



EE03-แบบรายงานความก้าวหน้า

นักศึกษา ☒ ปกติ ☐ สมทบ

รายงานความก้าวหน้าโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) การติดตั้งและการออกแบบระบบสายดินโดยใช้ระเบียบไฟไนท์เอลิเมนต์

(ภาษาอังกฤษ) Implentation and Design of Grounding Systems using the Finite Element Method.

ผู้จัดทำ

นายเศรษฐวิชัย ผลทอง รหัสนักศึกษา 164404130064 โทร. 064-1681744
นายระวิदनัย คงพุ่ม รหัสนักศึกษา 164404130057 โทร. 096-9069520

ความเห็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ได้ตรวจโครงงานแล้ว เห็นควร ☐ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (.....)	ความเห็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ได้ตรวจโครงงานแล้ว เห็นควร ☒ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (18/06/68)
--	--

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาหัวข้อวิจัย

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประชาชนและประเทศชาติ เนื่องจากเป็นสิ่งที่จำเป็นในเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ ดังนั้นในปัจจุบันระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของ กฟผ. จึงเป็นระบบที่มีการต่อลงดิน (Grounding or Earthing) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์ในเรื่องของความปลอดภัยต่อชีวิต และทรัพย์สินทั้งนี้ยังป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ไฟฟ้าแรงสูง เช่น สายส่งต่าง ๆ เมื่อเกิดเหตุฟ้าผ่าจากระบบไฟฟ้าแรงสูงขึ้นในระบบส่งผลให้เกิดฟ้าผ่า (Lightning) แรงดันไฟฟ้าฉับพลัน (Surge) หรือเกิดความผิดปกติ (Electrical Fault) รวมทั้งยังให้มีระบบรายงานได้อย่างดีในส่วนของข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้มาจากการทำงานของรีเลย์ช่วยให้การปฏิบัติงานของหน่วยงานวิศวกรรมสามารถส่งรวบรวมได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

จากการที่ระบบมีการต่อลงดินเมื่อเกิดเหตุผิดพลาดดังกล่าวขึ้นแล้วทำให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงไหลผ่านตัวนำที่เรียกว่า ตัวนำดิน (Ground Conductor) ลงสู่ดินในตำแหน่งแท่งเหล็กดิน (Ground Rod or Earth Electrode) ดังนั้นความต้านทานของระบบสายดินต้องมีค่าต่ำ ซึ่งทำการกำหนดของระบบสายดินให้เหมาะสมกับ กฟผ. ให้มีค่ามาตรฐานอยู่ไม่เกิน 10 โอห์ม ค่าความต้านทานสายดินจะบอกหรือขึ้นอยู่กับสภาพของดินและความต้านทานเฉพาะของดิน (Soil Resistivity) รูปแบบและลักษณะการลงดินของแท่งเหล็ก

เหตุผลในการศึกษาหัวข้อวิจัยโครงการนี้เป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความต้านทานดินมีความแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับสภาพของดินในพื้นที่ต่างๆ (Soil Resistivity) ลักษณะของตัวนำที่ใช้ในการเชื่อมต่อลงดิน (Ground Electrode) ความลึก และรูปแบบการติดตั้งตัวนำดิน ดังนั้นการศึกษารวค่าความต้านทานดินจึงมีความสำคัญเพื่อกำหนดแนวทาง และมาตรฐานที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบสายดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความแตกต่างทางธรณีวิทยา ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบไฟฟ้าให้มีความปลอดภัยให้เสถียรภาพมากขึ้น

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบการจัดวางหลักดิน 3 รูปแบบคือ แบบสามเหลี่ยมเดลต้า, แบบกราวด์มะเฟือง 1 แท่ง และแบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3 หลัก

1.2.2 เพื่อศึกษาการสร้างโมเดลจำลองค่าความต้านทานหลักดินด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดินและสร้างโมเดลการทดสอบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาแบบการจัดวางหลักดินไม่น้อยกว่า 3 รูปแบบคือ แบบสามเหลี่ยมเดลต้า, แบบกราวด์มะเฟือง 1 แท่งและ แบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3 หลัก

1.3.2 สร้างโมเดลจำลองค่าความต้านทานหลักดินได้ไม่น้อยกว่า 3 รูปแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จากค่าพารามิเตอร์หลักคือ ขนาดหลักดิน ความลึก ความต้านทานจำเพาะของดิน การจัดวางของแท่งหลังดิน

1.3.3 ทดสอบและ เปรียบเทียบผลจากการวัดความจำเพาะของดินและ ความต้านทานหลักดินด้วย Fluke 1664 Fc กับโมเดลจำลองโดยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ศึกษาและ วัดค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดินในการจัดวางแท่งหลักดิน 3 รูปแบบคือ แบบสามเหลี่ยมเดลต้า, แบบกราวด์มะเฟือง 1 แท่ง และแบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3 หลัก

1.4.2 ได้โมเดลในการจำลองค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดินทั้ง 3 รูปแบบโดยใช้ระเบียบไฟไนท์เอลิเมนต์

1.4.3 ได้ผลการทดสอบและ เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความต้านทานดินและ ความต้านทานหลักดินที่มีความแม่นยำ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ

1.5.2 ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

1.5.3 ออกแบบโครงสร้างและหลักการดำเนินงาน

1.5.4 สอบหัวข้อปริญญานิพนธ์

1.5.5 วัดค่าและสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์

1.5.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดิน

1.5.7 รายงานความก้าวหน้า

1.5.8 แก้ไขข้อบกพร่อง

1.5.9 จัดทำปริญญานิพนธ์

1.5.10 สอบจบโครงการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วิทย์ ดิษฐ์ และ สมชาติ จิรวิจากร (2553) ได้จัดทำการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเมื่อพิจารณาโครงสร้างชั้นดินแบบ Nonuniform Soil โดยใช้โปรแกรม MATLAB

ในการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยจะพิจารณาความปลอดภัยจากแรงดันไฟฟ้าสัมผัส Critical และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Touch and Step Voltage Etouch , Estep) นำค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมาเปรียบเทียบกับค่า Maximum Mesh and Step Voltage : Em, Es เพื่อเป็นเกณฑ์ความปลอดภัย งานวิจัยจึงได้ศึกษาโครงสร้างชั้นดินกรณี Nonuniform Soil และวิเคราะห์ผลกระทบจาก Reflection Coefficient : K, Nonuniform Soil Correction Factor ซึ่งมีผลต่อการคำนวณค่าความต้านทานกริด (Gridt Resistance: Rg) Em, Es เปรียบเทียบกับการพิจารณาโครงสร้างชั้นดินกรณี Uniform Soil ผลจากงานวิจัยบอกได้ว่าการพิจารณาโครงสร้างของชั้นดินกรณี Nonuniform Soil ที่มีค่าเป็นลบ ($p_1 > p_2$) ค่า Rg, Em, Es จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าการพิจารณา K ที่มีค่าเป็นบวก ($p_2 > p_1$) และยังมีค่าน้อยกว่าการพิจารณาโครงสร้างชั้นดินที่เป็นกรณี Uniform Soil โดยผลจากการคำนวณตรงกับสมมุติฐานที่อ้างตามทฤษฎี และเป็นที่น่าสนใจในการทดลองออกแบบใช้โปรแกรม Matlab ด้วยวิธีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (Graphical User Interface: GUI) ซึ่งเหมาะสมในการนำไปใช้

2.1.2 ธิชา เลยหยุด จิระสุนทร เมืองอินทร์ อภิวัฒน์ อักษรพิมพ์ และพาทองแท้ ฤทธวรรณศรี (2567) ได้จัดทำการวัดค่าความต้านทานหลักดินด้วยวิธี 3-Point และวิธี Clamp-On ในระบบหลักดินที่ต่อลงดินแบบแนวตรงและแบบตาข่าย

บทความนี้นำเสนอการทดลองวัดค่าความต้านทานหลักดิน 2 วิธี คือ วิธี 3-Point และวิธี Clamp-On โดยนำผลการทดลองการตรวจวัดมาเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบได้ว่าการวัดความต้านทานหลักดินด้วยวิธีการใดให้ค่าความต้านทานที่ดีที่สุด การทดลองแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ 1.) ต่อหลักดินจานบนกันเป็นแบบแนวตรง และ 2.) ต่อหลักดินแบบตาข่ายโดยในวิธี 3-Point ใช้การวัดค่าความต้านทานในระบบหลักดินอย่างเป็นระบบ ส่วนในวิธี Clamp-On สามารถทดลองได้โดยไม่ต้องตัดการต่อวงจรของหลักดิน โดยใช้วิธี Clamp-On จะได้ผลที่บ่งบอกถึงค่าความต้านทานที่เหมาะสมในพื้นที่นั้น ๆ จากการทดลองในบทความพบว่าการวัดความต้านทานหลักดินด้วยวิธีทั้งสองแบบมีผลต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือในระบบที่ประกอบด้วย 4 หลักดินจะได้ค่าความต้านทานใกล้เคียงกัน โดยในวิธี 3-Point ให้ค่าที่ต่ำกว่า Clamp-On เล็กน้อยประมาณ 1.67%

2.1.3 นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ (2562) ได้จัดทำการออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยมีสองสถานีในบริเวณเดียวกัน

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย และการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจร และมีกระแสสูงเกิดขึ้น เมื่อมีกระแสอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้ง หรือผู้ปฏิบัติงาน

ในบริเวณนั้น ซึ่งจะพิจารณาค่าสัดส่วนการบีบอัดตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 เพื่อให้ค่าที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดมีค่าที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์จะทำโดยใช้โปรแกรม Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) เพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ และนำผลของการออกแบบระบบกราวด์กริดในรูปแบบต่าง ๆ เมื่อผ่านไปปรับปรุงสมรรถนะแรงดันด้านกราวด์ของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย เพื่อจัดทำเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบ การปรับปรุงแก้ไขในโครงการที่จำเป็นเร่งด่วนนั้น ก็อาจใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน และมีคุณภาพมาปูพื้นที่ของบริเวณที่อาจเกิดอันตรายได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการงานวิจัยได้ทำการศึกษทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยมีตัวแปรหลักสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานของแท่งหลักดินโดยมีทฤษฎีหลักที่เกี่ยวข้องที่ศึกษามีดังนี้

2.2.1 หลักดิน

ทำหน้าที่ต่อระหว่างวงจรหรืออุปกรณ์ไฟฟ้ากับดิน เพื่อให้เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าลงดิน ความต้านทานระหว่าง หลักดินกับดินต้องมีค่าต่ำที่สุด เพื่อให้กระแสไหลได้ง่ายและแรงดันของสายนิวทรัลเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด โดยมาตรฐาน ได้กำหนดค่าความต้านทานการต่อลงดินไว้ไม่เกิน 5 โอห์ม เมื่อมีกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในดินรอบๆ หลักดิน โดยเฉพาะบริเวณผิวเนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุด การทำให้ความต้านทานโดยรวมต่ำ ต้องทำให้ความหนาแน่นของกระแสใกล้เคียงกับหลักดินมีค่าต่ำที่สุด โดยใช้หลักดินที่มีลักษณะยาวเป็นแท่งหรือเป็นเส้น ซึ่งให้ความต้านทานต่ำกว่าหลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมแม้จะมีพื้นที่เท่ากัน ถ้าความต้านทานการต่อลงดินสูงเกินไป สามารถลดความต้านทานได้โดยการเพิ่มจำนวนหลักดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของหลักดินที่ใช้

2.2.2 ประเภทของหลักดิน

2.2.2.1 แท่งหลักดินเหล็กหุ้มทองแดง (Ground Rods) เป็นแบบที่นิยมกันมากที่สุด เพราะราคาถูก ติดตั้งง่าย ใช้ได้ดีกับดินที่มีชั้นหินอยู่ลึกเกิน 10 ฟุต โดยขนาดแท่งดิน ต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง ไม่น้อยกว่า 5/8" ยาวไม่น้อยกว่า 8 ฟุต การใช้แท่งดินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางโตขึ้น จะลดความต้านทานดินได้ไม่มากนัก แต่จะมีผลด้านความแข็งแรงและทนการสึกกร่อนได้ดี การตอกแท่งดินที่มีความยาว ลึกลงไปในดิน จะให้ผลดีกว่าการตอกแท่งดินสั้นๆ หลายแท่ง เพราะที่ระดับลึกๆ ความต้านทานดินจะยิ่งลดลง แท่งดินที่ทำด้วยทองแดง จะทนต่อการสึกกร่อนได้ดีที่สุด แต่อาจมีราคาแพงและอ่อนตัว อย่างไรก็ตามสามารถใช้แท่งดิน ที่ทำด้วยเหล็กหุ้มทองแดง (Copper clad) แทนได้



ภาพที่ 2.1 แท่งหลักดินเหล็กหุ้มทองแดง

ที่มา : <https://www.safesiri.com/>

2.2.2.2 แท่งหลักดินแบบแฉก หรือที่เรียกว่า กราวด์ร็อด 4 แฉก เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบสายดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน โดยมีลักษณะเป็นแท่งโลหะที่มีส่วนปลายแบ่งออกเป็นสี่แฉก คล้ายรูปกากบาท ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับดินมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานดินลดลงและประสิทธิภาพของระบบสายดินดีขึ้นผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ที่มีคุณภาพสูง และหุ้มด้วยทองแดงบริสุทธิ์เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าและป้องกันการกัดกร่อนขนาดทั่วไปคือ 60 x 60 x 5 มิลลิเมตร และความยาว 2 เมตร ด้วยรูปทรงสี่แฉก ทำให้สามารถตอกลงดินได้ง่ายและมั่นคง เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน



ภาพที่ 2.2 แท่งหลักดินแบบแฉก

ที่มา : <https://somboonkl.co.th/>

2.2.2.3 แผ่นฝัง (Buried Plate) หลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะถูกนำมาใช้ เมื่อไม่ต้องการขุดดินลงไปลึกๆ การฝังแผ่นจะทำ ในแนวดิ่ง หรือแนวนอนก็ได้ ขนาดของแผ่นโลหะที่ใช้ ต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสไม่น้อยกว่า 0.18 ตารางเมตร และในกรณีที่ เป็น เหล็กอาบโลหะชนิดกันการผุกร่อน ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มม. โดยต้องฝังแผ่นโลหะลึกจากผิวดิน ไม่น้อยกว่า 1.6 เมตร



ภาพที่ 2.3 แผ่นฝัง

ที่มา : <https://www.hiachet.com/>

2.2.3 การจัดวางหลักดิน 3 รูปแบบ มีดังนี้

2.2.3.1 การตอกแบบสามเหลี่ยมเดลต้า หรือการต่อแบบขนานจะทำให้ค่าความต้านทานลดลงมากกว่า 1 เท่า การต่อห่างกัน 3 เมตร ก็เพราะปกติแท่งหลักดินจะยาวประมาณ 2.4-3 เมตร ควรจะต้องต่อห่างกันไม่น้อยกว่าความยาวของหลักดินเพื่อไม่ให้เมื่อมีกระแสไหลผ่านแท่งหลักดินแล้วเกิดผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเหนี่ยวนำ (Electrode Shell) ที่ทับซ้อนกันกับแท่งข้างทำให้การกระจายกระแสลงดินได้ไม่ดี จึงทำให้ค่าความต้านทานดินที่ได้ไม่ต่ำที่สุด ปัจจุบันมาตรฐาน NEC แนะนำระยะห่าง 2 เท่าของความยาวหลักดิน เพื่อลดผลของสนามแม่เหล็กที่จะมีผลต่อหลักดินที่ขนานกัน ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่ำสุดแต่หากระยะห่างน้อยกว่า 3 เมตร ก็สามารถทำได้ ขอให้ค่าความต้านทานหลักดินที่วัดได้ไม่สูงเกินมาตรฐานคือ 5 โอห์มก็พอ เพราะแม้จะมีระยะห่างน้อยกว่า 3 เมตร หากพื้นที่นั้นมีความต้านทานจำเพาะของดินต่ำเช่นดินร่วน ดินชั้น ก็จะทำให้ทำให้ค่าความต้านทานดินที่ได้ต่ำลงจนน้อยกว่า 3 เมตร จะได้ค่าความต้านทานดินเหมาะสมกับการลงทุนและพื้นที่ในการติดตั้ง



