สมรรถนะการเจาะน้ำแข็งในชั้นหิมะอัดแน่นที่ขั้วโลกใต้

Ice Drilling Performance in the Firn Drill Layer at the South Pole

ชนะ สินทรัพย์วโรดม[1,*], วราภรณ์ นันทิยกุล[2],อัจฉรา เสรีเพียรเลิศ[3], ศิรามาศ โกมลจินดา[2], ธีรศักดิ์ ปัญญาภีรวัฒน์[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่
[2]ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
[3]สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
**Corresponding author; chana.sinsabvarodom@cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะการเจาะน้ำแข็งในชั้นหิมะอัดแน่น (Firn layer) ที่ขั้วโลกใต้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการอัปเกรดโครงการ IceCube สำหรับการติดตั้งสายตรวจจับนิวตริโนใต้ผิวน้ำแข็ง ผลการทดสอบในสภาพจริงระหว่างฤดูร้อนปี 2024–2025 ได้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างโหลดของหัวเจาะและความลึกของชั้นเฟิร์นมีผลต่อการเบี่ยงเบนของหัวเจาะ และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเจาะ การควบคุมแรงกดหัวเจาะ (Standing Load) และความเร็วเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (Vertical Speed) อย่างเหมาะสม ช่วยลดโอกาสการเอียงของหลุมและปัญหาหัวเจาะติดขัด นอกจากนี้ยังพบว่าในชั้นเฟิร์นที่มีความพรุนสูง หากแรงกดไม่สมดุลจะทำให้หัวเจาะเอียงมากขึ้นและยากต่อการดึงกลับ การศึกษานี้ได้เสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเจาะ ได้แก่ การปรับสมดุลแรงโหลดตามความลึก การวางแผนช่วงเวลาเจาะให้เหมาะสมกับฤดูกาล และการใช้เทคนิคการเจาะเชิงกลร่วมกับการเจาะด้วยพลังงานความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเชิงกลเชิงลึกในการเจาะชั้นเฟิร์นภายใต้สภาวะขั้วโลก และมีประโยชน์โดยตรงต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการเจาะน้ำแข็งในอนาคต สำหรับงานวิจัยด้านฟิสิกส์นิวตริโน

คำสำคัญ: การเจาะน้ำแข็ง, ชั้นหิมะอัดแน่น, นิวตริโน, และ อนุภาคผี

Abstract

This study aims to evaluate the performance of ice drilling in the firn layer at the South Pole, which is a critical component of the IceCube Upgrade Project for deploying neutrino detectors beneath the Antarctic ice sheet. Field tests conducted during the summer of 2024–2025 revealed that the balance between drill head load and drilling depth significantly affects borehole deviation and overall drilling efficiency. Proper control of standing load and vertical drill speed was found to reduce borehole misalignment and mitigate drill head jamming—particularly in the highly porous firn layer. The results indicated that asymmetrical loading conditions could lead to drill tilt and increased difficulty in retracting the drill. To enhance performance, this study proposes load-depth balancing strategies, seasonally optimized drilling windows, and the integration of mechanical and thermal drilling techniques. The insights gained provide practical guidance for improving ice drilling technologies under extreme polar conditions, supporting advancements in neutrino physics.

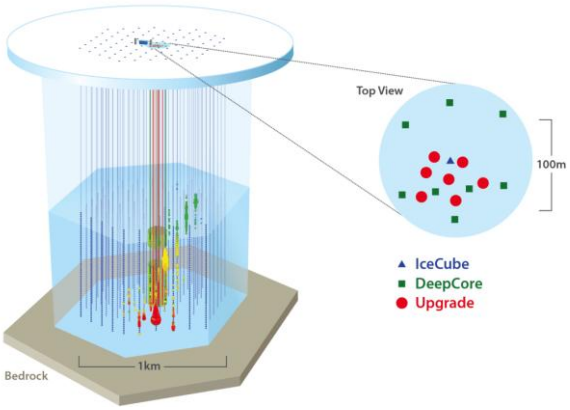
Keywords: Ice drilling, Firn layer, Neutrino, and Ghost particles

