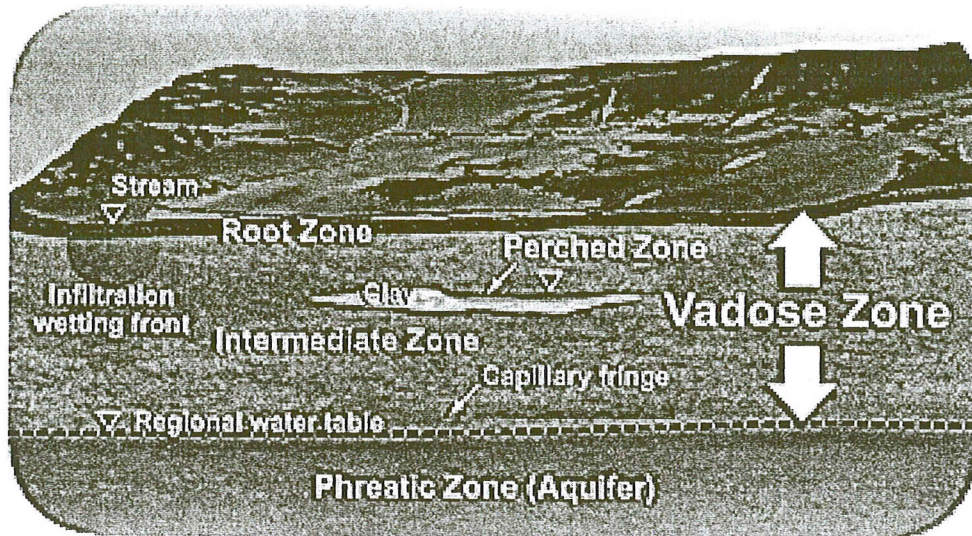


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ชั้นดินที่อยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดินเรียกว่าชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Vadose Zone) ซึ่งหมายถึงส่วนที่อยู่ติดกับพื้นผิวดิน ช่องว่างบางส่วนของเม็ดดินจะมีน้ำและฟองอากาศแทรกอยู่เรียกรวมกันว่าน้ำแขวนลอย (Vadose or suspended water) ปริมาณน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างเหล่านี้จะมีปริมาณมาก แต่น้ำเหล่านี้ไม่สามารถสูบขึ้นมาใช้ได้เนื่องจากน้ำจะถูกยึดอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดินด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary force) เนื่องจากในชั้นดินนี้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินประกอบด้วยอากาศและน้ำจึงนิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า aeration zone น้ำที่อยู่ในชั้นดินนี้เรียกว่า vadose water หรือ soil moisture ความหนาของชั้นดินชนิดนี้จะแปรผันไปตามลักษณะโครงสร้างทางธรณีของดิน กล่าวคือในบริเวณ บ่อ หนอง บึง ความหนาจะเท่ากับศูนย์และจะหนาตามที่บริเวณอยู่เหนือระดับน้ำทะเลมากๆ เป็นต้น ถัดจาก aeration zone ลงมาหรือชั้นดินที่อยู่ใต้เส้นระดับน้ำใต้ดินเรียกว่า phreatic zone หรือ groundwater zone เนื่องจากช่องว่างในระหว่างอนุภาคของดินจะเต็มไปด้วยน้ำจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า saturation zone น้ำที่อยู่ในชั้นนี้ยังลึกลงไปจะมีปริมาณน้อยลงตามลำดับทั้งนี้เพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน (pore space) จะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากน้ำหนักดินที่อยู่ข้างบนกดทับลงมา ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถแยกเป็นส่วนย่อยได้ 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2-1 คือ

- Belt of soil water เป็นส่วนที่อยู่ชั้นบนสุดของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ประกอบไปด้วยดิน วัสดุอินทรีย์ และอนินทรีย์ต่าง ๆ น้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในส่วนนี้เรียกว่าความชื้นในดิน (Soil moisture or soil water) เป็นน้ำที่ใช้สำหรับการเกษตรและยังชีพของพืชและต้นไม้ต่างๆ น้ำบางส่วนอาจจะสูญเสียกลับคืนสู่บรรยากาศโดยตรงโดยกระบวนการระเหยและการคายน้ำ
- Capillary fringe เป็นส่วนที่อยู่เหนือถัดขึ้นมาจากชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) ขึ้นไปจนถึงจุดที่สูงสุดที่น้ำซึมขึ้นไปด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary rise) น้ำที่อยู่ในบริเวณนี้เรียกว่าน้ำซัพ (Capillary water) ความหนาของชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับแรงคาปิลลารีซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างของเม็ดดิน ดินถ้าช่องว่างมีขนาดเล็กส่วนนี้จะหนา
- Intermediate belt เป็นส่วนที่อยู่ระหว่าง Belt of soil water กับ Capillary fringe ไม่ค่อยมีความสำคัญมากนักเพราะเป็นเพียงทางผ่านของน้ำที่ซึมผ่านลงไปเท่านั้น น้ำในส่วนนี้เรียกว่า Intermediate vadose water ส่วนนี้อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ กล่าวคือถ้าชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ไม่ลึกจากผิวดิน ส่วนของ Intermediate belt อาจจะไม่มีเลยเพราะชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความหนาไม่มาก ในขณะที่ถ้าชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ลึกจากผิวดิน ความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก็จะมากไปด้วย ทำให้ส่วนของ Intermediate belt ก็จะมีมีความหนาเพิ่มไปด้วย



