

การตรวจติดตามและประเมินสภาพการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในน้ำใต้ดิน จากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยชุมชน

Monitoring and Assessment of Groundwater Contaminated by Volatile Organic Compounds from Municipal Solid Waste Landfill

คำนำ

ปัจจุบันการกำจัดขยะมูลฝอยภายในจังหวัดนนทบุรี จะนำไปทิ้งไว้บริเวณสถานที่ทิ้งขยะมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ซึ่งการกำจัดมูลฝอยใช้วิธีเทกองกลางแจ้ง ปล่อยให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ถูกหลักสุขาภิบาล ทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน เนื่องจากน้ำชะมูลฝอย (leachate) มีการปนเปื้อนของสารมลพิษทั้งสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) สารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ซึ่งรวมถึงสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) โดยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ และสารสังเคราะห์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ VOCs ในน้ำชะมูลฝอยสามารถปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ในกรณีที่หลุมฝังกลบไม่มีระบบกันซึมหรือระบบกันซึมมีประสิทธิภาพไม่ดีพอ นอกจากนั้นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยของเทศบาลไม่ได้ออกแบบไว้เพื่อรองรับของเสียอันตราย ทำให้มีสารพิษจากของเสียอันตรายปนเปื้อนสู่ดินและน้ำใต้ดิน ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม

กลุ่มของ VOCs ที่พบบ่อยในน้ำชะมูลฝอยโดยทั่วไป ได้แก่ chlorinated hydrocarbons, aromatic hydrocarbons, halogenated compounds, และ alcohols เป็นต้น (Thornton *et al.*, 2000; Baun *et al.*, 2003) ถึงแม้ว่า VOCs ที่พบในน้ำชะมูลฝอยจะมีความเข้มข้นน้อยเมื่อเทียบกับสารประกอบอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก แต่การแพร่กระจายของ VOCs มีความวิกฤตมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก VOCs มีความคงทนต่อการย่อยสลายและมีความเป็นพิษสูง ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ตั้งแต่ระดับก่อให้เกิดความรำคาญ จนถึงก่อให้เกิดมลพิษอย่างเฉียบพลันจากไอระเหยของสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพของประชาชนในด้านระบบทางเดินหายใจ, ระบบประสาท, ความเสี่ยงในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม และการเกิดมะเร็ง ในด้านสภาวะแวดล้อมสารกลุ่มนี้ก่อให้เกิดมลภาวะด้านต่าง ๆ

เช่น มลภาวะทางดิน มลภาวะทางน้ำ รวมทั้งมลภาวะอากาศ นอกจากนั้นยังก่อให้เกิดผลกระทบทางเศรษฐกิจหลายด้าน ทั้งการรักษาพยาบาล การสูญเสียโอกาส การใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่ปนเปื้อนก็ทำได้ยาก และมีประสิทธิภาพด้อยลง เป็นต้น หากไม่เร่งดำเนินการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางในการจัดการปัญหาการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ แล้ว ในอนาคตปัญหาความรุนแรงจะเพิ่มมากขึ้นและการแก้ไขปัญหาจะมีความยุ่งยากซับซ้อน รวมถึงค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาก็จะยิ่งสูงมากขึ้น

โครงการสำรวจและประเมินความรุนแรงของสภาพการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในน้ำใต้ดิน บริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นโครงการที่จัดตั้งเพื่อการศึกษาทดลองและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น จากการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอย ซึ่งเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์ข้อเท็จจริง ของผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชั้นน้ำใต้ดินซึ่งเน้นการศึกษาค่าระดับน้ำและคุณภาพน้ำใต้ดินคือการแพร่กระจายของสารในชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งมีการพิจารณาคำนวณคุณภาพน้ำคือสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โดยเน้นศึกษาสาร BTEX ได้แก่ Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene นอกจากนั้นยังมีสาร Trichloroethylene (TCE) และ Perchloroethylene (PCE) เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการแทรกซึมของน้ำชะมูลฝอยที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารปิโตรเคมีเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดิน เนื่องจากว่า Benzene เป็นส่วนประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงหลายชนิดได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์พวกล้างทำความสะอาด, พลาสติก, ไนลอน, สีทาบ้าน, ลีซอมผ้า, เรซิน, ยางมะยม เป็นต้น Toluene ใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมต่าง ๆ รวมทั้งใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับสีทาบ้าน, coatings, gums, oils, และเรซิน เป็นต้น Ethylbenzene ใช้เป็นส่วนประกอบในก๊าซโซลีน, สารผสมในน้ำมันเครื่องบิน นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมในสีทาบ้าน, น้ำหมึก, พลาสติกและยางมะยม Xylenes ใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ในก๊าซโซลีน และตัวทำละลายในอุตสาหกรรมการพิมพ์, ยาง และอุตสาหกรรมเครื่องหนัง ส่วน TCE และ PCE ใช้เป็นสาร dry-cleaning, สาร vapour-degreasing และ drying agent สำหรับโลหะและของแข็งอื่น ๆ ใช้เป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน, ใช้ในการผลิตสารฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น

โดยเครื่องมือสำคัญที่ใช้ประกอบการวางแผนและบริหารจัดการคุณภาพน้ำใต้ดินได้แก่ การใช้แบบจำลองทางสิ่งแวดล้อมซึ่งเลือกใช้โปรแกรม Visual MODFLOW โดยแบบจำลองนี้สร้างขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์และเป็นโปรแกรมที่ผ่านการทดสอบแล้วว่ามีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับสูง อีกทั้งยังนิยมนำไปใช้วิเคราะห์การไหลของน้ำใต้ดินหลายประเทศทั่วโลก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจสอบสภาพการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในน้ำใต้ดิน บริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย
2. เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW และ MT3DMS

ขอบเขตของการวิจัย

1. พื้นที่ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ คือ สถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ตำบลคลองขวาง อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี
2. สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ศึกษาได้แก่ สารอินทรีย์ระเหยง่ายทุกประเภทที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 โดยสารที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงมากที่สุดจะนำมาประเมินการปนเปื้อนสู่พื้นที่ด้านนอกแหล่งกำจัดมูลฝอยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์การปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในน้ำใต้ดิน ได้แก่ โปรแกรม Visual MODFLOW และ MT3DMS
4. ระดับน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ที่ศึกษามีความลึกไม่เกิน 10.50 เมตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้จะทำให้ทราบสถานการณ์ความรุนแรงของปัญหาการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกซึมของน้ำชะมูลฝอยที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารปิโตรเคมีเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดิน และนำผลที่ได้จากการศึกษามาจัดทำแนวทางปรับปรุงฟื้นฟูการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของประชาชนในอนาคต

การตรวจเอกสาร

ในการศึกษาการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน เป็นการประเมินสถานการณ์การปนเปื้อนโดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานทั่วไปที่รวบรวมได้และจากการสำรวจภาคสนาม แล้วนำมาวิเคราะห์การปนเปื้อนและการกระจายตัวของสารที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำใต้ดิน (Visual MODFLOW) เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์จะนำไปใช้ในการกำหนดแนวทางในการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยต่อไป

1. ข้อมูลเบื้องต้น

จังหวัดนนทบุรีมีเนื้อที่ประมาณ 622 ตารางกิโลเมตร แบ่งการปกครองออกเป็น 6 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางบัวทอง อำเภอปากเกร็ด อำเภอบางกรวย อำเภอบางใหญ่ และอำเภอไทรน้อย แบ่งเป็น 52 ตำบล 428 หมู่บ้าน องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น แบ่งเป็นเทศบาลจำนวน 9 แห่ง ได้แก่ เทศบาลนครนนทบุรี เทศบาลเมืองบางบัวทอง เทศบาลนครปากเกร็ด เทศบาลตำบลบางกรวย เทศบาลตำบลบางศรีเมือง เทศบาลตำบลปลายบาง เทศบาลตำบลไทรน้อย เทศบาลตำบลบางใหญ่ เทศบาลตำบลบางม่วง องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี 1 แห่งและองค์การบริหารส่วนตำบล 37 แห่ง

1.1 สภาพทั่วไป แบ่งพื้นที่จังหวัดออกเป็นฝั่งตะวันออกและฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่ม มีระดับพื้นดินสูงเฉลี่ยประมาณ 2 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่านจากบริเวณตอนเหนือของจังหวัด คือ อำเภอปากเกร็ด เรื่อยมายังอำเภอเมืองและอำเภอบางกรวย นอกจากนี้ จังหวัดนนทบุรียังมีคูคลองอีกหลายสายทั้งตามธรรมชาติและที่ขุดขึ้น ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในการคมนาคมทางน้ำและการเกษตรกรรม ด้านสังคมมีสภาพที่เป็นทั้งสังคมเมือง และสังคมชนบท ความเจริญส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ อ. เมือง และ อ. ปากเกร็ด ซึ่งตั้งอยู่ฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนฝั่งตะวันตกโดยทั่วไปมีสภาพเป็นชนบท การคมนาคมสะดวกทั้งทางบก และทางน้ำ

1.2 ประชากร ข้อมูลประชากร ณ ปี พ.ศ. 2545 รวมทั้งสิ้น 936,515 คน เป็นชาย 449,121 คน เป็นหญิง 487,394 คน นอกจากนี้ ยังมีประชากรแฝงที่พักอาศัยตามคอนโดมิเนียม หอพัก และบ้านจัดสรร รวมแล้วกว่า 1 ล้านคน (กรมการปกครอง, 2547) ข้อมูลประชากรจำแนกตามอำเภอ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลประชากร ปี พ.ศ. 2545 จำแนกตามอำเภอ ของจังหวัดนนทบุรี

อำเภอ	จำนวนประชากร		
	ชาย	หญิง	รวม
เมืองนนทบุรี	171,979	179,066	351,045
บางกรวย	41,048	45,826	86,874
บางใหญ่	33,633	37,339	70,972
บางบัวทอง	84,612	95,691	180,303
ไทรน้อย	23,365	25,158	48,523
ปากเกร็ด	94,484	104,314	198,798
รวมทั้งสิ้น	449,121	487,394	936,515

ที่มา: กรมการปกครอง (2547)

1.3 การใช้ประโยชน์ที่ดิน จังหวัดนนทบุรีมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 388,939 ไร่ ในปี 2532 ส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรมคิดเป็นร้อยละประมาณ 70.23 ของพื้นที่จังหวัด ประมาณ 273,151 ไร่ การใช้ที่ดินเพื่อที่พักอาศัยคิดเป็นร้อยละประมาณ 23.24 (90,406 ไร่) อุตสาหกรรมร้อยละ 0.88 (3,426 ไร่) สนามกอล์ฟร้อยละ 0.06 (236 ไร่) พื้นที่ยังไม่ได้พัฒนาร้อยละ 2.11 (8,190 ไร่) และอื่น ๆ ร้อยละ 3.48 (13,530 ไร่) (อุดร, 2545)

1.4 สภาพภูมิอากาศ โดยทั่วไปจังหวัดนนทบุรี มีอากาศแบบร้อนชื้น โดยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้เกิดฤดูทั้งสามได้แก่ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มมีความแตกต่างของระดับพื้นดินเพียงเล็กน้อย สภาพภูมิอากาศจึงค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ จากข้อมูลลักษณะภูมิอากาศที่สถานีตรวจวัดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา (ระหว่างปี พ.ศ. 2514-2543 ดังตารางผนวกที่ จ1) พอจะสรุปได้ดังนี้

1.4.1 ฤดูกาล เมื่อพิจารณาจากระดับอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนสามารถแบ่งฤดูกาลออกได้เป็น 3 ฤดูดังนี้

ฤดูร้อน: เริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม เป็นช่วงที่อากาศร้อนจัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเดือนเมษายน ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยถึง 35.1 องศาเซลเซียส

ฤดูฝน: เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม เป็นช่วงที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งพาความชุ่มชื้นมาจากมหาสมุทรอินเดีย เดือนกันยายนเป็นเดือนที่มีฝนตกชุกที่สุด

ฤดูหนาว: เริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงราวกลางเดือนกุมภาพันธ์ เป็นช่วงที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งพัดพาอากาศเย็นจากประเทศจีนมาปกคลุมประเทศไทย อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในช่วงเดือนธันวาคมมีค่าประมาณ 21.1 องศาเซลเซียส

1.4.2 อุณหภูมิ ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีอุณหภูมิรายเดือนอยู่ในเกณฑ์สูงสุดเกือบตลอดปี โดยมีค่าเฉลี่ยรายเดือนอยู่ในช่วง 25.9-30.1 องศาเซลเซียส ค่าสูงสุดเฉลี่ยมีค่าตั้งแต่ 31.4 องศาเซลเซียส ในเดือนธันวาคม จนถึง 35.1 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายน ค่าต่ำสุดเฉลี่ยรายเดือนมีค่าตั้งแต่ 21.1 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคม จนถึง 26.4 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายน

1.4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ อากาศในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 75 % ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนมีค่าตั้งแต่ 69 % ในเดือนธันวาคม จนถึง 80 % ในเดือนกันยายน

1.4.4 ปริมาณน้ำระเหย ปริมาณน้ำระเหยมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ ในเดือนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและอุณหภูมิสูงจะมีปริมาณน้ำระเหยเฉลี่ยสูง ปริมาณน้ำระเหยเฉลี่ยรายเดือนที่สถานีกรมอุตุนิยมวิทยามีค่าตั้งแต่ 122.8 มิลลิเมตร ในเดือนตุลาคม จนถึง 183.6 มิลลิเมตร ในเดือนมีนาคม ปริมาณรวมตลอดทั้งปีเท่ากับ 1,798.8 มิลลิเมตรโดยเฉลี่ย

1.4.5 ปริมาณน้ำฝน ค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนที่สถานีกรมอุตุนิยมวิทยามีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 5.0 มิลลิเมตร ในเดือนธันวาคม ถึง 345.3 มิลลิเมตรในเดือนกันยายน ปริมาณน้ำฝนตลอดปีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1,543.2 มิลลิเมตร รวมวันที่ฝนตกทั้งหมดเท่ากับ 127 วันในหนึ่งปี

1.4.6 ลมพัดดิน ลมในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนส่วนใหญ่เป็นลมฝ่ายใต้ และในฤดูหนาวจะเป็นลมเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนทั่วไปมีค่าระหว่าง 2.2-4.7 นี้อัด

1.5 แหล่งกำเนิดและปริมาณมูลฝอย ขยะหรือของเสีย แบ่งเป็น มูลฝอยธรรมดาทั่วไป ได้แก่ มูลฝอยสด เศษอาหาร กระดาษ โฟม พลาสติก ขวด แก้ว โลหะ ฯลฯ และของเสียอันตราย ได้แก่ มูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาล กากสารเคมี สารเคมีกำจัดแมลง กากน้ำมัน หลอดฟลูออเรสเซนต์ แบตเตอรี่ใช้แล้ว แหล่งกำเนิดของเสียที่สำคัญ ได้แก่ ชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมและพื้นที่เกษตรกรรม เป็นต้น

2. การกำจัดมูลฝอย

วิธีการกำจัดมูลฝอยมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น นำไปกองทิ้งบนพื้นดิน (Dumping on land) ทิ้งลงทะเล (Dumping at sea) หมักทำปุ๋ยหมัก (Composting) ทิ้งลงในท่อระบายน้ำเสีย (Discharge to the sewer) เผากลางแจ้ง (Open burning) เผาในเตาเผา (Incineration) และการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) แต่ระบบการกำจัดมูลฝอยที่เหมาะสมและถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลมี 3 ระบบ คือ ระบบการเผาในเตาเผา ระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล และระบบการหมักทำปุ๋ย ซึ่งวิธี การฝังกลบมูลฝอย เป็นวิธีการกำจัดมูลฝอยที่นิยมใช้อยู่ในประเทศไทย (ประมาณร้อยละ 70) เนื่องจากต้นทุนและค่าบำรุงรักษาต่ำกว่าวิธีการกำจัดมูลฝอยวิธีอื่น สำหรับนอกเขตเทศบาลนั้น ส่วนใหญ่ยังไม่มีสถานที่กำจัดที่ถูกหลักสุขาภิบาล โดยทั่วไปจะกำจัดโดยการกองทิ้งกลางแจ้ง หรือเผากลางแจ้ง มีเพียงไม่กี่แห่งที่นำมูลฝอยไปกำจัดอย่างถูกหลักสุขาภิบาลร่วมกับเทศบาลที่มีระบบกำจัด (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.1 สถานการณ์ด้านการจัดการขยะมูลฝอยในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2547 มีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนเกิดขึ้นประมาณ 14.6 ล้านตัน ยังไม่รวมข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยก่อนที่จะนำมาทิ้งในถังขยะ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2546 ประมาณ 0.26 ล้านตัน เฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เก็บขนได้วันละ 9,356 ตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) ในขณะที่ปริมาณขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลและเมืองพัทยาเกิดขึ้นประมาณวันละ 12,500 ตัน และนอกเขตเทศบาล ซึ่งครอบคลุมพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบล เกิดขึ้นประมาณวันละ 18,100 ตัน การกำจัดขยะมูลฝอยนั้น กรุงเทพมหานคร ได้ว่าจ้างบริษัทเอกชนเป็นผู้ดำเนินการทั้งหมด ในเขตเมืองหรือเทศบาล มีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยที่ดำเนินการอย่างถูกหลักสุขาภิบาลจำนวน 106 แห่ง แบ่งเป็นเตาเผา 3 แห่ง (เทศบาลเมืองลำพูน เทศบาลนครภูเก็ต และเทศบาลตำบลเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี) ฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลจำนวน 103 แห่ง ส่งผลให้ปัจจุบันในเขตเมืองหรือเทศบาลสามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้ประมาณร้อยละ 37 ของปริมาณที่เกิดขึ้น ส่วนที่เหลือยังคงใช้วิธีการกำจัดที่ไม่

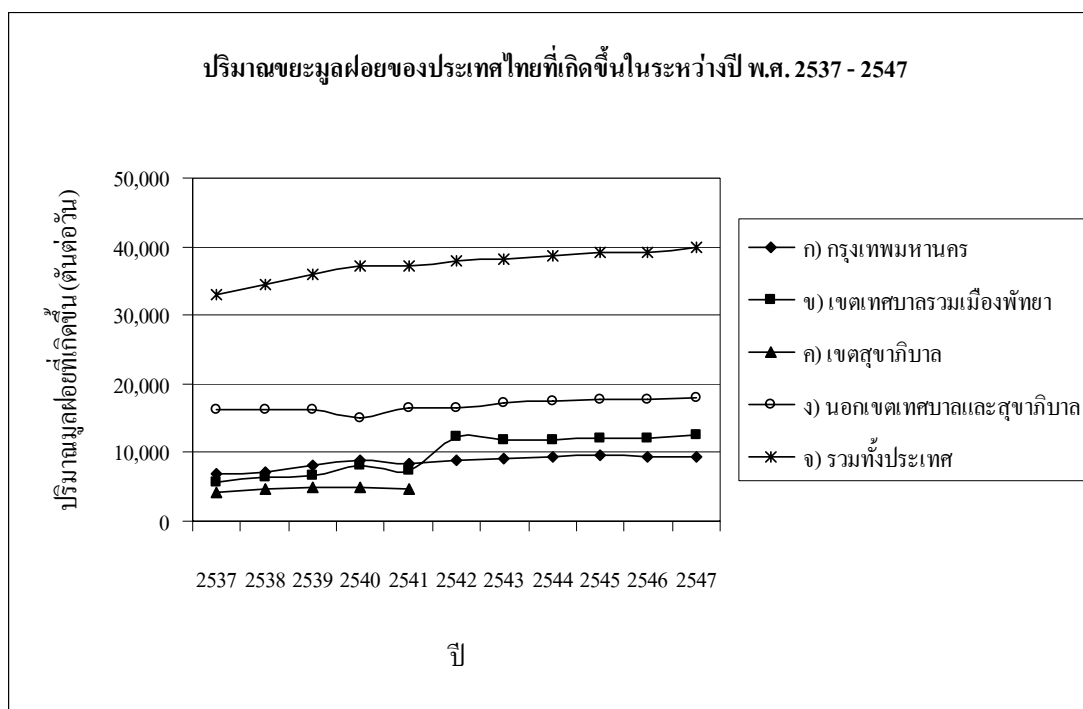
ถูกต้อง เช่น การกองบนพื้น การเผากลางแจ้ง ส่วนนอกเขตเทศบาล องค์การบริหารส่วนจังหวัดและ องค์การบริหารส่วนตำบลจะเป็นผู้รับผิดชอบ เก็บรวบรวมนำไปกำจัด ซึ่งส่วนใหญ่ยังไม่มีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยที่ถูกหลักสุขาภิบาล กำจัดโดยการเทกองกลางแจ้ง หรือเผากลางแจ้ง มีเพียงไม่กี่แห่งที่นำไปกำจัดอย่างถูกหลักสุขาภิบาลร่วมกับเทศบาลใกล้เคียง นอกจากนี้ขยะแต่ละประเภทต้องใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน ดังตารางที่ 2 ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมามากมาย

ตารางที่ 2 ระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ

วัสดุ	ระยะเวลาที่ย่อยสลาย
เศษกระดาษ	2-5 เดือน
เปลือกส้ม	6 เดือน
ถ้วยกระดาษเคลือบ	5 ปี
กันกรองบุหรี	12 ปี
รองเท้าหนัง	25-40 ปี
กระป๋องอะลูมิเนียม	80-100 ปี
ถุงพลาสติก	450 ปี
โฟม	ไม่ย่อยสลาย

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

การจัดการขยะมูลฝอยยังคงเป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทย ในเขตชุมชนและท้องถิ่นทุกระดับรวมทั้งกรุงเทพมหานคร ปริมาณขยะมูลฝอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ดังข้อมูลในภาพที่ 1 ทั้งนี้จากการขยายตัวของชุมชน การส่งเสริมและพัฒนาการท่องเที่ยว และการขยายตัวของภาคธุรกิจด้านต่าง ๆ ทั้งนี้การที่ปริมาณขยะมูลฝอยในเขตกรุงเทพมหานครลดลง อาจเนื่องมาจากได้มีการส่งเสริมให้ประชาชนคัดแยกขยะมูลฝอย เพื่อลดปริมาณขยะมูลฝอยและขยะมูลฝอยส่วนหนึ่งได้นำกลับมาใช้ประโยชน์มากขึ้นใหม่



ภาพที่ 1 ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยที่เกิดขึ้นในระหว่างปี พ.ศ. 2537 - 2547
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

จากการคาดการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยในรอบสิบปีข้างหน้า (2547-2556) พบว่าปริมาณขยะมูลฝอยจะเพิ่มขึ้นจากวันละ 39,956 ตัน ในปี 2547 เป็นวันละ 48,700 ตันในปี 2556 หรือมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย ร้อยละ 2.0 ต่อปี ซึ่งการจัดการขยะมูลฝอยในอนาคตมีแนวโน้มของปัญหามากยิ่งขึ้น เนื่องจากสาเหตุหลายประการได้แก่ รูปแบบและองค์ประกอบของขยะมูลฝอยจะมีความยากต่อการกำจัดมากขึ้น การต่อต้านและคัดค้านของประชาชนในการก่อสร้างสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น การขาดแคลนที่ดินในการก่อสร้างศูนย์กำจัดขยะมูลฝอย รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการเก็บรวบรวม การเก็บขน การขนส่งและกำจัดขยะมูลฝอย นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานตลอดจนงบประมาณในการดำเนินงาน รวมทั้งการมีส่วนร่วมของประชาชนในท้องถิ่นก็ยังเป็นประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่ง

2.2 การใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอยชุมชน ในปี 2547 มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นจากชุมชนทั่วประเทศประมาณ 14.6 ล้านตัน และขยะมูลฝอยมีองค์ประกอบทางกายภาพที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recyclable waste) มีประมาณ 3.1 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 21 ของปริมาณที่เกิดขึ้น และประเภทขยะย่อยสลายที่เหมาะสมแก่การทำปุ๋ยอีกประมาณ 0.2 ล้านตัน และมีปริมาณการนำขยะมูลฝอยที่คัดแยกได้จากชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ 2.9 ล้านตัน ทั้งนี้ลักษณะ

การนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ดำเนินการ โดยผ่านกิจกรรม เช่น ร้านรับซื้อของเก่า การจัดตั้งธนาคารขยะ การนำขยะมาแลกสิ่งของ การนำขยะมูลฝอยไปประดิษฐ์เป็นสิ่งของเครื่องใช้ต่าง ๆ การนำขยะที่ย่อยสลายไปหมักทำปุ๋ยอินทรีย์หรือ ปุ๋ยน้ำชีวภาพ การใช้ประโยชน์ด้านปศุสัตว์ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.3 สถานการณ์มลพิษด้านของเสียอันตราย การพัฒนาภาคอุตสาหกรรมและการเกษตรของประเทศอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการผลิตและนำเข้าสารเคมีอันตรายมาใช้ในประเทศเป็นจำนวนมาก ปัญหาหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเพิ่มขึ้นของอุบัติเหตุจากสารเคมีทั้งจากในกระบวนการผลิต การจัดเก็บและการขนส่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) คาดการณ์ว่าปริมาณของเสียอันตรายทั้งหมดในปี 2547 มีประมาณ 1.81 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2546 ประมาณ 0.01 ล้านตัน แบ่งออกเป็นของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม 1.405 ล้านตัน และปริมาณของเสียอันตรายจากชุมชน 0.403 ล้านตัน (รวมมูลฝอยติดเชื้อ 0.02 ล้านตัน) โดยของเสียอันตรายส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 59 ของปริมาณที่เกิดขึ้นหรือประมาณ 1.06 ล้านตันเกิดขึ้นในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ตามรายงานของสำนักกระบวนวิชา กรมควบคุมโรค พบว่าในปี 2547 มีผู้เจ็บป่วยจากสารอันตรายทั้งสิ้น 2,131 ราย เสียชีวิต 12 ราย จำแนกเป็นผู้ป่วยที่ได้รับพิษจากสารปิโตรเลียม 126 ราย ก๊าซและไอระเหย 86 ราย กลุ่มสารแมงกานีส ปรีท และสารหนู 122 ราย ผู้เจ็บป่วยที่ได้รับพิษจากสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช และสัตว์ 12 ราย เมื่อเทียบกับปี 2546 พบว่าจำนวนผู้ป่วยลดลง แต่จำนวนผู้เสียชีวิตเท่าเดิม นอกจากนี้ยังพบปัญหาร้องเรียนและการเกิดอุบัติเหตุจากสารอันตรายในรอบปี 2547 รวม 29 ครั้ง

การจัดการของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเกิดขึ้นในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล แต่มีการส่งเข้ามากำจัดเพียงร้อยละ 50 ของปริมาณที่เกิดขึ้น ทั้งนี้สาเหตุสำคัญอาจเนื่องมาจากความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ โดยผู้ประกอบการบางส่วนเลือกที่จะจัดการด้วยตัวเองหรือบางส่วนต้องการรวบรวมของเสียให้มีปริมาณมากเพียงพอก่อนส่งไปกำจัด เพื่อลดต้นทุน และสาเหตุอีกประการคือ การติดตามตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ในการบังคับใช้กฎหมายสำหรับการเคลื่อนย้ายและกำจัดของเสียอันตรายจากโรงงานไปยังสถานที่กำจัดอย่างถูกกฎหมาย โดยมีปริมาณที่ได้รับการกำจัดประมาณ 0.69 ล้านตัน

ในด้านของเสียอันตรายจากชุมชน ส่วนใหญ่มีการจัดการที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากยังมีการกำจัดของเสียอันตรายจากชุมชนรวมไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป ส่วนมูลฝอยติดเชื้อสถานพยาบาลที่มีเตาเผามูลฝอยติดเชื้อแล้วจะดำเนินการเอง และมูลฝอยติดเชื้อบางส่วน องค์การปกครองส่วน

ท้องถิ่นเป็นผู้เก็บรวบรวมและกำจัด โดยมีเตาเผาขยะติดเชื้อขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่นทั่วประเทศอยู่ประมาณ 10 แห่ง สำหรับขยะมูลฝอยอุตสาหกรรม ที่มีใช้ของเสียอันตราย ยังคงทิ้งรวมกับขยะมูลฝอยชุมชน แต่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีบางแห่งจ้างเอกชนให้นำไปทิ้งร่วมกับขยะมูลฝอยชุมชน ซึ่งนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม ทั้งดิน น้ำ และอากาศ กรณีมีการเผาเป็นบางครั้งคราว

จากสถานการณ์การจัดการมูลฝอยดังกล่าวข้างต้น ทำให้มลพิษจากมูลฝอยยังคงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยการจัดการมูลฝอยที่ไม่ถูกหลักสุขาภิบาลก่อให้เกิดปัญหาด้านกลิ่นเหม็นรบกวน ปัญหาแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรค ผลกระทบต่อสภาพภูมิทัศน์ ผลกระทบต่อแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินอันเกิดจากน้ำชะมูลฝอย และที่สำคัญที่สุดคือผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

3. ลักษณะและองค์ประกอบของมูลฝอย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอยสด ของพื้นที่กำจัดมูลฝอย (กองมูลฝอยเปิด) องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรีแสดงในตารางที่ 3 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ได้แก่เศษอาหารซึ่งเป็นสารอินทรีย์มีประมาณ 41.46 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาได้แก่พลาสติกและกระดาษมีประมาณ 24.88 และ 16.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนั้นเป็นวัสดุอื่น ๆ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติมูลฝอยทางเคมีของพื้นที่กำจัดมูลฝอย (กองมูลฝอยเปิด) องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของคุณสมบัติมูลฝอยทางเคมี มีปริมาณของธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เท่ากับ 16.42, 1.66, 0.42 และ 0.57 ตามลำดับโดยมีค่าความชื้นเท่ากับ 59.54 และมีปริมาณมูลฝอยที่เผาไหม้ได้เท่ากับ 97.52 โดยหลังจากเผามูลฝอยแล้วเกิดเถ้าร้อยละ 9.45 เมื่อพิจารณาค่า C/N ratio (อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน) พบว่ามีค่าเท่ากับ 9.9 (ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2545)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางกายภาพมูลฝอยเปิดขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เศษอาหาร	41.46
พลาสติก	24.88
กระดาษ	16.58
ผ้า	1.32
ไม้	13.28
แก้ว	0.82
โลหะ	1.66
อื่น ๆ	-
รวม	100
ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	0.39

ที่มา: ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2545)

นอกจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแล้วยังมีการวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบมูลฝอย ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดถึงร้อยละ 45-60 และ 40-50 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังมีการพบ VOCs จากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยอีกด้วย (Eklund *et al.*, 1998; Yassaa *et al.*, 2001)

กลุ่มของ VOCs ที่พบจากหลุมฝังกลบโดยทั่วไปได้แก่ Chlorinated Hydrocarbon, Aromatic Hydrocarbon, Halogenated Compounds, Alkanes, Cycloalkanes, Alcohols และ Ketones เป็นต้น แม้ว่า VOCs ที่ระบายจากหลุมฝังกลบมีค่าน้อยกว่า 1 % ของก๊าซทั้งหมดที่ปล่อยออกจากหลุมฝังกลบมูลฝอย แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ VOCs จึงทำให้สารดังกล่าวเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม มีรายงานว่าพบ VOCs มากกว่า 140 ชนิดแพร่กระจายจากหลุมฝังกลบมูลฝอย 7 แห่งในประเทศอังกฤษ และคาดว่าจะมีการแพร่กระจาย VOCs จากหลุมฝังกลบมูลฝอยประมาณ 10 ตันต่อปี (Allen *et al.*, 1997) และยังพบ VOCs นอกพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยและมี VOCs บางชนิดมีปริมาณที่เข้มข้นมากกว่าภายในบริเวณหลุมฝังกลบมูลฝอย (Ward *et al.*, 1996)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของมูลฝอยเปิดขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี

รายการ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปริมาณความชื้น (Moisture Content)	59.54
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	40.46
ปริมาณสารที่ไหม้ไฟได้ (Combustible Solids)	97.52
ปริมาณเถ้า (Ash Content)	9.45
ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (Volatile Solids)	29.55
ปริมาณคาร์บอน	16.42
ปริมาณไนโตรเจนรวม	1.66
ปริมาณฟอสฟอรัสรวม	0.42
ปริมาณโพแทสเซียมรวม	0.57
ค่าความร้อน DSCV (กิโลแคลอรี/ กิโลกรัม)	4, 917
ค่าความร้อน LSCV (กิโลแคลอรี/ กิโลกรัม)	1, 446

- หมายเหตุ**
- ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณสารที่ไหม้ไฟได้มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักสดของมูลฝอยทั้งหมด
 - รายการอื่น ๆ ที่ไม่ระบุหน่วย มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักแห้งของมูลฝอยส่วนที่ไหม้ไฟได้
 - DSCV หมายถึง Dry Solid Calorific Value
 - LSCV หมายถึง Lower Solid Calorific Value

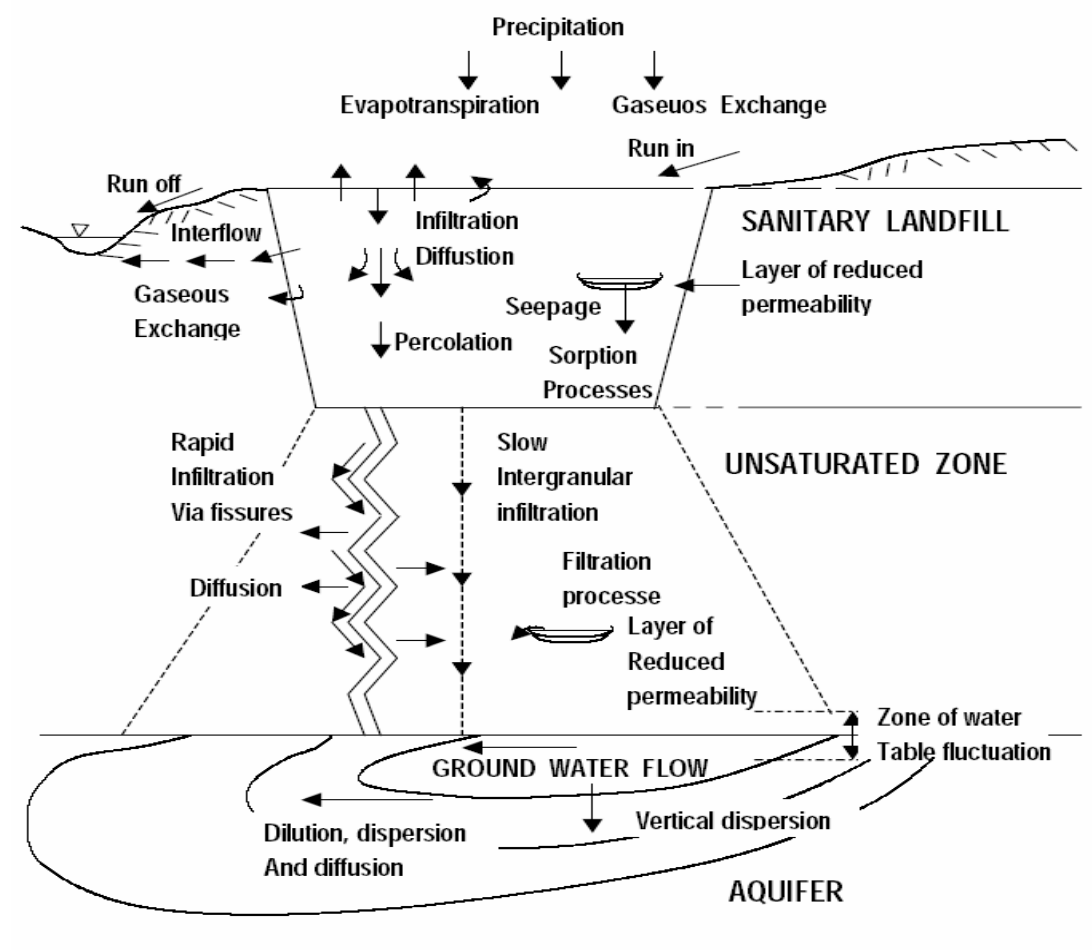
ที่มา: ศูนย์ปฏิบัติการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2545)

4. น้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอย เกิดจากของเหลวที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอยในหลุมฝังกลบแล้วชะละลายเอาสารละลาย หรือสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกมากับของเหลวนั้น ซึ่งของเหลวที่ซึมผ่านลงมาส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบ โดยน้ำฝนส่วนที่เหลือจากการไหลบ่าบนผิวดิน (surface runoff) การระเหยและการคายน้ำของดินและพืช จะถูกกักเก็บในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกินความจุสนาม (field capacity) ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของขยะมูลฝอย ของเหลวที่ซึม

ลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของขยะมูลฝอยและซึมลงไปสะสมตัวที่พื้นข้างใต้หลุมฝังกลบ กลายเป็น leachate หรือน้ำชะมูลฝอย (Dass *et al.*, 1977)

4.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย น้ำชะมูลฝอยเป็นผลจากระบวนการเปลี่ยนรูปมูลฝอยทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยมีน้ำเป็นตัวร่วมในปฏิกิริยา กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดกลไกทางกายภาพ 3 ระยะ ได้แก่ การย่อยสลายของแข็ง (Solid Phase) การเกิดของเหลว (Liquid Phase) และการเกิดก๊าซ (Gas Phase) ของเหลวที่เกิดขึ้นมีปริมาณของสารอินทรีย์ทั้งในรูปของสารละลาย สารแขวนลอย และอิมัลชัน ในปริมาณค่อนข้างสูง (Christensen *et al.*, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการเกิดน้ำชะมูลฝอย

ที่มา: Christensen *et al.* (1992)

การเกิดน้ำชะมูลฝอยสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาความแตกต่าง ของปริมาณน้ำ ที่เปลี่ยนแปลงในหลุมฝังกลบมูลฝอยสุทธิ กับความสามารถในการเก็บกักน้ำของชั้นมูลฝอย หาก ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในหลุมฝังกลบสุทธิมีค่ามากกว่าความสามารถในการเก็บกักน้ำของชั้นมูล ฝอย จะเกิดน้ำชะมูลฝอยขึ้น (Tchobanoglous *et al.*, 1993) สำหรับความสามารถในการเก็บกักน้ำ ของชั้นมูลฝอย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมูลฝอยดินที่ใช้ปิดทับ และการบดอัดมูลฝอยซึ่งหาได้ จากการทดลอง ในขั้นตอนของการฝังกลบ มูลฝอยจะถูกบดอัดทำให้บางชั้นส่วนมีขนาดเล็กลง เมื่อ เวลาผ่านไปจุลินทรีย์ที่มีอยู่จะย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างช้า ๆ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางด้าน กายภาพ เคมี และชีวภาพอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการย่อยสลายจะใช้เวลานานหลายปี ในระหว่างการย่อย สลาย ส่วนที่เป็นน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบของมูลฝอยในรูปความชื้น รวมถึงน้ำจากภายนอก เช่น น้ำฝน น้ำใต้ดิน จะละลายเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่มีอยู่ในมูลฝอยและไหลลงสู่ด้านล่าง กลายเป็นน้ำ ชะมูลฝอย ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียง

คุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจะแปรผันตามชนิดของมูลฝอย สภาพอากาศ ฤดูกาล อายุ ของหลุมฝังกลบ ความสูงของชั้นมูลฝอยและความชื้นที่มาจากมูลฝอย (David, 1981) ซึ่งลักษณะ ทั่วไปของน้ำชะมูลฝอยจากชุมชนจะมีความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ละลายอยู่สูง การ ควบคุมความชื้นในมูลฝอยให้มีปริมาณน้อย จะทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยในปริมาณที่น้อยตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายช้าลง (Townsend *et al.*, 1996) นอกจากนี้ยังพบว่าการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มอัตราการทรุดตัวของ หลุมฝังกลบมูลฝอยด้วย (Leckie *et al.*, 1979)

4.2 องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย น้ำชะมูลฝอยจากการฝังกลบประกอบไปด้วย

สารละลายต่าง ๆ บางชนิดก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม คุณภาพของน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝัง กลบมูลฝอยชุมชนจะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา เนื่องจากการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป จะแบ่งกระบวนการย่อยสลายออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะใช้ออกซิเจน (Aerobic Phase) ระยะการ ผลิตกรด (Acidogenic Phase) และระยะ สร้างมีเทน (Methanogenic Phase) จากการศึกษาคุณสมบัติ น้ำชะมูลฝอย ของ (Air Force Center for Environmental Excellence, 1999) พบว่าน้ำชะมูลฝอยมีค่า BOD, COD และโลหะค่อนข้างสูง ตารางที่ 5 แสดงถึงองค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอยและประมาณ ช่วงความเข้มข้น โดยมีช่วงค่าที่กว้างเนื่องมาจากความแตกต่างทางองค์ประกอบชนิดของมูลฝอย และแหล่งกำจัดมูลฝอย รวมทั้งความเป็นไปได้ในการถูกเจือจางด้วยน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยและช่วงความเข้มข้น

ดัชนีที่วิเคราะห์	ช่วงความเข้มข้น (mg/L)	ช่วงความเข้มข้นทั่วไป (mg/L)
pH (not units)	3.7–8.8	5.0–7.5
Biochemical Oxygen Demand, 5-day (BOD ₅)	4 – 57,700	1,000 – 30,000
Chemical Oxygen Demand (COD)	31 – 89,520	1,000 – 50,000
Total Organic Carbon (TOC)	0 – 28,500	700 – 10,000
Total volatile Acids (as acetic acid)	70 – 27,700	**
Total Kjeldahl Nitrogen (as N)	7 – 1,970	10 – 500
Nitrate (as N)	0 – 51	0.1–10
Ammonia (as N)	0 – 1,966	**
Total Phosphates	0.2 – 130	0.5–50
Orthophosphates	0.2 – 130	**
Total Alkalinity (as CaCO ₃)	0 – 20,850	500 – 10,000
Total Hardness (as CaCO ₃)	0 – 22,800	500 – 10,000
Total Solids	0 – 59,200	3,000 – 50,000
Total Dissolved Solids (TDS)	584 – 44,900	1,000 – 20,000
Specific Conductance (mmhos/cm)	1,400 – 17,100	2,000 – 8,000
Calcium	60–7,200	100–3,000
Magnesium	17–15,600	30–500
Sodium	0–7,700	200–1,500
Chloride	4.7 – 4,816	100 – 2,000
Sulfate	10 – 3,240	10 – 1,000
Chromium	0.02 – 18	0.05 – 1
Cadmium	0–17	0–0.1
Copper	0.005 – 9.9	0.02–1
Lead	0.001 – 2	0.1–1
Nickel	0.02 – 79	0.1–1
Iron	4 – 2,820	10 – 1,000
Zinc	0.06 – 370	0.5 – 30
Methane Gas (percent composition)	(Up to 60%)	**
Carbon Dioxide Gas (percent composition)	(Up to 40%)	**

หมายเหตุ: ** ไม่มีข้อมูล

ที่มา: U.S. Army Corps of Engineers (1995)

4.3 สารมลพิษที่พบว่าการปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอย สารมลพิษที่พบว่าการปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอย แบ่งออกเป็น 4 ประเภท (Christensen *et al.*, 1994) ดังนี้

4.3.1 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter) อยู่ในรูปของค่าซีโอดี (chemical oxygen demand) หรือสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (total organic carbon, TOC) รวมถึงมีเทน (CH_4) กรดไขมันระเหย (volatile fatty acids)

4.3.2 สารอนินทรีย์ เช่น Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn และ HCO_3^- เป็นต้น

4.3.3 โลหะหนัก ได้แก่ Cd, Cr, Cu, Pb, Ni และ Zn

4.3.4 Xenobiotic Organic Compounds (XOC_s) มีแหล่งกำเนิดจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรมเคมี มักพบที่มีความเข้มข้นต่ำในน้ำชะมูลฝอย โดยพบความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดต่ำกว่า 1 มก./ล. สารกลุ่มนี้รวมถึงสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ฟีนอล และคลออลิเนเตด อะลิฟาติก (chlorinated aliphatics)

สาร XOC_s ที่ปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยส่วนหนึ่งจัดเป็นสาร VOCs มีการศึกษาพบว่าสารอินทรีย์ละลาย (ซึ่งรวมถึงสาร VOCs ด้วย) สามารถแพร่ผ่านชั้น geomembranes ในชั้นกันซึมของหลุมฝังกลบมูลฝอยที่อยู่ในสภาพปกติ (ไม่มีความเสียหายใด ๆ) ได้ในอัตราที่สามารถวิเคราะห์ได้ ซึ่งแตกต่างกับการซึมผ่านของสารประกอบอนินทรีย์ ที่สามารถซึมผ่านชั้น geomembranes ได้เฉพาะกรณีที่ชั้นกันซึมนั้นมีรอยร้าวเกิดขึ้น (Park and Nibras, 1993; Mueller *et al.*, 1998; Rowe, 1998; Foose *et al.*, 2002.) การแพร่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้น geomembranes เป็นการเคลื่อนที่ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น โดยสารจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ

การเคลื่อนที่ของสาร VOCs มีความวิกฤติมากกว่าการเคลื่อนที่ของสารประกอบอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก แม้ว่า VOCs ที่ปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยจะมีความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจาก VOCs มีความเป็นพิษมากกว่าสารอนินทรีย์ และ VOCs สามารถแพร่ผ่านชั้น geomembranes polymer ได้โดยง่าย (Edil, 2003; Foose *et al.*, 2002; Park and Nibras, 1993)

4.4 ผลกระทบของน้ำชะมูลฝอย จากการศึกษาของ Edil (2003) พบว่าหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน (municipal solid waste, MSW) ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียง ทั้งนี้เนื่องจาก น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมีสารพิษ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลายชนิด ทำให้มีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

ในปัจจุบันการกำจัดมูลฝอยในประเทศมีปัญหาด้านการจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากมูลฝอยเนื่องจากส่วนใหญ่ยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย หรือมีการใช้บ่อฝังในการบำบัดน้ำเสีย แต่ไม่ได้มีการออกแบบอย่างถูกต้อง ให้เพียงพอกับปริมาณและลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถลดความสกปรกในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปล่อยน้ำชะมูลฝอยที่บำบัดยังไม่ได้มาตรฐานออกสู่สิ่งแวดล้อม เป็นการแพร่กระจายความสกปรกและสารพิษที่มีอยู่ในมูลฝอยสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอุปโภค บริโภค และเกษตรกรรม จึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบด้านต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีองค์ประกอบของสารต่าง ๆ อยู่มากมายทั้งสารเป็นพิษ และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูงมาก ดังนั้นอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำและระบบนิเวศในธรรมชาติ ได้แก่

ก. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Oxygen Depletion in Stream Water) น้ำชะมูลฝอยมีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก จากการศึกษาของ (Ou, 1989) พบว่าน้ำชะมูลฝอยจากสถานีฝังกลบมูลฝอยอ่อนนุช ที่ผ่านบ่อหมักไว้อากาศแล้วมีค่า BOD_5 ประมาณ 286-555 มก./ล. เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะมีผลอย่างยิ่งต่อปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Metcalf & Eddy, 1991)

ข. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Toxic to Stream Life) น้ำชะจากระบบฝังกลบมูลฝอยมักมีสารที่เป็นพิษซึ่งเกิดจากการชะเอาสารพิษจากมูลฝอยที่นำมากำจัด ได้แก่ มูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาล มูลฝอยอันตรายจากบ้าน เช่น กระป๋องสารฆ่าแมลง หลอดไฟฟ้า และถ่านไฟฉาย เป็นต้น จากการสำรวจสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลในพื้นที่ภาคเหนือ และภาคกลางโดย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) พบว่าสถานที่ฝังกลบมูลฝอยส่วนใหญ่ไม่แยกกำจัดมูลฝอยอันตรายและมูลฝอยติดเชื้อ ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

ค. ทัศนียภาพในแหล่งน้ำ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมักจะมีสีน้ำตาลเข้มหรือดำ และการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางชีววิทยาเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถลดความเข้มของสีได้มากนัก เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมักจะมีพวกฮิวมิก และกรดฟัลวิก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย (Tchobanoglous *et al.*, 1993)

4.1.2 ผลกระทบต่อดิน น้ำชะมูลฝอยสามารถไหลซึมผ่านชั้นดินที่ไม่มีการบดอัดได้เป็นอย่างดี และสามารถกระจายสารมลพิษได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง นอกจากนี้ดินบางชนิดยังมี

คุณสมบัติเป็นตัวกรองที่ดีจึงสามารถดูดซับสิ่งสกปรกและสารพิษ เช่น โลหะหนักต่าง ๆ สะสมไว้ในชั้นดินได้ จากการศึกษาของ (Nicholson *et al.*, 1983) ใน Borden Landfill พบว่ามีการกระจายของคลอไรด์ ซัลเฟตความเป็นด่างจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^- alkalinity) แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม เหล็ก และแมงกานีส ในระยะ 100-300 เมตร ในแนวราบ และระยะ 14-18 เมตร ในแนวดิ่ง

4.1.3 ผลกระทบต่อมนุษย์ น้ำชะมูลฝอยที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน อาจก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงกับมนุษย์ เมื่อนำน้ำจากแหล่งน้ำไปอุปโภค บริโภค จากการศึกษาของ (U.S. EPA, 1971) ระหว่างปี 1945-1970 พบว่ามีผู้ป่วยมากกว่า 31,000 คน ที่ป่วยด้วยสาเหตุจากการปนเปื้อน ของแหล่งน้ำใต้ดินจากสารอินทรีย์เคมีที่เป็นพิษ สำหรับการใส่ประโยชน์ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีองค์ประกอบของสารต่าง ๆ ในปริมาณสูง และอาจตกค้างในแหล่งทรัพยากรธรรมชาติต่าง ๆ ได้แก่ ดิน น้ำ ซึ่งจะมีผลต่อการนำทรัพยากรธรรมชาติเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ เช่น เพื่อการเพาะปลูก การประมง เป็นต้น

5. คุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทหนึ่งซึ่งมีธาตุคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีธาตุอื่นเป็นประกอบด้วย เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) มีความดันไอ (Vapor Pressure) สูง ทำให้ระเหยง่าย และมีจุดเดือดสูงไม่เกิน 500 องศาฟาเรนไฮต์ (260 องศาเซลเซียส) (Hunter and Oyama, 2000) โดยทั่วไปมีมวลโมเลกุลต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 12 อะตอม และคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ คือมีค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant, H_c) มาก ส่งผลให้ระเหยออกได้ง่าย และค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon partition coefficient, K_{oc}) มีค่าต่ำ (LaGrega *et al.*, 2001)

สาร VOCs สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่ม Hydrocarbon และ Compounds ดังแสดงในตารางที่ 6 ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร VOCs ที่สำคัญแสดงในตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 6 กลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

กลุ่ม	ประเภท	ตัวอย่าง
1. Hydrocarbons	Paraffins	Propane, butane, octane
	Olefins	Ethylene, butadiene
	Acetylenes	Acetylene
	Aromatics	Toluene, benzopyrene
2. Compounds	Alcohols	Methanol, ethanol
	Aldehydes	Formaldehyde
	Ketones	Methyl ethylketone
	Acids	Formic acid
	Hydroperoxides	Peroxyacetylnitrite (PAN)
	Halides	Vinyl chloride, bromobenzene
	S compounds	Dimethyl sulfide
	N compounds	Trimethyl amine

ที่มา: Hunter and Oyama (2000)

5.1 ความดันไอ (Vapor Pressure) คือความเข้มข้นในรูปก๊าซที่สภาวะสมดุลของของเหลวบริสุทธิ์ที่อุณหภูมินั้น ๆ หรือความดันที่เกิดจากไอของสารนั้นในบริเวณจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าสารนั้นมีความสามารถระเหยได้ดีก็就会有ความดันไอที่สูง โดยทั่วไปสารอินทรีย์ระเหยชนิดไม่มีขั้วจะมีความดันไอสูงกว่าชนิดที่มีขั้ว เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยชนิดไม่มีขั้วต้องการระดับพลังงานที่ต่ำสำหรับการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก๊าซ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลกับความดันไอบ้าง โดยเมื่ออุณหภูมิของสารประกอบมีอุณหภูมิสูง ค่าความดันไอของสารประกอบนั้นก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย (Card, 1998)

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสาร VOCs

Compound name	Chemical formula	Molecular weight ¹	Water solubility ²	Vapor pressure ³	Henry's coefficient ⁴	Melting point ⁵	Boiling point ⁶
Acetone	C ₃ H ₆ O	58.09	Total	266	2.50 x10 ⁻⁵	-95	56.2
benzene	C ₆ H ₆	78.12	1.78x10 ³	95.2	5.55 x10 ⁻³	5.5	80.1
Chloroform	CHCl ₃	119.37	8.00 x10 ³	200	1.5 x10 ⁻¹	-63.5	61.2
1,4-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	147	79	1.2	3.17 x10 ⁻³	53	173.4
2,6-dinitrotoluene	C ₇ H ₆ N ₂ O ₄	182.15	180	6	9.10 x10 ⁻⁶	67	0
Ethanol	C ₂ H ₆ O	46.08	6.52 x10 ⁴	50	3.03 x10 ⁻⁵	-114	78.4
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.18	1.52 x10 ²	9.5	0.80	-94.9	136.1
Formaldehyde	CH ₂ O	30.03	4.00 x10 ⁵	3500	3.00 x10 ⁻⁷	-118	-21
methanol	CH ₄ O	32.05	Total	114	5.20 x10 ⁻⁶	-98	65
methyl ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	72.12	3.50 x10 ⁵	100	1.30 x10 ⁻⁴	-86.3	79.6
methylene chloride	CH ₂ Cl ₂	84.93	2.00 x10 ⁴	438	3.00 x10 ⁻³	-96.7	39.8
pentachlorobenzene	C ₆ HCl ₅	250.32	0.24	0.0046	7.30 x10 ⁻³	85	277
phenol	C ₆ H ₆ O ₆	94.12	8.20 x10 ⁴	0.341	1.30 x10 ⁻⁶	43	182
Styrene	C ₈ H ₈	104.16	300	7.3	2.60 x10 ⁻³	-31	145
Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄	165.82	150	19	1.77 x10 ⁻²	-19-19	121
Toluene	C ₇ H ₈	92.15	515	30	6.42 x10 ⁻³	-95-95	110.6
Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	131.38	1.1	75	1.02 x10 ⁻²	-73	87
vinyl chloride	C ₂ H ₃ Cl	62.5	4.27 x10 ³	2660	2.65 x10 ⁻²	-154	-13.9
xylene	C ₈ H ₁₀	106.18	198	8.5	5.25 x10 ⁻³	-25	140

หมายเหตุ

¹ molecular weight in g/gmol

² water solubility in mg/L

³ vapor pressure in mmHg at 25°C

⁴ Henry's law coefficient at 25°C in atm/(mol/m³)

⁵ melting point in °C

⁶ boiling point in °C

ที่มา: (LaGrega *et al.*, 1994; Verchueren, 1996; Hunter and Oyama, 2000)

5.2 ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) เป็นค่าการละลายของสารในน้ำในสภาวะสมดุล ถ้าสารนั้นมีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) สูง จะละลายน้ำได้น้อย ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) น้อยลงด้วย โดยสารประกอบที่มีขั้วมีแนวโน้มที่จะสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าสารประกอบที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ มีแนวโน้มที่จะไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (Card, 1998) ในการทดลองถ้าสารมีความสามารถละลายน้ำได้ดี มีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย

สัดส่วนของก๊าซต่อของเหลว (gas/ liquid partitioning) ของสารประกอบระหว่างการแยกสถานะ กรณีที่สัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนของสารประกอบระหว่างสถานะก๊าซและของเหลว (น้ำ) สัมประสิทธิ์ของสัดส่วนนี้จะเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของเฮนรี (Henry's law coefficient) หรือค่าคงที่ของเฮนรี ซึ่งใช้อธิบายถึงความสามารถในการละลายของก๊าซลงในของเหลว เมื่อสารเคมีระเหยได้ละลายลงในน้ำ จะมีสารเคมีอยู่ในก๊าซบางส่วนลอยอยู่เหนือผิวน้ำ (ความดันไอของสารต่อความสามารถในการละลาย) ดังนั้นค่าคงที่ของกฎเฮนรีสามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถระเหยกลายเป็นไอของสารเคมีที่ละลายในน้ำ

