การออกแบบฐานรากเสาเข็มเจาะโดยใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศจีนในโครงการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ระยะที่ 1 (กรุงเทพ-นครราชสีมา) สัญญา 4-3 นวนคร - บ้านโพ

Pile foundation design by Chinese standard of Thai-China high-speed rail project construction phase 1 (Bangkok – Nakhon Ratchasima) contract 4-3: civil works (Navanakorn – Ban Po)

นพฤทธิ์ ทวีชัย[1,*] และ **Zhang Jiu Ming**[2]

[1]*สามัญวิศวกรโยธา, บริษัท ไชน่า เสตท คอนสตรัคชั่น เอ็นยิเนียริ่ง(ประเทศไทย) จำกัด*

[2]*วิศวกรอาวุธโส, China Construction Civil Engineering Co., LTD.*

**Corresponding author; E-mail address: npt.nopparit@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบเสาเข็มในโครงการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน (ระยะที่ 1 กรุงเทพ-นครราชสีมา) สัญญาช่วงที่ 4-3 นวนคร-บ้านโพ โดยใช้วิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน TB10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert และ TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert ซึ่งเป็นมาตรฐานเฉพาะด้านในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟของประเทศจีนในการออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มร่วมกับการใช้ข้อมูลดินจากการเจาะสำรวจชั้นดินในบริเวณพื้นที่โครงการก่อสร้างรวมไปถึงการวิเคราะห์และประยุกต์รวมของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างตามมาตรฐานและกฎหมายในประเทศไทยได้แก่แรงลมและแรงแผ่นดินไหวของบริเวณพื้นที่ก่อสร้างดังกล่าวเพื่อให้ได้แรงกระทำที่มีนัยสำคัญตามข้อกำหนดของมาตรฐานในการวิเคราะห์หาแรงกระทำทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้างเพื่อถ่ายลงสู่ฐานรากเสาเข็มได้อย่างปลอดภัย และเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างในการเลือกใช้มาตรฐานดังกล่าวข้างต้นในการออกแบบจึงดำเนินการเปรียบเทียบกับหลักการออกแบบที่ใช้ในประเทศไทยโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเสาเข็มเดียวกันกับที่ใช้ออกแบบในโครงการ จากผลการเปรียบเทียบของการออกแบบพบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อสรุปผลการออกแบบพบความแตกต่างในการใช้งานออกแบบมาจากปัจจัยหลักสองส่วนได้แก่มาตรฐานหรือหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์และค่าสัดส่วนความปลอดภัยในการออกแบบ

คำสำคัญ: การออกแบบเสาเข็ม, โครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน, มาตรฐานประเทศจีน, กำลังรับน้ำหนัก, ค่าสัดส่วนความปลอดภัย

Abstract

This paper presents the design of a pile foundation according to Chinese standards for Thai-China high-speed rail projects with 4-3 contracts from Navanakorn to Ban Po. The bearing capacity of the pile foundation was designed according to the code of TB10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert and TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert, which are the specified standards for railway structure of China. The design process uses the result of soil investigation in the project area including the load analysis with the Thai standard of wind force analysis and the seismic force analysis prescribed by the Thai ministry to combine with the load analysis of the structure and safely transferred it to the pile foundation. This study shows differences in the design of the bearing capacity of the pile foundation, compared with the standard method commonly used in Thailand for the same diameter and length of the pile. Finally, the result in the bearing capacity of pile foundation design has a difference due to the two main suffixes of the main equation analysis and the use of the factor of safety value.

Keywords: Pile foundation design, Thai-China high-speed rail project, Chinese standards code, Bearing Capacity, Factor of Safety

1. บทนำ

การขนส่งถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญในการขับเคลื่อนพัฒนาประเทศไทยให้ก้าวหน้าและทันสมัยต่อยุคปัจจุบัน ซึ่งหนึ่งในนั้นได้แก่การขนส่งระบบรางประเภทรถไฟความเร็วสูง [1] ถือเป็นทางเลือกในการขนส่งใหม่ที่ทันสมัยสำหรับการเดินทางภายในประเทศและยังสามารถเชื่อมต่อไปยังโครงข่ายระบบรถไฟความเร็วสูงระหว่างประเทศได้อย่างต่อเนื่อง และในขณะนี้ประเทศไทยอยู่ในระหว่างการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงเส้นทางแรกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในโครงการความร่วมมือระหว่างรัฐบาลแห่งราชอาณาจักรไทยและรัฐบาลแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีนในการพัฒนาระบบรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-หนองคาย โดยระบบโครงสร้างที่สำคัญของรถไฟความเร็วสูงประกอบไปด้วยระบบการเดินรถ, ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อน, และระบบโครงสร้างรองรับทางวิ่ง โดยเฉพาะโครงสร้างรองรับทางวิ่งของรถไฟ

