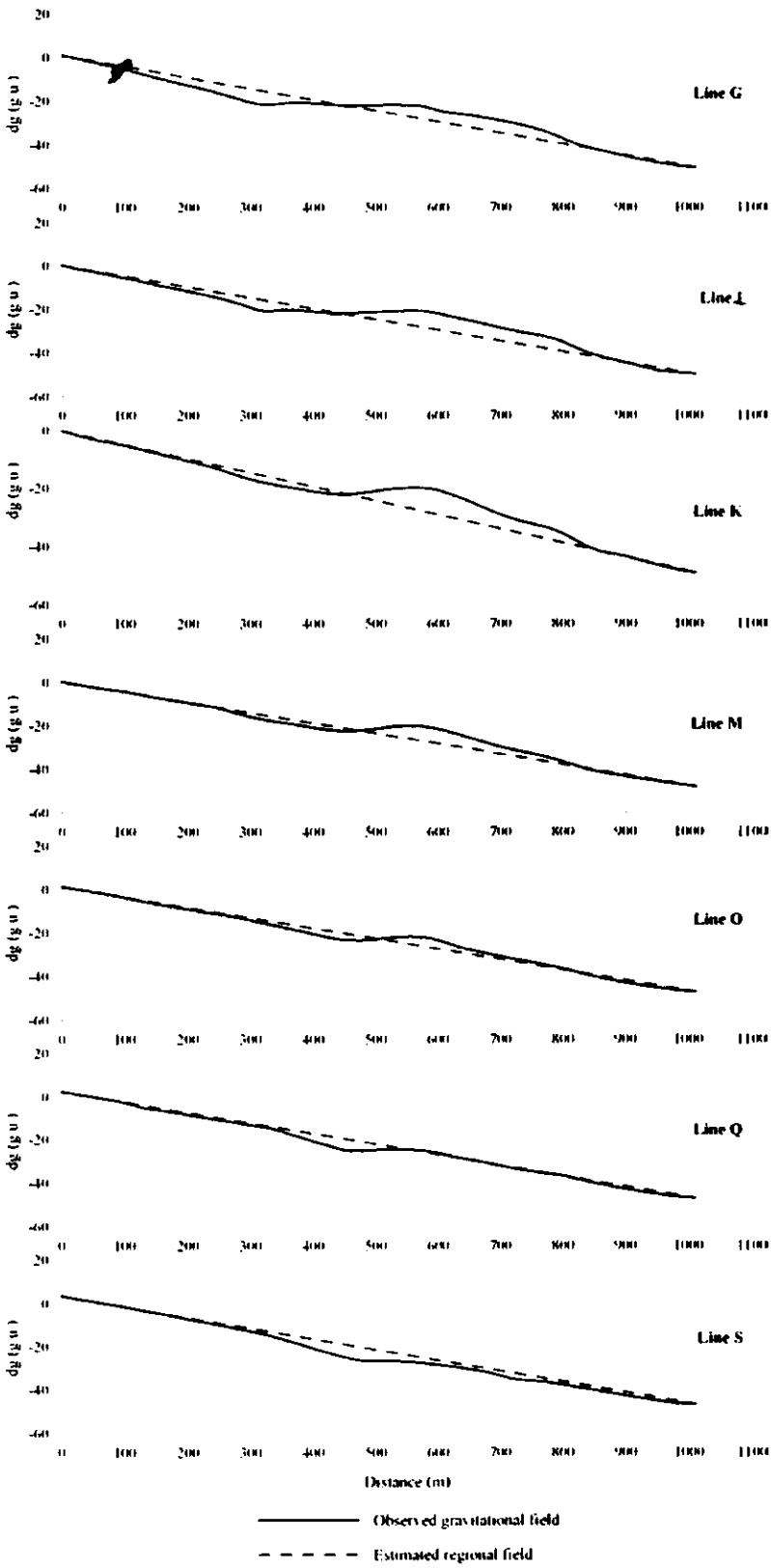
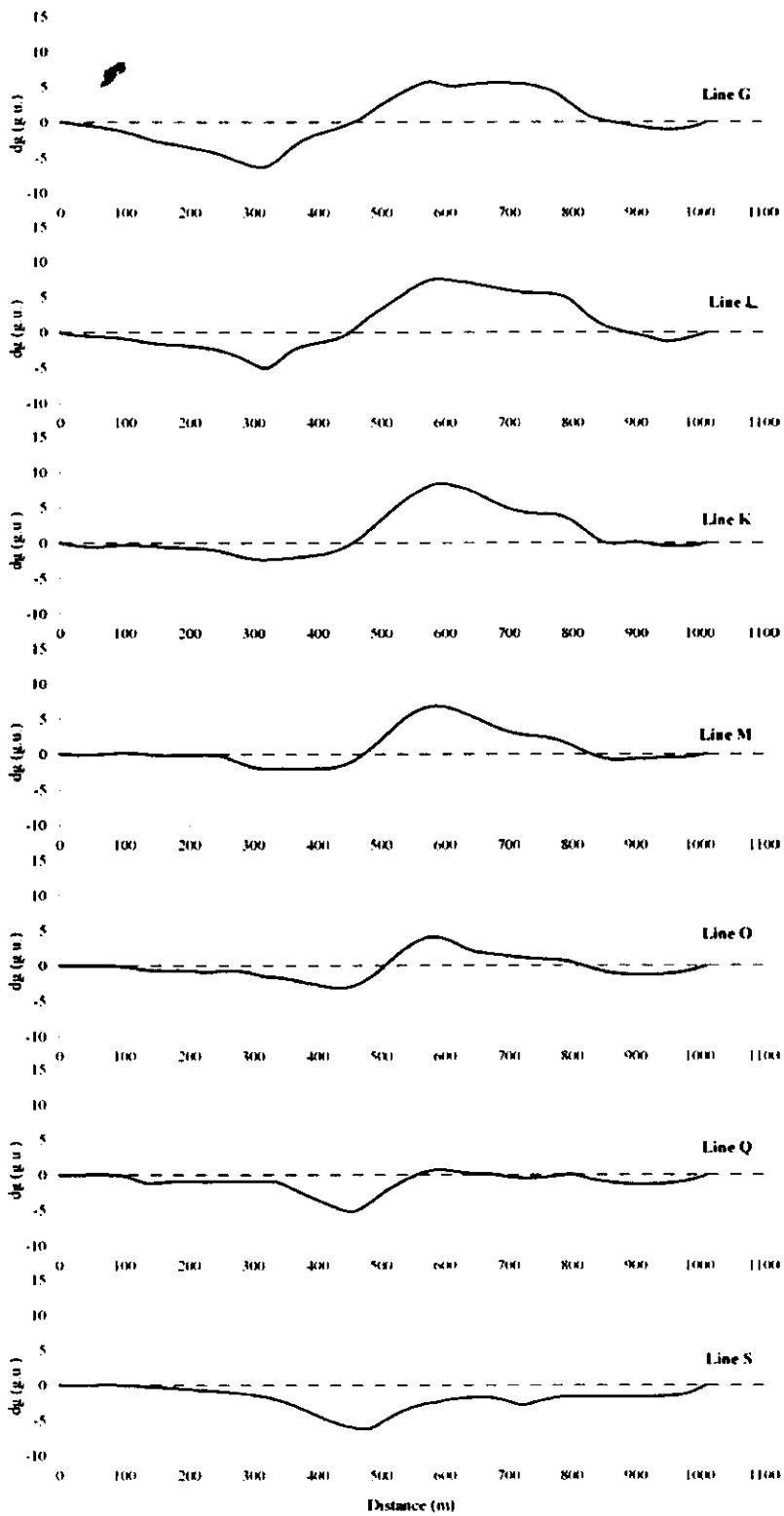