โดย Henry's law กล่าวว่าที่ภาวะสมดุลความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความดันย่อย (partial pressure) ของสารเคมีนั้นในอากาศ (headspace) ซึ่งแสดงในสมการที่ (1) ดังนี้

$$P = H \cdot X \quad (1)$$

โดย P เป็นความดันย่อยของสาร มีหน่วยเป็นบรรยากาศ [atm]

H เป็น Henry's law constant มีหน่วยเป็นบรรยากาศ x ลูกบาศก์เมตร/โมล [atm.m³/mol]

X เป็นความเข้มข้นของสารในน้ำ มีหน่วยเป็นโมล/ลูกบาศก์เมตร [mol/m³]

Henry's law constant อาจถูกพิจารณาว่าเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (partition coefficient) ของสารที่เกิดขึ้นในอากาศและน้ำ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแสดง Henry's law constant ได้ดังสมการที่ (2)

$$H = \frac{VP}{S} \quad (2)$$

โดย H เป็น Henry's law constant มีหน่วยเป็นบรรยากาศ x ลูกบาศก์เมตร/โมล
[atm.m³/mol]

VP เป็นความดันไอของสาร มีหน่วยเป็นบรรยากาศ [atm]

S เป็นค่าการละลายน้ำของสาร มีหน่วยเป็นโมล/ลูกบาศก์เมตร [mol/m³]

สารที่ละลายน้ำได้ดีและมีค่าความดันไอต่ำ มีแนวโน้มจะระเหยกลายเป็นไอจากน้ำได้น้อย โดยทั่วไปสารที่มีค่า Henry's law constant น้อยกว่า 10⁻⁵ atm.m³/mol การระเหยกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้น้อยและถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ถ้าสารมีค่า Henry's law constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10⁻⁷ atm.m³/mol ถือว่าไม่มีการระเหยออกจากสารละลาย มีผลทำให้ความเข้มข้นในสารละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากสารละลาย สำหรับสารที่มีค่า Henry's law constant มากกว่า 10⁻⁵ atm.m³/mol การระเหยกลายเป็นไอจากน้ำมีนัยสำคัญและอาจเป็นวิถีทางของการสูญเสียสารออกจากน้ำอีกทางหนึ่ง (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543)

5.3 สัมประสิทธิ์การดูดซับในดิน (soil adsorption coefficient) การดูดซับสาร VOCs ในดินสามารถแสดงโดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารระหว่างดินและน้ำ (partitioning coefficient, K_d) (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543) ซึ่งแสดงในสมการที่ (3) ดังนี้

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (3)$$

โดย C_s เป็นความเข้มข้นของสารในดิน [ไมโครกรัมของสารที่ถูกดูดซับ/กรัมของดิน]

C_w เป็นความเข้มข้นของสารในน้ำ [ไมโครกรัมของสารที่ละลายน้ำ/กรัมของน้ำ หรือไมโครกรัมของสารที่ละลายน้ำ/ลิตร]

เนื่องจากการดูดซับของสาร VOCs ในดินส่วนใหญ่เป็นการดูดซับโดยสารอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) ดินต่างชนิดกันจะมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสูงก็สามารถดูดซับเอาสาร VOCs ที่ปนเปื้อนไว้ได้มาก และดิน

ที่มีปริมาณสารอินทรีย์ของธาตุคาร์บอนต่ำก็จะสามารถดูดซับสาร VOCs ไว้ได้น้อย จึงทำให้ค่า partitioning coefficient ของสาร VOCs ในดินชนิดต่างกันมีค่าแตกต่างกันอย่างมาก ดังนั้นการดูดซับสาร VOCs ในดินจึงมีการนำเอาเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์คาร์บอนมาคำนวณด้วย ได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (adsorption coefficient, k_{oc}) ซึ่งแสดงในสมการที่ (4) ดังนี้

$$k_{oc} = \frac{K_d \times 100}{\%OC} \quad (4)$$

โดย % OC (organic carbon) เป็นร้อยละของสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในดิน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับสาร VOCs ในดินต่างชนิดกันจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักจึงสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

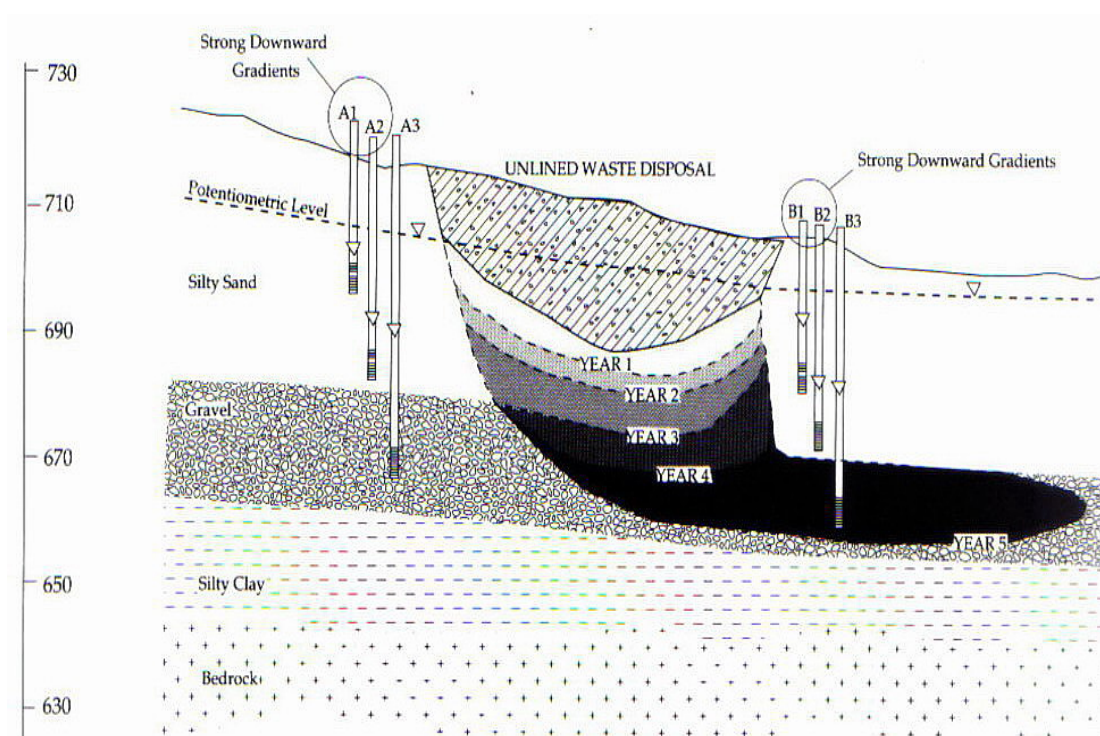
5.4 ความสามารถในการแตกตัว (Ionization) เป็นค่าที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่งของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพราะเป็นค่าที่แสดงว่าสารอินทรีย์ระเหยนั้นมีความเข้มข้นมากเพียงใดในสารละลาย โดยสารอินทรีย์ระเหยที่มีความสามารถในการแตกตัวในน้ำมากจะมีค่าคงที่ของการแตกตัว (Ionization constant) มากด้วย (Card, 1998)

5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Octanol-water partition coefficient, K_{ow}) คือค่าที่บอกลึกลับว่าสารประกอบอินทรีย์จะแบ่งแยกระหว่างข้างน้ำกับข้างอินทรีย์มากน้อยขนาดไหน ถ้า K_{ow} มีค่ามาก จะเป็น hydrophobic คือ ไม่ชอบน้ำ จะไปจับกับอนุภาคอื่น หรือบอกได้ว่าถ้าสารนั้นถูกปล่อยทิ้งลงพื้นดิน สารนั้นจะติดอยู่บนพื้นดินมากกว่าที่จะไหลซึมลงสู่ดิน แต่ถ้า K_{ow} มีค่าน้อยกว่า 10 จะเป็น hydrophilic คือ ชอบน้ำ ละลายน้ำได้มาก

6. การปนเปื้อนของสาร VOCs ในน้ำชะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

สาร VOCs ที่ปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอย เกิดจากการที่หลุมฝังกลบหรือสถานที่กำจัดมูลฝอยมีองค์ประกอบของมูลฝอยที่เป็นสารอินทรีย์ในปริมาณมาก การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยทั่วไปจะมีขั้นตอนดังนี้คือ การแตกสลายสารโมเลกุลใหญ่ (hydrolysis) การผลิตกรด (acid production) และการผลิตก๊าซ ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นเป็นกรดอินทรีย์อย่างง่าย เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทิริก (butyric acid) ซึ่งจัดเป็น VOCs ประเภทหนึ่ง นอกจากนี้

VOCs ที่ปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยยังมีสาเหตุมาจากสถานที่กำจัดมูลฝอยมีการปนเปื้อนของมูลฝอยอันตรายซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้หลุมฝังกลบมีสาร VOCs เกิดขึ้น สาร VOCs ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปกับมวลของน้ำหรือของเหลวในชั้นมูลฝอยผ่านชั้นมูลฝอยลงสู่ด้านล่างของหลุมฝังกลบ ทำให้น้ำชะมูลฝอยมีการปนเปื้อนของสาร VOCs การเคลื่อนที่ของน้ำชะมูลฝอยตามเวลาในหลุมฝังกลบที่ไม่มีระบบกันซึมแสดงไว้ในภาพ ที่ 3 ในช่วงแรกน้ำชะมูลฝอยจะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical flow) ผ่านชั้นดินที่มีค่าความสามารถในการซึมน้ำต่ำ ได้แก่ ชั้นทรายปนทรายแป้ง (silty sand) หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ในแนวราบ (horizontal excursion) ผ่านชั้นดินปนทรายและชั้นกรวด หินซึ่งมีความสามารถในการซึมผ่านได้มากขึ้น (Sara, 1993)



ภาพที่ 3 การเคลื่อนที่ของน้ำชะมูลฝอย

ที่มา: (Sara, 1993)

น้ำชะมูลฝอยสามารถเคลื่อนที่ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ในกรณีที่หลุมฝังกลบไม่มีระบบป้องกันการไหลซึมออกสู่ชั้นน้ำใต้ดิน หรือระบบป้องกันการซึมไม่มีประสิทธิภาพพอ ทำให้ปริมาณสารมลพิษต่าง ๆ กระจายลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินด้วย กระบวนการทางธรรมชาติอาจช่วยยับยั้งการกระจายได้ เช่น การถูกเจือจาง การกรองโดยชั้นดินเหนียว การดูดซับจากอนุภาคของดินเหนียว หรือการทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ความหนาของชั้นดินเหนียวมีผลต่อระยะเวลาการแพร่กระจายของสารได้ (Alloway, 1995)

6.1 กลไกการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน เมื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีการรั่วไหลหรือปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะเกิดกลไกต่าง ๆ เช่น การระเหย, การพา, การแพร่, การดูดซึม, การดูดซับ และกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

Christensen and Elton (1996) กล่าวว่า การระเหย (volatilization) ส่งผลให้ BTEX เข้มข้นขึ้น ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนของก๊าซโซลินในภาคสนาม สิ่งแรกที่เกิดขึ้น คือ ก๊าซโซลินบางส่วนจะเกิดการระเหย ส่งผลให้ สารนั้นมีมวลโมเลกุลต่ำ มีความดันไอสูง และมีความสามารถในการละลายมากขึ้น เมื่อสารนั้นละลายอยู่ในสภาพของเหลว ก็ย่อมจะเข้าสู่ น้ำใต้ดินได้ โดยการแทรกซึมหรือแทนที่ที่อยู่ระหว่างสารอินทรีย์ และอนุภาคของดิน จากนั้นเกิดการซึมซับโดยการสัมผัสกันของสารอินทรีย์ สู่ผิวเม็ดดิน (soil surface) หรือโดยการนำเข้าไป (intake) จากสารอินทรีย์สู่เนื้อดิน (soil matrix) การซึมซับนี้มีลักษณะที่ควบคุมการปนเปื้อนเช่น การละลาย (dissolution), ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Octanol-water partition coefficient, K_{ow}) และจะเกี่ยวข้องกับระหว่างเนื้อดินกับของเหลวที่เป็นสื่อกลางด้วย สาร BTEX ซึมซับสู่เนื้อดินได้ง่ายกว่าสาร aliphatic components และปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ปริมาณมาก ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการซึมซับและการเคลื่อนที่ไปของสารปนเปื้อน ก็คือ อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (groundwater flow)

การเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกหรือกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2546; Edil, 2003; Freeze and Cherry, 1979)

6.1.1 กระบวนการทางกายภาพ เช่น การพา (advection) การแพร่ (diffusion) และการกระจาย (dispersion) โดยการพา (Advection) เป็นขบวนการที่สารละลาย (dissolved substances or solutes) ซึ่งเป็นสารละลายปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย (nonreactive solutes) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ผ่านชั้นดินและหินต่าง ๆ การพาขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำใต้ดิน ดังนั้น สามารถลดการเคลื่อนที่ของมลสารได้โดยใช้ดินเหนียวที่มีค่าความนำหลศาสตร์ต่ำ (ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที) เป็นวัสดุกันซึม ส่วนการแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่จะหยุดเมื่อโมเลกุลของสารแพร่เท่า กัน ณ บริเวณต่าง ๆ ซึ่งการเคลื่อนย้ายของมลสารในลักษณะนี้ มลสารสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึม เช่น ดินเหนียวสังเคราะห์ หรือ geomembrane polymer ได้ สำหรับการกระจาย (Dispersion) เป็นการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดกระจายไปยังแหล่งอื่น ๆ ที่อยู่นอกเส้นทางการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน

หรืออาจเรียกว่า hydrodynamic dispersion ซึ่งเกิดจากการผสมเชิงกล (mechanical mixing) ในช่วงที่ของเหลวกำลังไหลหรือเกิดการพา และเกิดจากการแพร่เชิงโมเลกุลของสารปนเปื้อน (molecular diffusion) เนื่องจาก thermal-kinetic energy ของอนุภาคสารละลาย โดยปกติการแพร่เชิงโมเลกุลจะเกิดเมื่อของเหลวมีความเร็วต่ำมาก ๆ สำหรับการกระจายที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลอย่างเดียว เรียกว่า mechanical dispersion หรือ hydraulic dispersion ในการพิจารณาระดับ microscopic scale การกระจาย (Dispersion) เกิดจากสามกลไก ได้แก่ กลไกแรกจะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของตัวกลาง เนื่องจากแต่ละโมเลกุลของสารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของช่องว่าง สาเหตุมาจากความขรุขระของพื้นผิวตัวกลาง กลไกที่สองเกิดจากขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันระหว่างตัวกลางที่อยู่ตามแนวทิศทางการไหลของของไหล เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและความขรุขระไม่เท่ากัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างนั้น ๆ ทำให้ความเร็วของของไหลไม่เท่ากันด้วย กลไกที่สามมีความสัมพันธ์กับ tortuosity, branching และ interfingering of pore channels การกระจายของสารปนเปื้อนในทิศทางการไหลของของไหล เรียกว่า longitudinal dispersion ส่วนการกระจายของสารปนเปื้อนในทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหลของของไหล เรียกว่า transverse dispersion ซึ่ง longitudinal dispersion จะมีค่ามากกว่า transverse dispersion โดยปกติแล้วการกระจายจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลาง เช่น ถ้าดินมีความพรุนมากสารปนเปื้อนก็สามารถกระจายไปได้มากด้วย

6.1.2 กระบวนการทางเคมี เป็นการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่าง ๆ ในน้ำใต้ดิน เช่น ปฏิกิริยาความเป็นกรด-ด่าง การตกตะกอนของสาร การละลาย เป็นต้น

6.1.3 กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

6.2 ปริมาณของก๊าซที่เกิดจากหลุมฝังกลบมูลฝอย ปริมาณของก๊าซที่เกิดจากหลุมฝังกลบมูลฝอยจะแปรผันตามอายุของหลุมฝังกลบมูลฝอย และขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของขยะ สารอินทรีย์ ความลึก ความชื้น ความหนาแน่นของการบดอัด อุณหภูมิ พีเอช ชนิดของดิน ส่วนประกอบของจุลินทรีย์ และระยะเวลาที่ได้ฝังกลบมูลฝอย ปริมาณก๊าซสามารถประมาณได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้มีการประมาณว่าปริมาณมูลฝอยที่ย่อยสลายได้จำนวน 1 ตันจะก่อให้เกิดก๊าซประมาณ 6 ลบ.ม.ต่อปี สำหรับหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีอายุ 10 ปี ถึงแม้ว่าจะเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี (Foster and Beck, 1996) ประมาณว่าก๊าซจำนวน 3-6 ลบ.ฟ. เกิดจากขยะจำนวน 1 ปอนด์ (0.2-0.4 ลบ.ม./กก.) นอกจากนั้นยังมีวิธีอื่น ๆ ในการวัดปริมาณก๊าซจากหลุมฝังกลบมูลฝอย เช่น การสูบน้ำขึ้นมาแล้ววัดค่า

Foster and Beck (1996) กล่าวว่า สารประกอบอินทรีย์ที่พบในหลุมฝังกลบส่วนใหญ่เป็นสาร VOCs โดยสาร VOCs ที่เคลื่อนที่ออกจากหลุมฝังกลบมุดลอยไปกับน้ำใต้ดิน ผ่านชั้นดินในรูปของก๊าซ โดยอาจจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับก๊าซอื่น ๆ เช่น มีเทน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอย เมื่อก๊าซเหล่านี้เคลื่อนที่ไปสะสมอยู่ชั้นใต้ดินบริเวณที่อยู่อาศัยของมนุษย์ จะทำให้มนุษย์รับก๊าซเหล่านี้ผ่านทางหายใจมากที่สุด มีรายงานว่า VOCs ในหลุมฝังกลบมูลฝอยรวมทั้งสารไนโตรเจนออกไซด์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นโอโซน, การระคายเคืองต่อปอด นอกจากนี้ยังได้รายงานถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ จากการสูดดมก๊าซที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซจากหลุมฝังกลบมูลฝอย และความแตกต่างระหว่างสารก่อมะเร็งและไม่ก่อมะเร็งและระหว่างเด็กกับผู้ใหญ่ สาร VOCs ที่พบบ่อยในหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนจำนวน 66 แห่งใน California แสดงในตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่พบในหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน
จำนวน 66 แห่ง ในรัฐ California

Compounds	Average concentration
	(ppm by volume)
Benzene	2.1
Tetrachloroethylene	5.2
1,1-Dichloroethane	2.8
Dichloromethane	25.7
1,1-Dichloroethylene	0.13
Ethylbenzene	7.3
1,1,1-Trichloroethane	0.62
Trichloroethylene	2.1
Toluene	34.9
Vinyl Chloride	3.5
Methyl ethyl Ketone	3.1
Xylene	2.7

ที่มา: (Lang *et al.* 1989a, 1989b, quoted by Foster and Beck 1996)

6.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย VOCs สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สำคัญและพบได้บ่อยได้แก่ BTEX, TCE และ PCE ซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการกิน การหายใจ และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

6.3.1 Benzene

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเอาสารนี้เข้าไป ผลกระทบของการสัมผัสสารนี้จะไปกดระบบประสาทส่วนกลางก่อให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ง่วงซึม ปวดศีรษะ คลื่นไส้ เกิดภาวะ การทำงานไม่ประสานกัน มึนงง และทำให้หมดสติได้ การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้น 25 ppm คาดว่าจะไม่ก่อให้เกิดอันตราย การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้น 50-150 ppm จะก่อให้เกิดอาการปวดศีรษะ และอ่อนเพลีย ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูก และลำคอ อาจจะมีการเวียนศีรษะ เป็นอาการนำก่อนจะเกิดอาการอื่น ๆ ตามมา การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้นประมาณ 20,000 ppm จะทำให้เสียชีวิตได้ สารนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบเลือดและระบบภูมิคุ้มกันจากการทดลองในสัตว์ทดลอง แต่ยังไม่ยืนยันว่าสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ในการสัมผัสสารในระยะสั้น มีการรายงานเกี่ยวกับผลกระทบของสารนี้ในระบบเลือดเมื่อปี 1992 พบว่า ในคนงานที่ทำงานสัมผัสกับเบนซินที่ระดับความเข้มข้นสูง (สูงกว่า 60 ppm) เป็นเวลาติดต่อกันหลาย ๆ วัน โดยที่คนงานก็ยังคงใช้สารเคมีชนิดอื่นเข้าไปด้วยในช่วงเวลาเดียวกัน หลังจากติดตามเป็นเวลา 4 เดือนพบว่าคนงานเหล่านี้มีอาการทางระบบประสาทส่วนกลาง 9 คน ในคนงาน 15 คน และมีอย่างน้อย 1 คน ที่พบว่าผิดปกติของระบบเลือด และหลังจากการติดตามเป็นเวลา 1 ปี พบว่ามีคนงาน 6 คน ที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบเลือดอยู่ (มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเม็ดเลือดขาวชนิด lymphocytes)

ข. สัมผัสทางผิวหนัง จากการทดลองในสัตว์พบว่า การสัมผัสสารนี้จะก่อให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย จากการศึกษามนุษย์พบว่าสารนี้สามารถดูดซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายได้ทำให้ผิวหนังแห้ง

ค. กินหรือกลืนเข้าไป สารนี้จะเกิดการดูดซึมอย่างรวดเร็วและไปมีฤทธิ์กดระบบประสาทส่วนกลางก่อให้เกิดอาการคล้ายหายใจเข้าไป พบว่าสารนี้สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบเลือด และระบบภูมิคุ้มกันได้ ในสัตว์ทดลอง แต่ยังไม่มียารายงานยืนยันผลกระทบดังกล่าวในมนุษย์

ง. สัมผัสถูกตา ไอระเหยของสารก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา

จ. การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ ผลกระทบต่อการสัมผัสในระยะยาว หรือ การสัมผัสถูกผิวหนังเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดผื่นแดง ผิวหนังแห้ง อักเสบ และทำให้เกิดการสูญเสีย/ทำลายชั้นไขมันของผิวหนัง สารนี้จะก่อให้เกิดการลดลงของจำนวนเม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด แต่ในระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางและเกิดความผิดปกติต่อเม็ดเลือดขาว (leukemia) เนื่องจากเบนซีนจะไปทำลายไขกระดูกซึ่งมีหน้าที่ในการผลิตเม็ดเลือดจึงทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง และเกิดความผิดปกติของเม็ดเลือดขาว (leukemia) ขึ้น รวมทั้งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันนอกจากนั้นพบว่า เบนซีนสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อปลายประสาทและไขสันหลัง ทำให้เกิดการปวดศีรษะ ปวดเมื่อย เมื่อยล้า นอนไม่หลับ และความจำเลอะเลือน

- 1) สารนี้จัดเป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อ International Agency for Research on Cancer (IARC), National Toxicology Program (NTP), American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)
- 2) เบนซีนจะก่อให้เกิดมะเร็งต่อระบบน้ำเหลือง ปอด กระเพาะปัสสาวะ
- 3) สารนี้สามารถแพร่ผ่านรกได้ แต่ไม่เกิดผลกระทบต่อตัวอ่อนในครรภ์
- 4) การสัมผัสกับเบนซีนที่ความเข้มข้นสูง อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ และมีผลกระทบต่อประจำเดือนในเพศหญิงได้
- 5) สารนี้สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง/ก่อให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซมในเม็ดเลือดขาว และก่อให้เกิดการทำลาย Deoxyribonucleic acid (DNA) ในเซลล์เม็ดเลือดได้
- 6) จากผลการทดลองในสัตว์พบว่าการรับสัมผัสจะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเอทานอลในระบบเลือดได้
- 7) เบนซีนสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้อย่างรวดเร็วโดยทางการหายใจ และการกลืนกินและกระจายสู่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในเนื้อเยื่อไขมัน และ เบนซีนจะเกิดเมตาโบลิซึมขึ้นแรกที่ตับ และผ่านเข้าสู่ไขกระดูก และทำให้มีความเป็นพิษขึ้น ในมนุษย์ค่าครึ่งชีวิตของเบนซีนคือ 1-2 วัน และสารนี้ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมโดยสารนี้จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับลมหายใจออกผ่านทางปอด และพบขับออกมาพร้อมกับยูรีน

6.3.2 Toluene

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการปวดศีรษะ, เวียนศีรษะ, ง่วงซึม มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง มีอาการอ่อนเพลีย มึนงง ไม่สามารถทรงตัวได้ ประสาทหลอน สูญเสียความสามารถในการคิด ความจำ การควบคุมอารมณ์ และอาจมีอันตรายร้ายแรงถึงตายได้เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง ๆ เป็นเวลานาน

ข สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสถูกผิวหนังซ้ำหรือเป็นระยะเวลานาน ทำให้ผิวหนังแห้ง

ค. กินหรือกลืนเข้าไป การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ไอ ปวดท้อง ท้องร่วง และอาจหมดสติ

ง. สัมผัสถูกตา การสัมผัสกับของเหลวหรือไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และทำให้น้ำตาไหล

จ. การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง แต่ถ้าได้รับสารนี้เป็นเวลานานจะทำลายสมอง

6.3.3 Ethylbenzene

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือกและทางเดินหายใจส่วนบน กดประสาทส่วนกลาง

ข. สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง

ค. กินหรือกลืนเข้าไป การกลืนกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคือง คลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ

ง. สัมผัสถูกตา การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา

จ. การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ อวัยวะเป้าหมาย คือระบบประสาทส่วนกลาง ปอด ทรวงอก ระบบหายใจ ไต ตับ กระเพาะปัสสาวะ

6.3.4 Xylene

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจและปอด ทำให้เกิดการปวดศีรษะ, เวียนศีรษะ, คลื่นไส้, ซึมเศร้า เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง ๆ เป็นเวลานานจะเป็นอันตรายต่อดับ ไต ระบบประสาท และเลือด

ข. สัมผัสทางผิวหนัง สารนี้สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ การสัมผัสถูกผิวหนังซ้ำหรือเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำให้ผิวหนังไหม้ แห้ง แตก

ค. กินหรือกลืนเข้าไป การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร กระเพาะอาหาร ทำให้เกิดการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ ประสิทธิภาพการมองเห็นลดลง ความดันเลือดต่ำ

ง. สัมผัสถูกตา ไอของสารทำให้ตาระคายเคือง ถ้าเป็นของเหลวอาจมีอาการบวมแดง และแสบตาไหม้

จ. การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง แต่ถ้าได้รับสารนี้เป็นเวลานานจะทำลายสมอง

6.3.5 Trichloroethylene (TCE)

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการปวดศีรษะ, เวียนศีรษะ, คลื่นไส้, ไอ หายใจติดขัด หมดสติ, เป็นลม และอาจเสียชีวิตได้เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง ๆ

ข. สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสถูกผิวหนังซ้ำหรือเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำให้ผิวหนังอักเสบเนื่องจากการสูญเสียไขมันของชั้นผิวหนังได้ และอาจทำให้เกิดภาวะภูมิแพ้ต่อการสัมผัสผิวหนังได้

ค. กินหรือกลืนเข้าไป การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ไอ ปวดท้อง ท้องร่วง และอาจหมดสติ

ง. สัมผัสถูกตา การสัมผัสกับของเหลวหรือไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และทำให้น้ำตาไหลได้

จ. การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง ตาม NTP , Occupational Safety and Health Administration (OSHA), ACGIH แต่เป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อของ The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) และสงสัยว่าจะ

เป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ ตามบัญชีรายชื่อของ IARC และมีรายงานความผิดปกติของทารกในครรภ์ ตามรายงานของ Registry of Toxic Effects of Chemical Substances (RTEC) การสัมผัสในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและเยื่อเมือก ผิวหนัง และทำให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง อาจทำให้เกิดการทำลายทางเดินอาหาร ตับ และไตได้ การหายใจหรือการดูดซับของสารเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง, ทำลายตับและไต รวมทั้งทำให้เกิดภาวะที่ไวต่ออิทธิพลของอินฟลูเอนซา

6.3.6 Perchloroethylene (PCE) หรือ Tetrachloroethylene

ก. สัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูก เล็กน้อย ความเข้มข้นสูง ๆ จะทำให้ปวดศีรษะ กระจกกระวาย เวียนศีรษะ คลื่นไส้ ง่วงนอน และหมดสติ

- 1) เสี่ยงต่อการเกิดหัวใจเต้นเร็ว
- 2) เสี่ยงต่อการเกิดโรคปอดอักเสบและน้ำท่วมปอด
- 3) ในกรณีของการสัมผัสยาวนาน ๆ และซ้ำ ๆ กันจะทำให้ปวดศีรษะ เชื่องซึม และเสี่ยงต่อการผิดปกติของระบบประสาท
- 4) อาจเกิดผลกระทบในภายหลังรวมทั้งการเกิดโรคปอดอักเสบ ปอดบวม น้ำจากอาการไอ
- 5) สารเปอร์คลอโรไธเอทิลีน สามารถดูดซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจเป็นหลักทำให้เกิดทั้งการระคายเคือง และอาการทางประสาท

ข. สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสถูกสารนี้กับผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย ผื่นแดงที่ผิวหนัง ในกรณีที่สัมผัสซ้ำ ๆ กันจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวบนผิวหนัง เสี่ยงต่อการเกิดโรคผิวหนังอักเสบ

- 1) ผิวหนังไหม้ แผลพุพอง ผื่นแดงเป็นจ้ำ จากการสัมผัสกับสารนี้โดยตรงอย่างรุนแรง
- 2) ผิวหนังบางส่วนสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ แต่จะไม่เกิดอาการอย่างเห็นได้ชัดเจน

ค. กินหรือกลืนเข้าไป การกินหรือกลืนเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อปากและลำคอ ทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ อาเจียน ปวดท้อง ท้องร่วง เสี่ยงต่อการเกิดหัวใจเต้นเร็ว การทำงานผิดปกติของตับและไต

ง. สัมผัสถูกตา การสัมผัสถูกตา ฟุ้งของสารนี้ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อตาเล็กน้อย ถ้าเป็นของเหลวจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองรุนแรงขึ้น ทำให้น้ำตาไหล ตาแดง เสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บต่อตาชั่วคราว

จ. การก่อมะเร็ง ผลกระทบต่อสุขภาพอื่น ๆ

1) ดับ ไต ตา ทางเดินหายใจส่วนบน ระบบประสาทส่วนกลางในคนที่สัมผัสถูกซ้ำๆ และ/หรือ สัมผัสสูดดม จะทำให้เกิดอาการอ่อนเพลีย คลื่นไส้ ดับทำงานผิดปกติ (โดยการหายใจเข้าไป เริ่มจาก 15 ppm) และไตทำงานผิดปกติ (โดยการหายใจเข้าไป เริ่มจาก 230 ppm และกินเข้าไป เริ่มจาก 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว) อย่างไรก็ตามในมนุษย์ ผลความเป็นพิษต่อระบบประสาทส่วนกลางมีข้อมูลว่า เริ่มต้นที่ 100 ppm พฤติกรรมจะแตกต่างจากที่ได้รับ 400 ppm และมีผลกระทบต่อความไวของหัวใจ เริ่มที่ 5000 ppm จากการศึกษาพนักงานชักแห้ง 27 คน ผลว่ามีผลต่อระบบประสาท การสัมผัสของพนักงานเต็มทีระดับต่ำ ๆ เฉลี่ย 8 ชั่วโมง (Time Weigh Average, TWA) 18 ppm ในกลุ่มที่สัมผัสปรากฏปัญหาทางจิตวิทยา และอาการของการรบกวนทางระบบประสาท นักวิจัยพบว่าไม่มีผลแตกต่างระหว่างกลุ่มการสัมผัสและกลุ่มที่ถูกควบคุม

นอกจากนี้ (เกรียงศักดิ์, 2546; Christensen and Elton, 1996) กล่าวว่า การหายใจเอาสารโทลูอีน (Toluene) และไซลีน (Xylene) ที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีอาการปวดศีรษะ หน้ามืดและระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อต่าง ๆ ถ้าได้รับปริมาณความเข้มข้นสูง ๆ จะมีอาการร้ายแรงขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง หากได้รับเป็นระยะเวลานานจะทำลายสมอง แต่ไม่พบว่าเป็นสารก่อมะเร็ง

7. คุณสมบัติของดิน

คุณสมบัติของดินมีผลต่อการดูดซับสาร VOCs คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญมีดังนี้ (สุกมาศ, 2545)

7.1 เนื้อดิน (soil texture) เป็นสิ่งที่ยกถึงความหยาบหรือความละเอียดของสารอนินทรีย์ เช่น หินแร่ ที่ประกอบขึ้นเป็นดินซึ่งมีอนุภาคต่าง ๆ กัน โดยบอกในรูปของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (equivalent diameter) ซึ่งหมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางที่สมมุติขึ้นว่าอนุภาคต่าง ๆ ในดินเป็นทรงกลม เช่น กลุ่มดินเหนียวมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. กลุ่มซิลที่มีขนาด 0.002-0.02 มม. ทราย

ละเอียดมีขนาด 0.02-0.20 มม. และ ทรายหยาบมีเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล 0.20-2.00 มม. ซึ่งสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลุ่มอนุภาคดังกล่าว แสดงถึงประเภทของเนื้อดิน เช่น เนื้อดินเป็นชนิด clay loam จะมีขนาดอนุภาคกลุ่มทราย 40 % ดินเหนียว 35 % และซิลต์ 25 % เป็นต้น ซึ่งอนุภาคดินแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น กลุ่มขนาดดินเหนียวมีความไว (active) มากที่สุดในการควบคุมคุณสมบัติของดิน เพราะดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็ก และมีพื้นที่จำเพาะสูง จึงมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า คือมีการเกาะยึดกันเองและเกาะยึดกับสารอื่น เช่น ธาตุหรืออนุมูลต่าง ๆ เอนไซม์ และสารอินทรีย์อื่น ๆ รวมทั้งจุลินทรีย์ในดิน และอนุภาคขนาดกลุ่มดินเหนียว มีการพองตัว (swelling) และหดตัว (shrinkage) เมื่อเปียกหรือแห้งได้ง่าย ดังนั้นเมื่อทราบประเภทของเนื้อดินจึงสามารถคาดคะเนถึงสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคและคุณสมบัติชนิดนั้น ๆ ได้อย่างคร่าว ๆ ด้วย

7.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ เนื้อดินบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อินทรีย์อย่างหยาบได้ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ดินที่มีเนื้อละเอียดขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 9 การเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้นในเนื้อดินหยาบก็สามารถทำได้เช่นกันโดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน (สำอาง, 2535)

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดิน	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)
ดินเหนียว	150-250
ดินร่วนเหนียวปนซิลต์	120-200
ดินร่วนปนซิลต์	50-150
ดินร่วน	50-100
ดินร่วนปนทราย	10-40

ที่มา: (Kohnke, 1968)

7.3 การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption) การดูดซับหมายถึง การดูดในระดัปโมเลกุล ระหว่างสารชนิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูด (adsorbent) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ากับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวถูกดูด (adsorbate) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเป็นอย่างมาก ซึ่งสารชนิดหนึ่งจะดูดซับสารอื่นได้มากน้อยเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับว่าสารชนิดนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากน้อยเพียงใด ในดินการดูดซับที่สำคัญได้แก่การดูดซับน้ำและการดูดซับไอออนในสารละลายดิน ซึ่งในดินตัวดูดซับก็คือ

อนุภาคดินเหนียวและอนุภาคอินทรีย์วัตถุ เพราะมีขนาดเล็กมากจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนั้นอนุภาคทั้งสองชนิดยังมีประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นประจุลบเป็นส่วนใหญ่จึงสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี น้ำส่วนหนึ่งเป็นสารประกอบมีขั้วจึงอาจถูกดูดซับได้โดยกระบวนการนี้เช่นกัน

ส่วนการดูดซึมเป็นกระบวนการที่มีสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเกี่ยวข้องด้วยเช่นเดียวกับการดูดซับ โดยมีสารชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูด และสารชนิดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวเป็นตัวถูกดูด ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วตัวดูดจะดึงตัวถูกดูดให้ฝังตัวอยู่ในโครงร่างของตัวดูด และอาจมีกลไกอื่น ๆ นอกเหนือไปจากการดึงดูดในระดับโมเลกุลที่เกี่ยวข้องด้วย (สำออง, 2535) การดูดซึมที่สำคัญในดินก็คือ การดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดิน ช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมจำต้องเอาชนะอิทธิพลแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้อาจมีความสัมพันธ์ผกผันกับขนาดช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึมนี้อาจยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (เนื้อดินละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มากด้วยเหตุผลเดียวกัน

7.4 อินทรีย์วัตถุในดิน โดยทั่วไปปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสำคัญกับเนื้อดินพอสมควร กล่าวคือ ดินเนื้อละเอียดจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินเนื้อหยาบ ความสัมพันธ์เช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากดินเนื้อละเอียดอุ้มน้ำและดูดซับไอออนของสารต่าง ๆ ได้ อีกประการหนึ่ง ดินเนื้อหยาบมีการระบายอากาศที่ดีกว่าดินเนื้อละเอียด อัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุจึงสูงกว่า ทำให้เหลือปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด (สำออง, 2535)

7.5 สภาพความชื้นของดินและการเคลื่อนย้ายของน้ำ ความแตกต่างในด้านความสามารถอุ้มน้ำ (water holding capacity) ของดิน เป็นผลมาจากความแตกต่างของเนื้อดิน ดังนั้นเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยควบคุมระดับในการชะละลาย (leaching) ของดินและการแทรกซึมลง (infiltration) ของน้ำจากบนดินเข้าสู่ผิวดิน ซึ่งอัตราการแทรกซึมลงและความสามารถอุ้มน้ำของดินสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินและการปรับปรุงโครงสร้างดิน การทำลายอินทรีย์วัตถุในดินและการทำลายโครงสร้างดินจึงเป็นการลดอัตราการแทรกซึมลงและเป็นการลดความจุในการอุ้มน้ำของดินที่สำคัญ (สำออง, 2535)

7.6 โครงสร้างดิน (soil structure) ดินโดยทั่วไปในสภาพธรรมชาติไม่ได้อยู่ในลักษณะอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) อันเป็นลักษณะอนุภาคดินเดี่ยว ๆ แต่จะเชื่อมยึดกับอนุภาคข้างเคียงโดยอิทธิพลของสารเชื่อม (cementing agent) เกิดเป็นอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particle) ที่นิยมเรียกกันว่าเม็ดดิน (soil aggregate) เม็ดดินเหล่านี้ส่วนมากมีรูปทรงที่คล้ายคลึงกัน เม็ดดินที่มีรูปร่างและขนาดพอที่จะถือได้ว่าเป็นตัวแทนส่วนใหญ่ของเม็ดดินในชั้นดินนั้นเรียกว่า หน่วยโครงสร้างดิน (ped หรือ structural unit) ซึ่งเมื่อเชื่อมยึดกันเข้าก็จะได้โครงสร้างดิน (soil structure)

โครงสร้างของดินที่ดินนั้นจะต้องมีการกระจายขนาดช่อง (pore-size distribution) ของดินให้เหมาะสมต่อการอุ้มน้ำ การระบายน้ำ ระบายอากาศ ในการระบายน้ำนั้น ช่องว่างที่มีขนาดโตกว่า 300 ไมครอนจะมีการระบายน้ำโดยรวดเร็วด้วยระดับความดันเพียง 10 มิลลิบาร์และถ้าต้องการมีช่องว่างประมาณ 10 % ในสภาพความจุความชื้นสนามในเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะต้องมีช่องว่างขนาดใหญ่นี้เป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วในสภาพความชื้นดังกล่าว ค่าความดันจะอยู่ในราว 50-350 มิลลิบาร์ ซึ่งในสภาพความชื้นเช่นนี้ ช่องว่างที่มีขนาดโตกว่า 60 ไมครอน จะระบายน้ำออกหมดภายใน 48 ชั่วโมง

7.7 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน (soil density and porosity) กลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียวมีขนาดเล็กมากและส่วนใหญ่อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงยากที่จะบ่งบอกขนาดและปริมาณช่องที่มีอยู่ในดินนี้ เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวอาจเกาะยึดกันเองเป็นเม็ดดินเสถียร (stable aggregate) ซึ่งในสภาพเช่นนี้ดินเหนียวจะมีความพรุนสูงมาก ในทางตรงข้ามหากอนุภาคไม่เกาะยึดกัน อยู่ในสภาพฟุ้งกระจาย ดินเหนียวลักษณะเช่นนี้จะแน่นทึบมาก น้ำและอากาศไหลถ่ายเทได้ยากมาก อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วช่องขนาดเล็ก (micropore) ในดินก็ยังมีความสัมพันธ์กับเนื้อดินโดยที่เนื้อดินละเอียดจะมีขนาดช่องเล็กมากกว่าเนื้อดินหยาบ ซึ่งช่องขนาดเล็กจะสามารถดูดซึมน้ำเอาไว้ได้ เนื่องจากมีแรงแคปิลลารี (capillary forces) เกิดขึ้นในช่วงว่างของดิน ทำให้ดินเนื้อละเอียดมีความสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ

ดินที่มีปริมาณซิลท์สูง เมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้สูญเสียโครงสร้างดินได้ง่าย โดยซิลท์จะไหลลงอุดตันช่องทำให้ช่องผิวหน้าดินปิด ดังนั้นแม้มีความชื้นเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ช่องบนผิวหน้าดินปิด ทำให้น้ำและก๊าซไหลถ่ายเทได้น้อย ส่วนในดินเนื้อหยาบจะมีช่อง (pore) ขนาดใหญ่อยู่มากแต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เมื่อดินแห้งจะอุ้มน้ำได้น้อยทำให้ก๊าซถ่ายเทได้ดี (สุกมาส, 2545)

ความหนาแน่นของดินมี 2 ประการคือ ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นอนุภาค ซึ่งความหนาแน่นรวม (bulk density, D_b) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่แห้งสนิทกับปริมาตรทั้งหมดของดิน (ปริมาตรของส่วนประกอบทุก ๆ ส่วนรวมกัน)

ส่วนความหนาแน่นอนุภาค (particle density, D_p) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรของส่วนที่เป็นอนุภาคดิน (soil particle) เท่านั้น

สำหรับความพรุนของดินนิยมนิยามบอกค่าความพรุนทั้งหมด (total porosity, n) ซึ่งหมายถึงปริมาตรของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งในดิน เมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของดิน (สำอาง, 2535) ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสามดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ตามสมการที่ (5) ดังนี้

$$n = \left(1 - \frac{D_b}{D_p} \right) \times 100 \quad (5)$$

เนื่องจากค่าความหนาแน่นรวมคำนวณโดย เทียบน้ำหนักแห้งของดิน กับปริมาตรรวมทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นช่องในดิน ดังนั้นดินที่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำจึงหมายความว่าดินนั้นมีส่วนที่เป็นช่องมาก เมื่อดินเนื้อละเอียดยิ่งขึ้นความพรุนของดินโดยปรกติจะมากขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมของดินเนื้อละเอียดจึงมักต่ำกว่าของดินเนื้อหยาบ ดินที่มีเนื้อดินประเภทเหนียว มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.0-1.3 ก./มล. ดินที่มีเนื้อดินประเภทร่วนเหนียวและร่วนปนซัลที่มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.1-1.4 ก./มล. และดินที่มีเนื้อดินประเภทร่วน ร่วนปนทราย และทราย มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.2-1.6 ก./มล. สำหรับดินที่มีการเพาะปลูกส่วนมากดินชั้นไถพรวนมีความหนาแน่นรวมโดยเฉลี่ยประมาณ 1.32 ก./มล. (สำอาง, 2535) ดินในระดับที่ลึกลงไป ความพรุนของดินจะน้อยลงทำให้มีความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นชั้นดินที่ต่ำกว่าชั้นไถพรวนเช่นชั้นดิน B มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.4-1.6 ก./มล. และมีค่าสูงได้ถึง 1.6-1.8 ก./มล. ในชั้นดิน C (Ahlrichs, 1972)

ความหนาแน่นอนุภาคโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2.6 ก./มล. และถ้าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.3 ก./มล. โดยประมาณ ดังนั้น ความพรุนทั้งหมดของดินโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50 % หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือดินที่เหมาะสมในการเกษตรจะมีสัดส่วนของแข็งกับช่องอย่างละครึ่ง โดยส่วนที่เป็นช่องควรมีส่วนที่เป็นของเหลวและอากาศในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

8. น้ำใต้ดิน (Subsurface Water or Ground Water)

น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในชั้นดินบนพื้นผิวโลก โดยเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างของชั้นดินหรือหิน ซึ่งต้นกำเนิดของน้ำใต้ดินจะมาจากน้ำในบรรยากาศและน้ำผิวดินต่าง ๆ โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินทางกายภาพและทางชีววิทยาจะอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น มีความใส ปราศจากตะกอนความขุ่น ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากถูกกรองด้วยชั้นของดินและหิน แต่สำหรับคุณภาพของน้ำใต้ดินทางเคมีมักจะไม่น่าแน่นอน ส่วนมากจะมีแร่ธาตุและสารเคมีและละลายปะปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าน้ำผิวดิน

8.1 ลักษณะของแหล่งน้ำใต้ดิน ระบบน้ำใต้ดินมีอยู่หลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นดินในภูมิประเทศนั้น ระบบน้ำใต้ดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ (เกรียงศักดิ์, 2546; ไสว, 2530) ได้แก่

8.1.1 ชั้นให้น้ำหรือชั้นอุ้มน้ำ (Aquifer) ชั้นนี้จะเป็นพวกทราย กรวด หิน โดยชั้นนี้จะมี ความพรุนสูง น้ำสามารถซึมผ่านได้ดี

ก. ชั้นให้น้ำใต้ดินอิสระ (Unconfined หรือ Water Table Aquifer) ชั้นให้น้ำนี้จะ เป็นชั้นน้ำที่มีระดับน้ำใต้ดินสัมผัสกับอากาศในเมื่อดิน และมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยน้ำใต้ดินนี้จะไหลอยู่บนชั้นดินตึบน้ำ (Confining Layer) เป็นชั้นที่มักอยู่ใต้ดินที่ระดับตื้น ลักษณะชั้นดินที่มีน้ำแทรกอยู่ เป็นแบบชั้นดินเปียก (unsaturated zone) ซึ่งชั้นดินที่มีน้ำแทรกอยู่น้อย ไม่เต็มช่องว่างระดับน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล เช่น ฤดูแล้งระดับน้ำจะอยู่ลึก ฤดูฝนระดับน้ำจะ อยู่ตื้น

ข. ชั้นให้น้ำบาดาล (Confined Aquifer) เป็นชั้นน้ำที่มีเมื่อดินอยู่ภายใต้ความดัน เสมือนกับการไหลภายในท่อ เป็นชั้นที่มักอยู่ใต้ผิวดินที่ระดับลึกลงไป โดยมีชั้นของดินหรือ หินที่น้ำซึมผ่านได้ยากปิดปกคลุมไว้ข้างบน ทำให้น้ำในชั้นนี้มีความดัน มลพิษจากพื้นดินยากที่จะ ลงไปปนเปื้อนน้ำในชั้นนี้ได้ แต่อาจจะมีสารแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ เนื่องจากน้ำในชั้นนี้อาจมีการซึมผ่าน หินเกลือหรือพวกสนิมเหล็กได้ ลักษณะชั้นดินที่มีน้ำแทรกอยู่ เป็นแบบชั้นดินอมน้ำ (saturated zone) เป็นชั้นดินที่มีน้ำเต็มช่องว่างในเมื่อดิน ระดับน้ำในบ่อบาดาลนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตาม ฤดูกาลมากนัก ชั้นให้น้ำแบบปิดนี้อาจมีหลายชั้นสลับกัน

ก. ชั้นให้น้ำใต้ดินลอย (Perched Aquifer) จะอยู่เสมือนกับมีแอ่งน้ำหรือที่รองรับน้ำขนาดหนึ่ง โดยขนาดไม่ใหญ่ น้ำจะถูกเก็บไว้ได้ด้วยชั้นที่บ่น้ำอาจเป็นดินเหนียวหรือหินแข็งอุ้มน้ำไว้

8.1.2 ชั้นขับน้ำ (Aquiclude) ชั้นนี้เป็นชั้นที่สามารถขับน้ำได้ แต่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้โดยง่าย ชั้นนี้มักจะเป็นชั้นดินเหนียว

8.1.3 ชั้นกั้นน้ำ (Aquifuge) เป็นชั้นที่ไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่าน ไม่สามารถเก็บกักน้ำได้ ชั้นกั้นน้ำมักจะเป็นหินชนิดต่าง ๆ

8.1.4 ชั้นน้ำใต้ดินรั่ว (Aquitard) เป็นชั้นที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้อย่างช้า ๆ ชั้นนี้มักจะเป็นชั้นดินเหนียวปนทราย

8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil-Water Relationship) วีระพล (2538) กล่าวว่า ความชื้นในดินอาจอยู่ในลักษณะต่าง ๆ กัน กล่าวคือ ในลักษณะของ gravity water โดยเฉพาะในกรณีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดใหญ่ ในลักษณะของ capillary water โดยเฉพาะในกรณีที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็ก ในลักษณะของ hygroscopic moisture โดยการเคลือบคล้ายฟิล์มบาง ๆ รอบเม็ดดิน และในลักษณะของ water vapor เนื่องจากเม็ดดินที่เรียงตัวกันอยู่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดิน น้ำจะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างและเกาะติดอยู่กับเม็ดดินในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงสองชนิดด้วยกันคือ adhesive force และ cohesive force ถ้าหากน้ำเข้าไปแทนที่อากาศจนเต็มทุกช่องว่าง ก็กล่าวได้ว่า ดินอยู่ในสภาพอิ่มตัว และน้ำที่อยู่ในช่องว่างนั้นทั้งหมดจะเป็นปริมาณสูงสุดที่ดินจะเก็บกักเอาไว้ได้หากไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ แต่เนื่องจากว่าสารทุกอย่างที่อยู่บนโลกจะถูกแรงดึงดูดของโลกกระทำอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วย และในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่แรง adhesive ระหว่างอนุภาคของน้ำที่อยู่ตรงกลางของช่องว่างกับเม็ดดินจะน้อยกว่าในช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นเมื่อผลรวมของ แรง cohesive adhesive น้อยกว่าแรงดึงดูดของโลก น้ำก็จะไหลลงสู่ที่ต่ำกว่า น้ำในดินที่ไหลด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้ก็คือ gravity water หรือ free water ส่วนน้ำในช่องว่างขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถไหลไปได้ด้วยแรงดึงดูดของโลก แต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงดูดซับ (capillary force) น้ำซึ่งอยู่ในสภาพดังกล่าวนี้เรียกว่า capillary water ซึ่งการเคลื่อนที่จะช้ากว่ากรณี gravity water และจะมีทิศทางไปทางใดก็ได้สำหรับน้ำที่ยึดติดแน่นกับเม็ดดินและไม่สามารถที่จะทำให้เคลื่อนที่ได้ด้วยแรงดึงดูดของโลกหรือแรงดูดซับได้เลยนั้นเรียกว่า hygroscopic water

8.3 การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน (Movement of Groundwater) การไหลของน้ำใต้ดิน

สามารถคำนวณได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) และความพรุนของดินที่มีความต่อเนื่องตลอดชั้นดินอุ้มน้ำ (effective porosity) พบว่า อัตราการไหลผ่านตัวกลางพรุน (Q) จะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัด (A) และค่าความแตกต่างระหว่างระดับน้ำ (Head loss) ที่เข้าและออกจากระบบ (dH) แต่จะแปรผกผันกับระยะทางตามทิศทางการไหล (dX) ซึ่งแสดงในสมการที่ (6) ดังนี้

$$v = -K\left(\frac{dH}{dX}\right) \text{ หรือ } Q = -K \times A\left(\frac{dH}{dX}\right) \quad (6)$$

เมื่อ :

- Q คือ อัตราการไหล [L^3T^{-1}]
- v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล [LT^{-1}]
- A คือ พื้นที่หน้าตัด [L^2]
- K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) [LT^{-1}]
- dH คือ ความแตกต่างระหว่างระดับน้ำ (hydraulic head) [L] = $h_2 - h_1$
- dX คือ ระยะทางตามทิศทางการไหล [L] = $X_2 - X_1$
- dH/dX คือ ค่าลาดชันศาสตร์ (hydraulic gradient) [$-dH/dX$ มีเครื่องหมายลบแสดงถึงระยะทางตามทิศทางการไหลมากขึ้นพลังงานลดลง]

นอกจากนี้ยังพบว่า v จะแปรผันตรงกับ dH เมื่อ dX เป็นค่าคงที่ และจะแปรผกผันกับ dX เมื่อ dH เป็นค่าคงที่ หรือถ้า dH/dX เป็นค่าคงที่ v จะแปรผันตรงกับค่า K (Freeze and Cherry, 1979) ซึ่งความเร็ว v เป็นความเร็วเฉลี่ย (ความเร็วดาร์ซี) = Q/A , ส่วนความเร็วจริง ๆ คือความเร็วของน้ำในช่องว่างจะเท่ากับ v_a (actual velocity) ซึ่งแสดงในสมการที่ (7) ดังนี้

$$v_a = \frac{v}{n} \quad (7)$$

เมื่อ n คือ ความพรุนทั้งหมด (total porosity) ซึ่งได้จากปริมาตรของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งในดิน เมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity, K) เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำหรือของไหล และคุณสมบัติของตัวกลางที่ไหลผ่าน ซึ่งตัวกลางที่สำคัญได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน ดินทราย กรวด เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของดินโดยทั่วไป

Soil Type	Hydraulic Conductivity K (cm/s)	Total Porosity n (%)	Effective Porosity n _e (%)	Bulk Density D _b (g/cm ³)
Clayey	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁶	40-60	0-5	1.2-1.8
Silty	10 ⁻⁷ - 10 ⁻³	35-50	3-20	1.1-1.8
Sandy	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	20-50	10-35	1.3-1.9
Gravelly	10 ⁻¹ - 10 ²	25-40	12-30	1.6-2.1

ที่มา: (Freeze and Cherry, 1979; Sanders, 1998)

8.4 คุณภาพน้ำใต้ดิน คุณภาพน้ำใต้ดิน จะมีความแตกต่างกันระหว่างสถานที่หนึ่งกับอีกสถานที่หนึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของชุมชนที่อยู่รอบ ๆ พื้นที่และประเภทของชั้นดินหรือหินที่เก็บกักน้ำใต้ดินอยู่ ในปัจจุบันน้ำใต้ดิน ได้ถูกปนเปื้อนด้วยสารที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของประชากร ไม่ว่าจะเป็นสารเคมี โลหะหนัก สารปราบศัตรูพืช หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อาจมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่รั่วไหลจากถังกักเก็บบนดินและใต้ดิน เป็นต้น ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมให้มีในน้ำใต้ดิน โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายและผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเมื่อนำน้ำใต้ดินมาบริโภค ซึ่งแสดงในตารางที่ 11, 12 และ 13 ดังนี้

ตารางที่ 11 ความเข้มข้นมาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ความเข้มข้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)
Benzene	5
Carbon Tetrachloride	5
1, 2 - Dichloroethane	5
1, 1 - Dichloroethylene	7
cis - 1, 2 - Dichloroethylene	70
trans - 1, 2 - Dichloroethylene	100
Dichloromethane	5
Ethylbenzene	700
Styrene	100
Tetrachloroethylene	5
Toluene	1,000
Trichloroethylene	5
1, 1, 1 - Trichloroethane	200
1, 1, 2 - Trichloroethane	5
Total Xylenes	10,000

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

ตารางที่ 12 ความเข้มข้นมาตรฐานของโลหะหนัก (Heavy Metals) ในน้ำใต้ดิน

โลหะหนัก (Heavy Metals)	มิลลิกรัมต่อลิตร
Cadmium	0.003
Hexavalent Chromium	0.05
Copper	1.0
Lead	0.01
Manganese	0.5
Nickel	0.02
Zinc	5
Arsenic	0.01
Selenium	0.01
Mercury	0.001