1. คำนำ

การศึกษาและทำงานวิจัยในบริเวณพื้นที่ขั้วโลกใต้ถือเป็นหนึ่งในความท้าทายสำคัญทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่หนาวเย็นและความยากลำบากในการเข้าถึงพื้นที่ การวิจัยในแถบขั้วโลกนี้ไม่เพียงเกี่ยวข้องกับภูมิศาสตร์หรืออุตุนิยมวิทยาเท่านั้น หากยังมีความสำคัญโดยเฉพาะในด้านฟิสิกส์ของอนุภาคระดับพลังงานสูง หอสังเกตการณ์นิวตริโนไอซ์คิวบ์ (IceCube Neutrino Observatory) ซึ่งตั้งอยู่ใกล้เคียงกับสถานีวิจัย Amundsen–Scott South Pole Station ณ ขั้วโลกใต้ เป็นโครงการระดับนานาชาติที่มุ่งเน้นการตรวจจับนิวตริโนพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ [1] นิวตริโนซึ่งเป็นอนุภาคพื้นฐานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสสารอย่างจำกัด มีศักยภาพในการเผยข้อมูลจากเหตุการณ์รุนแรงในเอกภพ อาทิ ซูเปอร์โนวา หลุมดำ หรือแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา (gamma-ray bursts) [2]

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจจับ โครงการ IceCube Upgrade ได้รับการริเริ่มขึ้นโดยมีเป้าหมายในการติดตั้งสายตรวจจับ (strings) เพิ่มเติมจำนวน 7 สาย ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับแสง (Digital Optical Modules) รุ่นใหม่กว่า 700 ตัว พร้อมทั้งปรับปรุงระบบอิเล็กทรอนิกส์และซอฟต์แวร์เพื่อสนับสนุนการวัดสัญญาณที่มีความละเอียดสูงยิ่งขึ้น การอัปเกรดนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการศึกษานิวตริ

โนพลังงานต่ำ และตรวจสอบพฤติกรรมที่อยู่นอกเหนือแบบจำลองมาตรฐาน (beyond the Standard Model) ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น [3][4] ตำแหน่งของหลุมเจาะในโครงการ IceCube Upgrade ได้แสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 เครื่องมือในการตรวจวัดอนุภาคนิวตริโนในน้ำแข็งใส บริเวณแอนตาร์กติกาขนาดหนึ่งลูกบาศก์กิโลเมตร โดยใช้สายเซนเซอร์จำนวน 86 สาย ติดตั้งที่ความลึกระหว่าง 1,450 ถึง 2,450 เมตร ประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยที่มีความหนาแน่นของเซนเซอร์สูงที่เรียกว่า ดีปคอร์ (DeepCore) และอาร์เรย์ตรวจจับอนุภาคจากบรรยากาศบนพื้นผิวที่ชื่อ ไอซ์ท็อป (IceTop) และ IceCube Upgrade จะมีการติดตั้งสายเซนเซอร์ใหม่ 7 สายเพิ่มเติมภายในอาร์เรย์จากที่มีอยู่ในปัจจุบัน (แหล่งที่มา : https://icecube.wisc.edu/science/beyond/)

หนึ่งในขั้นตอนสำคัญของการติดตั้งเซนเซอร์เหล่านี้คือการเจาะแผ่นน้ำแข็งลงไปจนถึงระดับความลึกเป้าหมาย โดยเริ่มจากการเจาะผ่านชั้นเฟิร์น (Firn) ซึ่งเป็นชั้นเปลี่ยนผ่านจากหิมะตกใหม่ไปสู่น้ำแข็งธารน้ำแข็ง (Glacial ice) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แปรผันตามความลึก เช่น ความหนาแน่น ความพรุน และการนำความร้อน [5] ที่สถานีวิจัยขั้วโลกใต้ชั้นเฟิร์นมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 40 เมตร ซึ่งถือเป็นอุปสรรคสำคัญในการเจาะ เพราะมีลักษณะเป็นวัสดุกึ่งแข็งกึ่งพรุนซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ รวมถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [6]