ความเร็วสูงนั้นประกอบไปด้วยโครงสร้างหลักที่สำคัญได้แก่คานคอนกรีตสำหรับรองรับการติดตั้งหมอนวางรางเหล็กและอุปกรณ์ทั้งหมดที่จำเป็นใช้ในการเดินรถ, เสาขนาดใหญ่ใช้สำหรับรองรับคาน, และฐานรากซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญใช้ในการรองรับน้ำหนักทั้งหมดที่มาจากโครงสร้าง(กรณีทางวิ่งเสมอระดับพื้นดินจะใช้การปรับปรุงหรือก่อสร้างคันทางขึ้นมาใหม่เพื่อรองรับทางวิ่งเป็นต้น)ทั้งนี้ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ช่วงสัญญาที่ 4-3 เป็นโครงสร้างทางวิ่งยกระดับตลอดแนวเส้นทางจึงมีโครงสร้างฐานรากที่ต้องออกแบบและก่อสร้างให้รองรับน้ำหนักภาระจากโครงสร้างทั้งหมดลงสู่ชั้นดิน การออกแบบโครงสร้างฐานรากโดยทั่วไปที่นิยมใช้ในการออกแบบและก่อสร้างอย่างแพร่หลาย 2 ประเภทได้แก่ ฐานรากตื้น และฐานรากลึก โดยเฉพาะการออกแบบฐานรากลึกชนิดเสาเข็มที่ใช้ในการออกแบบสำหรับรับน้ำหนักโครงสร้างขนาดใหญ่หรือโครงสร้างที่ต้องรับภาระน้ำหนักสูงเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างหลักลงสู่ชั้นดินอย่างปลอดภัย โดยหลักการออกแบบเสาเข็มเพื่อรับน้ำหนักและถ่ายน้ำหนักลงดินนั้นจะใช้ข้อมูลที่สำคัญได้แก่ข้อมูลชั้นดินตามลักษณะภูมิประเทศ, ข้อมูลสำรวจเดิมที่มีอยู่ในพื้นที่หรือบริเวณใกล้เคียง, และจากการเจาะสำรวจชั้นดินขึ้นมาใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำของลักษณะชั้นดิน ณ บริเวณที่จะออกแบบเสาเข็มดังกล่าว ทั้งนี้ถึงจะมีการเจาะสำรวจชั้นดินขึ้นมาใหม่แต่ลักษณะทางกายภาพของชั้นดินยังคงมีความแปรปรวนสูงระหว่างชั้นดินที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของขอบเขตประเภทชั้นดินได้ในระยะห่างที่ไม่มาก ดังนั้นในการออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจึงเป็นไปไม่ได้ที่จะออกแบบได้ถูกต้องโดยเป็นเป็นการประมาณการกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากทฤษฎีพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์และสถิติศาสตร์จากแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกันของชั้นดิน [2] รวมไปถึงการกำหนดใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยสำหรับใช้ในการออกแบบเพื่อให้เกิดปลอดภัยในการรับน้ำหนักและถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดิน

บทความนี้จึงมุ่งสนใจไปยังการออกแบบโครงสร้างฐานรากประเภทเสาเข็มโดยอ้างอิงมาตรฐานเฉพาะด้านโครงสร้างทางรถไฟของประเทศจีนได้แก่มาตรฐาน TB10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert และ มาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert โดยประยุกต์ใช้กับข้อมูลของชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจในบริเวณที่จะดำเนินการก่อสร้างของสัญญาที่ 4-3 และพิจารณาการกระทำของแรงเพิ่มเติมได้แก่ลมตามพื้นที่ในมาตรฐานมยผ.1311-50, แผ่นดินไหวตามพื้นที่ กำหนดในกฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 และประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง การออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เพื่อให้ได้แรงกระทำทั้งหมดตามเงื่อนไขการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และดำเนินการเปรียบเทียบกับหลักการหรือทฤษฎีที่ใช้ในประเทศไทยโดยใช้ขนาดและความยาวของเสาเข็มตามการออกแบบในโครงการเพื่อวิเคราะห์และหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างในการหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองวิธีและเป็นทางเลือกสำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างรถไฟความเร็วสูงในประเทศไทย

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบแรงกระทำต่อโครงสร้าง (Load Design)

ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบแรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะพิจารณาแรงตามมาตรฐาน TB10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [3] ซึ่งแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทแรงที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบ

Type of Load		Description
Main Force	Dead Load	1.Structural components self-weight 2.Pre-afterburner 3.Effect force of concrete shrinkage and creep 4.Earth pressure 5.Hydrostatic pressure and water buoyancy 6.The effect force of base displacement
	Live Load	1.The vertical static and live load of the train 2.Highway live load 3.The vertical power of the train 4.Centrifugal force 5.Lateral rocking force 6.Live earth pressure 7.Sidewalk pedestrian load 8.Aerodynamic force
Additional Force		1.Breaking or traction Force 2.Bearing friction 3.Wind load 4.Water pressure 5.The effect force of temperature change 6.Frost heave force 7.Wave force
Special Load		1.Train derailment load 2.The impact force of a boat or raft 3.Car crash force 4.Construction temporary load 5.Earthquake force 6.Longitudinal force on long rails