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

ตารางที่ 13 ความเข้มข้นมาตรฐานของสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) และสารพิษ (Toxic) อื่น ๆ ในน้ำใต้ดิน

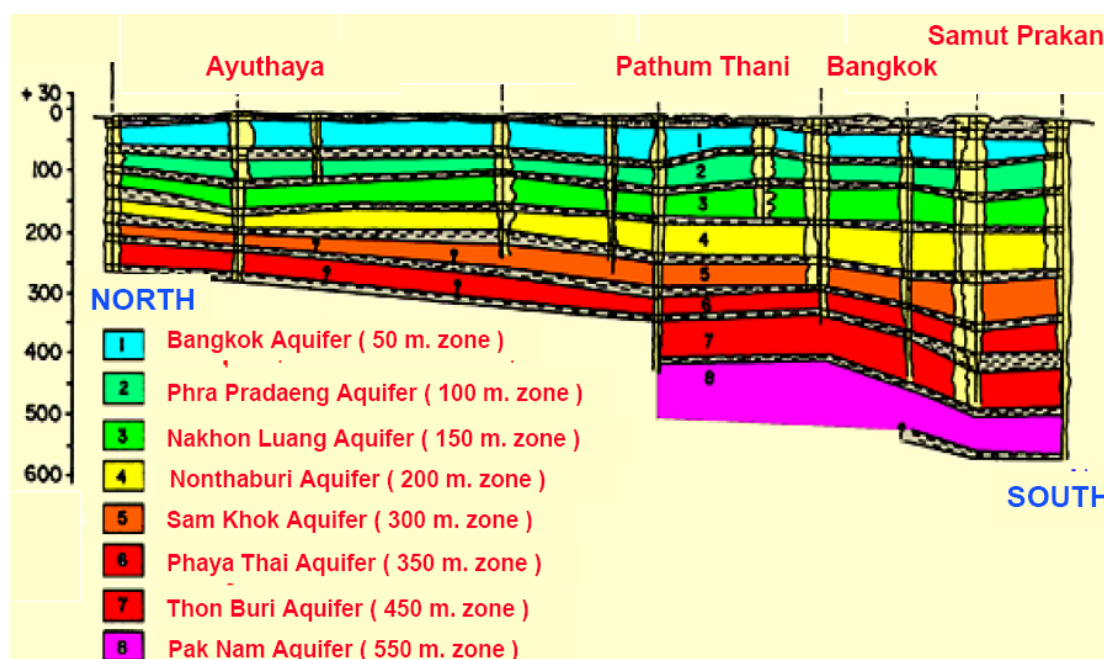
สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides)	ไมโครกรัมต่อลิตร
Chlordane	0.2
Dieldrin	0.03
Heptachlor	0.4
Heptachlor Epoxide	0.2
DDT	2.0
2, 4 -D	30
Atrazine	3
Lindane	0.2
Pentachlorophenol	1.0
สารพิษ (Toxic)	ไมโครกรัมต่อลิตร
Benzo (a) pyrene	0.2
Cyanide	200
PCBs	0.5
Vinyl Chloride	2.0

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

9. ชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

จากรายงานวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล กรุงเทพมหานครตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนใต้ ได้พื้นดินกรุงเทพฯ ลงไปมีแหล่งกวดทรายขนาดใหญ่ เมื่อกรวดและทรายมีขนาดใหญ่และกลมมนจึงมีช่องว่างสามารถเก็บกักน้ำบาดาลไว้ได้มาก ชั้นกรวดดังกล่าวซึ่งเป็นชั้นน้ำบาดาลจะวางตัวสลับอยู่กับชั้นดินเหนียว จึงทำให้มีชั้นน้ำบาดาลหลายชั้นและแต่ละชั้นแยกจากกันได้โดยตลอด ชั้นน้ำดังกล่าวแผ่ขยายไปทางทิศเหนือถึงจังหวัดชัยนาท และแผ่ขยายไปทางด้านตะวันตกและตะวันออกของกรุงเทพฯ จรดขอบแอ่งเจ้าพระยาและทางใต้จรดอ่าวไทย ดังนั้นกรุงเทพฯ จึงมีแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่และมีปริมาณมากที่สุด ความหนาของชั้นกรวดทรายและดินเหนียวดังกล่าวหนามาก ผลจากการสำรวจปิโตรเลียมทราบได้ว่า บริเวณท้องที่อำเภอภาษีเจริญมีชั้นกรวดทรายสลับชั้นดินเหนียวหนาถึง 1,830 เมตร สำหรับชั้นน้ำบาดาลตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 600 เมตร แบ่งได้เป็น 8 ชั้น ที่ระดับลึกกว่า 600 เมตรลงไป ยังมีชั้นน้ำบาดาลอยู่อีกแต่ยังไม่มีการใช้ รายงาน

การศึกษาของ JICA (1995) สรุปลักษณะชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลไว้ดัง
ภาพที่ 4 ดังนี้



ภาพที่ 4 รูปตัดทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวเหนือใต้บริเวณกรุงเทพและปริมณฑล
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2522)

9.1 ชั้นน้ำกรุงเทพ (ความลึก 50 เมตร) เป็นชั้นน้ำชั้นบนสุดและส่วนบนของชั้นน้ำนี้ปกคลุมด้วยดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok clay) ซึ่งมีความหนาเฉลี่ย 22 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยกรวดทราย และมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่บ้าง ชั้นน้ำหนาประมาณ 20-30 เมตร

9.2 ชั้นน้ำพระประแดง (ความลึก 100 เมตร) เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำกรุงเทพ ลงไป โดยถูกกั้นด้วยชั้นดินเหนียวเนื้อแน่นสีน้ำตาลอมเทา ความหนาไม่น้อยกว่า 10 เมตร ซึ่งในชั้นดินเหนียวหนามักมีชั้นทรายบาง ๆ แทรกอยู่ด้วย ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 60-80 เมตร ความหนาประมาณ 20-50 เมตร ประกอบไปด้วยกรวดทรายเม็ดเล็ก และใหญ่คละกันสีขาวอมเทาหรือสีน้ำตาลอ่อน และมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่ ปริมาณน้ำในชั้นน้ำนี้มีปริมาณมาก

9.3 ชั้นนํ้านครหลวง (ความลึก 150 เมตร) เป็นชั้นนํ้าที่อยู่ถัดชั้นนํ้าพระประแดงลงไป โดยมีดินเหนียวเนื้อแน่นสีนํ้าตาลหนา 3-10 เมตรกั้นอยู่ ระดับความลึกถึงระดับบนสุดของชั้นนํ้าอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 100-140 เมตร ทางด้านตะวันออกลึกไม่ถึง 90 เมตร ชั้นนํ้าหนา 50-70 เมตร ชั้นนํ้าประกอบด้วยกรวดทรายแผ่ขยายออกไปในแนวเหนือ - ใต้จนถึงจังหวัดชัยนาทและแผ่ขยายไปทางตะวันออก ตะวันตก ชั้นนํ้านครหลวงเป็นชั้นนํ้าที่มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้มากที่สุดเนื่องจากเป็นชั้นนํ้าที่ให้นํ้าดีทั้งปริมาณและคุณภาพ ยกเว้นบริเวณทางฝั่งธนบุรีและบริเวณตอนใต้กรุงเทพฯ ที่ได้นํ้ากร่อยถึงเค็ม บ่อที่เจาะลึกถึงชั้นนํ้านครหลวงสามารถสูบน้ำได้ในอัตรา 100-300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

9.4 ชั้นนํ้านนทบุรี (ความลึก 200 เมตร) ชั้นนํ้านนทบุรีวางตัวขนานกับชั้นนํ้านครหลวง มีคุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาคล้ายคลึงกัน ชั้นนํ้าประกอบไปด้วยกรวด ทราย และมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่ ชั้นดินเหนียวที่คั่นอยู่บางตอนจะยอมให้นํ้าไหลซึมผ่านไปได้ ระดับความลึกของชั้นนํ้าจากผิวดินประมาณ 170-200 เมตร ทางด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ อาจจะลึกประมาณ 150 เมตร ความหนาของชั้นนํ้าประมาณ 30-70 เมตร สภาพนํ้าบาดาลในชั้นนํ้านนทบุรีคล้ายคลึงกับชั้นนํ้านครหลวง ปริมาณนํ้าสามารถสูบได้ถึง 150-300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในระยะก่อนปี พ.ศ. 2518 ไม่ค่อยมีการเจาะบ่อลึกลงไปถึง เนื่องจากชั้นนํ้าอยู่ลึกทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง แต่เมื่อชั้นนํ้านครหลวงได้เกิดวิกฤตการณ์นํ้าบาดาลขึ้น ทำให้คุณภาพนํ้าเปลี่ยนแปลงและสูบน้ำได้น้อยลง จึงได้มีการเจาะบ่อลึกลงไปเพื่อให้ได้นํ้าคุณภาพดีและปริมาณนํ้ามากขึ้น ในปัจจุบันบ่อนํ้าบาดาลขนาดใหญ่ ๆ ของการประปานครหลวงและโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะเจาะลึกถึงชั้นนํ้านนทบุรี จึงทำให้เกิดวิกฤตการณ์นํ้าบาดาลในบางบริเวณเช่นเดียวกับชั้นนํ้านครหลวง

9.5 ชั้นนํ้าสามโลก (ความลึก 250 เมตร) ชั้นนํ้าวางตัวอยู่ใต้ชั้นนํ้านนทบุรี ระดับบนสุดของชั้นนํ้าพบที่ประมาณ 240-250 เมตร ความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 40-80 เมตร ลักษณะชั้นนํ้าประกอบไปด้วยชั้นทรายบาง ๆ หลายชั้นวางตัวเรียงสลับกันลงไป โดยมีชั้นดินเหนียวแทรกสลับอยู่กลาง บ่อนํ้าบาดาลส่วนใหญ่ที่เจาะในชั้นนํ้านี้จะอยู่บริเวณเหนือจังหวัดนนทบุรี จนถึงตัวจังหวัดปทุมธานี คุณภาพนํ้าใกล้เคียงกับชั้นนํ้านนทบุรี แต่ปริมาณนํ้าจะน้อยกว่า

9.6 ชั้นนํ้าพญาไท (ความลึก 350 เมตร) ชั้นนํ้าพญาไทมีลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาเหมือนกับชั้นนํ้าสามโลก คือ ประกอบด้วยชั้นทรายบาง ๆ หลาย ๆ ชั้น และมีชั้นดินเหนียวแทรกอยู่ โดยแยกจากกันด้วยชั้นดินเหนียวแข็งเนื้อแน่นหนาประมาณ 5-10 เมตร ระดับบนสุดของชั้นนํ้า

อยู่ลึกประมาณ 275-350 เมตร ชั้นน้ำหนาประมาณ 40-60 เมตร สภาพน้ำบาดาลคล้ายคลึงกับชั้นน้ำสามโคก โดยมีแหล่งน้ำจืดเฉพาะด้านเหนือ ตะวันออกและตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพมหานคร และน้ำเค็มทางด้านใต้และเขตรธนบุรี

9.7 ชั้นน้ำธนบุรี (ความลึก 450 เมตร) ชั้นน้ำธนบุรีวางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำพญาไท โดยมีชั้นดินเหนียวคั่นอยู่ ชั้นดินเหนียวดังกล่าวบางแห่งหนาถึง 30 เมตร แต่มีบางแห่งหนาประมาณ 1 เมตร เท่านั้น ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 350-400 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยทรายหนา ๆ อย่างน้อย 3 ชั้น แต่ละชั้นมีดินเหนียวแทรกอยู่ ความหนาของชั้นน้ำรวมกันประมาณ 50-100 เมตร น้ำบาดาลในชั้นธนบุรีส่วนใหญ่เป็นน้ำจืดหรือค่อนข้างจืด เว้นแต่บริเวณด้านตะวันตกหรือตะวันตกเฉียงใต้ของฝั่งธนบุรีซึ่งจะได้น้ำกร่อยถึงเค็ม

9.8 ชั้นน้ำปากน้ำ (ความลึก 550 เมตร) ชั้นน้ำปากน้ำเป็นชั้นน้ำที่ลึกที่สุด ให้น้ำจืดอยู่ทุกบริเวณเป็นชั้นน้ำที่ประกอบไปด้วยชั้นทรายหนา ๆ ไม่น้อยกว่า 3 ชั้น ทรายชั้นล่างสุด ประมาณ 550 เมตร ลงไป จะให้คุณภาพน้ำดีที่สุด ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 420-500 เมตร ในปัจจุบันได้มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะบ่อและสูบน้ำจากชั้นน้ำนี้โดยเฉพาะในบริเวณที่ชั้นน้ำระดับตื้นกว่าให้น้ำเค็ม เช่น บริเวณอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ บ่อสามารถสูบได้มากกว่า 45 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และชั้นน้ำให้น้ำร้อนอุณหภูมิสูงถึง 48 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพฯ โดยทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความซึมผ่านได้ของชั้นน้ำชั้นบนสุดคือชั้นน้ำกรุงเทพที่ได้จากการสูบทดสอบบริเวณตำบลบางขุน จังหวัดปทุมธานี มีค่า 3,950 ตร.ม./วัน สำหรับชั้นน้ำพระประแดงและนครหลวง มีความซึมผ่านได้ระหว่าง 500-2,000 ตร.ม./วัน สำหรับการรั่วซึมระหว่างชั้นน้ำ (seepage factor) อยู่ระหว่าง 2×10^{-6} วัน⁻¹ ถึง 2×10^{-5} วัน⁻¹ และค่าความซึมผ่านได้ของชั้นน้ำนันทบุรีอยู่ระหว่าง 100-2,000 ตร.ม./วัน และค่าการรั่วซึมระหว่างชั้นน้ำอยู่ระหว่าง 2×10^{-6} วัน⁻¹ (JICA, 1995)

10. การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

การวิเคราะห์การปนเปื้อนในน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นตัวช่วยให้เห็นถึงแนวโน้มในอนาคตของสภาพการปนเปื้อนในบริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย และจะนำไปใช้ในการประเมินสถานการณ์ความรุนแรงของการปนเปื้อนน้ำชะมูลฝอยที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและผิวดิน และหาวิธีการแก้ไขหรือบำบัดสารปนเปื้อนเหล่านั้นออกมาจากแหล่งน้ำใต้ดินหรือป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่กระจายไปกระทบกับสภาพความเป็นอยู่ของมนุษย์และยังป้องกันไม่ให้สารเหล่านั้นกระจายหรือปะปนไปกับน้ำใต้ดินที่มีการไหลในสภาพธรรมชาติ

10.1 การประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำใต้ดิน แบบจำลองน้ำใต้ดิน เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่จำลองการทดลองในห้องปฏิบัติการ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงและประมวลผลโดยประมาณของข้อมูลสนาม ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นแบบจำลองที่นำคณิตศาสตร์มาคำนวณทิศทาง ขนาดการไหลของน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำ โดยนำวิธีการคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้คำนวณและวิเคราะห์ระบบน้ำใต้ดินแทนแบบจำลองทางกายภาพ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของงาน ซึ่งแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม (Walton, 1996) ได้แก่

10.1.1 แบบจำลองเพื่อใช้คาดคะเนหรือพยากรณ์ (Predictive Model) แบบจำลองกลุ่มนี้จะใช้ในการคาดคะเนระดับน้ำ คุณภาพน้ำ ปริมาณน้ำ หรือการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าตัวแปรต่าง ๆ และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม (calibration)

10.1.2 แบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างของพื้นที่ (Interpretive Model) แบบจำลองชนิดนี้จะใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนระบบเก็บข้อมูล วิเคราะห์ระบบ หรือความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ ของพื้นที่นั้น ๆ จึงไม่มีความจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลสนาม

10.1.3 แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ระบบการไหลในกรณีสมมุติในทางทฤษฎี (Hypothetical Approach) และช่วยในการตรวจสอบแนวทางในการศึกษาของสภาพพื้นที่นั้น ๆ (Generic Model) สำหรับแบบจำลองชนิดนี้ไม่มีความจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลสนามเช่นกัน การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การไหลและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ส่วนใหญ่จะมุ่งไปยังแบบจำลองที่ต้องการใช้เป็นเครื่องมือในการพยากรณ์หรือคาดคะเนเหตุการณ์ต่าง ๆ ในอนาคต เพื่อนำผลมาออกแบบป้องกันและแก้ไขต่อไป ซึ่งเป็นการ

ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ต้องการข้อมูลสนามมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ พร้อมทั้งผลการติดตามข้อมูลที่ใช้เวลาติดต่อกันมาหลายปี

10.2 ขั้นตอนการจำลองการไหลและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลสนามและระบบอุทกวิทยา ตรวจสอบการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน เป็นวิธีการประมวลผลที่รวดเร็วและได้ผลดีที่สุด ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับจำนวนและความแม่นยำของข้อมูลสนามซึ่งใช้ในการปรับแบบจำลอง การเตรียมแผนงานจำลองมีขั้นตอนที่สำคัญ 9 ขั้นตอน (Spitz and Moreno, 1996) ดังนี้

10.2.1 การกำหนดวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง (Define purpose) ซึ่งจะแตกต่างกันไปเช่น เพื่อใช้ในการวางแผนงานหรือคำนวณการไหล ปริมาณ หรือออกแบบผลกระทบ ดังนั้น ขั้นตอนของการจำลองไม่จำเป็นจะต้องครบวงจรทั้งหมด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานนั้น ๆ

10.2.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual model) เป็นแบบจำลองเชิงกายภาพที่แสดงถึงแนวคิดที่เกิดจากข้อมูลสนามและนำมาประมวล เช่น ข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาร่วมกับข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ หรือข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมทางอุทกธรณีวิทยา (Hydrogeologic Environments) ได้แก่ สภาพภูมิประเทศ (การใช้ประโยชน์ที่ดิน สภาพภูมิประเทศ) ข้อมูลทางธรณีวิทยา (วัตถุตัวกลาง คุณสมบัติทางกลศาสตร์) อุทกวิทยาและสภาพดินฟ้าอากาศ ข้อมูลเหล่านี้เป็นตัวแปรที่ควบคุมการไหลของน้ำ ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพื้นที่แต่ละแหล่ง และระบบของน้ำใต้ดินก่อนทำการวิเคราะห์โดยละเอียดในเชิงตัวเลข (Numerical analysis) ดังนั้น พื้นที่ใด ๆ ที่มีแผนที่อุทกธรณีวิทยาในมาตราส่วนต่าง ๆ กัน จะช่วยในการสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ได้ง่ายและดีขึ้น หรือถ้าไม่สามารถหาข้อมูลได้จากแผนที่อุทกธรณีวิทยาก็มีความจำเป็นต้องจัดเตรียมข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ระบบอุทกวิทยาเสนอผลของการศึกษาและการประยุกต์ใช้ในการป้องกันแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน รวมทั้งการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำใต้ดิน

10.2.3 ขั้นตอนในการเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program selection) ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ได้มีการทดสอบหรือแก้ไข (verify) จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและสนามเป็นที่เชื่อถือได้แล้ว ประกอบกับลักษณะของโปรแกรมมีโปรแกรมการป้อนข้อมูล (pre-processing) และโปรแกรมแสดงผล (post processing) ที่ดี จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องเขียนโปรแกรมเอง แต่ทั้งนี้ผู้ใช้ควรเข้าใจในพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ วิธีการคำนวณ ข้อจำกัด

ของโปรแกรมนั้น ๆ ดังนั้น การเลือกใช้โปรแกรมที่นำมาสร้างแบบจำลองจึงมีความสำคัญต่อ วัตถุประสงค์ของการจำลองนั้น ๆ

10.2.4 การออกแบบจำลอง (Model design) เมื่อเข้าใจภาพรวมในเชิงโมเดลของ พื้นที่ได้ดีแล้ว การจำลองจากสภาพกายภาพต่าง ๆ สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็นหน่วยเล็ก ๆ (Discretization) โดยการออกแบบขนาดของพื้นที่ที่เป็นรูปเหลี่ยมหรือกริด เลือกขั้นตอนของเวลา (time step) ขอบเขตของพื้นที่และชั้นหิน (Boundary conditions) และค่าตัวแปรเบื้องต้นในการเริ่ม จำลองหรือคำนวณการกระจายค่าแรงดันของน้ำ (hydraulic head)

10.2.5 การปรับค่าตัวแปร (Calibration) ในการจำลองของแต่ละขั้นตอนในระบบ อุทกวิทยา ผู้จำลองไม่สามารถทราบความถูกต้องของข้อมูลสนามที่ใช้ป้อนเข้าไปในแบบจำลองได้ ทั้งหมด ดังนั้นผลการคำนวณจากการจำลอง เช่น ระดับน้ำหรือแรงดันของน้ำควรมีค่าใกล้เคียงกับ ข้อมูลที่วัดได้จริงในสนาม เมื่อผลการคำนวณไม่ตรง จึงมีความจำเป็นจะต้องปรับค่าตัวแปรที่ไม่ ทราบค่าแน่นอน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สภาพขอบเขตของแบบจำลองที่ เหมาะสม เพื่อให้ผลการคำนวณสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามได้ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ สำคัญที่ต้องใช้ความเข้าใจระบบการไหลเวียนของน้ำใต้ดิน ณ แหล่งนั้น ๆ ซึ่งบางครั้งต้องใช้ วิธีการลองผิดลองถูก จนกระทั่งทราบขอบเขตและช่วงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ถ้าผลการคำนวณต่าง จากข้อมูลสนามมาก อาจมีความจำเป็นต้องกลับไปตรวจสอบข้อมูลสนามอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงมี ความจำเป็นต้องวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน (sensitivity analysis) เช่น ขอบเขตของพื้นที่ การซึมของน้ำจากน้ำฝนเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

10.2.6 การแก้ไขและปรับปรุงโปรแกรม (Model Verification) โปรแกรมบางชนิด ก่อนนำมาใช้ต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ข้อมูลที่ทราบหรือ มีการปรับแก้แล้ว โดยปกติโปรแกรมสำเร็จรูปได้ผ่านการตรวจสอบและเป็นโปรแกรมที่ได้รับการ ยอมรับหรือเป็นโปรแกรมมาตรฐาน เช่น โปรแกรมในตระกูล MODFLOW ดังนั้นการใช้โปรแกรม MODFLOW จึงไม่มีความจำเป็นต้องปรับแก้โปรแกรมแต่อย่างใด ยกเว้นจะมีการเขียนเพิ่มเติม เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น

10.2.7 การคาดคะเนและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Prediction and Sensitivity Analysis) ในการคาดคะเนผลของการคำนวณต่าง ๆ เช่น แรงดันของน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัว แปรที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต ในขณะที่มีการเพิ่มเติมน้ำเข้าหรือการสูบน้ำออก หรือมีแหล่งกักเก็บ มลพิษเข้าไปปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน มีความจำเป็นต้องมีการวางแผนการใช้ข้อมูลในอนาคต ร่วมกับการวิเคราะห์และการตรวจสอบการอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) การ เปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิดจะทำให้ผลการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปมาก ความอ่อนไหวของตัว

แปรของแบบจำลองเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละพื้นที่ ดังนั้นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ทำให้ทราบถึงช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ และเตรียมการเฝ้าระวังของข้อมูลในการศึกษา และวิเคราะห์ในระยะยาว (Monitoring Program)

10.2.8 แสดงผลการจำลอง (Presentation of Results) การแสดงผลการจำลองเป็นงานขั้นสุดท้าย ซึ่งเป็นการสื่อสารต่อผู้ที่นำผลไปใช้ เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการและข้อจำกัดต่าง ๆ รวมทั้งผลที่จำลองมีความถูกต้องและผิดพลาดอย่างไร ซึ่งจะแสดงผลทั้งการนำมาซึ่งข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบ การปรับแก้ค่า การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ผลการคำนวณในเชิงตัวเลข รูปภาพและคำอธิบาย ข้อเสนอแนะพร้อมทั้งรายงานฉบับสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ของงานนั้น ๆ

10.2.9 การปรับปรุงแบบจำลองในระยะยาว (Post audit) สำหรับการศึกษาในหลาย ๆ กรณี เราไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองที่จัดทำขึ้นมีความถูกต้องเพียงใด เพราะเหตุการณ์ที่พยากรณ์ไว้ยังไม่เกิดขึ้น ในการศึกษาในบางกรณี เช่น การกักเก็บของแหล่งน้ำใต้ดิน การปนเปื้อนของสารอันตราย จึงมีความจำเป็นต้องมีการวางแผนเก็บข้อมูลชุดใหม่หลังจากที่เสร็จสิ้นการศึกษาช่วงแรกไปแล้ว ในช่วงเวลาหนึ่งหรือสองปี เพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงแบบจำลองทั้งระบบ โดยกลับไปยังขั้นตอนแรก เพื่อให้แบบจำลองนั้น ๆ ใช้งานได้ถูกต้องหรือชัดเจนขึ้น การปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ถูกต้องชัดเจนเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละแหล่ง ดังนั้น การวางแผนติดตามผลการสำรวจข้อมูลในระยะเวลาหลาย ๆ ปีติดต่อกัน จึงมีความสำคัญต่อผลรวมความถูกต้องของแบบจำลอง

10.3 การสร้างแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) โปรแกรม มาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการ Finite Difference ได้แก่ โปรแกรมในตระกูล MODFLOW การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้จะแบ่งพื้นที่ที่จะคำนวณ (domain) กำหนดขอบเขตให้ชัดเจนเป็นรูปสี่เหลี่ยม (block) ดังนั้นจึงแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือกริด (grid) การแบ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมโดยเส้นกริด อาจแตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับจำนวนความหนาแน่นของข้อมูล ความกว้างของกริดที่อยู่ติดต่อกันไม่ควรต่างกันเกิน 1.5 เท่า ของกริดข้างเคียง เพื่อให้ผลการคำนวณไม่เกิดความผิดพลาดมากเกินไป โดยแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นแนวดิ่ง (column) และแนวนอน (row) ส่วนในแนวดิ่งจะเป็นจำนวนชั้นของแบบจำลอง (model layer) การแก้สมการ อาศัยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ซึ่งสามารถสร้างสมการในรูปของ matrix และแก้สมการเป็นระบบโดยใช้วิธีทาง numerical techniques

10.4 แบบจำลองในกลุ่ม MODFLOW แบบจำลองในกลุ่ม MODFLOW (Modular-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติ ผ่านตัวกลางที่เป็นวัสดุพรุน โดยการใช้วิธี Finite difference method ที่เขียนโดย McDonald and Harbaugh ในปี ค.ศ. 1988 (US Geological Survey)

โปรแกรม MODFLOW ถูกออกแบบมาให้มีโครงสร้างที่อิสระสามารถทำงานด้วยตัวของมันเองได้ (Modular structure) ซึ่งสนับสนุนวัตถุประสงค์เบื้องต้น 2 ประการคือ ง่ายต่อการทำความเข้าใจและง่ายต่อการปรับปรุง กรณีที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งที่ทาง U.S. Geological Survey มีความเชื่อมั่นว่าผู้ใช้งานควรจะมีคามเข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรม เพื่อที่จะใช้งานอย่างเหมาะสม สำหรับการง่ายต่อการปรับปรุงเป็นอีกวัตถุประสงค์หนึ่ง เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่า มีความต้องการ โปรแกรมที่มีความสามารถใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของการปรับปรุง เช่น (Prudic, 1989; Hill, 1990; Leake and Prudic, 1991; Goode and Appel, 1992; Harbaugh, 1992; Guigure and Franz, 1999; Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003) เป็นต้น

โปรแกรม MODFLOW ได้รวบรวมเป็นรูปเล่มครั้งแรกโดย McDonald and Harbaugh (1984) โปรแกรมได้ถูกใช้และถูกปรับปรุงเป็นเวอร์ชันที่ 2 ซึ่งถูกรวบรวมโดย McDonald and Harbaugh (1988) เวอร์ชันนี้มักจะถูกเรียกว่า MODFLOW-88 สำหรับเวอร์ชันที่ 3 เรียกว่า MODFLOW-96 (Harbaugh and McDonald, 1996a and 1996b) ต่อมาบริษัท Waterloo Hydrogeologic Inc. (2003) ได้พัฒนาโปรแกรม Version 2.1 พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการป้อนข้อมูล (pre-processing) และโปรแกรมแสดงผล (post-processing) เพื่อให้สะดวกและง่ายในการใช้งาน คือ Visual MODFLOW ซึ่งใช้เป็นโปรแกรมหลักในการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดิน ร่วมกับระบบอุทกวิทยา นอกจากโปรแกรม MODFLOW ที่ใช้ในการคำนวณความเร็วของน้ำแล้วยังได้นำเอาโปรแกรม post-processing ที่ใช้แสดงผลของทิศทางการไหลในแนวหลัก (strongest hydraulic gradient direction) ของการจำลองแบบระดับน้ำคงที่ (steady state simulation) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ศึกษาการแพร่กระจายการปนเปื้อนของมวลสาร ในแหล่งน้ำใต้ดิน ได้แก่โปรแกรม MODPATH ซึ่งรวมอยู่ในกลุ่ม Visual MODFLOW (Walton, 1996) นอกจากนี้ยังได้นำเอาโปรแกรมการวิเคราะห์และคำนวณการแพร่กระจายของมวลสาร และปฏิกิริยาเคมีของสารปนเปื้อนบางชนิด ในแหล่งน้ำใต้ดินเข้ามารวมกับโปรแกรม

MODFLOW โดยอาศัยการคำนวณความเร็วของน้ำ โปรแกรมที่นำมาใช้ในการคำนวณการแพร่กระจายของมวลสารเรียกว่า MT3D (Mass Transport Three-Dimension Model; Zheng, 1996)

โปรแกรม MODFLOW-2000 ยอมให้มีการป้อนค่าเป็นแบบพารามิเตอร์มาใช้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับการป้อนค่ากริดเซลล์จำนวนมาก ๆ ร่วมกับวิธีการคูณ (Multiplication) เพื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์ และความสามารถพิเศษที่ช่วยในการป้อนค่าแบบ Zone array สำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ ทั้งนี้จะทำให้ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนค่าข้อมูล Input ส่วนใหญ่ของโมเดล ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดจะทำการคำนวณร่วมกับ การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivities) และจะถูกปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่จำลองได้เข้าใกล้ต่อค่าระดับน้ำและค่าอัตราการไหลจากที่วัดได้ให้มากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ Observation, Sensitivity และ Parameter estimation processes ของ MODFLOW-2000 ซึ่งได้แสดงในเอกสารของ Hill *et al.*(2000)

10.4.1 แนวความคิดการออกแบบ (Design Concept) โปรแกรม MODFLOW-2000 ได้ถูกแบ่งเป็นส่วนๆ ไปตามแต่ละลักษณะทางอุทกวิทยาเพื่อให้โปรแกรมสามารถจำลองปัญหาการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินได้แตกต่างกัน เรียกว่า “Package” เช่น การรั่วซึมของแม่น้ำ (Rivers package) ปริมาณ Recharge ของน้ำใต้ดิน (Recharge package) การคายระเหย (Evapotranspiration package) เป็นต้น Package ต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกรวบรวมอยู่ในสมการการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินเป็น package แยกจากกัน นอกจากนี้ ยังมีหลายวิธีที่จะเลือกใช้สำหรับแก้ปัญหสมการดังกล่าว โดยแยกเป็น Package ต่าง ๆ เช่น วิธี Preconditioned Conjugate Gradient (PCG2 of Hill, 1990) วิธี Strongly Implicit Procedure (SIP) เป็นต้น ทั้งนี้ Package สุดท้าย คือ Basic package ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ใน Package ทางด้านอุทกวิทยา หรือ Package ทางด้านการคำนวณ แต่เป็น Package ที่ควบคุมโปรแกรมทั้งหมด

สำหรับจุดมุ่งหมายของผู้เขียนโปรแกรมคือ การหยุดโปรแกรมเป็นส่วน ๆ จะทำให้ง่ายต่อการเลือกใช้โดยเรียกว่า “procedure” การร่วมกันของการแก้ปัญหสมการที่เกี่ยวข้องกัน เรียกว่า กระบวนการ (Process) ตัวอย่างของการแก้ปัญหของสมการการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดิน โดยใช้วิธี Finite difference ในโปรแกรม MODFLOW เดิมและปัจจุบันนี้ยังคงใช้อยู่เรียกว่า Groundwater Flow (GWF) Process ซึ่งได้รวมเอาสมการการไหล การกำหนดสมการ Finite difference, ข้อมูล Input และการกำหนดข้อมูล Output สำหรับ MODFLOW-2000 การปรับแก้แบบจำลอง (Model calibration)

Hill *et al.* (2000) ได้เสนอว่าควรจะมีอีก 3 กระบวนการ นอกเหนือจาก GWF process แล้ว ยังมีส่วนของ Observation (OBS) process เพื่อที่จะคำนวณค่าที่ถูกจำลอง (Simulated value) ซึ่งจะถูกรวบรวมเทียบกับค่าที่วัดได้ (Measured value) และคำนวณผลรวมของผลต่างระหว่างค่ายกกำลังสอง เพื่อดูว่าค่าที่จำลองเข้าใกล้ค่าที่เกิดจากการวัดหรือสังเกตมากน้อยเพียงใด (ผลรวมของผลต่างยกกำลังสองยิ่งน้อย แสดงว่ายิ่งเข้าใกล้ค่าที่สังเกตมาก) โดยที่ Sensitivity (SEN) process จะใช้สำหรับแก้ปัญหาสมการ Sensitivity สำหรับ Hydraulic head ของกริดทั้งหมด และส่วนสุดท้าย คือ Parameter-Estimation (PES) process จะแก้ปัญหาสมการ Modified Gauss-Newton เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์ของฟังก์ชัน นอกจากกระบวนการ (process) ซึ่งแก้สมการเหล่านี้ MODFLOW-2000 ยังมี Global process (GLO) ซึ่งควบคุมการปฏิบัติการและการตั้งค่าโครงสร้างข้อมูลโดยรวม ซึ่งสามารถถูกเรียกใช้ได้ทุกกระบวนการ

10.4.2 โครงสร้างโดยรวม (Overall Structure) ขึ้นอยู่กับกระบวนการ (process) ใด จะถูกนำมาใช้ร่วมกับ Ground Water flow process ซึ่งจะมีผลทำให้โครงสร้างของโปรแกรมมีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าโปรแกรมเดิม เช่น เมื่อมีการนำ Observation, Sensitivity และ Parameter-Estimation process เข้ามา loop ของการประมาณค่าพารามิเตอร์ (parameter estimation loop) ก็จะถูกเพิ่มขึ้นมาในโครงสร้าง GWF process ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น และผลของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวพารามิเตอร์ (parameter-Sensitivity loop) จะถูกเพิ่มขึ้นมาในโครงสร้างอย่างง่ายของการเชื่อมโยงกันของ Global Ground Water, Observation, Sensitivity และ Parameter-Estimation Process ซึ่งไม่ได้รวมเอาบาง procedure ที่ไม่ค่อยสำคัญของ Observation, Sensitivity และ Parameter-estimation process เพื่อให้ขนาดและความซับซ้อนของ Flow chart น้อยที่สุด และ procedure ส่วนใหญ่ดังแสดงในภาพที่ 5 สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก McDonald and Harbaugh (1988) ซึ่งมี procedure ใหม่ที่ต้องการของ parameter-estimation process คือ Rewind procedure ซึ่ง procedure นี้จะทำการอ่านและเก็บข้อมูลที่คำนวณได้ใน input files ใหม่ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการป้อนค่าใหม่ในการคำนวณ iteration ต่อไป

10.4.3 การทำงานร่วมกันของ Observation, Sensitivity และ Parameter-Estimation Process การเชื่อมโยงกันของ Observation, Sensitivity และ Parameter-Estimation process ในขั้นตอนต่าง ๆ ดังภาพที่ 6 ซึ่งโปรแกรม MODFLOW-2000 เริ่มต้นปัญหาโดยการอ่านค่าข้อมูล Input จากไฟล์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

ก. Input files ของ GWF process ซึ่ง กำหนดวิธีการของการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและค่าพารามิเตอร์

ข. Input files ของ OBS process ซึ่งกำหนดค่าจากการสังเกต เช่น Hydraulic head (HOB files) จากบ่อสังเกตต่าง ๆ ค่าระดับน้ำจากแม่น้ำ (RVOB files) เป็นต้น

ค. Input files ของ SEN process ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น และค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นจะถูกควบคุมโดย SEN process ซึ่งจะทำการคำนวณความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นจะถูกประมาณค่าผ่านทาง PES process

ง. Input files ของ PES process ซึ่งจะมีค่าตัวแปรที่ควบคุมการทำงานของวิธี Modified Gauss-Newton nonlinear regression

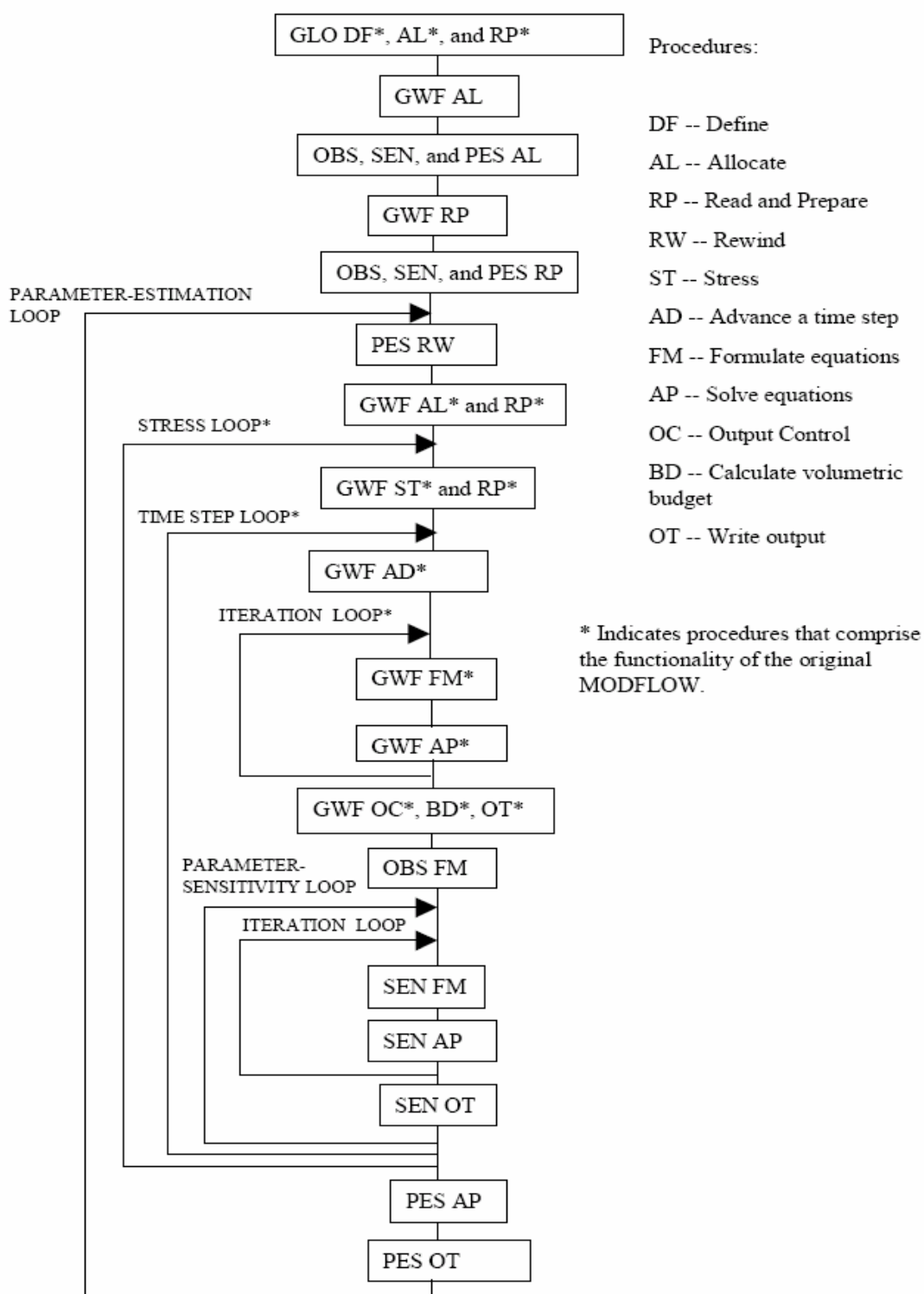
สำหรับ iteration ของการประมาณ 1 ค่าพารามิเตอร์ โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นจาก Input files ของ SEN process ต่อจากนั้น MODFLOW 2000 ก็จะใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น เพื่อค้นหาค่า Hydraulic head และคำนวณค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จนครบทุกตัวสำหรับการจำลอง ซึ่งมีเพียง 1 ช่วงเวลา (Time step) ส่วนใหญ่จะเป็น steady state ซึ่งคำนวณเพียง 1 รอบ แต่ถ้านำการจำลองประกอบด้วยหลายช่วงเวลา การคำนวณ Hydraulic head และค่าความอ่อนไหวก็จะถูกคำนวณหลายรอบตามช่วงเวลาเหล่านั้น เมื่อทุกช่วงเวลาถูกคำนวณโดยสมบูรณ์ ค่าที่จำลองได้ (simulated value) หักลบด้วยค่าจากการวัด (observed value) ก็จะได้ค่าซึ่งเรียกว่า Residual และนำมาคูณกับค่าการให้น้ำหนัก (weighted) และยกกำลังสองแล้วรวมกัน เพื่อจะนำมาคำนวณค่า กำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares objection function) ซึ่งใช้วิธี Regression เพื่อวัดค่าแบบจำลองนั้นว่าเข้าใกล้กันดีกับข้อมูลจากการสังเกตเพียงใด (Hill, 1998 eq.1)

เมื่อค่า Residual และค่า Sensitivities ถูกคำนวณครั้งแรกจะถูกใช้โดย PES process เพื่อหนึ่ง iteration ของวิธี Modified gauss-newton nonlinear regression เพื่อทำให้ค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนเป็นค่าล่าสุด (Update) (Hill, 1998 eq.1) ในขั้นตอนสุดท้ายของแต่ละ iteration ของการประมาณค่าพารามิเตอร์และจะเกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบ 2 จำนวน ที่เป็นเงื่อนไขของการลู่เข้า (convergence) ที่ถูกกำหนดใน input files ของ PES process จำนวนแรกคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงที่มีค่ามากที่สุด (Largest fractional change) ในค่าของพารามิเตอร์ใด ๆ จำนวนที่ 2 คือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสองน้อยที่สุดในวัตถุประสงค์ของฟังก์ชันซึ่งถูกให้น้ำหนัก (weighted Least-squares objection function) ถ้านำการเปลี่ยนแปลงเกินกว่าค่าเงื่อนไขการลู่เข้า และจำนวนสูงสุดของ iteration ของการประมาณค่าพารามิเตอร์ ยังไม่ถึง iteration ต่อมาก็จะถูกคำนวณ แต่ถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้น้อยกว่าเงื่อนไขการลู่เข้า แสดงว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ลู่เข้าสู่คำตอบ โดยเป็นไปตามเงื่อนไขข้อ 1 และค่าพารามิเตอร์นั้นก็น่าจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่

เหมาะสมเนื่องจากสามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงระหว่างค่าจากการจำลอง (simulated value) และค่าจากการสังเกต (observed value) ซึ่งถูกวัดโดยใช้วิธี weighted Least-squares objection function และจะเป็นการลู่เข้าอีกเช่นกัน ถ้าการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสองน้อยที่สุดในวัตถุประสงค์ของฟังก์ชัน ซึ่งถูกให้น้ำหนักมีค่าน้อยกว่า เงื่อนไขของจำนวนที่ 2 ถ้าการประมาณค่าพารามิเตอร์ไม่ลู่เข้า และถูกคำนวณจนค่า iteration สูงสุด ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ล่าสุด ก็จะถูกใช้คำนวณใน GWF และ SEN process เช่นเดียวกัน

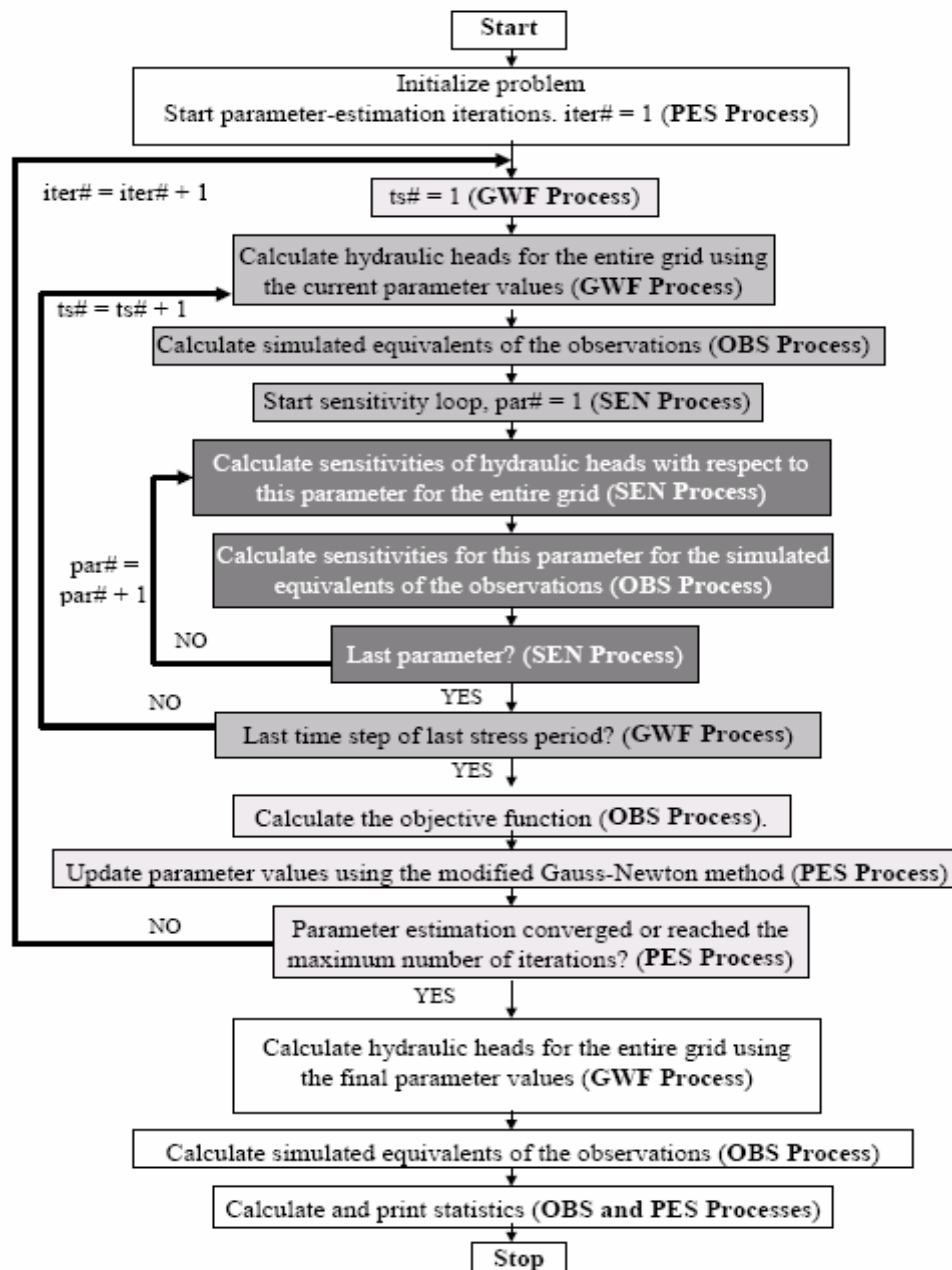
10.4.4 การกำหนดช่วงมิติระยะ (Space Discretization) ขนาดของกริด (grid) ในแนวราบ จะกำหนดในรูปแบบตำแหน่ง DELR และ DELC (ภาพที่ 7A) หลัก (Column) จะกำหนดเป็นตัวเลขเริ่มต้นจากด้านซ้าย ส่วนแถว (Row) จะกำหนดเป็นตัวเลขเริ่มต้นจากบน (plan view) $DELR_j$ เป็นความกว้างของเซลล์ในหลักที่ j และทุกเซลล์ในหลักจะมีความกว้างเท่ากัน ส่วน $DELC_i$ ก็เป็นความกว้างของเซลล์ในแถวที่ i และทุกเซลล์ในแถวจะมีความกว้างเท่ากัน

การแบ่งชั้น (Layer) กำหนดเป็นตัวเลขจากด้านบนสู่ด้านล่าง (ภาพที่ 7B) ในเวอร์ชันเดิมคือ MODFLOW-96 จะไม่กำหนดความหนาของชั้นให้น้ำโดยตรง แต่จะแฝงอยู่ในรูปของค่า Transmissivity (k_v) และค่า Vertical leakage ($K_z/\text{distance between two node}$) แต่ใน MODFLOW-2000 จะกำหนดระดับผิวบนของ Layers และกำหนดระดับล่างของแต่ละ Layers ดังภาพที่ 7B



ภาพที่ 5 Flow chart ของ Global (GLO), Ground-Water Flow (GWF), Observation (OBS), Sensitivity (SEN) และ Parameter Estimation (PES) Processes

ឯកសារ: Harbaugh *et al.* (2000)

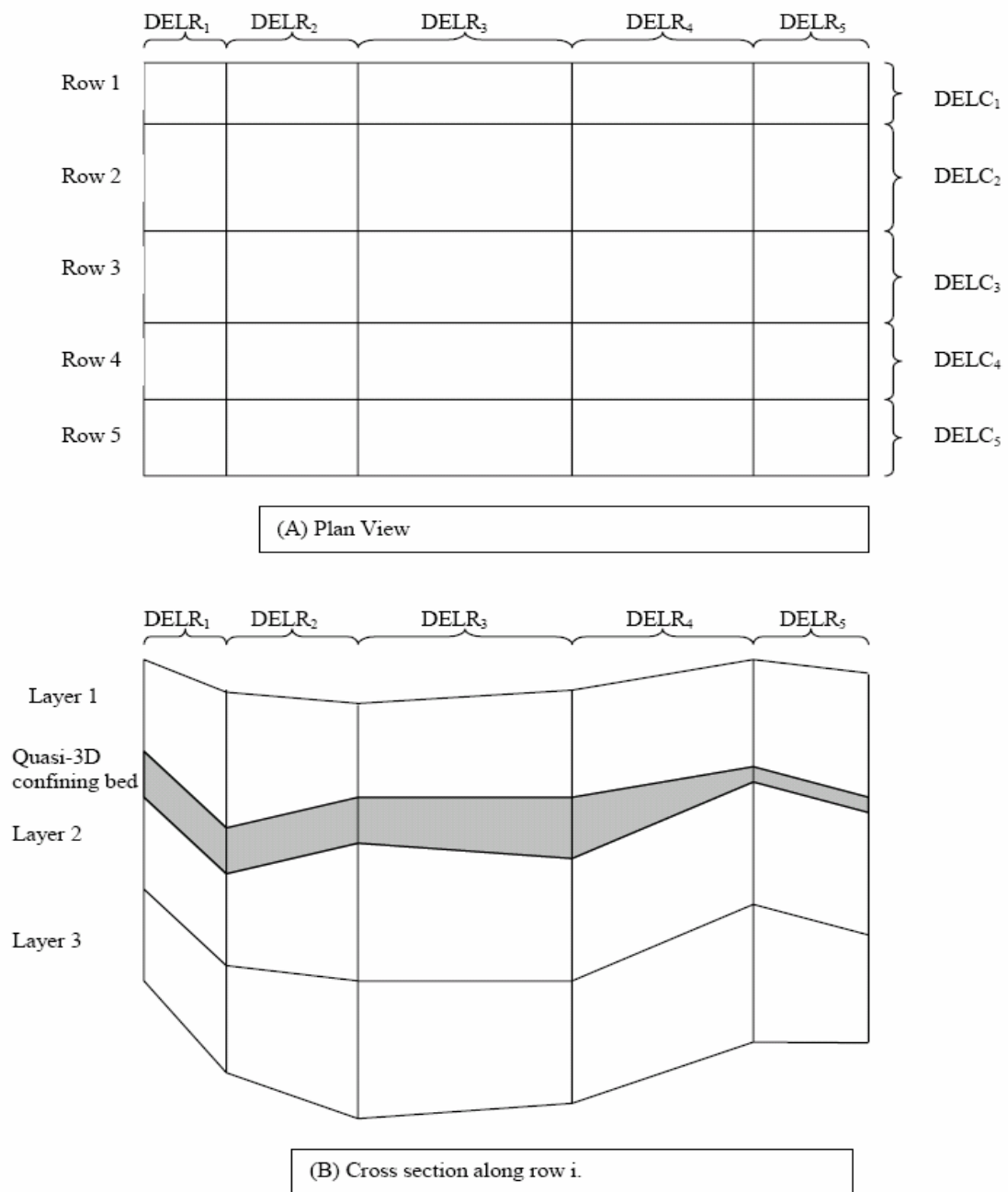


ภาพที่ 6 Flow chart แสดง Ground-Water Flow (GWF), Observation (OBS), Sensitivity (SEN) และ Parameter-Estimation (PES) Processes

ที่มา: Hill *et al.* (2000)

จากภาพที่ 6 เมื่อทุก Processes ทำงานและ LASTX ใน PES input file เท่ากับศูนย์ iter# คือ parameter-estimation iteration, ts# คือ time step จากจุดเริ่มต้นของ simulation

และ $\text{par\#}$ คือ parameter ใน MODFLOW-2000, time step จะเป็น subdivision ของ stress period ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ของ simulated stress ส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมหมายถึงมีการวนรูป



ภาพที่ 7 กริด Finite-difference (A) Plan view และ (B) Cross section view
ที่มา: Harbaugh *et al.*, (2000)

10.4.5 การกำหนดช่วงเวลา (Time Discretization) องค์ประกอบเบื้องต้นของการกำหนดเวลาในโปรแกรม MODFLOW คือ ช่วงเวลา (Time step) และหลาย ๆ ช่วงเวลารวมกันเป็น Stress periods ข้อมูล Input ที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาสามารถเปลี่ยนได้ทุก ๆ Stress periods

สำหรับแต่ละ Stress period ผู้ใช้โปรแกรมต้องกำหนดระยะเวลาโดยรวม (PERLEN) จำนวนช่วงเวลา (NSTP) และตัวคูณของระยะเวลาของช่วงเวลา (Time step) ที่ต่อเนื่อง (TSMULT) ซึ่งความยาวของช่วงเวลาแรก (Δt_1) สามารถหาได้จากสมการที่ (8) และความยาวช่วงเวลาต่อมา เพิ่มขึ้นเป็นแบบอนุกรมเรขาคณิต

$$\Delta t_1 = \text{PERLEN} \left[\frac{\text{TSMULT} - 1}{\text{TSMULT}^{\text{NSTP}} - 1} \right] \quad (8)$$

โปรแกรม MODFLOW-2000 ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ทั้งสภาพ Steady state Unsteady state สำหรับช่วง Steady state นั้น เทอม Storage ในสมการการไหลของน้ำใต้ดินถูกตั้งค่าให้เป็นศูนย์และระยะเวลา (PERLEN) ของ Stress period ไม่มีผลต่อระดับน้ำที่คำนวณได้ และในช่วง Steady state ให้กำหนดเพียงหนึ่งช่วงเวลา

ความแตกต่างของ MODFLOW เวอร์ชันเดิมกับ MODFLOW-2000 คือเวอร์ชันเดิมไม่ยอมให้มีการกำหนดสถานะ Steady state และ Unsteady state พร้อมกันในการจำลองแต่ละครั้ง ส่วน MODFLOW-2000 สามารถกำหนดทั้งสองสถานะได้พร้อมกันในการจำลองเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปในช่วง Stress period แรก จะกำหนดให้เป็น Steady state เพื่อสร้างระดับน้ำเริ่มต้น (initial condition) เพื่อใช้ในการคำนวณ Stress period ต่อมาซึ่งเป็นสถานะ Unsteady state