ภาพที่ 2.4 การตอกแบบสามเหลี่ยมเดลต้า

ที่มา : <https://www.blockdit.com/>

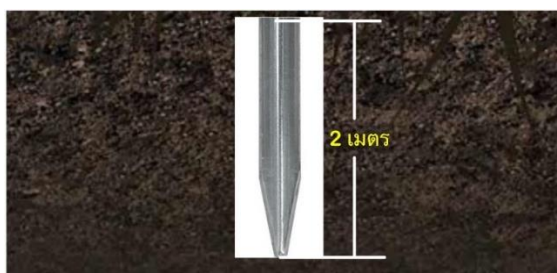
2.2.3.2 การตอกแบบเป็นแนวตรง 3 หลัก แล้วแต่ละแท่งห่างกันอย่างน้อย 3 เมตร ตามแนวคิดเรื่องระยะห่างตามข้อและต่อแต่ละหลักดินถึงกันแบบสามเหลี่ยมได้การต่อขนานหลักดินสามารถได้หลายแบบเช่น ต่อเป็น 4 เหลี่ยม หรือ ต่อเป็น ดาว 3 แฉก ก็ได้ไม่แตกต่างกันมาก หรือเพิ่มความลึกหรือใช้หลักดินแบบเส้นแนวนอนขนานไปกับดิน หรือหลักดินแบบแผ่น ก็ได้ โดยแต่ละแบบจะทำให้ค่าความต้านทานดินแตกต่างกันไปหากจะปักแท่งเดียวก็ได้ หากความต้านทานดินไม่สูงกว่ามาตรฐานกำหนดไว้คือไม่เกิน 5 โอห์ม



ภาพที่ 2.5 การตอกแบบเป็นแนวตรง 3 หลัก

ที่มา : <https://www.blockdit.com/>

2.2.3.2 การตอกแบบกราวด์มะเฟืองหรือแบบแฉก 1 แท่ง แท่งหลักดินแบบแฉกมีขนาดทั่วไปคือ $60 \times 60 \times 5$ มิลลิเมตร และความยาว 2 เมตร ลักษณะเป็นแท่งโลหะที่มีแฉกหรือกลีบยื่นออกมา ทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับดินมากขึ้น ซึ่งช่วยลดค่าความต้านทานของระบบสายดินและ มีพื้นที่สัมผัสกับดินมากขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลสามารถกระจายลงสู่ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้าดูดหรือไฟฟ้าลัดวงจรในพื้นที่ที่ดินมีค่าความต้านทานสูง เช่น ดินทรายหรือดินแห้ง การใช้แท่งหลักดินแบบแฉกช่วยให้ระบบสายดินทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ควรเลือกตำแหน่งที่ห่างจากโครงสร้างอาคารและระบบท่อประปา เพื่อป้องกันการรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกระแสไฟฟ้าลงดินตอกแท่งหลักดินแบบแฉกลงในดินจนสุดความยาวของแท่ง เพื่อให้แน่ใจว่ามีการสัมผัสกับดินอย่างเต็มที่



ภาพที่ 2.6 การตอกแบบกราวด์มะเฟืองหรือแบบแฉก 1 แท่ง

ที่มา : <https://somboonkl.co.th/>

2.2.4 ศึกษาปัจจัยผลกระทบที่มีต่อค่าความต้านทานหลักดิน (นายดนุรจน์ หมาดหมื่น, 2567 ดร.สำรวย สังข์สะอาด, 2544)

2.2.4.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน หมายถึง ความต้านทานของดินที่วัดระหว่างค่าห่างของดินขนาด $1 \times 1 \times 1$ ถูกมาทำเงื่อนไขให้มีหน่วยเป็น โอห์ม/เมตร ($\Omega \cdot m$) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.2.4.2 ชนิดของดิน พื้นที่ที่ทำการส่งไฟฟ้าแรงสูงผ่านย่อมมีลักษณะและชนิดของดินแตกต่างกัน บางพื้นที่อาจมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มซึ่งมักจะพบว่าเป็นพวกดินร่วนหรือดินเหนียว บางพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นภูเขา ชนิดของดินที่พบในแถบนั้นเป็นหิน ทราบาย ทั้งนี้หากนำดินดังกล่าวมาวัดค่าจะพบความต้านทานจำเพาะของดินที่พบมีความแตกต่างกัน ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่พบมากในประเทศไทย

2.2.4.3 ความชื้นของดิน สิ่งที่มีอิทธิพลต่อระดับความต้านทานที่สูงคือ ปริมาณน้ำหรือไอน้ำในดิน โดยจะพิจารณาถึงลักษณะพื้นที่และสภาพอุณหภูมิอากาศเป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น บริเวณที่มีน้ำขังจะมีความชื้นมากกว่าดินอัดแน่น ลักษณะดินอาจมีการซึมของน้ำที่ช้าหรือเร็วกว่า โซนที่ความชื้นมีผลกับค่าความต้านทานจำเพาะของดินคือ ดินร่วนปนทราย ดินบริเวณนั้นนำไฟฟ้าได้ดี ความชื้นจึงมีผลสำคัญอย่างยิ่ง

2.2.4.4 ความเป็นด่างและความเค็ม สารละลายไอออนที่ถือในดินมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของดินโดยเฉพาะปริมาณไอออนของโซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K)

2.2.4.5 อุณหภูมิ เป็นค่าที่มีความเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ เนื่องจากอากาศร้อนหรือมีที่วัดอุณหภูมิแล้วให้ค่าที่ถูกต้อง แม้ดินอาจไม่มี อิทธิพลจากอุณหภูมิไม่เท่ากัน และอย่างข้างที่จะไม่มีความคงตัว แต่หากมีการนำกระแสผ่านในดินที่มีอุณหภูมิต่ำย่อมมีความต้านทานมาก

2.2.4.6 ความอัดแน่น ความชื้นมีผลของแปรเปลี่ยนและพิจารณาถึงองค์ประกอบชั้นหินที่สำคัญ ดินที่ร่วนเบาจะมีความอัดแน่นน้อยกว่าดินอัดแน่น เนื่องจากเม็ดดินที่อัดแน่นอาจถูกน้ำซึมผ่านน้อยจึงมีค่าความต้านทานน้อย กรณีดินที่อัดแน่นจะทำให้ความต้านทานจำเพาะสูงขึ้นไปในดินไม่ดี เป็นสัด โดยค่าความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องทำการวิเคราะห์หลายปัจจัยที่อยู่ในดิน

2.2.4.7 สภาพดิน ณ จุดต่างๆ ของประเทศอาจมีค่าความต้านทานของดินไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและความชื้นในแต่ละที่ด้วย การสำรวจพื้นที่ในบริเวณที่จะสร้างสายดินไฟฟ้า มักจะมีการสำรวจหาส่วนประกอบหรือชนิดของดินในบริเวณนั้นควบคู่ไปด้วย ซึ่งตามปกติดินส่วนน้ำจะสามารถนำใช้สิ่งของเมื่อเวลาที่ดินที่ทำการสำรวจ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบว่าคุณสมบัติแตกต่างกันน้อยเพียงใด

สูตรที่ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถคำนวณได้จาก

$$\rho = 2\pi LR / \ln(8L/D - 1) \quad (2.1)$$

$$R = \rho / 2\pi L [(\ln 8L/D - 1)] \quad (2.2)$$

P = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega \cdot m$) L = ความยาวของแท่งสายดิน (m)
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งสายดิน (m) R = ค่าความต้านทานดินที่วัดได้ (Ω)

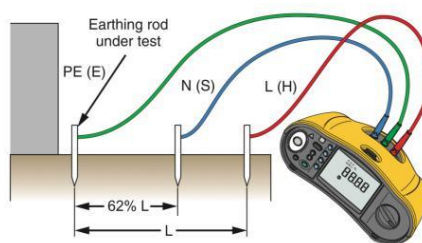
ตารางที่ 2-1 มาตรฐานค่าความต้านทานจำเพาะของดินและหินชนิดต่างๆ (ดร.สำรวย สังข์
สะอาด, 2544)

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega \cdot m$)
ดินร่วนเปียก	10 - 30
ดินเหนียว	50
ดินร่วนชั้น	100
ดินร่วนปนทราย	150
ทรายชั้น	200
ทรายแห้ง	1,000
ดินกรวดชั้น	500
ดินกรวดแห้ง	1,000
หิน	3,000 - 10,000

2.2.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน (นายดนุรจน์ หมาดหมื่น, 2567)

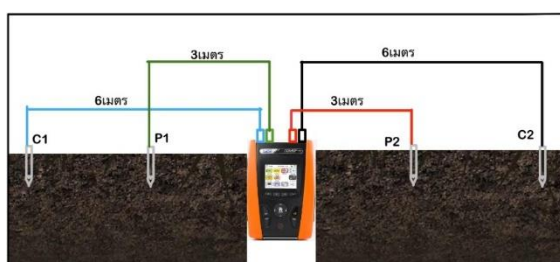
2.2.5.1 วิธีการวัดแบบ 3 pole Fall-of-Potential โดยใช้มิเตอร์รุ่น Fluke 1664 FC
เสียบแท่งหลักดินมาตรฐานของเครื่องวัด โดยให้ห่างจากแท่งหลักดินที่เราต้องการทดสอบ แต่ละหลักห่าง
กัน ประมาณ 15-25 เมตร (บางรุ่นความยาวสาย N(S) -L(H) อาจจะไม่เท่ากัน) ดังภาพที่ 2.7

1. ต่อสายวัด PE , N(S) , L(H) ของเครื่องวัดเข้ากับแท่งหลักดิน ตามภาพ
2. เช็กเพื่อดูการต่อสายวัดผิดปกติหรือไม่
3. ตั้งย่านวัดไปที่ RE เพื่อวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน
4. กดปุ่ม TEST เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานดิน ซึ่งค่าที่ได้จะต้องมีค่า ไม่เกิน 5 โอห์ม



ภาพที่ 2.7 วิธีการวัดแบบ 3 pole Fall-of-Potential

2.2.5.2 วิธีการวัดแบบ 4 pole Wenner Method การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินคุณสมบัติของดินในการนำไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบหลักดิน (Grounding System) และระบบป้องกันฟ้าผ่า แท่งตัวนำ C1 และ C2 ลงในดิน โดยให้ห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กันปักแท่งตัวนำ P1 และ P2 อยู่ระหว่างแท่ง C1 และ C2 โดยให้แท่งตัวนำทั้งหมดเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และมีระยะห่างเท่ากันต่อสายจากขั้ว C1 และ C2 ของเครื่องวัดไปยังแท่งตัวนำ C1 และ C2 ต่อสายจากขั้ว P1 และ P2 ของเครื่องวัดไปยังแท่งตัวนำ P1 และ P2 เปิดเครื่องวัด Earth Tester เครื่องวัดจะจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแท่ง C1 ลงดิน และไหลไปยังแท่ง C2 เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างแท่ง P1 และ P2 ซึ่งจะถูกวัดโดยโวลต์มิเตอร์

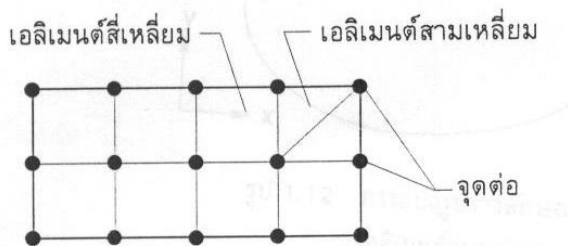


ภาพที่ 2.8 วิธีการวัดแบบ 4 pole Wenner Method

2.2.6 ทฤษฎี และลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์และทางด้านพลศาสตร์ รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ที่จุดตัดของเส้นกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า “จุดต่อ” (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ (อุณหภูมิ ความเค้น ความเร็ว ฯลฯ) ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ แทนที่จะแก้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าจะหาคำตอบได้ครบทุกจุด



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

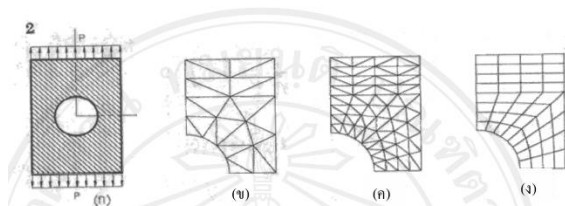
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และ โครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาวะยืดตัว (Plastic) นอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิธีวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการสั่นสะเทือนของโครงสร้างรวมทั้งยังสามารถวิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวลและ สามารถวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราจะสามารถ หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนโดย อาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มี ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการ เปลี่ยนแปลงของไหลอย่างฉับพลัน หรือ ใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่ สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) หรือ สมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟ ไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้ สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของ ปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน ในภาพที่ เราเรียกชิ้นส่วนย่อยๆ นี้ว่า เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาทีเดียว

ทั้งระบบ เช่นวิธีต่างๆไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น ในระบบโครงสร้าง เราจะหาการกระจัด และความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ

หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วย ค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งต่างๆบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหด้วยเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ดังเช่น แสดงในตัวอย่างของแผ่นวัสดุ ในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับ สมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้น จึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลง ในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด และ จำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น นอกจากนั้นความแม่นยำ ของผลเฉลยก็ยังขึ้นอยู่กับสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์ กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้น มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ ของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์ อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิ

เช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง เป็นต้น ส่วนขนาด ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และหากเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ใน รูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้ว อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรง โดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

คำอธิบายที่กล่าวมาเป็นคำอธิบายในลักษณะกว้างๆ และคร่าวๆ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นพร้อมภาพรวมของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ รายละเอียดปลีกย่อยของวิธีการนี้จะพออธิบายเป็นขั้นเป็นตอนพร้อมกับยกตัวอย่างประกอบง่ายๆ เกี่ยวกับวิธีการหาผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) เพื่อทำให้เห็นภาพก่อน ๆ ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณวิธีหนึ่งวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ และเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ รวมทั้งลักษณะบางอย่างที่ คล้ายคลึงกับวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ที่เราจะได้พบเห็นกันต่อไป ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะแสดง ให้เห็นวิธีการผลต่างสืบเนื่องโดยยกตัวอย่างง่ายๆ ขึ้นมาก่อน ลักษณะบางอย่างที่เราจะได้พบเห็นซึ่ง เกิดขึ้นจากวิธีการนี้จะช่วยเสริมความเข้าใจเมื่อเราทำการศึกษาวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ในขั้นต้น

2.2.7 COMSOL Multiphysics

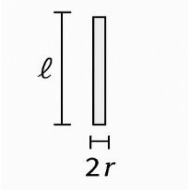
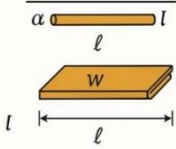
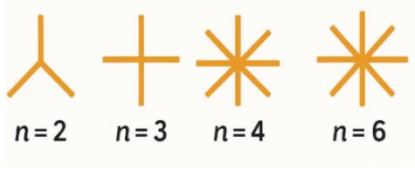
COMSOL Multiphysics เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (finite element analyzer), การแก้สมการ (solver) และการจำลอง (simulation) สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านฟิสิกส์และวิศวกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะในระบบที่มีปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์หลายชนิดเกิดร่วมกัน (coupled phenomena) หรือที่เรียกว่า Multiphysicsซอฟต์แวร์นี้รองรับการใช้งานผ่านอินเทอร์เฟซที่อิงตามฟิสิกส์ทั่วไป และยังสามารถจัดการกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์บางส่วน (PDEs) ที่เชื่อมโยงกันหลายระบบ

COMSOL Multiphysics มีสภาพแวดล้อมในการพัฒนา (IDE) และกระบวนการทำงานที่เป็นระบบเดียวกัน สำหรับการใช้งานด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ ของไหล อะคูสติกส์ และเคมี นอกเหนือจากการแก้ปัญหาทางคลาสสิกที่สามารถดำเนินการผ่านโมดูลเฉพาะทางแล้ว ตัวโปรแกรมหลักของ COMSOL ยังสามารถใช้ในการแก้สมการ PDEs ในรูปแบบเวค (weak form) ได้และมี API สำหรับ Java และ MATLAB ซึ่งสามารถใช้ควบคุมโปรแกรมจากภายนอกได้และโปรแกรมยังสามารถใช้สร้างแอปพลิเคชันจำลองทางฟิสิกส์ผ่านพีเจอาร์ Application Builder ได้อีกด้วยCOMSOL มีโมดูลเสริมหลายประเภท โดยแบ่งตามสาขาการประยุกต์ เช่น ด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ ของไหล เสียง เคมี การใช้งานทั่วไป (multipurpose) และการเชื่อมต่อกับโปรแกรมอื่น (interfacing)

2.2.8 R_0 ค่าความต้านทานของระบบสายดินทั้งหมด(Total Ground Resistance) วัดจากจุดรวมของระบบสายดิน(เช่น แท่งกราวด์ กริดกราวด์) ไปยังดินโดยรอบ (หนังสือ BCC BANGKOK CABLE การออกแบบและติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงสูง)

ค่า R_0 จะขึ้นกับรูปแบบของรากสายดิน -อาจเป็นแท่งโลหะ ตัวนำ หรือทั้งสองแบบผสมกันดังแสดงตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2-2 สังเกตว่าเมื่อใช้แท่งโลหะและตัวนำร่วมกันทำเป็นระบบรากสายดิน ความต้านทานของระบบรากสายดิน $R_{0,rod+wire}$ จะสูงกว่าผลการคำนวณจากการนำค่าความต้านทานของแท่งโลหะ $R_{0,rod}$ มาขนานกับความต้านทานของตัวนำ $R_{0,wire}$ เสมอ- $R_{0,rod+wire} > R_{0,rod} || R_{0,wire}$ เนื่องจากแท่งโลหะและตัวนำวางห่างกันไม่มากนัก และการต่อแท่งโลหะให้ถึงกันด้วยตัวนำจะให้ความต้านทานรวมของแท่งโลหะลดลงประมาณ 10-15% ในขณะที่เมื่อต่อเพิ่มแท่งโลหะให้กับตัวนำจะให้ความต้านทานของตัวนำลดลงประมาณ 25-30% เท่านั้น