รูปที่ 2-1 ภาพตัดขวางของชั้นดิน ที่มา www.dbstephens.com/images/vz_model_.jpg

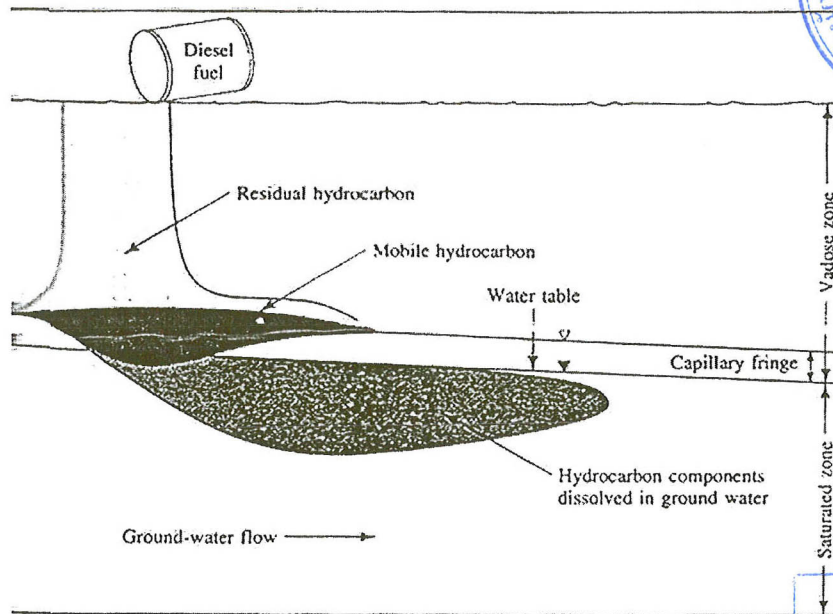
2.2 Light Non-Aqueous Phase Liquid

Non Aqueous Phase Liquid (NAPL) คือสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำแต่แยกตัวออกมาต่างหาก NAPL ได้แก่สารจำพวก chlorinated compound และ petroleum hydrocarbon NAPL สามารถแบ่งออกเป็น LNAPL และ DNAPL LNAPL (light non-aqueous phase liquid) จะเบากว่าน้ำในขณะที่ DNAPL (dense non-aqueous phase liquid) จะหนักกว่าน้ำ ตัวอย่างของ LNAPL เช่น เบนซิน, ดีเซล, และน้ำมันเครื่อง ในขณะที่ตัวอย่างของ DNAPL เช่น halogenated compound ความแตกต่างกันของความหนาแน่นของ LNAPL และ DNAPL จะเป็นคุณสมบัติหลักที่ควบคุมความแตกต่างในพฤติกรรมการณ์ไหลซึมของสารเหล่านี้ผ่านดิน

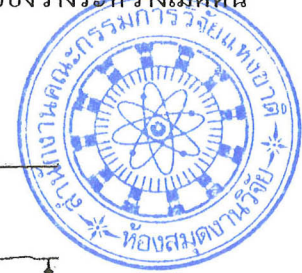
การเคลื่อนตัวของ LNAPL จะเคลื่อนตัวในลักษณะที่ดิ่งลงสู่ชั้นดินตามแรงโน้มถ่วงของโลกและจะค่อยๆ ไหลซึมผ่านเข้าไปแทนที่ช่องว่างบางส่วนของช่องคาпилลารี เมื่อเกิดการไหลซึมผ่านมากขึ้น LNAPL ก็จะเริ่มสะสมแล้วกดทับถมกันจนเกิดเป็นแถบความหนาบริเวณชั้นผิวหน้าของเขตอิมมัวเหนือระดับน้ำใต้ดิน (capillary fringe) ที่เรียกว่า “Oil table” เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันที่ไม่สามารถจะละลายน้ำได้ จนเมื่อมีการรวมตัวกันมากถึงจุดอิ่มตัวแล้วน้ำมันจะเริ่มแพร่กระจายไปตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน หรือตามความลาดชันของพื้นที่ และน้ำมันบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ตามช่องว่างของอนุภาคดิน (Fetter, 1999) จนในที่สุดแล้วชั้นคาпилลารีทั้งหมดก็จะเกิดความเสียหาย ซึ่งในส่วนที่ตกค้างจากบริเวณ oil table นั้นจะถูกน้ำหนักการกดทับของ LNAPL ลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในทันที

จากการศึกษาของ Gangadharan et al. (1988) พบว่าถ้าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินเป็นแบบเนื้อเดียวกันทุกทิศทาง (Homogeneous and Isotropic) แล้วนั้น การเคลื่อนตัวของน้ำมันผ่านชั้นดินนี้จะมีรูปทรงเป็นรูปกรวยคว่ำ แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านของชั้นดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รูปร่างการเคลื่อน

ตัวนั้นจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนดังรูปที่ 2-2 แสดงรูปร่างของ LNAPL เมื่อเกิดการรั่วซึมของสารและเกิดการตกค้างในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวไม่ได้มีเพียงแค่การเคลื่อนตัวไปตามแรงโน้มถ่วงและความลาดชันของดินเท่านั้นที่ทำให้เกิดการไหลซึมผ่านในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose zone) ได้ ขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ชนิดของดิน และชนิดของของเหลวก็มีผลต่อการไหลซึมผ่านด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2-2 การเคลื่อนตัวของ LNAPL ผ่านชั้นดิน (Fetter, 1999)

