

ผลกระทบของ Matric Suction ต่อกำลังรับแรงเฉือนและเสถียรภาพของถนน: กรณีศึกษาดินลูกรังในจังหวัดกาญจนบุรี Influence of Matric Suction on Shear Strength and Road Stability: A Case Study of Lateritic Soil in Kanchanaburi

ภัทรวีภา บุญจันทร์¹ กมล อมรฟ้า^{2,*} บรรพต กุลสุวรรณ³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: fengkma@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ดินลูกรังเป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างถนนในประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูง ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือน และเสถียรภาพของถนน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของค่า Suction ต่อกำลังรับแรงเฉือน และเสถียรภาพของถนนที่สร้างบนดินลูกรังจากอำเภอมโนรมย์ จังหวัดกาญจนบุรี โดยทำการทดสอบ Direct Shear Test ภายใต้ค่า Suction ที่ 10, 30 และ 50 kPa กรณีละ 3 ตัวอย่าง พร้อมทั้งควบคุมค่า Suction ด้วยเทคนิค Axis Translation Technique ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่า Suction สูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของถนนด้วยสมการ Extended Mohr-Coulomb ซึ่งคำนวณ Factor of Safety (FOS) ภายใต้ค่าความสูงของถนนที่ 2 เมตร จากการวิเคราะห์พบว่าค่า Suction ที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มค่า FOS ของถนน โดยค่า FOS เปลี่ยนจาก 6.8 ที่ Suction 10 kPa เป็น 10.3 ที่ Suction 50 kPa แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกของ Suction ต่อเสถียรภาพของถนน ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานประเมินเสถียรภาพของถนนในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดินลูกรัง, Suction, Extended Mohr-Coulomb, เสถียรภาพ, Factor of Safety

Abstract

Lateritic soil is a common material widely used in road construction in Thailand, especially in regions with significant moisture variations, which influence the shear strength and stability of roads. This study investigates the effects of suction on the shear strength and stability of roads constructed on lateritic soil from Phanom Thuan District, Kanchanaburi Province. Direct shear tests were conducted under suction values of 10, 30, and 50 kPa with 3 samples per case with suction controlled using the Axis Translation Technique. The experimental results indicate a significant increase in the shear strength of the soil with higher suction levels. The shear strength parameters obtained were utilized to analyze the stability of a 2-meter-high road embankment using the Extended Mohr-Coulomb equation to calculate the Factor of Safety (FOS). The analysis revealed

that higher suction levels enhanced the FOS of the road, increasing from 6.8 at 10 kPa suction to 10.3 at 50 kPa suction. This highlights the positive impact of suction on road stability. The findings from this study can be applied to the stability assessment of roads in areas with significant moisture variations, providing practical insights for construction and maintenance.

Keywords: Lateritic soil, Suction, Modified Mohr-Coulomb, Stability, Factor of Safety

1. บทนำ

ดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) เป็นสภาพของดินที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินยังไม่เต็ม 100% ส่งผลให้เกิดแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) ซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลของดิน เช่น กำลังเฉือนและการทรุดตัว โครงสร้างทางวิศวกรรมจำนวนมาก เช่น ถนนและคันดิน มักตั้งอยู่บนดินไม่อิ่มตัว ดังนั้น การทำความเข้าใจพฤติกรรมของดินประเภทนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบและเสริมเสถียรภาพของโครงสร้าง การศึกษากำลังเฉือนของดินไม่อิ่มตัวสามารถทำได้โดยใช้สมการ Extended Mohr-Coulomb ซึ่งคำนึงถึงผลของ Suction ต่อกำลังรับแรงเฉือน โดยเฉพาะค่าพารามิเตอร์ ϕ_b ซึ่งบ่งบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังเฉือนเมื่อค่า Suction เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการศึกษาพฤติกรรมทางกลของดินไม่อิ่มตัวในหลายบริบท เช่น การพังทลายของลาดเขาหรือการคงตัวของคันดิน งานวิจัยที่มุ่งเน้นการประเมินผลของ Matric Suction ต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของชั้นถนนลูกรังในบริบทของประเทศไทยยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามฤดูกาลอย่างรุนแรง เช่น จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งมีการใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุพื้นฐานในการก่อสร้างถนนอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพที่ใช้งานทั่วไปยังไม่สามารถพิจารณาผลของ Suction ได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการปรับแบบจำลองหรือแปลงค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการเพิ่มเติมช่องว่างดังกล่าว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและการวางแผนโครงสร้างถนนในพื้นที่เสี่ยง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมกำลังเฉือนของดินลูกรังจากอำเภอมโนรมย์ จังหวัดกาญจนบุรี โดยใช้ Direct Shear Test ที่สามารถควบคุมค่า Suction ได้ผ่านเทคนิค Axis Translation ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานสำหรับทดสอบดินไม่อิ่มตัว การทดลองดำเนินการภายใต้ค่า Suction ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 30 และ 50 kPa กรณีละ 3 ตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จาก

การทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์ผ่านสมการ Extended Mohr-Coulomb เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Suction กับพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดิน

ผลการศึกษาคาดว่าจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบถนนลูกรังและโครงสร้างทางธรณีเทคนิค โดยช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินเสถียรภาพของดินลูกรังในสภาวะไม่อิ่มตัวได้แม่นยำขึ้น นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำไปใช้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อจำลองพฤติกรรมของดินภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ และเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังสำหรับงานก่อสร้างในอนาคต

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ดินไม่อิ่มตัวและพฤติกรรมทางกล

ดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) เป็นสภาพของดินที่มีทั้งเฟสน้ำและเฟสอากาศอยู่ร่วมกันในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน โดยปริมาณน้ำที่มีอยู่นั้นยังไม่เต็มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ส่งผลให้เกิดแรงดูดซับหรือค่า Suction (Ψ) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น Matric Suction (ความแตกต่างระหว่างแรงดันอากาศและแรงดันน้ำ) และ Osmotic Suction (เกิดจากความเข้มข้นของสารละลายในน้ำรูพรุน) ค่า Suction นี้มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของดิน เช่น กำลังเฉือน (Shear Strength) การอัดตัว (Consolidation) และการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) [1]

Fredlund และคณะ [2] ได้เสนอว่าสมการ Mohr-Coulomb ซึ่งใช้สำหรับดินอิ่มตัวสามารถขยายไปใช้กับดินไม่อิ่มตัวได้โดยเพิ่มพารามิเตอร์ ϕ_b ซึ่งเป็นอัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังเฉือนตามค่า Suction โดยสมการที่แก้ไขแล้วหรือ Extended Mohr-Coulomb Equation สามารถแสดงได้เป็น:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' + \psi_m \tan \phi_b \quad (1)$$