ปิดล้อมด้วยเส้นคอนทัวร์ที่แสดงลักษณะผิดปกติ อันน่าจะเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินที่แตกต่างจากบริเวณข้างเคียง

เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในพื้นที่ จึงได้ตัดโพรไฟล์จากแผนภาพคอนทัวร์ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติแนวกว้างจำนวน 7 แนวขนานกัน ได้แก่ Line G, Line I, Line K, Line M, Line O, Line Q และ Line S ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติแนวกว้างกับระยะทางในแต่ละโพรไฟล์ แสดงดังรูปที่ 3.4-9 จากรูปดังกล่าวพบว่าค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติซ้อนทับอยู่บนค่าสนามโน้มถ่วงที่เกิดจากโครงสร้างธรณีวิทยาเชิงภูมิภาค โดยค่าความผิดปกติจะสูงที่สุดที่ระยะ $x = 0\text{m}$ และลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อระยะมากขึ้น แต่ที่ระยะ 450 – 900m ของทุกโพรไฟล์ ค่าสนามโน้มถ่วงลดลงไม่สม่ำเสมอ และจะสูงขึ้นเล็กน้อยแล้วจะมีค่าลดลงจนถึงสุดแนว และเมื่อตัดค่าสนามโน้มถ่วงเนื่องจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาเชิงภูมิภาคออก จะคงเหลือเฉพาะค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติที่เกิดจากมวลผิดปกติที่อยู่ภายใต้ผิวดิน เมื่อนำกราฟแสดงค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติแนวกว้างดังกล่าวกับระยะทางของทุกแนวมาวางเรียงกันดังรูป 3.4-10 พบว่าค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ 0m (JICA15) ถึงระยะประมาณ 500m โดยมีค่าต่ำสุดที่ระยะประมาณ 300-400m และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีค่าสูงสุดที่ระยะประมาณ 600m จากนั้นค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงสุดแนววัด ยกเว้นในแนววัด Q, R และ S ที่ค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติจะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องอีกจากระยะประมาณ 800m จนกระทั่งสุดแนววัด จากลักษณะของค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติดังกล่าวน่าจะได้รับอิทธิพลจากมวลใต้ผิวดินที่มีความหนาแน่นและค่าความลึกจากผิวดินที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินจากค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติในพื้นที่ศึกษานี้ได้



รูปที่ 3.4-8 The gravity anomaly and estimated regional gravity along the profiles G, I, K, M, O, Q and S.



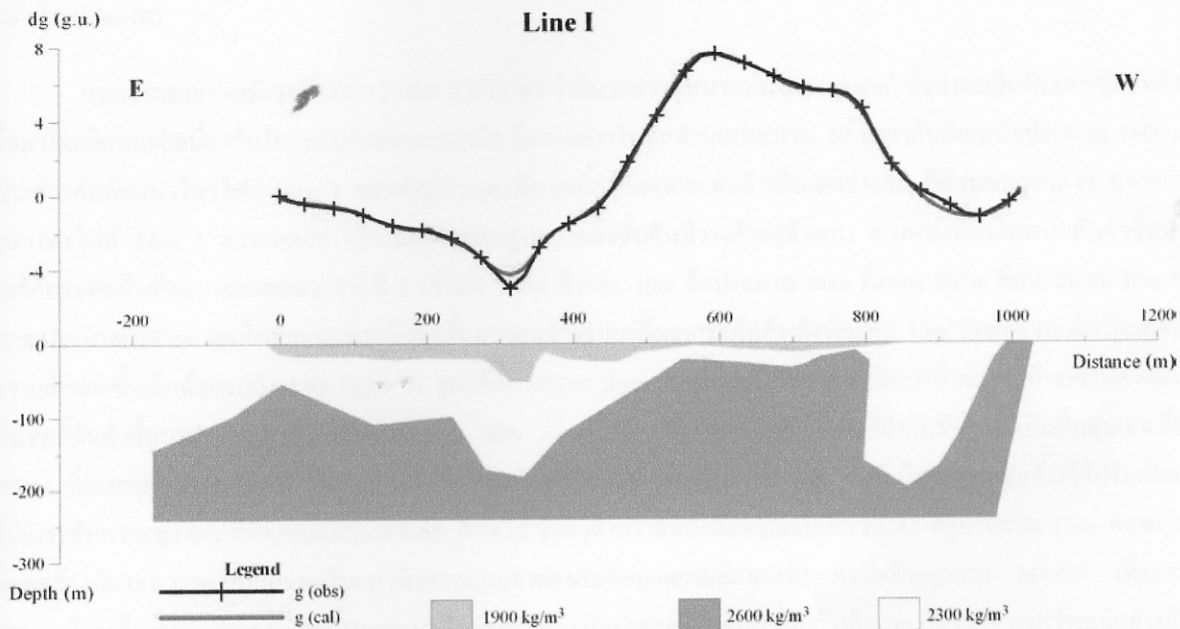
รูปที่ 3.4-9 The gravity anomaly along the profiles G, I, K, M, O, Q and S after the regional field is separated.

