

การใช้เทคนิคการอัดอากาศเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการไหลน้ำใต้ดิน

Air injection into the soil to temporarily alter the groundwater flow direction

เลิศยศ ควรมงคลเลิศ¹ ภาณุสิทธิ์ ดวงศรี¹ และ ธนวัฒน์ ตั้งจารุศรีธรราร¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Lertyot156@gmail.com

บทคัดย่อ

งานก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงที่เกี่ยวข้องกับงานโครงสร้างใต้ดิน หนึ่งในกระบวนการสำคัญที่ต้องพิจารณาคือการจัดการระดับน้ำใต้ดิน หรือการแยกน้ำออกจากพื้นที่ทำงาน (Dewatering) เพื่อให้สามารถก่อสร้างได้ ปัจจุบันวิธีการทั่วไปในการแยกน้ำใต้ดินออกจากพื้นที่ทำงาน ได้แก่ การสูบน้ำออกจากพื้นที่ทำงานโดยตรง หรือสูบน้ำบริเวณรอบข้างเพื่อลดระดับน้ำใต้ดินโดยรอบ อย่างไรก็ตามการจัดการน้ำที่สูบน้ำออกนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ทำงานหากไม่มีพื้นที่เพียงพอต่อการทำบ่อพัก น้ำที่สูบน้ำออกอาจถูกปล่อยออกสู่สาธารณะซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่ใกล้เคียงในการศึกษานี้มีเป้าหมายในการพัฒนาวิธีการใหม่สำหรับแยกน้ำออกจากพื้นที่ทำงานใต้ดิน โดยใช้เทคนิคการอัดอากาศลงไปในดิน (Air injection) อากาศที่ถูกอัดเข้าไปในดินมีแรงดันไปเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินชั่วคราว ไม่ให้น้ำใต้ดินไหลเข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง และลดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการน้ำที่สูบน้ำออกสำหรับการทดลองนี้ ได้จำลองการทดลองสถานการณ์ในห้องปฏิบัติการโดยให้วัสดุเศษกระจกแทนเพอร์ แทนดินทราย เนื่องจากความโปร่งใสของวัสดุทำให้สามารถสังเกตทิศทางการไหลของน้ำได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยผลการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของ Air injection ขนาด 6 บาร์ที่เติมลงไปในวัสดุพรุนที่ระดับมากถึงระดับ 8 เซนติเมตร จากหัวปล่อย Air injection และผลการศึกษาคาดหวังว่าจะนำไปสู่การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวในงานก่อสร้างใต้ดิน หรือซ่อมบำรุงในงานใต้ดินในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการน้ำและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การลดระดับน้ำใต้ดิน, การอัดอากาศในดิน, เศษกระจกแทนเพอร์, งานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน

Abstract

In underground construction or maintenance projects in high-groundwater areas, groundwater management or dewatering is a critical process to enable construction activities. Common methods include directly pumping water out of the work area or pumping from surrounding areas to lower the groundwater level. However, managing the pumped water

depends on the availability of space, and in cases where there is insufficient room for water retention ponds surrounding the construction area, the discharged water may be released into public areas, potentially causing social or environmental impacts. This study aims to develop a novel dewatering method using air injection techniques, where pressurized air is injected into the soil to temporarily alter the groundwater flow direction, preventing groundwater from entering the construction area and reducing issues related to managing extracted water. Laboratory experiments simulated the proposed method using tempered glass fragments as a substitute for sandy soil (cohesionless soil), with the material's transparency allowing for clearer observation of groundwater flow. This test result demonstrates the behavior of 6-bar Air injection added to porous material at a level of up to 8 centimeters from outlet of air injection. The findings are expected to support the development and application of this technique in underground construction and maintenance projects, improving groundwater management efficiency and minimizing environmental impacts.