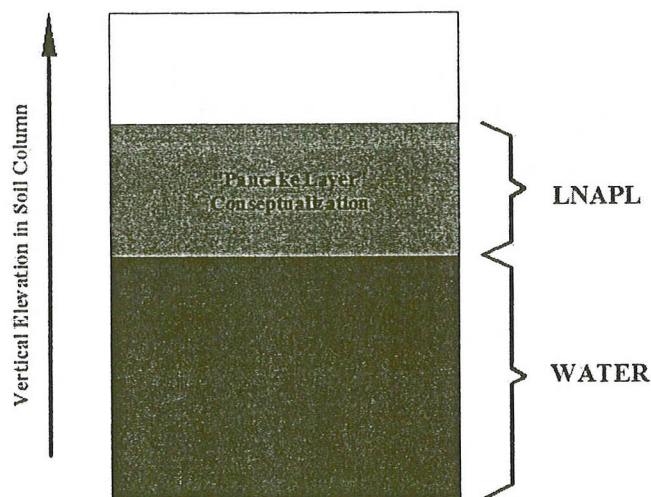


2.3 การปนเปื้อนของ LNAPL

การปนเปื้อนของ LNAPL ในดินเป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่มลพิษสู่ชั้นน้ำใต้ดินโดยอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน ถังเก็บในคลังน้ำมัน และท่อส่งน้ำมัน การรั่วไหลอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกดทับและการทรุดตัวของฐานราก เป็นต้น นอกจากนี้การปนเปื้อนอาจเกิดจากการเทน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วทิ้งบนผิวดิน บนแม่น้ำลำคลอง การเกิดอุบัติเหตุบนถนนของรถบรรทุกทุกน้ำมัน การปนเปื้อนของน้ำมันนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณที่ปนเปื้อน คุณสมบัติของน้ำมัน โครงสร้างของชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณที่เกิดการปนเปื้อน ก่อนที่น้ำมันจะเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้นั้นจะต้องผ่านชั้นต่างๆ คือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose zone), ชั้นคาปิลลารี (Capillary zone) และ ชั้นน้ำใต้ดิน (Saturated zone) การเกิดการรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน (Underground Storage Tank: UST) นั้น เริ่มแรกจะเกิดการซึมลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose zone) โดยถ้าการรั่วไหลเกิดขึ้นปริมาณเพียงเล็กน้อยน้ำมันจะถูกดูดซับไว้ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน และไม่สามารถไหลซึมผ่านลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดินหรือชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) เว้นแต่อนุภาคของดินมีคุณสมบัติในการดูดซับไว้ได้ไม่ดี หรือมีการนำพาลงไปพร้อมกับน้ำฝน และในกรณีที่มีการรั่วไหลออกมาจากการปนเปื้อนสู่ชั้นน้ำใต้ดินก็มีโอกาสมากเช่นกัน

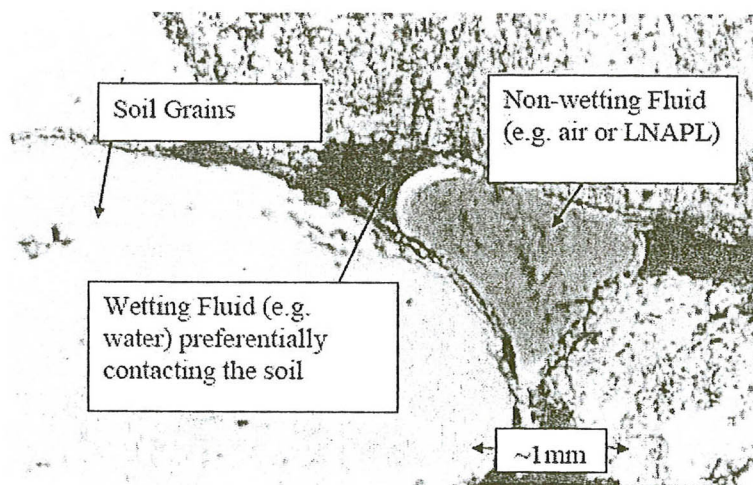
หลายปัจจัยมีผลกระทบต่อการไหลซึมของ LNAPL ผ่านดิน เช่น groundwater hydraulic gradient โดย Darcy's Law, entry pressure ของ pore throat, และการขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดิน LNAPL conductivity ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลว, relative permeability, และ conductivity ของ porous media Displacement entry pressure คือความดันที่ต้องการเพื่อให้ LNAPL สามารถเคลื่อนที่ผ่าน pore throat ได้ ถ้า pressure gradient ไม่เพียงพอที่ขอบเขตของ plume ที่จะดัน LNAPL ผ่าน pore throat ของ media ได้ LNAPL ก็จะไม่สามารถซึมผ่านได้ สำหรับทรายหยาบสะอาดจะมีค่า displacement entry pressure ต่ำ สำหรับดินเม็ดละเอียดอาจจะมีค่า displacement entry pressure มากและสามารถป้องกันไม่ให้ LNAPL ซึมผ่านได้ การขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดินก็สามารถป้องกัน LNAPL ซึมผ่านได้เพราะเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น LNAPL ก็จะติดค้างเป็น residual

ความเข้าใจของการกระจายตัวของน้ำมันใต้ดินได้เริ่มในทศวรรษที่ 1930 ทำให้เข้าใจถึงผลกระทบของแรง interfacial และ capillary ต่อการกระจายตัวของน้ำมันใต้ดิน และนำไปสู่การพัฒนาวิธีสำหรับอธิบายพฤติกรรม conductivity และการ recoverability ของน้ำมันจากบ่อน้ำมัน ในเวลา 20 ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรด้านน้ำใต้ดินทำการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับ LNAPL ใต้ดินด้วยสมมุติฐานที่ว่า LNAPL ลอยอยู่บนผิวน้ำเหมือนแพนเค้กและจะแทนที่น้ำและอากาศในช่องว่างในดินทั้งหมด (รูปที่ 2-3) จากสมมุติฐานแบบนี้ผลทำให้มีความเข้าใจว่า LNAPL ในดินลอยอยู่บนชั้นน้ำใต้ดินเป็นชั้น uniform ที่มี ความอิ่มตัวของ LNAPL เท่ากับ 100% ถึงแม้ว่าจะมีการตระหนักถึงความแตกต่างระหว่างความหนาของชั้น LNAPL ที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์และความหนาจริงๆในชั้น aquifer แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับความแตกต่างนี้และผลกระทบของชนิดของ LNAPL และ aquifer ยังไม่ได้รับการพัฒนา ยังคงใช้สมมุติฐานที่ว่าเมื่อพบ น้ำมันในบ่อสังเกตการณ์แสดงว่ามันกระจายตัว และยังเชื่อว่า LNAPL จะขึ้นลงตามระดับน้ำใต้ดินโดยจะลอยอยู่บนผิวน้ำเสมอ