โดยที่

τ = ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ดินสามารถรับได้ (Shear Strength) [kPa]

c' = ค่าความเชื่อมประสานของดิน (Effective Cohesion) [kPa]

σ' = ความเค้นตั้งฉากสุทธิ (Net Normal Stress) ($\sigma - u_a$) [kPa]

σ = ความเค้นตั้งฉากรวม (Total Normal Stress)

u_a = ความดันอากาศในช่องว่าง (Pore Air Pressure)

ϕ' = มุมเสียดทานภายในของดิน (Angle of Internal Friction) [°]

ψ_m = ค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) ($u_a - u_w$) [kPa]

u_w = ความดันน้ำในช่องว่าง (Pore Water Pressure)

ϕ_b = พารามิเตอร์ที่แสดงผลกระทบของแรงดูดเมทริกซ์ต่อความแข็งแรงของดิน (Suction Angle) [°]

หลายงานวิจัยพบว่า ค่า ϕ_b เป็นค่าไม่คงที่ แปรผันตามค่าปริมาณน้ำในช่องว่างของดิน และมักมีค่าสูงเมื่อ Suction ต่ำ และลดลงเมื่อ Suction สูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าผลของ Suction ต่อกำลังเฉือนมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น [1]

สมการของ Fredlund และ Morgenstern เป็นที่นิยมใช้มาก โดยมักจะสมมติให้ค่า ϕ_b เป็นค่าคงที่ เหมาะกับโปรแกรมคำนวณเสถียรภาพสำเร็จรูปที่ใช้แพร่หลายทั่วไป

2.2 เทคนิคสำหรับควบคุมค่า Suction ในการทดสอบดินไม่อิ่มตัว

เนื่องจาก Matric Suction คำนวณได้จาก $u_a - u_w$ ดังนั้นค่าที่ต้องการวัดคือหน่วยแรงของน้ำในช่องว่างดินนั่นเอง หลักการสำคัญของการวัด Suction คือการส่งผ่านหน่วยแรงของน้ำในช่องว่างดินไปสู่หัววัดในสภาวะสมดุล และมีการสัมผัสกันอย่างดี การควบคุมค่า Suction ใน

ห้องปฏิบัติการสามารถทำได้หลายวิธี และเครื่องมือในการวัด Suction นั้นมีการพัฒนามาหลายแบบเช่น Piezometer ที่วัดแรงดันนี้ด้านลบ และ Tensiometer ทั้งแบบ Low-capacity tensiometer และ High-capacity tensiometer [1] โดยในประเทศไทย หน่วยวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรมปฐพี ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์ ได้พัฒนา KU-tensiometer มาอย่างต่อเนื่องโดย รศ.ดร.อภิชาติ โชติสังกัส [3] นอกจากนี้ หนึ่งในเทคนิคที่ได้รับการยอมรับคือ Axis Translation Technique ซึ่งพัฒนาโดย Hilf [4] เทคนิคนี้อาศัยการเพิ่มแรงดันอากาศให้สูงกว่าแรงดันน้ำในรูพรุนเพื่อควบคุมค่า Matric Suction โดยไม่ทำให้ตัวอย่างดินระเหยน้ำออกไป วิธีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบ Direct Shear Test, Triaxial Test และ Oedometer Test สำหรับดินไม่อิ่มตัว โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง Direct Shear Test และ Axis Translation Technique สำหรับดินไม่อิ่มตัวในงานวิจัยนี้ และได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบและเสนอข้อแนะนำในการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

2.3 ผลกระทบของ Suction ต่อเสถียรภาพของถนน

การคำนวณเสถียรภาพของถนน ค้นดิน หรือลาดดิน สามารถใช้แนวคิดของ Fredlund และ Rahardjo [5] คือการพิจารณาความเชื่อมแน่นรวม Total cohesion ซึ่งเป็นผลรวมของ ค่าความเชื่อมประสานของดิน (Effective Cohesion, c') และกำลังเฉือนเนื่องจาก Suction ($\psi_m \tan \phi_b$) โดยการคำนวณอื่นๆยังเหมือนเดิม อย่างไรก็ตามประเด็นสำคัญคือการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม และการใช้ค่าแรงดันน้ำที่เหมาะสม โดยในการออกแบบนั้นวิศวกรควรทราบข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำใต้ดินและแรงดูดของชั้นดินตามฤดูกาลอย่างน้อยหนึ่งปี รวมถึงการคาดการณ์สภาวะเลวร้ายอื่นๆ [1] ดังนั้นงานตรวจวัดในสนามจึงมีความสำคัญไม่แพ้กัน ในการวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณเสถียรภาพของถนนอย่างง่ายเท่านั้น เพื่อให้เห็นผลกระทบของ Suction ต่อเสถียรภาพของถนน โดยไม่ได้มีการตรวจวัดจริงใดๆ จึงไม่ควรนำไปใช้งานจริง เป็นเพียงแค่การจำลองเพื่อให้เห็นพฤติกรรมที่มีความสัมพันธ์กันเท่านั้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fredlund และคณะ (1978) [2] ได้เสนอแนวคิดและสมการสำหรับอธิบายพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัว โดยใช้พารามิเตอร์แรงเฉือนที่สาม (ϕ_b) และค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) เป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งกลายเป็นแนวทางพื้นฐานในการศึกษาดินไม่อิ่มตัวในปัจจุบัน

Gan et al. (1988) [6] ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงที่สามารถควบคุม Suction ได้ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนกับ Suction มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และค่า ϕ_b มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Suction เพิ่มขึ้น

รัตนณี นันทสาร (2554) [7] ได้ประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและ Suction ไม่เป็นเส้นตรง และ ϕ_b เปลี่ยนแปลงตามค่า Suction ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Fredlund และคณะ

Jotisankasa และคณะ (2010) [3] ได้พัฒนาวิธีการทดสอบดินไม่อิ่มตัวโดยใช้ Miniature Tensiometer และ Psychrometer พร้อมกล่อง Shear Box ที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Suction กับกำลังเฉือน ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินลึก

He et al. (2017) [8] ได้ออกแบบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงที่สามารถควบคุม Pore Air และ Pore Water Pressure ได้อย่างแม่นยำ พบว่าค่ากำลังเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อ Suction และแรงกดแนวตั้งเพิ่มขึ้น โดยพบพฤติกรรม Failure Envelope แบบไม่เป็นเชิงเส้น

สยาม ยัมศิริ (2559) [9] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่า CBR และกำลังเฉือนของดินทรายผสมดินเหนียว พบว่า Matric Suction ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังดินเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเน้นการประยุกต์ใช้ในการออกแบบชั้นทาง