Keywords: (3-5 keywords must be given) abstract, format, methods

1. คำนำ

Construction dewatering คือกระบวนการจัดการน้ำใต้ดินที่ไหลเข้าสู่พื้นที่ทำงานก่อสร้าง เพื่อป้องกันน้ำใต้ดินไม่ให้เข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง ทั้งนี้เพื่อให้พื้นที่ทำงานแห้งและปลอดภัย กระบวนการดังกล่าวถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของโครงการที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างใต้ดินตามรูปที่ 1.1 เป็นงานทำฐานรากของโครงการก่อสร้างอาคารเอสเซน จังหวัดตรัง ระบบ dewatering เป็นขั้นตอนที่จำเป็นต่องานก่อสร้างเพื่อป้องกันปัญหาน้ำท่วมพื้นที่ขุด และการออกแบบที่เหมาะสมและตรวจสอบอย่างใกล้ชิดผ่านเทคนิคการสูบน้ำแบบแอค

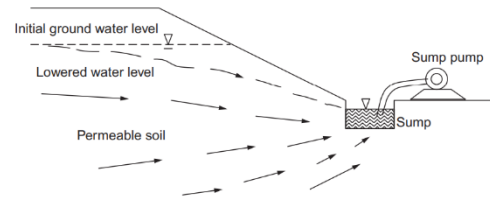
ที่ฟ (active pumping techniques) ตามรูปที่ 1.2 งานสูบน้ำออกโดยตรง และรูปที่ 1.3 เทคนิค wellpoint คือการลดระดับน้ำใต้ดินก่อนเข้าพื้นที่ขุด มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนให้การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย



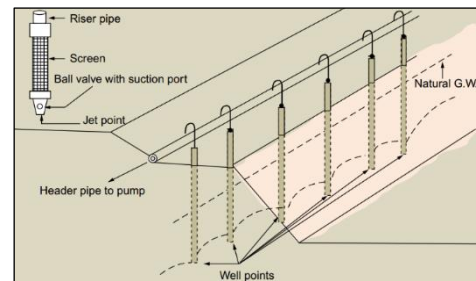
รูปที่ 1.1 น้ำเข้าสู่พื้นที่งานก่อสร้างฐานรากโครงการเอสเซน จังหวัดตรัง 2024

วิธีที่ใช้ pump ในการทำงานเช่น Sump method คือการปล่อยให้น้ำใต้ดินเข้าสู่พื้นที่ขุดแล้วสูบน้ำออก ในความลึกไม่เกิน 3 เมตร ตามรูปที่ 1.2 , Well point เป็นวิธีการสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดินก่อนเข้าถึงพื้นที่ขุดข้อจำกัดคือคือทำได้ในระดับความลึกไม่เกิน 6 เมตรตามรูปที่ 1.3 ,Ejector เป็นเทคนิคเช่นเดียวกับ well point คือการลดระดับน้ำก่อนเข้าพื้นที่ขุดเป็นรูปแบบสูบน้ำออกอีกรูปแบบหนึ่งโดย โดยมีความสามารถในการสูบน้ำต่ำ ชนิดดินที่มี low permeability แต่สามารถทำได้ในความลึกที่ไม่จำกัด และ Deep well point เหมือนกับวิธี well point แต่สามารถทำได้ในความลึกมากกว่า 16 เมตร แต่มีค่าใช้จ่ายในการใช้วิธีนี้สูง โดยมีเกณฑ์การเลือกใช้แตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน และระดับความลึก [1] การขุดเจาะอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินสามารถส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความปลอดภัยของบ่อขุด การจัดการน้ำใต้ดินจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกันความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้าง [2] วิธีการจัดการน้ำเหล่านั้นนิยม ใช้ระบบบ่อสูบน้ำขนาดใหญ่ร่วมกับกำแพงกันน้ำ มักจะถูกนำมาใช้เพื่อลดระดับน้ำใต้ดินภายในบ่อขุดในระหว่างการขุดเจาะ แต่อย่างไรก็ตามการจัดการน้ำด้วยวิธีน้ำเหล่านี้จำเป็นต้องพื้นที่เพื่อรองรับน้ำที่สูบน้ำออก และการสูบน้ำออกยังกระทบต่อ ทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลง (drawdown) ซึ่งก่อให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อโครงสร้างรอบๆพื้นที่ที่สูบน้ำออก ความไม่สมดุลนี้สร้างแรงซึม (seepage forces) ที่ทำให้โครงสร้างเคลื่อนตัวเข้าด้านในและส่งผลให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มเติม [3, 4] นอกจากนี้การจัดการและการระบายน้ำที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการสูบน้ำใต้ดินในงานก่อสร้างสามารถนำไปสู่ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้หลายประการ ตัวอย่างเช่น การจัดการน้ำที่ถูกสูบน้ำมาอย่างไม่เหมาะสม อาจกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียง อีกทั้งการ