10.4.6 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในการศึกษาครั้งนี้ คือ MODFLOW (MODular finite-difference groundwater FLOW model) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินในระบบ 3 มิติ เนื่องจากประยุกต์เข้ากับปัญหาได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน เป็นการคำนวณแบบ Finite Difference สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากสมการพื้นฐานที่น่าทึ่งของดาร์ซีมาวิเคราะห์ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) (Anderson and Woessener, 1992) ซึ่งแสดงในสมการที่ (9) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

โดยที่ค่า

K_x, K_y, K_z	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) ในแนวแกน x, y, z [LT^{-1}]
h	คือ	ค่า hydraulic head [L]
W	คือ	ปริมาตรการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน (Volumetric flux) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของค่าที่เป็น sources ถ้าเป็นการเพิ่มเติมน้ำเข้าสู่ระบบ (ค่าเป็นบวก) หรือ sinks ถ้าเป็นการสูญเสียน้ำออกจากระบบ (ค่าเป็นลบ) [T^{-1}]
S_s	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักจำเพาะ (Specific Storage) [L^{-1}]
t	คือ	เวลา [T]
$\frac{\partial h}{\partial t}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงของ head ต่อเวลา

สำหรับ MT3DMS คือโมเดลการเคลื่อนที่สำหรับสารปนเปื้อนในระบบการไหลของน้ำใต้ดินในระบบสามมิติ (ความกว้าง ความยาว และความลึก) ขึ้นอยู่กับการจำลองการไหลของน้ำเป็นหลัก ร่วมกับลักษณะการเคลื่อนที่ของสาร โดยอาศัยกระบวนการ advection, dispersion และปฏิกิริยาเคมีของสารนั้น ๆ โดยจะใช้หาค่าของสมการการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนเมื่อทราบค่าของการไหลของน้ำใต้ดินแบบไม่คงที่ (transient groundwater flow systems) จากโมเดล MODFLOW ก่อน สมการ advection-dispersion โดยทั่วไปจะอธิบายถึงความเป็นไปได้ในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน k ดังนั้น ความเข้มข้นของสารที่เคลื่อนที่ไปในเวลาต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จาก partial differential equation (Zheng, 1996) ดังสมการที่ (10)

$$\frac{\partial (nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (nv_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (10)$$

Dispersion-term Advection-term Sink/Source Reaction-term
term

เมื่อ :

C^k	คือ	ความเข้มข้นของมวลสาร k ที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]
n	คือ	ความพรุนทั้งหมดของตัวกลางในชั้นน้ำใต้ดิน (<1.0) [-]
t	คือ	เวลา [T]
x_i	คือ	ระยะทางที่วัดตามแนวแกนในระบบพิกัด Cartesian [L]
D_{ij}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]
v_i	คือ	ความซึมหรือความเร็วของน้ำที่ผ่านช่องว่างแบบเชิงเส้น ซึ่งมี ความสัมพันธ์กับอัตราการไหลจำเพาะ (Specific discharge) หรือ Darcy flux คือ ($v_i = q_i / n$) [LT^{-1}]
q_i	คือ	อัตราการไหลของน้ำผ่านพื้นที่หน้าตัดของระบบ [L^3T^{-1}]
q_s	คือ	Volumetric flow rate ต่อ หน่วยปริมาตรของชั้นน้ำ ถ้าเป็น sources มีค่าเป็นบวก แต่ถ้าเป็น Sink จะมีค่าเป็นลบ [T^{-1}]
C_s^k	คือ	ความเข้มข้นของมวลสาร ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำ, (sources หรือ sink) ของ สาร k [ML^{-3}]
$\sum R_n$	คือ	เป็นมวลที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี [L^3T^{-1}]

ทั้งหมดของกระบวนการนี้ใช้ Block-centered finite-difference โดยอาจจะใช้ explicit หรือ implicit ใน time weighting ก็ได้

10.5 ข้อมูลที่สำคัญในการสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารมลพิษในแหล่งน้ำใต้ดินมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อน เนื่องจากการสำรวจหรือติดตามไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มวลสารที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกันในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกมาก

ก่อนการดำเนินการฟื้นฟูสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน จำเป็นต้องมีการการสำรวจหรือตอบคำถามพื้นฐานเกี่ยวกับข้อมูลที่จำเป็น ดังนี้

10.5.1 สภาพของชั้นดินและหิน ในบริเวณที่เกิดการปนเปื้อนหรือสถานที่กำจัด มลพิษเป็นอย่างไร

10.5.2 สภาพของแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินในบริเวณดังกล่าวเป็นอย่างไร

ก. ทิศทางและขอบเขตการไหลของแหล่งน้ำใต้ดิน

ข. ความลึกการไหลของแหล่งน้ำใต้ดิน

ค. การเพิ่มเติมและการสูญเสียน้ำต่อระบบน้ำใต้ดิน

ง. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน เช่นอัตราการซึมผ่านของน้ำผิวดินและการสูญเสียของน้ำใต้ดินโดยการดูดซึมของพืชและการคายระเหย

10.5.3 การใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น แหล่งมูลฝอย ประเภทของอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ขนาดพื้นที่ ระยะเวลาของการปนเปื้อน และชนิดของสารที่ปนเปื้อน

10.5.4 ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดิน น้ำผิวดิน และในน้ำใต้ดิน ของบริเวณที่ปนเปื้อนและบริเวณใกล้เคียง ขนาดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน (กว้าง ยาว ลึก)

10.5.5 โอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนต่อไปในบริเวณใด ความเข้มข้นหรืออันตรายที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สุขภาพอนามัยของประชาชน แหล่งน้ำ แหล่งอาหาร ดิน พืช และอากาศ เป็นต้น

11. รายงานที่เกี่ยวข้อง

พัชรพร (2548) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อระดับน้ำบาดาลและผลกระทบทางด้านคุณภาพน้ำบาดาล ที่เกิดจากการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุล ทั้งทางด้านการลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลและการเพิ่มระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในกรณีศึกษาได้จำลองสถานการณ์ของน้ำบาดาลในกรณีต่างๆ คือ กรณีใช้น้ำบาดาลสูงสุดเป็นร้อยละเก้าสิบเท่ากับที่ใช้น้ำปี 2546 กรณีลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลในทุกพื้นที่เหลือ 80 %, 50 %, 30 % ของอัตราการใช้น้ำปี 2546 กรณีลดการใช้น้ำบาดาลตามการขยายตัวของการประกาศกรณีเติมน้ำเพื่อป้องกันการทรุดตัวของพื้นดิน และกรณีเติมน้ำเพื่อป้องกันการรุกรานของน้ำเค็ม โดยคำนวณการไหลของน้ำและระดับน้ำในแต่ละชั้นน้ำ และลักษณะการแพร่กระจายของคลอไรด์ในกรณีน้ำที่เดิมมีค่าคลอไรด์เท่ากับ 0, 500 และ 1,000 มก./ลิตร และนำมาประเมินผลกระทบต่อการกินระดับของน้ำบาดาลและคุณภาพของน้ำบาดาลเมื่อมีการลดการสูบน้ำและมีการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาล

จากผลการคำนวณระดับน้ำบาดาลด้วยแบบจำลอง Visual MODFLOW ในกรณีลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลพบว่าทุกกรณีระดับน้ำมีการคืนตัวทั้งหมด กรณีการลดการใช้น้ำบาดาลเหลือ 30 %, 50 % และ 80 % ของการใช้น้ำใน ปี 2546 โดยระดับน้ำต่ำสุดเพิ่มจาก -62 เมตร (ระดับน้ำทะเลปาน

กลาง, รทก.) เป็น -22, -37 และ -59 เมตร รทก. ตามลำดับ กรณีลดการใช้น้ำตามการขยายพื้นที่บริการของประปา มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจาก ระดับน้ำต่ำที่สุดที่ -62 เมตร รทก. เป็น -27 เมตร รทก. ในระยะเวลา 20 ปี กรณีเติมน้ำลงชั้นน้ำใต้ดินเพื่อลดการทรุดตัวของพื้น ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงและ ชั้นน้ำนครหลวง ยกตัวขึ้นมาที่ระดับ -23 และ -42 เมตร รทก. ตามลำดับ กรณีเติมน้ำเพื่อลดการรุกรานของน้ำเค็ม ด้วยอัตราการเติมน้ำ 135,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและ 270,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการเติมน้ำที่มากกว่าจะทำให้ค่าความเข้มข้นคลอไรด์มีค่าลดลงมากกว่า โดยระดับค่าคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ที่ใกล้จุดเติมน้ำทั้งด้านติดชายฝั่งและด้านในเขตพื้นดินพบว่าบ่อสังเกตการณ์ที่มีค่าคลอไรด์มากอยู่แล้ว ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ในอีก 20 ปีข้างหน้าจะลดลงเนื่องจากถูกเจือจางโดยน้ำที่เติมลงไป ในทางกลับกันค่าคลอไรด์บริเวณใกล้บ่อสังเกตการณ์ที่มีค่าน้อยอยู่แล้ว จะมีการเพิ่มค่าความเข้มข้นคลอไรด์ เนื่องมาจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำที่เติมปนเปื้อนไปกับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ แต่อย่างไรก็ตามในบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ไกลจากบ่อเติมน้ำออกไปค่าคลอไรด์แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเลย อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่ช้าของน้ำบาดาล และจากการที่ชั้นน้ำบาดาลมีขนาดใหญ่มากจึงมีปริมาณเก็บกักสูงเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่เติม ดังนั้นคลอไรด์ในน้ำที่เติมอาจจะถูกเจือจางไป

กรณีศึกษาทุกกรณีล้วนมีผลต่อการยกตัวของระดับน้ำบาดาลอย่างเด่นชัด แต่ในกรณีของผลกระทบต่อคุณภาพน้ำความเด่นชัดมีไม่มากนักในภาพรวม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลมีอัตราที่ช้ามากจึงทำให้ในระยะเวลา 20 ปี ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน

พิศาล (2545) ได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของระดับน้ำใต้ดินในโครงการน้ำใต้ดินสุโขทัย โดยทำการทดสอบการทำงานของโปรแกรม Visual MODFLOW ซึ่งแก้ปัญหาโดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical technique) เปรียบเทียบกับผลจากการแก้ปัญหาโดยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Analytical technique) กับตัวอย่างปัญหาที่สมมุติขึ้น โดยกำหนดพื้นที่ตัวอย่างมีลักษณะของชั้นน้ำแบบ Confined aquifer ชั้นน้ำถูกสมมุติให้มีลักษณะขอบเขตกว้างใหญ่มาก ยกเว้นขอบเขตที่เป็นแม่น้ำทางด้านขวาของพื้นที่ กำหนดให้มีการสูบน้ำด้วยอัตราการที่ บ่อละ 5,000 ลบ.ม./วัน เป็นเวลา 15 วัน จำนวน 2 บ่อ โดยบ่อแรกอยู่ห่างจากแม่น้ำ 5,000 เมตร และบ่อที่ 2 อยู่ห่าง 10,000 เมตร กำหนดให้ชั้นน้ำหนา 50 เมตร ค่า Hydraulic conductivity (K) 15 เมตร/วัน ค่า Specific storage 1×10^{-5} เมตร⁻¹

ผลจากการคำนวณทั้งสองส่วน นำมาเปรียบเทียบในรูปตัดขวางของ Column กับ Head จะพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก มีการสอบเทียบ

แบบจำลอง (Calibration) โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกคือปี 2530-2537 และช่วงที่สองคือในปี 2538-2542 ข้อมูลช่วงแรกนำมาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง โดยจะนำค่าระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากโปรแกรม MODFLOW มาทำการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์ ในรูปกราฟระดับน้ำกับเวลา (Hydrograph) แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าระดับน้ำจากแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับค่าระดับน้ำใต้ดินจริงมากที่สุด ส่วนการตรวจสอบแบบจำลอง (Verification) จะใช้ข้อมูลชุดที่สองและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ผ่านการสอบเทียบดีแล้ว มาทำการเปรียบเทียบผลค่าระดับน้ำใต้ดินจากการจำลองและค่าระดับน้ำใต้ดินจากการบันทึกจากบ่อสังเกตการณ์ เพื่อดูว่าแบบจำลองที่ได้นำเชื่อถือมากน้อยเพียงใด

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าบริเวณที่มีอัตราการสูบน้ำมาก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีค่าความสามารถในการให้น้ำของชั้นน้ำ (Storage coefficient) สูง และเนื่องจากมีค่า Hydraulic gradient สูง ทำให้ระดับน้ำลดต่ำกว่าบริเวณอื่น เป็นผลให้ค่า Recharge บริเวณนี้ค่อนข้างสูงกว่าส่วนอื่น ๆ ดังนั้นกราฟระดับน้ำจึงมีการแกว่งสูงกว่าพื้นที่ที่มีการสูบน้ำน้อย สำหรับเขตที่ติดต่อกับแม่น้ำ ค่าระดับน้ำจากแบบจำลองค่อนข้างคงที่กว่าค่าระดับน้ำจากการบันทึก เพราะค่าจากแบบจำลองได้กำหนดค่าระดับน้ำในแม่น้ำแบบคงที่ (Constant head) แต่ค่าจากการบันทึกได้รับอิทธิพลจากระดับน้ำในแม่น้ำ ซึ่งต้องน้ำมีการเชื่อมโยงกับชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง MODFLOW กับการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการสูบทดสอบ ซึ่งทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของชั้นให้น้ำ (K , S , S_s) จากการสูบทดสอบในสนาม แล้ววัดค่าระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ใกล้เคียงที่อยู่ในรัศมีการสูบทดสอบที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แล้วใช้วิธีของ Cooper and Jacob ในการคำนวณค่า K , S , S_s ของชั้นน้ำใต้ดินที่จุดนั้น ๆ พบว่าค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง MODFLOW กับค่าพารามิเตอร์จากการสูบทดสอบส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีบางค่าที่แตกต่างกัน เนื่องจากการคำนวณจากสูตรจะพิจารณาเป็นจุดย่อย แต่ค่าจากการสอบเทียบจากแบบจำลองพิจารณาเป็นภาพรวมของระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์เป็นบริเวณกว้าง ต่อจากนั้นจะคาดการณ์ในอนาคต โดยใช้ข้อมูล Recharge จากค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ส่วนอัตราการสูบน้ำต่าง ๆ ตั้งแต่ 35 ถึง 55 ล้าน ลูกบาศก์เมตรต่อปี และทำการสูบน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ปี ด้วยอัตราคงที่แล้วหยุดสูบน้ำเป็นเวลา 5 ปี เพื่อดูผลที่เกิดขึ้นและหาค่าปริมาณการสูบน้ำที่ปลอดภัยต่อไป

สรุป ปริมาณการสูบน้ำที่ปลอดภัย (Safe yield) จะอยู่ในช่วง 35 – 40 ล้านลูกบาศก์เมตร ต่อปี ส่วนการคืนตัวของระดับน้ำหลังจากหยุดสูบน้ำเป็นเวลา 5 ปี พบว่าจะมีอัตราการคืนตัวสูงในช่วงปีแรก และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อยในปีต่อมา โดยระดับน้ำยิ่งลดต่ำลงมากเท่าใดยิ่งต้องอาศัยระยะเวลาในการคืนตัวสู่ระดับเดิมมากขึ้นเท่านั้น

ธนสาร (2545) ใช้โปรแกรม MODFLOW ศึกษา การจัดการน้ำใต้ดินและการประเมินประสิทธิผลโครงการพัฒนาน้ำใต้ดินสุโขทัย โดยจำลองสถานการณ์ปัจจุบันเพื่อที่จะคาดการณ์ระดับน้ำใต้ดินที่ได้มาจากการจำลองปริมาณสูบน้ำใต้ดินในรูปแบบต่าง ๆ มีการจำลองปริมาณสูบน้ำรายปีและการจำลองปริมาณ Recharge จากฝน โดยใช้ระยะเวลาสำหรับการจำลองการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินเป็นเวลา 6 ปี เริ่มตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2548 การจำลองแสดง อยู่ในรูปกราฟระดับน้ำที่บ่อสังเกตการณ์ต่าง ๆ ในบริเวณขอบเขตการจำลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โซน คือโซนที่ 1 อยู่ในเขตที่มีการสูบน้ำ โซนที่ 2 อยู่รอบนอกเขตที่มีการสูบน้ำ โซนที่ 3 อยู่ในเขตที่ติดต่อกับแม่น้ำ

การจำลองกำหนดให้รูปแบบที่ 1 ถึงรูปแบบที่ 4 ใช้การจำลองปริมาณสูบน้ำปกติ แต่มีความแปรปรวน 5 % ของอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย (40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี) โดยที่ปริมาณการสูบน้ำในปีที่ 1 ของการจำลองจะมีปริมาณการสูบน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย 5 % สำหรับปีที่ 2 จะใช้ปริมาณการสูบน้ำเท่ากับอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย ปีที่ 3 ของการจำลองปริมาณการสูบน้ำจะน้อยกว่าค่าอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย 5 % สำหรับปีที่ 4 ปีที่ 5 และปีที่ 6 จะใช้ปริมาณการสูบน้ำเช่นเดียวกับปริมาณการสูบน้ำปีที่ 1 ปีที่ 2 และปีที่ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ในแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะการจำลองปริมาณ Recharge ที่แตกต่างกัน เช่น รูปแบบที่ 1 จะใช้การจำลองปริมาณ Recharge เป็นลักษณะฝนปานกลางตลอดช่วงการจำลอง สำหรับการจำลองปริมาณการสูบน้ำร่วมกับการจำลองปริมาณ Recharge รูปแบบที่ 1 ถึงรูปแบบที่ 4 พบว่า บ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในบริเวณที่มีการสูบน้ำและบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่บริเวณรอบนอกโซนที่มีการสูบน้ำ กราฟระดับน้ำไม่มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทั้งนี้บ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในบริเวณที่มีการสูบน้ำจะมีการแกว่งของระดับน้ำค่อนข้างสูง เนื่องจากได้รับอิทธิพลของการสูบน้ำ

สำหรับผลการจำลองรูปแบบที่ 5 ถึงรูปแบบที่ 8 ใช้การจำลองปริมาณสูบน้ำปกติ เช่นเดียวกัน แต่มีความแปรปรวน 10 % ของอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย และใช้การจำลองปริมาณ Recharge มีลักษณะเดียวกับกรณีแรก ซึ่งผลการจำลองพบว่ากราฟระดับน้ำในบริเวณที่มี

การสูบน้ำและนอกโซนที่มีการสูบน้ำ ระดับน้ำยังคงไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นเดียวกัน แต่จะมีการแกว่งของระดับน้ำในบริเวณที่มีการสูบน้ำมากกว่ากรณีแรก เนื่องจากมีอัตราการสูบน้ำที่มีความแปรปรวนมากกว่า สำหรับผลการจำลองทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในบริเวณที่ติดต่อกับแม่น้ำ กราฟระดับน้ำจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากผลการจำลองปริมาณการสูบน้ำร่วมกับการจำลองปริมาณ Recharge ที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน สรุปได้ว่า อัตราการสูบน้ำปกติแต่มีความแปรปรวน 5 % และ 10 % สามารถปฏิบัติงานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานสูบน้ำในอนาคต ซึ่งกราฟระดับน้ำในบริเวณที่มีการสูบน้ำจะมีการแกว่งของระดับน้ำมากกว่าบริเวณนอกโซนที่มีการสูบน้ำ

การประเมินผลกระทบต่อระดับน้ำใต้ดิน กรณีอัตราการสูบน้ำรายปีไม่คงที่ โดยใช้โปรแกรม MODFLOW จำลองสภาพปัจจุบันของโครงการฯ และรูปแบบปริมาณสูบน้ำรายปีรูปแบบต่าง ๆ เพื่อที่จะคาดการณ์ระดับน้ำใต้ดินในอนาคต และเป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับการสูบน้ำใต้ดิน ซึ่งจะไม่เกิดผลกระทบ เมื่อพิจารณาปริมาณสูบน้ำที่ปลอดภัย 35 ถึง 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยนำมาจัดสร้างเป็นรูปแบบจำลองปริมาณการสูบน้ำรายปีร่วมกับการจำลองปริมาณ Recharge ลักษณะต่าง ๆ กัน ทั้งนี้จากผลการจำลองรูปแบบปริมาณการสูบน้ำรายปี สรุปได้ว่า อัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัยแต่มีความแปรปรวน 5 % ถึง 10 % สามารถปฏิบัติงานได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ฝนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับน้ำใต้ดิน เช่นเดียวกับอัตราการสูบน้ำ

นอกจากนั้นยังสรุปอีกได้ว่า น้ำใต้ดินมีความยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้น้ำใต้ดินตามปริมาณการสูบน้ำคงที่ทุกปี แต่สามารถปรับอัตราการสูบให้มีความยืดหยุ่น โดยค่าอัตราการสูบรายปีต้องไม่มากกว่าค่าอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย (Safe yield)

อุดร (2545) ได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์การปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน โดยใช้โปรแกรม HELP Model, Visual MODFLOW และ MT3D96 Model มีการสำรวจข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การสำรวจทางอุทกธรณีวิทยา การสำรวจทดสอบชั้นดินจำนวน 3 หลุม การติดตั้งบ่อตรวจสอบคุณภาพน้ำจำนวน 3 บ่อ ซึ่งมีความลึกจากระดับพื้นดินถึงก้นบ่อ 13.3 เมตร รวมทั้งมีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วย

ผลการคำนวณปริมาณน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ HELP Model สำหรับสถานที่กำจัดมูลฝอยที่ได้ศึกษาสรุปไว้ในตารางที่ 14 ดังนี้

ตารางที่ 14 สรุปผลการคำนวณการเกิดน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ HELP Model (version 3.07)

รายละเอียด	หน่วย	จำนวน
พื้นที่กองมูลฝอย	ไร่	46
ปริมาณน้ำฝนที่ส่งผลกระทบ	ลบ.ม./ปี	92,954
ปริมาณน้ำที่ระเหยและคายออก	ลบ.ม./ปี	68,088
น้ำชะมูลฝอยที่ส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดิน	ลบ.ม./ปี	7,020
น้ำชะมูลฝอยในกองมูลฝอยหรือส่งผลกระทบต่อน้ำผิวดิน	ลบ.ม./ปี	17,846
ความสูงของน้ำชะมูลฝอยในกองมูลฝอย	ม.	8.32
ความลึกของชั้นมูลฝอยใต้ดิน	ม.	8.0
ความนำหลศาสตร์ของดินใต้ชั้นมูลฝอย	ชม./วินาที	2.0×10^{-7}
ความนำหลศาสตร์ของดินใต้ชั้นมูลฝอย	ชม./วินาที	5.0×10^{-7}
และมีค่าความชื้นน้ำสูงกว่า		
ความลึกใต้ชั้นมูลฝอยถึงชั้นดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูงกว่า	ม.	4.0

ที่มา: อุดร (2545)

ปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่จะไหลเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินจะสัมพันธ์กับค่าความนำหลศาสตร์ของดินใต้ชั้นมูลฝอย และพบว่าถ้าชั้นดินใต้ชั้นมูลฝอยมีความนำหลศาสตร์ต่ำ ปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่อาจไหลลงสู่แหล่งน้ำผิวดินก็จะมากขึ้น ผลจาก HELP Model แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่ไหลลงแหล่งน้ำผิวดินโดยรอบพื้นที่ที่มีปริมาณกว่า 2 เท่าของปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่ไหลเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

ผลการเจาะสำรวจดินพบว่ามีความหนาแน่นดินเหนียวหรือทรายปน ที่ระดับความลึก 15 เมตร จากพื้นดิน และที่ระดับความลึกประมาณ 7 เมตร พบว่ามีชั้นดินที่มีค่าความนำหลศาสตร์ต่ำ ซึ่งสามารถช่วยลดอัตราการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นดินที่อยู่ถัดไปได้ ส่วนผลการคำนวณพบว่าน้ำใต้ดินมีอัตราการไหลค่อนข้างต่ำมาก เฉลี่ย 2.0×10^{-7} ชม./วินาที และมีทิศทางการไหลจากด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ

จากการเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดินในบ่อตรวจสอบของสถานที่กำจัดมูลฝอยมาวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณสารละลายน้ำ (Dissolved Solids) สูงมาก (มากกว่า 10,000 mg/L) และค่า BOD อยู่ระหว่าง 54- 350 mg /L โลหะหนักที่สำคัญได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และเหล็ก มีปริมาณค่อนข้างมาก (0.29, 0.7 และ 19 mg /L ตามลำดับ) ส่วนโลหะหนักอันตราย เช่น ปรอท, โครเมียม และ แคดเมียม ยังคงมีค่าในระดับต่ำ (< 0.0005 , < 0.01 และ < 0.0005 mg /L) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอย ได้ใช้เป็นข้อมูลแหล่งกำเนิดสารมลพิษที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลอง MT3D96 Model ในขณะเดียวกันผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อตรวจสอบน้ำจะใช้ประโยชน์ ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง เมื่อทราบจำนวนปีที่ได้ดำเนินการมาแล้วของสถานที่กำจัดมูลฝอย ซึ่งในการเปรียบเทียบนี้ได้เลือกสารปนเปื้อนที่ได้ตรวจพบในตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดินของบ่อตรวจสอบ ได้แก่ โลหะหนัก นิกเกิล เพื่อใช้ในการคำนวณการแพร่กระจายสารมลพิษในชั้นน้ำใต้ดินที่ระยะทางและเวลาต่าง ๆ โดยผลการคำนวณจะแสดงในรูปของเส้นชั้นความสูง (contour) แสดงค่าความเข้มข้นแต่ละค่าในเวลาที่กำหนด เช่น 50 ปี นับจากที่เริ่มมีการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

ผลการคำนวณการแพร่กระจายของนิกเกิลในชั้นน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลอง MT3D96 Model พบค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำใต้ดิน) ในสภาพปัจจุบันได้แพร่กระจายออกจากพื้นที่ในแนวราบเป็นระยะทางประมาณ 40 เมตร และลึกจากผิวดินประมาณ 31 เมตร โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ก่อนไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ส่วนผลการคาดการณ์การแพร่กระจายของนิกเกิลในอนาคต 50 ปีข้างหน้า พบว่าสารปนเปื้อนนิกเกิลจะเคลื่อนที่ห่างออกไปอีกเป็นระยะทางในแนวราบ 59 เมตร และเคลื่อนที่ในแนวตั้งลึกลงไปอีกประมาณ 53 เมตร จากผิวดิน

มณีรัตน์ (2549) ศึกษาการประเมินอัตราการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหย จากพื้นที่กำจัดมูลฝอยในประเทศไทย มีการศึกษาการปนเปื้อนของดินอันเนื่องมาจากน้ำชะมูลฝอย โดยวิเคราะห์ปริมาณ อินทรีย์วัตถุในดิน ปริมาณคลอไรด์ นิกเกิล เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และโครเมียมทั้งหมด จากดินใต้กองมูลฝอยเทียบกับดินนอกกองมูลฝอยที่ระดับความลึกเดียวกัน คือ 6-8 เมตร และศึกษาอัตราการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหย ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีน และไครลอลโรเอทิลีน จากกองมูลฝอยและจากบ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอย

ตลอดจนหาประเภทของมูลฝอยที่เป็นแหล่งการแพร่กระจายที่สภาวะอุณหภูมิ 40 และ 80 °C โดยมีพื้นที่ศึกษาอยู่ที่กองมูลฝอยเปิด อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี

ผลการศึกษาในส่วนแรกพบว่าดินใต้กองมูลฝอย มีการปนเปื้อนจากน้ำชะมูลฝอยในระดับน้อยถึงปานกลาง ลักษณะดินบริเวณใต้กองมูลฝอยและรอบกองมูลฝอยเป็นดินเหนียว ร้อยละ 43-47 โดยมีทรายและดินซิลต์เป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงร้อยละ 18-30 และร้อยละ 23-39 ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่น อยู่ในช่วง 1.62-1.96 ก./ซม.³ ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 22.86-47.30 โดยดินมีสภาพเป็นกลางจนถึงด่างเล็กน้อย และสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,224-1,972 ไมโครซีเมนต์ ตามลำดับ สำหรับการปนเปื้อนโลหะหนักมีผลการวิเคราะห์ดังนี้ สังกะสี (Zn) มีค่าระหว่าง 54.7 ถึง 71.0 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไป พบว่า อยู่ในระดับปกติไม่เกินค่าขั้นสูง (Upper limit) จนถึงระดับปนเปื้อน ซึ่งกำหนดค่าปกติอยู่ในช่วง 10.5-183 mg/kg ทองแดง (Cu) มีค่าระหว่าง 6.6 ถึง 28.7 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไป พบว่า อยู่ในระดับปกติไม่เกินค่าขั้นสูง (Upper limit) จนถึงระดับปนเปื้อน โดยกำหนดค่าปกติอยู่ในช่วง 2.0-101 mg/kg เหล็ก (Fe) มีปริมาณเหล็กร้อยละ 0.165 ถึง 0.302 เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปบริเวณแถบอบอุ่น พบว่า อยู่ในระดับต่ำกว่าค่าขั้นต่ำ ซึ่งกำหนดค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-5.0 นิกเกิล (Ni) มีค่าระหว่าง 20.0 ถึง 42.6 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปในประเทศอังกฤษ พบว่า อยู่ในระดับปนเปื้อนน้อย โดยกำหนดค่าอยู่ในช่วง 20-50 mg/kg ตะกั่ว (Pb) มีค่าระหว่าง 26.5 ถึง 47.8 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปในประเทศอังกฤษ พบว่าอยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน โดยกำหนดค่าอยู่ในช่วง 0-500 mg/kg แคดเมียม (Cd) มีค่าระหว่าง 4.0 ถึง 4.6 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปของประเทศอังกฤษ พบว่า อยู่ในระดับปนเปื้อนปานกลาง โดยกำหนดค่าอยู่ในช่วง 3-10 mg/kg แมงกานีส (Mn) มีค่าระหว่าง 84.6 ถึง 985.5 mg/kg เมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปของประเทศอังกฤษ พบว่า อยู่ในระดับปนเปื้อนน้อย โดยกำหนดค่าอยู่ในช่วง 500-1,000 mg/kg โครเมียมทั้งหมด (Cr) มีค่าระหว่าง 32.7 ถึง 78.2 mg/kg โดยเมื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปของประเทศอังกฤษ พบว่า อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน โดยกำหนดค่าอยู่ในช่วง 0-100 mg/kg จากผลการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดต่าง ๆ ดังกล่าว พบว่าส่วนใหญ่จะเหมือนกันคือจะมีความเข้มข้นสูงสุดที่ความลึก 6-8 เมตร และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำตัวอย่างดินที่

ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณปกติที่พบในดินทั่วไปจะอยู่ในระดับปกติไม่เกินค่าชั้นสูง (Upper limit) จนถึงระดับปนเปื้อน

ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยภายนอกกองมูลฝอย พบว่า ในน้ำชะมูลฝอยจะมีปริมาณของ Fe ในปริมาณที่สูงกว่าโลหะอื่น ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-26.02 mg/L รองลงมา ได้แก่ Cu ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.002-5.334 mg/L Ni, Mn และ Cd โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.04-1.606 mg/L, 0.079-0.896 mg/L และ 0.013-0.036 mg/L ตามลำดับ และ Pb ไม่พบในน้ำชะมูลฝอยทุกจุด

สำหรับผลการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยใต้กองมูลฝอยเปิด พบว่า มีปริมาณเหล็กสูงที่สุด คือ มีค่าอยู่ในช่วง 3.316-12.408 mg/L รองลงมา คือ Mn มีค่าระหว่าง 2.526 - 10.958 mg/L, Zn มีค่า 0.676-0.896 mg/L, Ni มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.187-0.4 mg/L และ Cu ซึ่งพบที่ตำแหน่ง BH-3 เพียงจุดเดียว มีความเข้มข้น 0.052 mg/L

ผลการศึกษาส่วนที่สอง พบว่าบนกองมูลฝอยมีอัตราการแพร่กระจายของเบนซีนสูงสุดในบรรยากาศ และที่ความลึก 1-4 เมตร เท่ากับ 0.3-74 กรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ส่วนอัตราการแพร่กระจายจากบ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอยเท่ากับ 27.5 กรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งพบว่า ปริมาณการแพร่กระจายของไตรคลอโรเอทิลีน เบนซีน และ โทลูอิน ส่วนใหญ่มาจากพลาสติกสด มีความเข้มข้น 19.955, 1.89 และ 8.060 mg/kg ตามลำดับ สำหรับเอทิลเบนซีน ส่วนใหญ่แพร่กระจายมาจาก พลาสติกเก่าฝัองอายุ 2 ปี มีความเข้มข้น 1.92 mg/kg สำหรับไซลีนแพร่กระจายมาจากพลาสติกเก่าฝัองอายุ 7 ปี มีความเข้มข้น 2.409 mg/kg ซึ่งมีปริมาณการแพร่กระจายสูงที่อุณหภูมิ 80 °C โดยมีกลไกการแพร่กระจายมาจาก 2 ส่วน คือ การปนเปื้อนจากมูลฝอยอันตรายที่ระเหยได้ และการย่อยสลายทางชีวภาพของมูลฝอยภายในกองมูลฝอยเปิด

Foose *et al.* (2002) ได้ใช้ MODFLOW (a three-dimensional finite-difference groundwater flow model) และ MT3D (a three-dimensional block-centered finite-difference computer model for solving the three-dimension advection-dispersion equation) สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านวัสดุรองพื้นแบบผสมผสาน (composite liners) และเพื่อประเมินวัสดุรองพื้นแต่ละชนิดโดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่ (pathway) ของสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำได้สองรูปแบบได้แก่ (1) การพาและการแพร่ของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ละลายผ่านรูรั่วในวัสดุรองพื้น (Defects in the geomembrane) หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินลงสู่ด้านล่าง (2) การแพร่

ของสารอินทรีย์ละลายผ่านชั้นวัสดุรองพื้นที่ไม่มีรูรั่ว (Intact geomembrane) หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินรองพื้นลงสู่ด้านล่างต่อไป

โมเดลทางคณิตศาสตร์ถูกใช้เพราะการไหลและการเคลื่อนที่ผ่าน composite liners เป็นแบบสามมิติ และ semi-infinite bottom boundary condition เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับวิเคราะห์สมการของการพาและการแพร่ โดย MT3D เป็นโปรแกรม finite-difference ที่ใช้จำลองการพา, การแพร่ และปฏิกิริยาเคมีของตัวถูกละลายหนึ่งชนิดในดิน ถูกใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านรูรั่วใน composite liners ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้จะได้มาจากโปรแกรม MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) การใช้ MODFLOW เพราะว่าเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการยืนยันว่ามีความถูกต้องน่าเชื่อถือมาก ดังนั้น MT3D จึงเป็นโปรแกรมที่ถูกออกแบบมาให้ทำงานร่วมกับ MODFLOW โดย MODFLOW ใช้แก้สมการ partial differential equation สำหรับการไหลสามมิติของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ผ่านชั้นดิน โดยใช้วิธี block-centered finite-difference ซึ่งในการทดลองนี้ ต้องการเพียงการแก้ปัญหาคำนวณแบบ steady-state flow เท่านั้น สำหรับการไหลและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในแบบจำลองจะใช้ระบบ rectangular coordinate system พื้นที่รอบ ๆ รูรั่วใน geomembranes ถูกจำลองให้เป็น block of soil ซึ่งแกนของรูรั่วจะผ่านขอบของบล็อก ส่วนด้านข้างถูกกำหนดให้เป็นเขตที่ไม่มีการไหล (no flow boundaries) ส่วนความกว้างในโมเดลถูกกำหนดไว้ที่ 91 ซม. ซึ่งเพียงพอเพื่อการคำนวณให้ได้ผลลัพธ์ สำหรับอัตราการไหลผ่านรูรั่วที่เป็นวงกลมใน composite liners ซึ่งรูรั่วจะทำโมเดลแบบ rectangular cell ที่มี constant head source และ bottom boundary จะกำหนดให้เป็น constant head boundary เช่นกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ free drainage สำหรับความดันลด (head loss) ที่เกิดขึ้นในชั้นเนื้อพื้นผิว geomembranes และผ่านรูรั่วจะไม่นำมาคำนวณเพราะว่า soil liner มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (hydraulic conductivity) ต่ำกว่าชั้นของ geomembrane มาก ขนาดเซลล์ที่เล็กที่สุดสำหรับ finite-difference grid ที่ใช้ใน MODFLOW คือ 0.2 มม. และขนาดของเซลล์จะขยายในอัตราส่วน 1.1 เท่า สำหรับแนวแกนและแนวตั้ง ซึ่งขนาดของกริดจะถูกเลือกจากค่าที่ทำให้สมดุลมวลเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ปกติแล้ว Finite-difference grid จะมีจำนวนเซลล์ประมาณ 67,000 และ 300,000 เซลล์ ขึ้นอยู่กับความหนาของ composite liner สำหรับ composite liner ที่มี soil liner อย่างหนา อัตราการรั่วไหลที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงประมาณ 1 % ส่วน composite liner ที่ใช้ GCL อัตราการรั่วไหลที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงประมาณ 4 %

สำหรับแบบจำลองของ MT3D จะใช้ finite-difference grid เหมือนกับใน MODFLOW ซึ่งตั้งสมมติฐานว่า soil liner เป็นแบบ Homogeneous and isotropic ซึ่ง lateral sides ของ MT3D จะเป็นขอบเขตแบบ zero solute flux boundaries และ geomembranes จะถูกจำลองโดยใช้ zero solute flux cells โดยความเข้มข้นของระบบทั้งหมดตอนเริ่มต้นจะกำหนดให้เป็นศูนย์ และแหล่งกำเนิดของสารปนเปื้อนที่ใช้จะกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของเซลล์เป็นค่าคงที่ในรูรั่วของ geomembranes นอกจากนี้ขอบเขตชั้นล่าง (bottom boundary) จะกำหนดให้ค่าความเข้มข้นเป็นค่าคงที่ซึ่งเท่ากับ ศูนย์ สำหรับการออกแบบจริง ๆ ค่าเงื่อนไขขอบเขตจะถูกเลือกจากสภาพเงื่อนไขที่แท้จริงในสนาม ส่วน time step สูงสุดที่ใช้ใน MT3D คือ 3.1×10^{-4} ปี และค่าผิดพลาดของสมดุลมวลของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านรูรั่วจะมีค่าน้อยกว่า 1 %

การกำหนดขนาดและรูปร่างของรูรั่วของ geomembrane และสภาพรอยต่อระหว่าง geomembrane กับ soil liner ในโมเดล โดยการออกแบบวัสดุรองพื้นจะมีการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ซึ่งวัสดุรองพื้นทั้งสามชนิดที่เลือกทดสอบได้แก่ Subtitle D ของ RCRA, GCL (Geosynthetic clay liners) และ NR 500 ของ Wisconsin Administrative Code Section โดย Subtitle D และ NR 500 ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัด (ความหนา ≥ 0.6 ม. และ ≥ 1.2 ม. ตามลำดับ) ซึ่งจะถูกปูทับด้วยชั้นวัสดุ High-Density Polyethylene (HDPE) geomembrane มีความหนา 1.5 มม. ส่วนวัสดุ GCL ก็จะมีรูปแบบการจัดวางเหมือนกัน แต่แตกต่างกันตรงที่ชั้นดินเหนียวบดอัดจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุ GCL ความหนา 6.5 มม.

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบวัสดุรองพื้นทั้งสามชนิดจะใช้พื้นที่วัสดุ 1 hectare โดยมีจำนวนรูรั่วประมาณ 2.5 defects/ha. การติดตั้งจะมีการควบคุมคุณภาพอย่างสูง พื้นที่ของรูรั่วประมาณ 0.66 ตร.ซม. ความลึกของน้ำชะขยะประมาณ 30 ซม. ซึ่งเป็นค่าโดยทั่วไปของความลึกสูงสุดสำหรับการออกแบบระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอยจากขยะมูลฝอยชุมชนและขยะอันตราย มีระยะเวลาสำหรับการประเมินการเคลื่อนที่ของสารโทลูอิน (Toluene) ด้วยแบบจำลอง 100 ปี ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อนเท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองได้ Mass flux ของ Toluene ที่ผ่านชั้นรองพื้นที่ไม่ชำรุด (intact composite liners) มีช่วงประมาณ 1 ถึง 185 g/ha/year ดังนั้น Mass flux ของ VOCs ที่ผ่านผ่านชั้นรองพื้นที่ไม่ชำรุดจึงมีค่า orders of magnitude 4 ถึง 6 ซึ่งมากกว่าที่ผ่านรูรั่ว เพราะฉะนั้น Mass flux ของ VOCs ที่ผ่านรูรั่วจึงไม่น่ามาคิด จากการทดลอง Mass flux ของ GCL และ Toluene ที่บริเวณฐานของชั้น

รองพื้นจะเป็นเส้นตรงและเป็นอิสระต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารระหว่างดินและน้ำ (partition coefficient, K_d) ยิ่งไปกว่านั้น Mass flux ส่วนใหญ่จะถึงจุด breaks through ภายในระยะเวลาประมาณ 10 ปีถึง 20 ปี ขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นรองพื้น

Mass flux ของ Toluene หลังจากเวลา 100 ปี สำหรับ GCL composite liner จะมีค่า orders of magnitude มากกว่าของ Subtitle D ประมาณ 1.5 และมากกว่าของ Wisconsin NR 500 ประมาณ 2.1 ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเกตมาจากรูปร่างของมวลรวมสะสมของตัวอย่าง ณ เวลา 100 ปี มวลรวมสะสมของ GCL composite liner มีค่าประมาณ 18,365 g/ha, ของ Subtitle D มีค่าประมาณ 385 g/ha และของ Wisconsin NR 500 มีค่าประมาณ 43 g/ha ซึ่งมวลรวมสะสมของ Toluene มีค่ามากกว่ามวลรวมสะสมของแคดเมียม (cadmium) ถึง 23 ล้านเท่า โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน เหตุผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างของ contaminant flux และ mass discharged ทั้งนี้เพราะว่าการเคลื่อนที่ของสารโทลูอินเกิดขึ้นทั่วพื้นผิวของ liner ในขณะที่การเคลื่อนที่ของแคดเมียม (cadmium) เกิดขึ้นบริเวณรูรั่วได้แผ่น geomembranes เท่านั้น

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการประเมินที่อยู่บนพื้นฐานของอัตราการรั่วไหล (leakage rate) เช่น กรณีมีเฉพาะการพา (pure advection) อาจนำไปสู่ข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ การประเมินบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน (contaminant transport) จะมีความถูกต้องมากกว่าสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) การใช้ composite liners ที่มีชั้นดินที่หนากว่าจะมีค่า mass flux ต่ำ และมีความสามารถในการซับสูงกว่าการใช้ GCL composite liner ซึ่งการวิเคราะห์บนพื้นฐานของอัตราการรั่วจะให้ผลตรงข้าม

จากข้อจำกัดของการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือในภาคสนาม ที่ได้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจาก composite liners อย่างไม่ถูกต้องมากนัก ทำให้ความแม่นยำของแบบจำลอง (model) ในการจำลองเงื่อนไขของสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนามลดลงไปด้วย นอกจากนี้ข้อสรุปเหล่านี้อยู่บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายอย่างเดียว ปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความต้านทานการย่อยสลายทางสิ่งแวดล้อม, คุณภาพการก่อสร้าง และความเสถียรภาพทางกลต้องได้รับการพิจารณาด้วย รวมทั้งชนิดและขนาดของรูรั่วจะถูกสมมติให้เหมือนกัน และจะจำกัดขอบเขตของวัสดุและคุณสมบัติของตัวถูกละลาย ซึ่งการย่อยสลายของสารปนเปื้อนจะไม่นำมาพิจารณาและแหล่งนำชะมูลฝอยจะสมมติให้มีความเข้มข้นและความลึกคงที่

การหาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสาร VOCs ในชั้นดินเหนียวบดอัดและชั้น geomembranes สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองเพื่อทำนาย mass flux ของสาร VOCs ผ่าน composite liner สมัยใหม่ และได้ข้อมูลเชิงปริมาณของ liner ต่าง ๆ และนัยสำคัญของการแพร่กระจายของสาร VOCs ในรูปของเหลว (aqueous-phase diffusion) จากข้อมูลการเคลื่อนที่และแบบจำลองพบว่าการแพร่กระจายเป็นปัจจัยหลักสำหรับการเคลื่อนที่ของสาร VOCs ผ่านชั้น liners ต่าง ๆ และมีความจำเป็นที่ต้องทำการตรวจสอบภาคสนามต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ จะเน้นศึกษาสาร BTEX, TCE และ PCE ซึ่งเป็นสาร VOCs ที่พบเป็นปริมาณค่อนข้างมากและพบบ่อยในน้ำชะมูลฝอย จึงมีโอกาสนปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้มาก ด้วย ปัจจุบันของเสียอันตรายจากชุมชน ส่วนใหญ่ยังคงทิ้งรวมไปกับมูลฝอยชุมชน ซึ่งระบบการจัดการมูลฝอยชุมชนไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับของเสียอันตราย ส่งผลให้มีการปนเปื้อนของมลพิษ ไม่ว่าจะเป็น VOCs, โลหะหนัก, สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และสารพิษอื่น ๆ ในน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดิน ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ดังนั้นการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์และประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อนดังกล่าว จะช่วยให้วิศวกรสามารถหาแนวทางฟื้นฟูและป้องกันการเกิดปัญหาในอนาคตได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดิน

1.1 ขวดแก้ว BOD ขนาด 300 ml. และขวดพลาสติก ขนาด 500 และ 1000 ml. สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ

1.2 เครื่องสูบน้ำสำหรับสูบน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ ประเภท Submersible pump ขนาด 1.8 นิ้ว ทำจากวัสดุ Stainless Steel ชนิด 316 พร้อมท่อส่งน้ำทำจากวัสดุ Teflon

1.3 เครื่องปั่นไฟฟ้าใช้สำหรับเครื่องสูบน้ำ

1.4 เครื่องมือเก็บตัวอย่างน้ำ (water sampler)

1.5 ถังมือ

1.6 เครื่องวัดระดับน้ำนิ่ง (Water level meter)

1.7 เครื่องมือตรวจสอบคุณภาพน้ำในสนาม (Water Quality Checker) ซึ่งสามารถตรวจสอบ pH, Temperature, Conductivity, DO และ Salinity

1.8 Garden Sprayer สำหรับฉีดล้างเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.9 สาร Alcanox (Phosphate- free) สำหรับใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ

1.10 น้ำสะอาดที่ปราศจากสารอินทรีย์ (Deionized water) สำหรับล้าง Alcanox ออกจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนทำการสูบน้ำ

1.11 Cooler บรรจุน้ำแข็งสำหรับเก็บรักษาขวดเก็บตัวอย่าง

2. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)

2.1 เครื่อง gas chromatograph (GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6890 N (บริษัท โกชู โคชัน จำกัด)

2.2 ขวดแก้วสุญญากาศปริมาตร 10 มิลลิลิตร

2.3 เข็มฉีดยา gas tight syringe with Luer Lock Valve ขนาด 25 มิลลิเมตร

2.4 สารอินทรีย์มาตรฐานระเหย (calibration standards, VOCs mix)

2.5 Detector: Mass Selective Detector (MS) รุ่น 5973 N

2.6 Column: Fused Silica Capillary Column DB-624 ขนาด $20\text{ m} \times 0.18\text{ mm} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ (long $\times$ id $\times$ film)

2.7 Thickness: ยี่ห้อ Agilent's J & W Scientific

2.8 Purge & Trap: Tekmar Dehrmann 3100 Sample Concentrator

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประเมินการเคลื่อนที่ของชั้นน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โดยใช้โปรแกรม Visual MODFLOW และ Visual MT3DMS

4. เครื่องคอมพิวเตอร์ ต้องมี Hardware ขั้นต่ำเพื่อใช้ประมวลผล (Run) ดังนี้

4.1 Pentium II, 300 MHz

4.2 64 MB of RAM (128 MB recommended)

4.3 CD ROM drive

4.4 Free disk space 100 Mbytes

4.5 Windows 98/2000/XP/NT 4.0 (Service Pack 3)

5. แผนที่

วิธีการ

1. การศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

ทำการรวบรวมเอกสาร และรายงานที่เกี่ยวข้องทั้งด้านการจัดการมูลฝอยและการจัดการสิ่งแวดล้อม ซึ่งหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน ได้ดำเนินการไปแล้วในอดีต และกำลังดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน สำหรับข้อมูลบางส่วนที่ไม่สามารถรวบรวมได้ ก็จะมีการสำรวจภาคสนามตามความจำเป็นต่อไป โดยข้อมูลต่าง ๆ ที่จะทำการศึกษารวบรวมมีดังนี้

1.1 สถานการณ์การจัดการมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี

1.2 สภาพทางธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาทั่วไป

1.3 สภาพทางอุทกนิคมวิทยา

1.4 ลักษณะดิน

1.5 น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

1.6 การใช้ประโยชน์ที่ดิน

2. การศึกษาและสำรวจภาคสนาม

การสำรวจข้อมูลภาคสนาม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินสถานการณ์ความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากสถานที่กำจัดมูลฝอย โดยแผนการสำรวจภาคสนามมีแนวทางดำเนินการดังนี้

2.1 รายละเอียดเฉพาะในสถานที่กำจัดมูลฝอย

2.1.1 ปริมาณมูลฝอยสะสมภายในสถานที่กำจัดมูลฝอย

2.1.2 สภาพทางอุทกธรณีวิทยา

2.2 สภาพแวดล้อมในพื้นที่กำจัดมูลฝอยและบริเวณโดยรอบ

2.2.1 การใช้ประโยชน์ของที่ดินโดยรอบในรัศมี 1 กิโลเมตร

2.2.2 แหล่งน้ำโดยรอบ

2.3 สำรวจเพื่อกำหนดจุดและทำการขุดเจาะสำรวจลักษณะของชั้นดิน และคุณสมบัติของดิน เช่น การอุ้มน้ำ การซึมผ่าน และความสามารถในการบดอัด ความพรุน เป็นต้น

2.4 สำรวจและวิเคราะห์การไหลของน้ำใต้ดิน โดยเจาะบ่อน้ำใต้ดินด้านเหนือน้ำไม่น้อยกว่า 1 บ่อ และที่ท้ายน้ำไม่น้อยกว่า 2 บ่อ ซึ่งใช้เป็นบ่อตรวจสอบคุณภาพน้ำใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอย

2.5 ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยในสถานที่กำจัดมูลฝอย เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และประเมินสภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำ โดยมีพารามิเตอร์ที่ตรวจวัด ได้แก่ BTEX,

TCE และ PCE รวมทั้งสารอินทรีย์ระเหยง่าย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

น้ำใต้ดิน เก็บตัวอย่างจากบ่อสังเกตการณ์ที่ติดตั้งในบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยบริเวณด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ ในการเก็บตัวอย่างน้ำจะต้องมีการป้องกันการปนเปื้อน โดยทำความสะอาดอุปกรณ์เครื่องมือก่อนทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ก่อนเก็บตัวอย่างน้ำจะทำการวัดระดับน้ำนิ่งในบ่อ และสูบน้ำทิ้งก่อนเก็บตัวอย่าง รอกจนกระทั่งอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำคงที่จึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำ โดยใช้เครื่องสูบน้ำและต่อท่อลงไปที่ระดับน้ำใต้ดิน แล้วสูบน้ำขึ้นมา สำหรับการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ จะเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C แล้วทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร VOCs โดยวิธี Gas Chromatography

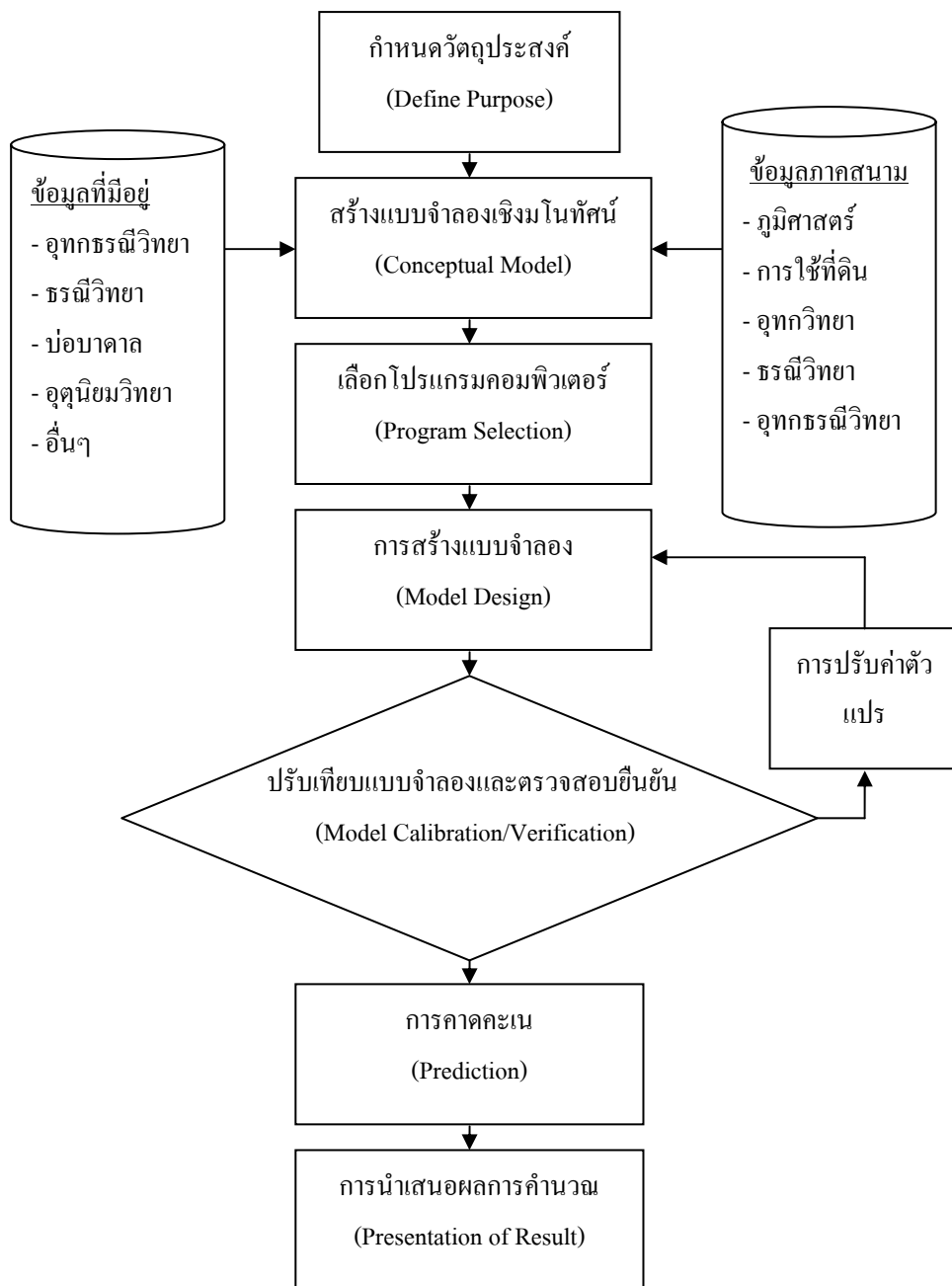
3. จัดทำแผนที่จากข้อมูลพื้นฐาน

สำรวจพิกัดตำแหน่งของสถานที่กำจัดมูลฝอย รวมทั้งแสดงภาพโดยรอบในรัศมี 1 กิโลเมตร และทำการกำหนดค่าพิกัดลงในแผนที่หลัก (Base Map) ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การกระจายตัวของแหล่งน้ำทุกแห่ง ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ตำแหน่งบ่อตรวจสอบ เส้นชั้นความสูง แหล่งกำเนิดมลพิษต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอยและข้อมูลอื่น ๆ

4. การประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน

การประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน บริเวณใกล้สถานที่กำจัดมูลฝอย เป็นการประมวลผลข้อมูลทั้งหมดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยค่าคำนวณและจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน โดยใช้โปรแกรม Visual MODFLOW และการประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อน โดยใช้โปรแกรม Visual MT3DMS

วิธีการจัดทำแบบจำลอง มีขั้นตอนการจัดทำทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 8 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการจัดทำแบบจำลอง

4.1 การกำหนดวัตถุประสงค์ (Define Purpose) วัตถุประสงค์ของแบบจำลองในการศึกษา นี้ เพื่อตรวจสอบและประเมินความรุนแรงของสภาพการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในน้ำใต้ดิน บริเวณใกล้เคียงสถานที่กำจัดมูลฝอย

4.2 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model) เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลา ต้องอาศัยข้อมูลภาคสนามเพื่อทำความเข้าใจสภาพพื้นที่ จากการรวบรวมข้อมูลทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา คุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยา สภาพการไหลของน้ำใต้ดิน ขอบเขตแหล่งน้ำใต้ดิน แล้วทำการย่อส่วน (Simplify) ปัญหาในสนามซึ่งมีความซับซ้อน ให้อยู่ในรูปแบบที่จะสามารถทำการวิเคราะห์คำนวณได้

4.3 การเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program Selection) โปรแกรมที่จะนำมาสร้างแบบจำลองน้ำใต้ดิน ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม Visual MODFLOW Version 3.1 พัฒนาโดย บริษัท Waterloo Hydrogeologic, Inc. จากประเทศแคนาดา โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรม MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS, RT3D, Zone Budget, Stream Routing Package, WinPEST, และ VMOD 3D-Explorer ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการศึกษาการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของสาร VOCs ในน้ำใต้ดิน

4.4 การสร้างแบบจำลอง (Model Design) เมื่อเข้าใจภาพรวมในเชิงมโนทัศน์ของพื้นที่ได้ดีแล้ว การจำลองจากสภาพกายภาพต่าง ๆ จะดำเนินการโดยแบ่งพื้นที่ออกเป็นหน่วยเล็ก ๆ (Discretization) ออกแบบขนาดของพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือกริดเซลล์ (Grid Cell) เลือกขั้นตอนของเวลา (Time Step) ขอบเขตของพื้นที่และชั้นหิน (Boundary Conditions) และค่าตัวแปรเบื้องต้นในการเริ่มจำลองหรือคำนวณการกระจายค่าแรงดันของน้ำ (Hydraulic Heads)

4.5 การปรับเทียบแบบจำลองและตรวจสอบยืนยัน (Model Calibration/Verification) โดยมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบแบบจำลองและทำให้แบบจำลองมีความสามารถที่จะสังเคราะห์ข้อมูลใหม่ ซึ่งผลการคำนวณจากแบบจำลอง เช่น ระดับน้ำหรือแรงดันของน้ำควรมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดจริงในสนาม ณ สถานที่และเวลานั้น ๆ เมื่อผลการคำนวณไม่ตรงกับข้อมูลที่วัดได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแน่นอน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและสภาพขอบเขตของแบบจำลอง เพื่อให้ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามสอดคล้องกัน ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องใช้ความเข้าใจของระบบของการไหลเวียนของ

น้ำใต้ดิน ณ แหล่งนั้น ๆ ซึ่งบางครั้งต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial-and-error adjustment) จนกระทั่งทราบขอบเขตและช่วงค่าของตัวแปรต่าง ๆ เมื่อมีการปรับค่าตัวแปรแล้ว ควรจะต้องดำเนินการตรวจสอบยืนยันอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลที่ตรวจสอบได้จากภาคสนาม อีกชุดหนึ่งที่แตกต่างจากข้อมูลชุดแรกที่ใช้ในการปรับค่าตัวแปรเพื่อยืนยันจนเป็นที่แน่ใจว่าแบบจำลองนี้ถูกต้องใช้งานได้

4.6 การคาดคะเน (Prediction) ในการคาดคะเนผลของการคำนวณต่าง ๆ เช่น แรงดันของน้ำหรือการกระจายสาร VOCs เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ในขณะที่มีการเติมน้ำเข้าหรือการสูบน้ำมากขึ้น มีความจำเป็นต้องมีการวางแผนการใช้ข้อมูลในอนาคต ร่วมกับการวิเคราะห์และการตรวจสอบความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) การเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิดจะทำให้ผลการคำนวณเปลี่ยนไปมาก ความอ่อนไหวของตัวแปรของแบบจำลองเป็นคุณสมบัติเฉพาะของพื้นที่นั้น ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรทำให้ทราบถึงช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ และเตรียมการเฝ้าระวังของข้อมูลในการศึกษาและวิเคราะห์ในระยะยาว (Monitoring Program) การคาดคะเนระดับน้ำในอนาคต จะกระทำโดยการจำลองเพื่อจะได้คำนวณค่าระดับน้ำจะเกิดขึ้นเนื่องจากสถานการณ์เหล่านั้น โดยจำลองตามสถานการณ์ที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตงานวิจัยจากนั้นทำการคำนวณการแพร่กระจายของ VOCs ในชั้นน้ำใต้ดินแต่ละชั้น โดยนำผลการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินมาป้อนเข้าในแบบจำลองการแพร่กระจาย ในขั้นแรกได้ทำการกำหนดกริดเหมือนกับที่ใช้ในแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน และกำหนดค่าความเข้มข้น VOCs ที่ขอบเขตพื้นที่ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้ความเข้มข้น VOCs เท่ากับค่าสูงสุด ซึ่งอยู่ในราว 16,500 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีรูปแบบการจำลองสถานการณ์เช่นเดียวกันกับที่กำหนดไว้ในขอบเขตงานวิจัยดังกล่าวมาแล้ว

4.7 การนำเสนอผลการคำนวณ (Presentation of Results) การเสนอผลการจำลองเป็นงานขั้นสุดท้าย ซึ่งเป็นการสื่อสารต่อผู้นำผลไปใช้เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการและข้อจำกัดต่าง ๆ รวมทั้งผลที่จำลองมีความถูกต้องและผิดพลาดอย่างไร ซึ่งจะแสดงผลทั้งการนำมาซึ่งข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบ การปรับแก้ค่า การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรผลการคำนวณในเชิงตัวเลข รูปภาพ คำอธิบายและข้อเสนอแนะ ซึ่งจะมุ่งเน้นที่ความชัดเจนและตรงประเด็นตามที่ได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้

5. จัดทำแนวทางและวิธีฟื้นฟูน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

แบบจำลอง Visual MT3DMS นอกจากใช้ในการประเมินการปนเปื้อนน้ำชะมูลฝอยในแหล่งน้ำใต้ดินแล้วยังสามารถช่วยในการศึกษาประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย เพื่อลดการกระจายของสารปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน โดยตั้งสมมติฐานในการฟื้นฟูและประเมินการปนเปื้อน ดังต่อไปนี้

5.1 ใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย BTEX, TCE และ PCE เป็นสารปนเปื้อนในการศึกษา และกำหนดค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเท่ากับค่าสูงสุด ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

5.2 การคำนวณขอบเขตการแพร่กระจายโดยรอบพื้นที่ในสภาพปัจจุบัน และในอนาคต 50 ปี

5.3 ใช้วัสดุกลบทับชั้นสุดท้ายของหลุมฝังกลบเป็นดินเหนียวที่มีค่าความนำคลศาสตร์ไม่เกิน 1×10^{-7} ซม./วินาที หนาไม่น้อยกว่า 45 ซม. พร้อมดินปกคลุมซึ่งจะลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยเหลือไม่เกินร้อยละ 20

5.4 ใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ หนาไม่น้อยกว่า 0.5 มม. พร้อมดินปกคลุมเป็นวัสดุทับชั้นสุดท้าย จะลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยเหลือไม่เกินร้อยละ 5

5.5 กำหนดขอบเขตหรือระยะห่างของการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิด ในอนาคตปีที่ 50 ไว้ไม่เกิน 100 เมตร กรณีมีการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย

สถานที่ทำการศึกษา

ในการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนของสาร VOCs จากน้ำชะมูลฝอยจะดำเนินงานที่สถานที่กำจัดมูลฝอยของเทศบาลเมืองนนทบุรี ส่วนการวิเคราะห์จะดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ระยะเวลาในการศึกษา

เริ่มทำการวิจัยตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2548 ถึงเดือนเมษายน 2549 รวมระยะเวลา 12 เดือน
แผนการดำเนินการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 15 ดังนี้

ตารางที่ 15 แผนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	พ.ศ. 2548								พ.ศ. 2549			
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ตรวจเอกสาร												
2. การเขียนโครงการ วิทยานิพนธ์												
3. เตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี												
4. สืบเสาะหาสถานที่ เก็บและวิเคราะห์ ตัวอย่างน้ำ												
5. ทำการการรัน โปรแกรม												
6. รวบรวมและวิเคราะห์ ข้อมูล												
7. จัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์												
8. จบการศึกษา												

แหล่งเงินทุน

การวิจัยนี้ได้รับแหล่งเงินทุนสนับสนุนจากองค์กร Swedish International Development Cooperation Agency (SIDA)

ผลและวิจารณ์

ผลการวิจัย

ผลการวิจัย เรื่องการตรวจติดตามและประเมินสภาพการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี เป็นการศึกษาวิจัยเชิงปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลกระทบคุณภาพน้ำใต้ดินภายใต้สภาพปัญหาที่เป็นความเสี่ยงในรูปแบบต่าง ๆ ของพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW รวมทั้งเสนอแนวทางป้องกันการปนเปื้อนสาร VOCs น้ำใต้ดิน และเสนอแนวทางการฟื้นฟูน้ำใต้ดินที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว

1. ผลการสำรวจและรวบรวมข้อมูลสถานที่กำจัดมูลฝอย

ผลการสำรวจสถานที่กำจัดมูลฝอยประกอบด้วยสภาพพื้นที่ภายในสถานที่กำจัดมูลฝอย และสภาพแวดล้อมโดยรอบรัศมีประมาณ 2 กม. ได้แก่ การใช้ที่ดิน แหล่งน้ำ ถนน ชุมชน เป็นต้น

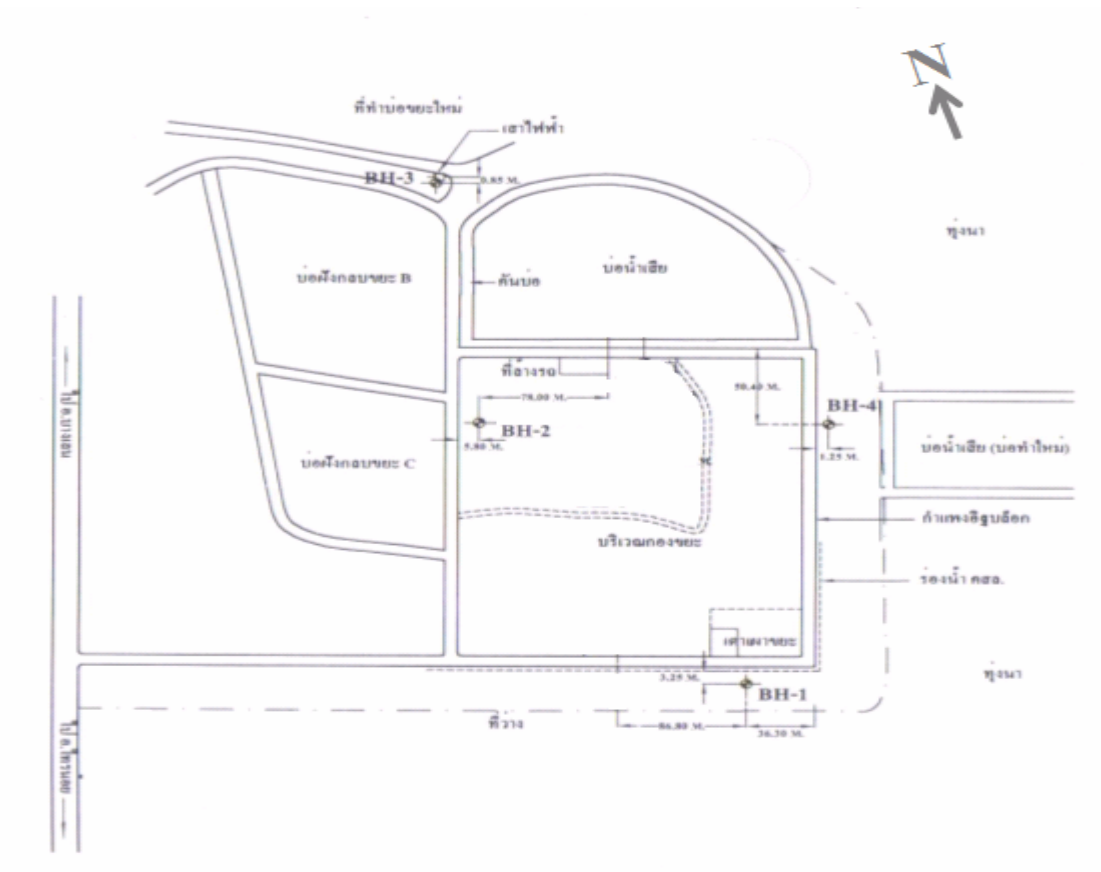
1.1 ที่ตั้งสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ตั้งอยู่ที่หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 8 ตำบลคลองขวาง อำเภอไทรน้อย อยู่ห่างจากที่ว่าการอำเภอไทรน้อยประมาณ 4.5 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 9 มีอาณาเขตติดต่อดังนี้

ทิศเหนือ	จรดตำบลราษฎร์นิยม	อำเภอไทรน้อย	จังหวัดนนทบุรี
ทิศใต้	จรดตำบลไทรน้อย	อำเภอไทรน้อย	จังหวัดนนทบุรี
ทิศตะวันออก	จรดตำบลราษฎร์นิยม	อำเภอไทรน้อย	จังหวัดนนทบุรี
ทิศตะวันตก	จรดตำบลขุนศรี	อำเภอไทรน้อย	จังหวัดนนทบุรี

1.2 สภาพพื้นที่ของสถานที่กำจัดมูลฝอย ขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ดังแสดงในภาพที่ 10 ถึง 15 ตั้งอยู่ที่บริเวณตำบลคลองขวาง อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี ติดถนนรพช. (หน่วยเร่งรัดและพัฒนาชนบท) สายไทรน้อย- คลองนาหมอน พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่ม สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางไม่เกิน 2 เมตร ลักษณะพื้นที่ดินเดิมเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ มีความลึกประมาณ 10 เมตร ซึ่งการจัดการมูลฝอยใช้วิธีเทลงในบ่อดิน ปัจจุบันมีการใช้บ่อจนเต็ม จึงใช้วิธีเทกองกลางแจ้งต่อไปอีก จนมีสภาพเป็นกองมูลฝอยขนาดใหญ่เต็มพื้นที่ และมีความสูงจากระดับพื้นดินเดิมโดยเฉลี่ย 10 เมตร สถานที่กำจัดมูลฝอยแห่งนี้เริ่มใช้เมื่อปี 2525 และยังใช้งานอยู่จนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีปริมาณขยะมูลฝอยของชุมชนที่เกิดขึ้นเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 843 ตันต่อวัน โดยเทศบาลนครนนทบุรีเป็นชุมชนที่ก่อให้เกิดขยะมูลฝอยมากที่สุด เฉลี่ย 338 ตันต่อวัน รองลงมาคือเขตเทศบาลนครปากเกร็ด เฉลี่ย 182 ตันต่อวัน เทศบาลตำบลบางศรีเมือง และเทศบาลตำบลบางกรวย เฉลี่ย 45 ตันต่อวัน เทศบาลเมืองบางบัวทอง เฉลี่ย 40 ตันต่อวัน และเทศบาลตำบลปลายบาง เฉลี่ย 20 ตันต่อวัน ส่วนเทศบาลตำบลบางใหญ่ เทศบาลตำบลบางม่วง และเทศบาลตำบลไทรน้อย มีขยะมูลฝอย เฉลี่ย 8 ตันต่อวัน องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี เฉลี่ย 38 ตันต่อวัน นอกจากนี้ เป็นมูลฝอยที่เกิดขึ้นในเขตพื้นที่ขององค์การบริหารส่วนตำบลอื่น ๆ อีกประมาณ 156 ตันต่อวัน จากการประมาณเบื้องต้น พบว่ามีปริมาณมูลฝอยกองสะสมอยู่ในพื้นที่ประมาณ 1,173,684 ลูกบาศก์เมตร (อุดร, 2545)

1.3 สภาพแวดล้อมโดยรอบ พื้นที่โดยรอบส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม เช่น นาข้าว สวนผัก โดยมีชุมชนขนาดประมาณ 112 ครัวเรือน และขนาด 97 ครัวเรือน ตั้งอยู่ห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยเป็นระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร และ 1.2 กิโลเมตร ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตามลำดับ แหล่งน้ำผิวดินที่สำคัญได้แก่ คลองนาหมอนและคลองห้ำร้อย โดยคลองนาหมอนอยู่ห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยไปทางทิศเหนือ เป็นระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร มีการใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคและเกษตรกรรม ส่วนคลองห้ำร้อย อยู่ห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยไปทางทิศตะวันออก เป็นระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตรมีการใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคและเกษตรกรรม เช่นเดียวกัน แหล่งน้ำใต้ดิน จากการสำรวจพบที่มีการขุดเจาะบ่อบาดาลเพื่ออุปโภค จำนวน 6 บ่อ มีความลึกตั้งแต่ 220-253 เมตร คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดีทุกบ่อ น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค ภายในชุมชนรอบบริเวณที่ศึกษา มีทั้งจากน้ำฝน น้ำบาดาล และน้ำในคลอง เพราะน้ำประปายังให้บริการไม่ทั่วถึง ส่วนผู้ที่ทำงานอยู่ในสถานที่ที่มูลฝอยจะชื้อน้ำจากในเมืองมาใช้ทั้งอุปโภคและบริโภค ส่วนการระบายน้ำมีสภาพพื้นที่ที่ทั้งขยะเป็นที่ราบลุ่มมีระบบการระบายน้ำลงสู่รางระบายน้ำที่ถูกรอบ ๆ พื้นที่ซึ่งได้ขุดไว้เพื่อระบายน้ำขยะมูลฝอยก่อนนำไปบำบัดในระบบบำบัดน้ำเสีย

แต่ขณะนี้ระบบบำบัดน้ำเสียยังไม่ได้ใช้งาน เพราะประชาชนในบริเวณใกล้เคียง ไม่ยอมให้ปล่อยน้ำทิ้งลงสู่คลองนาหมอน ดังนั้นน้ำชะมูลฝอยจึงไหลล้นและเจือปนไปถึงพื้นที่ลุ่มน้ำข้างเคียง(อุดร, 2545)



ภาพที่ 10 สถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี
ที่มา: เอสทีเอส (2548)

1.4 บริเวณพื้นที่กำจัดมูลฝอยแห่งใหม่ขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี แสดงในภาพที่ 10 ได้แก่บ่อฝักกลบมูลฝอย B และ C อยู่ติดกับบริเวณพื้นที่กำจัดมูลฝอยเดิม ซึ่งกองมูลฝอยเดิมปัจจุบันเลิกใช้แล้ว



ภาพที่ 11 สภาพทั่วไปภายในพื้นที่กำจัดมูลฝอย (พฤษภาคม พ.ศ. 2548)



ภาพที่ 12 Sanitary landfill แห่งใหม่ ยังไม่ได้ใช้งาน (พฤษภาคม พ.ศ. 2548)



ภาพที่ 13 น้ำชะมูลฝอย (Leachate) บริเวณบ่อกำจัดมูลฝอย A (พฤษภาคม พ.ศ. 2548)



ภาพที่ 14 ถนนและคันดินโดยรอบบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอย (พฤษภาคม พ.ศ. 2548)



ภาพที่ 15 บ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (พฤษภาคมพ.ศ. 2548)

1.5 ประสิทธิภาพการจัดเก็บขยะมูลฝอย ประสิทธิภาพในการจัดเก็บขยะมูลฝอยของหน่วยงานต่าง ๆ ที่มีอยู่ พบว่าสามารถจัดเก็บได้โดยเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 80 ของปริมาณขยะมูลฝอย (อุดร, 2545) จะเห็นได้ว่าจังหวัดนนทบุรีประสบปัญหาการกำจัดขยะมูลฝอยที่ไม่สามารถเก็บขนขยะได้ทั้งหมดต่อวัน อันเนื่องมาจากเครื่องมือ ยานพาหนะ และอุปกรณ์ในการจัดเก็บที่ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากสภาพพื้นที่ ซึ่งบางส่วนเป็นคูคลอง ไม่สามารถที่จะเข้าไปจัดเก็บได้ จึงทำให้มีขยะมูลฝอยตกค้างเป็นจำนวนมาก

1.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากสถานที่กำจัดมูลฝอยต่อชุมชน พบว่าได้รับผลกระทบด้านกลิ่นเหม็น โดยเฉพาะช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวจะมีความรุนแรงมาก ปัญหาโรคติดต่อทางอาหาร โดยมีแมลงวันเป็นพาหะนำโรค ซึ่งมีผลกระทบมากในฤดูร้อนและฤดูฝน ปัญหาน้ำเน่าเสียและการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยจะมีมากในฤดูฝน นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านทัศนียภาพด้วย

2. ผลการสำรวจอุทกธรณีวิทยา

ในเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2548 มีการก่อสร้างบ่อสังเกตการณ์จำนวน 4 บ่อ โดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนในการก่อสร้างจาก The Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) ซึ่งดำเนินการก่อสร้างโดยบริษัท เอส ที เอส อินสตรูเมนต์ จำกัด (เอสทีเอส, 2548) ผลการสำรวจอุทกธรณีวิทยาในสถานที่กำจัดมูลฝอยรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก, ข, ค และ ง ซึ่งประกอบด้วย การเจาะสำรวจและทดสอบชั้นดิน การติดตั้งบ่อตรวจสอบคุณภาพน้ำ การเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำใต้ดิน ข้อมูลทั้งหมดจากการสำรวจและศึกษาวิเคราะห์เหล่านี้ จะใช้ในการประเมินการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายของน้ำชะมูลฝอย โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลประกอบในการวางแผนการจัดการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย ได้ผลดังนี้

2.1 ผลการเจาะสำรวจดิน เพื่อติดตั้งบ่อสังเกตการณ์น้ำใต้ดิน ประกอบด้วยหลุมเจาะสำรวจดินลึก 8.00-10.50 เมตร มีจำนวน 4 หลุม การเจาะสำรวจได้กระทำโดยใช้เครื่องเจาะชนิด Rotary ดิกระบบ Hydraulic เพื่อใช้กดหัวเจาะขณะเจาะผ่านชั้นดิน วิธีการเจาะในช่วง 1-2 เมตร ใช้วิธีการเจาะโดยใช้ Power Auger และที่ระดับลึกลงไปใช้วิธีเจาะแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ ขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) ใส่เพื่อป้องกันหลุมพัง

การเก็บตัวอย่างดินได้ทำการเก็บแบบต่อเนื่อง ในชั้นดินถมคอนบนจะเก็บตัวอย่าง โดยใช้กระบอกผ่าซีกมาตรฐาน (Split Spoon Barrel) พร้อมกับทำการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 ด้วย สำหรับในชั้นขยะ (Garbage) จะทำการเก็บตัวอย่าง โดยใช้สว่านเจาะดิน (Power Auger) และสำหรับชั้นดินอ่อนจะทำการเก็บตัวอย่างดิน ใช้กระบอกบาง (Thin Wall Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.50 นิ้ว จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ นอกจากนั้นได้ทำการรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสนามโดยใช้ Pock Penetrometer ด้วย

1) BH-1 ลักษณะดินชั้นบนถึงความลึกหนึ่งเมตรแรก เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด แข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Clay, trace fine sand, dark grey, medium to stiff (CH/Fill)) ช่วง 1-8 เมตร ลักษณะดินเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีเทาถึงดำ เป็นดินอ่อน (Clay, trace fine sand, dark grey to grey, soft (CH))

2) BH-2 ลักษณะดินชั้นบนตลอดลงมาถึงระดับความลึก 3 เมตร เป็นดินเหนียวและขยะ มีสีน้ำตาลแดงปนดำ (CH + Garbage) ช่วง 3-8.50 เมตร เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีเทา ดำ เป็นดินอ่อน (Clay, trace fine sand, dark grey, soft (CH))

3) BH-3 ลักษณะดินชั้นบนถึงความลึก 0.60 เมตร ลักษณะดินเป็นแดง, สีเทาปนแดง และน้ำตาล, เป็นดินแน่น สีดำ (Lateritic soil, grayish-reddish brow, dense (SC/Fill)) ช่วง 0.6-2.00 เมตร ลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีน้ำตาลปนดำ เป็นดินแข็งถึงแข็งมาก (Clay, trace fine sand, brownish dark grey, stiff to very stiff (CH/Fill)) ช่วง 2.00- 3.50 เมตร ลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีน้ำตาลปนดำ เป็นดินแข็งปานกลางถึงแข็ง (Clay, trace fine sand, brownish dark grey, medium to stiff (CH)) ช่วง 3.50 – 10.00 ลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีเทา เป็นดินอ่อน (Clay, trace fine sand, grey, soft (CH))

4) BH-4 ลักษณะดินชั้นบนถึงความลึก 1.50 เมตร เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลอ่อนปนดำ เป็นดินอ่อนถึงแข็งปานกลาง (Clay, trace fine sand, light-brownish grey, soft to medium (CH)) ช่วง 1.50 – 8.00 เมตร ลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด, สีเทาและดำ เป็นดินอ่อน (Clay, trace fine sand, grey & dark grey, soft (CH))

สาเหตุที่กำหนดให้ความลึกไม่เกิน 10.50 เมตร เพราะว่าสภาพทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษามีระดับน้ำใต้ดินสูง และลักษณะชั้นดินส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด ซึ่งมีค่าความนำชลศาสตร์ค่อนข้างต่ำ ทำให้น้ำใต้ดินไม่สามารถซึมผ่านชั้นดินตามแนวดิ่งมากนัก ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ ดังนั้นการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ นอกจากนี้ยังเป็นการประหยัดงบประมาณอีกด้วย

2.2 ติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ (Monitoring Well Installations) หลังจากเจาะสำรวจดินลึก 8.00-10.00 เมตร จึงทำการติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ จำนวน 4 หลุม ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) ทำการลง Casing HW (เส้นผ่านศูนย์กลาง, $\phi=102$ มม.) และเจาะขยายขนาดหลุมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 มม. จนถึงความลึกก้นหลุม

2) ถ้างหลุมให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า และทำการลงกรวดละเอียดที่ก้นหลุมให้ได้ความหนาประมาณ 50 ซม. และทำการลงท่อ screen โดยมีฝาปิดที่ก้นท่อ

3) ทำการลงท่อ screen โดยมีฝาปิดที่กั้นท่อและท่อ screen จะต่อกับท่อ PVC riser $\phi=2$ นิ้ว โดยข้อต่อยึดให้แน่นด้วย rivet ท่อ PVC riser จะอยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 0.85-1.00 เมตร

4) ค่อย ๆ หย่อนกรวดละเอียดลงบริเวณข้าง ๆ ท่อ PVC riser และผนังหลุมเจาะจนได้ระยะที่ต้องการ คือ สูงขึ้น 3 เมตร จากระยะปลายล่างของท่อ PVC screen

5) ค่อย ๆ หย่อนทรายละเอียดลงไปให้ได้ความสูงเหนือชั้นกรวดละเอียดขึ้นมาอีกประมาณ 0.50 เมตร

6) ทำการหย่อน Betonite Ball และกระทุ้งให้แน่นจนได้ความหนาขึ้นมาประมาณ 1.50 เมตร

7) ทำการลงทรายละเอียดอีกให้ได้ความหนาประมาณ 0.50 เมตร

8) ทำการ Grout ด้วยน้ำ + Cement + Betonite ให้ได้ความหนา 1.50 เมตร

9) ทำการ Grout ระยะที่เหลือด้วยน้ำ + Cement จนถึงปากหลุมเจาะ

10) ทำการถอน Casing และกรอกน้ำ + Cement + Betonite Grout ที่เหลือให้เต็มหลุม

11) ทำการติดตั้ง Protection pipe ϕ 4 นิ้ว

12) ทำการล้างบ่อให้สะอาด โดยการใช้ Bailer ดักน้ำออกจากหลุมเจาะให้หมดและปล่อยให้น้ำไหลเข้ามาในบ่ออีกครั้งและทำการดักน้ำออกให้หมดอีกประมาณ 2-3 ครั้ง จนแน่ใจว่าหลุมสะอาดและไม่มีตะกอนหลงเหลืออยู่



ภาพที่ 16 บ่อสังเกตการณ์ (Monitoring Well)

การติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ พบว่าความลึกของชั้นมูลฝอยอยู่ในช่วง 3.4- 8.8 เมตร ดังนั้นบ่อสังเกตการณ์จึงต้องเจาะลึกลงไปกว่าความลึกของชั้นมูลฝอย สำหรับความลึกของบ่อ ระยะของท่อ Screen และระดับน้ำช่วงเจาะสำรวจ แสดงในตารางที่ 16 ส่วนข้อมูลระดับน้ำใต้ดินในแต่ละช่วงเวลาแสดงในภาพที่ 17 ดังนี้

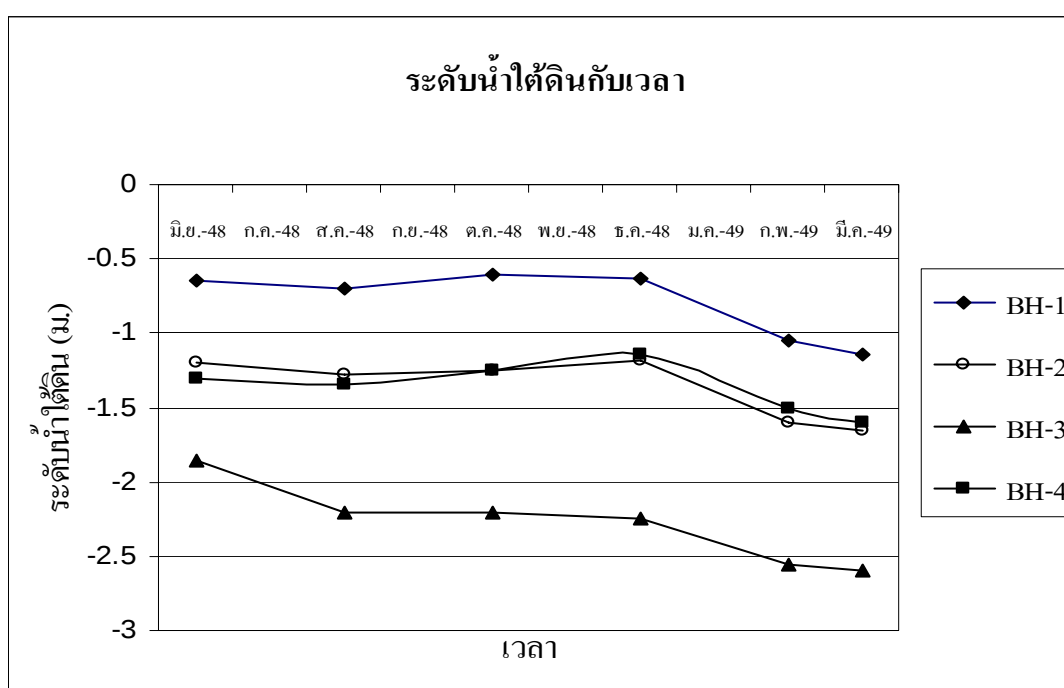
ตารางที่ 16 ข้อมูลบ่อสังเกตการณ์ (Monitoring Wells)

(หน่วย : เมตร)

บ่อสังเกตการณ์	ความลึกจากระดับ พื้นดินถึงก้นบ่อ	ระยะของท่อ Screen วัดจากระดับพื้นดิน	ระดับน้ำเทียบกับ ระดับอ้างอิงเดียวกัน *
BH-1	-8.50	-5.00 ถึง -8.00	-1.00
BH-2	-8.50	-5.00 ถึง -8.00	-1.30
BH-3	-10.50	-7.00 ถึง -10.00	-2.70
BH-4	-8.50	-5.00 ถึง -8.00	-1.80

หมายเหตุ * - ระดับอ้างอิงกำหนดให้เป็นศูนย์ที่ระดับถนนบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอย
- ทำการวัดระดับน้ำหลังเจาะ 24 ชั่วโมง (ระหว่างวันที่ 22 ถึง 26 มี.ค. 2548)

ที่มา: เอสทีเอส (2548)



ภาพที่ 17 ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์

ระดับน้ำนิ่ง วัดในหลุมเจาะระหว่างทำการเจาะสำรวจดิน มีค่าระหว่าง 1.00-2.70 เมตร ต่ำกว่าระดับดินปากหลุมเจาะ ส่วนค่าระดับน้ำใต้ดินที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 4 บ่อ คือ BH-1, BH-2, BH-3 และ BH-4 ตั้งแต่ช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 พบว่าระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ตลอดทั้งปี ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ฤดูกาล ปริมาณน้ำฝนที่ตกระหว่างปี อิทธิพลของน้ำทะเล การระเหย การดูดซึมโดยพืช รวมถึงการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ เช่นการสูบน้ำใต้ดิน การระบายน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ เป็นต้น โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับน้ำใต้ดินในบริเวณพื้นที่ที่ศึกษามากที่สุดคือปริมาณน้ำฝน หากอยู่ในช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม จะมีปริมาณน้ำใต้ดินมากทำให้ค่าระดับน้ำใต้ดินมีค่าสูงตามไปด้วย สำหรับทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยแห่งนี้ หากพิจารณาจากการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลา โดยสังเกตจากตำแหน่งของบ่อสังเกตการณ์และระดับน้ำใต้ดิน หากบ่อใดมีค่าระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าก็จะไหลไปยังบ่อซึ่งมีค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่า เนื่องจากสถานที่กำจัดมูลฝอยมีลักษณะเป็นเนินสูงกว่าพื้นที่อื่นที่อยู่รอบ ๆ ส่วนทางด้านทิศเหนือเป็นที่ราบลุ่มและมีคลองน้ำไหลผ่าน ทำให้น้ำใต้ดินส่วนใหญ่ไหลไปรวมกันด้านทิศเหนือ รายละเอียดของเส้นระดับน้ำใต้ดิน (Head equipotential lines) แสดงในภาพที่ 20 สำหรับวิธีการหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ดังแสดงในภาคผนวก ข

3. ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์

การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 4 บ่อ คือ BH-1, BH-2, BH-3 และ BH-4 (ภาพที่ 10) ตั้งแต่ช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ผลการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน EPA 524.2 โดยบริษัทโกซุโคชัน จำกัด (จังหวัดสมุทรปราการ) แสดงในตารางที่ 17, 18 และ 19 สำหรับ calibration curve แสดงในภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน วันที่: 14-17 มิถุนายน 2548
(หน่วยความเข้มข้น: $\mu\text{g/L}$)

ลำดับ	Volatile Organic Compounds (VOCs)	มาตรฐาน น้ำใต้ดิน	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
1	Benzene	5	<5	11.5	<5	<5
2	Carbon tetrachloride	5	<5	<5	<5	<5
3	1, 2 - Dichloroethane	5	<5	10	<5	<5
4	1, 1 - Dichloroethylene	7	<5	713.5	<5	<5
5	cis - 1, 2 Dichloroethylene	70	<5	7,395.5	<5	<5
6	trans - 1, 2 - Dichloroethylene	100	<5	216.5	<5	<5
7	Dichloromethane	5	<5	7.5	<5	<5
8	Ethylbenzene	700	<5	5.5	<5	<5
9	Styrene	100	<5	<5	<5	<5
10	Tetrachloroethylene	5	<5	<5	<5	<5
11	Toluene	1,000	<5	23	<5	<5
12	Trichloroethylene	5	<5	16,525	<5	<5
13	1,1,1 - Trichloroethane	200	<5	<5	<5	<5
14	1,1,2 - Trichloroethane	5	<5	20	<5	<5
15	Total Xylenes	10,000	<5	16.5	<5	<5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 17 พบว่าบ่อสังเกตการณ์ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นจำนวนมากคือบ่อ BH-2 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับบ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอยมากที่สุด สำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) มีหลายชนิดได้แก่ (1) Benzene (2) 1, 2 - Dichloroethane (3) 1, 1 - Dichloroethylene (4) cis - 1, 2 Dichloroethylene (5) trans - 1, 2 - Dichloroethylene (6) Dichloromethane (7) Trichloroethylene และ (8) 1,1,2 - Trichloroethane โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดคือสาร Trichloroethylene (TCE) มีความเข้มข้นเท่ากับ 16,525 มก.ก./ลิตร ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย กำหนดไว้ไม่เกิน 5 มก.ก./ลิตร

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน วันที่: 22-24 กุมภาพันธ์ 2549
(หน่วยความเข้มข้น: $\mu\text{g/L}$)

ลำดับ	Volatile Organic Compounds (VOCs)	มาตรฐาน น้ำใต้ดิน	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
1	Benzene	5	<5	<5	<5	<5
2	Carbon tetrachloride	5	<5	<5	<5	<5
3	1, 2 - Dichloroethane	5	<5	<5	<5	<5
4	1, 1 - Dichloroethylene	7	<5	148	<5	<5
5	cis - 1, 2 Dichloroethylene	70	<5	7,753	<5	<5
6	trans - 1, 2 - Dichloroethylene	100	<5	364	<5	<5
7	Dichloromethane	5	<5	<5	<5	<5
8	Ethylbenzene	700	<5	<5	<5	<5
9	Styrene	100	<5	<5	<5	<5
10	Tetrachloroethylene	5	<5	<5	<5	<5
11	Toluene	1,000	<5	<5	<5	<5
12	Trichloroethylene	5	<5	8,126	<5	<5
13	1,1,1 - Trichloroethane	200	<5	<5	<5	<5
14	1,1,2 - Trichloroethane	5	<5	<5	<5	<5
15	Total Xylenes	10,000	<5	<5	<5	<5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 18 พบว่าบ่อสังเกตการณ์ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นจำนวนมากคือบ่อ BH-2 สำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) มีหลายชนิดได้แก่ (1) 1, 1 - Dichloroethylene (2) cis - 1, 2 Dichloroethylene (3) trans - 1, 2 - Dichloroethylene และ (4) Trichloroethylene โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดคือสาร TCE มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 126 มก.ก./ลิตร แต่ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจพบในตารางที่ 18 มีค่าต่ำกว่าในตารางที่ 17 เกือบทุกชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการเจือจางจากปริมาณน้ำฝน

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในแหล่งน้ำใต้ดิน วันที่: 30 มีนาคม 2549(หน่วยความเข้มข้น: $\mu\text{g/L}$)

ลำดับ	Volatile Organic Compounds (VOCs)	น้ำชะมูล- ฝอย	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
1	Benzene	<5	<5	<5	<5	<5
2	Carbon tetrachloride	<5	<5	<5	<5	<5
3	1, 2 - Dichloroethane	<5	<5	<5	<5	<5
4	1, 1 - Dichloroethylene	<5	<5	90.8	<5	<5
5	cis - 1, 2 Dichloroethylene	<5	<5	8,623	<5	<5
6	trans - 1, 2 - Dichloroethylene	<5	<5	145	<5	<5
7	Dichloromethane	<5	<5	<5	<5	<5
8	Ethylbenzene	<5	<5	<5	<5	<5
9	Styrene	<5	<5	<5	<5	<5
10	Tetrachloroethylene	<5	<5	<5	<5	<5
11	Toluene	<5	<5	<5	<5	<5
12	Trichloroethylene	<5	<5	10,409	<5	<5
13	1,1,1 - Trichloroethane	<5	<5	<5	<5	<5
14	1,1,2 - Trichloroethane	<5	<5	<5	<5	<5
15	Total Xylenes	<5	<5	<5	<5	<5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 19 ด้วย GCMS ซึ่งเป็นการ scan สาร VOCs 15 ชนิด ตามมาตรฐานน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย พบว่าบ่อสังเกตการณ์ที่มีการปนเปื้อนสาร VOCs มากสุด คือ บ่อ BH-2 สำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินและพบบ่อที่สูงสุด ได้แก่ (1) 1, 1 - Dichloroethylene (2) cis - 1, 2 Dichloroethylene (3) trans - 1, 2 - Dichloroethylene และ (4) Trichloroethylene โดยสารที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด คือ สาร TCE มีความเข้มข้นเท่ากับ 10,409 มก.ก./ลิตร แต่ความเข้มข้นที่ตรวจพบในตารางที่ 19 มีค่าเฉลี่ยมากกว่าผลจากการตรวจวัดในตารางที่ 18 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดลงของระดับน้ำใต้ดิน ส่วนผลการตรวจวัดสาร VOCs จากน้ำชะมูลฝอยในตารางที่ 19 พบว่าทุกชนิดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีพิษสัมผัสกับบรรยากาศจึงอาจเกิดการระเหยออกสู่อากาศจนหมด สำหรับผลการตรวจวัดสาร VOCs จากน้ำใต้ดินในบ่อสังเกตการณ์ทั้งสี่บ่อคือ

BH-1, BH-2, BH-3 และ BH-4 พบว่าความเข้มข้นในแต่ละบ่อมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากตำแหน่งของแต่ละบ่ออยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนไม่เท่ากัน โดยบ่อ BH-2 ซึ่งอยู่ติดกับบ่อรับน้ำชะมูลฝอยและกองมูลฝอยมากที่สุด จึงตรวจพบความเข้มข้นของสาร VOCs ชนิดต่าง ๆ มากกว่าบ่อสังเกตการณ์อื่น ๆ

สรุปผลการวิเคราะห์สาร VOCs จากน้ำใต้ดินในบ่อสังเกตการณ์ทั้งสี่บ่อคือ BH-1, BH-2, BH-3 และ BH-4 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2548 ถึงเดือนมีนาคม 2549 พบว่าสาร VOCs ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดคือสาร TCE รองลงมาได้แก่สาร cis - 1, 2 Dichloroethylene และ 1, 1 - Dichloroethylene โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 8,126-16,525 ug/L, 7,395.5- 8,623 ug/L และ 90.8 - 713.5 ug/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาโดยมณิรัตน์ (2549) ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากน้ำชะมูลฝอยในบ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอย มีความเข้มข้นของ TCE สูงที่สุด รองลงมาคือ Benzene, Toluene โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 4.211- 6.310 mg/L, 0.234 - 0.379 mg/L และ 1.23-1.348 ug/L ตามลำดับ ส่วน Ethylbenzene และ O-xylene ไม่พบในน้ำชะมูลฝอย จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สาร VOCs จากสถานที่กำจัดมูลฝอยเดียวกัน และมีช่วงเวลาการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน แต่มีจุดเก็บตัวอย่างต่างกันคือ จากน้ำใต้ดินและจากน้ำชะมูลฝอย พบว่าทั้งสองกรณีมีลักษณะเหมือนกันคือ สาร VOCs ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดได้แก่สาร TCE ส่วนสาร VOCs ชนิดอื่น ๆ พบว่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองแหล่งมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของสาร VOCs แต่ละชนิด และคุณสมบัติของตัวกลางที่สาร VOCs เคลื่อนที่ผ่าน

4. การประเมินการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Model

จุดประสงค์ของแบบจำลองนี้ เพื่อประเมินการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน โดยแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ระดับน้ำใต้ดิน โดยใช้เส้นชั้นความสูงของระดับน้ำ (contours of hydraulic head) ทิศทางการไหล โดยใช้ particle pathlines และ velocity vectors เป็นต้น ซึ่งมีสมมติฐานคือเป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นชั้นน้ำใต้ดินแบบเปิด (Unconfined groundwater flow) เพียงชั้นเดียว (1 Layer) ผ่านตัวกลางหรือชั้นดินที่มีลักษณะพรุน (Porous Media) ที่มีลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาเหมือนกัน (homogeneous, isotropy) มีขอบเขตกว้าง 1.50 กม. ยาว 2.0 กม. และความหนาประมาณ 10.50 เมตรวัดจากระดับพื้นดินลงไป ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจากทิศใต้ไป

ทางทิศเหนือ และเป็นการจำลองในสภาวะคงที่ (Steady State flow) มีระยะเวลาการประเมินในแบบจำลอง 50 ปี นับจากปีที่สถานที่กำจัดมูลฝอยเริ่มต้นใช้งาน

4.1 การออกแบบข้อมูลและโครงสร้างข้อมูล ประเภทของข้อมูล แบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

4.1.1 ข้อมูลเชิงรูปภาพ (Graphical Data) เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงค่าพิกัดตำแหน่งจริงบนพื้นผิวโลกของสิ่งต่าง ๆ เช่น ค่าละติจูด – ลองจิจูด (Latitude-Longitude) ค่า UTM (Universal Transverse Mercator) ข้อมูลพิกัดเหล่านี้จะถูกบันทึกและเรียบเรียงทางกราฟิกเป็นแผนที่หรือที่เรียกว่าสัญลักษณ์ทางกราฟิก (Graphic Features) ซึ่งได้แก่ จุด (Point) เส้น (Line) รูปหลายเหลี่ยม (Polygon)

4.1.2 ข้อมูลเชิงบรรยาย (Attribute Data) เป็นข้อมูลที่แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับสัญลักษณ์ทางกราฟิก เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่กำจัดมูลฝอยจะมีข้อมูลที่ระบุสัญลักษณ์ทางกราฟิกบนแผนที่เป็นชนิดรูปหลายเหลี่ยมที่แสดงขอบเขตของสถานที่กำจัดมูลฝอย

4.2 ชนิดของข้อมูลที่บันทึก จะจัดแบ่งการบันทึกข้อมูลออกเป็น 3 ชนิด คือ

4.2.1 การบันทึกข้อมูลแบบพื้นที่ (Area Features) ได้แก่ ข้อมูลอุทกธรณีวิทยาข้อมูลขอบเขตสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย ข้อมูลของเขตการปกครอง ข้อมูลแสดงประเภทการใช้ที่ดิน เป็นต้น

4.2.2 การบันทึกข้อมูลแบบเส้น (Line Features) ได้แก่ ข้อมูลโครงข่ายแม่น้ำ ข้อมูลโครงข่ายถนน ข้อมูลแสดงลักษณะความสูงต่ำของพื้นดิน เป็นต้น

4.2.3 การบันทึกข้อมูลแบบจุด (point Features) ได้แก่ ข้อมูลแสดงตำแหน่งบ่อตรวจสอบคุณภาพน้ำ, ข้อมูลแสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำ เป็นต้น

4.3 รายละเอียดการออกแบบข้อมูล ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต้องรวบรวมนี้ เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างของฐานข้อมูล สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ ดังนี้

4.3.1 สถานที่กำจัดมูลฝอย

4.3.2 บ่อน้ำใต้ดิน

4.3.3 อุทกธรณีวิทยาและชั้นน้ำใต้ดิน

4.3.4 ขอบเขตการปกครอง

4.3.5 ลักษณะภูมิประเทศ

4.4 การสร้างฐานข้อมูล

4.4.1 การอ้างอิงระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ เป็นการกำหนดรูปแบบของการแสดงพิกัดทางภูมิศาสตร์และมาตรฐานของการอ้างอิงพิกัดภายในระบบ โดยระบบที่จัดทำขึ้นนี้มีการอ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ ดังนี้

ก. การอ้างอิงพิกัด (Geodetic Datum Open GIS.WGS 1984)

ข. รูปทรงรี (Ellipsoid) ใช้ระบบ WGS 1984

ค. กริด ยูทีเอ็ม เขตกริด 47 ระยะระหว่าง 1,000 เมตร (Grid 1,000 meter UTM

Zone 47)

ง. เส้นโค้งแผนที่ (Projection Transverse Mercator)

จ. พื้นหลักฐานทางดิ่ง ใช้ระดับทะเลปานกลาง (Vertical Datum Mean Sea

Level)

ฉ. พื้นหลักฐานทางราบ ใช้ระบบ WGS 1984 (Horizontal Datum WGS 1984)

ช. หน่วยวัดและรูปแบบของการแสดงค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์

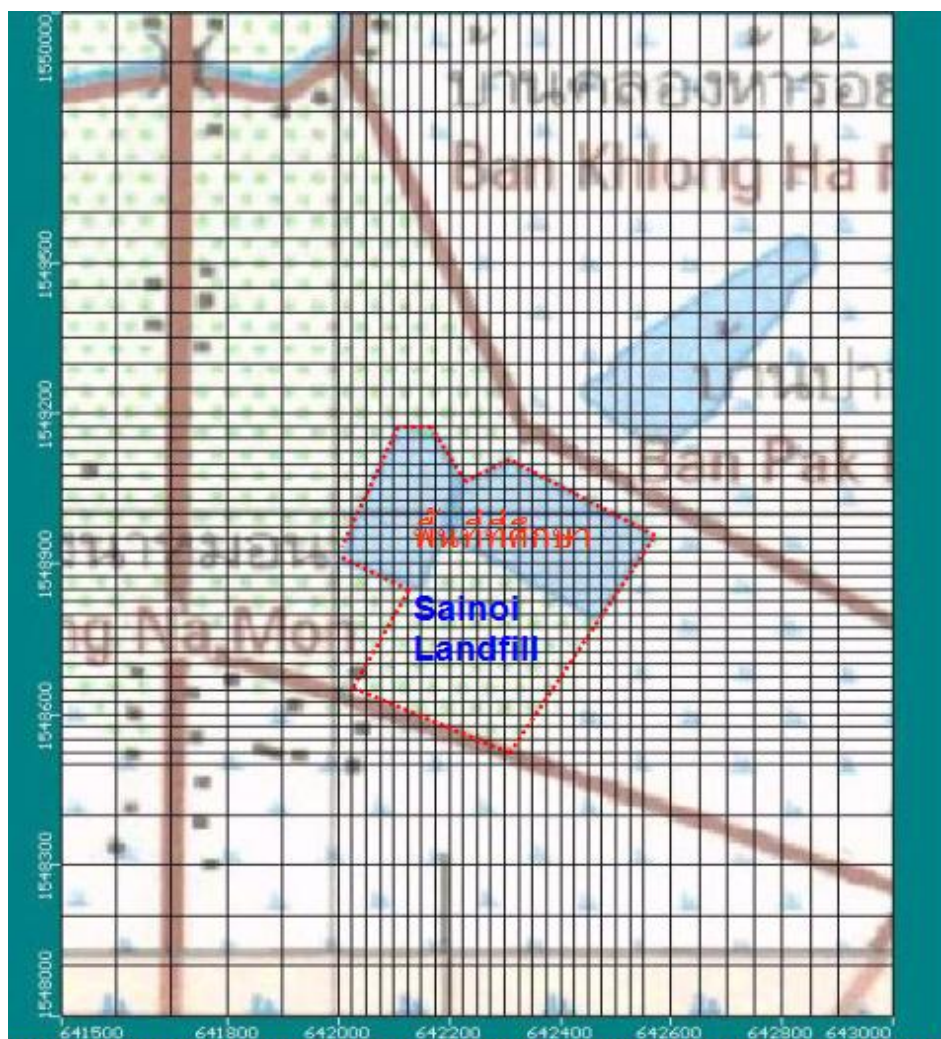
- 1) หน่วยวัดระยะเป็น เมตร
- 2) หน่วยวัดพื้นที่เป็น ตารางเมตร
- 3) หน่วยวัดปริมาตรเป็นลูกบาศก์เมตร
- 4) รูปแบบของการแสดงค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์เป็นแบบ Easting, Northing
- 5) ทศนิยมของค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ใช้ 2 ตำแหน่ง

4.4.2 การนำเข้าข้อมูล หมายถึง การแปลงข้อมูลจากแหล่งข้อมูลเข้าสู่ข้อมูลเชิงตัวเลขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งวิธีนำเข้าข้อมูลนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การนำเข้าข้อมูลเชิงรูปภาพ (Graphical Data) จะใช้ข้อมูลจากแผนที่แสดงลักษณะภูมิประเทศ ขนาดมาตราส่วน 1: 50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ชุด L 7018 ใช้ระบบพิกัด world co-ordinates และ model co-ordinates

ข. การนำเข้าข้อมูลลักษณะประจำ (Attribute Data) จะนำเข้าข้อมูลโดยการพิมพ์เข้าทาง keyboard สำหรับข้อมูลเชิงบรรยาย โดยใช้ Microsoft Excel, Notepad เป็นต้น

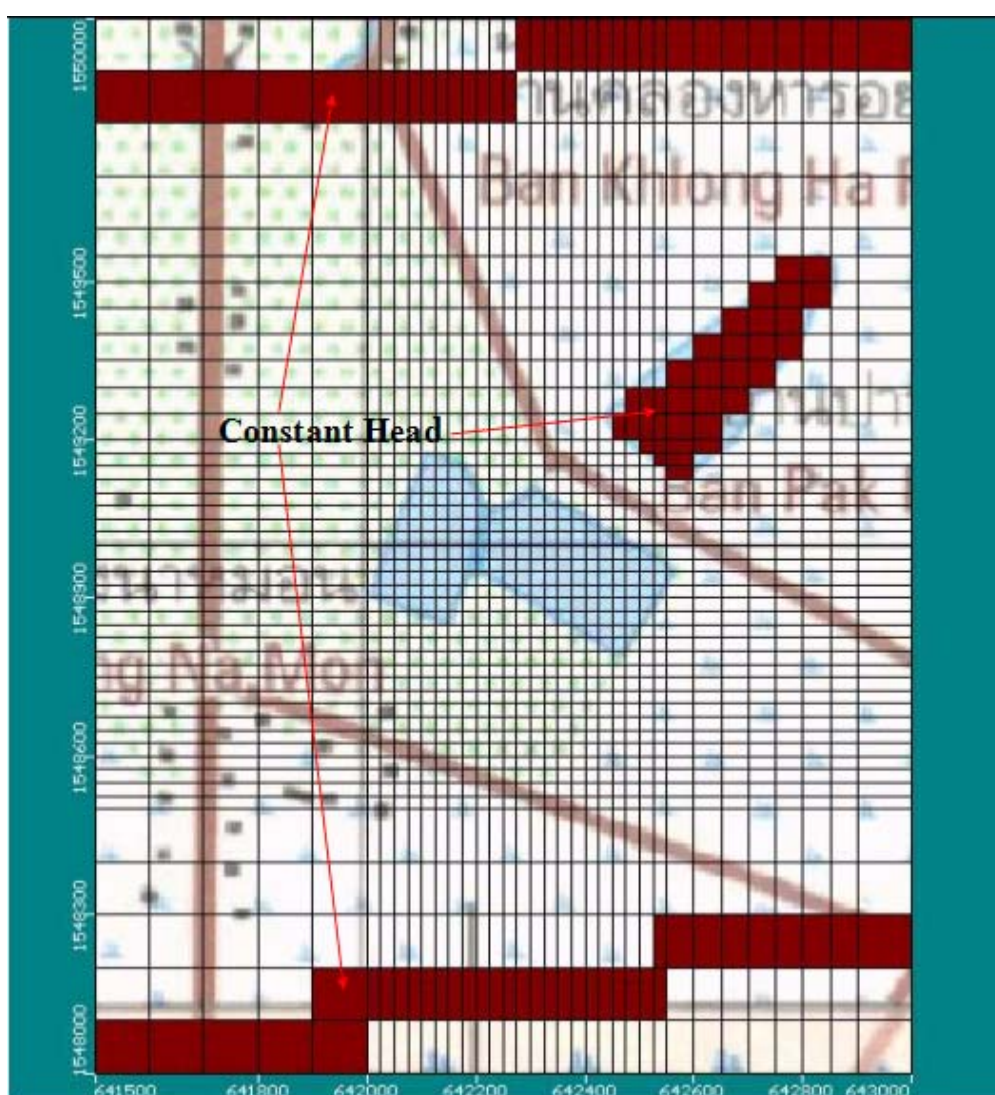
4.5 การออกแบบกริด (Grids Design) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษาได้ออกแบบกริดเป็นแบบจำลอง 3 มิติ โดยแบ่งกริดตามแนวแกน X, Y และ Z เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ เรียกว่า กริดเซลล์ (Grid cells) โดยครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างกว่าขอบเขตพื้นที่ศึกษา ทั้ง 4 ด้าน การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม พื้นผิวกว้าง 1.50 กิโลเมตร ตามแกน X (แนวตะวันตก-ตะวันออก) จากพิกัด 641,500 ถึง 643,000 เมตร ตะวันออก มีความยาว 2.00 กิโลเมตร ตามแกน Y (แนวเหนือ-ใต้) จากพิกัด 1,548,000 ถึง 1,550,000 เมตรเหนือ และแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นตาราง โดยขนาดของตารางในพื้นที่ที่ศึกษา มีขนาดคงที่เท่ากับ 25×25 ตารางเมตร (ภายในบริเวณเส้นประ) ดังแสดงในภาพที่ 18 ส่วนขนาดตารางนอกพื้นที่ศึกษามีขนาดไม่คงที่ โดยมีขนาดตั้งแต่ 50×50 ตารางเมตร จนถึงขนาด 100×100 ตารางเมตร โดยขนาดของแต่ละตารางจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษามากขึ้น การจำลองชั้นน้ำใต้ดินของพื้นที่ศึกษานั้นจะจำลองชั้นน้ำ 1 ชั้น (Layer) ดังนั้นจำนวนชั้นในแบบจำลอง 3 มิติ คือ 1 ชั้น (แกน Z) จำนวนกริดเซลล์ที่มีอยู่ทั้งหมดเท่ากับ 1,575 กริดเซลล์ ($35 \text{ แถว} \times 45 \text{ สดมภ์} \times 1 \text{ ชั้น}$)