ตารางที่ 2-2 สมการหาค่า R_0 ของระบบรากสายดินที่ใช้ขีล็กโตรรูปร่างต่างๆ

Layout	R_0
	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right]$
	$R_0 = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 \right]$ When $t \ll W$: r
	$R_{0n} = \frac{\rho}{n\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 + N(n) \right]$ $N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left[\frac{1 + \sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)}{\sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)} \right]$

บทที่ 3

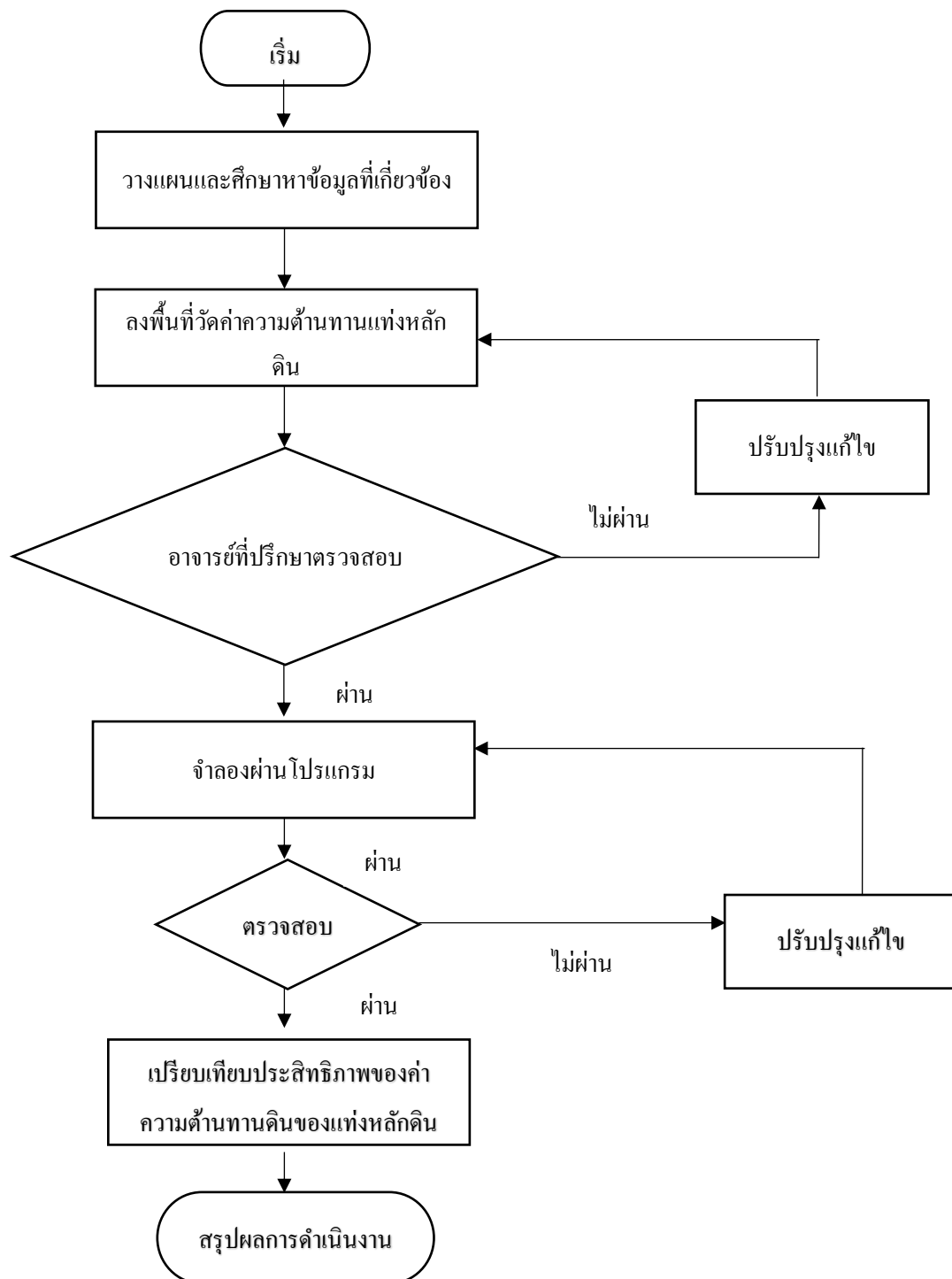
วิธีดำเนินงาน

การดำเนินงานของโครงการวิจัยการติดตั้งและออกแบบระบบสายดินโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ได้เริ่มศึกษาทฤษฎีจากค่าพารามิเตอร์หลักที่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานหลักดิน ประกอบด้วย ขนาดหลักดิน ความลึก ความต้านทานจำเพาะของดิน การจัดวางของแท่งหลักดิน โดยทำการวัดค่าความต้านทานหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วย Fluke 1664 Fc เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลักดินที่ได้จากการจำลองโมเดลโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

คณะผู้จัดทำโครงการวิจัยการติดตั้งและออกแบบระบบสายดินโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ได้เริ่มวิธีการดำเนินงานต่างๆ ดังนี้

1. วิธีการดำเนินงาน
2. แผนการดำเนินงาน
3. ลงพื้นที่สำรวจชุดทดลองแท่งหลักดินเพื่อที่จะออกแบบตำแหน่งของแท่งหลักดิน
4. ลงพื้นที่วัดค่าความต้านทานแท่งหลักดินทุกรูปแบบและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
5. สร้างวิธีการจำลองระบบสายดินแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics

3.1 การดำเนินโครงการวิจัยสามารถเขียนแผนผังขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้แสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผัง Flow chat

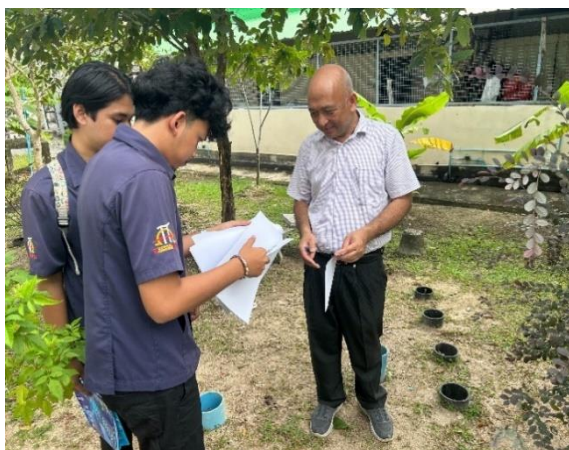
3.2 แผนการดำเนินการ

ตารางที่ 3-1 แผนการดำเนินการทำงานมีระยะเวลาดังนี้

ระยะเวลาดำเนินงาน	ก.พ. 68	มี.ค. 68	เม.ย. 68	พ.ค. 68	มิ.ย. 68	ก.ค. 68
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับ โครงการวิจัย						
2. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา โครงการวิจัย						
3. สอบหัวข้อปริญญานิพนธ์						
4. ลงพื้นที่สำรวจชุดทดลอง						
5. ออกแบบโครงสร้างและ หลักการดำเนินงาน						
6.ลงพื้นที่วัดค่าความต้านทาน หลักดิน						
7. สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์						
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ค่าความต้านทานแท่งหลักดิน						
7. รายงานความก้าวหน้า						
8. แก้ไขข้อบกพร่อง						
9. จัดทำปริญญานิพนธ์						
10. สอบจบโครงการ						

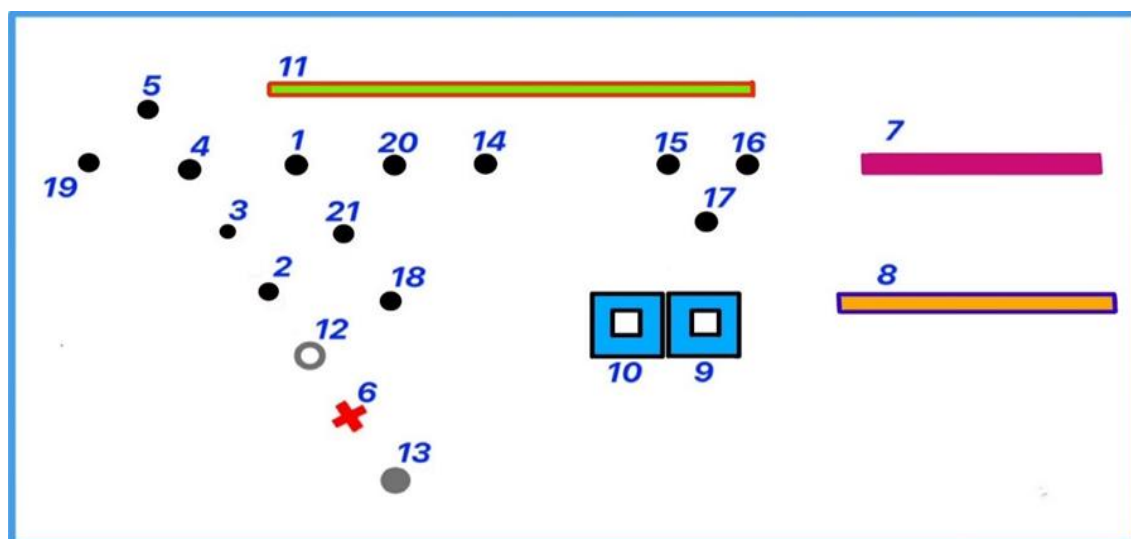
3.3 ลงพื้นที่สำรวจจุดสาธิตแห่งหลักดินเพื่อที่จะออกแบบตำแหน่งของแห่งหลักดิน

ในการลงพื้นที่สำรวจจุดสาธิตแห่งหลักดินเพื่อมาดูแบบการติดตั้งก่อนลงพื้นที่วัดค่าความต้านทาน โดยทีมมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาซึ่งเป็นผู้ออกแบบและ ติดตั้งสร้างจุดสาธิตการวัดค่าความต้านทานของแห่งหลักดินแบบต่างๆ ตำแหน่งของจุดสาธิตตั้งอยู่ข้างตึกคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา



ภาพที่ 3.2 ลงพื้นที่สำรวจจุดสาธิตที่ตึกคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

แบบโครงสร้างของชุดทดลองการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดินภาพที่แสดงถึงการ
ออกแบบโครงสร้างด้วยแอป CallaNote



ภาพที่ 3.2 แบบโครงสร้างของชุดทดลองการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน

ตารางที่ 3-2 ตารางสัญลักษณ์ของหลักดิน

สัญลักษณ์ของหลัก	ชื่อของแท่งหลักดิน
●	เหล็กหุ้มทองแดง
○	แสดนเลสแบบกลวง
●	แสดนเลสแบบตัน
×	เหล็กแบบแฉก
□ □	แผ่นเพลท
▬ (yellow/green)	สายไฟขนาด 35mm ²
▬ (pink)	เหล็กหุ้มทองแดง (เอียง)
▬ (orange)	เหล็กหุ้มทองแดง (ลึก)

ตารางที่ 3-3 ตารางหมายเลขและขนาดของหลักดิน

หมายเลขของหลัก	ขนาด (นิ้ว)/ความยาว (เมตร)/(องศา)	ประเภท
1	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
2	4/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
3	5/8 x 2	เหล็กหุ้มทองแดง
4	5/8 x 3	เหล็กหุ้มทองแดง
5	5/8 x 6	เหล็กหุ้มทองแดง
6	2½ x 2	เหล็กแบบแฉก
7	5/8 x 2.4 (เอียง 45°)	เหล็กหุ้มทองแดง
8	5/8 x 2.4 (ลึก 70cm.)	เหล็กหุ้มทองแดง
9	40x50cm ² x 1	แผ่นเพลท
10	40x50cm ² x 1.7	แผ่นเพลท
11	1x35mm ² x 6.5	สายไฟขนาด 35mm ²
12	2 x 2	เสตนเลสแบบกลวง
13	2 x 2	เสตนเลสแบบตัน
14	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
15	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
16	5/8 x 1	เหล็กหุ้มทองแดง
17	5/8 x 1	เหล็กหุ้มทองแดง
18	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
19	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
20	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง
21	5/8 x 2.4	เหล็กหุ้มทองแดง

3.4 ลงพื้นที่วัดค่าความต้านทานแท่งหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 1 ครั้ง

ในส่วนของการวัดค่าความต้านทานแท่งหลักดินเพื่อที่จะนำค่าความต้านทานของแท่งหลักดินมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณและ ผลการจำลองโมเดล ใช้วิธีการวัดแบบ 3 pole Fall-of-Potential โดยใช้มิเตอร์รุ่น Fluke 1664 FC

ในส่วนของการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพื่อที่จะนำค่ามาเป็นตัวแปรในการคำนวณจากสูตรและ การจำลองโมเดล ใช้วิธีการวัดแบบ 4 pole Wenner Method โดยใช้มิเตอร์ GSCO 60 HT



ภาพที่ 3.4 ลงพื้นที่วัดค่าความต้านทานแท่งหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

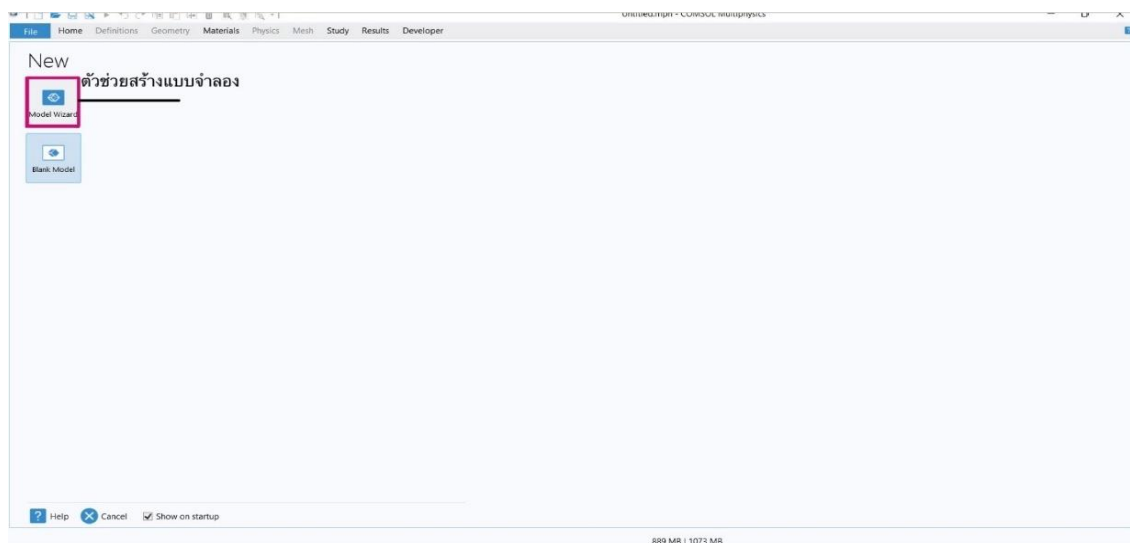
3.5 วิธีการสร้างโมเดลในการจำลองระบบสายดินผ่านโปรแกรม Comsol Multiphysics

ขั้นตอนที่ 1: การเปิดโปรแกรมสร้างโปรเจกต์ใหม่

ขั้นตอนการตั้งค่า:

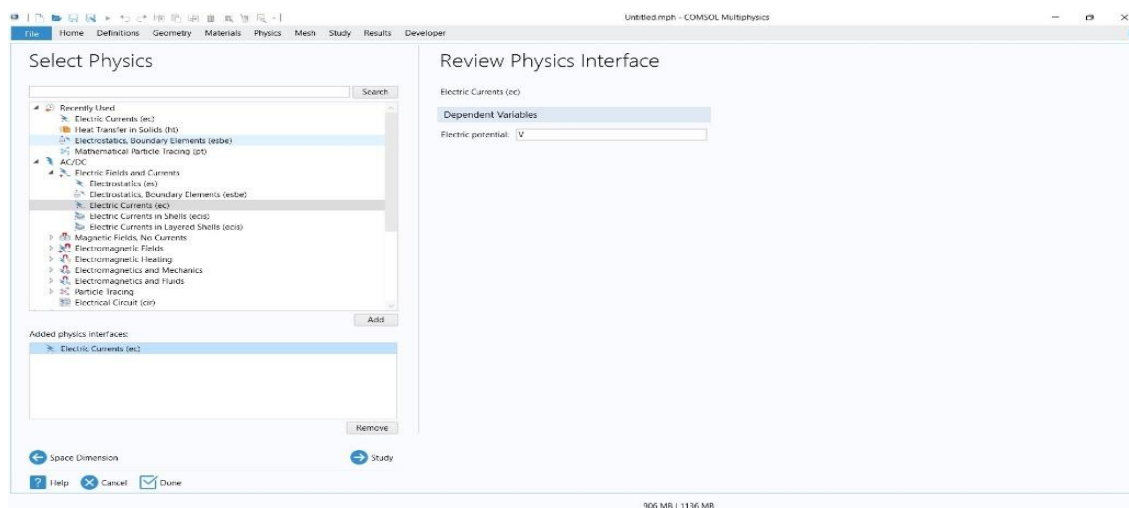
1.1 เปิดโปรแกรม COMSOL Multiphysics 6.1 คลิกเข้าไปใน Model Wizard