ระบายน้ำที่ไม่เหมาะสมยังอาจนำไปสู่การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม [5]



รูปที่ 1.2 การ dewatering โดยวิธี sump method [6]



รูปที่ 1.3 การ dewatering โดยวิธี well point [6]

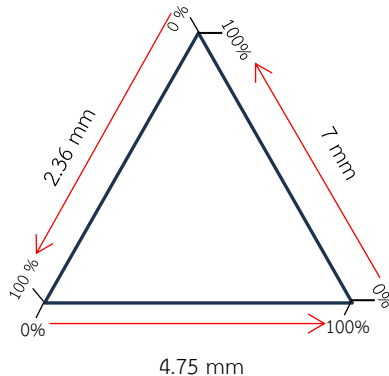
เทคนิคการเติมอากาศ(Air injection) ตามที่ใช้ในงาน เป็นเทคนิค

Liquefaction countermeasure และ desaturate เป็นทางเลือกที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ [7] วิธีนี้เป็นการเติมอากาศที่มีความดันสูงลงในพื้นที่อิ่มตัวน้ำ ซึ่งทำให้น้ำมันกลายเป็นดินที่ไม่มีน้ำอิ่มตัว และจากแบบจำลองของ [8] พบว่าการใช้ Air injection สามารถทำให้เกิดการพื้นที่แห้งหลังจากเติมอากาศเข้าไปได้ และงานศึกษาครั้งนี้จึงนำเทคนิค Air injection มาศึกษาเพิ่มในการพัฒนาสำหรับใช้ในงาน Dewatering เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกให้การก่อสร้าง หรือซ่อมบำรุงงานก่อสร้างใต้ดินได้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับพื้นที่ต่อไป

2. อุปกรณ์ และวิธีการศึกษา

งานศึกษาชิ้นนี้ได้เนื่องจากใช้วัสดุทดแทนทรายด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ คละขนาดจึกมีการนำวัสดุมาแยกขนาด และได้ขนาดมาสามขนาด 7 mm, 4.75 mm และ 2.36mm โดยงานชิ้นนี้ได้ผสมอัตราส่วนของผสมวัสดุทดแทนทรายทั้งสามขนาด ได้จำนวน 66 ตัวอย่างตามรูปที่ 2.1 เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่าน Hydraulic conductivity และคัดเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมในการทดลอง Air injection และค่า Hydraulic conductivityนี้เป็นคุณสมบัติที่เชื่อมโยงกับคุณสมบัติของทรายได้

2.1 การคละขนาดวัสดุ โดยการใช้ค้อนโดยมีตะแกรง ขนาด 7 mm ตะแกรงเบอร์ 4 ขนาด 4.75 mm. และตะแกรงเบอร์ 8 ขนาด 2.36 mm และมีการผสมตามรูปที่ 2.1 รูปแสดงกราฟ Ternary