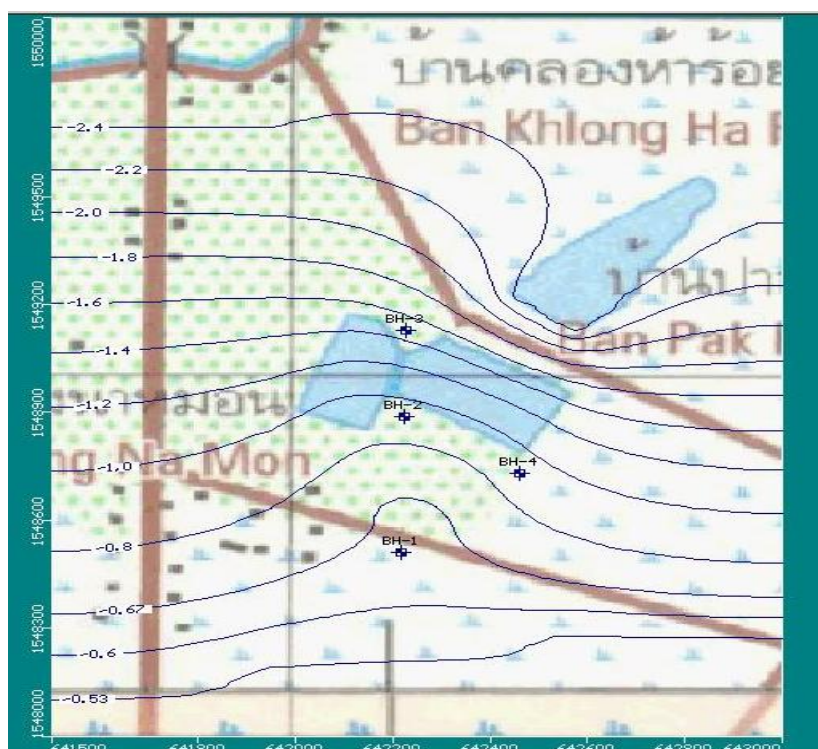
ภาพที่ 18 การแบ่งกริดเซลล์ (Grid cells) ในพื้นที่ที่ศึกษา

4.6 ขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Conditions) ขอบเขตของแบบจำลองและขอบเขตของชั้นน้ำจะถูกกำหนดให้เหมาะสมลงในแบบจำลอง โดยพิจารณาจากข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาของสถานที่ที่จำลองผล พบว่า ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของระบบชั้นน้ำใต้ดิน สามารถแบ่งชั้นน้ำได้ 8 ชั้นน้ำ ซึ่งแต่ละชั้นน้ำจะถูกแบ่งด้วยชั้นดิน แต่ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้กำหนดให้แบบจำลองเป็นแบบชั้นเดียว โดยมีสมมติฐานว่าชั้นดินทั้งหมดมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทั้งชั้น (Homogeneous, isotropy) และมีความลึกจากระดับพื้นดินไม่เกิน -10.50 เมตร โดยสาเหตุที่ใช้ความลึกในระดับนี้ เนื่องจากสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ จากน้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินไปในแนวราบ เพราะชั้นดินในบริเวณพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ต่ำ ดังนั้นจึงเป็นระยะที่เหมาะสมและพอเพียงสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

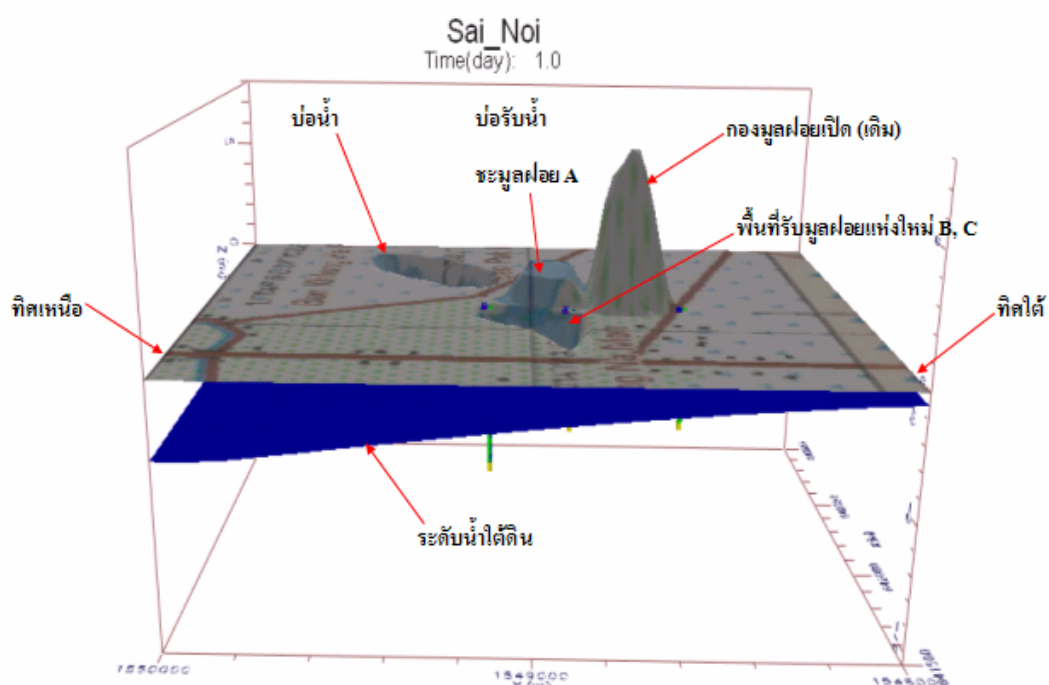
การกำหนดขอบเขตของระดับน้ำคงที่ (Constant Head) ในเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ (Active cell) จะกำหนดตามค่าระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยและทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินที่ได้จากการสำรวจและประเมินภาคสนาม โดยบริเวณทางทิศใต้ของแบบจำลอง (แถวที่ 43 ถึง 45) มีค่า -0.50 เมตร วัดจากระดับพื้นดิน กำหนดให้ขอบเขตทางเหนือ (แถวที่ 1 ถึง 2) เป็นขอบเขตของระดับน้ำคงที่ มีค่าต่ำกว่าพื้นดินประมาณ -3.00 เมตร และกำหนดให้ขอบเขตบ่อน้ำบริเวณบ้านคลองห้าร้อย (แถวที่ 6 ถึง 15 และคอลัมน์ที่ 23 ถึง 33) เป็นขอบเขตของระดับน้ำคงที่ มีค่าต่ำกว่าพื้นดินประมาณ -2.50 เมตร แสดงในภาพที่ 19 ดังนี้



ภาพที่ 19 แสดงขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant Heads)



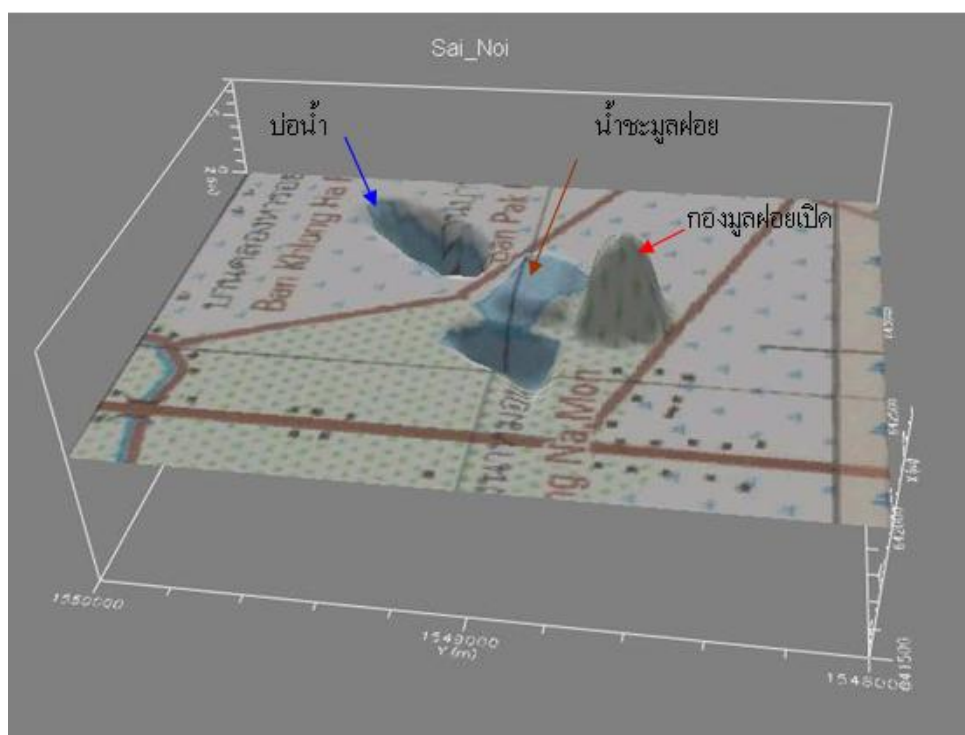
ภาพที่ 20 แสดงเส้นระดับน้ำใต้ดิน (Head Equipotential Lines)



ภาพที่ 21 แสดงระดับน้ำใต้ดินและทิศทางการไหลแบบสามมิติ

จากภาพที่ 20 และ 21 เป็นผลการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยที่ศึกษาด้วยแบบจำลอง Visual MODFLOW โดยภาพที่ 20 แสดงให้เห็นถึงเส้นของระดับน้ำใต้ดิน (Head Equipotential Lines) ในแต่ละจุด ซึ่งในแต่ละเส้นจะมีค่าระดับน้ำเท่ากัน ส่วนภาพที่ 21 เป็นภาพสามมิติแสดงระดับน้ำใต้ดิน โดยด้านซ้ายของภาพเป็นทิศเหนือ ด้านขวาเป็นทิศใต้ ด้านหลังที่ตั้งฉากกับภาพเป็นทิศตะวันออก จากภาพจะพบว่าน้ำใต้ดินมีทิศทางการไหลจากด้านทิศใต้ไปยังทิศเหนือเช่นเดียวกับผลการประเมินด้วยข้อมูลจากบ่อสังเกตการณ์

4.7 ระดับด้านบนและระดับด้านล่าง (Top and Bottom) ข้อมูลระดับพื้นดินในพื้นที่ศึกษาได้มาจากข้อมูลระดับพื้นดินจากกรมแผนที่ทหาร และระดับพื้นดินนอกพื้นที่ศึกษาได้มาจากแผนที่ภูมิประเทศ 1: 50,000 ซึ่งมีค่าระดับพื้นดินเฉลี่ยประมาณ 2 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง สำหรับในแบบจำลองที่ศึกษานี้กำหนดให้ระดับอ้างอิงที่พื้นผิวถนนมีค่าเป็นศูนย์เมตร ระดับที่อยู่ต่ำกว่าอ้างอิงจะมีค่าเป็นลบ ส่วนระดับที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิงจะมีค่าเป็นบวก ด้านบนของแบบจำลองกำหนดให้เปิดสู่บรรยากาศรับการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำจากน้ำฝน ส่วนขอบเขตด้านล่างของแบบจำลองมีความหนาเท่ากันตลอดทั้งแบบจำลองคือ 10.5 เมตร ระดับด้านบนของแบบจำลองแสดงในภาพที่ 22 ดังนี้



ภาพที่ 22 แสดงระดับพื้นดินในพื้นที่ศึกษาและขอบเขตด้านล่างของแบบจำลอง

4.8 ชนิดของชั้นน้ำ (Aquifer Type) จะถูกระบุในแต่ละชั้นน้ำ ชั้นน้ำทั้งหมดในแบบจำลองกำหนดให้เป็นชั้นน้ำไร้แรงดัน (Unconfined Aquifer) เนื่องจากความลึกของบ่อสังเกตการณ์มีค่าประมาณ -10.50 เมตร จากระดับพื้นดิน ซึ่งยังไม่ถึงระดับชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

4.9 ความพรุน (Porosity) ในการคำนวณการไหลของน้ำ (Visual MODFLOW) จะไม่นำค่าความพรุนของชั้นดินไปใช้ แต่ในการคำนวณการเคลื่อนย้ายมวลสารและหาความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคในน้ำใต้ดิน (Visual MT3DMS) ในเบื้องต้นกำหนดให้ความพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.35 ตลอดทั้งแบบจำลอง เพราะลักษณะดินในพื้นที่ที่ศึกษาส่วนใหญ่ประกอบด้วยดินเหนียวและดินทรายละเอียด ซึ่งมีความพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.35-0.60 (Freeze and Cherry, 1979; Sanders, 1998)

4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักจำเพาะ (Specific Storage) เป็นตัวแปรที่จำเป็นต้องใส่ในแต่ละช่องของโปรแกรม Visual MODFLOW ซึ่งค่านี้สามารถหาได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกัก (Storage Coefficient) ของแต่ละช่องหารด้วยความหนาของชั้นน้ำในช่องนั้นๆ โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักได้มาจากการสูบทดสอบ (Pumping Test) จะเป็นค่าที่มีช่วงกว้างมากจากการสูบทดสอบและรวบรวมข้อมูลพบว่าชั้นน้ำใต้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักในช่วง 1.4×10^{-5} ถึง 1.89×10^{-3} และข้อมูลจาก JICA (1995) พบว่า สำหรับชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักควรจะอยู่ระหว่าง 1.0×10^{-5} ถึง 1.0×10^{-3} สำหรับดินทุกประเภท และอยู่ระหว่าง 5.0×10^{-5} ถึง 1.0×10^{-2} สำหรับชั้นที่ให้น้ำมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกัก ในแต่ละชั้นน้ำ ยกเว้นชั้นดินเหนียวกรุงเทพ สมมติให้เท่ากับ 1.0×10^{-3} และค่านี้เองสามารถเปลี่ยนไปเป็นค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักจำเพาะโดยการหารด้วยความหนาของชั้นน้ำนั้นๆ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักจำเพาะของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ สามารถคำนวณได้จากสมการ (JICA, 1995)

$$S_s = m_v \times \frac{\gamma_w}{10} \quad (11)$$

เมื่อ S_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักจำเพาะ (1/ม.)

m_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบอัดตัวของดิน (ตร.ชม./กก.)

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (ก./ลบ.ซม.)

ซึ่งค่า m_v หาได้จากทดสอบการยุบอัดตัวของดิน

เมื่อพิจารณาค่า m_v ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.75×10^{-2} ตร.ซม./กก. ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักน้ำเฉพาะจะเท่ากับ 6.75×10^{-2} ต่อเมตร (JICA, 1995)

4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการทำแบบจำลอง สามารถหาได้จากการสุบทดสอบในสนาม โดยค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านคำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity)หารด้วยความยาวของท่อกรอง ซึ่งการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำนี้โดยใช้สมการของ Logan (1964) ดังนี้

$$T = 1.22 \times S_C \quad (12)$$

$$S_C = Q/s \quad (13)$$

เมื่อ T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity) [L^2/T]

S_C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความจุจำเพาะ (Specific Capacity) [L^2/T]

Q คือ อัตราการสูบน้ำ (Pumping Rate) [L^3/T]

s คือ ระยะน้ำลดที่เกิดขึ้นในบ่อ, (Drawdown) [L]

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (BK-Clay) 4.1×10^{-5} ลบ.เมตร/วัน (อ้างอิง JICA, 1995)

4.12 ระดับน้ำเริ่มต้น (Initial Heads) ค่าระดับน้ำเริ่มต้นของชั้นน้ำ จะใช้ค่าระดับน้ำได้ดินของชั้นน้ำนั้น ๆ ที่วัดได้ในสนาม จากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในพื้นที่ศึกษา ในพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูลของบ่อสังเกตการณ์ จะใช้การวิเคราะห์แบบจำลองในสภาวะคงที่ (Steady state) และการวิเคราะห์แบบจำลองในสภาวะไม่คงที่ (Transient state) ค่าระดับน้ำเริ่มต้นในแบบจำลองที่ทำการศึกษาค้างนี้จะใช้ค่าประมาณ -0.50 เมตร วัดจากระดับพื้นดินลงไป

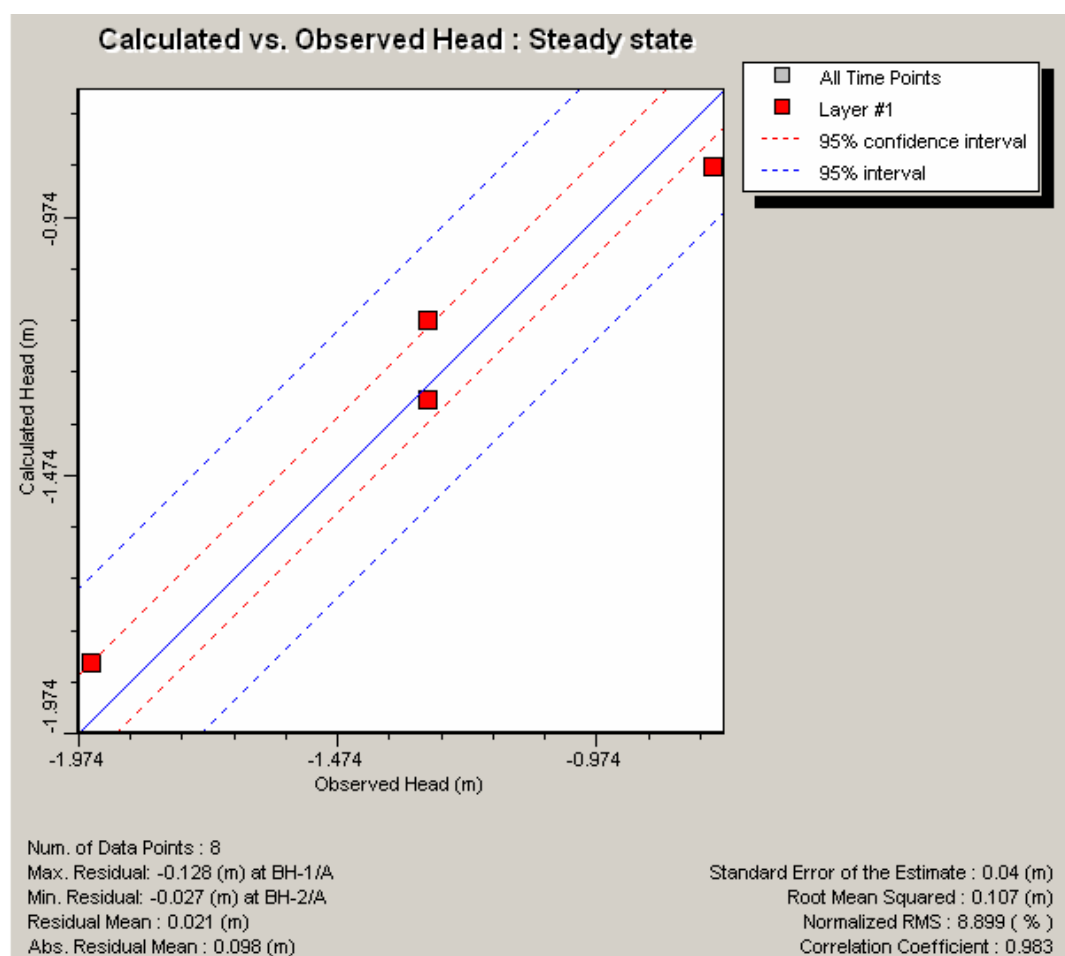
4.13 อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate) การเติมน้ำสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็นการเติมน้ำจากปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ผ่านดินชั้นบนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน อัตราการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำใต้ดินจากปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นดิน อาศัยข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยและข้อมูลคุณสมบัติดิน การใช้ที่ดินและลักษณะทางธรณีสัณฐาน บริเวณที่มีการเติมน้ำเข้าสู่ระบบจะถูกกำหนดให้เป็นบริเวณที่อยู่ขอบเขตของชั้นน้ำ อัตราการเติมน้ำประมาณ 1-15 % ของปริมาณฝนรายปี พบว่าอัตราความเหมาะสมในการเติมน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (K_x , K_y) ของชั้นน้ำหรือพื้นที่เป้าหมายเป็นสำคัญ โดยอัตราการเติมน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัมประสิทธิ์ การยอมให้น้ำซึมผ่าน

4.14 แม่น้ำ (River) ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ ระดับท้องน้ำ ความกว้างแม่น้ำ ความยาวแม่น้ำ ระดับน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวดิ่งของชั้นตะกอนท้องน้ำ แม่น้ำในพื้นที่ศึกษาจะเป็นลำคลองสายเล็ก ๆ ซึ่งในการศึกษานี้จะกำหนดให้เป็นค่าระดับน้ำคงที่ (Constant Head)

4.15 อัตราการใช้น้ำใต้ดิน (Pumping Rate) การใช้น้ำใต้ดินอาศัยข้อมูลการสูบน้ำจากบ่อขออนุญาตใช้น้ำบาดาล จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและข้อมูลบ่อบาดาลจากหน่วยงานราชการต่าง ๆ ข้อมูลการใช้น้ำใต้ดินเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญที่สุดข้อมูลหนึ่ง ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาตำแหน่งของบ่อ ความลึกท่อกรอง วันที่ขออนุญาตใช้ วันที่หมดอายุขออนุญาต ปริมาณน้ำที่ขออนุญาต เป็นหลัก สำหรับอัตราการใช้น้ำใต้ดินในแบบจำลองที่ศึกษานี้จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจาก เป็นการสูบน้ำใต้ดินจากชั้นน้ำต่างกันและมีจำนวนบ่อสูบน้ำไม่มากนัก รวมทั้งมีอัตราการสูบค่อนข้างต่ำ ซึ่งไม่มีผลต่อแบบจำลอง

4.16 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง การปรับค่าตัวแปรในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบแนวคิดของแบบจำลอง การแบ่งชั้นน้ำ ขอบเขตของแบบจำลอง ตัวแปรหลักของการปรับค่าตัวแปรในแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ขอบเขตของแบบจำลอง อัตราการเติมน้ำ การเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสถานะคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 23 เป็นการปรับค่าตัวแปรโดยอาศัยข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่วัดได้จริงจากบ่อสังเกตการณ์ทั้งสี่บ่อ (Observed Head) เปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากการคำนวณ (Calculated Head) ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW ผลการจำลองพบว่ารูปแบบการไหลของน้ำใต้ดินที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model) ซึ่งจากการปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Residual Mean) 0.021 เมตร มีค่าความ

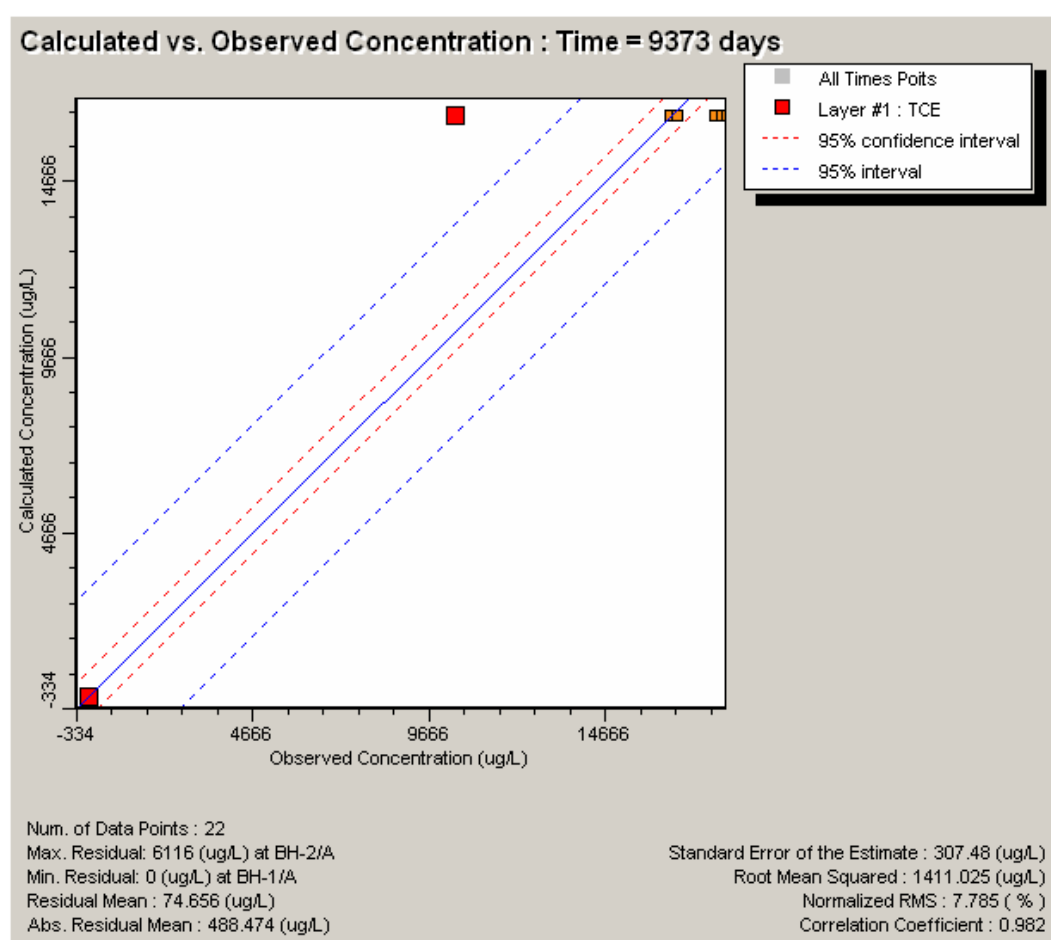
คลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (Absolute Residual Mean) 0.098 เมตร มีค่ารากกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Squared) 0.107 เมตร และมีค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ประมาณ 8.899 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้คือต้องต่ำกว่า 10 % การวิจัยครั้งนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K) ที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง คือ 1.5×10^{-4} ซม./วินาที ตลอดทั้งแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพดินแล้วจัดเป็นดินประเภทดินตะกอน (Silty) ซึ่งมีค่า K ระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-3} ซม./วินาที (ตารางที่ 10)



ภาพที่ 23 ผลการปรับค่าตัวแปรแบบจำลองในสถานะคงตัว โดยโปรแกรม MODFLOW

การเปรียบเทียบแบบจำลองการแพร่กระจายของสาร TCE ดังแสดงในภาพที่ 24 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์ (Observed Concentration) ทั้งสี่บ่อ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 กับผลการคำนวณความเข้มข้น (Calculated Concentration) ของสาร TCE ด้วยโปรแกรม Visual MT3DMS โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Dispersion coefficient, D) เพื่อให้ความเข้มข้นของสาร TCE ในแบบจำลอง

สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดจากบ่อสังเกตการณ์ให้มากที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายนำไปใช้ในการคำนวณดังสมการที่ 10 และสมการในภาคผนวก ฅ การปรับเทียบครั้งนี้ทำให้ทราบค่า Longitude Dispersivity จากการปรับเทียบแบบจำลอง คือ 40 เมตร ตลอดทั้งแบบจำลอง มีความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนประมาณ 7.785 % ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ของแบบจำลองต้องต่ำกว่า 10 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ พชรพร (2548) ซึ่งเป็นการประเมินการแพร่กระจายของคลอไรด์ในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล ได้ค่า Longitude Dispersivity 30 เมตร ตลอดทั้งแบบจำลอง

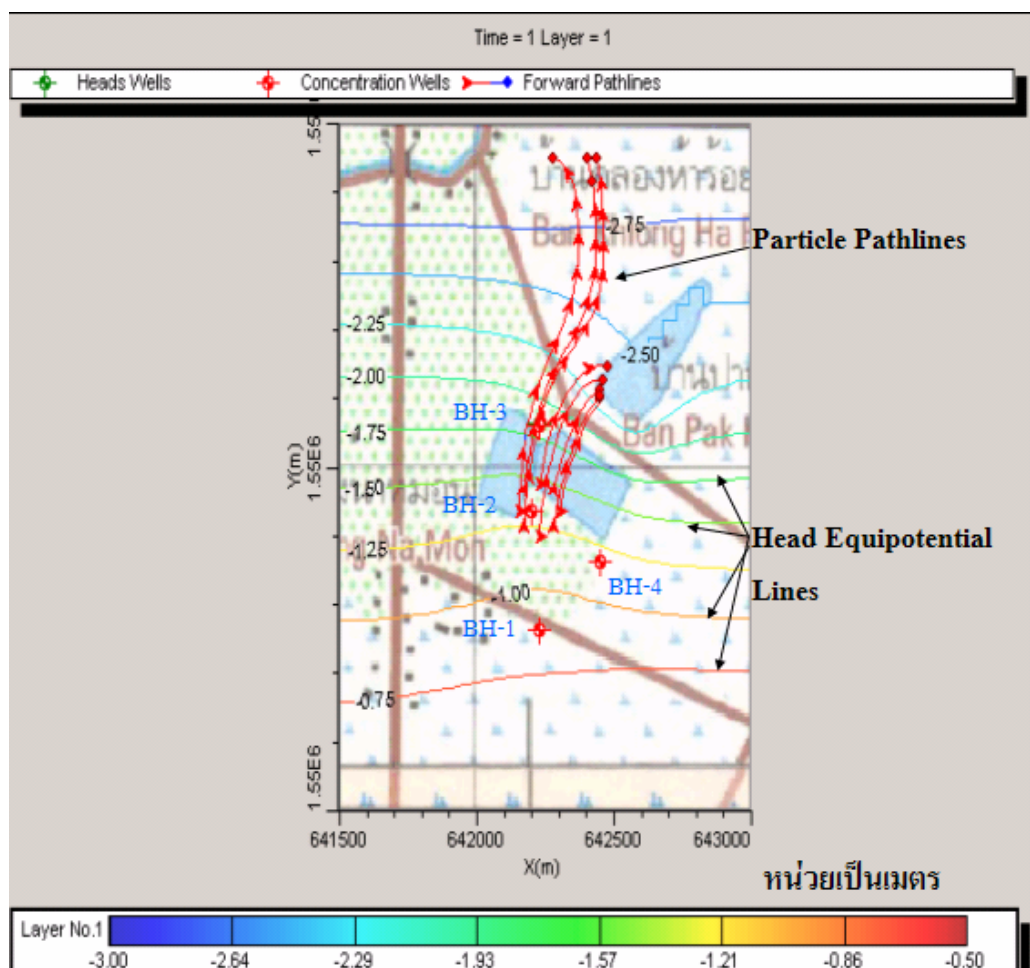


ภาพที่ 24 การปรับเทียบแบบจำลองการแพร่กระจายของสาร TCE
โดยโปรแกรม MT3DMS

5. การประเมินการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินโดยโปรแกรม Visual MODFLOW

Model

ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากการสำรวจภาคสนามจากบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 4 บ่อ ของสถานที่กำจัดมูลฝอยจะถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลอง Visual MODFLOW เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่คำนวณได้จากแบบจำลอง หลังจากที่ได้ทำการปรับเทียบ (calibration) แบบจำลองแล้ว จะใช้แบบจำลองดังกล่าวคำนวณหาทิศทางและระยะทางการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยที่เวลาต่าง ๆ เมื่อสถานที่กำจัดมูลฝอยมีอายุมากขึ้น อาทิเช่น ใน 10, 20, 25 หรือ 50 ปีข้างหน้า ผลการคำนวณจะสามารถแสดงในภาพที่ 25 ดังนี้



ภาพที่ 25 ทิศทางการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินที่เวลา 50 ปี (พ.ศ. 2574)
(MODFLOW)

จากภาพที่ 25 ได้แสดงแนวการไหลของน้ำชะมูลฝอยลงบนแผนที่โดยรอบสถานที่กำจัดมูลฝอย (ตามแนวลูกศร) พบว่าแนวการไหลจะเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนบริเวณกองมูลฝอยใกล้บ่อสังเคราะห์ BH-2 แล้วเคลื่อนที่ผ่านบ่อเก็บน้ำชะมูลฝอย ไปทางทิศเหนือผ่านบ่อสังเคราะห์ BH-3 จากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังบ่อเก็บน้ำบริเวณบ้านคลองห้าร้อย (บ่อดิน) โดยน้ำได้ดินส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อย ๆ และจะหยุดเมื่อมีความเร็วต่ำมาก ๆ ในกรณีที่ไม่มีบ่อดินซึ่งมีระดับน้ำคงที่ต่ำกว่าระดับน้ำได้ดินปกติ อยู่ในเส้นทางการไหลของน้ำได้ดิน จะส่งผลให้เส้นทางการไหลของสารปนเปื้อน (particle pathlines) ทั้งหมดจะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งบ่อดินไปหมด ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทำให้ทราบถึงบริเวณที่มีโอกาสได้รับการปนเปื้อน ถ้ามีการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำได้ดินที่อยู่ใต้หลุมฝังกลบมูลฝอยนั้น

จากข้อมูลบ่อสังเคราะห์น้ำได้ดินต่าง ๆ ได้ติดตั้งตะแกรง (Screen) ที่ความลึกตั้งแต่ -5.0 ถึง -10.50 เมตร จากระดับพื้นดิน จากผลการเจาะสำรวจดินพบว่าชั้นดินส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวปนทรายละเอียด และที่ระดับความลึกประมาณ 7 เมตรพบว่า มีชั้นดินที่มีค่าความนำทางชลศาสตร์ต่ำ ซึ่งสามารถช่วยลดอัตราการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นดินที่อยู่ถัดไปได้ ผลการคำนวณโดยใช้ MODFLOW Model ดังแสดงใน ตารางที่ 20 พบว่าน้ำได้ดินมีอัตราการไหลค่อนข้างต่ำมาก เฉลี่ย 1.25×10^{-6} ซม./วินาที มีค่า Reynolds Number, R_e ต่ำกว่า 1 ซึ่งแสดงว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) (Freeze and Cherry, 1979) และมีทิศทางการไหลจากด้านทิศใต้ไปทางทิศเหนือ

ตารางที่ 20 สรุปผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำได้ดินโดยใช้ Visual MODFLOW Model

รายละเอียด	จำนวน	ที่มา
1. พื้นที่กองมูลฝอย (เดิม)	73,600 ตร.ม.	อุดร (2545)
2. อายุใช้งาน (ถึงปัจจุบัน)	25 ปี	งานวิจัยนี้
3. ลักษณะการไหลของน้ำได้ดิน ความเร็วเฉลี่ย (v)	1.25×10^{-6} ซม./วินาที	งานวิจัยนี้ (MODFLOW)
4. สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K)	1.5×10^{-4} ซม./วินาที	งานวิจัยนี้ (MODFLOW)
5. ทิศทาง	จากด้านทิศใต้ไปทางทิศเหนือ	งานวิจัยนี้ (MODFLOW)

6. ผลการคำนวณการแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) ในน้ำใต้ดิน

6.1 สมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลอง ในการศึกษาการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยในแหล่งน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง MT3DMS ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้ สภาพปัญหาคือน้ำใต้ดินได้รับการปนเปื้อนจากสาร TCE จากน้ำชะมูลฝอย ซึ่งเป็นการปนเปื้อนในรูปสารละลาย (Dissolved-phase, groundwater contaminant plume) แบบต่อเนื่อง (Continuous) ผ่านตัวกลางที่เป็นวัสดุพรุนและอิ่มตัวด้วยน้ำ มีลักษณะเป็น Homogeneous, Isotropic medium มีกลไกการแพร่กระจายสารปนเปื้อนผ่านขบวนการพาและการกระจาย (Contaminant advection, hydrodynamic dispersion) ส่วนกลไกอื่น ๆ เช่น การดูดซับ, การละลาย, การตกตะกอน และการย่อยสลาย เป็นต้น ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีตัวแปรมาก และเป็นขบวนการทางธรรมชาติที่ซับซ้อน ทำให้ขาดข้อมูลที่ชัดเจนและเพียงพอ

กำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration) ของสาร TCE ในบริเวณพื้นที่เท่ากับศูนย์ มก.ก./ลิตร ส่วนแหล่งกำเนิดสารมลพิษกำหนดให้เป็นความเข้มข้นคงที่ (Constant Concentration) อยู่บริเวณตำแหน่ง BH-2 ซึ่งตรวจพบสาร TCE ที่มีความเข้มข้นถึง 16, 525 มก.ก./ลิตร โดยสมมติว่า TCE มีความสามารถในการละลาย (solubility limit) ตลอดช่วงการจำลอง 50 ปี (จนถึงปีพ.ศ. 2574) และไม่ขัดขวางการไหลของน้ำใต้ดิน รวมทั้งไม่มีผลกระทบจากความหนาแน่น สำหรับรูปแบบการไหลจะเป็นแบบสถานะคงที่ รวมทั้งมีการใช้กฎของดาร์ซีด้วย

6.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลแบบคงที่ ของตัวกลางที่เป็นวัสดุพรุนแบบเนื้อเดียวกันในสองมิติ (The partial differential Equation for Steady-State Flow in two-dimensional, homogeneous, isotropic region of flow) ได้แก่ partial differential equation จากสมการของ Laplace (อ้างอิง Freeze and Cherry, 1979) รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข และสมการที่ (9) สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนย้ายมวลของสารปนเปื้อน รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ฉ และสมการที่ (10)

6.3 การเลือกดัชนีสำหรับวิเคราะห์การปนเปื้อน ผู้วิจัยพิจารณาเห็นว่าสมควรเลือกสารไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene, TCE) เป็นดัชนีสำหรับวิเคราะห์การปนเปื้อน ทั้งนี้โดยพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 17, 18 และ 19 และเหตุผลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

6.3.1 การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นไปได้อย่างมากที่จะมาจากการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอย นอกจากนี้ สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และมีการกำหนดค่าที่ยอมรับให้มีได้สูงสุดไว้ในค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)

6.3.2 การใช้สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นดัชนีวัดการปนเปื้อน จะช่วยให้ทราบถึงความรุนแรงของสถานการณ์การปนเปื้อนที่เกิดขึ้นแล้ว และคาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตได้ ทั้งนี้โดยเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดินที่ตรวจวัด และประเมินโดยใช้แบบจำลอง MT3DMS กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ถ้าพบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่เกินค่ามาตรฐาน ก็แสดงว่าสถานการณ์การปนเปื้อนยังไม่รุนแรง

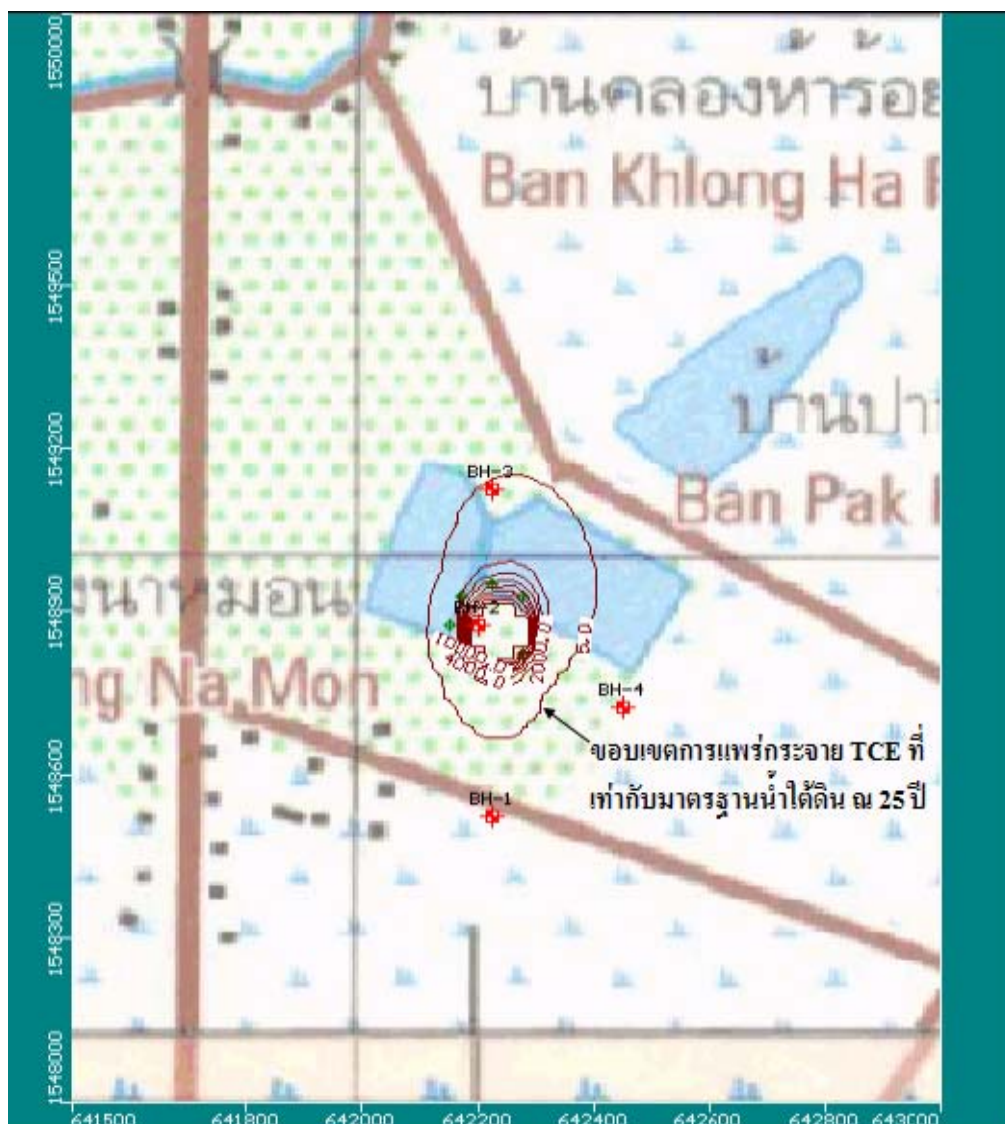
6.3.3 เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีหลายชนิด ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาเลือกสาร TCE ที่ตรวจพบในปริมาณสูงที่สุดในน้ำใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอย โดยเทียบเป็นสัดส่วนกับค่าที่ยอมรับให้มีได้สูงสุดในมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินและเลือกชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่มีสัดส่วนสูงที่สุด

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ ได้ใช้เป็นข้อมูลแหล่งกำเนิดสารมลพิษที่ป้อนเข้าแบบจำลอง MT3DMS ในขณะเดียวกันข้อมูลดังกล่าวจะใช้ประโยชน์ในการปรับเทียบ (calibration) หรือตรวจสอบความถูกต้อง (verification) ของผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เมื่อทราบอายุของสถานที่กำจัดมูลฝอย (ดำเนินการกำจัดมูลฝอยมาแล้ว 25 ปี) ซึ่งในการปรับเทียบแบบจำลองได้คัดเลือกสาร VOCs ที่ได้ตรวจพบในตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยและน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ ได้แก่สาร TCE การคำนวณการแพร่กระจายของสาร TCE ในแบบจำลอง MT3DMS จะทำการคำนวณค่าที่ระยะทางและเวลาต่าง ๆ โดยผลการคำนวณจะแสดงในรูปของเส้นชั้นความเข้มข้น (Contour of Concentration) โดยเป็นการแสดงค่าความเข้มข้นแต่ละค่า (ค่าความเข้มข้นหนึ่งค่าจะแทนด้วยเส้นหนึ่งเส้น) ในเวลาที่กำหนด อาทิเช่น 10, 20, 25 หรือ 50 ปี นับจากที่เริ่มมีการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังแสดงในภาพที่ 26 ถึง 28 และ ตารางที่ 21 ซึ่งแสดงผลการศึกษาเพื่อประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอย โดยได้แสดงขอบเขตความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ในสภาวะปัจจุบัน (พ.ศ. 2549) ซึ่งเป็นปีที่ 25 และในอนาคต (พ.ศ. 2574) ซึ่งเป็นปีที่

50 รวมทั้งคาดการณ์การปนเปื้อนในกรณีสมมติให้มีการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยดังกล่าวอย่างถูกต้อง หลักระบบ ซึ่งจะทำให้สามารถป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ เนื่องจากคุณสมบัติด้านการซึมผ่านหรือความนำทางชลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที

ตัวอย่างการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยโดย ทิพย์สุริย์ และคณะ (2549) การฟื้นฟูพื้นที่กำจัดมูลฝอยแบบเทกองกลางแจ้งสามารถดำเนินการได้ 3 ระดับคือ ระดับที่ 1 การปิดทับกองมูลฝอยด้วยดิน ระดับที่ 2 การจัดทำระบบกันซึมและชั้นดินกลบทับ และระดับที่ 3 การปรับปรุงเป็นระบบฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกต้องหลักระบบ โดยมีการใช้จ่ายในการฟื้นฟูแปรผันในช่วงตั้งแต่ 360 ถึง 1,200 บาทต่อตารางเมตร เกณฑ์ที่สำคัญในการพิจารณาจัดลำดับพื้นที่ตามความจำเป็นในการฟื้นฟูซึ่งได้จากแบบสอบถามกลุ่มผู้เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูพื้นที่กำจัดมูลฝอย จำนวน 425 แห่ง ได้แก่ ขนาดพื้นที่กำจัดมูลฝอย ปริมาณมูลฝอย อายุการใช้งานของพื้นที่กำจัดมูลฝอย และการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ตัวอย่างการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย โดย Foose *et al.* (2002) ได้แก่ การใช้วัสดุรองพื้นชนิดต่าง ๆ เช่น GCL (Geosynthetic clay liners), Subtitle D ของ RCRA และ NR 500 ของ Wisconsin Administrative Code Section โดย Subtitle D และ NR 500 ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัด (ความหนา ≥ 0.6 ม. และ ≥ 1.2 ม. ตามลำดับ) ซึ่งจะถูกปูทับด้วยชั้นวัสดุ High-Density Polyethylene (HDPE) geomembrane มีความหนา 1.5 มม. ส่วนวัสดุ GCL ก็จะมีรูปแบบการจัดวางเหมือนกัน แต่แตกต่างกันตรงที่ชั้นดินเหนียวบดอัดจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุ GCL ความหนา 6.5 มม. นอกจากการใช้วัสดุรองพื้นแล้วยังต้องมีการใช้วัสดุปกคลุมส่วนบนของหลุมฝังกลบมูลฝอยด้วย เช่น การใช้ดินเหนียวหรือวัสดุสังเคราะห์ ที่มีค่าความนำทางชลศาสตร์ต่ำมาก ๆ เป็นต้น จึงจะสามารถป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนออกจากแหล่งกำจัดมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

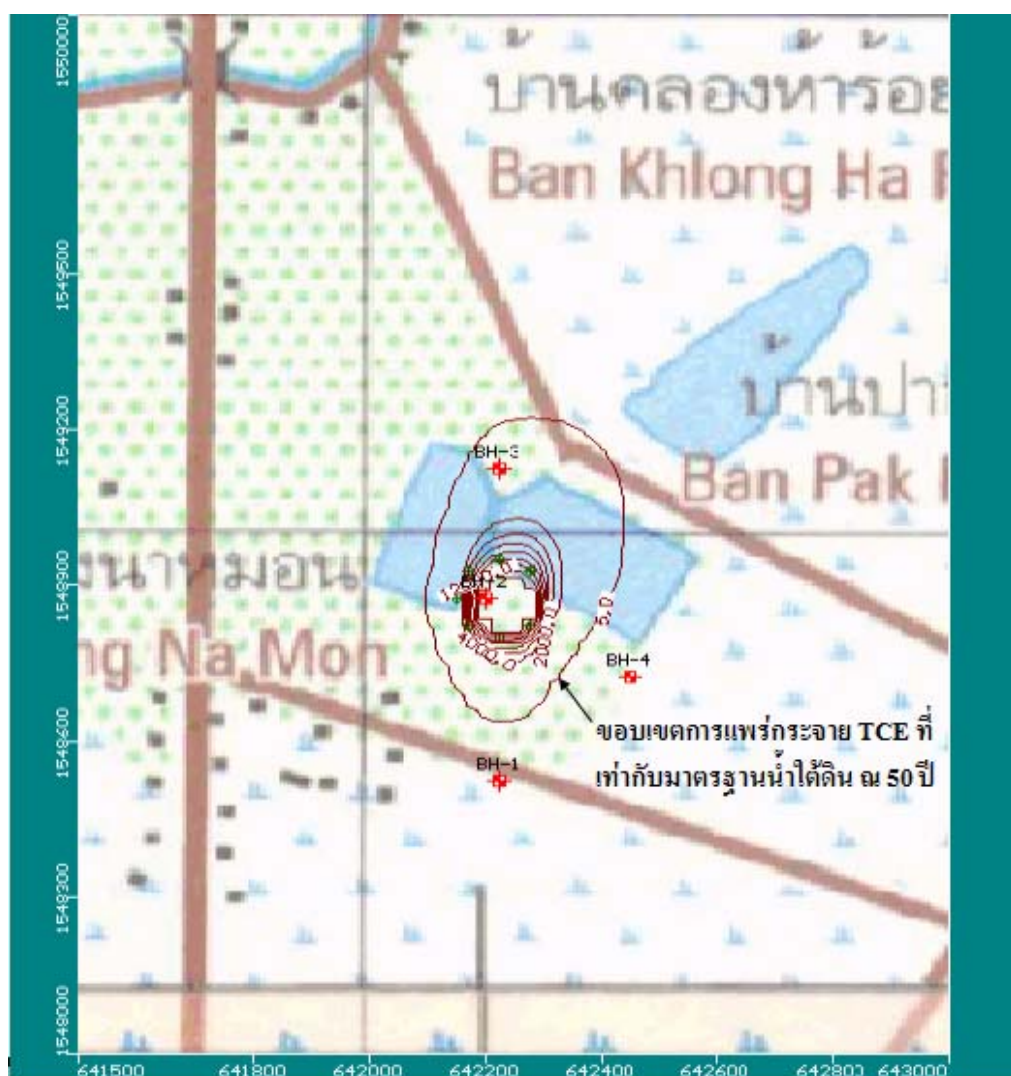


ภาพที่ 26 ผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดิน กรณียังไม่มี การฟื้นฟูในปัจจุบันปีพ.ศ. 2549 (ปีที่ 25)

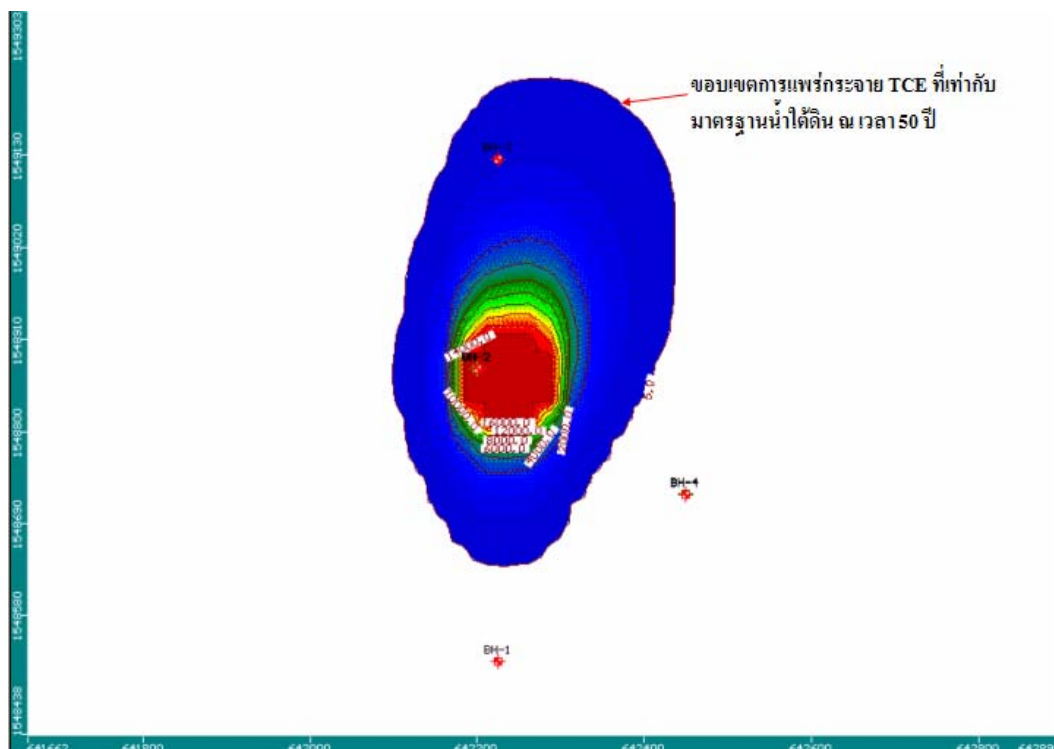
จากภาพที่ 26 ผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีน ในน้ำใต้ดินด้วยสมการที่ (10) แต่ไม่รวม Sink/source term และ Reaction term เนื่องจากไม่อยู่ใน ขอบเขตของการวิจัยครั้งนี้ กรณียังไม่มี การฟื้นฟู ณ เวลาปัจจุบัน (ปี 2549) ซึ่งเป็นปีที่ 25 ขอบเขต การแพร่กระจายสารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นเท่ากับค่ามาตรฐานน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย (ไม่เกิน 5 มก.ก./ลิตร) พบว่ามีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมลพิษประมาณ 240 เมตร ตามทิศทางการ ไหลของน้ำใต้ดินในแนวราบ และ 118 เมตร ในแนวขวางทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน โดยสาเหตุ ที่ทำให้การแพร่กระจายของสาร TCE ไม่เป็นรูปวงกลม ทั้ง ๆ ที่การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเป็นไป อย่างค่อนข้างช้า เนื่องมาจากประการแรกคือ ในแบบจำลองมีการกำหนดขอบเขตระดับน้ำคงที่ตาม

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ ดังนั้นจึงกำหนดเป็นแนวทแยงในแนวทิศใต้และทิศเหนือ แต่ไม่เป็นเส้นตรง (ภาพที่ 19) ทำให้ความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ไม่เป็นเชิงเส้น และประการที่สองมีการกำหนดอัตราส่วนการกระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้แก่

Horizontal/Longitudinal Dispersivity = 0.1, Vertical/ Longitudinal Dispersivity = 0.01 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Peclet number, P_e พบว่ามีค่ามากกว่า 100 ซึ่งแสดงว่าเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนที่อาศัยการพาเป็นกลไกหลัก ดังนั้นจึงส่งผลต่อรูปร่างการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนโดยมีแนวโน้มที่จะแพร่กระจายไปตามทิศทางการไหลมากกว่าด้านที่ขวางทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