วารการ ไม้เรียง และนางลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ (2552) [10] ได้ทดสอบ Multi-stage Direct Shear Test กับดินในพื้นที่ดินถม พบว่าความชื้นแน่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราความอิ่มตัวเกิน 85% และสามารถแสดงความสัมพันธ์กำลังเฉือนในรูปกราฟ 3 มิติ ซึ่งเหมาะกับการใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดเขาและเตือนภัยล่วงหน้า

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าค่า Matric Suction มีอิทธิพลโดยตรงต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะในพื้นที่ลาดเขาและภูมิประเทศที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างมาก ทั้งแนวคิดเชิงทฤษฎีและการพัฒนาเครื่องมือทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่าง Suction กับกำลังเฉือน ซึ่งเป็นองค์ความรู้สำคัญต่อการวิเคราะห์ความมั่นคงของโครงสร้างทางและลาดดินในภูมิภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามฤดูกาล

3. วัสดุและวิธีการ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษานี้ใช้ดินลูกรังจาก บ่อดินในอำเภอพนมทวน จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นดินที่พบได้ทั่วไปในงานก่อสร้างถนนและฐานรากในพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย ตัวอย่างดินถูกเก็บจากบ่อดินที่ระดับความลึกประมาณ 1.0 - 1.5 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงชั้นดินผิวที่อาจปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเป็นดินที่กำลังนำมาใช้ในการก่อสร้างถนนแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม หลังจากนั้นดินถูกนำมาผ่านกระบวนการตากแห้งทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินถูกวิเคราะห์โดยมีรายละเอียดการทดสอบมีดังนี้:

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) – ASTM D422, ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) – ASTM D854, ขีดจำกัด Atterberg (Atterberg Limits) – ASTM D4318

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมแบบ Modified (Compaction Test) – ASTM D1557, กำลังเฉือนของดินโดยใช้ Direct Shear Test แบบควบคุมค่า Suction

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดินที่ใช้ดินลูกรัง เมื่อนำมาจำแนกดินทางวิศวกรรมได้เป็นชนิด SC และ A-2-4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	ผลทดสอบ	มาตรฐานที่ใช้
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (%)	63.48	ASTM D422
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (%)	19.52	ASTM D422
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (%)	15.57	ASTM D422
ขีดจำกัดของเหลว (LL, %)	27.75	ASTM D4318
ขีดจำกัดพลาสติก (PL, %)	16.92	ASTM D4318
ดัชนีพลาสติก (PI)	10.83	ASTM D4318
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.84	ASTM D854
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (V_d max, kN/m ³)	20.58	ASTM D1557
ปริมาณน้ำเหมาะสม OMC (%)	8.91	ASTM D1557

3.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Direct Shear Test แบบควบคุมค่า Suction โดยใช้อุปกรณ์ Suction-Controlled Direct Shear Box ซึ่งมีระบบ Axis Translation Technique ในการควบคุมแรงดันน้ำและอากาศเพื่อกำหนดค่า Matric Suction

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

- นำดินที่ผ่านการร่อนแล้วมาผสมกับน้ำตามปริมาณน้ำที่เหมาะสม OMC จาก Compaction Test
- บรรจุดินลงในกล่องเฉือนให้ได้ความแน่นที่ 95% Modified Proctor
- เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมแรงดันอากาศและแรงดันน้ำเพื่อกำหนดค่า Suction ตามที่ต้องการ

3.2.2 การตั้งค่าแรงดัน Suction

เพื่อศึกษาผลกระทบของค่า Suction ต่อกำลังเฉือนของดิน การทดสอบนี้ใช้ค่า Suction ที่ระดับ 10, 30 และ 50 kPa โดยใช้ Axis Translation Technique ในการควบคุมแรงดันอากาศและแรงดันน้ำ โดยมีขั้นตอนดังนี้:

- ตั้งค่า แรงดันน้ำ (u_w) ให้คงที่ที่ 10 kPa
- ปรับค่า แรงดันอากาศ (u_a) เป็น 20, 40 และ 60 kPa เพื่อให้ได้ค่า Matric Suction ตามลำดับดังนี้:
 - Suction 10 kPa: $u_a = 20$ kPa, $u_w = 10$ kPa
 - Suction 30 kPa: $u_a = 40$ kPa, $u_w = 10$ kPa
 - Suction 50 kPa: $u_a = 60$ kPa, $u_w = 10$ kPa

การตั้งค่าแรงดันดังกล่าวช่วยให้สามารถควบคุมค่า Matric Suction ได้อย่างแม่นยำ และสะท้อนสภาพความชื้นที่แตกต่างกันในดินลูกรัง โดยไม่ให้เกิดการไหลของน้ำออกจากตัวอย่างระหว่างกระบวนการเฉือน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการทดสอบกำลังเฉือนของดินไม่อิ่มตัว

3.2.3 การทดสอบ Direct Shear Test

- ปล่อยให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะ Consolidation จนกว่าอัตราการยุบตัวจะคงที่
- ทดสอบกรณีละ 3 ตัวอย่าง โดยกำหนดค่าความเค้นแนวตั้ง (Total Normal Stress, σ) เริ่มต้นไว้ที่ 50, 100 และ 150 kPa อย่างไรก็ตามพบว่าระหว่างการทดสอบจริง ค่า Total Normal Stress มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างทดสอบ จึงบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบจริงระหว่างที่ดินอยู่ในช่วงพิบัติ
- ทำการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราเคลื่อนที่ของการเฉือน 0.3 mm/min จนกว่าดินจะถึงจุดพิบัติ
- บันทึกค่า แรงเฉือน (τ) และการเคลื่อนตัวของดิน ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

3.2.4 การคำนวณค่า c' , ϕ และ ϕ_b

- กำลังเฉือนที่จุดพิบัติของดิน ความเค้นตั้งฉากสุดท้ายจุดพิบัติของดิน และ ค่าแรงดุดเมทริกซ์ ถูกนำไปใช้สร้าง Failure Envelope และใช้ Linear Regression Analysis คำนวณค่า Cohesion (c') และ Angle of Internal Friction (ϕ') ค่า Suction Angle ϕ_b ตามแนวทาง Extended Mohr-Coulomb Equation ของ Fredlund และคณะ [2]

ตารางที่ 2 ชื่อตัวอย่างและการกำหนดค่าเริ่มต้น

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	Normal Stress (σ_n)	Suction ($u_a - u_w$)
1	N50S10	50 kPa	10 kPa
2	N50S30	50 kPa	30 kPa
3	N50S50	50 kPa	50 kPa
4	N100S10	100 kPa	10 kPa
5	N100S30	100 kPa	30 kPa
6	N100S50	100 kPa	50 kPa
7	N150S10	150 kPa	10 kPa
8	N150S30	150 kPa	30 kPa
9	N150S50	150 kPa	50 kPa