รูปที่ 1 รูปแสดงกราฟ ternary อัตราการส่วนการผสมของวัสดุ

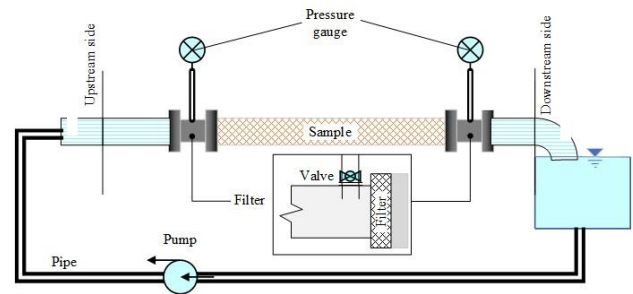
2.2 Hydraulic conductivity

ค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน (Hydraulic conductivity) เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการแสดงความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดิน ซึ่งสามารถประเมินได้ด้วยวิธีการตรวจสอบหลายรูปแบบ [9] เช่น การทดสอบการซึมผ่านน้ำในห้องปฏิบัติการ ค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพหลายประการ รวมถึงความพรุน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค รูปร่างของอนุภาค การจัดเรียงตัวของอนุภาค และปัจจัยอื่นๆ โดยทั่วไปในสื่อที่มีรูพรุนที่ยังไม่ถูกปรับสภาพ ค่าการซึมผ่านของน้ำจะแตกต่างกันไปตามขนาดอนุภาค โดยวัสดุที่เป็นดินเหนียวแสดงค่าการนำไฮดรอลิกต่ำ ในขณะที่ทรายและกรวดแสดงค่าที่สูงขึ้น [10]

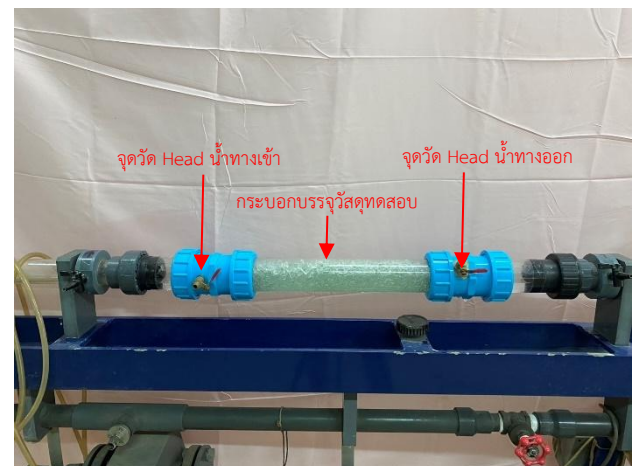
เครื่องมือทดสอบ Hydraulic conductivity โดยการทดสอบนั้นมี schematic diagram ตามรูปที่ 2.2 ใช้ อุปกรณ์ทดสอบ Hydraulic conductivity ตามรูป 2.3 โดยเครื่องมือทดสอบชิ้นนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ วัด head น้ำไว้ที่ ก่อนแล้วหลังผ่าน porous media ขนาดกระบอกที่บรรจุวัสดุมีขนาดความยาว 40 cm. และพื้นที่หน้าตัดของกระบอกอยู่ที่ 0.00283 sq.m. และนำมาคำนวณหาค่า Hydraulic conductivity จากสมการของ Darcy สมการที่ (1)

$$q = kiA \quad (1)$$

โดย q คืออัตราการไหล (cu.m/s), k คือค่า Hydraulic conductivity, i คือ ค่า hydraulic gradient และ A คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกทดลอง



รูปที่ 2.2 schematic diagram การทดสอบ hydraulic conductivity



รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบ Hydraulic conductivity

2.2 Air injection

เทคนิคการฉีดอากาศ [7] เป็นวิธีการที่เปลี่ยนดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำให้กลายเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวน้ำ โดยการฉีดอากาศที่มีความดันสูงเข้าสู่ชั้นดิน ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ (air coefficient of permeability) ถูกกำหนดโดยระดับความอิ่มตัวของน้ำในดินอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อระดับความอิ่มตัวของน้ำในดินลดลงอย่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่ามากที่สุด และในทางกลับกัน เมื่อระดับความอิ่มตัวของน้ำเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศจะลดลง [11]

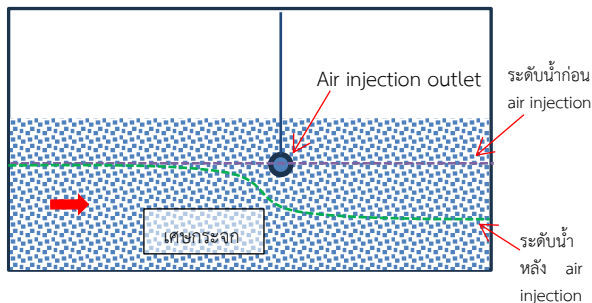
ในกระบวนการฉีดอากาศเพื่อลดระดับความอิ่มตัวของน้ำในดิน [2] พบว่าการเคลื่อนที่ของอากาศสามารถขับไล่ได้ดินออกและลดการซึมผ่านน้ำมันผิวลาดเขาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การฉีดอากาศยังช่วยลดค่าการซึมผ่านของดินในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดการเลื่อนตัวของดิน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การฉีดอากาศ (Air Injection) สามารถสกัดกั้นการไหลของน้ำใต้ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการฉีดอากาศในงาน ลดระดับน้ำใต้ดิน (Dewatering) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการไหลของน้ำใต้ดินในงานวิศวกรรมต่อไป