1.2 สร้างแบบจำลองใหม่เลือก 3D เป็นมิติของพื้นที่



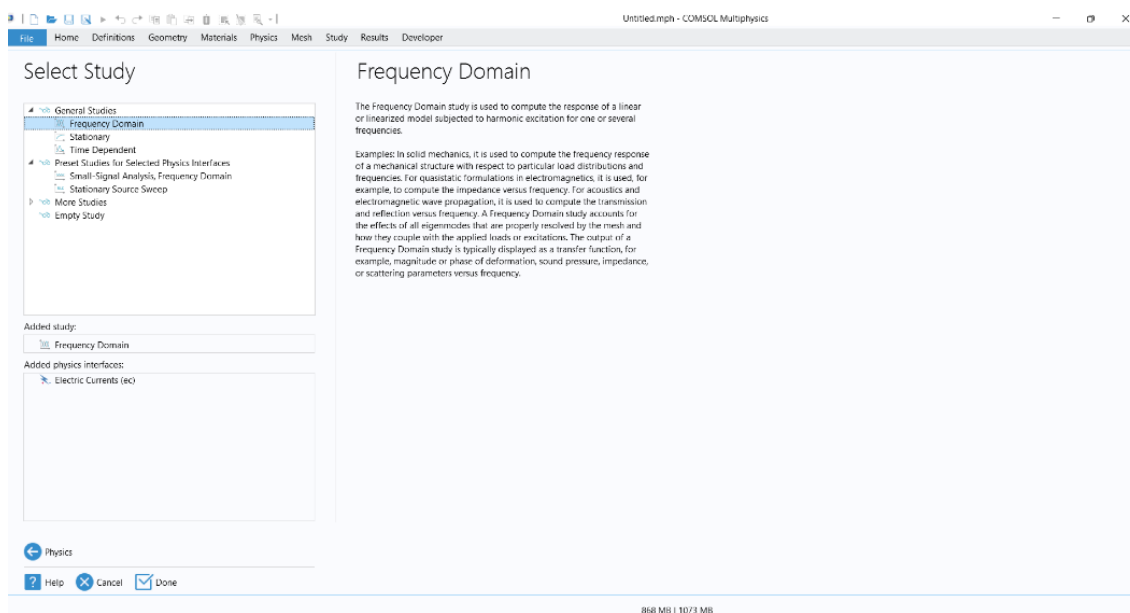
ภาพที่ 3.5 หน้าสร้างแบบจำลอง

1.3 เลือกฟิสิกส์ (Physics) ใช้ Electric Currents (ec) จากหมวด AC/DC Module



ภาพที่ 3.6 การเลือกใช้ฟิสิกส์ที่ต้องการจำลองทางวิศวกรรม

1.4 เลือกการศึกษาทั่วไป (General Studies) กดเลือกโดเมนความถี่ (Frequency Domain) แล้วกดที่ Done



ภาพที่ 3.7 การเลือกใช้ศึกษาทั่วไป

1.5.1 แถบเครื่องมือการเข้าถึงด่วน ใช้ปุ่มเหล่านี้เพื่อเข้าถึงฟังก์ชันต่างๆ เช่น เปิด/บันทึกไฟล์ เลิกทำ/ทำซ้ำ คัดลอก/วาง และลบ

1.5.2 รีบบิ้น แท็บรีบบิ้นมีปุ่มและรายการดรอปดาวน์สำหรับควบคุมขั้นตอนทั้งหมดของ กระบวนการสร้างแบบจำลอง

1.5.3 หน้าต่างกราฟิก หน้าต่างกราฟิกจะแสดงกราฟิกแบบโต้ตอบสำหรับโหนดเรขาคณิต ตา ข่าย และผลลัพธ์การดำเนินการต่างๆ ได้แก่ การหมุน การเลื่อน การซูม และการเลือก

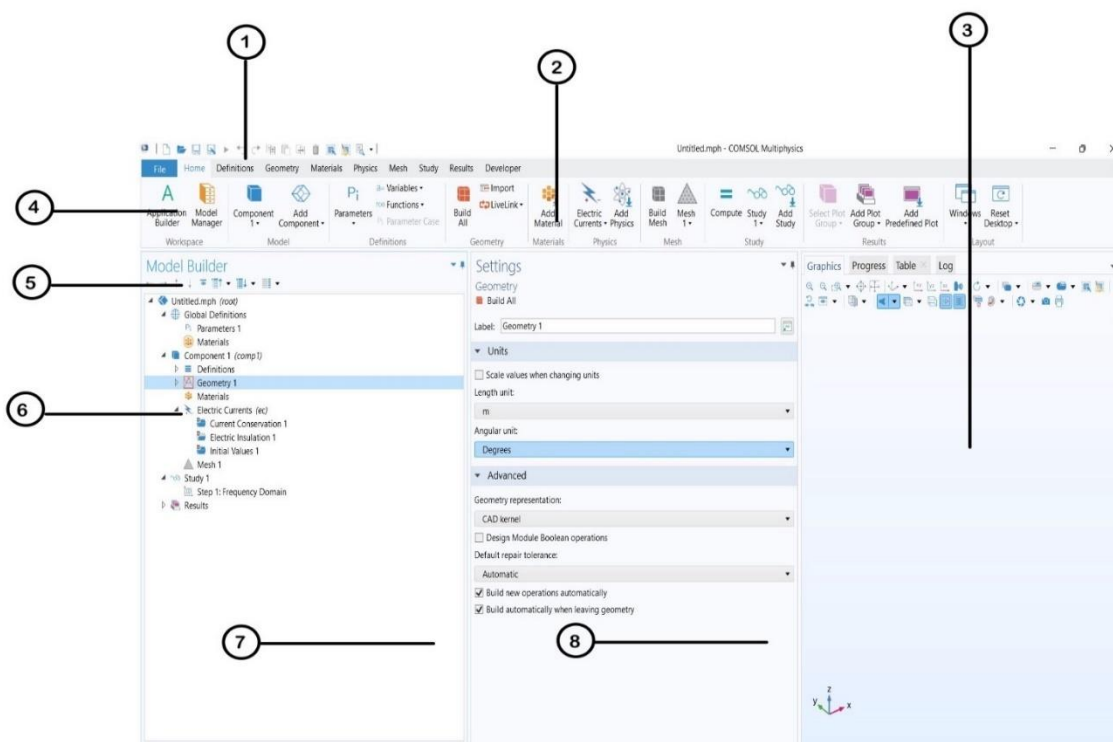
1.5.4 ตัวสร้างแอปพลิเคชัน คลิกปุ่มนี้เพื่อสลับไปยังตัวสร้างแอปพลิเคชันและเริ่มสร้าง แอปพลิเคชันตามแบบจำลองของคุณ

1.5.5 แถบเครื่องมือสำหรับนักสร้างโมเดล

1.5.6 แผนผังโมเดล แผนผังโมเดลจะให้ภาพรวมของโมเดลและฟังก์ชันและการดำเนินการ ทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการสร้างและแก้ไขปัญหา

1.5.7 ตัวสร้างแบบจำลอง หน้าต่างตัวสร้างแบบจำลองพร้อมด้วยโครงสร้างแบบจำลองและปุ่ม แถบเครื่องมือที่เกี่ยวข้องช่วยให้คุณเห็นภาพรวมของแบบจำลองกระบวนการสร้างแบบจำลองสามารถ ควบคุมได้จากเมนูที่ไวต่อบริบท

1.5.8 หน้าต่างการตั้งค่า คลิกโหนดใดๆ ในแผนผังแบบจำลองเพื่อดูหน้าต่างการตั้งค่าที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดง ถัดจากตัวสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 3.8 อธิบายแถบคำสั่งหน้าต่างWindowsของโปรแกรม

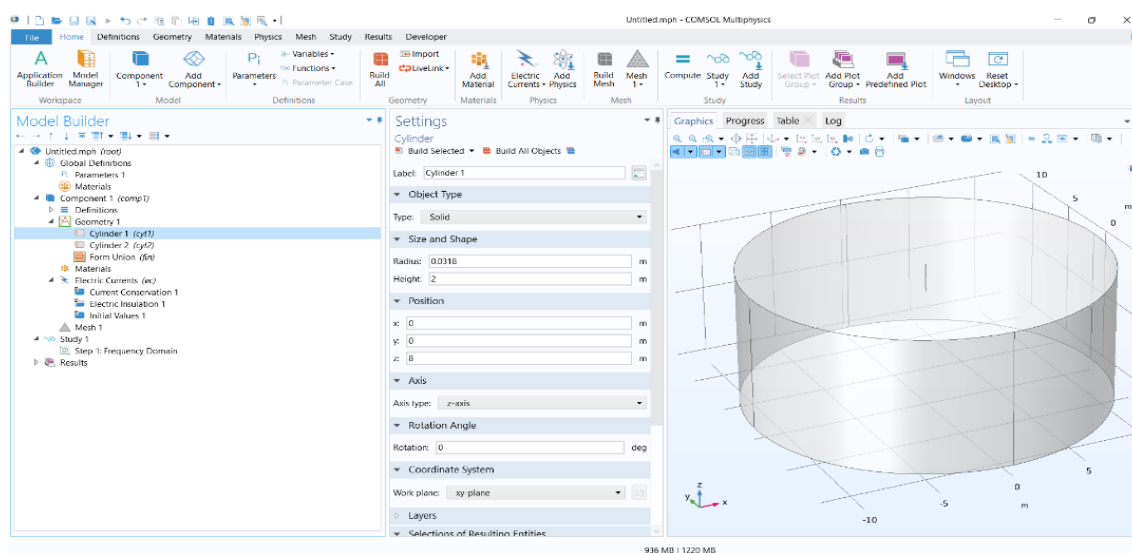
ขั้นตอนที่ 2: การสร้างและกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของโมเดล (Geometry)

ขั้นตอนการตั้งค่า:

1.1 สร้างแท่งหลักดิน 1 แท่ง คลิกขวาที่ Geometry แล้วเลือก Cylinder1 ความยาว 2 เมตร

รัศมี 0.0318 เมตร โดยตำแหน่งของแท่งกราวด์อยู่เสมอกับบนผิวดิน $x=0, y=0, z=8$

1.2 สร้าง Domain ดิน คลิกขวาที่ Geometry แล้วเลือก Cylinder2 ความลึก 10 เมตร รัศมี 12 เมตร

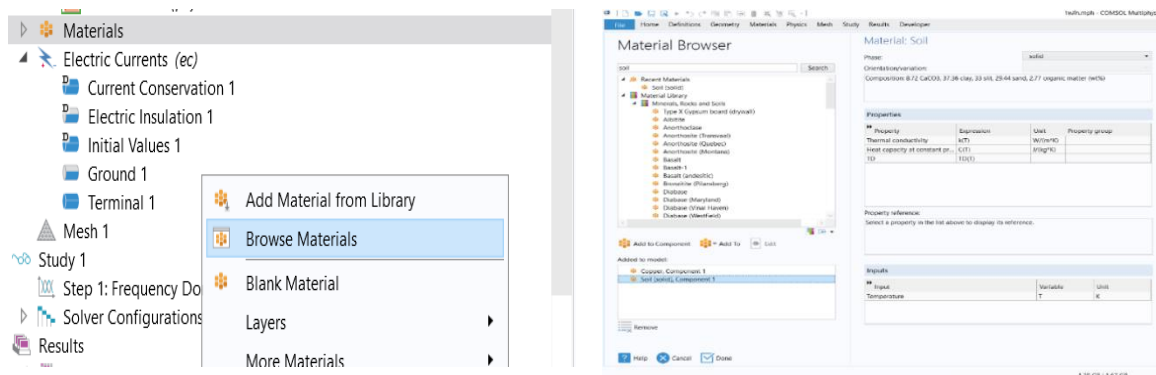


ภาพที่ 3.9 การสร้างและกำหนดรูปร่างเรขาคณิต

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดวัสดุ (Materials)

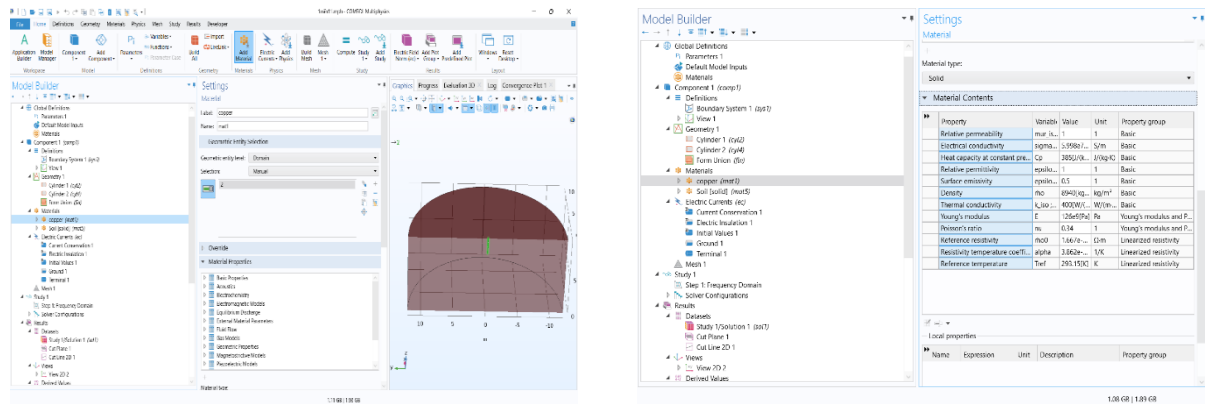
ขั้นตอนการตั้งค่า:

3.1 คลิกขวาที่ Materials เลือกที่ Browse Materials ให้ค้นหาคำว่า Copper และ Soil แล้วให้ กด Add To เพื่อจะนำมากำหนดคุณสมบัติของโมเดล



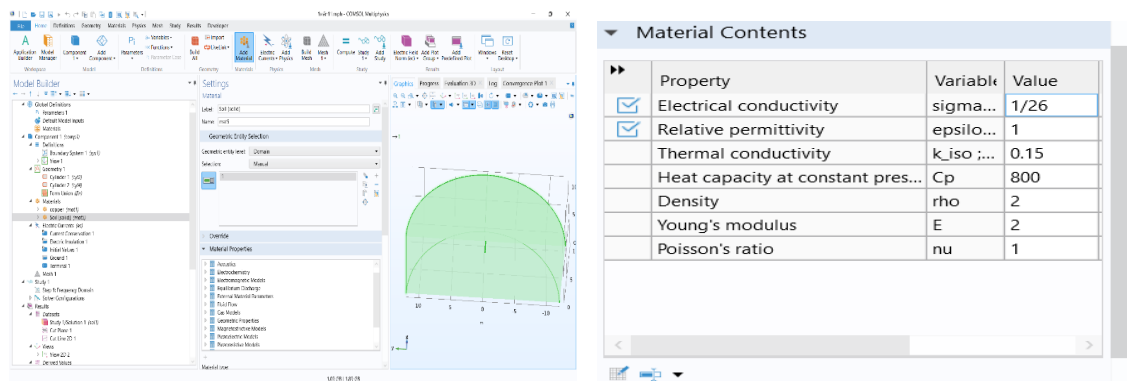
ภาพที่ 3.10 การค้นหาคุณสมบัติที่จะเลือกใช้

3.2 คุณสมบัติให้แท่งหลักดิน (Cylinder1) คือ ทองแดงและ คุณสมบัติของวัสดุ



ภาพที่ 3.11 การกำหนดคุณสมบัติของทองแดง

3.3 กำหนดคุณสมบัติพื้นที่ทั้งหมด (Cylinder2) ให้เป็นดินและ คุณสมบัติของดิน

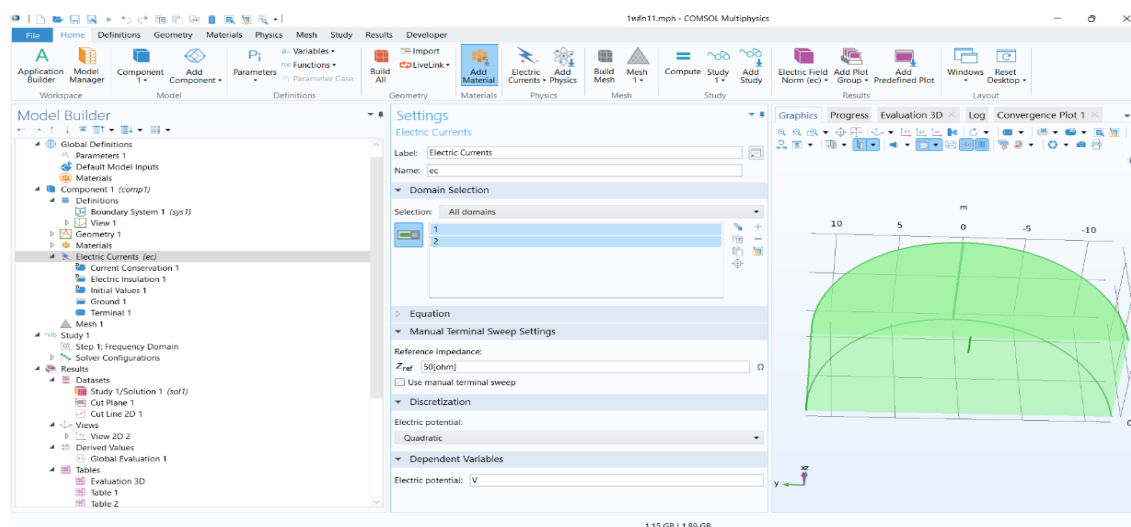


ภาพที่ 3.12 การกำหนดคุณสมบัติของดิน

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดขอบเขตไฟฟ้า (Boundary Conditions)