4. รายละเอียดการทำงานของเครื่อง Direct Shear Test สำหรับ Unsaturated Soil

การทดสอบ Direct Shear Test สำหรับดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) นี้ใช้เทคนิค Axis Translation ในการควบคุมค่า Matric Suction ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างแรงดันอากาศและแรงดันน้ำในตัวอย่างดิน การทดสอบนี้ใช้เครื่องมือที่ได้รับการปรับปรุงจากเครื่อง Direct Shear Test มาตรฐานเพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยระบบทดสอบแรงเฉือนในสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated Shear Testing System) [11] โดยสามารถรองรับตัวอย่างดินทั้งในรูปทรงกลมและสี่เหลี่ยม ภายในระบบทดสอบที่ปิดสนิท (Sealed Sample Chamber)

ตัว Unsaturated Shear Box มีลักษณะการติดตั้งแบบ Bench-mounted ระบบควบคุมขับเคลื่อนด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor-based Control) ประกอบด้วยมอเตอร์สเต็ปเปอร์สำหรับการสร้างแรงในแนวนอน (Horizontal Loading), หน้าจอแสดงผลแบบกราฟิก (Graphical Display), และสวิตช์ควบคุมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า/ถอยหลัง (Travel Limit Switches)

การให้แรงในแนวตั้ง (Vertical Loading) ดำเนินการผ่านระบบนิวแมติก (Pneumatic Actuator) ซึ่งต้องใช้อากาศอัด (Compressed Air Supply) ในระหว่างการทดสอบ ระบบจะควบคุมค่าความดูด (suction) โดยใช้ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติแบบนิวแมติก (Pneumatic Automatic Pressure Controller; Pneumatic APC) ที่ด้านบนของตัวอย่าง และแบบไฮดรอลิก (Hydraulic APC) ที่ฐานของตัวอย่าง

ระบบมีการบันทึกข้อมูลในตัว (Built-in Data Acquisition) ซึ่งสามารถบันทึกค่าการเคลื่อนที่และแรงในแนวนอนและแนวตั้งได้โดยอัตโนมัติ โปรแกรม Clisp Studio csUnsatShear ใช้สำหรับควบคุมการทำงานและตั้งค่าการทดสอบ รวมถึงแสดงผลข้อมูลที่วัดและคำนวณได้ในรูปแบบตารางและกราฟแบบเรียลไทม์

4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ

เครื่องมือ Direct Shear Test สำหรับดินไม่อิ่มตัว แสดงดังในรูปที่ 1-3 ประกอบด้วยส่วนหลักดังนี้

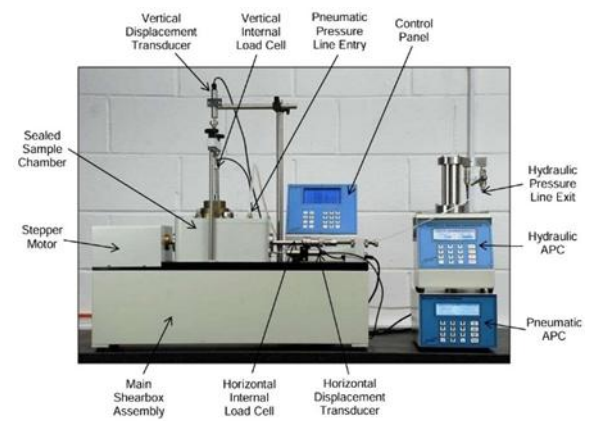
(1) Shear Box: เป็นกล่องเดือ้นที่ออกแบบให้สามารถใส่ตัวอย่างดินขนาดมาตรฐาน และแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งสามารถเลื่อนผ่านกันได้ โดยกล่องเดือ้นนี้มีช่องสำหรับใส่แผ่นพรุน (Porous Disc) และแผ่นระบายน้ำ (Drainage Plate) เพื่อควบคุมความชื้นภายในตัวอย่าง

(2) ระบบควบคุมแรงดันอากาศ (Air Pressure System): ใช้ควบคุมค่าแรงดันอากาศ (u_a) ซึ่งจะถูกนำเข้าสู่ช่องว่างของดินผ่านช่องระบายอากาศด้านบนของตัวอย่าง

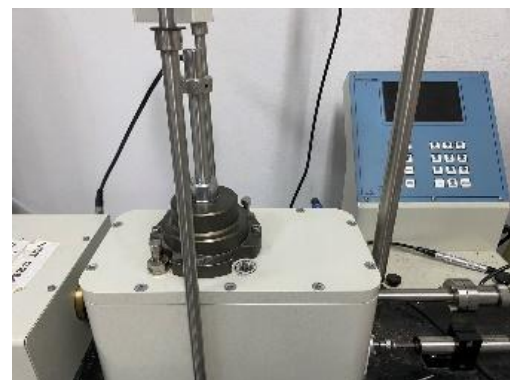
(3) ระบบควบคุมแรงดันน้ำ (Water Pressure System): ใช้ควบคุมค่าแรงดันน้ำ (u_w) ซึ่งจะถูกกำหนดค่าคงที่ผ่านแผ่นเซรามิกและแผ่นหินพรุนด้านล่างของตัวอย่าง

(4) ระบบควบคุมการรับน้ำหนัก (Loading System): แรงกดในแนวตั้ง (Vertical Load) ระบบนี้จะไม่ถูกถ่ายโดยตรงผ่านแผ่นน้ำหนัก แต่ใช้ระบบแรงดันอากาศจากปั๊มลมในการควบคุมแรงกดแทน

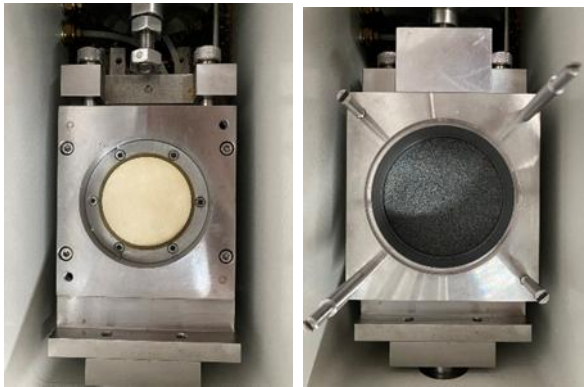
(5) เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลง (Measurement System): ประกอบด้วยตัววัดแรงเฉือน (Load Cell) และ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) เพื่อติดตามการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างดิน



รูปที่ 1 ภาพรวมเครื่องมือ Direct Shear Test สำหรับดินไม่อิ่มตัว [11]