จากการพิจารณารูปค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติที่ตัดค่าสนามโน้มถ่วงเนื่องจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาเชิงภูมิภาคออกแล้วในแต่ละแนวโพรไฟล์ ได้เลือกแนวโพรไฟล์ 3 แนว คือ Line I, Line M และ Line Q เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

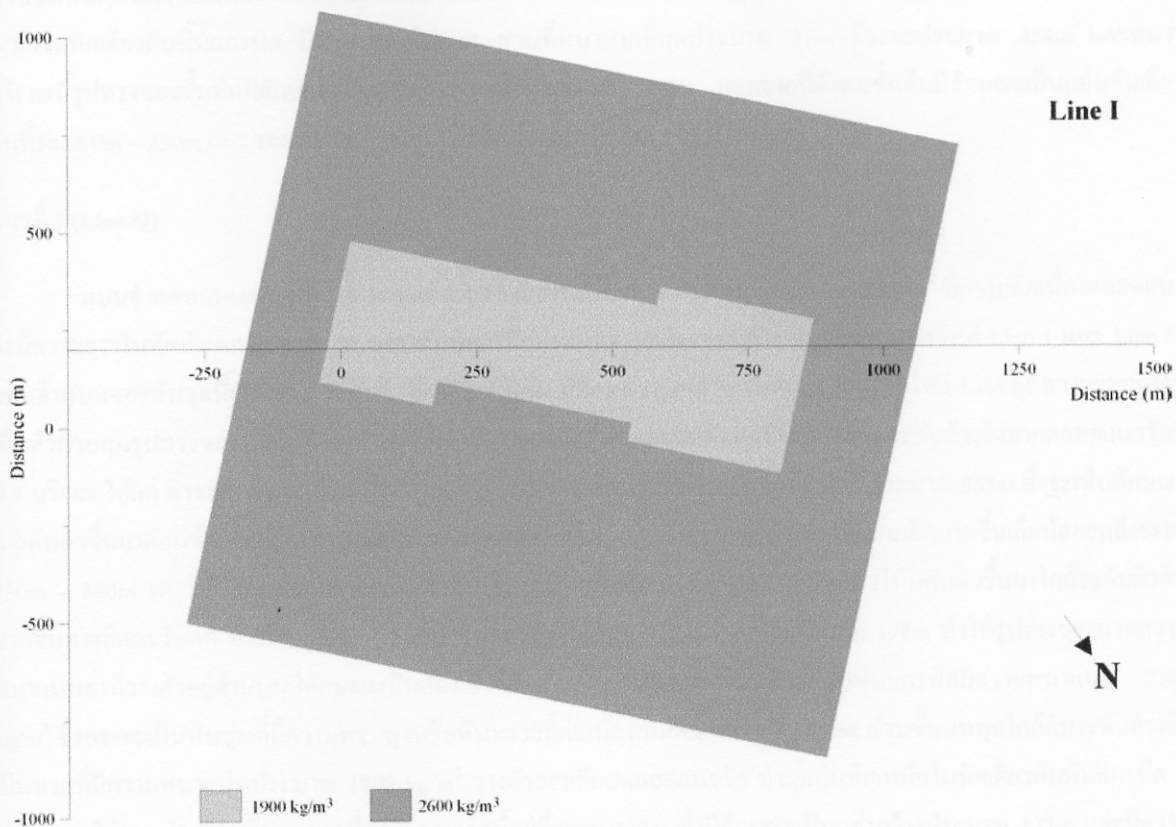
สร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม GMM (Gravity and Magnetic Modeling) เวอร์ชัน 1.24 ของบริษัท Swedish Geological & Swedish space ซึ่งสามารถสร้างและเปลี่ยนแปลงแบบจำลอง โดยกำหนดขนาด ค่าความหนาแน่น ค่าความลึกจากผิวดินของมวลผิดปกติ และค่าความหนาแน่นของมวลข้างเคียงได้ ดังนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับค่าสนามโน้มถ่วงที่วัดได้ แบบจำลองของทั้ง 3 แนววัดดังรูปที่ 3.4-10 ถึง 3.4-15 ใช้ความหนาแน่นของมวลผิดปกติเป็น 2600 kg/m^3 และ 1900 kg/m^3 ความหนาแน่นของหินท้องที่เป็น 2300 kg/m^3 โดยระดับความสูงอ้างอิง 0m ที่ปรากฏในแผนภาพเป็นระดับความสูงที่หลุมเจาะลึก JICA15 ซึ่งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 34.67m จากแบบจำลองของทั้ง 3 แนว จะเห็นว่าค่าสนามโน้มถ่วงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ป้อนเข้าไปมีความสอดคล้องกับค่าสนามโน้มถ่วงของมวลผิดปกติ (Bouguer anomaly) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแนววัด M ที่พบว่าแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการลำดับชั้นดินของหลุมเจาะลึก JICA15, JICA2, MV479 และ JICA1 (ดังรูปที่ 2-6) ในพื้นที่ศึกษาอย่างดียิ่ง แสดงว่าแบบจำลองที่น่าจะเป็นลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินในพื้นที่ศึกษา ดังพิจารณารายละเอียดของแต่ละโพรไฟล์ดังนี้

แนวที่ 1 (Line I)

แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.4-10 และ 3.4-11 จะเห็นว่าค่าสนามโน้มถ่วงที่คอมพิวเตอร์คำนวณได้กับค่าที่ทำการวัดสอดคล้องกันกับค่าที่วัดได้ และจากแบบจำลองพบว่ามีมวลความหนาแน่น 2600 kg/m^3 ซึ่งน่าจะเป็นหินแกรนิตดันตัวขึ้นมา โดยมีความต่อเนื่องกันในระดับลึกตลอดแนววัด มีความยาวประมาณ 1600m โดยวางตัวทำมุมประมาณ 40 องศากับทิศเหนือ และสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าขอบด้านบนของหินชนิดนี้อยู่ลึกจากระดับอ้างอิงแตกต่างกัน ความแตกต่างนี้เป็นตัวควบคุมรูปทรงของชั้นดินที่วางตัวอยู่ข้างบน ตำแหน่งที่หินแกรนิตดันตัวขึ้นมาใกล้กับระดับอ้างอิงมากในแนววัดนี้ ได้แก่ ที่ระยะ 0m ลึกประมาณ 54m ที่ระยะ 548 – 804m ลึกประมาณ 22m และที่ระยะ 991 – 1029m อยู่ที่ระดับเดียวกันกับระดับอ้างอิง ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงน้อยสุดประมาณ 10m ที่ระยะ 785m สำหรับด้านบนของหินแกรนิตมีมวลความหนาแน่น 2300 kg/m^3 ซึ่งอาจจะเป็นหินปูนที่มีความพรุนสูงที่ระยะ 0m และเป็นหินทรายที่ระยะ 430m สำหรับดินชั้นบนสุดที่ระดับคืนใกล้กับระดับอ้างอิงเป็นมวลที่มีความหนาแน่นประมาณ 1900 kg/m^3 วางตัวยาวเกือบตลอดแนววัด ทำมุมกับทิศเหนือเหมือนกับหินแกรนิต มีความหนาไม่มาก ส่วนที่หนามากที่สุดประมาณ 52m ที่ระยะประมาณ 339m และพบว่าบริเวณนี้รูปทรงของชั้นดินมีลักษณะเป็นแอ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความโน้มถ่วงที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ณ ตำแหน่งนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดอยู่เล็กน้อย จึงเป็นไปได้ที่จะมีมวลความหนาแน่นต่ำกว่า 1900 kg/m^3 วางตัวอยู่ด้านบนใกล้กับระดับอ้างอิงในบริเวณนี้



รูปที่ 3.4-10 The geological section model along Line I, a level of 0m refer to the level 34.67m (MSL) at a deep well JICA15.



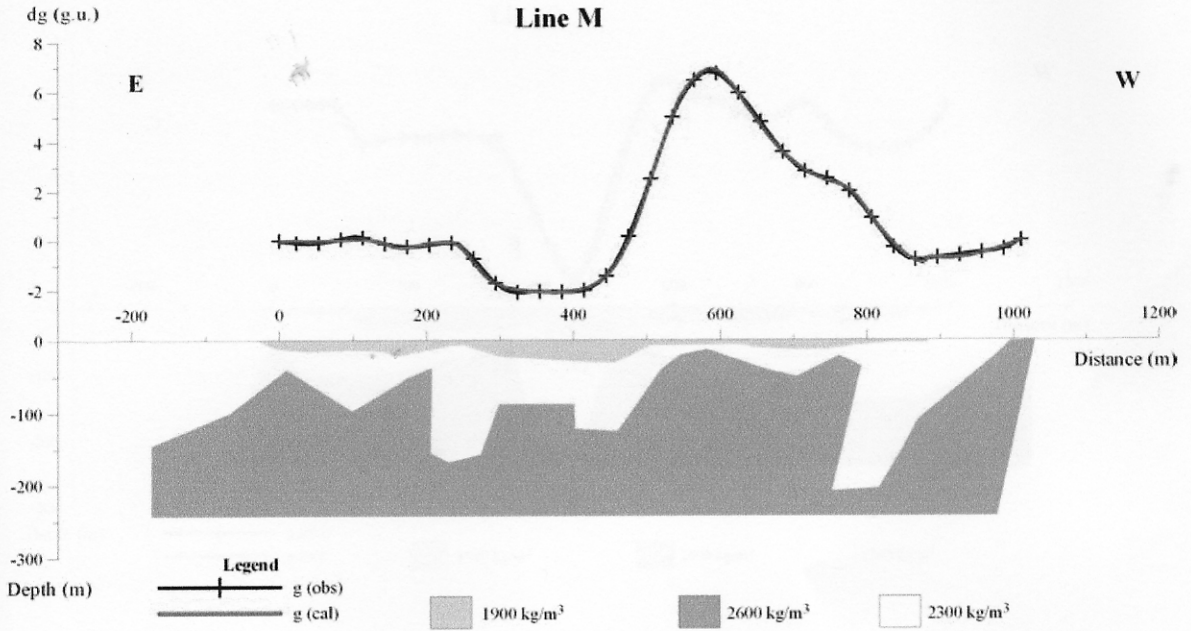
รูปที่ 3.4-11 The geological model in the XY plane along Line I.

แนวที่ 2 (Line M)