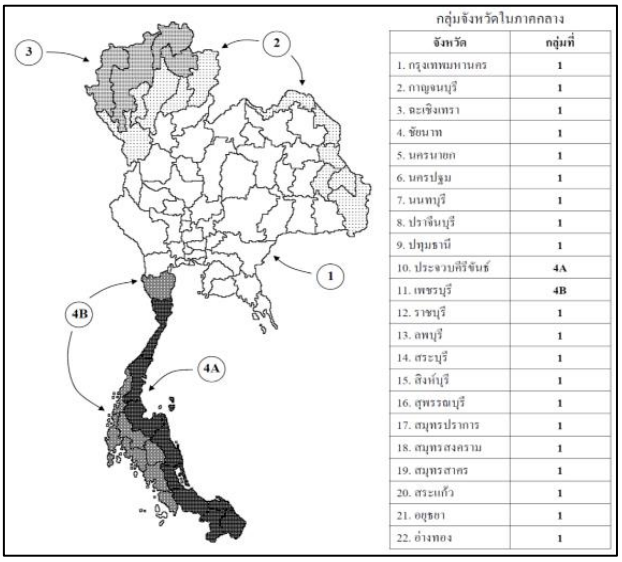
โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาแรงทั้งหมดดังนี้

1.Combination I: Dead Load + Live Load
2.Combination II: Dead Load + Live Load + Additional Force
3.Combination III: Dead Load + Live Load + Special Force

2.2 การวิเคราะห์และประมาณการแรงกระทำที่เกิดจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหวตามเขตพื้นที่ในประเทศไทย

การพิจารณาแรงกระทำเพิ่มเติมได้แก่แรงลมประจำพื้นที่ตาม มยผ. 1311-50 และแรงแผ่นดินไหวตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564

1.การพิจารณาอ้างอิงความเร็วของแรงลมของ มยผ.1311-50 ตามตำแหน่งที่ตั้งของจังหวัดอยุธยา [4]

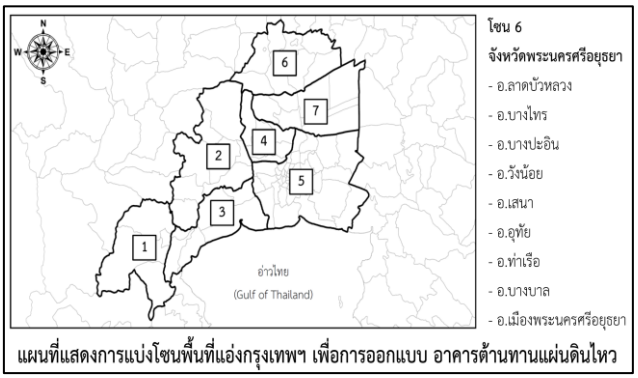


กลุ่มจังหวัดในภาคกลาง

จังหวัด	กลุ่มที่
1. กรุงเทพมหานคร	1
2. กาญจนบุรี	1
3. ฉะเชิงเทรา	1
4. ชัยนาท	1
5. นครนายก	1
6. นครปฐม	1
7. นนทบุรี	1
8. ปราจีนบุรี	1
9. ปทุมธานี	1
10. ประจวบคีรีขันธ์	4A
11. เพชรบุรี	4B
12. ราชบุรี	1
13. ลพบุรี	1
14. สระบุรี	1
15. สิงห์บุรี	1
16. สุพรรณบุรี	1
17. สมุทรปราการ	1
18. สมุทรสงคราม	1
19. สมุทรสาคร	1
20. สระแก้ว	1
21. อยุธยา	1
22. อ่างทอง	1

รูปที่ 1 พื้นที่การแบ่งทิศทางของแรงลมในส่วนของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

2.การพิจารณาแรงแผ่นดินไหวตาม ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง การออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ตามตำแหน่งที่ตั้งของจังหวัดอยุธยา [5-6]



รูปที่ 2 พื้นที่การแบ่งโซนแผ่นดินไหวของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

2.2 การออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ

การวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert ได้กำหนดให้ใช้สมการ [7] ดังแสดงต่อไปนี้

$$[P]=1/2U\sum f_i l_i+m_o A[\sigma] \quad (1)$$

$[P]$ คือ Allowable Bearing Capacity of Pile (kN)
U คือ Perimeter of Cross section of Pile Shaft (m)
f_i คือ Ultimate frictional resistance of soil layer (kPa)
l_i คือ Thickness of soil layer (m)
m_o คือ Reduction coefficient of bearing capacity
A คือ Bearing area at pile base (m^2)
$[\sigma]$ คือ Allowable bearing capacity of ground at pile base (kPa)

โดยค่า $[\sigma]$ นั้นประกอบไปด้วยเงื่อนไข 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 $h \le 4d$; $[\sigma] = \sigma_o + k_2\gamma_2(h-3)$ (2)
กรณีที่ 2 $4d<h\le10d$; $[\sigma] = \sigma_o + k_2\gamma_2(4d-3)+ k'_2(h-4d)$ (3)
กรณีที่ 3 $h>10d$; $[\sigma] = \sigma_o + k_2\gamma_2(4d-3)+ k'_2\gamma_2(6d)$ (4)