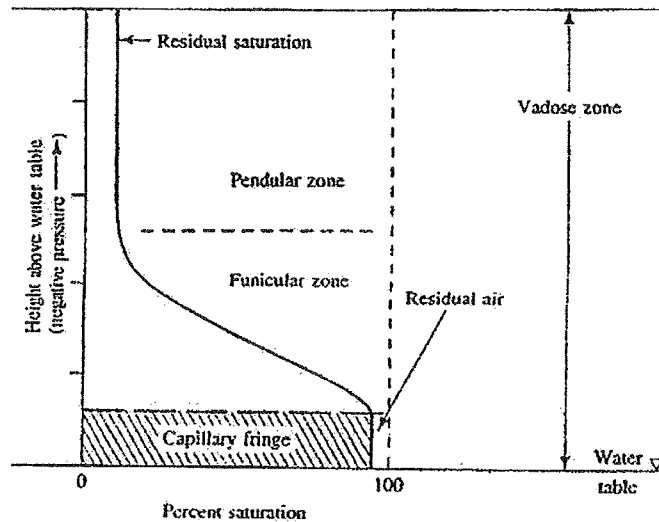
รูปที่ 2-3 แบบจำลองแบบแพนเค้ก

Farr & McWhorter (1990) และ Lenhard & Parker (1990) ได้ขยายความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของ LNAPL สำหรับบ่อน้ำมันในทศวรรษที่ 1930 ไปสู่การประยุกต์ทางด้านสิ่งแวดล้อมของการรั่วไหลของน้ำมัน งานเหล่านี้เป็นการเปิดความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาดังกล่าวตั้งแต่ทศวรรษที่ 1990 แบบจำลองความเข้าใจจากผลงานวิจัยได้แสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งต่างจากแบบจำลองแผนค้ำ โดยที่ LNAPL ไม่ได้อยู่กันอย่างต่อเนื่องภายในช่องว่างในดินแต่จะอยู่ร่วมกับน้ำในช่องว่าง LNAPL จะไม่ลอยอยู่บนผิวของน้ำใต้ดินที่อัตราความอิ่มตัว 100% เสมอแต่อัตราความอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน, คุณสมบัติทาง capillary, คุณสมบัติของเหลว, และปริมาตรของ LNAPL ที่รั่วซึม โดยสรุป LNAPL จะเติมช่องว่างในดินเพียงบางส่วนและอัตราความอิ่มตัวจะลดลงกับความลึกจนกระทั่งน้ำเติมช่องว่างจนเต็ม



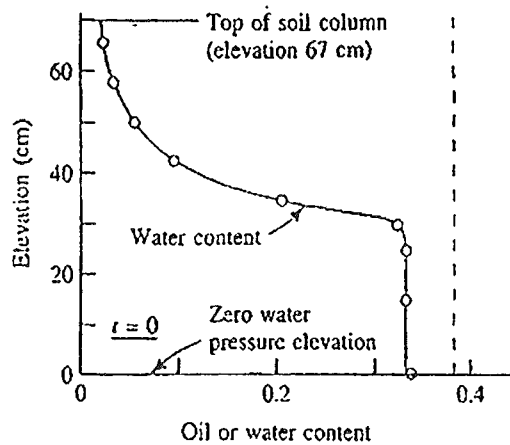
รูปที่ 2-4 LNAPL อยู่ร่วมกับน้ำในช่องว่างในดิน (www.rtdf.org)

รูปที่ 2-5 แสดงการกระจายของน้ำใน vadose zone ในดิน (Abdul, 1988) จะสังเกตเห็นว่าดินมีความชื้นที่เรียกว่า irreducible water saturation ที่ส่วนบนสุดของ vadose zone หรือเรียกส่วนนี้ว่า pendular zone ใต้ส่วนนี้ความชื้นของดินจะมากกว่า irreducible saturation หรือบางทีก็เรียกส่วนนี้ว่า funicular zone เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำเข้าใกล้ 100% ก็จะเป็น capillary fringe ความสัมพันธ์ระหว่างอากาศและน้ำในส่วน vadose zone เป็นแบบ two-phase immiscible flow และมี residual air saturation ใน capillary zone

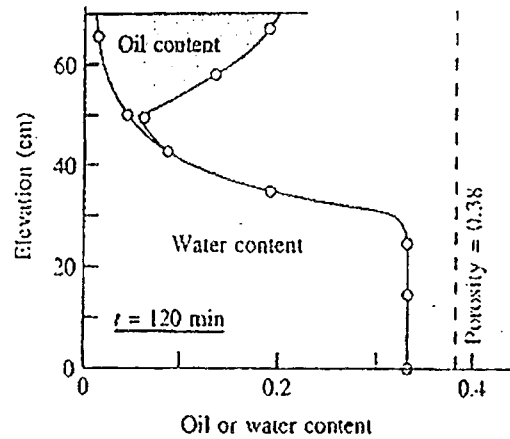


รูปที่ 2-5 การกระจายตัวของน้ำใน vadose zone เมื่อไม่มี LNAPL (Abdul, 1988)