เครื่องมือทดสอบ Air injection

ในการทดสอบ Air Injection ได้เลือกใช้ Seepage Tank เป็นอุปกรณ์หลักร่วมกับปั๊มลมที่สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 8 บาร์ เพื่อดำเนินการทดลอง การออกแบบและจัดวางอุปกรณ์ทดสอบเป็นไปตามแผนภาพเชิงโครงสร้าง (Schematic Diagram) ในรูปที่ 2.4 และรูปของ Seepage Tank ในรูปที่ 2.5

การทดลองมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอากาศที่ใช้กับระยะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ โดยเลือกใช้ Air Pressure ที่ 2 – 6 บาร์ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ นอกจากนี้ ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพิ่มเติม (รูปที่ 2.6) บริเวณ Outlet ของปั๊มลม เพื่อให้สามารถปรับระดับแรงดันอากาศได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2.4 schematic diagram การทดสอบ Air injection



รูปที่ 2.5 เครื่อง seepage tank และปั๊มลม



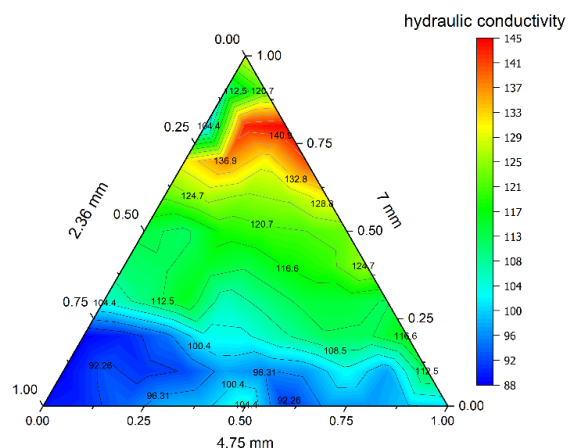
รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมความดัน Air pressure

3.ผลการศึกษา

3.1คุณสมบัติ Hydraulic conductivity ของวัสดุ

จากการทดสอบค่าการซึมผ่านของไหล (Hydraulic Conductivity) ของวัสดุที่มีอัตราส่วนการผสมทั้งหมด 66 ตัวอย่าง ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟ Ternary Contour ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าการนำผ่านของไหลของเศษกระจกเทเปอร์ที่มีการกระจายขนาดอนุภาคสามระดับอยู่ในช่วง 88-140 เมตรต่อวัน (m/day) ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติของดินประเภทต่าง ๆ พบว่าค่าดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับคุณสมบัติของ กรวดหยาบ (Gravel Coarse) ตามที่แสดงในตารางที่ 3.1

ดังนั้น ในการทดลอง Air Injection จึงเลือกใช้ค่าการนำผ่านของไหลที่ 140 เมตรต่อวัน (m/day) เป็นค่าตัวอย่างสำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 กราฟ ternary contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระจายขนาดของเศษกระจกเทเปอร์และ ค่า hydraulic conductivity

ตารางที่ 3.1 Representative Values of Hydraulic Conductivity [12]

Material	Hydraulic conductivity (m/day)
Gravel, coarse	150
Gravel, medium	270
Gravel, fine	450
Sand, coarse	45
Sand, medium	12
Sand, fine	2.5
Silt	0.08
Clay	0.0002