รูปที่ 2 Unsaturated Shear Box ใน Sealed Sample Chamber



รูป a

รูป b



รูป c

รูป d

รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่างดินใน Shear Box

4.2 หลักการทำงานของ การทดสอบ Direct Shear Test สำหรับ Unsaturated Soil

การทดสอบ Direct Shear Test สำหรับดินไม่อิ่มตัวดำเนินการภายใต้การควบคุมแรงดันน้ำและแรงดันอากาศ โดยอาศัยหลักการ Axis Translation Technique เพื่อกำหนดค่า Suction ตามลำดับดังนี้

(1) การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งใน Shear Box

- ตัวอย่างดินถูกบดอัดให้มีความแน่นที่ 95% Modified Proctor และมีปริมาณน้ำตามที่กำหนด
- ติดตั้งตัวอย่างใน Shear Box โดยให้แผ่นเซรามิคและแผ่นพรุนด้านล่างเชื่อมต่อกับระบบควบคุมแรงดันน้ำตัวอย่างดิน และ แผ่นพรุนด้านบนเชื่อมต่อกับระบบควบคุมแรงดันอากาศตามลำดับรูปที่ 3
- ปิดฝาและล็อกตัวอย่างให้แน่นเพื่อป้องกันการสูญเสียแรงดัน

(2) การกำหนดค่าแรงดันอากาศและแรงดันน้ำ

- ตั้งค่าแรงดันน้ำ (u_w) คงที่ที่ 10 kPa
- ปรับค่าแรงดันอากาศ (u_a) เป็น 20, 40 และ 60 kPa เพื่อให้ค่า Matric Suction เท่ากับ 10, 30 และ 50 kPa ตามลำดับ
- ตรวจสอบความเสถียรของระบบก่อนเริ่มการทดสอบ

(3) การ Consolidation ภายใต้ Total Normal Stress

- กำหนด Total Normal Stress เริ่มต้นที่ระดับ 50, 100 และ 150 kPa
- ฝ้าติดตามแรงดันน้ำจนกระทั่งสมดุล (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในช่วงเวลาที่กำหนด)
- ใช้เวลาในการ Consolidation ประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าค่าการทรุดตัวจะคงที่

(4) การเฉือนตัวอย่าง (Shearing Stage)

- หลังจากการ Consolidation เสร็จสิ้น ทำการเพิ่มแรงเฉือนในอัตราคงที่ (Shear Rate 0.3 mm/min)
- ฝ้าติดตามค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ของตัวอย่างจนถึงจุดสูงสุดหรือถึงจุดที่ค่าการเฉือนคงที่
- บันทึกค่า Shear Stress และ Horizontal Displacement ตลอดกระบวนการ

4.4 ตัวแปรที่วัดได้จากการทดสอบ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ Direct Shear Test สำหรับ Unsaturated Soil ได้แก่

- ค่า Shear Strength (τ) ที่ได้จากการทดสอบภายใต้ค่า Suction ต่างๆ
- ค่า Cohesion (c') และ Angle of Internal Friction (ϕ') และค่า ϕ_b

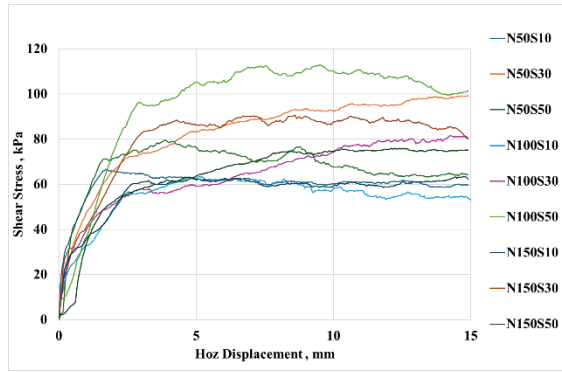
5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองจาก Direct Shear Test สำหรับดินไม่อิ่มตัวในครั้งนี้ถูกวิเคราะห์โดยพิจารณาค่า Shear Strength (τ), Cohesion (c'), Angle of Internal Friction (ϕ'), และ Suction Angle (ϕ_b) ภายใต้ค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) ที่กำหนดไว้ ผลลัพธ์จะแสดงผ่านตารางและกราฟที่เกี่ยวข้อง

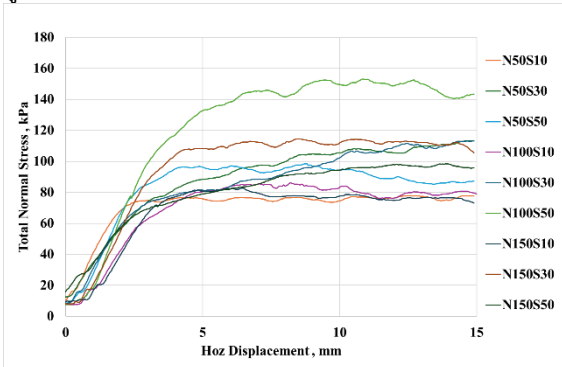
5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างดินภายใต้แรงเฉือน

ผลการตรวจวัดค่า Shear Stress, Normal Stress, Pore Air Pressure, Pore Water Pressure, Matrix Suction Pressure เทียบกับการเคลื่อนที่ในแนวราบระหว่างการเฉือนแสดงดังรูปที่ 4-8 โดยพบว่า Shear Stress เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดพิบัติ หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ สำหรับ Normal Stress มีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและคงที่ แต่ไม่เป็นไปตามตัวเลขที่กำหนดไว้ เริ่มต้น เนื่องจากระบบปั๊มลมมีปัญหา จึงเลือกใช้ค่าที่จุดแรงเฉือนพิบัติในการนำไปใช้ต่อ สำหรับค่า Pore Air Pressure, Pore Water Pressure, Matrix Suction Pressure ในช่วงแรกค่าอาจจะคลาดเคลื่อน แต่เครื่องมือทดสอบก็ค่อยๆปรับค่าจนมาคงที่เท่ากับค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้น และค่าต่างๆที่จุดพิบัติแสดงดังตารางที่ 3 โดยพบว่าเมื่อค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) เพิ่มขึ้น ค่า Maximum Shear Stress มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงของดินไม่อิ่มตัวได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก Matric Suction นอกจากนี้ ค่าความเค้นตั้งฉากสุทธิ (Net Normal Stress) ยังมีผลต่อพฤติกรรมของดิน โดยค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อ Net Normal Stress เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี Extended Mohr-Coulomb Failure Criterion