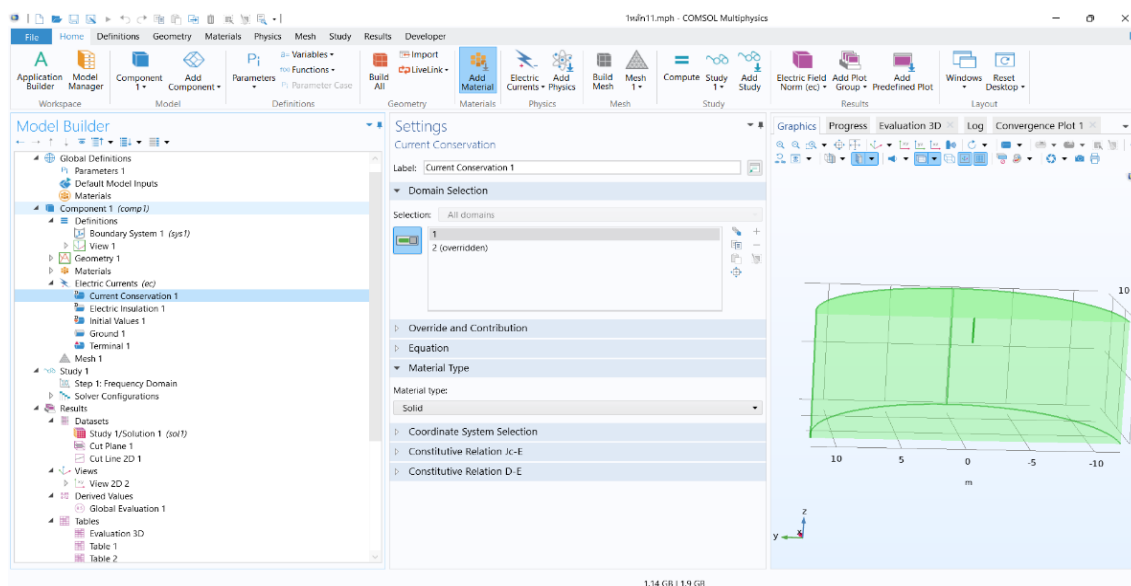
ขั้นตอนการตั้งค่า:

4.1 Electric Currents (ec) พื้นผิวทั้งหมดของโมดูลหลักสำหรับการจำลองการนำไฟฟ้าในตัวนำใช้กฎของโอห์มและกฎการอนุรักษ์ประจุโดยจะคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้า V และกระแส J



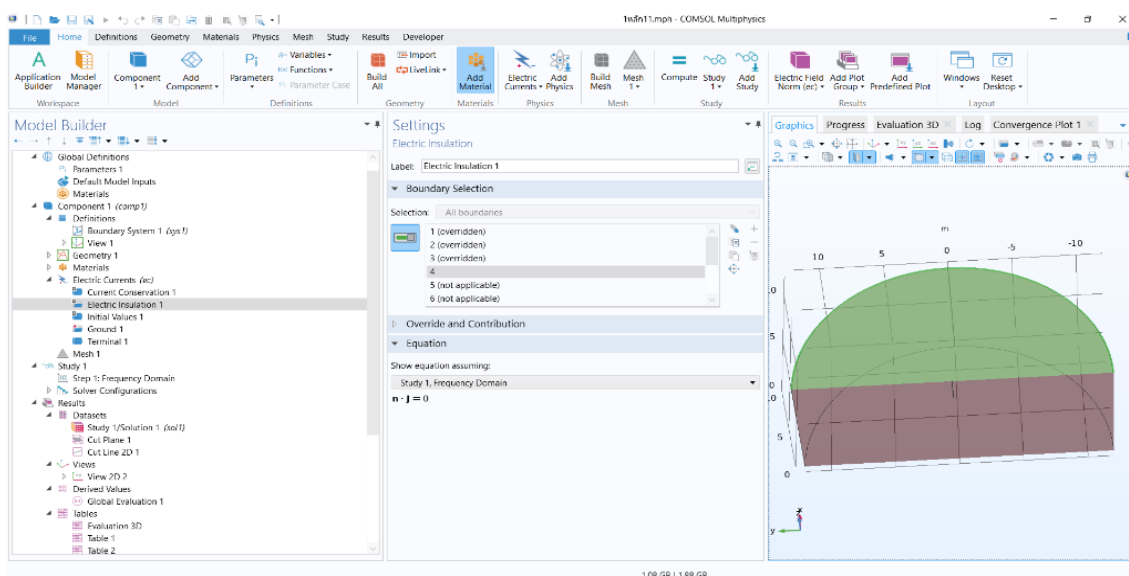
ภาพที่ 3.13 การกำหนดพื้นผิวทั้งหมดของโมดูลหลักสำหรับการจำลองการนำไฟฟ้าในตัวนำ

4.2 Current Conservation 1 หมายถึง พื้นผิวทั้งหมดรวมถึงแท่งกราวด์ ประจุไม่สามารถสูญหายได้ – กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่จุดใดต้องเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากจุดนั้น (กฎของเคอร์ชอฟฟ์) นี่คือสมการหลัก: $\nabla \cdot J = 0$



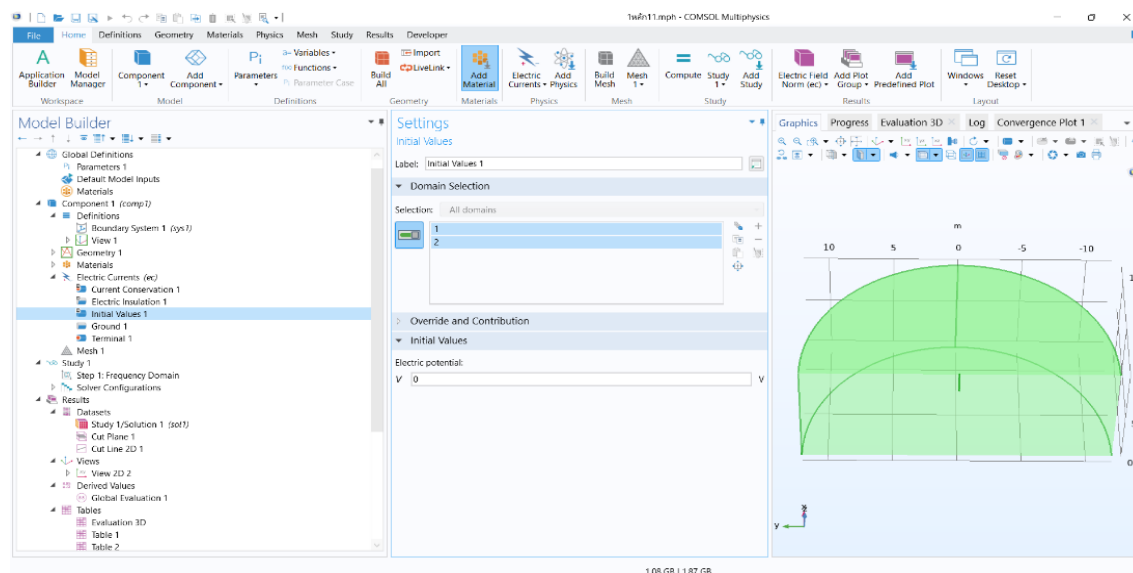
ภาพที่ 3.14 การกำหนดพื้นผิวทั้งหมดรวมถึงแท่งกราวด์ประจุไม่สามารถสูญหายได้

4.3 ElectricInsulation1 ขอบเขตพื้นผิวด้านบนนี้จะตั้งค่าให้ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านพื้นผิวนั้นใช้กับพื้นผิวด้านข้างหรือด้านบนของโดเมนที่เราต้องการ“จำลองว่าไม่มีการไหลของกระแส” สมการที่ใช้คือ: $n \cdot J = 0$



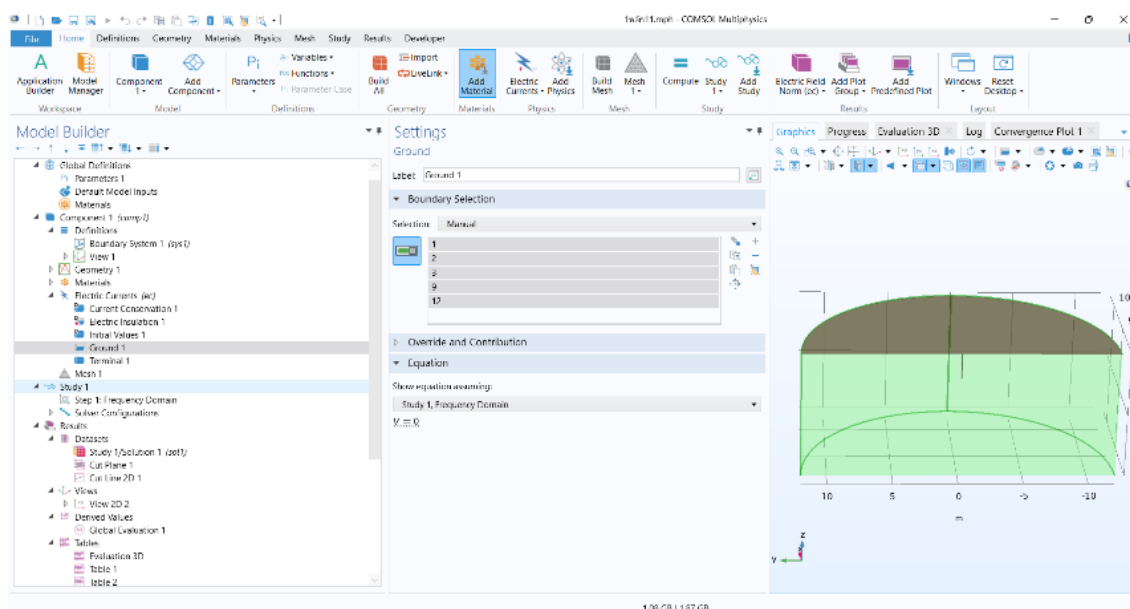
ภาพที่ 3.15 การกำหนดพื้นผิวด้านบนไม่ให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านพื้นผิว

4.4 InitialValues1 ใช้พื้นผิวทั้งหมดกำหนดค่าเริ่มต้นของศักย์ไฟฟ้า V ก่อนเริ่มการคำนวณ โดยทั่วไปใช้ค่า $V=0$ ทุกจุดเว้นแต่คุณมีเงื่อนไขเฉพาะที่อยากเริ่มจากค่าที่ต่างออกไป



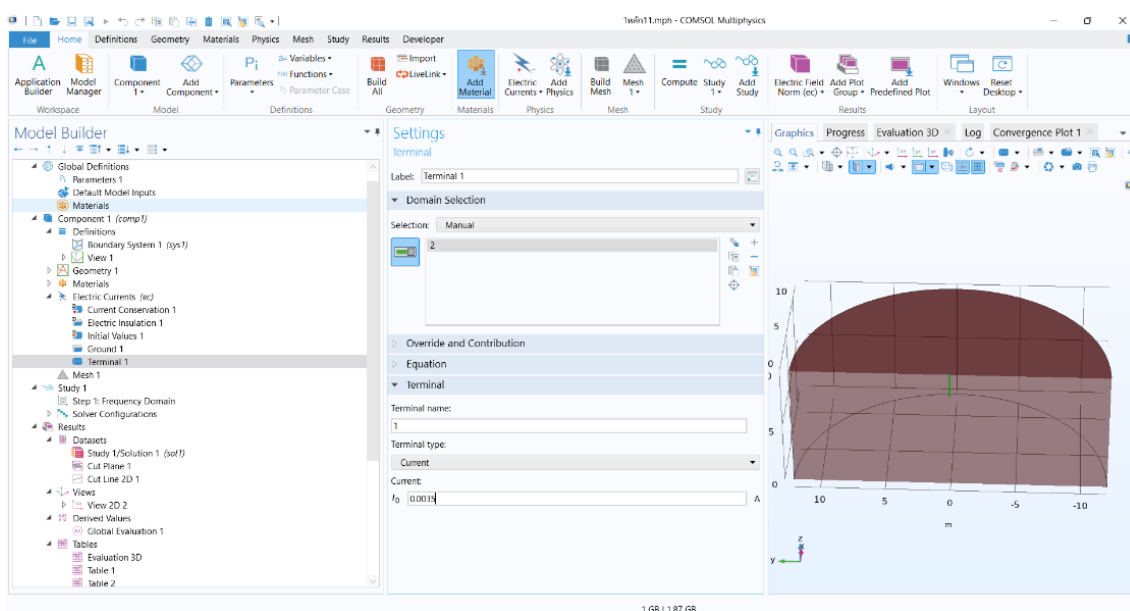
ภาพที่ 3.16 การกำหนดพื้นผิวทั้งหมดให้ค่า $V=0$

4.5 Ground1กำหนดให้พื้นที่ผิวด้านข้างและด้านใต้ของดินยกเว้นด้านบนที่เลือกให้หุ้มศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ (0V) ใช้เป็น "จุดอ้างอิง" ทางไฟฟ้า คล้ายกับ “ดิน” ในระบบไฟฟ้าจริงต้องมีอย่างน้อยหนึ่ง Ground เสมอในการจำลองแบบนี้



ภาพที่ 3.17 กำหนดพื้นผิวด้านข้างและด้านล่างให้เป็นกราวด์

4.6 Terminal1 ใช้กำหนดจุดที่เราป้อนกระแสไฟฟ้าในกรณีคือกำหนดกระแสไฟฟ้าให้กับแท่งหลักดิน $I_0=0.0035$ A โดย Electric current (กระแสคงที่)



ภาพที่ 3.18 กำหนดกระแสเพื่อป้อนให้กับแท่งหลักดิน

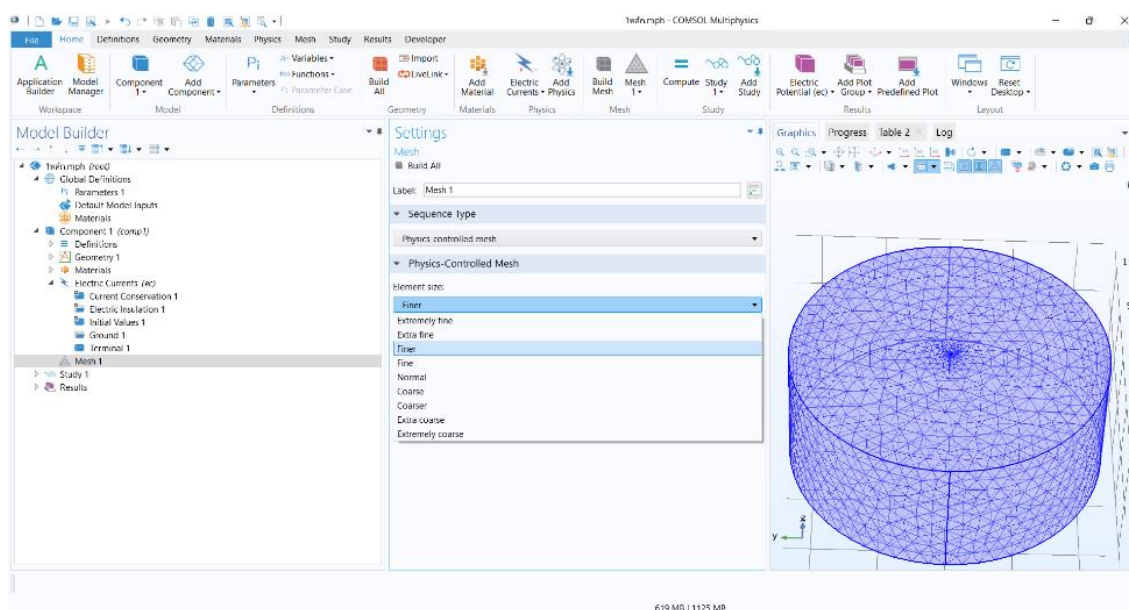
ขั้นตอนที่5 : Mesh1 การตั้งค่าตาข่ายจะกำหนดความละเอียดของตาข่ายองค์ประกอบไฟไนต์ (Finite Element Mesh) ที่ใช้ในการแบ่งแบบจำลอง วิธีองค์ประกอบไฟไนต์จะแบ่งแบบจำลองออกเป็นองค์ประกอบเล็กๆ ของรูปทรงเรขาคณิตที่เรียบง่าย ซึ่งในกรณีนี้คือ เตตระฮีดรอน (Tetrahedron)