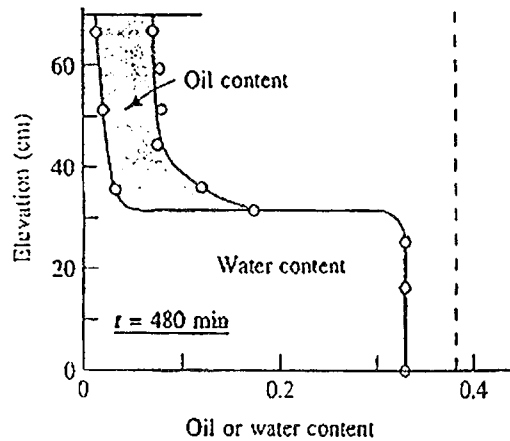
Eckberg & Sunada (1984) ศึกษาการกระจายตัวของเบนซินใน vadose zone จากการทดสอบ one-dimensional infiltration column test รูปที่ 2-6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของน้ำและ LNAPL ใน sand column เมื่อเติมเบนซินลงไป เบนซินจะไหลซึมลงในแนวตั้งผ่านชั้นทรายไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรง capillary ชั้นนี้将有ความชื้นเริ่มต้นและ LNAPL จะเป็น non-wetting fluid เบนซินบางส่วนจะค้างอยู่ในช่องว่างในดินเนื่องจาก interfacial force ทำให้เกิด residual saturation gasoline ซึ่งจะมีปริมาณประมาณ 1-7% ของปริมาตรของช่องว่างในส่วนที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อ LNAPL ไหลซึมลงมาจะแทนที่บางส่วนของ capillary water ในส่วน vadose zone ทำให้น้ำส่วนนี้เคลื่อนตัวอยู่ข้างหน้า LNAPL เมื่อ LNAPL ไหลไปถึง capillary zone ก็จะเริ่มสะสมตัว เริ่มแรก LNAPL จะอยู่ภายใต้ tension เหมือนกับน้ำที่อยู่ใน vadose zone เมื่อ LNAPL สะสมตัวเพิ่มขึ้นบน capillary zone จะเกิดชั้นสะสมตัวของเบนซิน (oil table) โดยมี LNAPL บางส่วนมี pore pressure ที่เป็นบวก ชั้น capillary zone จะเริ่มบางลงและของเหลวจะเคลื่อนตัวผ่านได้ง่ายขึ้นหรือ LNAPL อีกระลอกเริ่มสะสมตัว ในที่สุด capillary zone จะหายไปและ oil table จะวางตัวอยู่บนชั้นน้ำใต้ดินโดยตรง ผิวบนของชั้นน้ำใต้ดินอาจจะลดระดับลงเนื่องจากน้ำหนักของ LNAPL



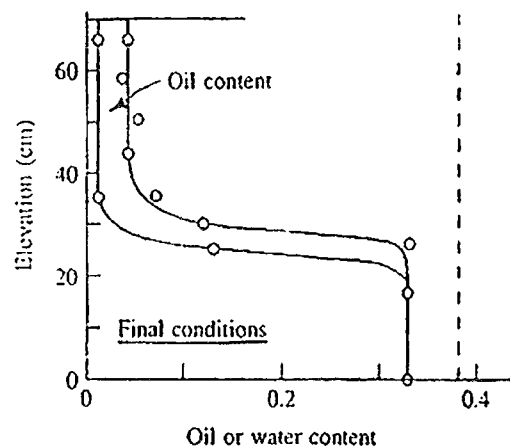
(a) สภาพเริ่มต้น



(b) $t = 120 \text{ min}$



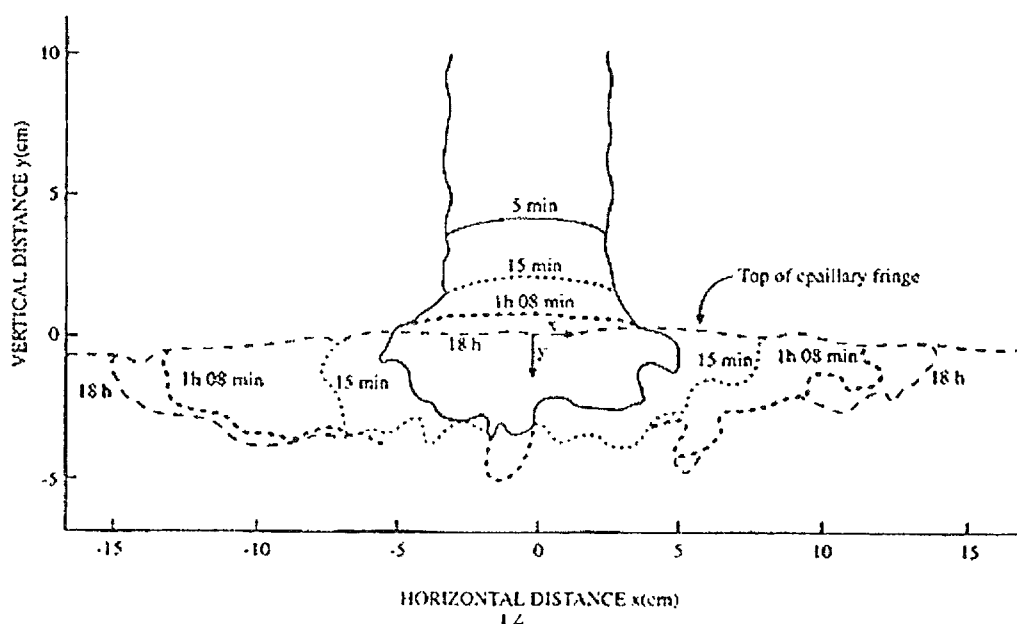
(c) $t = 480 \text{ min}$



(d) สภาพสุดท้าย

รูปที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันและน้ำเมื่อน้ำมันถูกเติมเข้าไปในส่วนบนของ column ของทราย (Eckberg & Sunada, 1984)

Schroth et al (1995) ศึกษาลักษณะของไหลซึมของ LNAPL ที่เกิดในชั้นทรายไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้ two-dimensional infiltration tank test LNAPL จะไหลซึมในแนวตั้งผ่านส่วน vadose zone จนกระทั่งถึง ส่วนบนของ capillary fringe จากนั้นก็จะกระจายตัวออกทางด้านข้างที่ส่วนบนของ capillary fringe จนกระทั่งเกิดการสมดุล LNAPL จะสะสมตัวและมีรูปร่างโค้งที่ส่วนใต้และมีส่วนบนเสมอกับระดับเดิม ของ capillary fringe LNAPL ส่วนที่อยู่เหนือ capillary fringe คือ residual รูปที่ 2-7 แสดงการไหลซึมของ LNAPL กับเวลา



รูปที่ 2-7 การไหลซึมของ LNAPL กับเวลาจาก two-dimensional infiltration tank (Schroth et al., 1995)