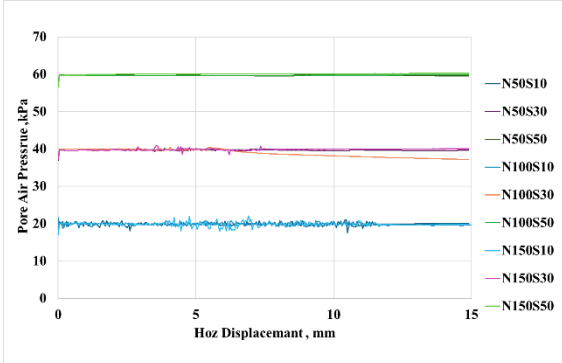
จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่างดินที่มี Matric Suction สูง (เช่น 49.17 - 49.75 kPa) มีค่า Maximum Shear Stress สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มี Matric Suction ต่ำ (เช่น 8.86 - 9.82 kPa) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินที่เกิดจาก Matric Suction ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินไม่อิ่มตัว



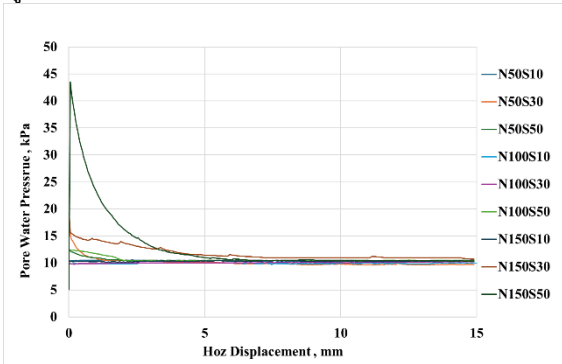
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ในแนวนอน



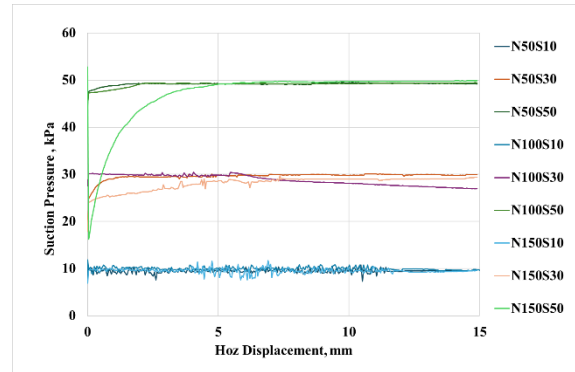
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากและการเคลื่อนที่ในแนวนอน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอากาศและการเคลื่อนที่ในแนวนอน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำและการเคลื่อนที่ในแนวนอน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดเมทริกซ์และการเคลื่อนที่ในแนวนอน

ตารางที่ 3: ผลการทดสอบค่าที่วัดได้จริงที่จุดพิบัติจาก 9 ตัวอย่าง

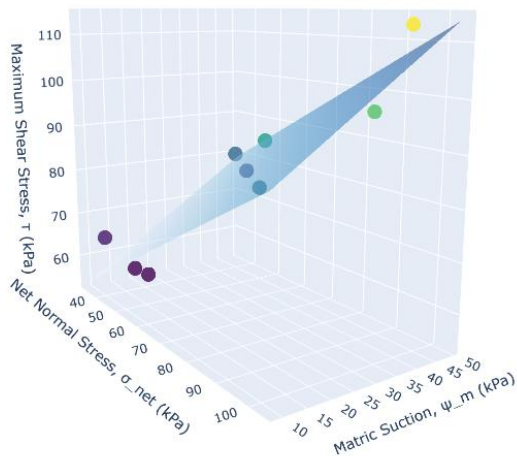
ค่าเริ่มต้น	Total Normal Stress (kPa)	Max Shear Stress (kPa)	Pore Air Pressure (kPa)	Pore Water Pressure (kPa)	Matrix Suction (kPa)	Net Normal Stress (kPa)
N50S10	62.40	66.76	19.38	10.51	8.86	43.02
N50S30	113.32	99.33	39.64	9.71	29.93	73.68
N50S50	93.60	79.60	59.67	10.50	49.17	33.93
N100S10	81.03	63.38	19.83	10.01	9.82	61.20
N100S30	81.67	81.67	37.30	10.24	27.06	75.34
N100S50	152.55	112.87	59.71	10.45	49.26	92.84
N150S10	74.56	63.32	19.86	10.33	9.52	54.70
N150S30	114.47	90.61	39.92	10.98	28.94	74.55
N150S50	98.18	75.93	60.18	10.43	49.75	38.00

5.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์แรงเฉือน

จากตารางที่ 2 วิเคราะห์ Extended Mohr-Coulomb Equation ด้วยวิธี least square method ได้ผลดังนี้

- Cohesion (c') = 31.76 kPa
- Friction Angle (ϕ') = 26.56°
- Matrix Suction Parameter (ϕ_b) = 31.15°
- R^2 ของโมเดลที่ได้จากการคำนวณคือ 0.920

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Strength, Net Normal Stress และ Matrix Suction แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของค่า Shear Strength, Net Normal Stress และ Matrix Suction

6. วิจัยการผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ Matrix Suction ต่อค่าความแข็งแรงของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัว ข้อสังเกตที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

6.1 อิทธิพลของ Matrix Suction ต่อ Shear Strength

จากผลการทดลองพบว่า Shear Strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Matrix Suction ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากแรงดูดเมทริกซ์ที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มของ Shear Strength อาจไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วง Matrix Suction ที่ศึกษา ซึ่งอาจเป็นผลจากอิทธิพลของโครงสร้างดินและปริมาณน้ำในรูพรุน นอกจากนี้ ในช่วง Matrix Suction สูง อาจเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินที่ทำให้การเพิ่มขึ้นของ Shear Strength มีแนวโน้มลดลง

6.2 ข้อควรระวังในการทดสอบ ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น และข้อจำกัดของการทดสอบ

- ตรวจสอบระบบควบคุมแรงดันให้มีความแม่นยำก่อนเริ่มทดสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของแรงดันอากาศและแรงดันน้ำ
- ตรวจสอบฟองอากาศภายในสายยาง เพื่อป้องกันแรงดันกระแทกของน้ำ ซึ่งอาจส่งผลให้แผ่นเซรามิกหลุดออกจากบล็อก
- ตรวจสอบเครื่องอัดอากาศที่จ่ายลมอย่างสม่ำเสมอทุกครั้ง
- ค่าที่ได้จากการทดสอบต้องได้รับการตรวจสอบความเสถียรของแรงดันก่อนทำการเขียนตัวอย่าง
- ระวังอย่าให้เกิดการไหลของน้ำออกจากตัวอย่าง ซึ่งอาจทำให้ค่า Suction ไม่คงที่และส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของดินที่วัดได้
- ในระหว่างการเขียนตัวอย่าง อาจมีการสูญเสียแรงดันน้ำจากแผ่นพรุน ซึ่งส่งผลต่อค่า Matrix Suction ที่ควบคุมไว้
- อัตราการเขียนที่เลือกใช้มีผลต่อค่าความแข็งแรงของดิน หากเขียนเร็วเกินไป อาจไม่ได้ค่าที่แท้จริงของพฤติกรรมดิน