เมื่อ σ_o คือกำลังรับแรงแบกทานพื้นฐานของชั้นดินที่ปลายเสาเข็ม (kPa)
h คือ ความยาวของเสาเข็ม (m)
γ_2 คือ ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักดินเหนือปลายเสาเข็ม (kN/m3)
d คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (m)
k_2 และ k'_2 คือ ค่าปรับแก้ตามประเภทชั้นดิน

2.3 ค่าจำเป็นที่ใช้ในการออกแบบโดยพิจารณากำหนดใช้ตามข้อมูลชั้นดิน

ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามสมการ (4) มีการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert [8-9] ซึ่งใช้ข้อมูลชั้นดินประกอบในการใช้ตามแสดงในตารางที่ 2-9 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 Ultimate frictional resistance f_i (kPa) of bored pile

Soil type	Soil Property	Ultimate frictional resistance f_i
Soft Soil	-	12-22
Cohesive Soil	Fluid plastic	20-35
	Soft plastic	35-55
	Stiff plastic	55-75
Silt	Moderately dense	30-55
	Dense	55-70
Silty Sand and Fine Sand	Moderately dense	30-55
	Dense	55-70
Medium Sand	Slightly and moderately	45-70
	Dense	70-90
Coarse sand and Gravelly Sand	Slightly and moderately	70-90
	Dense	90-150
Round Gravelly and Angular Gravelly	Slightly and moderately	90-50
	Dense	150-220
Gravel Soil and Pebbly Soil	Slightly and moderately	150-220
	Dense	220-420

ตารางที่ 3 Reduction coefficient m_o of bearing capacity bored pile

Soil property and base cleaning condition	m_o		
	5d<h≤10d	10d<h≤25d	25d<h≤50d
Good	0.9-0.7	0.7-0.5	0.5-0.4
Moderate	0.7-0.5	0.5-0.4	0.4-0.3
Poor	0.5-0.4	0.4-0.3	0.3-0.1

ตารางที่ 4 Basic Bearing Capacity σ_o (kPa) of cohesionless soil

Soil type	Condition	Compactness			
		Loose	Slightly	Moderate	Dense
Coarse	humidity	200	370	430	550
Medium	humidity	150	330	370	450
Fine	Wet	100	230	270	350
	Saturated	-	190	210	300
Silty	Wet	-	190	210	300
	Saturated	-	90	110	200

ตารางที่ 5 Basic Bearing Capacity σ_o (kPa) of cohesive soil

Void ratio, e	Plasticity Index, I_L								
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
0.5	450	440	430	420	400	380	350	310	270
0.6	420	410	400	380	360	340	310	280	250
0.7	400	370	350	330	310	290	270	240	220
0.8	380	330	300	280	260	240	230	210	180
0.9	320	280	260	240	220	210	190	180	160
1.0	250	230	220	210	190	170	160	150	140
1.1	-	-	160	150	140	130	120	110	100

ตารางที่ 6 (ต่อ) Basic Bearing Capacity σ_o (kPa) of cohesive soil

Void ratio, e	Plasticity Index, I_L			
	0.9	1.0	1.1	1.2
0.5	240	220	-	-
0.6	220	200	180	
0.7	190	170	160	150
0.8	160	150	140	130
0.9	140	130	120	100
1.0	120	110	-	-
1.1	90	-	-	-

ตารางที่ 7 Correction Factors of Width and Depth For Sandy Soil

Correction Factor	Type (M=Medium, and D=Dense)							
	Silty		Fine		Medium		Coarse	
	M	D	M	D	M	D	M	D
k_1	1	1.2	1.5	2.0	2.0	3.0	3.0	4
k_2	2	2.5	3.0	4.0	4.0	5.5	5.0	6

ตารางที่ 8 Correction Factors of Width and Depth For Cohesive Soil

Correction Factor	I_L<0.5	I_L≥0.5	Alluvial	Eluvial	Silt
k_1	0	0	0	0	0
k_2	2.5	1.5	2.5	1.5	1.5

ตารางที่ 9 Correction Factors of Width and Depth For Cohesive Soil

Correction Factor	Type of Soil	
	Cohesive Soil	Cohesionless Soil
k'_2	1.0	$k_2/2$

2.4 ข้อมูลผลเจาะสำรวจชั้นดิน

จากผลการเจาะสำรวจชั้นดินในบริเวณออกแบบพบว่าเป็นดินตะกอนลุ่มแม่น้ำที่ถูกพัดพาและทับถมจนเป็นชั้นดินเหนียวและทรายสะสมหลายชั้นที่มีความถี่สูงในการเรียงสลับชั้นไปมาโดยเริ่มจากจากดินเหนียวอ่อนช่วงความลึก 0 ถึง –12 เมตรจากนั้นจึงเริ่มเป็นชั้นดินเหนียวแข็งเรียงสลับกับชั้นทรายจนทั้งที่ความลึกโดยประมาณ -43 เมตรจึงเป็นชั้นทรายแน่นที่เหมาะสำหรับกำหนดตำแหน่งของปลายเสาเข็ม

