & Tillage Research*, 190, pp. 202–208
- Kottegoda, N. T & Rosso, R. (2008). *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-405-17917-1