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเจาะในชั้นเฟิร์น โดยทดสอบเทคนิคและพารามิเตอร์การเจาะต่าง ๆ เช่น อัตราการเจาะ (Penetration rate) หรือ ความเร็วของหัวเจาะในแนวดิ่ง (Vertical speed) การใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy consumption) และการควบคุมทิศทางของหลุมเจาะ ภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายคลึงกับภาคสนามจริงในโครงการ IceCube Upgrade การประเมินผลที่แม่นยำและครอบคลุมเหล่านี้จะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเจาะสำหรับการปฏิบัติงานในภูมิภาคขั้วโลก ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความสำเร็จของโครงการ IceCube และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการวิจัยด้านธารน้ำแข็งศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และระบบสำรวจวิศวกรรมในพื้นที่อุณหภูมิต่ำทั่วโลกได้อีกด้วย [7 - 8]

2. การเจาะน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้

2.1 ทฤษฎีการเจาะน้ำแข็ง (Theory of Ice Drilling)

การเจาะน้ำแข็งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนทางวิศวกรรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการส่งพลังงานเข้าสู่สื่อกลางน้ำแข็งเพื่อลบวัสดุออกจากบริเวณเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการนี้อาจทำได้โดยใช้พลังงานกลความร้อน หรือการผสมผสานของทั้งสองรูปแบบ การเลือกเทคนิคการเจาะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำแข็ง ความลึกเป้าหมาย ความต่อเนื่องของแกน (core integrity) และเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเจาะน้ำแข็งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- การเจาะเชิงกล (Mechanical Drilling)
- การเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling)
- การเจาะด้วยน้ำร้อนแรงดันสูง (Hot Water Drilling)

2.1.1 การเจาะเชิงกล (Mechanical Drilling)

การเจาะเชิงกลเป็นเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ใบมีด หัวกัด หรือสว่านที่หมุนด้วยกำลังกล โดยมีการออกแบบหัวเจาะให้เหมาะสมกับแรงต้านเชิงกลของน้ำแข็ง

- น้ำแข็งมีลักษณะเป็นวัสดุเปราะที่มีค่าความต้านทานแรงอัดสูง (~5–25 MPa) แต่มีความต้านทานแรงเฉือนต่ำ
- พฤติกรรมการแตกของน้ำแข็งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของการโหลด และโครงสร้างภายใน
- ในการเจาะชั้น Firn ซึ่งมีความพรุนสูงและความหนาแน่นแปรผันตามความลึก การควบคุมแรงป้อน (Feed force) และความเร็วรอบ (RPM) ต้องแม่นยำเพื่อป้องกันการแตกตัวของผนังหลุม

รูปที่ 2 การเจาะเชิงกล (Mechanical Drilling) ในโครงการ IceCube Upgrade

ในโครงการ IceCube Upgrade ได้มีการใช้การเจาะน้ำแข็งเชิงกลดังรูปที่ 2 เป็นการเจาะนำร่องก่อนทำการเจาะด้วยความร้อนเนื่องจาก

บริเวณส่วนบนของชั้นน้ำแข็งมีซากเศษวัสดุจากการก่อสร้างของเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์บางชนิดซึ่งถูกชั้นหิมะทับถมและการเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling) ไม่สามารถทะลุผ่านได้

2.1.2 การเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling)

เทคนิคนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงแปลงเป็นความร้อนโดยตรงที่หัวเจาะ เพื่อหลอมละลายน้ำแข็งให้กลายเป็นน้ำ จากนั้นระบายออกหรือปล่อยให้แข็งตัวใหม่ภายนอกแนวหลุม