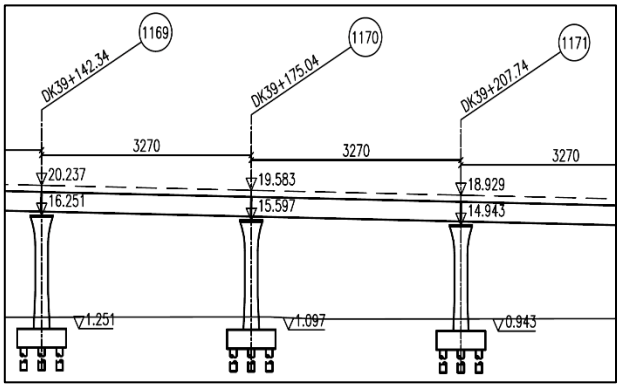
ตารางที่ 10 แสดงผลเจาะสำรวจข้อมูลดิน BNSBH-1865 (DK39+174.26)

Depth		Type of Soil	SPT
From	To		
0.00	-1.30	Very Soft Clay	2
-1.30	-2.90	Soft Clay	3
-2.90	-12.00	Soft Clay	3
-12.00	-15.80	Stiff Clay	12
-15.80	-18.90	Very Stiff Clay	17
-18.90	-23.00	Medium Sand	17
-23.00	-26.30	Dense Sand	37
-26.30	-28.30	Hard Clay	43
-28.30	-30.10	Dense Sand	48
-30.10	-35.40	Hard Clay	35
-35.40	-36.50	Dense Sand	45
-36.50	-38.30	Dense Sand	48
-38.30	-41.40	Very Dense Sand	52
-41.40	-43.00	Hard Clay	50
-43.00	-45.70	Very Dense Sand	54

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของ P1170 (DK39+175.04) เพื่อดำเนินการวิเคราะห์น้ำหนักกระทำทั้งหมดจากโครงสร้าง

รูปแบบโครงสร้างตำแหน่ง P1170 กำหนดเป็นโครงสร้างรองรับการติดตั้งคานคอนกรีตประเภทความยาวรวม 32.7 m โดยใช้งานคู่กับเสาชนิด SP2(H=14.5m) และรองรับด้วยฐานรากเสาเข็ม PC3(7.6x9.4x2.5m) ซึ่งใช้งานร่วมกับเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร จำนวนทั้งหมด 9 ต้น ตามแสดงในรูปที่ 3



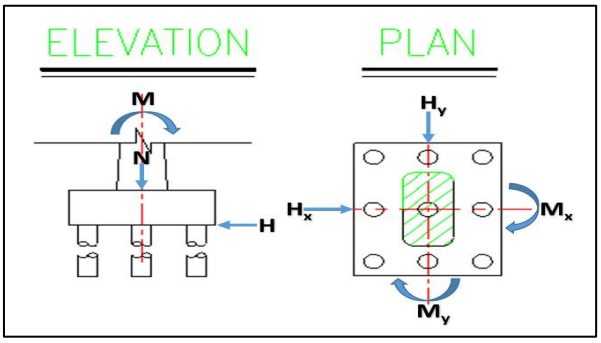
รูปที่ 3 แบบแสดงตำแหน่งโครงสร้าง P1170

3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำตามเงื่อนไขของมาตรฐานเพื่อหาน้ำหนักวิกฤตในการใช้ควบคุมในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

โดยวิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างและทำการรวมน้ำหนักกระทำทั้งหมด (Vertical Load) ตามเงื่อนไขการรวมแรงกระทำดังนี้

1. Dead Load = 13,967.500 kN (Vertical Load)
2. Superimpose Dead Load = 3,802.161 kN (Vertical Load)
3. Live Load = 3,204.109 kN (Vertical Load)
4. Additional Load = 239.672 kN (Horizontal Force)
5. Special Force I = 4,905.000 kN (Vertical Load)
6. Special Force II = 716.214 kN (Horizontal Force)

Combination I: 20,973.770 kN
Combination II: 20,973.770 kN
Combination III: 25,878.770 kN (Critical Load)



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดงแรงกระทำต่อโครงสร้าง

เนื่องจากเป็นฐานรากประเภทกลุ่มเสาเข็มจึงต้องดำเนินการพิจารณาแรงที่ทำให้เกิดการดัดรวมกับแรงอัด [10]

M_x = 2,803.680 kN-m (Wind Load Effect)
M_y = 196.885 kN-m (Braking or Traction Force Effect)

$$P_{max,\ min} = \frac{N}{n} \pm \frac{Mx}{y} \pm \frac{My}{x} \quad (5)$$

$$P = \frac{25{,}878.770}{9} \pm \frac{2{,}803.680}{3.7x3} \pm \frac{196.885}{2.8x3} \text{ kN}$$

P = 3,151.441 kN (max.)