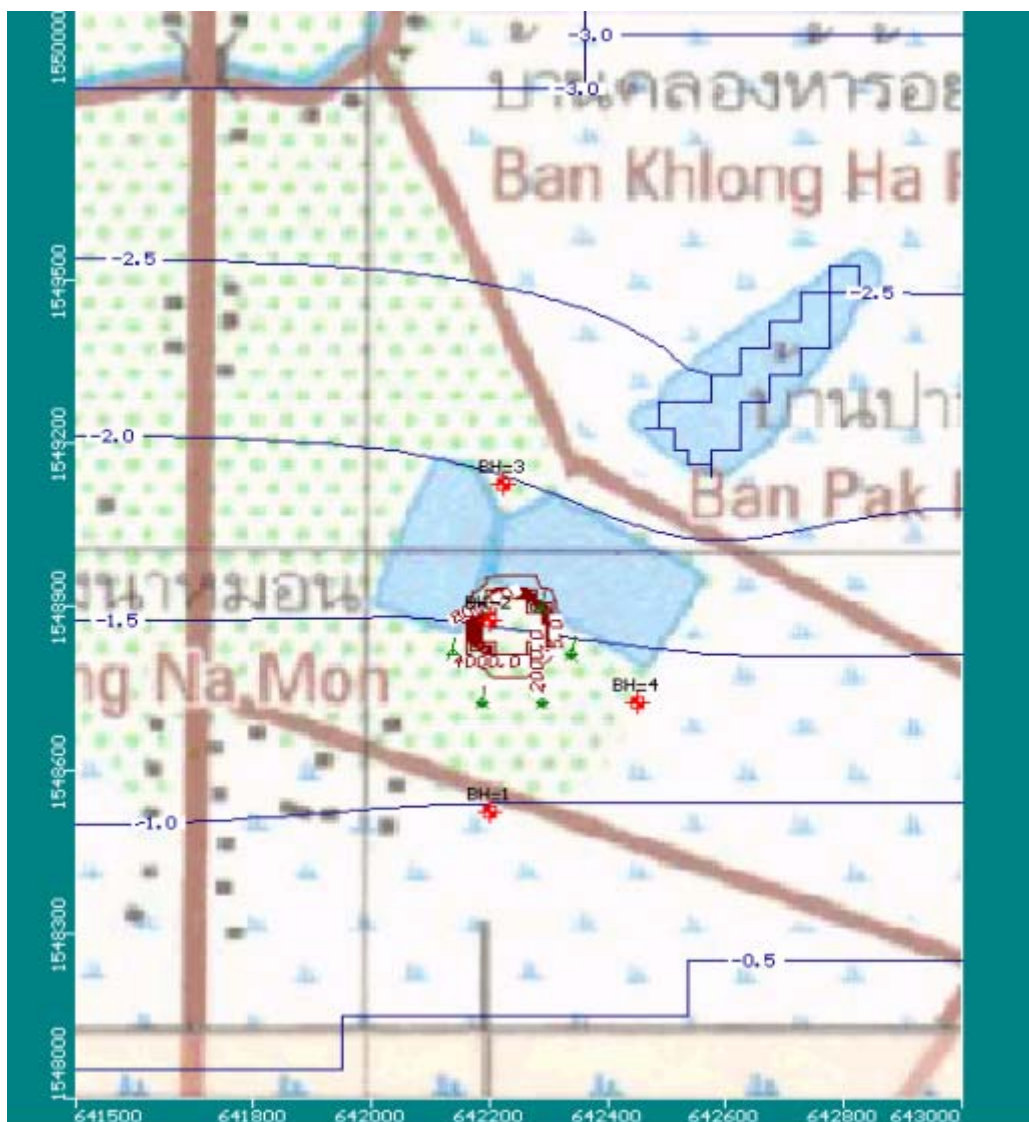


ภาพที่ 27 ผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดิน กรณียังไม่มีกรฟื้นฟูในอนาคคปีที่ 50 (ปีพ.ศ. 2574)



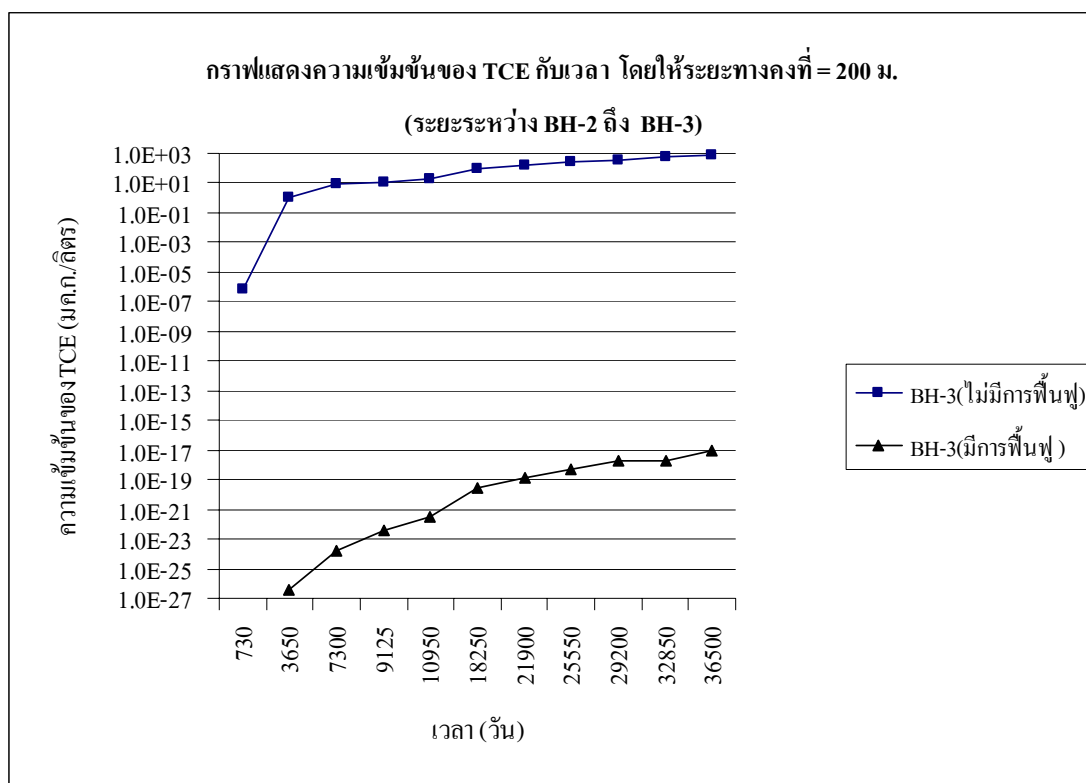
ภาพที่ 28 ภาพขยายการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดินกรณียังไม่มี การฟื้นฟูในอนาคตปี ที่ 50 (ปีพ.ศ. 2574)

จากภาพที่ 27 และภาพที่ 28 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดินด้วยสมการที่ (10) แต่ไม่รวม Sink/source term และ Reaction term เนื่องจากไม่อยู่ในขอบเขตของการวิจัยครั้งนี้ กรณียังไม่มี การฟื้นฟู ณ เวลาอนาคตปี ที่ 50 (ปีพ.ศ. 2574) พบว่าจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่เกือบเป็นวงรี ขอบเขตความเข้มข้นที่เท่ากับค่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน (5 มก.ก./ลิตร) มีรัศมีการแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดมลพิษที่ตำแหน่ง BH-2 ประมาณ 310 เมตร ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในแนวราบ สำหรับการแพร่กระจายในแนวขวางทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในแนวราบ จะมีรัศมีการแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดมลพิษประมาณ 148 เมตร ลักษณะเช่นนี้ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยอื่น ๆ จะทำให้ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของสาร TCE ในน้ำใต้ดิน ที่ตำแหน่ง BH-3 ซึ่งอยู่ด้านท้ายน้ำมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่วน BH-1 ที่อยู่ทางต้นน้ำและ BH-4 ที่อยู่ด้านข้างของแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนจะยังไม่ได้ รับผลกระทบดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) พบว่าที่ ตำแหน่ง BH-1 และ BH-4 จะมีความเข้มข้นของ TCE เท่ากับมาตรฐานน้ำใต้ดิน ต้องใช้เวลาประมาณ 86 ปี และ 70 ปี ตามลำดับ



ภาพที่ 29 ผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดินกรณีการฟื้นฟู ในอนาคตปีที่ 50 (ปีพ.ศ. 2574)

จากภาพที่ 29 ผลการจำลองสถานการณ์การแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีน ในน้ำใต้ดินกรณีมีการฟื้นฟูอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ณ เวลาอนาคต 50 ปี (ปีพ.ศ. 2574) พบว่าการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดไปในแนวราบ ทั้งตามทิศทางการไหลและแนวขวางการไหลของน้ำใต้ดินเป็นระยะทางประมาณ 40 เมตร จะเห็นว่าเป็นไปอย่างช้ามาก จนเกือบจะไม่มี การแพร่กระจายเลย เนื่องจากการใช้วัสดุกันซึมที่ค่าความนำทางชลศาสตร์ต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบผลการจำลองการแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดิน
จากระยะ BH-2 ถึง BH-3 ระหว่างกรณีที่ยังไม่มีการฟื้นฟูกับการฟื้นฟูสถานที่
กำจัดมูลฝอยที่เวลาต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MT3DMS

จากภาพที่ 30 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรม MT3DMS ระหว่างกรณีที่ยังไม่มีการฟื้นฟูกับการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยที่เวลาต่าง ๆ ถ้ากำหนดให้ระยะทางจากจุดกำเนิดสารปนเปื้อน (BH-2) ถึงตำแหน่งที่พิจารณา (BH-3) เป็นค่าคงที่ประมาณ 200 เมตร โดยทั้งสองกรณีมีแนวโน้มของการแพร่กระจายเหมือนกัน คือ ในช่วงเริ่มต้นความเข้มข้น (Initial Concentration) ของ TCE จะมีค่าต่ำสุด หลังจากเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ความเข้มข้นของ TCE จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อถึงเวลาหนึ่งความเข้มข้นของ TCE จะเริ่มคงที่ เนื่องจากการแพร่กระจายแบบต่อเนื่อง ซึ่งความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่แหล่งกำเนิดเป็นค่าคงที่ (Constant Concentration) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามเวลา สำหรับความแตกต่างระหว่างทั้งสองกรณี พบว่าที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน ความเข้มข้นของ TCE ในน้ำใต้ดินในกรณีที่ไม่มีการฟื้นฟู จะมีค่าความเข้มข้นสูงกว่ากรณีที่มีการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยอย่างมาก เนื่องจากถ้ามีการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยด้วยการใช้วัสดุรองพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอม

ให้น้ำซึมผ่านที่ต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที จึงทำให้สาร TCE ในน้ำชะมูลฝอยแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดลงสู่หน้าดินในอัตราที่ต่ำมากหรือไม่มีเลย

ตารางที่ 21 สรุปผลการคำนวณการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยต่อน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลอง MT3DMS

ลำดับ	รายละเอียด	ผลการคำนวณ
1	พื้นที่กองมูลฝอยเดิม	73,600 ตร.ม.
2	อายุใช้งานถึงปัจจุบัน	25 (ปี)
3	ความเร็วเฉลี่ยของน้ำใต้ดิน	1.25×10^{-6} (ซม./วินาที)
4	ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน	ทิศใต้ไปยังทิศเหนือ
5	ขอบเขตความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เท่ากับค่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน ของสารไตรคลอโรเอทิลีน (TCE)	
	- ระยะห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยในปัจจุบัน	240 (ม.)
	- ระยะห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยในอนาคต 50 ปี และยังไม่มีการฟื้นฟู	310 (ม.)
	- ระยะห่างจากสถานที่กำจัดมูลฝอยในอนาคต 50 ปี เมื่อมีการฟื้นฟู (ใช้ดินเหนียวและดินกลบทับ)	40 (ม.)
6	บ่อน้ำที่ตั้งอยู่ในทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจำนวน	2 (บ่อ)
	- ระยะห่าง	900 (ม.)
	- ลึกจากผิวดิน	220 (ม.)

จากตารางที่ 21 ได้สรุปการประเมินการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินในกรณีไม่มีการฟื้นฟูกับการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย โดยได้เปรียบเทียบสภาพการปนเปื้อน ดังแสดงในภาพที่ 27, 28 และภาพที่ 29 เป็นตัวอย่างแสดงผลการเปรียบเทียบประเมินการแพร่กระจายของสาร TCE โดยเฉพาะในแนวราบของสถานที่กำจัดมูลฝอย สมมติฐานในการฟื้นฟูของพื้นที่นี้ใช้ดินเหนียวที่มีค่าความนำคลศาสตร์ไม่เกิน 1×10^{-7} ซม./วินาที หนาไม่น้อยกว่า 45 ซม. พร้อมดินปกคลุมเป็นวัสดุกลบทับชั้นสุดท้าย เพื่อลดอัตราการซึมผ่านของน้ำชะมูลฝอยให้เหลือไม่เกินร้อยละ 20 ของกรณีที่ไม่มีการฟื้นฟู

7. การคำนวณโดยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure)

วัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณการแพร่กระจายของสาร TCE ในน้ำใต้ดินด้วยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) กับผลการประเมินด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Visual MT3DMS ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเหมือนกัน

กระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) ด้วยสมการของ Ogata, 1970 (อ้างอิง Freeze and Cherry, 1979) มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\begin{array}{lll} \text{Initial condition} & C(x, 0) & = 0 \quad x \geq 0 \\ \text{Boundary condition} & C(0, t) & = C_0 \quad t \geq 0 \\ \text{Boundary condition} & C(\infty, t) & = 0 \quad t \geq 0 \end{array}$$

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (14)$$

เมื่อ	C_0	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร ที่เวลาเท่ากับศูนย์ [M/L]
	C	= ความเข้มข้นของสารที่เวลาใด ๆ [M/L]
	x	= ระยะทางจากจุดกำเนิดมลพิษถึงจุดที่พิจารณา [L]
	v	= Average linear velocity = v_L [L/T]
	v_L	= $\frac{Ki}{n_e}$
	K	= Hydraulic Conductivity [L/T]
	i	= Hydraulic Gradient [-]
	n_e	= Effective Porosity [-]
	t	= Time [T]
	D_L	= Coefficient of longitudinal mechanical dispersion-diffusion [L^2/T]
		= $\alpha_L v_L + D^*$
	α_L	= Longitudinal Dispersivity [L]
		= $0.0175L^{1.46}$

L = Distance from the source [L]

D^* = Molecular diffusion [L]

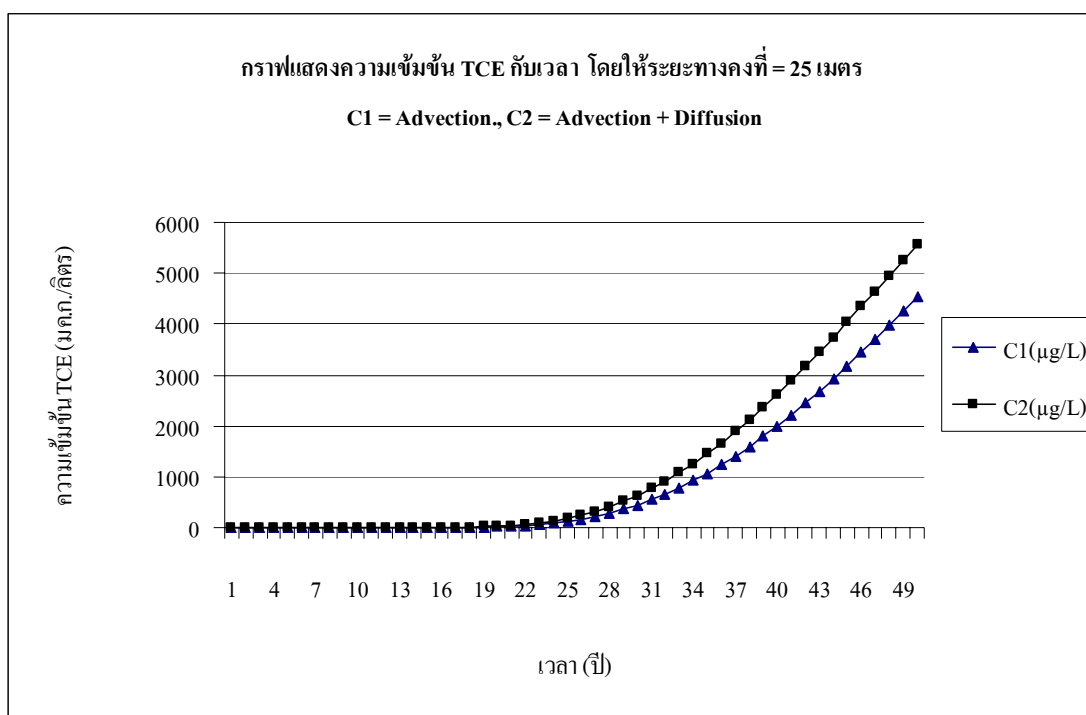
โดยนิพจน์ $\exp\left(\frac{vx}{D_L}\right)$ คือ Peclet number (P_e) ซึ่งใช้วัดอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของสาร

ปนเปื้อน (rate of transport) ระหว่างการพา (Advection) ต่อการแพร่ (Diffusion) ถ้าค่า Peclet number มากกว่า 100 แสดงว่าเป็นการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนด้วยการพาเป็นหลัก ซึ่งทำให้เทอมที่สองของสมการที่ (14) เป็นศูนย์

การคำนวณรูปร่างของ breakthrough curve และ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (concentration profiles) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาและระยะทางจากจุดกำเนิด (point source) ในน้ำใต้ดินที่ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของดินและน้ำใต้ดินแล้ว ได้แก่ hydraulic conductivity (K) $= 1.5 \times 10^{-6}$ m/s, hydraulic gradient $= 2.5$ m/2,000 m, effective porosity $= 0.15$, average linear velocity (v_L) $= 1.25 \times 10^{-8}$ m/s และ effective diffusion coefficient $= 0.75 \times 10^{-9}$ m²/s โดยมีสมมุติฐานว่าน้ำใต้ดินอิ่มตัว (saturated) ไหลผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน (homogeneous medium) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดพื้นที่ ไหลด้วยสภาวะคงตัว (steady-state flow) แบบต่อเนื่อง (continuous supply) โดยไม่มีผลกระทบจากปฏิกิริยาเคมี ชีวภาพ หรือการย่อยสลายทางกัมมันตรังสี ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร TCE, (C_0) $= 16,525$ µg/L และกำหนด Boundary condition ที่สภาวะเวลาคงที่เท่ากับ 50 ปี

จากภาพที่ 31 ถ้ากำหนดให้ระยะทางจากจุดกำเนิดมลพิษถึงจุดที่พิจารณา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตั้งอยู่ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินเป็นค่าคงที่ พบว่าช่วงตอนเริ่มต้นสารปนเปื้อนจะมีความเข้มข้นต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ความเข้มข้นจะเพิ่มตามไปด้วยจนกระทั่งมีค่าคงที่เกือบเท่ากับค่าเริ่มต้นของสารมลพิษ ในการประเมินด้วยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) ครั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่เวลา 50 ปีหลังจากการการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน เช่น ณ ตำแหน่งที่ห่างจากจุดกำเนิดมลพิษ 25 เมตร ความเข้มข้นของ TCE ในกรณีเคลื่อนที่ด้วยวิธีการพา (Advection) จะมีค่าประมาณ 4,525.5 มก.ก./ลิตร และกรณีการพาบวกกับการแพร่ (Advection + Diffusion) จะมีค่าประมาณ 5,580 มก.ก./ลิตร

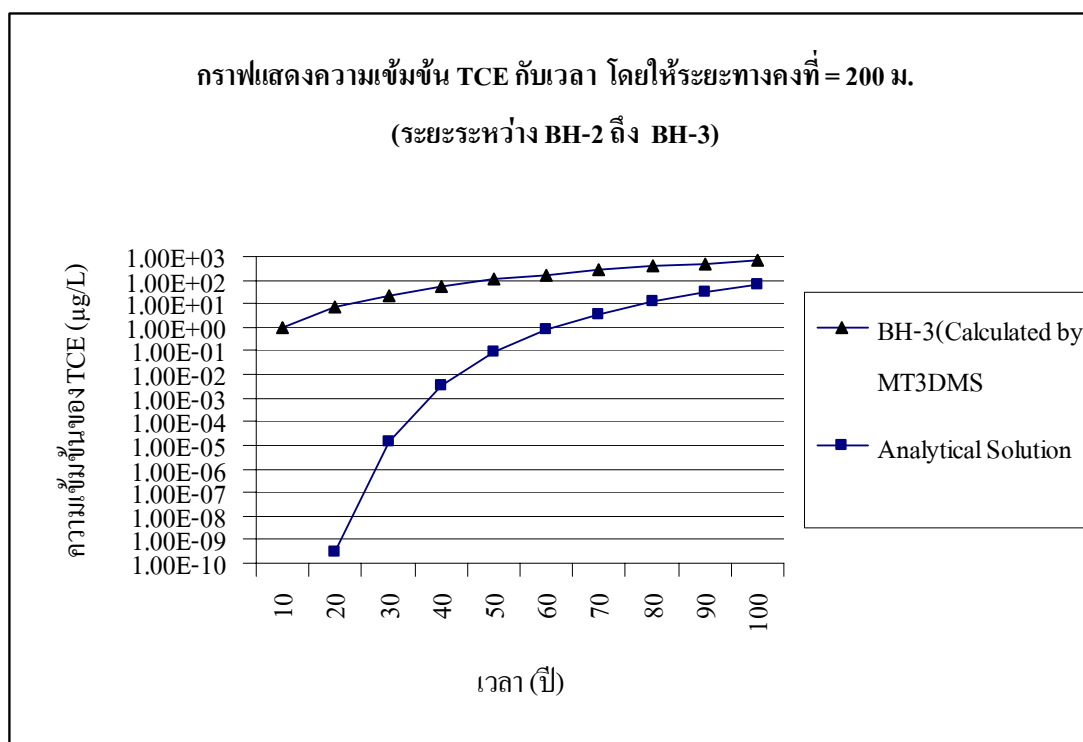
จากผลการคำนวณดังกล่าว สรุปได้ว่าหากกำหนดให้ระยะทางเป็นค่าคงที่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจะเพิ่มขึ้นตามเวลา และในกรณีที่มีกลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารเป็นแบบการพา รวมกับการแพร่เป็นหลักแล้วจะทำให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมีความเข้มข้นมากกว่ากรณีการพาเพียงอย่างเดียว สำหรับในกรณีนี้กลไกหลักของการเคลื่อนย้ายมวลสารจะเป็นแบบการพา เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่า Peclet number (P_e) แล้วมีค่ามากกว่า 100 ดังนั้นการแพร่กระจายของ TCE จึงขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินเป็นหลัก



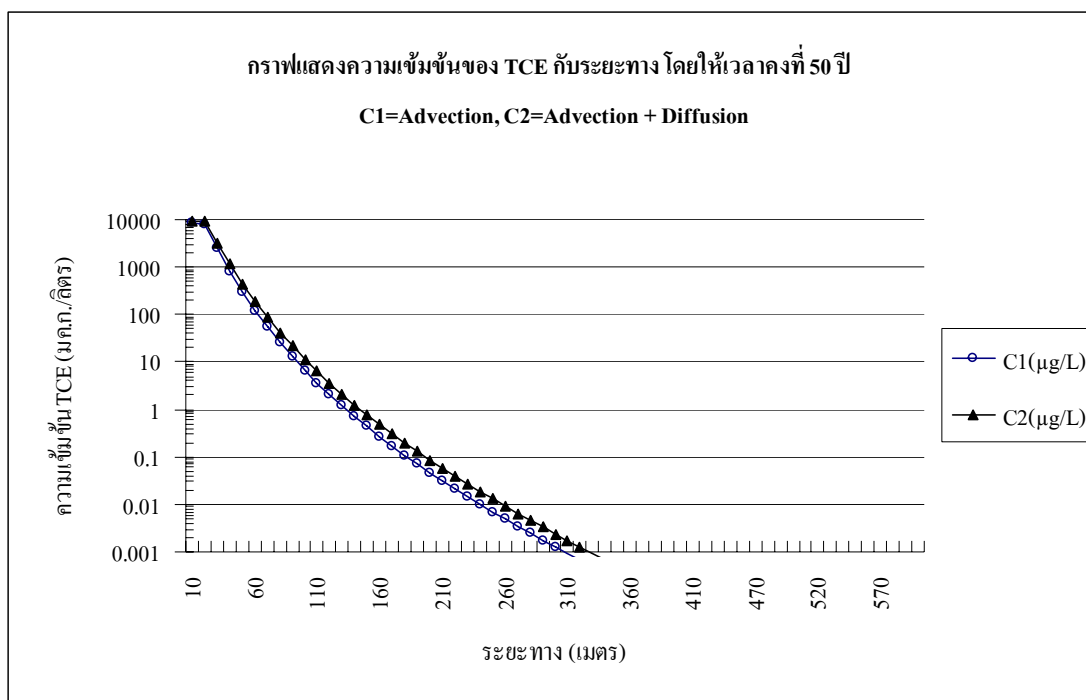
ภาพที่ 31 กราฟแสดงความเข้มข้นของ TCE กับเวลาโดยให้ระยะทางคงที่เท่ากับ 25 เมตร

จากภาพที่ 32 เป็นการเปรียบเทียบผลการประเมินการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินด้วยด้วยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) กับผลการประเมินด้วยแบบจำลอง Visual MT3DMS Model ตลอดช่วงเวลา 100 ปี โดยกำหนดให้ระยะทางจากจุดกำเนิดมลพิษ (BH-2) ถึงจุดที่พิจารณา (BH-3) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตั้งอยู่ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินเป็นค่าคงที่ประมาณ 200 เมตร พบว่าทั้งสองกรณีจะมีลักษณะที่เหมือนกันคือ ในช่วงเริ่มต้น สารปนเปื้อนจะมีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากสารปนเปื้อนยังแพร่กระจายไปไม่ถึง เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ความเข้มข้นจะเพิ่มตามไปด้วยจนกระทั่งเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากการจำลองภายใต้สมมติฐานดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนความแตกต่างระหว่างผลการประเมินทั้งสองวิธีได้แก่ ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในแต่ละช่วงเวลาที่ได้จากการประเมินด้วยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical

Procedure) ในครั้งนี้ จะมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MT3DMS เพราะว่า เป็นการประเมินภายใต้เงื่อนไขขอบเขตบางอย่างที่แตกต่างกัน เช่น ค่าความพรุน ในการประเมิน ด้วยกระบวนการวิเคราะห์จะใช้ค่าความพรุนประสิทธิผล (Effective Porosity, n_e) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.15 ส่วนการคำนวณด้วยแบบจำลอง MT3DMS จะใช้ค่าความพรุนทั้งหมด (Total Porosity, n) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.35 นอกจากนั้น การกำหนดค่าความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ใน แบบจำลอง MT3DMS จะกำหนดตามข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางอุทก ธรณีวิทยาของพื้นที่ ทำให้เกิดความแตกต่างกันในแต่ละกริดเซลล์ บางกริดเซลล์อาจมีค่าสูงกว่า ค่าเฉลี่ย ทำให้น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น แต่การประเมินด้วยกระบวนการวิเคราะห์จะกำหนดเป็น ค่าคงที่เพียงค่าเดียว ดังนั้นผลการประเมินด้วยแบบจำลอง MT3DMS จึงได้ความเข้มข้นของสาร ปนเปื้อนในปริมาณที่สูงกว่าการประเมินด้วยกระบวนการวิเคราะห์ เป็นต้น



ภาพที่ 32 กราฟแสดงความเข้มข้นของ TCE กับเวลาโดยให้ระยะทางคงที่เท่ากับ 200 เมตร



ภาพที่ 33 กราฟแสดงความเข้มข้นของ TCE กับระยะทางโดยให้เวลาคงที่เท่ากับ 50 ปี

จากภาพที่ 33 กราฟระหว่างความเข้มข้นกับระยะทางในแนวราบ ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน พบว่าหากกำหนดให้เวลาเป็นค่าคงที่เท่ากับ 50 ปี ตำแหน่งที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดมลพิษมากที่สุดจะมีความเข้มข้นมากที่สุด และความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะทางประมาณ 300 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW/ MT3DMS ซึ่งพบว่าสารปนเปื้อนสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางการไหลของน้ำไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิดประมาณ 310 เมตร และเคลื่อนที่ตามแนวขวางทิศทางการไหลของน้ำประมาณ 148 เมตร

สรุปการใช้แบบจำลอง Visual MT3DMS คำนวณการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในแนวราบได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการประเมินด้วยกระบวนการวิเคราะห์ (Analytical Procedure) จากสมการของ Ogata, 1970 (อ้างถึง Freeze and Cherry, 1979) ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยประมาณ 3.33 % ทั้งนี้เพราะว่ามีเงื่อนไขและพารามิเตอร์บางอย่างที่แตกต่างกัน การที่จะทำให้ผลการคำนวณทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากัน จะต้องทำการปรับเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใหม่ เช่น ค่าความนำคลศาสตร์, ค่าลาดทางคลศาสตร์, ค่าความพรุนของตัวกลาง, ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย เป็นต้น

วิจารณ์

การประเมินผลกระทบจากการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยต่อน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะต้องตระหนักถึงข้อจำกัดและขอบเขตการประยุกต์ใช้งานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ประเมินและความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลอง ซึ่งมีข้อจำกัดต่าง ๆ ดังนี้

1. ข้อจำกัดในการสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากลักษณะสมบัติของชั้นดินและน้ำใต้ดินมีความสลับซับซ้อนและกลไกต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก การที่จะรวบรวมข้อมูลทุกอย่างให้ครบถ้วนและถูกต้องเป็นไปได้ยาก
2. ข้อจำกัดในด้านงบประมาณ และอุปกรณ์ในการเจาะสำรวจชั้นดิน การวิจัยครั้งนี้มีจำนวนหลุมเจาะสำรวจน้อย ไม่ครอบคลุมพื้นที่การใช้ประโยชน์ของชุมชน และความลึกที่เจาะได้อยู่ที่ระดับประมาณ 10 เมตร จากระดับพื้นดิน ซึ่งชั้นน้ำใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดขยะจะมีความลึกประมาณ 200 เมตร จากระดับพื้นดิน
3. ข้อจำกัดในด้านระยะเวลาการศึกษา ทำให้ไม่สามารถรวบรวมข้อมูลระดับน้ำและการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินในแต่ละฤดูกาลได้
4. แถบสีของเส้นชั้นความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีน (contour of concentrations) ในแบบจำลองการแพร่กระจาย มีข้อจำกัดในการระบุช่วงความเข้มข้น ซึ่งทำให้แถบสีของเส้นชั้นความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีน ในแต่ละกรณีดูเหมือนจะใกล้เคียงกัน แต่ในความเป็นจริงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแต่ละจุด
5. ในการศึกษาการแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีนได้กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration) มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในพื้นที่จริงที่มีสภาพซับซ้อน ชั้นน้ำใต้ดินอาจมีการสะสมของไตรคลอโรเอทิลีนอยู่ในชั้นน้ำเดิมแล้ว แต่เนื่องจากข้อมูลที่จำกัดทำให้ไม่สามารถระบุความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด (Point sources) ในชั้นน้ำใต้ดินได้ หรืออาจเป็นในกรณีที่ชั้นน้ำด้านบนมีการรั่วซึมสู่ชั้นน้ำด้านล่าง แต่ผู้ศึกษาไม่สามารถทราบพื้นที่การรั่วซึมของทุกชั้นน้ำได้ ทำให้การศึกษาในบางบ่อสังเกตการณ์มีผลการทำนายที่เบี่ยงเบนไปจากความเป็นจริง

6. การคาดการณ์ขอบเขตการปนเปื้อนที่เกินมาตรฐานในน้ำใต้ดินสำหรับในอนาคตอีก 50 ปีข้างหน้า จะเห็นว่าขอบเขตของการปนเปื้อนยังเคลื่อนที่ไปไม่ถึงแหล่งน้ำบาดาลของชุมชนที่อยู่ด้านทิศเหนือของสถานที่กำจัดมูลฝอย ทั้งนี้เนื่องจากผลการทำนายของแบบจำลองนี้อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่รวบรวมได้ ณ เวลาที่ทำการสำรวจเท่านั้น แต่ควรมีการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำใต้ดินเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เพื่อปรับเทียบแบบจำลองให้มีความถูกต้องและเป็นปัจจุบันอยู่เสมอ จึงจะสามารถทำนายเหตุการณ์ในอนาคตได้แม่นยำใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด

7. ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ จึงเป็นการประเมินการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยต่อแหล่งน้ำใต้ดินในเบื้องต้นเท่านั้น ในการประเมินสถานการณ์ความรุนแรงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในแต่ละพื้นที่ จำเป็นต้องมีการสำรวจรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมอย่างเพียงพอและต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เพื่อให้การประเมินการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินมีความถูกต้องมากที่สุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำใต้ดินในบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี พบว่ามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย หลายชนิดที่เกินค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย เช่น เบนซีน (Benzene), ซีเอส-1,2- ไดคลอโรเอทิลีน (cis-1,2-Dichloroethylene), เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene), ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นต้น ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้สารไตรคลอโรเอทิลีน เป็นดัชนีข้อมูลการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดินที่จะป้อนเข้าแบบจำลอง Visual MODFLOW Model และ MT3DMS เนื่องจากมีความเข้มข้นสูงที่สุดและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้มากที่สุดด้วย ซึ่งผลการคำนวณจากแบบจำลองสามารถประเมินการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ดังนี้

ระดับน้ำใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยและพื้นที่ใกล้เคียงมีค่าระหว่าง 0.63-2.55 เมตร ต่ำกว่าระดับพื้นดินปากหลุมเจาะ อย่างไรก็ตามระดับน้ำใต้ดินอาจมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปี ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและปริมาณน้ำฝนที่ตกระหว่างปี ลักษณะการไหลของน้ำชะมูลฝอยที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบแนวราบ มีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 1.25×10^{-6} ซม./วินาที มีทิศทางการไหลจากทิศใต้ไปทางทิศเหนือ อันเนื่องมาจากสภาพทางอุทกธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่ที่ศึกษาเป็นปัจจัยหลัก

ชั้นดินใต้บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด ซึ่งมีค่าความนำหลศาสตร์ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 1×10^{-7} ถึง 1×10^{-3} ซม./วินาที ส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลของน้ำใต้ดิน ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินช้ามาก โดยเฉพาะในแนวตั้งความเร็วของน้ำใต้ดินจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย ของสารไตรคลอโรเอทิลีนไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการจำลอง 2 สถานการณ์ คือ ในสภาพปัจจุบันและอนาคต 50 ปี ซึ่งยังไม่มีมีการปรับปรุงสถานที่กำจัดมูลฝอย ผลการคำนวณ ณ สภาพปัจจุบันพบว่า มีการแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีนในน้ำใต้ดินไปในแนวราบ ห่างจากจุด

กำเนิดไปทางทิศเหนือเป็นระยะทาง 240 เมตร ส่วนในอนาคต 50 ปีเมื่อยังไม่มี การฟื้นฟู สถานที่กำลังจัดมูลฝอย จะพบว่าการแพร่กระจายของสารไตรคลอโรเอทิลีนในน้ำใต้ดินไปใน แนวราบ ห่างจากจุดกำเนิดไปทางทิศเหนือเป็นระยะทาง 310 เมตร และกรณีในอนาคต 50 ปี เมื่อมี การฟื้นฟูสถานที่กำลังจัดมูลฝอย พบว่าสารไตรคลอโรเอทิลีนในน้ำใต้ดินจะแพร่กระจายไปใน แนวราบ ห่างจากจุดกำเนิดไปทางทิศเหนือเป็นระยะทางประมาณ 40 เมตร สถานที่กำลังจัดมูลฝอย แห่งนี้ ปัจจุบัน ไม่สามารถรองรับมูลฝอยต่อไปได้อีก จึงควรออกแบบรายละเอียดเพื่อปิดพื้นที่ฝัง กลบตามหลักสุขาภิบาล ส่วนการฟื้นฟูชั้นใต้ดินและน้ำใต้ดินยังไม่จำเป็น เพราะจากการประเมิน ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ พบว่าขอบเขตการแพร่กระจายที่เท่ากับมาตรฐานน้ำใต้ดินสำหรับประเทศ ไทยต้องใช้เวลาประมาณ 186 ปี จึงจะเคลื่อนที่ไปถึงบ่อน้ำบาดาลของชุมชน

โดยภาพรวมสรุปได้ว่า ถ้ากำหนดให้เวลาคงที่ ค่าความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีน จะมีค่าสูงสุดบริเวณใกล้บ่อเก็บกักน้ำชะมูลฝอยหรือแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน ส่วนในบ่อ สังเกตการณ์ที่อยู่ห่างออกไปความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงระยะหนึ่งแทบจะ ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนเลย ส่วนในกรณีที่ให้ระยะทางระหว่างจุดกำเนิด มลพิษกับจุดปลายทางเป็นค่าคงที่ ในช่วงเริ่มต้นความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนที่ตำแหน่ง ปลายทางจะมีค่าต่ำสุด หลังจากเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนจะมีค่า สูงขึ้นตามไปด้วย จนถึงเวลาหนึ่งความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าสูงสุดและจะเริ่มคงที่ เนื่องจากการเป็นกรไหลของมลสารในน้ำใต้ดินผ่านวัสดุตัวกลางพรุน แบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาแนวโน้มความเสี่ยงของการปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทิลีนต่อการใช้ น้ำใต้ดินของชุมชนที่อยู่บริเวณโดยรอบสถานที่กำจัดมูลฝอย ซึ่งมีบ่อน้ำบาดาลสำหรับใช้อุปโภค ตามแนวทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินอยู่จำนวน 2 บ่อ มีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมูลฝอยประมาณ 900 เมตร โดยทั้งสองสถานการณ์ สารปนเปื้อนยังเคลื่อนที่ไปไม่ถึงบ่อน้ำบาดาลและค่าความ เข้มข้นที่ตำแหน่งไกลที่สุดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับประเทศไทย แต่หากปัจจัย ต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงก็อาจมีความเสี่ยงมากขึ้นได้

ในการวางแผนเพื่อดำเนินการฟื้นฟูนั้น สรุปได้ว่าความรุนแรงของผลกระทบมีสาเหตุหลัก มาจากปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้น และปริมาณสารอันตรายซึ่งปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอย ดังนั้น แนวทางในการลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยในสถานที่กำจัดมูลฝอยจะเป็นวิธีการพื้นฐานในการ ออกแบบฟื้นฟูสถานที่กำลังจัด ซึ่งผลการศึกษาเลือกใช้วัสดุกลบทับชั้นสุดท้ายเป็นดินเหนียวที่มีค่า ความนำชลศาสตร์ไม่เกิน 1×10^{-7} ซม./วินาที จะเป็นวิธีที่เหมาะสมและถูกหลักวิชาการ เพื่อลด

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในพื้นที่ นอกจากนั้นควรมีการติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยต่อแหล่งน้ำใต้ดินอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอทั้งในระหว่างการฟื้นฟูและภายหลังการฟื้นฟู

สำหรับการออกแบบฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยแห่งนี้ เสนอให้ดำเนินการดังนี้

1. เคลื่อนย้ายกองมูลฝอยที่สะสมอยู่เหนือระดับผิวดิน ไปอีกด้านหนึ่ง เพื่อสะดวกต่อการปรับปรุงพื้นที่
2. ก่อสร้างคันดินโดยรอบเพื่อควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำชะมูลฝอยไหลสู่ภายนอกพื้นที่
3. ก่อสร้างท่อรวบรวมน้ำเสียในชั้นใต้ดิน บ่อสูบน้ำเสีย รวมทั้งบ่อบำบัดน้ำเสีย หรือนำไปบำบัดที่อื่น
4. วางท่อระบายอากาศทั้งแนวราบและแนวตั้ง
5. ในชั้นสุดท้ายใช้ดินเหนียวหนาไม่น้อยกว่า 45 ซม. ปิดทับชั้นมูลฝอยและปิดทับด้วยดินปกคลุม ป้องกันการพังทลายของดิน หนาไม่น้อยกว่า 45 ซม.
6. ให้มีการเจาะดินและติดตั้งบ่อสังเกตการณ์เพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบและติดตามการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอย ให้มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด
7. ปลูกหญ้าหรือพืชอื่น ๆ เพื่อให้รากพืชช่วยยึดดินให้แน่นเป็นการลดการกัดเซาะหรือการชะล้างและช่วยลดปริมาณน้ำฝนซึมลงสู่ชั้นล่างของกองมูลฝอย
8. ปรับปรุงภูมิทัศน์บริเวณสถานที่ฝังกลบมูลฝอยที่ปิดแล้วให้ถูกสุขลักษณะและสวยงาม
9. สร้างกำแพงหรือรั้วป้องกันการบุกรุก
10. ควรมีมาตรฐานการตรวจติดตามวัดค่ามลพิษต่าง ๆ เช่น คุณภาพดิน น้ำ อากาศ เป็นต้น

มาตรการป้องกันและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ในระหว่างการฟื้นฟูควรจัดเตรียม มาตรการป้องกันแก้ไขเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการฟื้นฟู และควรดำเนินการตั้งแต่ในระยะก่อนการฟื้นฟู ในระหว่างการฟื้นฟู และภายหลังการฟื้นฟู สำหรับแนวทางการปฏิบัติการในการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย หน่วยงานที่รับผิดชอบควรรีบดำเนินการให้เร็วที่สุด เพื่อลดความเสี่ยงอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของประชาชน

ข้อเสนอแนะ

การประเมินสภาพการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Visual MODFLOW Model จะน่าเชื่อถือเพียงใดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ รวมกันเช่น มีข้อมูลที่ต้องการ มีการเปรียบเทียบและตรวจสอบยืนยันผลการคำนวณ และต้องปรับปรุงข้อมูลต่าง ๆ ให้เป็นปัจจุบันอยู่เสมอ สำหรับข้อเสนอแนะต่าง ๆ ได้แก่

1. การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นดินและน้ำใต้ดิน ควรติดตั้งบ่อสังเกตการณ์เพิ่มเติม และมีความลึกถึงระดับชั้นน้ำใต้ดินที่เป็นแหล่งน้ำบาดาลของชุมชนโดยรอบพื้นที่กำจัดมูลฝอย นอกจากนี้การกำหนดจำนวนชั้น (Layer) ในแบบจำลองควรให้มีความสัมพันธ์กับจำนวนชั้นน้ำใต้ดิน
2. ในแบบจำลอง Visual MODFLOW ค่าความนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ที่ใช้คือ 1.5×10^{-4} ซม./วินาที ตลอดทั้งแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริงพื้นที่แต่ละแห่งหรือแต่ละชั้นอาจจะมีค่าความนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ไม่เท่ากัน ดังนั้น การศึกษาคำนวณอย่างละเอียดจะทำให้การวิจัยมีความแม่นยำมากขึ้น
3. ในแบบจำลอง MT3DMS ค่า Longitude Dispersivity ที่ใช้คือ 40 เมตร ตลอดทั้งแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริงพื้นที่ศึกษามีขอบเขตกว้างและแต่ละพื้นที่ไม่จำเป็นจะต้องมีค่า Longitude Dispersivity เท่ากัน ดังนั้น การศึกษาคำนวณอย่างละเอียดจะทำให้การวิจัยมีความแม่นยำมากขึ้น
4. การประเมินการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการแม่นยำ ควรมีการสำรวจรวบรวมข้อมูลให้เพียงพอและถูกต้องอย่างต่อเนื่อง เช่น ควรวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเพื่อศึกษาถึงกลไกหรือปฏิกิริยาระหว่างสารปนเปื้อนกับคุณสมบัติของดิน ผลของความแปรผันทางฤดูกาล การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับสารปนเปื้อนในดิน การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของสารปนเปื้อน อัตราการย่อยสลายสารปนเปื้อน เป็นต้น

5. แนวทางการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย ไม่มีรูปแบบที่ตายตัว ต้องพิจารณาปัญหาเฉพาะกรณี ควรหาแนวทางที่เหมาะสมและประหยัดงบประมาณที่สุด ซึ่งควรมีมาตรการต่าง ๆ ได้แก่

5.1 ลดปริมาณของเสียอันตรายที่แหล่งกำเนิด เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่ายต่าง ๆ ควรมีการคัดแยกประเภทและส่งไปกำจัดตามวิธีการที่ถูกต้อง ส่วนการลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยไม่ต้องลงทุนในการฟื้นฟูมากนัก ทั้งนี้โดยการดำเนินการฝังกลบให้ถูกต้อง ซึ่งรวมถึงการปิดทับชั้นมูลฝอยด้วยดินเหนียว และปรับปรุงระบบระบายน้ำที่ปนเปื้อนออกจากพื้นที่ฝังกลบ เป็นต้น

5.2 ดำเนินการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยที่ปิดให้บริการแล้ว ซึ่งแนวทางการฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอย โดยทั่วไปมีหลักการดังนี้

- 5.2.1 ทำการฟื้นฟูสถานที่เพื่อลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยในอนาคต
- 5.2.2 ทำการฟื้นฟูพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนจากน้ำชะมูลฝอย
- 5.2.3 ทำการฟื้นฟูชั้นดินและน้ำใต้ดินที่ได้รับผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอย

โดยหลักการทั้ง 3 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น จะต้องพิจารณาถึงความยุ่งยากของกระบวนการฟื้นฟู ระยะเวลาที่ต้องการ และค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟู การดำเนินการเพื่อลดปริมาณน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบสามารถทำได้ทันที โดยมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากนัก ส่วนการฟื้นฟูบริเวณผิวดินที่มีการปนเปื้อนจำเป็นต้องมีการสำรวจข้อมูลเพิ่มเติมในสนาม เพื่อศึกษาถึงระดับของการปนเปื้อนและพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อน สำหรับการฟื้นฟูชั้นดินและน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนก็จำเป็นต้องมีการสำรวจข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยา ซึ่งรวมทั้งการขุดเจาะบ่อสำรวจชั้นดิน ซึ่งจะช่วยให้สามารถกำหนดระดับของการลงทุนและขั้นตอนการดำเนินการที่เหมาะสมต่อไปได้ อย่างไรก็ตามวิธีการในการฟื้นฟูปรับปรุงคุณภาพน้ำใต้ดินที่ได้รับการปนเปื้อนเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาและเสียค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นการตัดสินใจดำเนินการจำเป็นต้องพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูกับความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อประชาชนด้วย

5.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการ ซึ่งอาจทำได้โดยอาศัยมาตรการต่อไปนี้

5.3.1 การปรับปรุงระบบติดตามตรวจวัด

5.3.2 การจำแนกพื้นที่เพื่อการจัดการน้ำใต้ดิน

5.3.3 การใช้มาตรการทางกฎหมาย

6. จากผลการวิจัยในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าสถานที่กำจัดมูลฝอยที่ไม่มีการออกแบบระบบป้องกันการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หรือใช้วัสดุที่ไม่ได้มาตรฐาน เป็นผลให้เกิดการแพร่กระจายและปนเปื้อนออกสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ในอัตราเร็วกว่ากรณีที่มีการออกแบบหรือฟื้นฟูอย่างถูกต้องหลักสุขาภิบาลประมาณ 7.75 เท่า ดังนั้น หน่วยงานที่รับผิดชอบควรจะต้องรีบดำเนินการออกแบบฟื้นฟูสถานที่กำจัดมูลฝอยอย่างเร่งด่วนและถูกต้องหลักวิชาการ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต รวมทั้งเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเป็นประโยชน์ต่อประชาชนทั่วไปอย่างยิ่ง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2543. โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางการจัดการการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำยังดินและใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยเทศบาลในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันตก, กรุงเทพฯ.

_____. 2546. ขยะมูลฝอย. กรุงเทพมหานคร. <http://www.pcd.go.th/>

_____. 2548. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2547. กรุงเทพฯ.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. 2543. โททอลปิโตเลียมไฮโดรคาร์บอน. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย (Hazardous Wastes). พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต.

กรมการปกครอง. 2547. ข้อมูลประชากรจังหวัดนนทบุรี. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ.

กรมอุตุนิยมวิทยา. ข้อมูลลักษณะภูมิอากาศที่สถานีตรวจวัดอากาศ ระหว่างปี พ.ศ. 2514-2543. กรุงเทพฯ.

กรมแผนที่ทหาร. 2535. แผนที่ภูมิประเทศ 1: 50,000. กระทรวงกลาโหม, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี. 2522. ชั้นน้ำใต้ดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. กรุงเทพฯ.

ทิพย์สุริย์ กรบุญรักษา, ชาดิ เจียมไชยศรี, วิไล เจียมไชยศรี และ สุชาติ เหลืองประเสริฐ. 2549. การประเมินและการฟื้นฟูพื้นที่กำจัดมูลฝอยแบบเทกองกลางแจ้งในประเทศไทย, น. 42 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11 (วิศวกรรมโยธาเพื่อการพัฒนา

ชุมชน) วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท
ป่าตอง จังหวัดภูเก็ต.

ธนสาร อุดมโชค. 2545. การจัดการน้ำใต้ดินและการประเมินประสิทธิผลโครงการพัฒนาน้ำใต้ดิน
สุโขทัย.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความใน
พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนด
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ดัชนีในพื้นที่ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 117 ตอนพิเศษ 95 ง ลงวันที่
15 กันยายน 2543

พัชรพร อธิสุขนันท์. 2548. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำ
บาดาลในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิศาล ชัยสาขันธ์. 2545. การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินในโครงการน้ำใต้ดินสุโขทัยโดยใช้
โปรแกรม MODFLOW. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มณีรัตน์ บุษชา. 2549. การประเมินอัตราการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหย จากพื้นที่กำจัดมูล
ฝอยในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระพล เต็มสมบัติ. 2538. หลักสูตรกวิทยา. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์,
กรุงเทพมหานคร.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะ
เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตร
ศาสตร์. 2545. โครงการศึกษาและออกแบบรายละเอียดศูนย์กำจัดมูลฝอยรวมแบบครบ
วงจร องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี.

ไสว พงศ์สุวรรณ. 2530. **หลักอุทกวิทยา**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ลำออง ศรีนิลทา. 2535. บทที่ 3 สมบัติฟิสิกส์บางประการของดิน, น. 65- 152. ใน **ปฐพีวิทยา
เบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 7. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอสทีเอส อินสตรูเมนต์ จำกัด. 2548. รายงานผลการเจาะสำรวจดินเพื่อติดตั้งบ่อสังเกตการณ์น้ำใต้
ดิน โครงการบ่อฝังกลบขยะที่อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี (เอกสารรายงานต่อ
มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์)

อุดร ระโหฐาน. 2545. การสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางการจัดการการปนเปื้อนของน้ำ
ชะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหาร
ส่วนจังหวัดนนทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ahlich, J.L. 1972. Chapter 1: The Soil Environment, pp. 3-46. In **Organic Chemicals in the
Soil Environment**. Vol. 1. C.A. Goring and J.W. Hamaker (eds.). Marcel Dekker, inc.,
New York.

Allen, M.R., A. Braitwaite and C.C. Hills. 1997. Trace Organic Compounds in Landfill Gas at
Seven U.K. Waste Disposal Site. **Environ. Sci. Technol.** 31: 1054-1061.

Alloway, B.J. 1995. **Heavy Metals in Soils**. 2nd ed. Blackie Academic & Professional,
London.

American Public Health Association (APHA). 1985. **Standard Methods for the Examination
of Water and Wastewater**. 16th Edition., Washington, D.C.

American Society for Testing and Materials. 1971. **Annual book of ASTM standard**. MD., USA.

Anderson, M.P. and W.W. Woessener. 1992. **Applied groundwater modelling simulation of flow and advective transport**. Academic Press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.

Baun, A. , L.A. Reitzel, A. Ledin, T.H. Christensen and P.L. Bjerg. 2003. Natural attenuation of xenobiotic organic compounds in a landfill leachate plume (Vejen, Denmark). **Contaminant Hydrology**. 65: 269-291.

Card, T.R. 1998. Fundamentals: Chemistry and Characteristics of Odors and OCs. pp. 2.1-2.36. *In* **Odor and VOC Control Handbook**. H.J. Rafson (ed.). The McGraw – Hill Company, New York, U.S.A.

Christensen, J.S. and J. Elton. 1996. **Soil and Groundwater Pollution from BTEX**. Groundwater Pollution Primer. Virginia Tech: Civil Engineering Department.

Christensen, T.H., R. Cossu and R. Stegmann. 1992. **Landfilling of Waste: Leachate**. Elsevier Science Publ. Ltd., England. 520 p.

Christensen, T.H., P. Kjeldson, H.J. Heron, P.H. Nielsen, P.L. Bjerg and P.E. Holm. 1994. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. **Environ. Sci. Technol.** 24: 119-202.

_____, _____, P.L. Bjerg, D.L. Jensen, J.B. Christensen, A. Baun, H.J. Albrechtsen and G. Heron. 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Geochemistry**. 16: 659-718.

- Dass, P., G.R. Tamke and C.M. Stoffel. 1977. Leachate production at sanitary landfill sites. **Environ. Eng.** 103: 981-988.
- David, W.G. 1981. **Biology and chemical treatment of landfill leachate.** Master thesis, The University of British Columbia Vancouver.
- Edil, T.B. 2003. A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners. **Waste Manag.** 23: 561-571.
- Eklund, B., E.P. Anderson, B.L. Walker and D.B. Burrows. 1998. Characterization of Landfill Gas Comparison at the Fresh Kills Municipal Solid Waste Landfill. **Environ. Sci. Technol.** 32: 2233-2237.
- Foose, G.J., C.H. Benson and T.B. Edil. 2002. Comparison of solute transport in three composite liners. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** 128 (5), 391- 403
- Foster, S.J. and B.D. Beck. 1996. Basement gas: Issues related to the migration of potentially toxicchemicals into house basements from distant sources. **Toxicology and Industrial Health.** 12 (2): 165-177.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry. 1979. **Groundwater.** Prentice- Hall, Inc.
- Guiguer and N.T. Franz. 1999. **Visual Modflow, The Integrated Modeling Environmental for MODFLOW and MODPATH.** Waterloo Hydrogeologic Software
- Goode, D.J. and C.A. Appel. 1992. **Finite-difference interblock transmissivity for unconfined aquifers and for aquifers having smoothly varying transmissivity:** U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4121. 79 p.

Harbaugh, A.W. 1992. **A generalized finite-difference formulation for the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model:** U.S. Geological Survey Open- File Report 91-494. 60 p.

_____, E.R. Banta, M.C. Hill and M.G. McDonald. 2000. **MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process:** U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92. 130 p.

_____, and M.G. McDonald. 1996a. **User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model:** U.S. Geological Survey Open- File Report 96-485. 56 p.

_____. 1996a. **Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model:** U.S. Geological Survey Open- File Report 96-486. 220 p.

Hill, M.C. 1990. **Preconditonal Conjugate-Gradient 2 (PCG2), a computer program for solving ground- water flow equations:** U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4048. 43 p.

_____. 1998. **Methods and guidelines for effective model calibration:** U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4005. 90 p.

_____, E. R Banta, A. W. Harbaugh and E. R. ANDERMAN. 2000. **MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs:** U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184. 210 p.

Hounslow, W. 1995. **Water Quality Data Analysis and Interpretation**. CRC Press. Inc.,
Lewis publishers.

Hunter, P. and S.T. Oyama. 2000. **Control of Volatile Organic Compound Emissions**.
A Wiley – Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc. New York. U.S.A.

Japan International Cooperation Agency JICA Department of Mineral Resources Ministry of
Industry and Public Works Department Ministry of Interior the Kingdom of
Thailand. 1995. *In* final report main report. **The Study on Management of
Groundwater and Land Subsidence in The Bangkok Metropolitan Area and Its
Vicinity**. KOKUSAI KOGYO CO., LTD.

Kohnke, H. 1968. **Soil Physics**. McGraw- Hill, New York. U. S. A.

Kokusai Kogyo Co., LTD. 1995. **The study on management of groundwater and land
subsidence in the Bangkok metropolitan area and its vicinity**: Final report prepared
for the Japan International Cooperation Agency (JICA) and the Department of Mineral
Resources, Ministry of Industry, Thailand.

LaGrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans. 2001. **Hazardous Waste Management**.
McGraw-Hill Inc, Singapore.

Lang, R.J. (1989a) **Modeling the movement of trace gases in municipal solid waste landfills**.
University of California: Davis (unpublished thesis).

_____. (1989b) **Summary report: Movement of gases in municipal solid waste landfills**.
California Waste Management Board: Sacramento.