- การออกแบบหัวเจาะต้องคำนึงถึงการควบคุมอัตราการหลอมละลาย (melting rate) และการสูญเสียความร้อน (thermal diffusion loss)
- พลังงานที่ต้องใช้โดยประมาณสามารถประเมินได้จากสมการพลังงานดังแสดงในสมการที่ 1

$$Q = \rho.V.\left(L_f + c.\Delta T\right) \quad (1)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำแข็ง (~917 kg/m³)

L_f คือ ความร้อนแฝงของการหลอม (~334 kJ/kg)

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง (~2.1 kJ/kg·K)

ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสถานะเริ่มต้นถึงจุดหลอม (~20–50°C)

โดยข้อจำกัดการเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling) คือ การควบคุมความแม่นยำของแกนน้ำแข็งอาจต่ำ และไม่สามารถใช้งานได้ดีกับเฟิร์นที่พรุนสูง หัวเจาะโครงการ IceCube Upgrade ได้แสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 การเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling) ในโครงการ IceCube Upgrade ในขณะทำการดึงหัวเจาะขึ้นจากหลุมหลังจากเสร็จสิ้นภารกิจ

2.1.3 การเจาะด้วยน้ำร้อน (Hot Water Drilling)

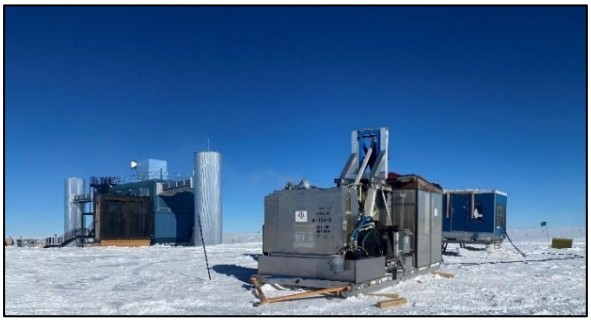
ใช้ในโครงการขนาดใหญ่ เช่น IceCube โดยฉีดน้ำร้อนแรงดันสูง (70–88°C) ลงไปหลอมละลายน้ำแข็ง สร้างหลุมแนวตั้งเส้นผ่านศูนย์กลาง ~60 ซม.

- ความได้เปรียบคือการเจาะได้รวดเร็วและสามารถเข้าถึงระดับลึกกว่า 2,000 เมตรในเวลาสั้น
- แต่จำเป็นต้องใช้เครื่องผลิตน้ำร้อนกำลังสูง ระบบท่อน้ำแรงดันและระบบควบคุมที่ซับซ้อน
- ไม่เหมาะสำหรับชั้นเฟิร์นซึ่งไม่สามารถเก็บน้ำร้อนและควบคุมทิศทางการไหลได้ดี

การเจาะด้วยน้ำร้อนในโครงการ IceCube Upgrade จะใช้เจาะระหว่างความลึก 40 เมตรถึงประมาณ 2,800 เมตร ซึ่งจะดำเนินการในระหว่างปี 2025-2026

3. ผลลัพธ์และการอภิปราย (Results and Discussion)

ในการเจาะน้ำแข็งในโครงการ IceCube Upgrade ระหว่างช่วง Summer 2024-2025 เป็นการดำเนินการเจาะชั้นหิมะ ที่ความลึกประมาณ 40 เมตร เพื่อเตรียมเจาะด้วยน้ำร้อน (Hot Water Drilling) ระว่างความลึก 40 เมตร ถึงประมาณ 2,800 เมตร ในช่วง Summer 2025-2026 การทำการเจาะน้ำแข็งจะทำได้เฉพาะในช่วงหน้าร้อนระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงต้นเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี เนื่องจากหน้าหนาวบริเวณขั้วโลกเหนือจะไม่มีแสงอาทิตย์และงดการขนส่งอุปกรณ์ต่างๆ จึงเป็นข้อจำกัดในการดำเนินการเจาะน้ำแข็ง เครื่องมือ และ ลักษณะหลุมเจาะของโครงการ IceCube Upgrade ในชั้น Firn Drill ได้แสดงในรูปที่ 4 และ 5