เพราะฉะนั้นจะได้แรงกระทำทั้งหมดถ่ายลงสู่เสาเข็มในแต่ละต้นเท่ากับ, P = 3,151.441 kN เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ต้องออกแบบ

3.3 การแปลผลข้อมูลของชั้นดิน

หลังจากการเจาะสำรวจชั้นดินในบริเวณที่จะออกแบบจึงดำเนินการวิเคราะห์และแปลผล [11] เพื่อให้ได้ค่าที่จำเป็นใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้แก่ หน่วยน้ำหนักดิน, ค่าความเชื่อมแน่น, และมุมของแรงเสียดทานภายในชั้นทราย เป็นต้น

ตารางที่ 11 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญแปลผลจากข้อมูลดินในตารางที่ 10

Layer No.	Type of Soil	SPT	γ (kN/m3)	Su (t/m2)	$\emptyset$
1	Very Soft Clay	2	14.0	1.5	
2	Soft Clay	3	14.5	2.0	
3	Soft Clay	3	14.5	2.0	
4	Stiff Clay	12	17.0	7.9	
5	Very Stiff Clay	17	17.5	11.5	
6	Medium Sand	17	18.0		32.1
7	Dense Sand	37	19.5		37.8
8	Hard Clay	43	20.0	29	
9	Dense Sand	48	20.0		40.5
10	Hard Clay	35	19.5	24	
11	Dense Sand	45	20.0		39.8
12	Dense Sand	48	20.0		40.5
13	Very Dense Sand	52	20.0		41.5
14	Hard Clay	50	20.0	33.3	
15	Very Dense Sand	54	20.0		42.0

3.4 การหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามมาตรฐาน

1.กำลังรับแรงแบกทานปลายเสาเข็มโดยพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 11

ตารางที่ 12 แสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณ

Description	Value	Unit
Pile length Design	42.00	m
Diameter Design	1.00	m
Perimeter	3.140	m
Bearing area at pile base	0.785	m2
m_o	0.3	-
γ_2 Average of soil layer above foundation base)	18.923	kN/m3
k_2 (Very Dense Sand)	5.5	-

ดังนั้นเงื่อนไขในการหาค่า คือ h>10d หรือแทนค่า 42>10 จะได้ค่าของแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มตามสมการ (4), σ= 866.306 kPa

2.กำลังรับแรงเสียดทานตามแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 รายการข้อมูลคำนวณสำหรับแรงเสียดทาน

Layer No.	f_i(kN/m2)	Li(m)	fiLi(kN)
1	-5.000	8.777	-43.885
2	56.500	3.800	214.700
3	56.500	3.100	175.150
4	45.000	4.100	184.500
5	80.000	3.300	264.000
6	62.500	2.000	125.000
7	80.000	1.800	144.000
8	62.500	5.300	331.250
9	80.000	1.100	88.000
10	60.000	1.800	108.000

11	80.000	3.100	248.000
12	65.000	1.600	104.000
13	80.000	2.223	177.840
	Total:	42.000	2,120.555

3.กำลังรับน้ำหนักรวมทั้งหมดของเสาเข็มจากสมการ (1) ได้ค่าดังนี้

P = (1/2)(3.140)(2,120.555)+(0.3)(0.785)(866.306) = 3,539.075 kN

ทั้งนี้ตามมาตรฐานผลลัพธ์ของน้ำหนักที่กระทำต่อเสาเข็มจะเท่ากับน้ำหนักกระทำสูงสุดรวมกับผลต่างระหว่างน้ำหนักคอนกรีตและน้ำหนักดินที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำหนักของคอนกรีต [12] จะได้ว่า

P = 3,151.441 + (776.245-560.490) = 3,367.196 kN

ดังนั้นน้ำหนักที่กระทำทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 3,440.928 kN น้อยกว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ออกแบบไว้รองรับได้อย่างปลอดภัยเท่ากับ 3,539.075 kN หรือ 3,367.196 < 3,539.075 kN

3.5 กรณีการหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามหลักการพื้นฐานที่ใช้ในประเทศไทย

ในส่วนของการออกแบบตามวิธีการที่ใช้ในประเทศไทยนั้นได้มีการรวบรวมสมการจากตำราทางด้านพื้นฐานทางปฐพีและการบันทึกค่าสถิติเพื่อให้ได้วิธีการหรือหลักการที่เหมาะสมโดยอ้างอิงดังนี้

1.การวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่สมการจะอยู่ในรูปแบบ [13] คือ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W_p - N_f \quad (9)$$

$$Q_{allow} = \frac{Qult}{F.S.} \quad (10)$$

เมื่อ Q_f คือ กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม (ตัน)
Q_e คือ กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (ตัน)
Wp คือ น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน)
N_f คือ กำลังแรงเสียดทานลบหรือแรงเสียดทานฉุดลง (ตัน)
Q_{ult} คือ กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (ตัน)
Q_{allow} คือ กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม (ตัน)
$F.S.$ คือ Factor of Safety (ค่าที่แนะนำตั้งแต่ 2.5 ขึ้นไป)

การเลือกใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจะพิจารณาตามลักษณะของโครงสร้างและการรับแรง [14] ดังแสดงในตารางที่ 14 หรือขึ้นอยู่กับการพิจารณาเลือกใช้ในการออกแบบและลักษณะของชั้นดินมีความซับซ้อนหรือแปรปรวนมากเพียงใด

ตารางที่ 14 แสดงรายการข้อมูลค่าสัดส่วนความปลอดภัย

โครงสร้างและการรับแรง	สัดส่วนความปลอดภัย
โครงสร้างถาวร-รับแรงกด	>2.5
โครงสร้างถาวร-รับแรงดึง	>3.0
โครงสร้างชั่วคราวที่ไม่ต้องคำนึงถึงการทรุดตัว	1.5-2.0

2.ดำเนินการหากำลังรับน้ำหนักตามการวิเคราะห์ดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 15 แสดงรายการข้อมูลคำนวณกำลังรับแรงเสาเข็ม

Layer No.	γ (t/m3)	ΔL (m)	Su (t/m2)	α	Ø (°)	Nq
1	1.500	8.777	2.000	0.90		
2	1.550	3.800	7.900	0.50		
3	1.750	3.100	11.500	0.35		
4	1.750	4.100			31.30	9.0
5	1.950	3.300			36.30	21.0
6	2.000	2.000	20.000	0.25		
7	2.000	1.800			37.50	22.0
8	1.950	5.300	20.000	0.30		
9	2.000	1.100			35.70	15.0
10	2.000	1.800			36.00	21.0
11	2.000	3.100			36.30	21.5
12	2.000	1.600	20.000	0.25		
13	2.000	2.223			36.00	21.0
	Total:	42.000				

ตารางที่ 16 (ต่อ) แสดงรายการข้อมูลคำนวณกำลังรับแรงเสาเข็ม

Layer No.	σ'_v (t/m2)	δ (°)	K_o	Q_f (t)	Q_e (t)
1	4.390		1.000	-49.633	
2	2.090		1.000	47.155	
3	2.330		1.000	39.199	
4	3.080	23.85	0.473	25.856	
5	3.140	27.23	0.408	29.260	
6	2.000		1.000	31.416	
7	1.800	28.13	0.391	21.184	
8	5.040		1.000	99.903	
9	1.100	26.78	0.416	17.718	
10	1.800	27.00	0.412	30.701	
11	3.100	27.23	0.408	57.848	
12	1.600		1.000	25.133	
13	2.220	27.00	0.412	47.760	555.356
			Total:	425.499	555.356

จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 15 จะได้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อแทนในสมการ (9) ดังนี้

Q_{ult} = 425.499 + 555.356 – 79.168 = 901.687 tons

$$Q_{allow} = \frac{901.687}{2.5} = 360.675 \text{ tons}$$

ดังนั้นเมื่อแปลงหน่วยของค่ากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มจากค่าที่ได้ 360.675 tons เป็นหน่วย kN จะได้เท่ากับ 3,537.010 kN ซึ่งมากกว่า 3,367.196 kN เช่นกัน

4. ผลการวิเคราะห์

หลังจากผ่านการวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามการอ้างอิงของมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert ทำให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเท่ากับ 3,539.075 kN ซึ่งมากกว่าแรงกระทำทั้งหมดจากโครงสร้างในกรณีที่ 3 เท่ากับ 3,367.196 kN โดยเป็นไปตามเงื่อนไขของหลักการออกแบบที่กำลังรับน้ำหนักออกแบบต้องมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักโครงสร้างที่ออกแบบถ่ายลงเสาเข็ม รวมไปถึงการออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามหลักการวิธีที่ใช้ในประเทศไทยได้กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้เท่ากับ 3,537.010 kN และเป็นไปตามเงื่อนไขของหลักการออกแบบที่กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มต้องมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักโครงสร้างที่ออกแบบถ่ายลงเสาเข็มเช่นกัน

5. บทสรุป

ในการออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยอ้างอิงใช้วิธีการออกแบบตามมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert และเปรียบเทียบกับหลักการออกแบบที่ใช้ในประเทศไทยตามที่ได้นำเสนอในบทความนี้พบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้ของทั้งสองวิธีนั้นค่อนข้างมีความใกล้เคียงกันซึ่งถ้าเทียบความแตกต่างในค่าเปอร์เซ็นต์ของตัวเลขมีความแตกต่างกันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ โดยการเทียบกับมาตรฐานของจีนทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นมาจากปัจจัยโดยสรุปดังนี้

5.1 รูปแบบของสมการที่ใช้ในการออกแบบหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

1. สมการที่ใช้ออกแบบในส่วนของมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert ในส่วนของพจน์ที่ใช้หากำลังรับแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานซึ่งมีการแปลข้อมูลโดยตรงจากชนิดของชั้นดินตามแสดงในตารางที่ 2 ในการใช้คำนวณซึ่งแตกต่างจากหลักวิธีการที่ใช้ในไทยโดยต้องแยกเป็นประเภทของดินได้แก่ ในกรณีประเภทชั้นดินเหนียวจะใช้ค่าประกอบอยู่สองส่วนได้แก่ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทาน ในกรณีของทรายใช้ค่าประกอบอยู่สามส่วนได้แก่ หน่วยแรงกดทับประสิทธิผลของชั้นดิน, ค่าสัมประสิทธิของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดิน, และค่ามุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน