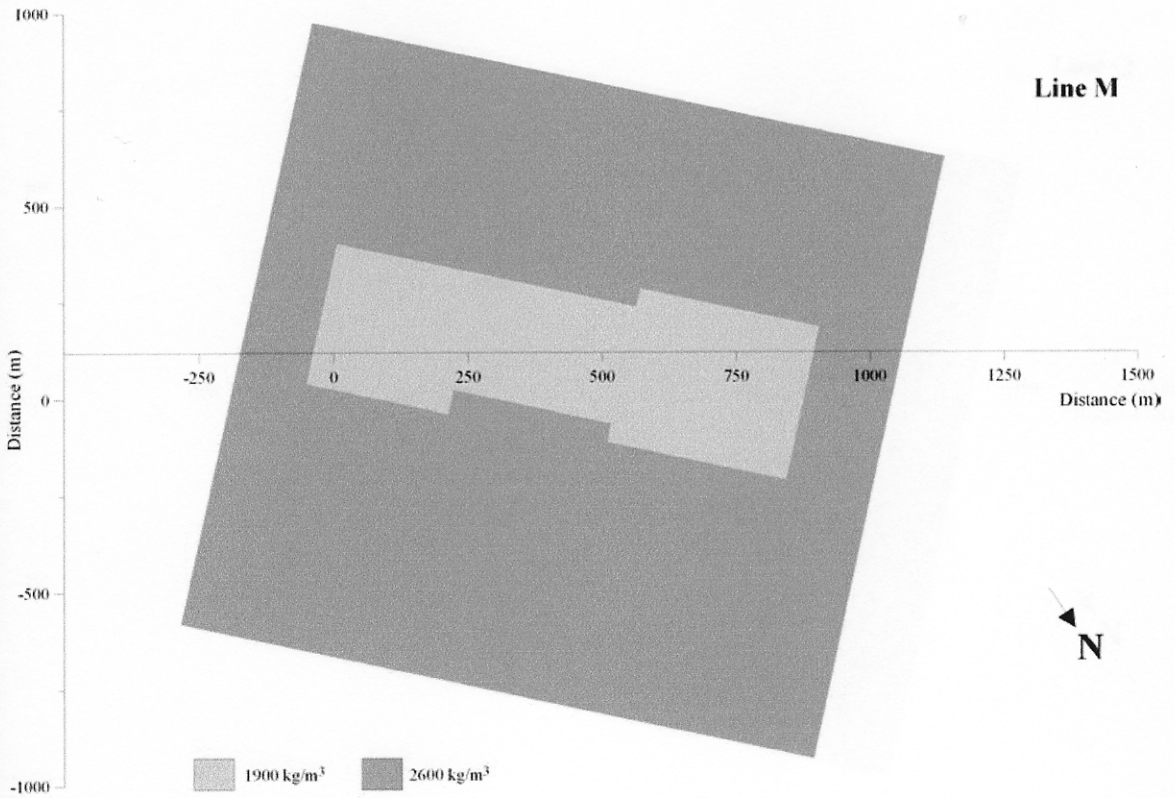
แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.4-12 และ 3.4-13 พบว่ามีมวลความหนาแน่น 2600 kg/m^3 ซึ่งน่าจะเป็นหินแกรนิตคันตัวขึ้นมาโดยมีความต่อเนื่องกันในระดับลึกลงแนววัด มีความยาวในทิศทำมุมประมาณ 40 องศา กับทิศเหนือประมาณ 1600m เช่นเดียวกับกับแนวโพรไฟล์ Line I ขอบด้านบนของหินขุดนี้อยู่ลึกจากระดับอ้างอิงแตกต่างกัน มีลักษณะสูงๆต่ำๆ มากกว่าแนวโพรไฟล์ Line I ความแตกต่างนี้เป็นตัวควบคุมรูปทรงของชั้นดินที่วางตัวอยู่ข้างบน ตำแหน่งที่หินแกรนิตคันตัวขึ้นมาใกล้กับระดับอ้างอิงมากตลอดแนววัดนี้ มี 5 บริเวณ ได้แก่ ที่ระยะ 10m ลึกประมาณ 40m ที่ระยะ 207m ลึกประมาณ 38m ที่ระยะประมาณ 582m จะเห็นลักษณะการคันตัวขึ้นมาค่อนข้างชันอยู่ลึกจากระดับอ้างอิงน้อยสุด 13m และมีความต่อเนื่องแต่มีความลึกมากขึ้นเล็กน้อยจนถึงระยะ 792m ณ จุดนี้ลึกประมาณ 36m จากนั้นจะมีลักษณะเหมือนหน้าผาภูเขาหินแกรนิตได้คินหินขุดนี้คันตัวขึ้นมาปรากฏยังระดับอ้างอิงที่ระยะ $996 - 1029\text{m}$ ซึ่งสอดคล้องกันอย่างดีกับข้อมูลชั้นดินที่หลุมเจาะลึก JICA1 ที่ระยะประมาณ 1020m ที่ระบุน่ามีชั้นหินแกรนิตอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 17m ทั้งนี้เนื่องจากระดับอ้างอิงได้ปรับเทียบไปยังระดับความสูง 0m ที่ตำแหน่งหลุมเจาะลึก JICA15 ซึ่งอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งหลุมเจาะลึก JICA1 อยู่ประมาณ 17m ความไม่สอดคล้องกันระหว่างความลึกของหินแกรนิตจากแบบจำลองกับข้อมูลความลึกของหินแกรนิตที่หลุมเจาะ MV479 (ที่ระยะ 700m) ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดิน 14m ดังนั้นจากแบบจำลองหินแกรนิตน่าจะอยู่ลึกจากระดับอ้างอิง 7m (MV479 สูงกว่าระดับอ้างอิง 6m) แต่ปรากฏว่าหินแกรนิตจากแบบจำลองอยู่ลึกกว่า แม้ว่าจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความลึกอย่างไรก็ไม่สามารถทำให้ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัด จึงมีความเป็นไปได้ว่าหินแกรนิตที่เจาะเจอที่หลุมเจาะ MV479 อาจจะเป็นก้อนหินแกรนิตขนาดใหญ่ (boulder) สำหรับมวลความหนาแน่น 2300 kg/m^3 ที่วางตัวอยู่บนหินแกรนิตอาจจะเป็นหินปูนที่มีความพรุนสูงที่ระยะ 0m และเป็นหินทรายที่ระยะ 430m โดยอ้างอิงข้อมูลจากหลุมเจาะ JICA15 และ JICA2 ตามลำดับ ส่วนชั้นบนสุดใกล้กับระดับอ้างอิงเป็นมวลที่มีความหนาแน่นประมาณ 1900 kg/m^3 วางตัวยาวเกือบตลอดแนววัด ทำมุมกับทิศเหนือในทิศเดียวกับหินแกรนิต มีความหนาไม่มาก ส่วนที่หนามากที่สุดประมาณ 31m ที่ระยะประมาณ 454m และพบว่าบริเวณนี้รูปทรงของชั้นดินมีลักษณะเป็นแอ่งมีความกว้างประมาณ 250m นอกจากนี้ยังพบชั้นดินมีลักษณะเป็นแอ่งเช่นเดียวกันที่ระยะ $0\text{m} - 250\text{m}$ และ ระยะ $600\text{m} - 885\text{m}$ แต่ลึกน้อยกว่าที่ระยะ $250\text{m} - 500\text{m}$

แนวที่ 3 (Line Q)