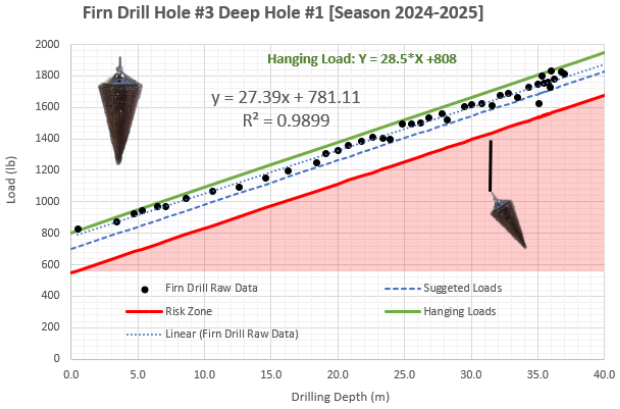


รูปที่ 4 เครื่องเจาะน้ำแข็ง Independent Firn Drill ในโครงการ IceCube Upgrade

ในระหว่างการเจาะน้ำแข็งจะต้องมีการสมดุลระหว่างโหลดและความลึก(depth) ในการเจาะน้ำแข็งดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อป้องกันหัวเจาะเอียงหากหัวเจาะอยู่ใน Risk Zone (โซนสีแดง) ซึ่งหากการสมดุลนี้ไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดการโค้งงอของหลุมเจาะได้ซึ่งจะเกิดปัญหาในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดนิวตริโน นอกจากนี้การควบคุมการกระจายแรงกด (Standing Load) ที่หัวเจาะกดไปยังชั้นเฟิร์น (Firn) ที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการเจาะ ทำให้ลดเวลาในการเจาะแต่ละหลุมประหยัดพลังงาน

รูปที่ 5 การเจาะด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Drilling) ในโครงการ IceCube Upgrade ในขณะทำการดึงหัวเจาะขึ้นจากหลุมหลังจากเสร็จสิ้นภารกิจ



รูปที่ 6 การประมาณค่าสมดุลระหว่างแรงกระทำหัวเจาะระหว่างโหลดและความลึกในการเจาะน้ำแข็ง

การปรับความเร็วของหัวเจาะในแนวดิ่ง (Vertical Speed) ให้เหมาะสมกับสภาพของน้ำแข็งในแต่ละชั้นถือเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเจาะน้ำแข็ง โดยเฉพาะในชั้นเฟิร์น (Firn layer) หากความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะในแนวดิ่งสูงเกินไป อาจส่งผลให้พลังงานความร้อนจากหัวเจาะถ่ายเทเข้าสู่น้ำแข็งได้ไม่เพียงพอ ซึ่งอาจก่อให้เกิดภาระการรับแรงเกิน (Overstanding Load) ที่บริเวณหัวเจาะ ส่งผลให้หัวเจาะเอียงเนื่องจากการสัมผัสกับหิมะมีลักษณะไม่สมมาตร โดยเฉพาะเมื่อแรงกดกระทำเพียงด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจส่งผลต่อแนวทิศทางของหลุมเจาะ รวมถึงลดความแม่นยำในการเจาะลึกเข้าสู่ชั้นน้ำแข็งต่อไป จนเกิดหัวเจาะติดขัดและการติดขัดของหัวเจาะเป็นอุปสรรคสำคัญของการเจาะน้ำแข็งด้วยเครื่องเจาะ Firn Drill เนื่องจากหัวเจาะได้ออกแบบให้มีเจาะน้ำแข็งลงไปในด้านล่างทิศทางเดียว ไม่เหมาะกับการเจาะแบบย้อนกลับ (ย้อนขึ้นด้านบน) การดึงหัวเจาะกลับทิศทางขึ้นด้านบนอาจจะใช้เวลามากกว่าทิศทางลงด้านล่าง 3-5 เท่า แล้วแต่องศาของมุมเอียง ยิ่งมุมเอียงมากทำให้ดึงหัวเจาะกลับขึ้นมายากและเสี่ยงต่อการ Overload ของแรงดึงกลับของหัวเจาะและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างแท่นเจาะ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะและการใช้งานอุปกรณ์การเจาะน้ำแข็งอย่างเหมาะสม การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องมืออย่างต่อเนื่องก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่ควรมองข้ามในการดำเนินการเจาะน้ำแข็งในสภาวะที่มีความท้าทายสูง