ในแต่ละเตตระฮีดรอนจะใช้ชุดฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Functions) เพื่อประมาณค่าขอบเขตการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ซึ่งหมายถึงวัตถุจะเสียรูปไปเล็กน้อยเพียงใดในแต่ละทิศทางของพิกัด โดยการแยกความแตกต่างของขอบเขตการเคลื่อนตัวนั้น

ขั้นตอนการตั้งค่า:

5.1 ใน Model Builder ภายใต้ Component 1 ให้คลิก Mesh 1 ในหน้าต่าง Settings สำหรับ Mesh ภายใต้ Mesh Settings ให้เลือก Finer จากรายการ Element size

5.2 หลังจากผ่านไปสองสามวินาทีตาข่ายจะปรากฏในหน้าต่างกราฟฟิกให้หมุนเพื่อดูการกระจายขนาดองค์ประกอบ (หมายเหตุ: การกระจายของตาข่ายอาจแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับเวอร์ชันของซอฟต์แวร์ที่คุณใช้งาน)



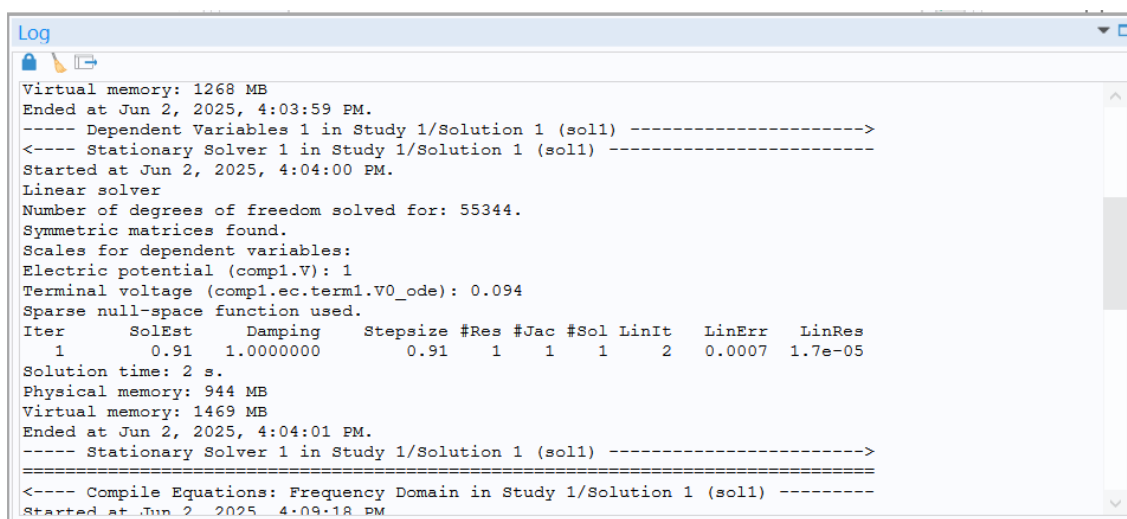
ภาพที่ 3.19 การกำหนดความละเอียดของตาข่ายองค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 6 : Study1 ในตอนเริ่มต้นของการตั้งค่าแบบจำลอง คุณเลือกการศึกษาหรือการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยตั้งค่า (Frequency Domain 128 Hz) ซึ่งหมายถึงซึ่งใช้ในการจำลองพฤติกรรมของระบบเมื่อถูกรบกวนด้วย สัญญาณไซน์ความถี่คงที่ หรือ โหลดที่มีลักษณะเป็นคลื่นความถี่เฉพาะ

ขั้นตอนการตั้งค่า:

6.1 คลิกขวาที่ Study 1 แล้วเลือก Compute (หรือกดปุ่ม F8 บนแป้นพิมพ์)หลังจากเวลาคำนวณผ่านไปสองสามวินาที ผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟจะแสดงขึ้นใน หน้าต่าง Graphics ในระหว่างการคำนวณ:หน้าต่าง Progress จะแสดงข้อมูลความคืบหน้าจากตัวแก้ปัญหแบบเรียลไทม์หลังจากการคำนวณเสร็จสิ้นคุณสามารถตรวจสอบข้อมูลและข้อความเพิ่มเติมได้ในแท็บ Messages and Log ซึ่งอยู่ภายใต้หน้าต่าง Graphics

6.2 หน้าต่างเพื่อดูข้อมูลประเภทต่างๆ ที่คุณสามารถเข้าถึงได้ หน้าต่างของความสามารถเปิดได้จากรายการดรอปดาวน์ Windows ในแท็บหน้าแรกของริบบิ้น



ภาพที่ 3.20 การแสดงค่าหน้าต่างเริ่มการทำงาน

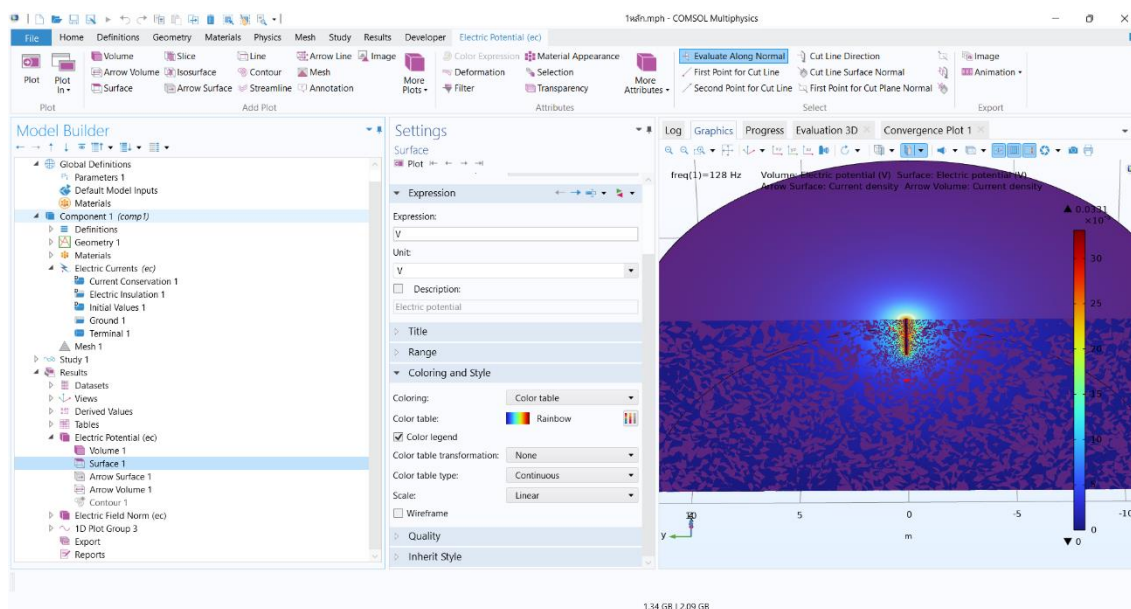
ขั้นตอนที่ 7: Results

- Results คือ ส่วนแสดงผลลัพธ์ ของการคำนวณจำลอง (simulation) ภายใต้ Results สามารถแสดง กราฟ 2D / 3D คำนวณ ค่าที่ได้จากผลลัพธ์ เช่น ค่าเฉลี่ย จุดสูงสุด หรืออินทิกรัล สร้างตาราง, แผนภูมิ หรือรายงานในภาพมีหลาย plot group ซึ่งเป็นการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบต่างๆ
- Electric Potential (ec) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า (V) ที่ได้จากการคำนวณในฟิสิกส์ Electric Currents (ec) จากในภาพกำลังศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบ 3D Plot เป็นผลจากการจำลองแบบ Frequency

Domain ที่ความถี่ 128 Hz ศักย์ไฟฟ้านี้แสดงเป็นสี (Colormap) บนเรขาคณิตของโมเดล ใช้เพื่อดูว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่าไรในแต่ละจุดของวัสดุ

- Volume 1 คือ เป็นการแสดงผลแบบปริมาตร (3D Volume Plot) ใช้สำหรับแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อวัสดุ (เช่น ด้านในของทรงกระบอก, ดิน, แท่งหลักดิน ฯลฯ) สีที่แสดงจะบ่งบอกระดับของศักย์ไฟฟ้าใน จุดต่าง ๆ ภายในชิ้นงานเหมาะสำหรับการดูการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าในเชิงลึกจากรูปที่...โมเดลเป็นดินที่มีแท่งหลักดินฝังอยู่ข้างใน Volume 1 จะแสดงศักย์ไฟฟ้า ทั่วเนื้อดินและวัตถุ
- Surface 1 คือ เป็นการแสดงผลบนพื้นผิวเท่านั้น (2D Surface Plot บนผิว 3D) ใช้แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะ บริเวณพื้นผิวของวัตถุหรือขอบเขต (boundary) เช่น ผิวทรงกระบอกด้านนอก, ผิวชั้นบนสุดของดิน ฯลฯ มีประโยชน์มากที่ต้องการให้ผลลัพธ์ที่ แสดงเฉพาะบนผิวด้านนอก ดูว่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวนำหรือผิวดินกระจายตัวอย่างไร

7.1 ใน Model Builder ให้กดคลิกขวาที่ Results แล้วเลือก Electric Potential (ec) จากนั้นคลิกขวาที่ Electric Potential (ec) แล้วเลือก Surface 1 แล้วกด Plot ใช้เพื่อดูว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่าไรในแต่ละจุดของวัสดุ

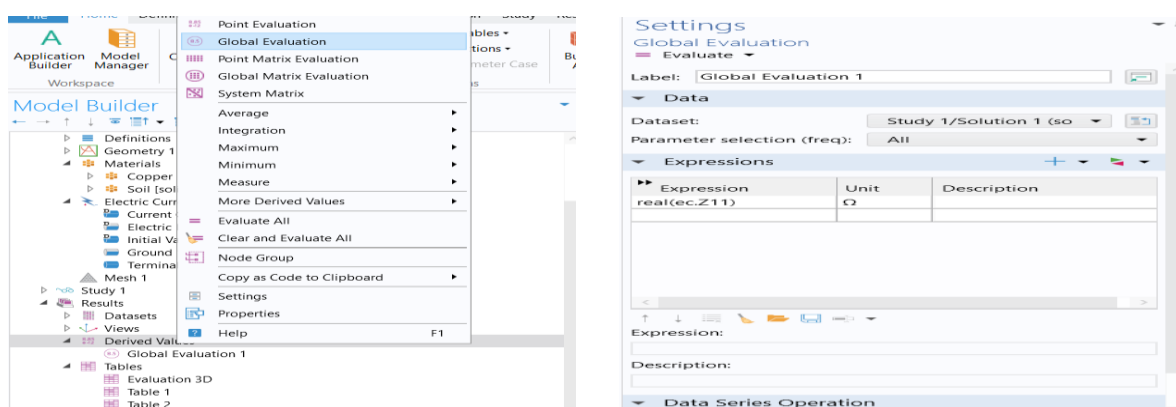


ภาพที่ 3.21 การแสดงกราฟฟิกส์หน้าตาโมเดล 3 มิติ

7.2 กดคลิกขวาที่ Derived Values แล้วเลือก Global Evaluation 1 ไปที่ Setting Global Evaluation แล้วป้อนคำสั่ง real(ec.Z11) ใน Expression ของ Global Evaluation 1 คำสั่งนี้เพื่อใช้หา ค่า ความต้านทานจริง (Real Resistance) ที่ขั้วแท่งหลักดิน (Terminal 1) ซึ่งจะได้ในหน่วย โอห์ม (Ω)

Derived Values คือ หมากรวมฟังก์ชันหาค่าผลลัพธ์เชิงปริมาณ ใช้เมื่อต้องการหาค่าที่มีความหมาย เช่น ค่าเฉลี่ย, ค่าสูงสุด, ค่าเฉพาะจุด ฯลฯ

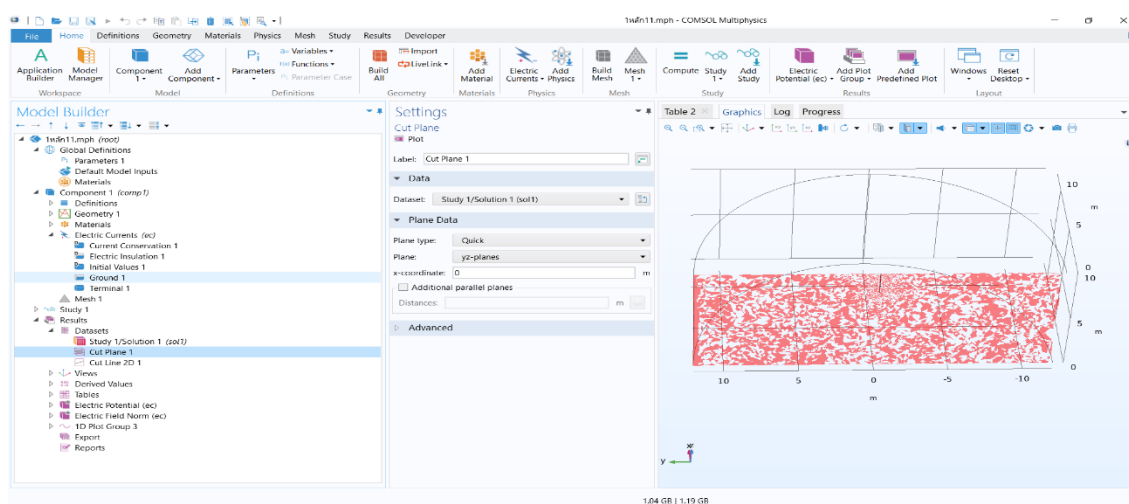
Global Evaluation คือ หาค่าจากพารามิเตอร์หรือตัวแปรเฉพาะที่ระดับโมเดล ใช้เมื่อต้องการดูค่าที่จุดเดียว เช่น ศักย์ที่ตำแหน่งหนึ่ง



ภาพที่ 3.21 ป้อนคำสั่งเพื่อหาค่าความต้าน

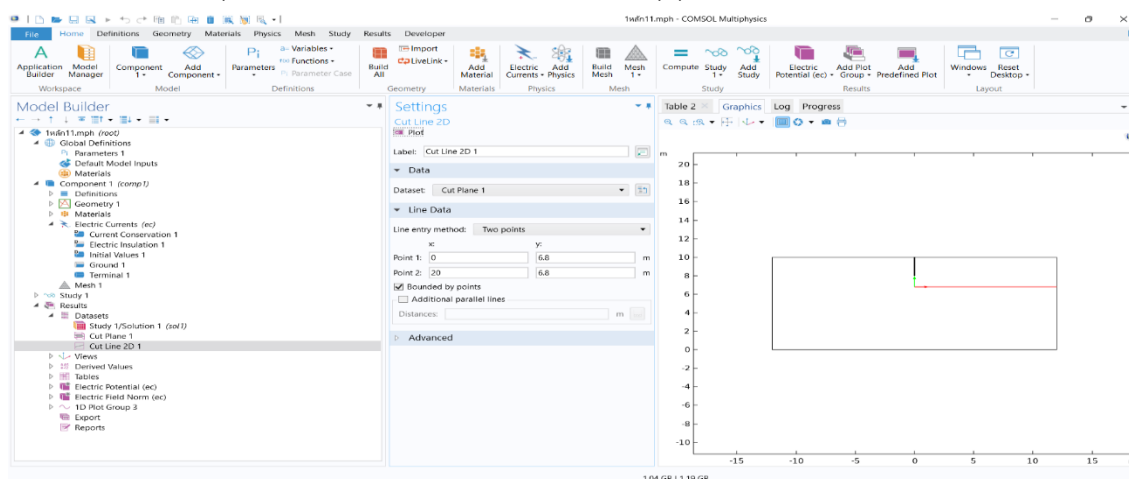
ขั้นตอนที่8: Datasets คือข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการใน Study (การศึกษา/จำลอง) เมื่อคุณกด Compute แล้ว COMSOL จะเก็บผลลัพธ์ไว้ใน Dataset เพื่อใช้สร้างกราฟ, ตาราง, แสดงภาพ, คำนวณค่าต่างๆ

8.1 กดคลิกขวา Datasets ใน Results แล้วเลือก Cut Plane 1 แล้วกด Plot ใน Graphics จะตัดพื้นที่สามมิติ (3D) ออกมาเป็นระนาบ 2 มิติ (2D) ใช้เพื่อลดความซับซ้อน และดูการกระจายของปริมาณต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า ในระดับระนาบ