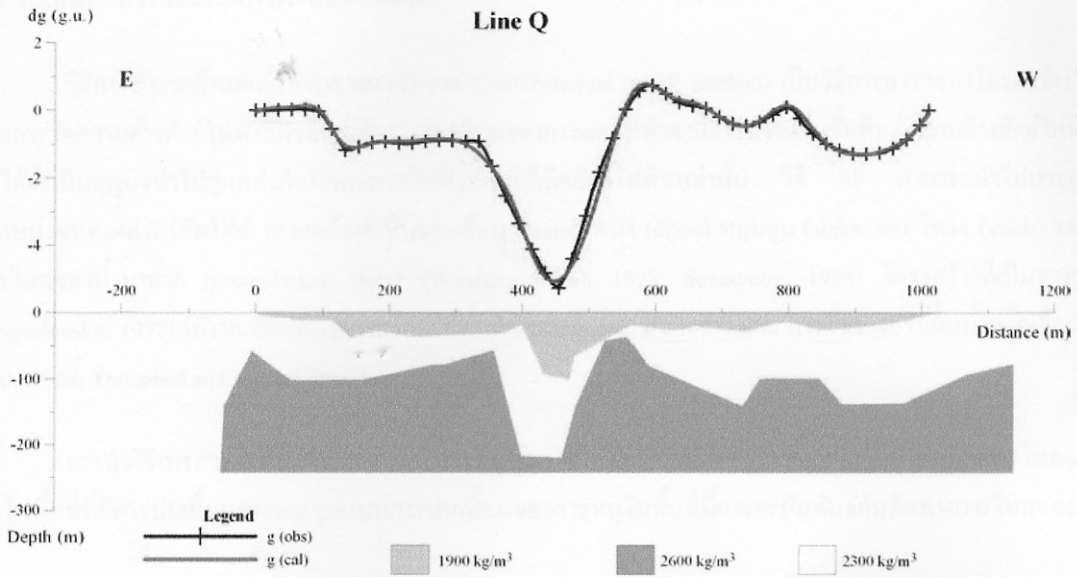
แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.4-14 และ 3.4-15 ลักษณะของมวลความหนาแน่น 2600 kg/m^3 มีความต่อเนื่องตลอดแนววัดมีความยาวในทิศทำมุมประมาณ 40 องศา กับทิศเหนือประมาณ 1600m เช่นเดียวกับกับแนวโพรไฟล์ Line I และ Line M ขอบด้านบนของหินขุดนี้อยู่ลึกจากระดับอ้างอิงแตกต่างกัน มีลักษณะสูงๆต่ำๆ น้อยกว่าแนวโพรไฟล์ Line M ความแตกต่างนี้เป็นตัวควบคุมรูปทรงของชั้นดินที่วางตัวอยู่ข้างบน ตำแหน่งที่หินแกรนิตคันตัวขึ้นมาใกล้กับระดับอ้างอิงมากตลอดแนววัดนี้มี 3 บริเวณ ได้แก่ ที่ระยะ -5m ลึกประมาณ 57m ที่ระยะ 357m ลึกประมาณ 56m และที่ระยะประมาณ 555m ซึ่งจะเห็นลักษณะการคันตัวขึ้นมาค่อนข้างชันอยู่ลึกจากระดับอ้างอิงน้อยสุด 41m และมีความต่อเนื่องแต่มีความลึกมากขึ้นเล็กน้อยจนถึงระยะ $730\text{m} - 880\text{m}$ พบว่าหินแกรนิตมีลักษณะเป็นเนินเตี้ยๆได้คินลึกประมาณ 100m และมีแนวโน้มนันคันตัวขึ้นมาใกล้ระดับผิวดินมากขึ้นทางทิศตะวันตก ที่ระยะ $357\text{m} - 555\text{m}$ หินแกรนิตมีลักษณะเป็นแอ่งกว้างประมาณ 198m ทำให้รูปร่างของมวลความหนาแน่นต่ำที่วางตัวอยู่ด้านบนมีลักษณะเป็นแอ่งเช่นเดียวกัน สำหรับมวลที่วางตัวอยู่บนหินแกรนิตมีความหนาแน่น 2300 kg/m^3 ซึ่งอาจจะเป็นหินปูนที่มีความพรุนสูงหรือหินทรายที่ต่อเนื่องกันกับแนววัด I และ M ส่วนชั้นบนสุดใกล้กับระดับอ้างอิงเป็นมวลที่มีความหนาแน่นประมาณ 1900 kg/m^3 วางตัวยาวเกือบตลอดแนววัด ทำมุมกับทิศเหนือในทิศเดียวกับหินแกรนิต มีความหนาไม่มากนัก ส่วนที่หนามากที่สุดในแนววัดนี้อยู่ที่ระยะ 432m ซึ่งมีลักษณะเป็นแอ่งกว้างประมาณ 173m และมีความลึกประมาณ 93m ซึ่งลึกกว่าในแนววัด I และ M ที่ระยะเดียวกัน



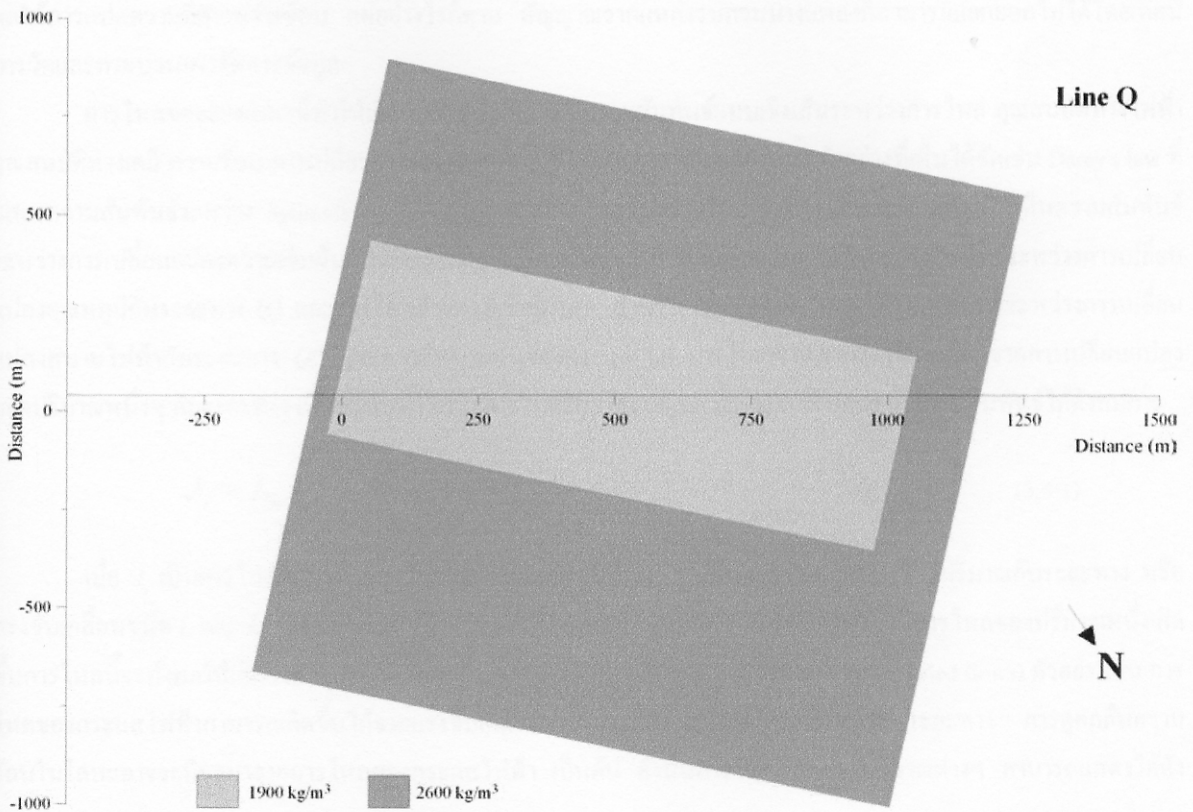
รูปที่ 3.4-12 The geological section model along Line M, a level of 0m refer to the level 34.67m (MSL) at a deep well JICA15.