4. บทสรุป

การเจาะน้ำแข็งในโครงการ IceCube Upgrade เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและท้าทาย โดยต้องมีการสมดุลระหว่างโหลดและความลึกในการเจาะเพื่อป้องกันการเอียงของหัวเจาะ ในระหว่างกระบวนการเจาะนั้น การควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น โหลด ความเร็วในเจาะในแนวดิ่ง และอุณหภูมิของหัวเจาะเป็นสิ่งสำคัญเพื่อรักษาประสิทธิภาพในการเจาะ และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากสภาพของน้ำแข็งที่มีความหนาแน่นและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน การบำรุงรักษาและการตรวจสอบเครื่องมืออย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการเลือกเทคนิคการเจาะที่เหมาะสม ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการเจาะน้ำแข็งดำเนินไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงโหลดของหัวเจาะและความลึกของหลุมเจาะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของเทคนิคการเจาะในโครงการนี้ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเจาะน้ำแข็งเพื่อการติดตั้งเซนเซอร์ใต้พื้นน้ำแข็ง อันเป็นขั้นตอนสำคัญในการยกระดับศักยภาพการตรวจจับอนุภาคนิวตริโนในโครงการ IceCube Upgrade และช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับฟิสิกส์ของนิวตริโนในระดับสูง อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการเดินหัวเจาะในแนวดิ่งโดยใช้เครื่องเจาะ Firn Drill ยังต้องพึ่งพาประสบการณ์ของวิศวกรภาคสนามเป็นหลัก ซึ่งในอนาคตสามารถพัฒนาให้ระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) เข้ามาช่วยควบคุมและปรับพารามิเตอร์การเจาะได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายภาคส่วน ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการและทรัพยากรในการดำเนินงานในโครงการนี้

ขอขอบคุณ โครงการความร่วมมือไทย–IceCube ที่ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน ตลอดจนสนับสนุนโอกาสในการพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือระหว่างประเทศที่เอื้อต่อการดำเนินงานด้านวิจัยเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center (WIPAC) มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน–แมดิสัน (University of

Wisconsin–Madison)มูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติสหรัฐอเมริกา (U.S. National Science Foundation: NSF) และ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences Laboratory: PSL) ที่ให้การสนับสนุนด้านเทคนิค เครื่องมือ และโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นในการดำเนินการเจาะน้ำแข็ง ณ พื้นที่ขั้วโลกใต้ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2017). *The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems*. Journal of Instrumentation, 12(03), P03012. https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03012

[2] Halzen, F. (2010). *High-energy neutrino astrophysics*. Nature, 464(7285), 136–138. https://doi.org/10.1038/nature08916

[3] IceCube Upgrade. (2023). *Project Overview*. IceCube Neutrino Observatory. Retrieved from https://icecube.wisc.edu/science/upgrades/

[4] Abbasi, R., et al. (2021). *Design and Expected Performance of the IceCube Upgrade*. EPJ Web of Conferences, 207, 02005. https://doi.org/10.1051/epjconf/202020702005

[5] Alley, R. B., et al. (1982). *Density-dependent sonic velocity in firn at the South Pole*. Journal of Glaciology, 28(98), 357–366.

[6] Gerhardt, L., et al. (2010). *Ice property measurements for the IceCube Upgrade: Density, temperature, and optical absorption in firn*. Cold Regions Science and Technology, 62(1), 13–25.

[7] Talalay, P. G. (2016). *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer Polar Sciences. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58634-2

[8] Xenon, K., et al. (2020). *Field Deployment Considerations for Drilling in Polar Firn*. Annals of Glaciology, 61(81), 101–112.