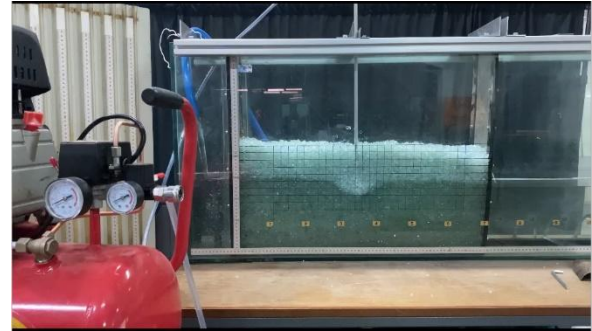
3.2 การทดสอบ Air injection

จากการทดลองการฉีดอากาศ (Air Injection) ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอากาศจำนวน 6 ระดับ ตั้งแต่ 0 ถึง 6 บาร์ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 และ 3.8 ตามลำดับ พบว่าค่าความดันอากาศมีผลโดยตรงต่อการลดระดับน้ำและการเกิดพื้นที่แห้งในแนวราบ โดยผลการทดลองสรุปไว้ในตารางที่ 3.2

จากข้อมูลในตาราง พบว่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 6 บาร์ ส่งผลให้ระดับน้ำลดลงจากตำแหน่งช่องทางออกของอากาศ (Air Outlet) ได้ประมาณ 16 เซนติเมตร และทำให้เกิดพื้นที่แห้งในแนวราบด้านละประมาณ 8 เซนติเมตร ในขณะที่แรงดันอากาศต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 1 บาร์ สามารถลดระดับน้ำได้เพียงประมาณ 4 เซนติเมตร แต่ยังคงสามารถทำให้เกิดพื้นที่แห้งในแนวราบด้านละประมาณ 8-10 เซนติเมตร



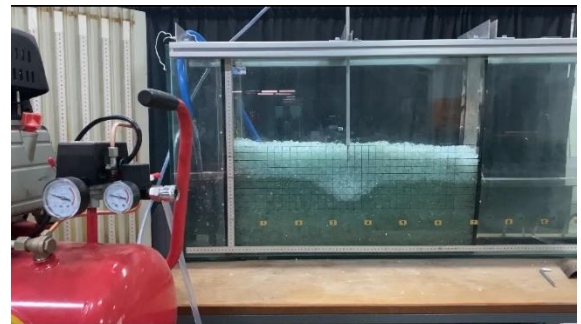
รูปที่ 3.2 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 0 bar(ก่อนปล่อย Air injection)



รูปที่ 3.3 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 1 bar



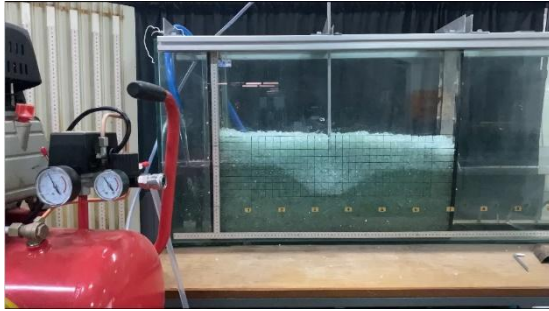
รูปที่ 3.4 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 2 bar



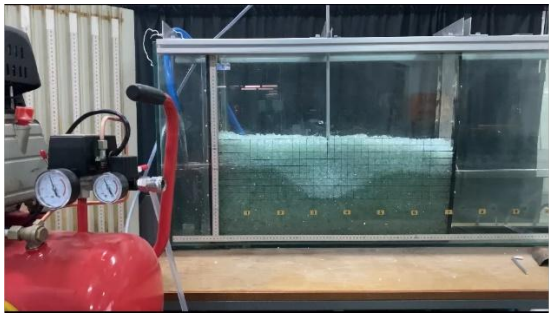
รูปที่ 3.5 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 3 bar



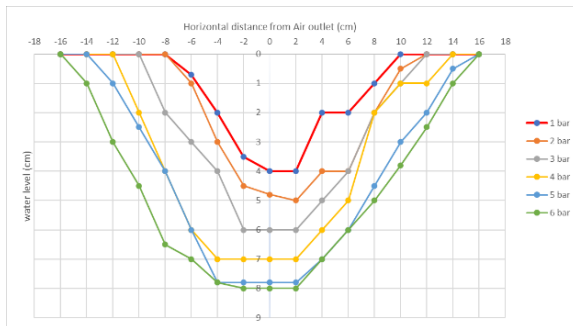
รูปที่ 3.6 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 4 bar



รูปที่ 3.7 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 5 bar



รูปที่ 3.8 การทดสอบก่อนใช้ Air injection pressure 6 bar



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Air injection pressure และระยะที่เกิดพื้นที่แห้ง