2.สมการที่ใช้ออกแบบในส่วนของมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert ในส่วนของพจน์ที่ใช้หากำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงกดทับโดยตรงในการใช้คำนวณตามเงื่อนไขในสมการ (2), (3), และ (4) แตกต่างจากหลักวิธีการที่ใช้ในไทยโดยต้องแยกตามประเภทของดินเช่นกันในการคำนวณได้แก่ ในกรณีชั้นดินเหนียวจะใช้ค่าประกอบอยู่สองส่วนได้แก่ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าประกอบกำลังรับแรงแบกทาน N_C ในกรณีของทรายใช้ค่าประกอบอยู่สองส่วนเช่นกันได้แก่ หน่วยแรงกดทับประสิทธิผลของชั้นดิน และค่าประกอบกำลังรับแรงแบกทาน N_q

5.2 การใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัย

1. ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) มีการใช้ที่แตกต่างกันโดยที่ในสมการตามมาตรฐาน TB10093-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert นั้นจะมีค่าคงที่ ที่มีนัยสำคัญทางด้านสัดส่วนของความปลอดภัยกำหนดไว้ในสมการโดยตรงโดยในพจน์ของกำลังรับแรงเสียดทานจะมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยกำกับไว้คือ 1/2 แต่ในส่วนพจน์ของกำลังรับแรงแบกทานนั้นค่าสัดส่วนความปลอดภัยจะอยู่ในรูปแบบของค่า m reduction โดยขึ้นอยู่กับความลึกของเสาเข็มและการคาดการณ์ของเศษตะกอนที่ปลายเสาเข็มว่ามีการเก็บออกหรือตกค้างมากน้อยเพียงใดในระหว่างก่อสร้าง แต่ทั้งนี้ในส่วนของวิธีการที่ใช้ในไทยจะใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ยอมให้โดยมาจากการนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสูงสุดหารด้วยค่าสัดส่วนความปลอดภัยก่อนนำไปใช้งานโดยค่าสัดส่วนของความปลอดภัยที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของการใช้งานโครงสร้างได้แก่ชั่วคราวและถาวร และอาจขึ้นอยู่กับดุลยพินิจในการเลือกใช้ของผู้ออกแบบ

ทั้งนี้ความแตกต่างของกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เกิดขึ้นจากบทความที่นำเสนอตามบทสรุปอาจมีความเป็นไปได้ที่จะมีความแตกต่างกันมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ซึ่งขึ้นอยู่กับการเลือกใช้หลักการหรือมาตรฐานในการออกแบบและการเลือกใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยรวมไปถึงการตีความของผลข้อมูลดินเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการใช้คำนวณออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] หงส์ฟ้า ทรัพย์บุญเรือง และ จินตวัฒน์ ศิริรัตน์ (2563). โครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน: โอกาสของการพัฒนาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วารสารไทยคดีศึกษา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, หน้า 50-80.

[2] พรพจน์ ตันเส็ง (2554). วิศวกรรมฐานราก: ฐานรากเสาเข็ม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 139.

[3] People's Republic of China Industry Standard (2017). TB10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert: Load Design. Published by the National Railway Administration, pp.15.

[4] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2550). มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร: แผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง และ การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง. บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 51-52.

[5] ราชกิจจานุเบกษา (2564). กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการ

ต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564. เล่ม 138, ตอนที่ 16 ก. หน้า 13

[6] ราชกิจจานุเบกษา (2564). ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง การออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. เล่ม 138, ตอนที่พิเศษ 275 ง, ผนวก ก. หน้า 13

[7] People's Republic of China Industry Standard (2018). TB10002-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert: Pile Foundation. Published by the National Railway Administration, pp.22.

[8] People's Republic of China Industry Standard (2018). TB10002-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert: Bearing Capacity. Published by the National Railway Administration, pp.10-15.

[9] People's Republic of China Industry Standard (2018). TB10002-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert: Pile Foundation. Published by the National Railway Administration, pp.22-23.

[10] People's Republic of China Industry Standard (2018). TB10002-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert: Appendix D Calculation of Pier and Abutment Foundation with Consideration of Elastic Resistance of Soil. Published by the National Railway Administration, pp.65.

[11] Braja M.Das (2011). Geotechnical Engineering Hnadbook: Engineering Properties of Soil. Published by J.Ross Publishing, Inc., pp.1-30.

[12] People's Republic of China Industry Standard (2018). TB10002-2017 Code for Design Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert: Pile Foundation. Published by the National Railway Administration, pp.24.

[13] พรพจน์ ตันเส็ง (2554). วิศวกรรมฐานราก: ฐานรากเสาเข็ม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 128.

[14] พรพจน์ ตันเส็ง (2554). วิศวกรรมฐานราก: ฐานรากเสาเข็ม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 141.