รูปที่ 3.4-13 The geological model in the XY plane along Line M.



รูปที่ 3.4-14 The geological section model along Line Q, a level of 0m refer to the level 34.67m (MSL) at a deep well JICA15.



รูปที่ 3.4-15 The geological model in the XY plane along Line Q.

3.5 ระเบียบวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติ

วิธีการสำรวจด้านศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติ (Self-Potential or SP method) เป็นวิธีการสำรวจหาโครงสร้างใต้พื้นดิน โดยการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าตามธรรมชาติในชั้นดิน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จะเป็นกุญแจนำไปสู่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเหล่านั้น วิธี SP สามารถนำไปประยุกต์ใช้หาตำแหน่งของแหล่งแร่ซัลไฟด์ โครงสร้างที่เป็นรอยเลื่อน (faults) พนัง (dikes) หลุมยุบ (sinkholes) โพรง (voids) ระบุทิศทางการไหลของน้ำบาดาล (groundwater flow) (Wanfang et al., 1998; Schiavone, 1983) โครงสร้างที่เป็นทางระบายน้ำ (Bogoslovsky, 1972) บริเวณที่มีแหล่งความร้อนใต้พื้นดิน (George et al., 1997) และ การรั่วของอ่างเก็บน้ำหรือเขื่อน (Ogilvy et al., 1968; Thunhed and Triumph, 2001)

การนำวิธีการสำรวจด้านศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติมาใช้ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนู รูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่นี้อาจจะสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

3.5.1 แหล่งกำเนิดของ SP

ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งกำเนิด เช่น แร่ควาน้ำ (แร่ซัลไฟด์ แกรไฟต์ และ แมกนีไทต์) การไหลถ่ายความร้อน การไหลของของเหลว เป็นต้น เป้าหมายที่สนใจของการสำรวจเป็นลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างจากสัญญาณข้างเคียงเรียกว่า แหล่งผิดปกติ (anomaly sources) ส่วนที่นอกเหนือจากสิ่งที่น่าสนใจเรียกว่า แหล่งสัญญาณรบกวน (noise sources) เนื่องจากไม่มีวิธีการที่จะแยกสัญญาณอันเกิดจากแหล่งผิดปกติออกจากสัญญาณจากแหล่งรบกวนอื่นๆ จึงส่งผลให้การแปลความมีความซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม สัญญาณจากแหล่งรบกวนบางแหล่งก็สามารถแยกออกไปได้โดยเทคนิคการวัดและกระบวนการจัดการข้อมูล

การไหลของของเหลวที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า SP จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างการไหล คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางเคมี ความร้อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง และแรงดันน้ำ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเช่น Darcy's law ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง hydraulic gradient (i) และการไหลของของไหล (q) Fick's law แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับระยะทาง (i) และการแพร่ (Fourier's law แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (i) และการไหลถ่ายความร้อน (q) สำหรับ Ohm's law แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ากับระยะทาง (E) และความหนาแน่นของกระแส (J) การไหลที่เกิดจากแรงขับเคลื่อนจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณหนึ่งๆ กับระยะทาง เป็นที่รู้กันทั่วไปว่า การไหลโดยตรง (direct flows) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$J_i = L_{ii} X_i \quad (3.5-1)$$

เมื่อ J_i เป็นการไหลต่อหน่วยพื้นที่ของแรงขับเคลื่อนชนิด i , X_i เป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกับระยะทาง หรือแรงขับเคลื่อนชนิด i , และ L_{ii} เป็นสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของการไหลชนิด i ในธรรมชาติเมื่อมีการไหลของปริมาณหนึ่งเกิดขึ้นการไหลนี้จะส่งผลให้เกิดการไหลของปริมาณอื่นๆ การไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลคู่ควบ (coupled flows) ตัวอย่างเช่น การไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากแรงขับเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำกับระยะทาง การดูดกลืนความร้อนในโลหะอาจจะมีผลมาจากการไหลของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการไหลสุทธิของปริมาณต่างๆ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j \quad (3.5-2)$$

เมื่อ $i = 1, 2 \dots n$ และ L_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์คู่ควบสำหรับการไหลแต่ละแบบ i ที่เกิดจากแรงขับเคลื่อน j และ X_j เป็นแรงขับเคลื่อนชนิด j หากในบริเวณที่ทำการสำรวจไม่มีแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในรูพรุนของตัวกลางจะเกิดจากแรงขับเคลื่อนของแรงดันน้ำ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