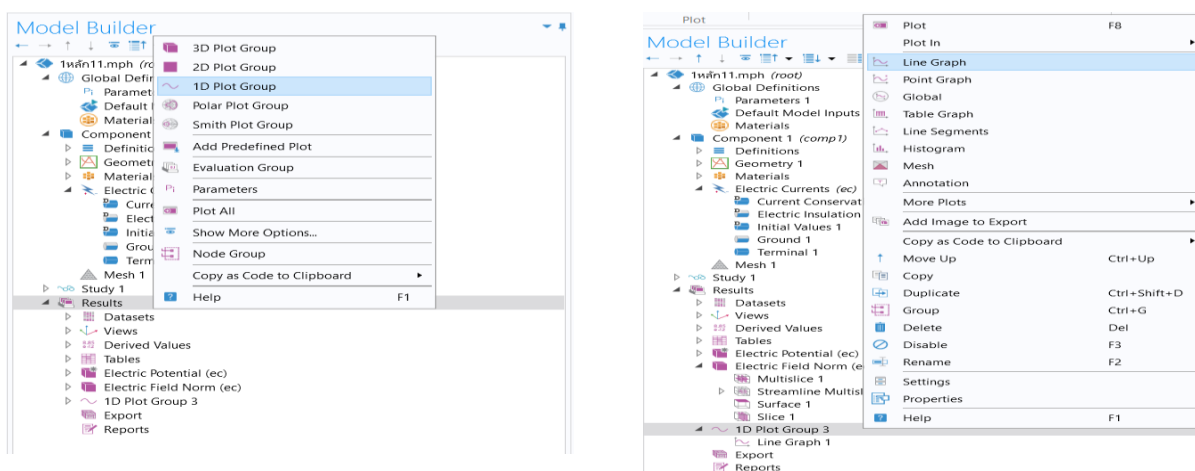
ภาพที่ 3.22 การตัดพื้นที่ออกมาเป็นระนาบ 2 มิติเพื่อสร้างกราฟ

8.2 กดคลิกขวา Datasets ใน Results แล้วเลือก Cut Line 2D 1 แล้วกด Plot คือเส้นตรงที่คุณวาดบน Cut Plane เพื่อนำค่าตามแนวเส้นนั้นไปแสดงในรูปกราฟตำแหน่งจุดเริ่มต้น Point 1 = (0, 6.8) ตำแหน่งจุดสิ้นสุด Point 2 = (20, 6.8) กำลังวัดศักย์ไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระดับ y = 6.8 m (บนระนาบ Cut Plane 1) ผลลัพธ์คือกราฟ Electric Potential (V) แสดงตามระยะทางบนเส้นนี้



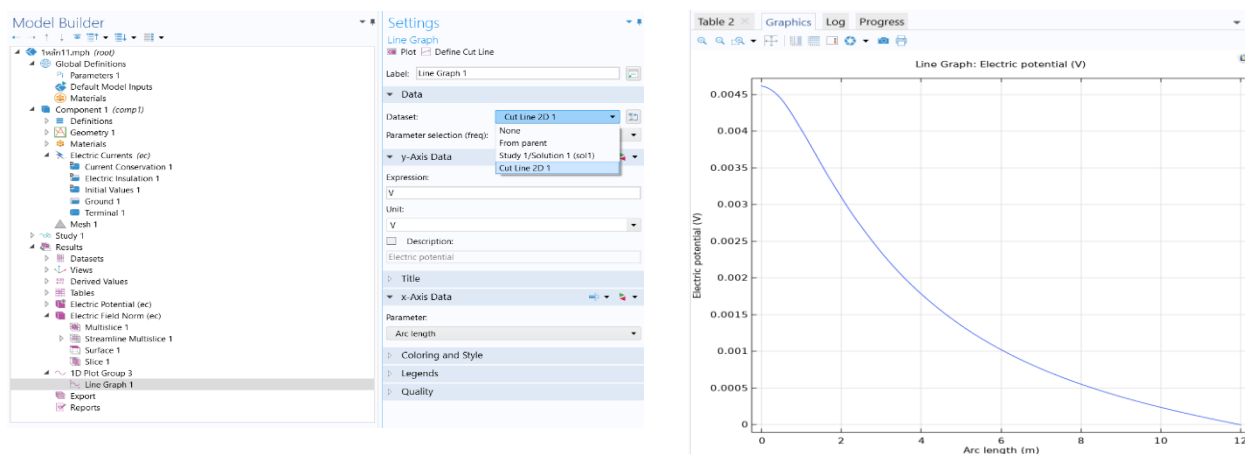
ภาพที่ 3.23 นำค่าตามแนวเส้นนั้นไปแสดงในรูปกราฟ

8.3 กดคลิกขวา Results แล้วเลือก 1D Plot Group 3 คือกลุ่มแสดงผลกราฟเส้น (1 มิติ) สำหรับแสดงผล ค่าต่าง ๆ ตามเส้น แล้วกดคลิกขวาเลือก Line Graph 1 เป็นกราฟเส้นในกลุ่ม 1D Plot Group 3 มันแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟเส้น โดยแกน X คือระยะทางตามเส้นตัด (Arc length) แกน Y คือ ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential: V)



ภาพที่ 3.24 การเลือกแสดงกราฟในแต่ละแบบ

8.4 Setting Line Graph 1 ในหน้าต่าง Settings Line Graph ใช้ข้อมูลจาก Cut Line 2D 1 โดยแกน y-Axis Data: ใส่ V หมายถึงแสดง “ค่าศักย์ไฟฟ้า” เป็นแกนตั้ง x-Axis Data: คือ Arc length (ระยะตามแนวเส้น)และจากการแสดงค่าหน้าGraphics แกน X (แนวนอน): Arc length (หน่วยเมตร) ระยะห่างตามเส้นที่คุณสร้างบน Cut Plane แกน Y (แนวตั้ง): Electric Potential (V) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นนั้น



ภาพที่ 3.25 เลือก Cut Line 2D 1 เพื่อแสดงกราฟ

8.5 ถ้าหากต้องการที่จะเพิ่มแท่งหลักดินให้กลับไปสร้างและกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของโมเดลของแท่งหลักดินเพิ่มตามขั้นตอนที่ 2-8 แต่ต้องกำหนดความยาวแท่งหลักดิน รัศมีและ ระยะห่างของแท่งหลักดินแต่ละแท่งโดยต้องกำหนดตำแหน่งของแท่งหลักดินอยู่เสมอกับบนผิวดิน $x=0, y=0, z=8$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การจัดทำโครงงานวิจัย การติดตั้งและการออกแบบระบบสายดินโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยในการทดสอบจะมีการเปรียบเทียบหาค่าความต้านทานของแท่งหลักดินแบบต่างๆ

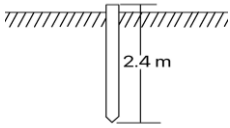
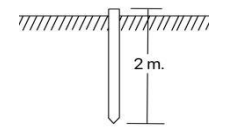
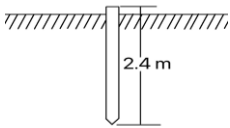
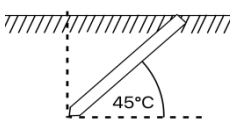
4.1 ผลจากวัดค่าความต้านทานของหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

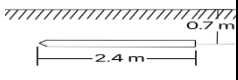
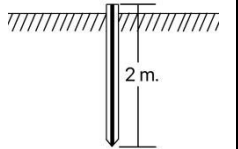
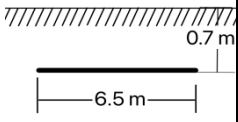
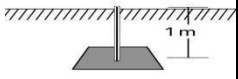
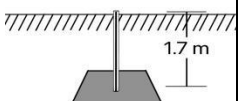
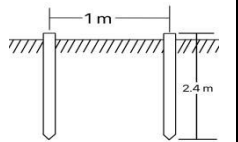
4.2 ผลจำลองโมเดลและค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองโปรแกรม Comsol multi physics

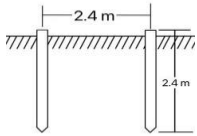
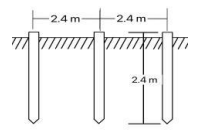
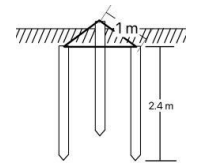
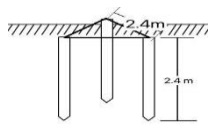
4.3 นำผลจำลองโมเดลและค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแท่งหลักดินที่ได้จากเครื่องวัด

4.1 ผลจากวัดค่าความต้านทานของหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางที่ 4-1 ตารางเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ได้จากการวัด 1 ครั้ง

ตารางค่าความต้านทานของแท่งหลักดินและ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัด ลงพื้นที่วัดในวันที่ 13 มีนาคม 2568					
หมายเลข ของหลัก (No.)	ขนาด (นิ้ว)/ความ ยาว (เมตร)	รูปแบบ	ค่าความต้านทาน จากการวัด	ค่าความต้านทาน จากการคำนวณ	ค่าความต้านทาน จากการจำลอง
1	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	13.6	10.5	-
2	5/8 in x 2. m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	15	12.2	-
3	4/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	14.6	12.7	-
7	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง เอียง 45 องศา	13.4	-	-

8	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดงฝัง ดินแนวนอน	14.9	9.7	-
6	2 ½ x 2 m.	 เหล็กแบบแฉกหลัก เดียว	11.7	9.3	9.46
11	1x35mm ² x 6.5 m.	 แบบสายไฟฝังดิน	21.1	-	-
9	40x50 cm ² X 1 m.	 แบบแผ่นเพลท	12.9	-	-
10	40x50cm ² X 1.7 m.	 แบบแผ่นเพลท	9.7	-	-
15-16	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	7.9	8	-

1-14	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	7.2	7.2	-
1-14-15	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	5	4.2	4.12
15-16-17	5/8 in x 1 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	5.7	4.7	-
1-14-18	5/8 in x 2.4 m.	 เหล็กหุ้มทองแดง	4.5	4.2	3.97

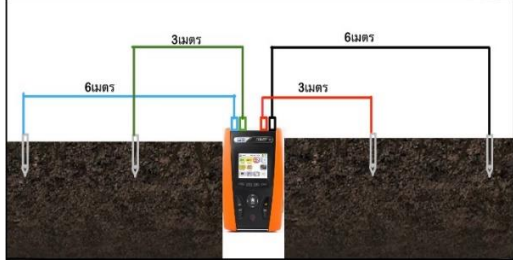
จากตารางที่ 4-1 จะสรุปได้ว่า

1. จากค่าความคลาดเคลื่อนของกราวด์มะเฟืองหลักเดียว ค่าความต้านทานจากการวัดและค่าความต้านทานจากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 20% ค่าจากการจำลองและค่าจากการวัดอยู่ที่ 19% ค่าจากการคำนวณและค่าจากการจำลองอยู่ที่ 1% ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทั้งหมดอยู่ที่ 13%

2. จากค่าความคลาดเคลื่อนของ 3 หลักแนวตรง ค่าความต้านทานจากการวัดและค่าความต้านทานจากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 16% ค่าจากการจำลองและค่าจากการวัดอยู่ที่ 18% ค่าจากการคำนวณและค่าจากการจำลองอยู่ที่ 2% ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทั้งหมดอยู่ที่ 12%

3. จากค่าความคลาดเคลื่อนของสามเหลี่ยมเดลด้า ค่าความต้านทานจากการวัดและค่าความต้านทานจากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 6% ค่าจากการจำลองและค่าจากการวัดอยู่ที่ 11% ค่าจากการคำนวณและค่าจากการจำลองอยู่ที่ 5% ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทั้งหมดอยู่ที่ 7%

ตารางที่ 4-2 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัด ลงพื้นที่วัดในวันที่ 13 มีนาคม 2568

รูปแบบ	ระยะห่างระหว่างหลัก (เมตร)	ค่าความต้านทาน
		มิเตอร์ GSCO 60 HT (โอห์ม)
 วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	3	26

4.1.1 การหา R_0 ค่าความต้านทานของระบบสายดินทั้งหมด (Total Ground Resistance)
 ค่าความต้านทานรวมของแท่งโลหะลดลงประมาณ 10-15% ในขณะที่เมื่อต่อเพิ่มแท่งโลหะให้กับตัวนำจะทำให้ความต้านทานของตัวนำลดลงประมาณ 25-30% เท่านั้น ค่าความต้านทานเป็นไปตามทฤษฎีดังตารางที่ 4-3

คำอธิบายของตัวแปรในสูตรทั้งหมด

1. **ρ** ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน (Soil resistivity) หน่วย: โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)
2. **l** ความยาวของแท่งกราวด์ (Length of rod)
3. **r** รัศมีของแท่งกราวด์ (Radius of rod)
4. **w** ความกว้างของแท่งกราวด์ (เฉพาะในแบบแผ่นกราวด์)
5. **R** รัศมีของวงกลม (ใช้ในแบบวงกลมที่มีแท่งกราวด์กระจายอยู่รอบๆ)
6. **p** ระยะห่างระหว่างแท่งกราวด์ในแบบคู่ (Pair spacing)
7. **n** จำนวนแท่งกราวด์ที่ใช้
8. **$N(n)$** ฟังก์ชันผลรวมที่ใช้ในแบบกลุ่ม (Clustered rods) โดย:

$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left[\frac{1 + \sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)}{\sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)} \right] \quad (4.1)$$

ค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ได้จากการคำนวณตามสูตร

แท่งเดี่ยวแนวตั้ง (Single Vertical Rod)

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

$$R_0 = \frac{26}{2\pi \times 2} \left[\ln \left(\frac{4 \times 2}{0.0318} \right) - 1 \right]$$

$$R_0 = 9.3 \, \Omega$$

ค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ได้จากการคำนวณตามสูตร

แท่งเดี่ยวแนวนอน (Single Vertical Rod)

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

$$R_{0n} = \frac{26}{\pi \times 2.4} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2.4}{\sqrt{2 \times 0.00794 \times 0.7}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{0n} = 9.7 \, \Omega$$

ค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ได้จากการคำนวณตามสูตร

แท่งกราวด์ 3 แท่งต่อแบบเดลต้าในกลุ่มเดียวกัน (Clustered Vertical Rods)

$$R_{0n} = \frac{\rho}{n\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 + N(n) \right] \quad (4.4)$$

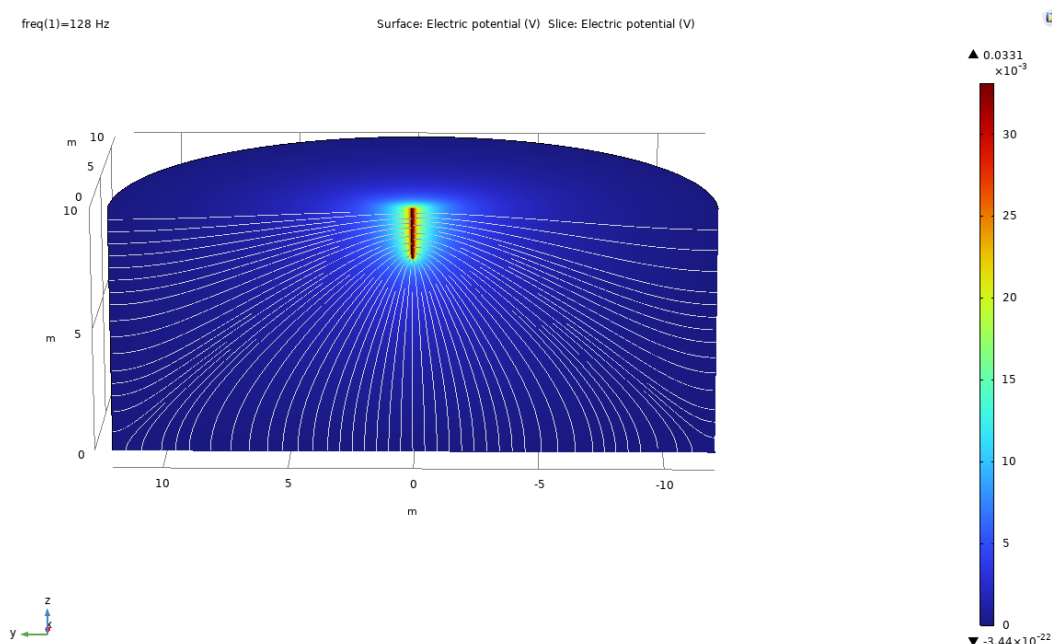
$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left[\frac{1 + \sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)}{\sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)} \right]$$

$$R_{0n} = \frac{26}{3\pi \times 2.4} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2.4}{\sqrt{2 \times 0.00794 \times 2.4}} \right) - 1 + 1.534 \right]$$

$$R_{0n} = 4 \, \Omega$$

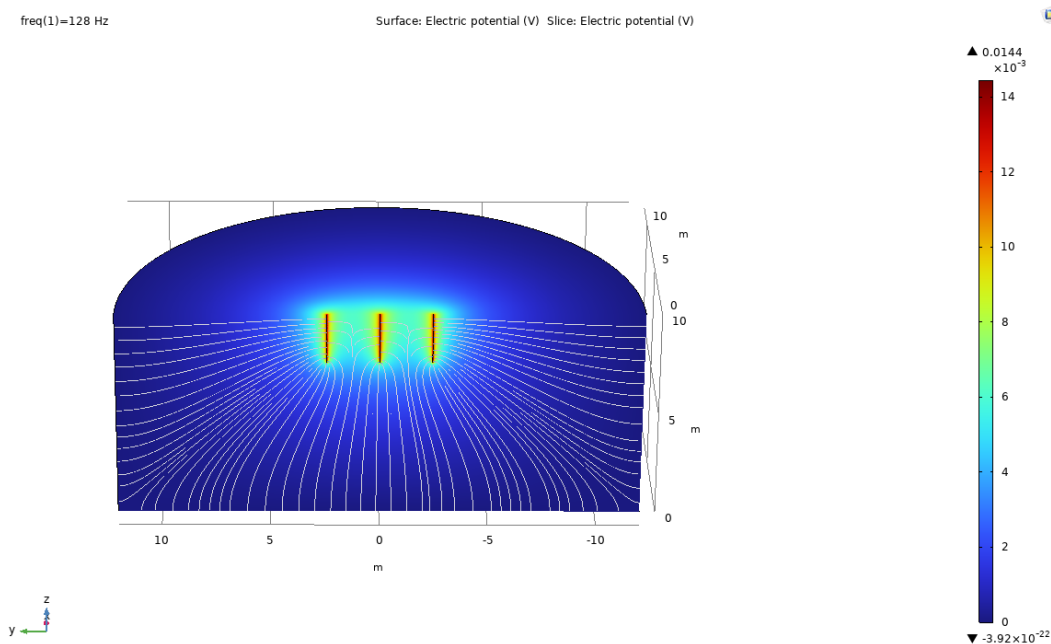
4.2 ผลจำลองโมเดลและค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองโปรแกรม Comsol multiphysics