- ในการอัดดิน ควรปรับผิวดินให้เรียบเสมอกับ Cutting Ring ทั้งสองด้านก่อนนำไปทดสอบ เพื่อป้องกันการแตกร้าวของแผ่นพรุน
- แรงดันอากาศและแรงดันน้ำที่มากเกินไป อาจทำให้แผ่นเซรามิกหลุดออกจากตำแหน่งได้

7. ผลกระทบของ Suction ต่อ Stability

7.1 หลักการวิเคราะห์ Stability

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของถนนที่ก่อสร้างบนชั้นดินลูกรังบดอัด ค่าแรงเฉือนของดินถูกกำหนดตามสมการ Mohr-Coulomb Equation ซึ่งสำหรับดินไม่อิ่มตัว จำเป็นต้องรวมผลของ Suction เข้าไปด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโปรแกรม KUSlope ไม่สามารถใช้ Extended Mohr-Coulomb Equation ได้โดยตรง จึงต้องพิจารณาการคำนวณแรงเฉือนเป็นส่วน ส่วนตามแนวทางของ Fredlund และ Rahardjo [5] คือ

$$\tau = c' + \Delta c + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (2)$$

เมื่อ c' = Cohesion ของดินอิ่มตัว (จากการทดสอบ)

Δc = Cohesion เพิ่มเติมที่เกิดจาก Suction ($u_a - u_w$)

$(\sigma - u_w) \tan \phi'$ = แรงเฉือนจาก Effective Normal Stress

ค่า Δc คำนวณจาก ϕ_b ดังนี้

$$\Delta c = (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (3)$$

7.2 สมมติฐานของโมเดลและเงื่อนไขการคำนวณ

ในการวิเคราะห์ Stability ได้กำหนดสมมติฐานดังนี้

- โครงสร้างถนน : เป็นโครงสร้างสมมุติอย่างง่าย กำหนดให้ถนนเป็นดินลูกรังเนื้อเดียว สูง 2.0 เมตร ความลาดชัน 1:1 และไม่มีน้ำหนักเพิ่มเติมจากการจราจรและสิ่งก่อสร้างอื่นๆ
- ชั้นถนนลูกรัง : ความหนาแน่นแห้ง 20.58 kN/m³ ความหนาแน่นรวม 22.41 kN/m³ Cohesion (c') = 31.76 kPa, Friction Angle (ϕ') = 26.56°, Matrix Suction Parameter (ϕ_b) = 31.15°
- ชั้นดินเดิม : เป็นดินแข็งมาก มีค่าแรงเฉือนสูงกว่าชั้นลูกรังมาก
- การวิเคราะห์ Stability : วิเคราะห์ด้วย KUSlope โดยใช้หาค่า Factor of Safety (FOS) ด้วยวิธีของ Spencer
- กรณีศึกษา : เปรียบเทียบค่า FOS ที่ค่า Suction ต่าง ๆ ได้แก่ 10, 30, 50 kPa

7.3 ผลการคำนวณ Stability และค่า Factor of Safety

7.3.1 Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) และแรงเฉือนรวม

ค่าที่ใช้ในการคำนวณได้จากการทดสอบ Direct Shear และนำไปใช้คำนวณ Factor of Safety (FOS) แสดงใน ตารางที่ 4

ตารางที่ 4: ค่าที่ใช้ในการคำนวณ Factor of Safety (FOS)

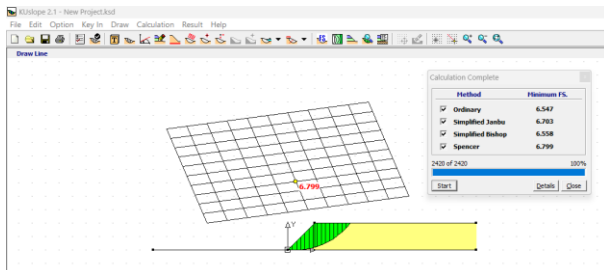
Matrix Suction (kPa)	Cohesion (C') (kPa)	Cohesion เพิ่มเติมที่เกิดจาก Suction (ΔC) (kPa)	Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) (kPa)	ϕ'
10	31.76	6.04	37.80	26.56°
30	31.76	18.13	49.89	26.56°
50	31.76	30.22	61.98	26.56°

7.3.2 ค่า Factor of Safety (FOS) จาก KUSlope

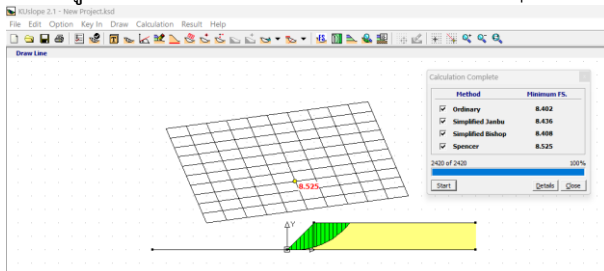
ผลการวิเคราะห์ Factor of Safety (FOS) ที่ค่า Suction ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 10-12

ตารางที่ 5: Factor of Safety (FOS) ที่ค่า suction ต่าง ๆ

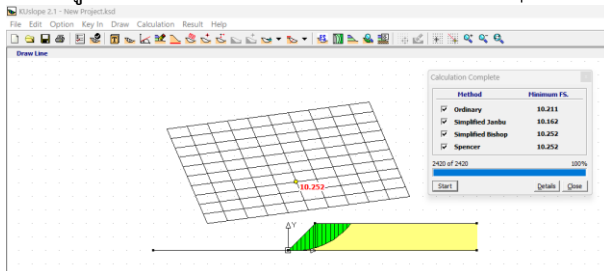
Suction (kPa)	Factor of Safety (FOS)
10	6.799
30	8.525
50	10.252



รูปที่ 10 ค่า FOS กรณี Suction 10 kPa จาก KUSlope



รูปที่ 11 ค่า FOS กรณี Suction 30 kPa จาก KUSlope



รูปที่ 12 ค่า FOS กรณี Suction 50 kPa จาก KUSlope

7.4 การวิเคราะห์ผล

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าค่า Factor of Safety (FOS) เพิ่มขึ้นตามค่า Suction ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Unsaturated Soil Mechanics ที่ว่า Suction เพิ่ม Cohesion เสมือนของดิน ทำให้ดินมีความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงขึ้น และเสถียรภาพของถนนดีขึ้น ค่า Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) มีผลโดยตรงต่อ Stability แม้ว่า Effective Normal Stress ($\sigma - u_w$) จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่า ΔC ที่ได้จาก suction สามารถเพิ่มกำลังของดินอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อสรุปที่ได้