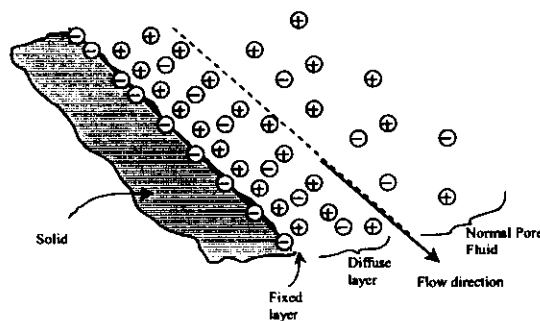
$$J = L_{EH}i_h + L_{ET}i_t + L_{EC}i_c \quad (3.5-3)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้า SP ที่เกิดขึ้นบนผิวดินไม่เพียงแต่มีสาเหตุมาจากความหนาแน่นของกระแสของการไหลของของเหลวแต่ยังมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของความร้อนหรือสารเคมี ดังนั้นเราสามารถที่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกับระยะทางได้ผิวดินได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้า SP

แม้ว่าความคิดปกติของศักย์ไฟฟ้าที่มีสาเหตุมาจากการไหลของน้ำได้คิดยังไม่มีความชัดเจน แต่การสำรวจด้วยวิธีนี้เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการไหลของน้ำทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เรียกว่า Streaming potential ศักย์ไฟฟ้าประเภทนี้จึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

3.5.1.1 Streaming potential

Streaming potential หรือ Electrofiltration เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านรูพรุนของตัวกลาง เมื่อสารละลายสัมผัสกับผิวของตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งโดยปกติจะมีประจุลบมาเกาะที่ผิว เช่น พวงแร่ดิน (clay minerals) ทำให้ประจุบวกที่อยู่ในสารละลายถูกดึงดูดมาสะสมอยู่ที่ผิวของตัวกลาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่รู้จักกันในชื่อ electrical double layer (รูปที่ 3.5-1) ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดชั้นของการแพร่ (diffuse layer) เนื่องจากที่ผิวของตัวกลางมีปริมาณของประจุบวกมากกว่าจำนวนของประจุลบ เมื่อสารละลายเกิดการไหลสัมพัทธ์กับตัวกลางอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดัน ประจุบวกที่เกินมานี้จะถูกดึงดูดให้เคลื่อนที่ไปพร้อมๆกันและในทิศทางเดียวกันกับการไหลของสารละลายทำให้เกิดกระแสการพา (convection current : I_{conv}) ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างประจุบวกทางด้านบนของกระแสน้ำ (upstream part) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำและประจุลบทางด้านล่างของกระแสน้ำ (down stream part) อันเป็นบริเวณที่มีความดันสูง การแบ่งแยกของประจุทำให้เกิด streaming potential เพื่อให้กระแสไหลกลับในสารละลายในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการไหลของสารละลาย



รูปที่ 3.5-1 Schematic representations of the pore wall double layer geometry. Note the fixed surface charge and the excess of positive charges in the diffuse layer (modified after Fitterman, 1978).

ในสถานะสมดุลสำหรับรูพรุนภายในตัวกลางที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า I_{conv} จะถูกทำให้สมดุลกับ I_{cond} จากสมการ Poisson, Gouy-Chapman diffuse layer และ Parabolic velocity profile characteristic of Poiseuille's flow สามารถเขียนสมการกระแสการพาและสมการกระแสการนำไฟฟ้า (Morgan et al., 1989) ได้ดังสมการ

$$I_{conv} = -\pi \varepsilon \frac{\zeta}{\eta} G \Delta P \quad (3.5-4)$$

$$I_{cond} = \pi \sigma_w G \Delta V \quad (3.5-5)$$

เมื่อ ΔV และ ΔP เป็นความต่างศักย์แตกต่าง (streaming potential) และความแตกต่างของแรงดันที่ทำให้เกิดการไหลของสารละลาย, σ_w เป็นค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย, ε เป็นค่า dielectric permittivity ของสารละลาย, ζ เป็นค่าความต่างศักย์ที่ระนาบที่อยู่ติดกับผิวของตัวกลางที่เป็นของแข็งมากที่สุดและเป็นระนาบที่มีการเคลื่อนที่ของประจุ (zeta potential), η เป็นความหนืดของสารละลาย, และ G เป็นค่า geometrical factor

จากสมการ (3.5-4) และ (3.5-5) จะได้ว่า

$$\Delta V = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_w} \Delta P \quad (3.5-6)$$

สมการนี้คือสมการของ Helmholtz-Smoluchowski ค่า $\Delta V/\Delta P$ เป็นปริมาณ streaming potential coefficient (C) หากพิจารณาสมการ (3.5-3) ร่วมกับ Ohm's law ในกรณีที่ไม่มีความแตกต่างของปริมาณอื่นกับระยะทาง นอกจากความแตกต่างของความดันของน้ำเท่านั้นที่ทำให้เกิดการไหลของสารละลาย ดังนั้น

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{L_{EH}}{\sigma_w} = C \quad (3.5-7)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า C ขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้า, dielectric permittivity, zeta potential, และความหนืดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตลอดเส้นทางการไหล การประมาณค่า C ของพื้นที่ใดๆ สามารถทำได้โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระดับความสูงซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความแตกต่างของความดันระหว่างจุดวัดสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของค่าความสูงของจุดวัด และระดับผิวบนของชั้นน้ำได้ดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะความสูงของพื้นที่ ค่า C ที่ได้เป็นค่า apparent streaming potential coefficient จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าถ้ามีการไหลของน้ำได้ดิน ก็ควรจะเกิด streaming potential ในระดับ 10-150mV ระหว่างจุดสองจุดที่มีระดับความสูงต่างกัน 10m (Bergström, 1998) หรือ $C \approx 1 - 15mV/m$

เนื่องจากในความเป็นจริงตัวกลางที่มีความพรุน หรือของแข็งซึ่งอยู่รอบๆสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้เป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ ปริมาณของ apparent streaming potential coefficient จึงมีค่าน้อยกว่าที่ประมาณจากห้องปฏิบัติการ ในกรณีนี้จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวของของแข็ง σ_s (surface conductivity) และสมการ (3.4-6) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\Delta V = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta \left(\sigma_w + 2 \frac{\sigma_s}{r} \right)} \Delta P \quad (3.5-8)$$

เมื่อ r เป็นรัศมีของรูพรุน (pore or capillary radius)