Kamon et al. (2006) ทำการทดสอบการไหลของ LNAPL ผ่าน vadose zone ด้วย two-dimensional infiltration tank test โดยใช้ image analysis technique และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของการอิ่มตัวของ LNAPL, น้ำ, และอากาศ นอกจากนี้ยังวัดการอิ่มตัวของน้ำอย่างต่อเนื่องโดย miniature resistivity probe และวัดความดัน matric suction ของ LNAPL และน้ำโดยใช้ hydrophobic และ hydrophilic tensiometer ข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงของความดันและความอิ่มตัวของของไหลต่างๆกับเวลาที่จุดต่างๆในระบบการทดลองจะเป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบความสามารถของการคำนวณเชิงตัวเลข ข้อมูลนี้จะใช้ในการทดสอบความเหมาะสมของ constitutive pressure-saturation relations ที่ใช้สำหรับ multiphase flow model ผลการศึกษานี้แสดงว่าสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกต้องจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์นี้้อย่างละเอียด ในการคำนวณ three-fluid phase system แบบจำลองต้องคำนึงถึง residual NAPL saturation หลังจาก NAPL drainage ด้วย

2.4 ผลกระทบของเอธานอลต่อคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

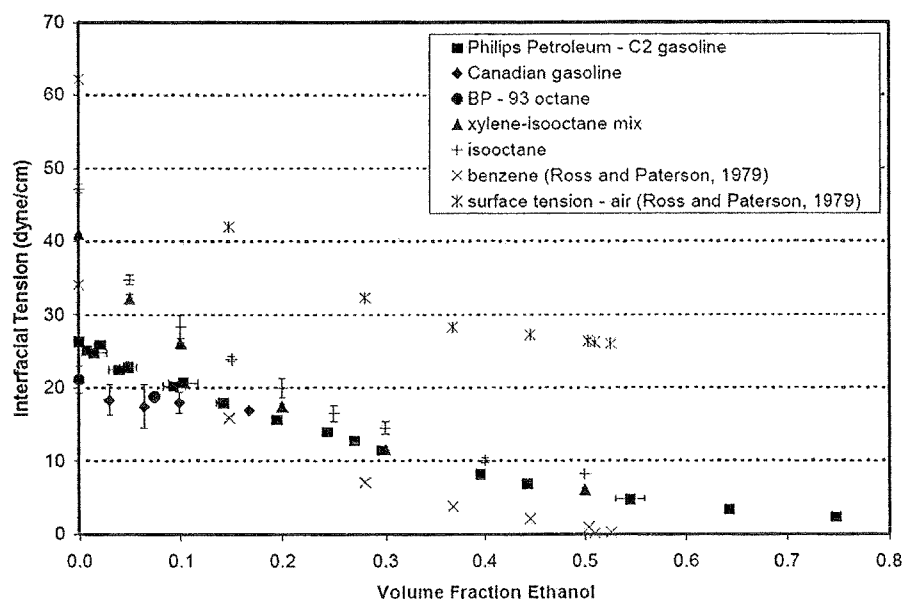
เอธานอลเปลี่ยนคุณสมบัติหลัก 3 ประการที่ควบคุมการไหลซึมของก๊าซโซฮอลใต้ดิน คือ (i) solubility, (ii) surface tension, และ (iii) sorption ก๊าซโซฮอลสามารถละลายในน้ำได้มากกว่าเบนซินทำให้มีการกระจายตัวของก๊าซโซฮอลในน้ำใต้ดินมากกว่า ก๊าซโซฮอลจะมีค่า surface และ interfacial tension ที่ลดลงทำให้การติดค้างของก๊าซโซฮอลในดินลดลงเมื่อมีการไหลผ่าน ก๊าซโซฮอลจะมีพฤติกรรม sorption ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากเอธานอลเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ในขณะที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้นไม่

ชอบน้ำ (hydrophobic) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลซึมและการกระจายตัวของก๊าซโซฮอลผ่านดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

น้ำมันเบนซินเป็นสารที่แทบจะไม่ละลายน้ำ Polak & Lu (1973) วัดการละลายน้ำของส่วนประกอบของเบนซิน 21 ตัว และรายงานว่าความสามารถในการละลายอยู่ระหว่าง 0.54 mg/L และ 1800 mg/L สำหรับ 2, 2, 5 – trimethylhexane และ benzene ที่ 25°C ตามลำดับ ความสามารถที่น้ำจะละลายในเบนซินอยู่ระหว่าง 74 mg/L และ 690 mg/L สำหรับน้ำใน 2, 3, 5 – trimethylpentane และ benzene ตามลำดับ ค่าที่รายงานนี้ไม่รวมผลกระทบของสาร surface-active หรือสารผสมเพิ่มอื่นๆในเบนซินที่อาจมีประจุในโครงสร้างของโมเลกุล ในทางตรงข้ามเอธานอลเป็นสารที่ละลายน้ำและเบนซินได้ในทุกความเข้มข้น เมื่อมีเอธานอลในส่วนผสมของเบนซินกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของส่วนผสมต่างๆ เมื่อสัดส่วนผสมของเอธานอลต่อส่วนผสมก็ยังแยกเป็น 2 ส่วนแต่น้ำจะละลายในเบนซินได้มากขึ้นและเบนซินก็ละลายในน้ำได้มากขึ้น เมื่อมีส่วนผสมของเอธานอลมากพอน้ำและเบนซินจะเข้ากันได้โดยสมบูรณ์และรวมกันเป็นเนื้อเดียว การแยกตัวของเอธานอลและผลกระทบของเอธานอลต่อ solubility แสดงได้ด้วย ternary phase diagram (De Oliveira, 1997)

การผสมเอธานอลในเบนซินจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทาง capillary ของก๊าซโซฮอลเนื่องจากการลดลงของ interfacial และ surface tension ระหว่าง phase Powers & Heermann (1999) ได้ทำการทดสอบจำนวนมากกับส่วนผสมของเบนซิน, น้ำ, และเอธานอลโดยแปรผันปริมาณของเอธานอลโดยการเปลี่ยนสัดส่วน gasoline-water volume ratio หรือโดยการเติมเอธานอลลงไปในระบบ ผลการทดลองในรูปที่ 2-8 แสดงว่าค่า interfacial tension ของระบบ C2 ลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อปริมาณของเอธานอลเพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 26.3 dynes/cm ที่ 0% เอธานอล ไปเป็น 7 dynes/cm ที่ 50% เอธานอล (ลดลง 75%) น้ำมัน C2 คือน้ำมันที่มีปริมาณเอธานอล 5.8% โดยปริมาตรถูกพัฒนาโดย Phillips Chemical Company และรับรองว่าเป็นสารสำหรับการทดสอบใน California ในทางตรงข้ามสำหรับสารบริสุทธิ์และสารทดลองแทนเบนซินที่ประกอบด้วย xylene (20% โดยปริมาตร) และ isooctane มีค่า interfacial tension ลดลงมากกว่าเมื่อมีการเพิ่มเอธานอลเพียงจำนวนเล็กน้อย (<10%) ในของผสม ความแตกต่างนี้บ่งบอกว่าส่วนประกอบอย่างอื่นในเบนซิน C2 มีผลกระทบอย่างมากต่อค่า interfacial tension และสารทดลองแทนเบนซินที่เป็น monoaromatic และ alkane จะไม่ใช่ตัวแทนที่ดีของเบนซินในการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวและกระจายตัวในดิน ในทางตรงข้าม surface tension ระหว่าง organic และอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเพิ่มของปริมาณเอธานอล ค่า surface tension ของเบนซิน C2 หลังจากสมดุลกับน้ำและเอธานอลมีค่า 19.7 ± 0.25 dynes/cm ในช่วงปริมาณเอธานอลที่ศึกษา (Powers & Heermann, 1999) ผู้วิจัยคนอื่นๆก็รายงานการคงที่ของค่า surface tension ของสารละลายบริสุทธิ์ในระบบ ternary (organic ethanol-water) (เช่น Ross & Paterson, 1979) เนื่องจากการลดลงของ capillary force และการเปลี่ยนแปลงของ interfacial และ surface tension ทำให้ความสูงของ capillary fringe ลดลงและความลึกของ gasoline pool เปลี่ยนแปลง และทำให้เบนซินสามารถเข้าไปใน

ช่องว่างเล็กๆระหว่างเม็ดดินได้ง่ายขึ้น (Demond & Poberts, 1991) ซึ่งจะกระทบการกระจายตัวของก๊าซโซฮอลใน vadose zone และ gasoline pool



รูปที่ 2-8 ค่า interfacial และ surface tensions ของเบนซินและสารอินทรีย์เมื่อผสมกับเอทานอล (Powers et al., 2001)

Donaldson et al. (1994) ได้ทำการศึกษาอย่างละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบของแอลกอฮอล์ในเบนซินต่อพฤติกรรมการไหลซึมใต้ดิน โดยสังเกตการไหลผ่านดินที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของน้ำมัน M85 (ส่วนผสมของเมธานอล 85% และเบนซิน 15%) การที่มีแอลกอฮอล์ในปริมาณมากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนตัวแบบไม่ผสมกับน้ำแบบน้ำมันปกติเป็นการการเคลื่อนตัวที่มีการผสมกับน้ำ ในการเคลื่อนตัวแบบผสมกับน้ำนั้นความหนาแน่นและความหนืดจะมีความสำคัญมากกว่า interfacial tension จากผลของการทดสอบการไหลซึมนี้จะสังเกตพฤติกรรมการไหลซึมของ M85 เปรียบเทียบกับเบนซิน ดังนี้

- M85 มีการกระจายตัวทางด้านข้างที่น้อยกว่า
- ความสูงของ capillary fringe ของ M85 จะน้อยกว่า (ความสูงนี้เกิดเนื่องจากการสะสมตัวของน้ำมันบนผิวของน้ำใต้ดิน)
- การสะสมตัวของ pool ของ M85 มีการกระจายตัวในแนวนอนที่น้อยลง
- มีฟองอากาศเกิดขึ้นในบริเวณที่ M85 ไหลผ่านเนื่องจากการไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำและเมธานอลซึ่งทำให้ปริมาตรของส่วนผสมลดลง
- เกิดหยดของเบนซินรอบๆขอบเขตของ gasoline pool และ infiltration zone เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของเมธานอลและการลดลงของ effective solubility ของส่วนประกอบในเบนซิน