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบ Air injection

air pressure (Bar)	ระยะน้ำลดลงหลังจากผ่านหัว Air injection																
	distance from air injection (cm)																
	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16
1	0	0	0	0	0	0.7	2	3.5	4	4	2	2	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	3	4.5	4.8	5	4	4	2	0.5	0	0	0
3	0	0	0	0	2	3	4	6	6	6	5	4	2	1	0	0	0
4	0	0	0	2	4	6	7	7	7	7	6	5	2	1	1	0	0
5	0	0	1	2.5	4	6	7.8	7.8	7.8	7.8	7	6	4.5	3	2	0.5	0
6	0	1	3	4.5	6.5	7	7.8	8	8	8	7	6	5	3.8	2.5	1	0

4. สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองทางกายภาพของการฉีดอากาศ (Air Injection) เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน (Porous Media) แสดงให้เห็นว่า อากาศสามารถทำให้วัสดุที่น้ำไหลผ่านเกิดภาวะลดความอิ่มตัว (Desaturation) โดยอากาศทำหน้าที่เสมือนเป็นกำแพงเพื่อกดระดับน้ำให้ต่ำลง การศึกษานี้พบว่าความดันเริ่มต้นที่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำได้อยู่ที่ 1 บาร์ ซึ่งทำให้ระดับน้ำลดลงจากเดิม 4 เซนติเมตร ณ ตำแหน่งปล่อยอากาศ นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความดันเป็น 6 บาร์ ระดับน้ำสามารถลดลงได้ 8 เซนติเมตร และน้ำเริ่มกลับคืนสู่ระดับเดิมที่ระยะ 16 เซนติเมตรในแนวระนาบ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุนคือ ความดันของอากาศ และการฉีดอากาศสามารถสร้างกำแพงอากาศเพื่อควบคุมและเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาใช้ในการกำจัดน้ำใต้ดิน (Dewatering) ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในเรื่องการระบายน้ำหรือการควบคุมทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในงานวิศวกรรมต่อไป ทั้งนี้ คาดว่าผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคการฉีดอากาศในบริบทอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนวัสดุตัวกลางที่น้ำไหลผ่านเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของ Air injection เมื่อค่า Hydraulic conductivity เปลี่ยนไป เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำการศึกษารวมทั้งขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่ให้การช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

1. Roberts, T. and M. Preene, *The design of groundwater control systems using the observational method*. Géotechnique, 1994. 44(4): p. 727-734.
2. Xie, Z.-F., et al., *Environmentally sustainable groundwater control during dewatering with barriers: A case study in Shanghai*. Underground Space, 2021. 6(1): p. 12-23.
3. Huang, M., et al., *Calculation of foundation pit deformation caused by deep excavation considering influence of loading and unloading*. Journal of Central South University, 2017. 24(9): p. 2164-2171.
4. Li, Y., et al., *Surface Settlement Damage Model of Pile Anchor Supporting Structure in Deep Excavation*. Advances in Civil Engineering, 2020. 2020(1): p. 1907526.
5. Bevan, M.A., *Geoenvironmental impacts of construction dewatering*. 2005, University of Southampton.
6. Patel, A., *Geotechnical investigations and improvement of ground conditions*. 2019: Woodhead Publishing.
7. Okamura, M. and T. Teraoka, *Shaking table tests to investigate soil desaturation as a liquefaction countermeasure*, in *Seismic Performance and simulation of pile foundations in liquefied and laterally spreading ground*. 2006. p. 282-293.
8. Catney, S. and R. Lynch, *Experimental investigations of air sparging to control contaminated groundwater*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2001. 149(4): p. 253-258.
9. Masaoka, N. and K.i. Kosugi, *Improved evaporation method for the measurement of the hydraulic conductivity of unsaturated soil in the wet range*. Journal of hydrology, 2018. 563: p. 242-250.
10. Todd, D.K. and L.W. Mays, *Groundwater hydrology*. 2004: John Wiley & Sons.
11. Fredlund, D.G., *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006. 132(3): p. 286-321.
12. Morris, D.A. and A.I. Johnson, *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60*. 1967, US Government Printing Office.