4.2.1 ผลจากการจำลองโมเดลแท่งหลักดินแบบกราวด์มะเฟืองหลักเดียว ได้ค่าความต้านทานอยู่ที่ 9.463 โอห์ม จากตัวแปลการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ที่มีผลต่อค่าความต้านทานดังภาพที่ 4.6



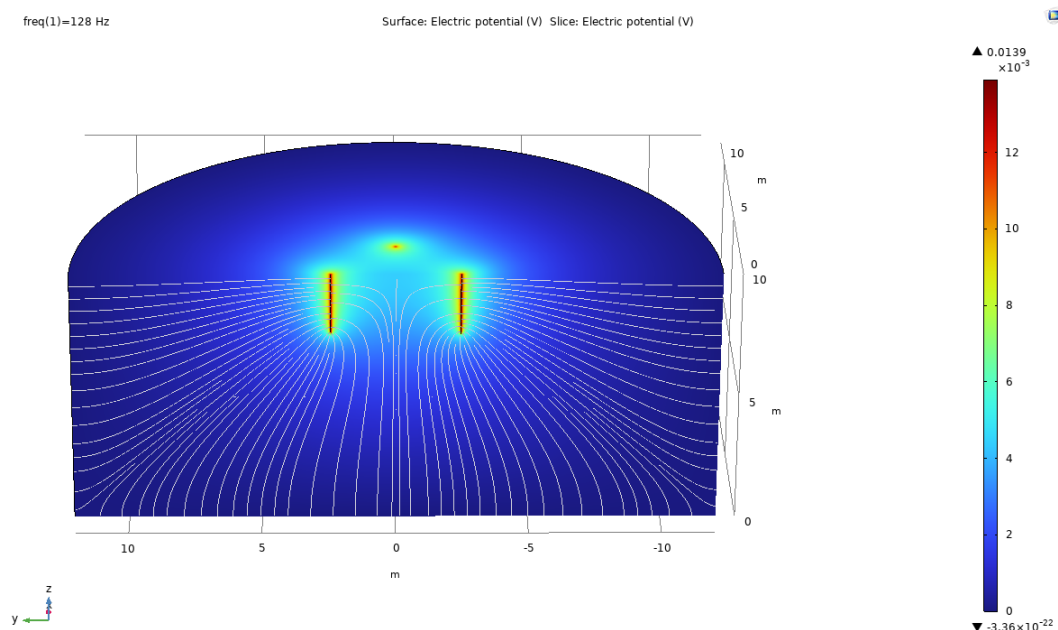
ภาพที่ 4.1 โมเดล 3 มิติ แบบกราวด์มะเฟือง หลักเดียว

4.2.2 ผลจากการจำลองโมเดลแท่งหลักดินแบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3 หลัก ได้ค่าความต้านทานอยู่ที่ 4.128 โอห์ม จากตัวแปรการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ที่มีผลต่อค่าความต้านทาน ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.3 โมเดล 3 มิติ แบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3 หลัก

4.2.3 ผลจากการจำลองโมเดลแท่งหลักดินแบบเหล็กหุ้มทองแดงสามเหลี่ยมเดลด้า 3 หลักได้ค่าความต้านทานอยู่ที่ 3.973 โอห์ม จากตัวแปรการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ที่มีผลต่อค่าความต้านทาน ดังภาพที่ 4.8



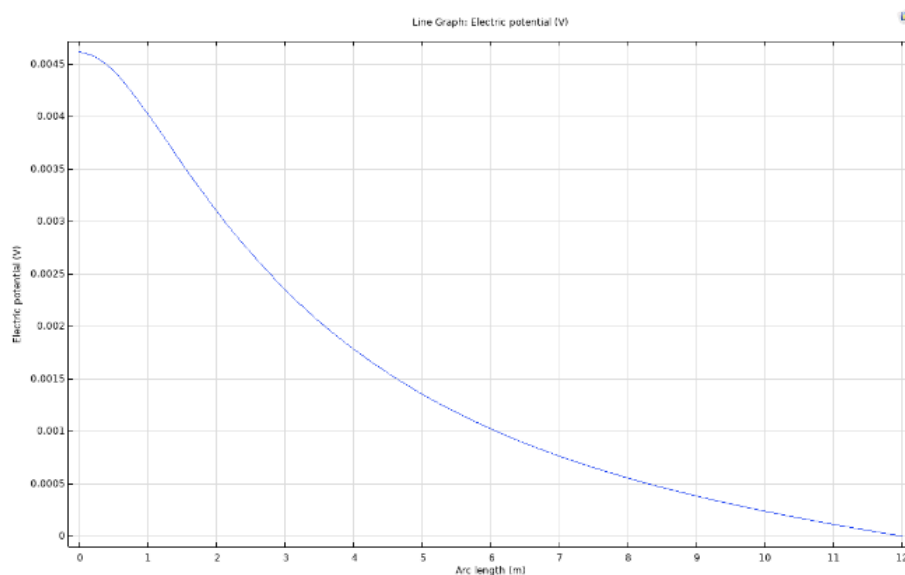
ภาพที่ 4.5 โมเดล 3 มิติ แบบเหล็กหุ้มทองแดงสามเหลี่ยมเดลด้า 3 หลัก

4.2.4 กราฟที่แสดงค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ทั้ง 3 รูปแบบ
กราฟจะแสดงค่า

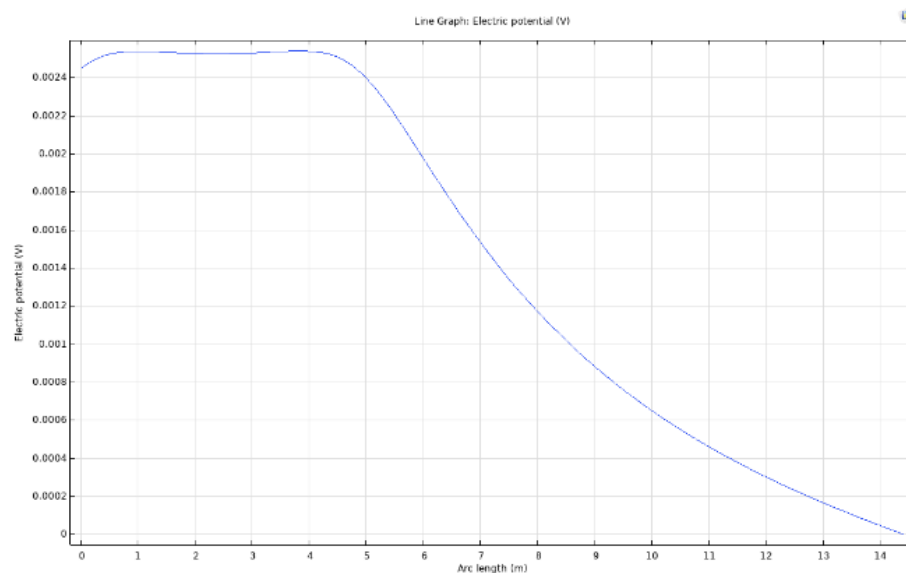
- แกน X (แนวนอน): Arc length (หน่วยเมตร) คือระยะห่างตามเส้นที่ผู้สร้างบน Cut Plane
- แกน Y (แนวตั้ง): Electric Potential (V) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นนั้น

ลักษณะกราฟ

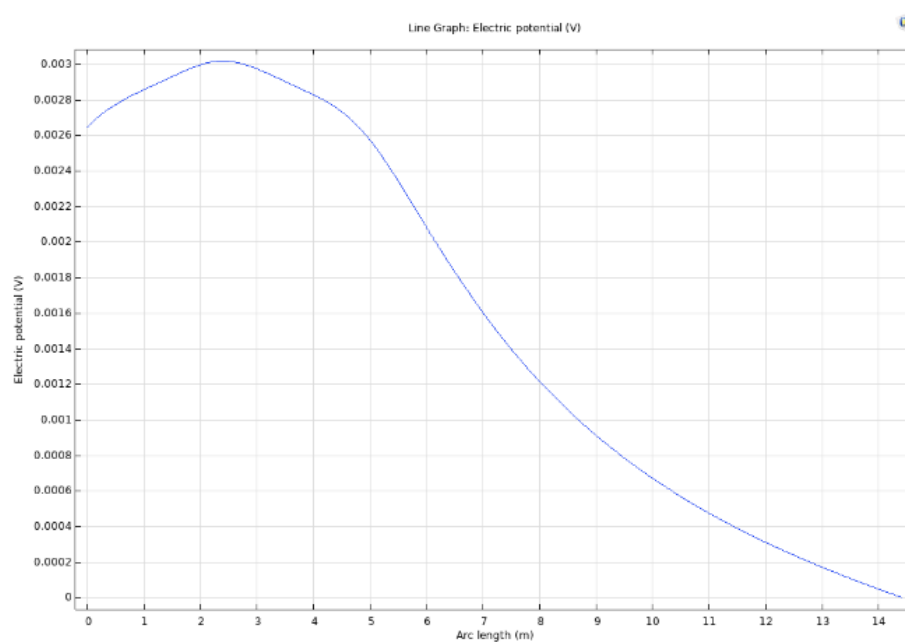
- เส้นกราฟเริ่มที่ ค่าศักย์สูง และค่อย ๆ ลดลง → แสดงว่า ศักย์ไฟฟาลดลงเมื่ออยู่ห่างจากแท่งกราวด์
- ลักษณะนี้แสดงถึงการ กระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์ Ground Resistance



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์ แบบกราวด์มะเฟือง หลักเดียว



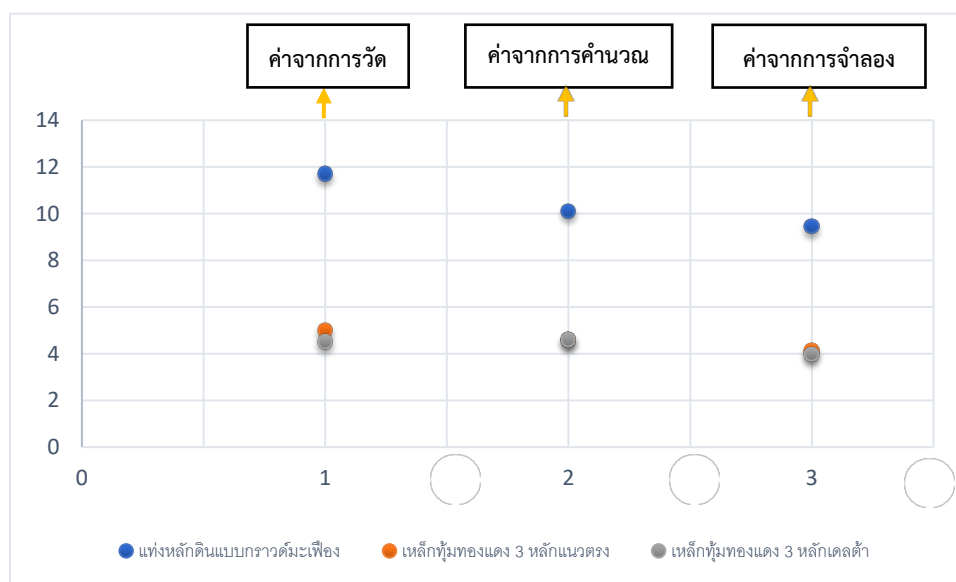
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์แบบเหล็กหุ้มทองแดงแนวตรง 3
หลัก



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้าในดินรอบแท่งกราวด์แบบเหล็กหุ้มทองแดงสามเหลี่ยม
เดลต้า 3 หลัก

4.2.5 การแสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแท่งหลักดินทั้ง 3 รูปแบบ โดยค่าที่นำไปแสดงในกราฟจะมีค่าความต้านทานในการลงพื้นที่วัดการคำนวณและจากการจำลองผ่านโปรแกรม โดยจะมี

- แกน X (แนวนอน): คือการหาค่าความต้านทานในแบบต่างๆ จากแนวแกน X หมายเลข 1 คือค่าความต้านทานที่ได้จากการวัด หมายเลข 2 คือค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณตามสูตร และ หมายเลข 3 คือค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม
- แกน Y (แนวตั้ง): คือค่าความต้านทานจากการวัดการคำนวณและ การจำลองผ่านโปรแกรม



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแท่งหลักดินทั้ง 3 รูปแบบ

ผลสรุปผลการทดลอง

- สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานของหลักดินเพิ่มขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับ ขนาดของหลัก ความยาวของหลัก รูปร่าง ประเภทของดิน ดินแต่ละประเภทมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น ดินเหนียว ดินทราย หรือดินร่วน
- จากการจำลองผ่านโปรแกรมจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานของแท่งหลักดินใกล้เคียงกับความเป็นจริง ที่ได้จากเครื่องวัดอาจะมีค่าความผิดพลาด 15 % ตามมาตรฐานเครื่องวัดของยี่ห้อที่ใช้และปัจจัยอื่นๆ

3. สรุปได้ว่าใช้แท่งกรวดปล่อยศักย์ไฟฟ้าจาก Terminal กระจายเข้าสู่ดินใกล้จุดต่อ (จุดแท่ง) จะมีศักย์สูงมาก เมื่อระยะเพิ่มขึ้นศักย์ไฟฟ้าจะลดลงตามธรรมชาติของการนำไฟฟ้าผ่านดิน (ซึ่งเป็นตัวต้านทาน)

4. สรุปได้ว่าผลจากตารางที่ 4-1 จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองค่าของความคลาดเคลื่อนเป็นไปทฤษฎีไม่เกินอยู่ที่ 20 %

บรรณานุกรม/อ้างอิง

- [1] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2544. **ทฤษฎีการศึกษาค่าความต้านทานดิน**, 4. มหาวิทยาลัยนเรศวร. สำนักงานหอสมุด
- [2] นาย ดนุรจน์ หมดหมื่น, นาย พลพล ขวัญทอง, นาย พิสิทธิ์พงษ์ เมื่อน้ำพราย. 2567. **ชุดสถิติการวัดค่าความต้านทานของหลักดิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาสาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรมคณะเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
- [3] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2560). **COMSOL Multiphysics เป็นซอฟต์แวร์จำลองทางวิศวกรรม**. [<https://en.wikipedia.org.com>]. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2568
- [4] ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์. 2565. การออกแบบและติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [5] THE KOP ENGINEER. (2563). เรียนรู้ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร. [<https://www.blockdit.com/>]. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2568
- [6] FAI FAH PRO. (2564). ทำไมต้องตอกหลักดินเป็นสามเหลี่ยม. [<https://www.faifahpro.biz/>]. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2568
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2542. **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [8] วิทิญ์ ดีสวัสดิ์, สมชาติ จิรวิจากร 2553. การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเมื่อพิจารณาโครงสร้างชั้นดินแบบ Nonuniform Soil โดยใช้โปรแกรม MATLAB. วิทยานิพนธ์ปริญญาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] ถิชา เลยหยุด, จิระสุนทร เมืองอินทร์, อภิวัฒน์ อักษรพิมพ์, พาททองแท้ ฤทธวรรณศรี (2567) ได้ **จัดทำกรวัดค่าความต้านทานหลักดินด้วยวิธี 3-Point และวิธี Clamp-On ในระบบหลักดินที่ต้องลงดินแบบแนวตรงและแบบตาข่าย**. วิทยานิพนธ์ปริญญา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- [10] นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ (2562). **ได้จัดทำกรออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยมีสองสถานีในบริเวณเดียวกัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