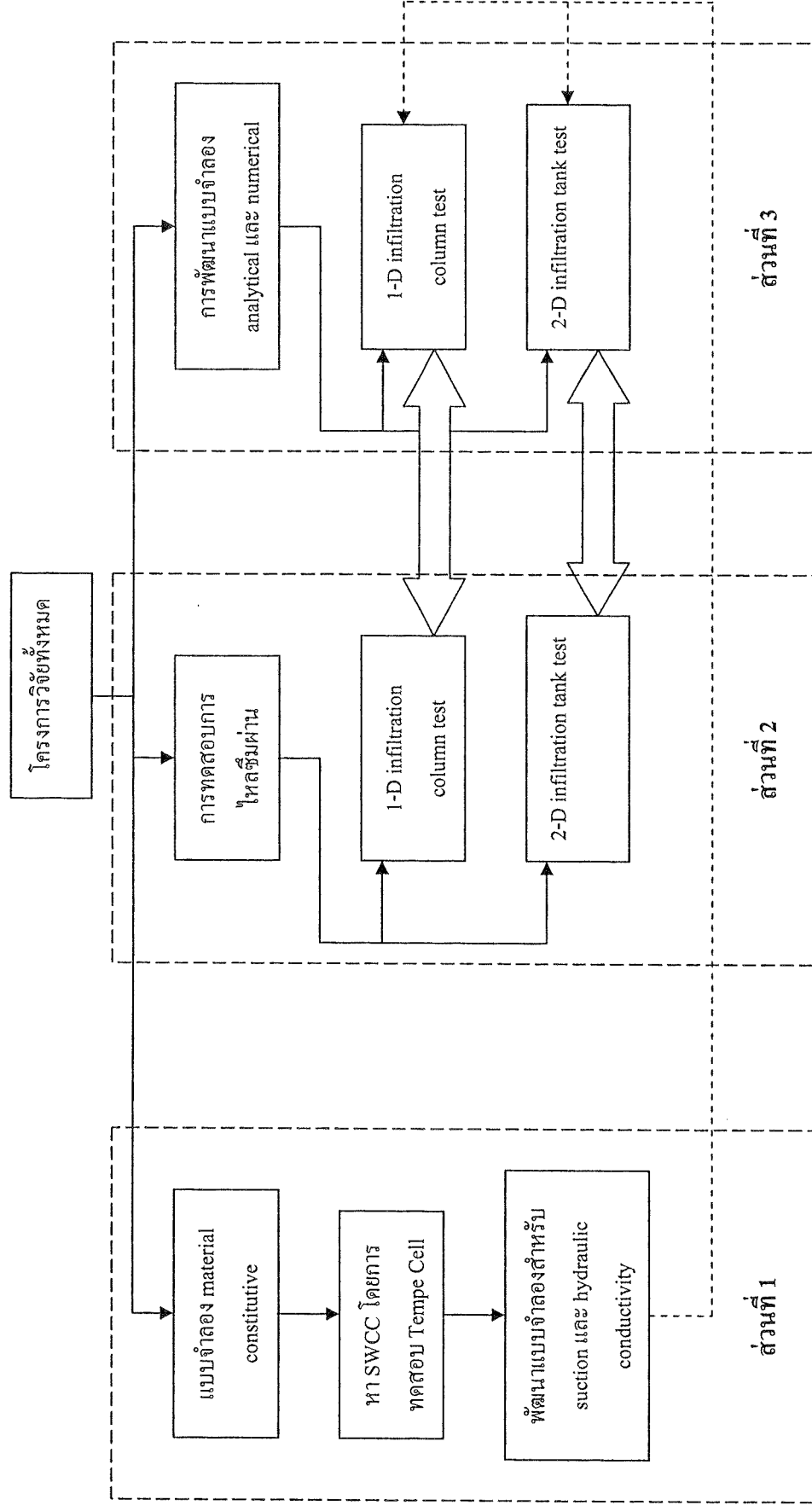
Ryan & Dhir (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในการตกค้างของน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำใต้ดินเมื่อน้ำใต้ดินมีการขึ้นลง เขาพบว่าเมื่อลดค่า interfacial tension จาก 40 ไปเป็น 10 dynes/cm โดยการเพิ่ม isopropyl alcohol ปริมาณของน้ำมันที่ตกค้างในบริเวณที่อิ่มตัวด้วยน้ำลดลงจาก 11% เป็น 6% ของปริมาณช่องว่างทั้งหมด ความเข้มข้นของอัลกอฮอล์ที่มากมีแนวโน้มที่จะลดความเป็นไปได้ในการตกค้างแต่เพิ่มความเป็นไปได้ที่จะเกิดหยดน้ำมันระหว่างการไหลซึม การเกิดหยดน้ำที่ตกค้างของน้ำมันในบริเวณที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีความสำคัญเพราะจะเพิ่ม NAPL-water contact area ของสารละลาย

มีการศึกษาหลายเรื่องเกี่ยวกับผลกระทบของ cosolvency ของอัลกอฮอล์โดยใช้ single hydrophobic organic chemicals (HOCs) เป็นสารแทนสำหรับเบนซิน แนวทางการศึกษานี้ไม่พิจารณาความซับซ้อนเนื่องจากลักษณะของส่วนประกอบหลายอย่างของสารอินทรีย์นี้ (Groves, 1988; Mihelcic, 1990; Stepenson, 1992; Peschke & Sandler, 1995; Hellinger & Sandler, 1995) งานของ Poulsen et al. (1992) ให้ข้อมูลมากมายเกี่ยวกับการแยกตัวของสารประกอบ BTEX จาก multi-component gasoline โดยมีเมทานอลและ MTBE เป็นสาร oxygenate ที่เติมลงในน้ำมัน PS-6 ตามมาตรฐาน API การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ BTEX เนื่องจากผลของ cosolvent จะสมดุลโดยการลดลงของมวลของสารนี้ในน้ำมันเนื่องจากการมี oxygenate ความเข้มข้นของ benzene จะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อสัดส่วนของเบนซินต่อน้ำสูงเท่านั้น Heermann & Powers (1998) ศึกษาผลของ cosolubility ต่อการมีเอทานอลในเบนซินโดยทำการทดสอบ batch equilibrium เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง BTEX และ เอทานอล partitioning โดยใช้สารบริสุทธิ์แทนเบนซินและยังมีการทดสอบกับสารที่ผสมเอทานอลด้วย

โดยสรุปเอทานอลจะเปลี่ยนคุณสมบัติที่ควบคุมการไหลซึมของเบนซินผ่านดิน การศึกษาส่วนมากทำกับสารบริสุทธิ์ที่ใช้แทนเบนซิน ยังคงไม่มีการศึกษาที่เป็นระบบของผลกระทบของการเติมเอทานอลในเบนซินต่อการไหลซึมผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงถูกเสนอขึ้นเพื่อศึกษาปัญหาดังกล่าวอย่างละเอียด

2.5 การดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะมีทั้งการทดลองในห้องปฏิบัติการ, การพัฒนา analytical model, และการพัฒนา numerical model โดยงานในโครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็นสามส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะศึกษา soil-water characteristic curves และการพัฒนา constitutive model สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆกับทราย ส่วนที่ 2 จะเป็นการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลซึมของ LNAPL ทั้งในหนึ่งมิติและสองมิติ (1-D infiltration column test และ 2-D infiltration tank test) และส่วนที่ 3 เป็นการพัฒนาแบบจำลอง analytical model และ numerical model โดยอาศัยผลการทดลองจากส่วนที่ 1 และ 2 โดยระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการวิจัยเป็นดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 วิธีการดำเนินการวิจัย