- ค่า Factor of Safety (FOS) ของถนนเพิ่มขึ้นจาก 6.8 เป็น 10.3 เมื่อค่า suction เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 kPa
- ค่า Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) มีบทบาทสำคัญต่อ Stability และควรพิจารณาร่วมกับ $(\sigma - u_w) \tan \phi'$
- ในกรณีที่โปรแกรม Stability Analysis ไม่รองรับ Extended Mohr-Coulomb Equation อาจใช้แนวทาง แปลงค่า

Suction เป็น Cohesion เสมือน ตามแนวทางของ Fredlund และ Rahardjo [5]

8. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของ Suction ต่อ Shear Strength ของดินลูกรังบดอัด และประเมินเสถียรภาพของถนนบนชั้นดินที่แข็งแรงมากโดยใช้โปรแกรม KUSlope โดยผลการศึกษารูปได้ดังนี้

- การทดสอบ Direct Shear แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นตามค่า Suction
- ค่า Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่า Suction เพิ่มขึ้น
- ค่า Angle of Internal Friction (ϕ') มีผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินผ่านค่าของ Effective Normal Stress
- ค่า Factor of Safety (FOS) ของถนนเพิ่มขึ้นจาก 6.8 เป็น 10.3 เมื่อค่า suction เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 kPa
- การเพิ่มขึ้นของค่า FOS มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเค้นประสานเสมือน ($C + \Delta C$) โดยอาจมีการศึกษาในอนาคตว่าการเพิ่มของ shear strength และการเพิ่มของ FOS มีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น
- เนื่องจากโปรแกรม KUSlope ไม่สามารถใช้ Extended Mohr-Coulomb Equation ได้ จึงต้องวิเคราะห์ค่า Suction แยกเป็นกรณีต่าง ๆ และแปลงผลให้อยู่ในรูปของ Cohesion เสมือน

8.2 ข้อเสนอแนะ

- ข้อเสนอแนะในการทดสอบ
 - การใช้ดินลูกรังอาจมีปัญหาในการควบคุมความเหมือนกันในการทดสอบ โดยเฉพาะข้อจำกัดของ Direct shear ที่ บังคับระนาบแรงเฉือน ดังนั้นในอนาคตอาจจะต้องคำนึงถึงการควบคุมอนุภาคเม็ดดินที่เป็น Uniform grade และ เม็ดดินที่มีความกลม เพื่อศึกษาผลกระทบของ Matrix suction
- การพิจารณาผลของ Suction มีผลต่อ Stability ของถนน
 - ควรพิจารณาในเขตที่มีดินลูกรังหรือดินชั้นพื้นทางที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว
 - การใช้ค่า Cohesion เสมือน ($C + \Delta C$) สามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการวิเคราะห์ Stability ได้
 - Suction ช่วยให้คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นผ่านค่า แรงยึดเหนี่ยวเสมือน ซึ่งสามารถทำให้การออกแบบมีความประหยัดขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น หรือ ดินอิ่มตัวมากขึ้น ที่ไม่ตรงตามสมมุติฐานก็อาจจะส่งผลต่อ เสถียรภาพในภายหลัง ดังนั้นในการออกแบบควรพิจารณาสภาวะ worst case การใช้กำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นโดยปราศจากความเข้าใจและไม่มีผลตรวจวัด มีความเสี่ยงและไม่แนะนำให้ใช้ [1]
- ควรพัฒนาโปรแกรม Stability Analysis ที่สามารถรองรับ Unsaturated Soil Model

- การที่โปรแกรม Stability ส่วนใหญ่ยังใช้สมการ Mohr-Coulomb แบบดั้งเดิม ทำให้ไม่สามารถพิจารณาผลของ Suction ได้โดยตรง
 - การใช้ Fredlund & Rahardjo's Shear Strength Equation หรือ Extended Mohr-Coulomb Equation อาจช่วยให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องมากขึ้น
 - การควบคุมสถานะ Suction ควรนำมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างถนนดินลูกรัง
 - ในพื้นที่ที่มีค่า Suction สูง (ช่วงฤดูแล้ง) ถนนอาจมีความแข็งแรงมากกว่าช่วงฤดูฝน เนื่องจากค่า Cohesion เสมือนที่เพิ่มขึ้น
 - หากสามารถรักษาระดับ Suction ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อาจช่วยลดปัญหาการทรุดตัวของถนนได้
 - ควรมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ Suction ในสนามเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ Stability
 - ควรติดตั้ง Tensiometers หรืออุปกรณ์วัด Suction ในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเค้นในสภาพจริง
 - อาจใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวแปรเพิ่มเติมในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อให้สามารถรับมือกับความเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นในดินได้
- [2] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. (1978). Shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp. 313–321.
- [3] Jotisankasa, A., Tappnrich, J., Booncharoenpanich, P., Hunsachainan, N., & Soralump, S. (2010). Unsaturated Soil Testing for Slope Studies. *International Conference on Slope 2010: Geotechnique and Geosynthetics for Slopes*, Chiangmai, Thailand.
- [4] Hilf, J. W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. *Technical Report No. 42*, US Bureau of Reclamation.
- [5] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons.
- [6] Gan, J.K.M., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), pp. 500–510. <https://doi.org/10.1139/t88-055>.
- [7] รัตมณี นันทสาร (2554). การประเมินกำลังรับแรงเค้นของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยวิธีแรงอัดสามแกน. *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 3, หน้า 335–345.
- [8] He, P., Sun, L., & Wang, Z. (2017). Direct shear test of unsaturated soil. *Earth Sciences Research Journal*, 21(4), pp. 183–188. <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n4.66103>
- [9] สยาม อิมศิริ (2559). ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อกำลังรับแรงเค้นของดินในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ. *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยบูรพา, กันยายน 2559*.
- [10] วรากร ไม้เรียง และ นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ (2552). ความแข็งแรงของดินไม่อิ่มตัวเพื่อการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเขา. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9*, เพชรบุรี, 19-21 พฤษภาคม 2547.
- [11] VJ Tech Ltd. (2015). *Unsaturated Shear System Guide, Version 1.0*. VJ Tech Ltd., Berkshire, England, pp.4.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณความร่วมมือในการทดลองและเก็บข้อมูลจากนายพัชรพล ปานรัตนมงคล นายปัญญาพนต์ วงศ์ทหาร และ นายนพพันธ์ ถูกษ์สำราญ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภินิติ โชติสังกาศ (2555). *กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, 255 หน้า. (กรณีหนังสือ)