- Leake, S.A., and D.E. Prudic. 1991. **Documentation of a computer program to simulate aquifer system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model**: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A2, 68 p.
- Leckie, J.O., J.G. Pacey and C. Halvadakis. 1979. Landfill Management with Moisture Control. **Environ. Eng.** 105: 337-355.
- Logan, J. 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. **Ground Water**. 2: 35-37.
- McDonald, M.G. 1988. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
- _____, and A.W. Harbaugh. 1984. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875. 528 p.
- _____, _____, B. R. Orr and D. J. Ackerman. 1992. **A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground -water flow model**: U.S. Geological Survey Open-File Report 91- 536. 99 p.
- Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse**. 3rd, ed., McGraw-Hill, Inc., New York.
- Mueller, W., R. Jakob, R. Tatzky-Gerth and H. August. 1998. Solubilities, dilution and partition coefficients of organic pollutants in HDPE geomembranes: experimental results and calculations. pp. 239–248. **In: Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics**. Industrial Fabrics Association International, Atlanta.

Office of Water. 1994. **National Primary Drinking Water Standards**, U. S. Environmental Protection Agency

Nicolson, R.V., J.A. Cherry. And E.J. Reardon. 1983. Migration of contaminants in ground water at A landfill: A Case Study 6. Hydrogeochemistry. **Journal of Hydrology**. 63: 76-131

Ou, W. 1989. **Soil Column Process for Landfill Leachate Treatment**. M.S. Thesis Asia Institute of Technology. Patumtanee.

Park, J.K. and M. Nibras. 1993. Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes. **Water Environment Research**. Washington, DC 65 (3), 227-237.

Prudic, D.E. 1989. **Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relation using a modular, finite-difference, ground-water flow model**: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-729. 113 p.

Rowe, R.K. 1998. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. pp. 27–102. **In: Proceedings of the Sixth international Conference on Geosynthetics**. Industrial Fabrics Association International, Atlanta.

Sanders, L.L. 1998. **A Manual of Field Hydrogeology**. Prentice Hall, Inc.

Sara, N. Martin. 1993. **Standard Handbook for Solid and Hazardous Waste Facility Assessments**. Lewis Publishers. An imprint of CRC Press.

Symons and M. James 1992. **Drinking water - Refreshing answers to all your questions**. Texas A & M University Press.

Tchobanoglous, G., H. Theisen And S. Vigil. 1993. **Integrated Solid Waste Management; Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill Inc, Singapore.

Thornton, S.F., M.I. Bright, D.N. Lerner and J.H. Tellam. 2000. Attenuation of landfill leachate by UK Triassic sandstone aquifer materials Sorption and degradation of organic pollutants in laboratory columns. **Contaminant Hydrology**. 43: 355-383.

Townsend, T.G., W.L. Miller, M.J. Lee and J.F.K. Earle. 1996. Acceleration of Landfill Stabilization using Leachate Recycle. **Environ. Eng.** 122: 263-268.

U.S. Army Corps of Engineers. 1994. **Sanitary Landfill**. USACE Technical Manual, Publication No. TM 5-814-5, January 1994.

U.S. Environmental Protection Agency. 1971. **Pollution of Subsurface Water by Sanitary Landfills**. Dresel University, Virginia.

Verchueren, K. 1996. **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. 3rd ed. USA.

Walton, W.C. 1996. **Aquifer Test Analysis with Windowss Software**. CRC Press Inc, Boca Ration.

Ward, R.S., G.M. Williams and C.C. Hills. 1996. Changes in major and trace components of landfill gas during subsurface migration. **Waste Management & Research**. 14: 243-261.

Waterloo HydroGeoLogic Inc. 2003. **The Wateloo Training Course Series Groundwater Modeling Education Packet Present**. n.p.

_____. 2003. **Visual MODFLOW V.3.1 User's Manual for Professional Application in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling.** n.p.

_____. 2003. **WinPEST User's Manual Non-Linear Parameter Estimation and Predictive Analysis Program.** n.p.

Yassaa, N., E. Brancaleoni, M. Frattoni and P. Ciceoli. 2001(a). Trace Level Determination of Enantiomeric Monoterpenes in Terrestrial Plant Emission and in the Atmosphere Using a Capillary Column Coupled with Thermal Desorption and Mass Spectrometry. **Journal of Chromatography.** 915: 185-197.

_____, M.Y. Meklati, A. Cecinato and F. Marino. 2001(b). Organic Aerosols in Urban and Waste Landfill of Algiers Metropolitan Area: Occurrence and Sources. **Environ. Sci. Technol.** 35: 306-311.

U.S. Army Corps of Engineers. 1995. **Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems,** USACE Technical Letter, Publication No. ETL 1110-1-160, 17 April, 1995.

Zheng, C. 1996. **MT3D a modular three dimensional transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems:** S. S. Papadopolus and Assoc., Inc.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แผนที่ของสถานที่กำจัดมูลฝอยและตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน



ภาพผนวกที่ ก1 แผนที่แสดงที่ตั้งของสถานที่กำจัดมูลฝอย
 ที่มา: เอสทีเอส (2548)



ภาพผนวกที่ ก2 ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน
 ที่มา: เอสทีเอส (2548)

ภาคผนวก ข

เทอมที่ใช้ในการทดสอบดิน (List of terms used)

LIST OF TERMS USED

DRILLING & SAMPLING SYMBOLS

SS	:	Split-Spoon - 1 3/8" I.D., 2" O.D., except where noted
ST	:	Shelby Tube - 2" O.D., except where noted
PA	:	Power Auger Sample
DB	:	Diamond Bit - NX:BX:AX:
CB	:	Carbology Bit - NX:BX:AX:
OS	:	Osterberg Sampler - 3" Shelby Tube
HS	:	Housel Sampler
WS	:	Wash Sample
FT	:	Fish Tail
RB	:	Rock Bit
WO	:	Wash Out

Standard "N" Penetration : Blows per foot of a 140 pound hammer falling 30 inches on 2 inches O.D. split spoon, except where noted.

WATER LEVEL MEASUREMENT SYMBOLS

WL	:	Water Level	WD	:	While Drilling
WCI	:	Wet Cave In	BCR	:	Before Casing Removal
DCI	:	Dry Cave In	ACR	:	After Casing Removal
WS	:	While Sampling	AB	:	After Boring

Water levels indicated on the boring logs are the levels measured in the boring at the times indicated. In pervious soils, the indicated elevations are considered reliable ground water levels. In impervious soils, the accurate determination of ground water elevations is not possible in even several days observation, and additional evidence on ground water elevations must be sought.

CLASSIFICATION

COHESIONLESS SOILS

"Trace"	:	1 % to 10 %
"Trace to some"	:	10 % to 20 %
"Some"	:	20 % to 35 %
"And"	:	35 % to 50 %
Very Loose	:	N = 0 - 4 blows
Loose	:	N = 4 - 10 blows
Medium	:	N = 10 - 30 blows
Dense	:	N = 30 - 50 blows
Very Dense	:	N = over 50 blows

COHESIVE SOILS

If clay content is sufficient to that clay dominates soil properties, then clay becomes the principle noun with the other major soil constituent as modifier, i.e., silty clay. Other minor soil constituents may be added according to classification breakdown for cohesionless soils, i.e., silty clay, trace to some sand, trace gravel.

Very Soft	:	0.00 - 0.25	Tsf. or	0 - 2	blows
Soft	:	0.25 - 0.50	Tsf. or	2 - 4	blows
Medium	:	0.50 - 1.00	Tsf. or	4 - 8	blows
Stiff	:	1.00 - 2.00	Tsf. or	8 - 16	blows
Very Stiff	:	2.00 - 4.00	Tsf. or	16 - 32	blows
Hard	:	Over 4.00	Tsf. or	> 32	blows

Unified Soil Classification

Field Identification Procedures (Excluding particles larger than 3 mm and using fractions on estimated weights)				Group Symbols ^a	Typical Names	Information Required for Describing Soils	Laboratory Classification Criteria
Coarse-grained soils More than half of material is larger than No. 200 sieve size ^b	Gravels More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size	Gravels with little or no fines	Wide range in grain size and substantial amounts of all intermediate particle sizes	<i>GW</i>	Well graded gravels, gravel sand mixtures, little or no fines	Give typical name, indicate approximate percentages of sand and gravel, maximum size, angularity, surface condition, and hardness of the coarse grains, local or geologic name and other pertinent descriptive information, and symbols in parentheses	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for GVV
	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Gravels with little or no (appreciable) fines	Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	<i>GP</i>	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
Fine-grained soils More than half of material is smaller than No. 200 sieve size ^b	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Gravels with little or no (appreciable) fines	Plastic lines (for identification procedures, see <i>CL</i> blow)	<i>GM</i>	Silty gravels, poorly graded gravel-sand mixtures	For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for SW
	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Gravels with little or no (appreciable) fines	Wide range in grain sizes and substantial amounts of all intermediate particle sizes	<i>SW</i>	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines	Examples: Silty sand, gravelly; about 20% hard, rounded, gravel particles 12 mm maximum size, rounded and subangular sand grains coarse to fine, about 15% nonplastic lines with low dry strength; well compacted and moist in place, alluvial sand; (<i>SM</i>)	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
Identification Procedures on Fraction Smaller than No. 40 Sieve Size	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Gravels with little or no (appreciable) fines	Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	<i>SP</i>	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; colour in wet condition, odour if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses	Determine percentages of gravel and sand from grain size curve Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size) coarse grained soils are classified as follows: Less than 5% 5% to 12% More than 12%
	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Gravels with little or no (appreciable) fines	Plastic lines (for identification procedures, see <i>CL</i> blow)	<i>SM</i>	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remoulded states, moisture and drainage conditions	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
Silt and clays greater than 50 liquid limit	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Distinction (reaction to shaking) character (stiffness)	<i>ML</i>	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; colour in wet condition, odour if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Distinction (reaction to shaking) character (stiffness)	<i>CL</i>	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remoulded states, moisture and drainage conditions	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
Highly Organic Soils	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Distinction (reaction to shaking) character (stiffness)	<i>OL</i>	Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	Example: Clayey silt, brown, slightly plastic; small percentage of fine sand; numerous vertical root holes; firm and dry in place; loss; (<i>ML</i>)	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4
	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Silt and clays greater than 50 liquid limit	Distinction (reaction to shaking) character (stiffness)	<i>OH</i>	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	Example: Clayey silt, brown, slightly plastic; small percentage of fine sand; numerous vertical root holes; firm and dry in place; loss; (<i>ML</i>)	Atterberg limits below - A* line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above - A* line, with <i>PI</i> symbols greater than 4



From Wagner, 1957.

^a Boundary classifications. Soils possessing characteristics of two groups are designated by combinations of group symbols. For example GW-GC, well graded gravel-sand mixture with clay binder.

^b All sieve sizes on this chart are U.S. standard.

These procedures are to be performed on the minus No. 40 sieve size particles.

Field Identification Procedures for Fine Grained Soils or Fractions

Dry Strength (Crumbling characteristics):

After removing particles larger than No. 40 sieve size, prepare a pat of soil to the consistency of putty, adding water if necessary. Allow the pat to dry completely by oven, sun or air drying, and then test its strength by breaking and crumbling between the fingers. This strength is a measure of the character and quantity of the colloidal fraction contained in the soil. The dry strength increases with increasing plasticity.

High dry strength is characteristic for clays of the CH group. A typical inorganic silt possesses only very slight dry strength. Silty fine sands and silts have about the same slight dry strength, but can be distinguished by the feel when powdering the dried specimen. Fine sand tests entirely whereas a touch will flake the smooth test of flour.

Toughness (Consistency near plastic limit):

After removing particles larger than No. 40 sieve size, a specimen of soil about 12 mm cube in size, should be moulded to the consistency of putty. If too dry, water must be added and if sticky, the specimen should be spread out in a thin layer and allowed to lose some moisture by evaporation. Then the specimen is rolled out by hand on a smooth surface or between the palms into a thread about one-eighth inch in diameter. The thread is then folded and is rolled repeatedly. During this manipulation the moisture content is gradually reduced and the specimen stiffens, finally loses its plasticity and crumbles when the plastic limit is reached.

After the thread crumbles, the pieces should be lumped together and a slight kneading action continued until the lump crumbles.

The toughness near the plastic limit and the stiffer the lump when it finally crumbles, the higher is the colloidal clay fraction in the soil. Weakness of the thread at the plastic limit and quick loss of cohesiveness of the lump below the plastic limit indicate either inorganic clay of low plasticity or organic clay of high plasticity.

ภาคผนวก ก

รายงานการเจาะสำรวจและทดสอบชั้นดิน

[illegible]

[illegible]

[illegible]

LOG OF BORING No. BH-4																
PROJECT : บ่อฝังกลบขยะที่อำเภอไทรน้อย					LOCATION : จังหวัดนนทบุรี											
CLIENT :																
DEPTH, m	SAMPLE No.	TYPE OF SAMPLE	SAMPLE DIST RECOVERY	DESCRIPTION OF MATERIAL	GRAPHIC LOG	☐ Natural Water Content ☒ Plastic Limit ☐ Liquid Limit (%)	☐ Su (UC) ☒ Su' (UC) ☐ Su (Fv) ☒ Su' (Fv) ☒ Qp/2 (t/m ²) ☐ SPT ,N (Blow/ft)	2.5	5	7.5						
0								20	40	60	80	100	20	40	60	
	01	SS		Clay, trace fine sand, light - brownish grey, soft to medium. (CH)												
	02	SS		light - brownish grey, soft to medium. (CH)												
	03	ST		1.50 m.												
	04	ST														
	05	ST														
	06	ST														
	07	ST														
	08	ST														
	09	ST		Clay, trace fine sand, grey & dark grey, soft. (CH)												
5	10	ST														
	11	ST														
	12	ST														
	13	ST														
	14	ST														
	15	ST														
	16	ST		8.00 m.												
				END OF BORING												
10																
15																
20																
25																

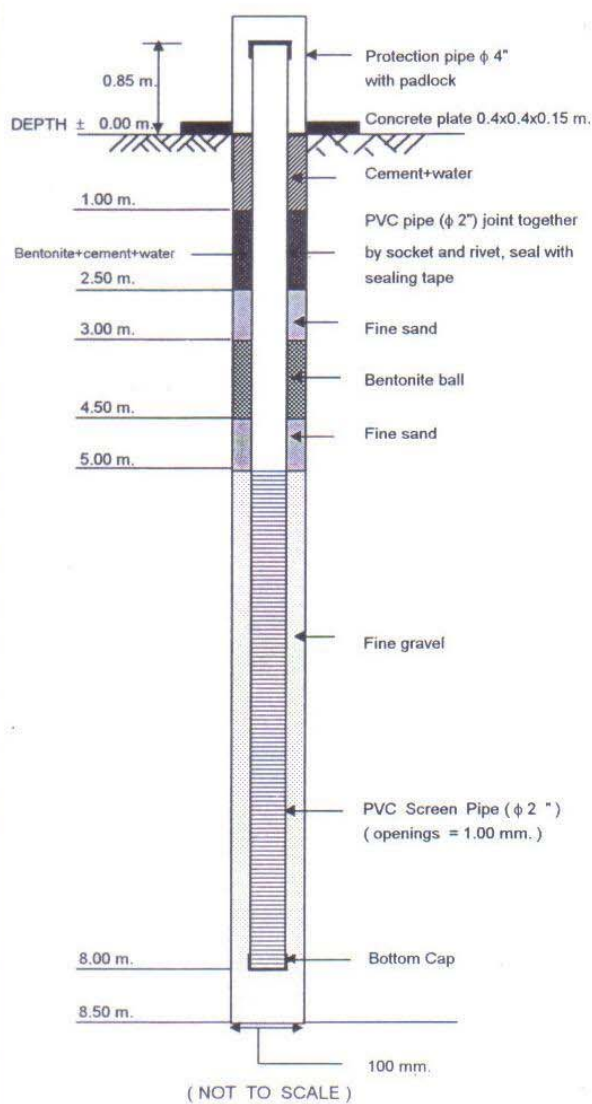
STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED	BORING STARTED. 23/03/05	RIG. ACKER	WL. -1.80 M	24 HRS. AFTER BORING.
	BORING FINISHED. 23/03/05	FOREMAN SC.	JOB No. 10102	

ภาคผนวก ง

รายละเอียดข้อสังเกตการณ์

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
TYPICAL MONITORING WELL INSTALLATION

PROJECT : บ่อฝังกลบขยะ	HOLE NO. :	BH-1	JOB NO. :	10102
LOCATION : ที่ อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี	TYPE OF TEST :		CASING DIAMETER :	10 cm.
DEPTH OF BOREHOLE : 8.50 m.	DATE OF INS. :	23/3/05	W.L. BEFORE INS. (M.) :	-1.00 m



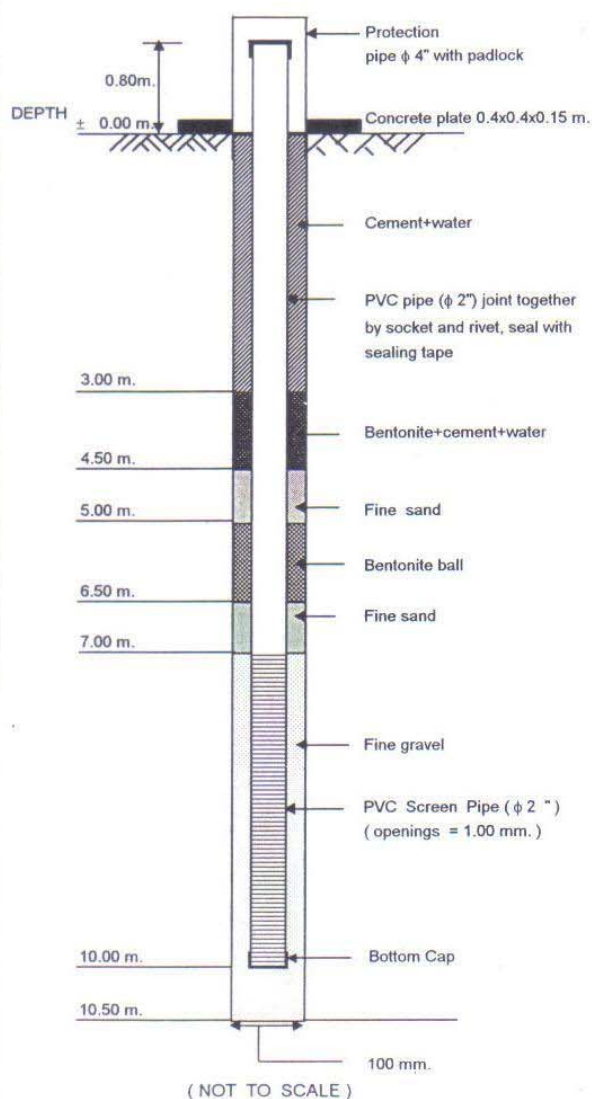
WATER MEASURED

[illegible]

REMARK : GWL MEASURED BELOW GROUND

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
TYPICAL MONITORING WELL INSTALLATION

PROJECT : บ่อฝังกลบขยะ	HOLE NO. :	BH-3	JOB NO. :	10102
LOCATION : ที่ อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี	TYPE OF TEST :		CASING DIAMETER :	10 cm.
DEPTH OF BOREHOLE : 10.50 m.	DATE OF INS. :	25/3/05	W.L. BEFORE INS. (M.) :	-2.70 m



WATER MEASURED

[illegible]

REMARK : GWL MEASURED BELOW GROUND

ภาคผนวก จ

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่สถานีอุตุณิยมหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2514 – 2543)

ตารางผนวกที่ ๑ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่สถานีอุตุนิยมวิทยา (พ.ศ. 2514 – 2543)

	มด.	กพ.	มี.	เม.	พค.	มิ.	กค.	สค.	กย.	ตค.	พย.	ธค.	รายปี
ความผันแปรอากาศ(ขอได้ปาลา)													
เฉลี่ย	1012.41	1011.24	1010.03	1008.44	1007.21	1006.53	1006.66	1006.86	1008.07	1009.81	1011.64	1013.15	1009.34
ค่าสูงสุด	1023.10	1021.33	1021.71	1017.07	1014.06	1013.01	1013.34	1013.22	1018.61	1018.59	1020.38	1023.33	1023.33
ค่าต่ำสุด	1004.42	1002.27	1001.66	999.66	999.40	999.30	999.30	999.38	1000.76	1001.83	1003.32	1002.58	999.30
ช่วงห่างเฉลี่ยรายวัน	4.73	4.80	4.80	4.38	3.75	3.71	3.92	4.47	4.55	4.43	4.61	4.41	
อุณหภูมิ(เฉลี่ยปี)													
เฉลี่ย	27.7	29.1	30.1	29.7	29.1	28.7	28.4	28.0	27.8	27.1	25.9	28.2	
สูงสุดเฉลี่ย	32.2	32.9	34.0	35.1	34.4	33.4	33.0	32.7	32.6	32.3	31.9	31.4	33.0
ต่ำสุดเฉลี่ย	21.7	23.7	25.4	26.4	25.9	25.8	25.3	25.2	24.8	24.5	23.3	21.1	24.4
ค่าสูงสุด	37.6	37.0	37.6	40.0	39.5	37.7	37.8	37.0	36.0	36.2	36.0	35.8	40.0
ค่าต่ำสุด	14.9	15.7	21.9	22.0	22.5	22.1	21.6	22.1	18.3	14.2	10.5	10.5	
ความชื้นสัมพัทธ์(%)													
เฉลี่ย	73	74	74	76	76	76	77	80	80	73	69	75	
สูงสุดเฉลี่ย	88	89	88	90	89	89	90	93	92	88	84	89	
ต่ำสุดเฉลี่ย	49	54	54	58	60	60	61	63	62	55	51	57	
ค่าต่ำสุด	26	17	23	34	38	40	43	40	33	32	29	17	
การระเหย(มม.)													
เฉลี่ย	135.6	143.6	183.6	183.3	173.7	151.4	150.3	151.6	128.6	122.8	124.4	133.6	1782.5
ลม(มก)													
ความเร็วเฉลี่ย	2.3	4.7	4.1	3.3	3.5	3.4	3.4	2.2	1.9	2.2	2.4	-	
ทิศทาง	E, S	S	S	S	S	S, SW	S, SW	SW	W	NE	NE	NE	-
ความเร็วสูงสุด	32	34	45	38	35	40	42	36	42	30	28	45	
ฝน(มม.)													
เฉลี่ย	9.1	19.6	31.3	219.6	149.5	161.4	213.6	345.3	268.9	46.0	5.0	1543.2	
จำนวนวันที่ฝนตก	1.4	2.5	2.9	15.8	16.1	17.3	19.8	20.9	17.3	6.0	8	127.1	
ค่าสูงสุดรายวัน	41.9	55.4	88.4	248.6	167.3	108.6	128.9	156.7	143.9	116.6	32.0	248.6	

ภาคผนวก จ

ข้อมูลปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนที่คัดเลือก

ตารางผนวกที่ ๑1 ข้อมูลปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนที่คัดเลือก

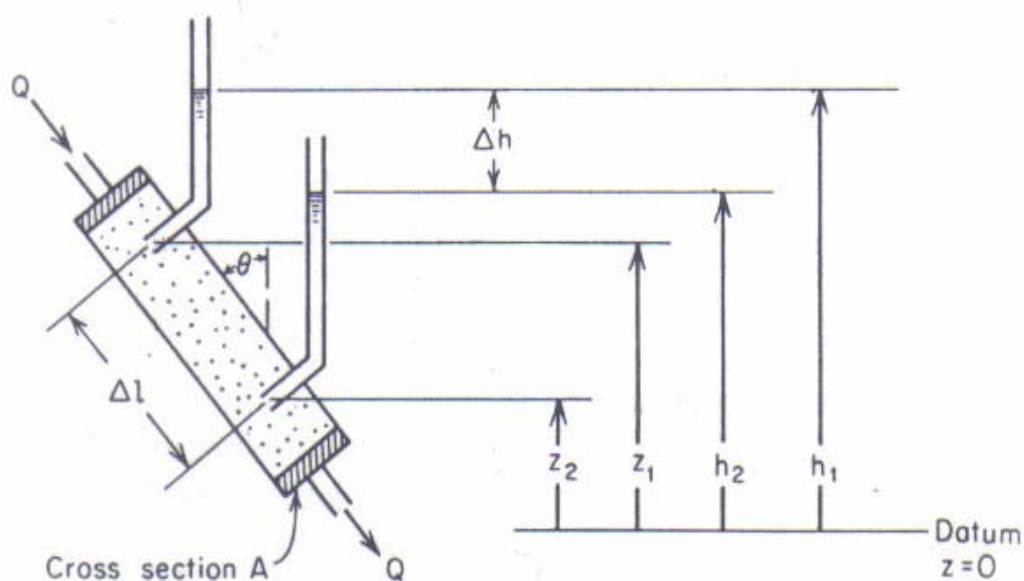
ลำดับ ที่	ชื่อสถานี	รหัส	ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม.)											
			เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	พ.ค.
1.	จ.เมืองจ. นครปฐม	23012	39.7	140.8	142.2	110.8	135.1	232.9	228.2	46.8	7.8	2.5	7.0	18.9
2.	จ.เมืองจ. นครปฐม	31012	51.7	146.8	135.1	139.7	163.8	258.1	194.7	28.5	6.1	7.1	16.2	15.5
3.	จ.ปากเกร็ดจ. นครปฐม	31022	52.2	160.1	120.0	138.0	158.9	296.4	245.0	50.7	3.0	7.1	10.6	27.9
4.	จ.บางกรวยจ. นครปฐม	31032	57.0	161.0	141.2	140.0	181.2	249.8	253.1	62.3	0.1	7.9	10.3	35.8
5.	จ.สวนผึ้งจ. นครปฐม	31132	65.3	161.0	111.5	97.8	127.4	230.5	224.1	21.5	7.8	6.6	10.4	46.3
6.	จ.เมืองจ. ปทุมธานี	32012	60.1	138.8	128.5	132.0	152.6	254.0	181.2	33.5	5.9	7.6	13.0	22.1
7.	จ.ลำลูกกาจ. ปทุมธานี	32062	59.3	179.0	146.6	157.9	168.3	276.6	162.4	17.5	1.9	3.3	8.8	38.9
8.	สถานีเกษตรประสาธน์สวนหลวง ร.๙	41111	74.6	197.5	143.6	172.6	185.3	322.2	263.7	53.0	4.9	16.8	20.1	37.7
9.	จ.เมืองจ. พระนครศรีอยุธยา	42012	58.5	127.3	133.1	124.4	145.3	238.9	137.0	23.7	2.9	3.4	6.4	15.4
10.	จ.บางบาลจ. พระนครศรีอยุธยา	42072	52.1	115.1	106.2	90.6	116.2	188.5	148.8	26.0	1.7	3.6	9.5	18.2
11.	จ.นครหลวงจ. พระนครศรีอยุธยา	42122	60.6	137.8	135.4	114.3	169.2	214.2	133.2	35.7	3.2	5.5	10.3	19.6
12.	จ.เมืองจ. สุพรรณบุรี	51012	73.3	183.6	133.1	134.3	168.1	287.8	202.9	38.6	4.5	12.5	22.5	27.2
13.	จ.บางปลารจ. สุพรรณบุรี	51032	50.8	144.9	135.7	113.1	137.2	239.5	185.7	30.4	2.8	11.5	11.1	21.2
14.	จ.เมืองจ. สุพรรณบุรี	52012	66.0	157.0	114.5	128.3	170.3	251.9	244.9	65.3	8.0	5.9	27.7	28.6
15.	นิคมบางไผ่จ. สุพรรณบุรี	52062	60.2	179.3	96.5	108.1	164.0	297.1	265.9	29.6	3.4	6.9	10.5	51.0

ภาคผนวก ช

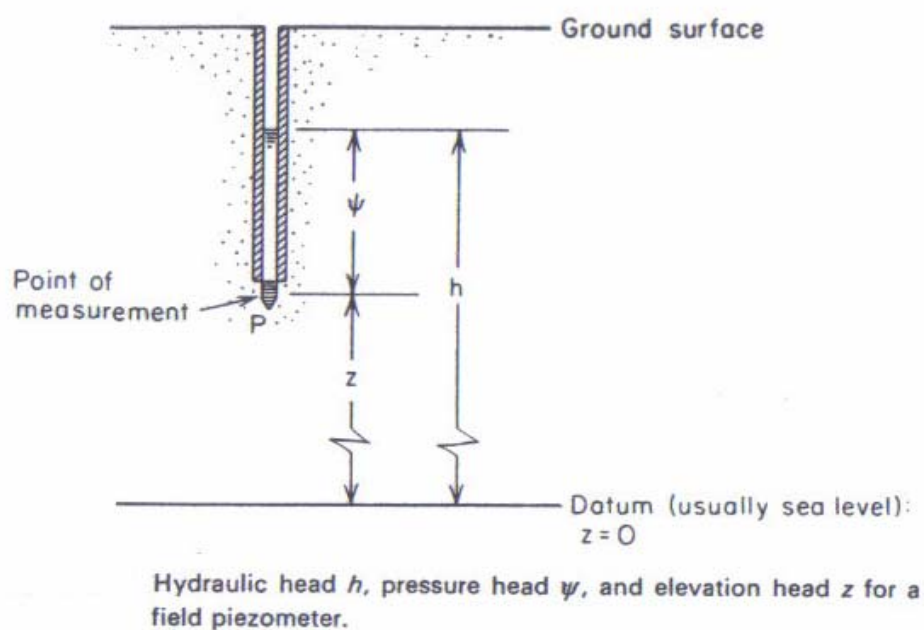
วิธีการหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

การหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

อุปกรณ์พื้นฐานในการหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินได้แก่ หลอด (tube) หรือท่อ (pipe) ที่สามารถหาระดับน้ำได้ ในห้องปฏิบัติการมีการใช้หลอดที่เรียกว่า Manometer (ภาพผนวกที่ ข1) สำหรับในภาคสนาม (ภาพผนวกที่ ข2) มีการใช้ท่อที่เรียกว่า Piezometers ซึ่งต้องมีการอุดรอยรั่วตลอดความยาวทั้งหมด มีทางให้น้ำไหลเข้าอยู่ด้านล่างสุดและมีช่องเปิดสู่บรรยากาศอยู่ด้านบนสุด ปากท่อสำหรับน้ำเข้า (intake) ปกติจะเป็นช่องเล็ก ๆ slotted pipe หรือ well point ถูกออกแบบมาเพื่อให้น้ำไหลเข้าได้อย่างเดียว แต่ไม่ให้ดินเหนียว ทราย กรวด หรือสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ เข้าไปด้านในท่อ ซึ่งอาจจะทำให้ท่อเกิดการอุดตัน ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดใน Piezometer คือจุดที่อยู่ด้านล่างสุด ไม่ใช่ที่ตำแหน่งระดับน้ำ ในปัจจุบันมีอุปกรณ์สำหรับการวัดระดับน้ำใต้ดินหลายชนิด เช่น pressure transducers, pneumatic devices และ electronic components เป็นต้น

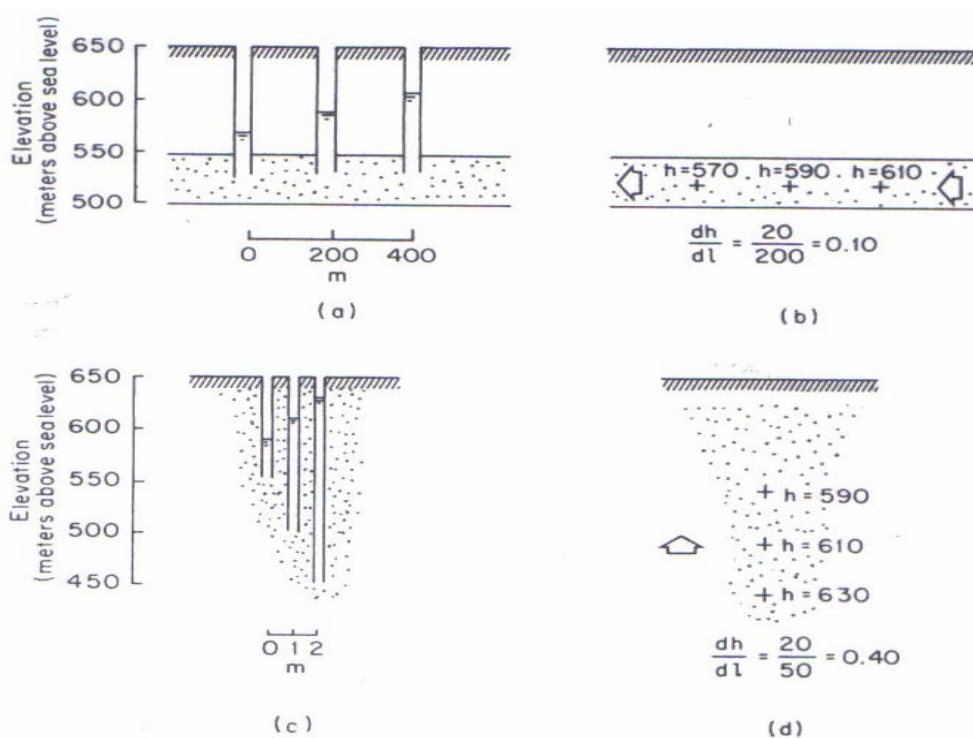


ภาพผนวกที่ ข1 อุปกรณ์การทดลองสำหรับหาระดับน้ำและสาธิตสมการของดาร์ซี
ที่มา: Freeze and Cherry (1979)



ภาพผนวกที่ ข2 อุปกรณ์การทดลองสำหรับหาระดับน้ำในภาคสนาม (Piezometers)

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)



ภาพผนวกที่ ข3 อุปกรณ์การหาระดับน้ำและทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน (Piezometers)

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

การติดตั้ง Piezometers ปกติแล้วจะติดตั้งเป็นกลุ่ม เพื่อใช้ในการหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข3(a) และ ข3 (b) ซึ่งประกอบด้วย Piezometers จำนวน 3 บ่อ ติดตั้งอยู่ในแนวเดียวกัน มีความลึกของบ่อเท่ากัน ระยะห่างแต่ละบ่อเท่ากับ 200 เมตร เมื่อทราบระดับน้ำใต้ดิน (head) ในแต่ละบ่อแล้วก็สามารถคำนวณหาความลาดทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient, dh/dl) ได้ และหากทราบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (hydraulic conductivity, K) ของชั้นดิน ก็สามารถประยุกต์สมการของดาร์ซี (Darcy's law) ในการคำนวณอัตราการไหลจำเพาะ (specific discharge) หรือ ปริมาตรของการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลได้ ในกรณีนี้ ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจะไหลจากด้านขวาไปด้านซ้าย เนื่องจากธรรมชาติของน้ำใต้ดินจะไหลจากจุดที่มีระดับน้ำ (head) สูงไปยังจุดที่มีระดับน้ำต่ำกว่าเสมอ

ในบางกรณีมีความแตกต่างของระดับน้ำในแนวตั้ง (vertical potential gradient) การหาทิศทางการไหลจะทำการติดตั้ง Piezometer nest ซึ่งประกอบด้วย Piezometers มากกว่าหรือเท่ากับสอง บ่อ ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งใกล้ ๆ กัน (ถ้าเป็นไปได้ควรให้อยู่ในบ่อเดียวกัน) โดยให้ระดับความลึกที่กันบ่อไม่เท่ากัน และควรให้อยู่ในชั้นดินต่างชนิดกัน ดังภาพผนวกที่ ข3(c) และ ข3(d) แสดงให้เห็น Piezometer nest ในบริเวณที่น้ำใต้ดินมีทิศทางการไหลขึ้น (upward groundwater flow)

การกระจายของระดับน้ำ (hydraulic head) ในระบบน้ำใต้ดิน จะเป็นแบบสามมิติ ส่วนกลุ่มของ Piezometers ที่แสดงในภาพที่ เป็นเพียงองค์ประกอบของการไหลในทิศทางสองมิติ เท่านั้น ถ้า Piezometers มีจำนวนมากเพียงพอ กระจายตัวผ่านชั้นดินและน้ำใต้ดินในระบบสามมิติ ซึ่งสามารถนำค่าระดับน้ำใต้ดินในแต่ละตำแหน่งที่เท่ากันมาเขียนเส้นชั้นความสูง (contour the position of equal hydraulic head) ในระบบสามมิติตำแหน่งต่าง ๆ ดังกล่าวจะทำให้เกิด equipotential surface ส่วนในระบบสองมิติจะเรียกเส้นที่ลากผ่านตำแหน่งที่ระดับน้ำเท่ากันว่า equipotential lines.

ภาคผนวก ข

สมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินแบบสองมิติ

สมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลแบบคงที่ ของตัวกลางที่เป็นวัสดุพอร์แบบเนื้อเดียวกัน ในสองมิติ ได้แก่ partial differential equation จากสมการของ Laplace (อ้างอิง Freeze and Cherry, 1979) ได้แก่

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{ข1})$$

เพื่อที่จะหาสมการ finite-difference สำหรับแต่ละ node จะต้องแบ่งพื้นที่ของการไหล ออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งจะต้องแปลง second order partial derivatives ในสมการที่ (ข1) โดยพิจารณา เทอมแรกก่อน จากนั้นของ partial derivative ซึ่งสัมพันธ์กับ x ของฟังก์ชันสองตัวแปร $h(x, z)$ คือ

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{h(x + \Delta x, z) - h(x, z)}{\Delta x} \quad (\text{ข2})$$

ในเครื่องคิดเลขเป็นไปไม่ได้ที่จะให้ลิมิตของ $\Delta x \rightarrow 0$ แต่เป็นไปได้ที่จะประมาณค่าของ ลิมิตให้มีค่าน้อยที่สุด ในความเป็นจริงสามารถกำหนดให้ node network มีระยะห่างของ Δx น้อย ๆ สำหรับแต่ละค่าของ z เรียก z_0 เราสามารถขยาย $h(x, z_0)$ ในอนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's expansion) รอบจุด (x_0, z_0) ดังนี้

$$h(x, z_0) = h(x_0, z_0) + (x - x_0) \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_0, z_0) + \dots \quad (\text{ข3})$$

ถ้ากำหนดให้ $x = x_0 + \Delta x$ (เรียกว่า forward difference) และไม่สนใจเทอมที่มี order มากกว่าหนึ่ง ดังนั้น สามารถประมาณค่าของ $\partial h / \partial x$ ได้โดย

$$\frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0 + \Delta x, z_0) - h(x_0, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{ข4})$$

เราสามารถหานิพจน์เหมือนสมการที่ (ข4) ด้วยการแทนที่ด้วย backward difference, $x = x_0 - \Delta x$ ลงไปในสมการที่ (ข3) จะได้

$$\frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0, z_0) - h(x_0 - \Delta x, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{ข5})$$

เพื่อที่จะหาค่าประมาณของ $\partial^2 h / \partial x^2$ เราจะใช้ forward difference expression ในการเขียนสมการที่อยู่ในเทอมของ $\partial h / \partial x$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_0, z_0) = \frac{\frac{\partial h}{\partial x}(x_0 + \Delta x, z_0) - \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{ซ6})$$

และแทน backward difference expression ของสมการที่ (ซ5) ในสมการที่ (ซ6) จะได้

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0 + \Delta x, z_0) - 2h(x_0, z_0) + h(x_0 - \Delta x, z_0)}{(\Delta x)^2} \quad (\text{ซ7})$$

ในวิธีเดียวกันนี้เราจะปรับปรุงนิพจน์สำหรับ $\partial^2 h / \partial z^2$ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0, z_0 + \Delta z) - 2h(x_0, z_0) + h(x_0, z_0 - \Delta z)}{(\Delta z)^2} \quad (\text{ซ8})$$

สำหรับการแบ่งพื้นที่แบบจำลองออกเป็นกริดจัตุรัส, $\Delta x = \Delta z$ จากสมการที่ (ซ7) และ (ซ8) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการ Laplace ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\Delta x)^2} [h(x_0 + \Delta x, z_0) + h(x_0 - \Delta x, z_0) + h(x_0, z_0 + \Delta z) \\ + h(x_0, z_0 - \Delta z) - 4h(x_0, z_0)] = 0 \end{aligned} \quad (\text{ซ9})$$

ถ้าเรากำหนดให้ (x_0, z_0) เป็นจุด (nodal point) ที่พิจารณา (i, j) สามารถเปลี่ยนรูปสมการที่ (ซ9) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (ซ10) ดังนี้

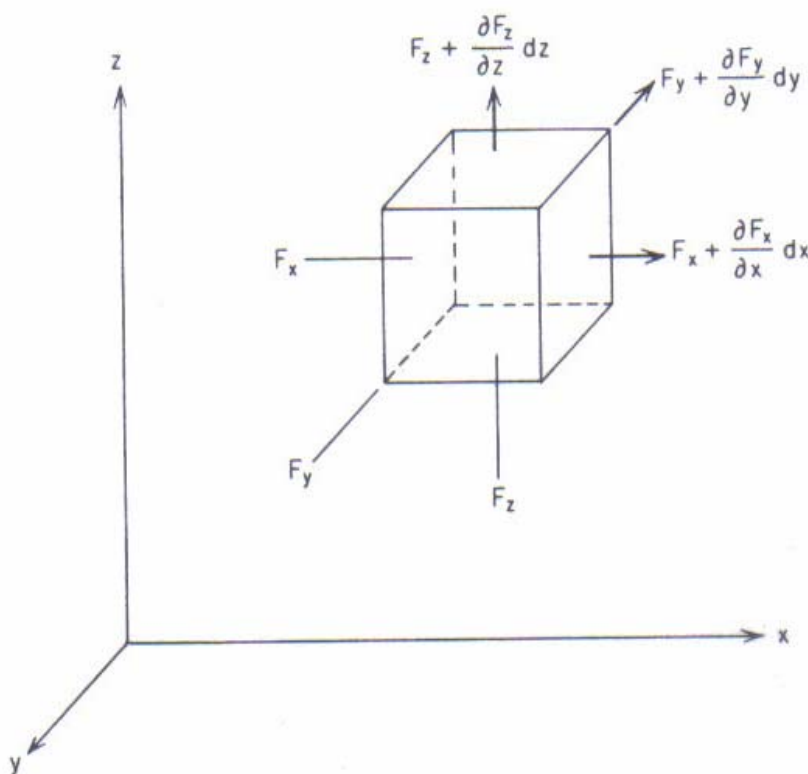
$$h_{ij} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (\text{ซ10})$$

ภาคผนวก ฅ

สมการที่ใช้คำนวณการเคลื่อนย้ายมวลของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

Derivation of the Advection- Dispersion Equation for Solute Transport in Saturated Porous Media

สมการต่อไปนี (อ้างอิง Freeze and Cherry, 1979) อยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of conservation of mass) ซึ่งมีสมมติฐานว่าวัสดุตัวกลางพรุนเป็นเนื้อเดียวกันและเหมือนกันทุกทิศทาง (homogeneous and isotropic) โดยตัวกลางมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) มีการไหลแบบคงตัว (steady state) และใช้กฎของดาร์ซีในการวิเคราะห์ ซึ่งภายใต้สมมติฐานของดาร์ซี การไหลเป็นแบบ average linear velocity โดยกลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารจะเป็นแบบการพา (advection) เพียงอย่างเดียว สารละลายจะเป็นประเภทที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย (nonreactive solutes) มีรูปแบบการไหลแบบ plug flow แต่ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงจะมีการผสมกัน (mixing process) หรือเกิดขบวนการกระจาย hydrodynamic dispersion ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในรูพรุนต่าง ๆ



ภาพผนวกที่ ๑1 สมดุลมวลในหนึ่งหน่วยปริมาตร

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

เมื่อพิจารณาตัวกลางพรุนขนาดหนึ่งหน่วยปริมาตร ที่มีการไหลใน 3 ทิศทางดังแสดงในภาพผนวกที่ ฅ1 และจากกฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of conservation of mass) ที่กล่าวว่า “ อัตราการไหลเข้าของมวลสารในหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวกลางพรุน ลบด้วยอัตราการไหลออก จะเท่ากับอัตราการกักเก็บของมวลสารในหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้น ” ในระบบ Cartesian coordinates อัตราไหลจำเพาะ (specific discharge, v) มีองค์ประกอบคือ (v_x, v_y, v_z) และความเร็วเฉลี่ย (average linear velocity, $\bar{v} = v/n$) มีองค์ประกอบคือ ($\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$) ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่แบบการพาจะเท่ากับ $\bar{v}$ โดยความเข้มข้นของสารปนเปื้อน C คือมวลของตัวถูกละลายต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลาย ซึ่งมวลของตัวถูกละลายต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุพรุนคือ nC สำหรับตัวกลางชนิดเนื้อเดียวกัน (homogeneous medium) ค่าความพรุน (n) จะเป็นค่าคงที่ และ $\partial(nC)/\partial x = n\partial C/\partial x$ มวลของตัวถูกละลายที่กระจายตัวในทิศทางแกน x ด้วยกลไกการเคลื่อนที่สองแบบ ได้แก่

$$\text{Transport by advection} = \bar{v}_x nC dA \quad (\text{ฅ1})$$

$$\text{Transport by dispersion} = nD_x \frac{\partial C}{\partial x} dA \quad (\text{ฅ2})$$

โดย D_x คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย (Dispersion coefficient) ในแนวแกน x และ dA คือพื้นที่หน้าตัดของหน่วยปริมาตร ซึ่งสัมประสิทธิ์การกระจาย (D_x) มีความสัมพันธ์กับค่า Dispersivity (α_x) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D^*) จะได้

$$D_x = \alpha_x \bar{v}_x + D^* \quad (\text{ฅ3})$$

รูปแบบของสมการที่ (ฅ2) มีลักษณะเหมือนกับ Fick's first law ถ้าให้ F_x แทนมวลทั้งหมดของตัวถูกละลายต่อพื้นที่หน้าตัดในแกน x ต่อหน่วยเวลา ดังนั้น

$$F_x = \bar{v}_x nC - nD_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{ฅ4})$$

$$F_y = \bar{v}_y nC - nD_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (\text{ฅ5})$$

$$F_z = \bar{v}_z nC - nD_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{ฅ6})$$

โดยเครื่องหมายลบที่อยู่หน้าเทอมการกระจาย บ่งบอกถึงการที่สารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และมวลรวมของตัวถูกละลายที่เข้าไปในหนึ่งหน่วยปริมาตร (ภาพผนวกที่ ฅ1) จะได้

$$F_x \, d_z d_y + F_y \, d_z d_x + F_z \, d_x d_y$$

มวลรวมของตัวถูกละลายที่ออกจากหนึ่งหน่วยปริมาตร ได้แก่

$$\left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left(F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy \right) dz dx + \left(F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz \right) dx dy$$

ซึ่ง partial term บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของมวลตัวถูกละลายในทิศทางต่าง ๆ ผลต่างระหว่างมวลที่เข้าและออกจากระบบ ได้แก่

$$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) dx dy dz$$

เนื่องจากตัวถูกละลายมีสมมติฐานว่าไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ ผลต่างระหว่าง flux ที่เข้าและออกจากระบบจะเท่ากับจำนวนที่สะสมอยู่ภายในระบบ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในระบบ ได้แก่

$$- n \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz$$

และนิพจน์ที่แสดงถึงกฎการอนุรักษ์มวลสารที่สมบูรณ์ ได้แก่

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = -n \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฉ7})$$

เมื่อแทนค่าของนิพจน์จากสมการที่ (ฉ4), (ฉ5), (ฉ6) ลงใน (ฉ7) และตัดตัวแปร n ออกทั้งสองข้าง จะได้

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฉ8})$$

ในระบบที่วัสดุตัวกลางเป็น homogeneous ซึ่งทำให้ความเร็วเฉลี่ย $\bar{v}$ เป็นค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์การกระจาย (Dispersion coefficients) D_x, D_y, D_z ไม่เปลี่ยนแปลง สมการที่ (ฉ8) จะได้

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - \left[\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฉ9})$$

ในการคำนวณแบบมิติเดียว (One dimension)

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฉ10})$$

ในบางกรณี ทิศทางแบบมิติเดียวจะเกิดในลักษณะ curvilinear coordinate ในทิศทางการไหลตามเส้นการไหล สมการการเคลื่อนย้ายมวลสารจะเป็น

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - \bar{v}_1 \frac{\partial C}{\partial l} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฅ11})$$

ซึ่ง 1 คือ coordinate direction ตามเส้นการไหล, D_1 คือ longitudinal coefficient of dispersion และ $\bar{v}_1$ คือ average linear velocity ตามเส้นการไหล

สำหรับปัญหาแบบสองมิติ จะกำหนด curvilinear coordinate direction สองตัวคือ S_l, S_t เมื่อ S_l คือ ทิศทางตามเส้นการไหล S_t คือ ทิศทางตามแนวขวาง ดังนั้นสมการการเคลื่อนย้ายมวลสารจะเป็น

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial S_l^2} + D_t \frac{\partial^2 C}{\partial S_t^2} - \bar{v}_1 \frac{\partial C}{\partial S_l} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฅ12})$$

ซึ่ง D_1 และ D_t คือสัมประสิทธิ์การกระจายในแนวการไหลและแนวขวางตามลำดับ ถ้า v_1 แปรเปลี่ยนตามเส้นการไหล และ D_1 กับ D_t แปรเปลี่ยนผ่าน space จะได้

$$\frac{\partial}{\partial S_l} \left(D_1 \frac{\partial C}{\partial S_l} \right) + \frac{\partial}{\partial S_t} \left(D_t \frac{\partial C}{\partial S_t} \right) - \frac{\partial}{\partial S_l} (\bar{v}_1 C) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{ฅ13})$$

สมการที่ (ฅ8)-(ฅ13) เป็นสมการของการพาและการกระจายสำหรับการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ผลการคำนวณในแต่ละสมการจะได้ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (C) ที่เป็นฟังก์ชันของระยะและเวลา (Space and time) ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูป $C(x, y, z, t)$ สำหรับสมการที่ (ฅ8) และ (ฅ9); $C(l, t)$ สำหรับสมการที่ (ฅ11); $C(S_l, S_t, t)$ สำหรับสมการที่ (ฅ12) และ (ฅ13) นอกจากนั้นยังมีวิธีสำหรับการคำนวณการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เช่นสมการของ Ogata (1979) (อ้างถึง Freeze and Cherry, 1979) เป็น การคำนวณเชิงตัวเลข (Analytical solutions) ของสมการที่ (ฅ11) ซึ่งสามารถทราบผลและแนวโน้มการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนได้อย่างคร่าว ๆ แต่ก็สะดวกและรวดเร็ว

ในสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ๆ ทิศทางของการกระจายเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของตัวกลาง ถ้าตัวกลางไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous and anisotropic) สมการที่ใช้ในการคำนวณก็มีความซับซ้อนมากขึ้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์อย่างน้อยสองหรือสามมิติ นอกจากนี้ ความเร็วก็ไม่คงที่ และการกระจายตัวของมลสารก็เปลี่ยนแปลงตลอด ดังนั้นการที่จะวิเคราะห์ให้ได้ผลอย่างถูกต้องแม่นยำก็ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วย ซึ่งไม่สามารถใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้

มีความเป็นไปได้ที่จะขยายสมการการเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนที่รวมถึงผลกระทบจากปัจจัยหน่วง (Retardation factor) เช่น การดูดซับ ปฏิกิริยาเคมี การย่อยสลายทางชีวภาพ และการย่อยสลายทางกัมมันตรังสี เป็นต้น ซึ่งในกรณีนี้สมการมวลของระบบจะต้องรวมเอาเทอม Source-Sink term ด้วย สำหรับการหน่วงเนื่องจากการดูดซับ สมการการเคลื่อนย้ายมวลสารใน homogeneous medium ในมิติเดียว ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - \bar{v}_1 \frac{\partial C}{\partial l} + \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (14)$$

โดย ρ_b คือ ความหนาแน่นรวมของตัวกลางพรุน, n คือ ความพรุน และ S คือ มวลของสารที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวกลาง $\partial S / \partial t$ คือ อัตราการถูกดูดซับ และ $(\rho_b / n)(\partial S / \partial t)$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในของไหล ที่เกิดจาก adsorption หรือ desorption ซึ่งเทอมแรกของสมการที่ (14) จะเป็นเทอมของการกระจาย เทอมที่สองจะเป็นเทอมของการพา และเทอมที่สามจะเป็นเทอมของปฏิกิริยาต่าง ๆ

ภาคผนวก ญ

กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์สาร VOCs และข้อมูลประกอบ

Gravimetric Certificate

Dr. Ehrenstorfer

Product Identification

05021500 VOC Mix 15

Please note: The expiry date is valid under recommended storage conditions only.

Reference Materials for
Residue Analysis

Expiry Date 01.04.2006

Lot Number 50331ME

Store at 20°C in the dark

Gravimetric Data

Product Name	Final Conc. (mg/l)	Lot. No.	Purity (%) Conc. (mg/l)	RT (min.)	Weight/Volume
1 Benzene	200.000	41108ME	20000.00		1.000 ml
2 Bromobenzene	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
3 Bromochloromethane	200.000	50301ME	20000.00		1.000 ml
4 Bromodichloromethane	200.000	50314ME	20000.00		1.000 ml
5 n-Butylbenzene	200.000	11206ME	20000.00		1.000 ml
6 sec-Butylbenzene	200.000	11205ME	20000.00		1.000 ml
7 tert-Butylbenzene	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
8 Chlorobenzene	200.000	41112ME	20000.00		1.000 ml
9 2-Chlorotoluene	200.000	11205ME	20000.00		1.000 ml
10 4-Chlorotoluene	200.000	11205ME	20000.00		1.000 ml
11 Dibromochloromethane	200.000	50114ME	20000.00		1.000 ml
12 1,2-Dibromo-3-chloropropane	200.000	50314ME	20000.00		1.000 ml
13 1,2-Dibromoethane	200.000	50301ME	20000.00		1.000 ml
14 Dibromomethane	200.000	50301ME	20000.00		1.000 ml
15 1,2-Dichlorobenzene	200.000	40817ME	20000.00		1.000 ml
16 1,3-Dichlorobenzene	200.000	30826ME	20000.00		1.000 ml
17 1,4-Dichlorobenzene	200.000	40714ME	20000.00		1.000 ml
18 1,1-Dichloroethane	200.000	50331ME	20000.00		10.000 ml
19 1,2-Dichloroethane	200.000	50117ME	20000.00		1.000 ml
20 1,1-Dichloroethene	200.000	41006ME	20000.00		1.000 ml
21 cis-1,2-Dichloroethene	200.000	50331ME	20000.00		10.000 ml
22 trans-1,2-Dichloroethene	200.000	41007ME	20000.00		1.000 ml
23 Dichloromethane	200.000	41112ME	20000.00		1.000 ml
24 1,2-Dichloropropane	200.000	20930ME	20000.00		1.000 ml
25 1,3-Dichloropropane	200.000	41019ME	20000.00		1.000 ml
26 2,2-Dichloropropane	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
27 1,1-Dichloro-1-propene	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
28 1,3-Dichloropropene	400.000	10702ME	20000.00		2.000 ml
29 Ethylbenzene	200.000	41222ME	20000.00		1.000 ml
30 Hexachloro-1,3-butadiene	200.000	30417ME	20000.00		1.000 ml
31 Isopropylbenzene	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
32 4-Isopropyltoluene	200.000	20613ME	20000.00		1.000 ml
33 n-Propylbenzene	200.000	11206ME	20000.00		1.000 ml
34 Styrene	200.000	41004ME	20000.00		10.000 ml
35 1,1,1,2-Tetrachloroethane	200.000	40219ME	20000.00		1.000 ml
36 1,1,2,2-Tetrachloroethane	200.000	41126ME	20000.00		1.000 ml
37 Tetrachloroethene	200.000	41112ME	20000.00		1.000 ml
38 Tetrachloromethane	200.000	50113ME	20000.00		1.000 ml
39 Toluene	200.000	41005ME	20000.00		1.000 ml
40 Tribromomethane	200.000	41110ME	20000.00		1.000 ml
41 1,2,3-Trichlorobenzene	200.000	50118ME	20000.00		1.000 ml
42 1,2,4-Trichlorobenzene	200.000	50118ME	20000.00		1.000 ml
43 1,1,1-Trichloroethane	200.000	50315ME	20000.00		1.000 ml
44 1,1,2-Trichloroethane	200.000	40525ME	20000.00		1.000 ml
45 Trichloroethene	200.000	50114ME	20000.00		1.000 ml
46 Trichloromethane	200.000	20430ME	20000.00		1.000 ml
47 1,2,3-Trichloropropane	200.000	50301ME	20000.00		1.000 ml
48 1,2,4-Trimethylbenzene	200.000	50315ME	20000.00		1.000 ml



Reg. No. 2874/01



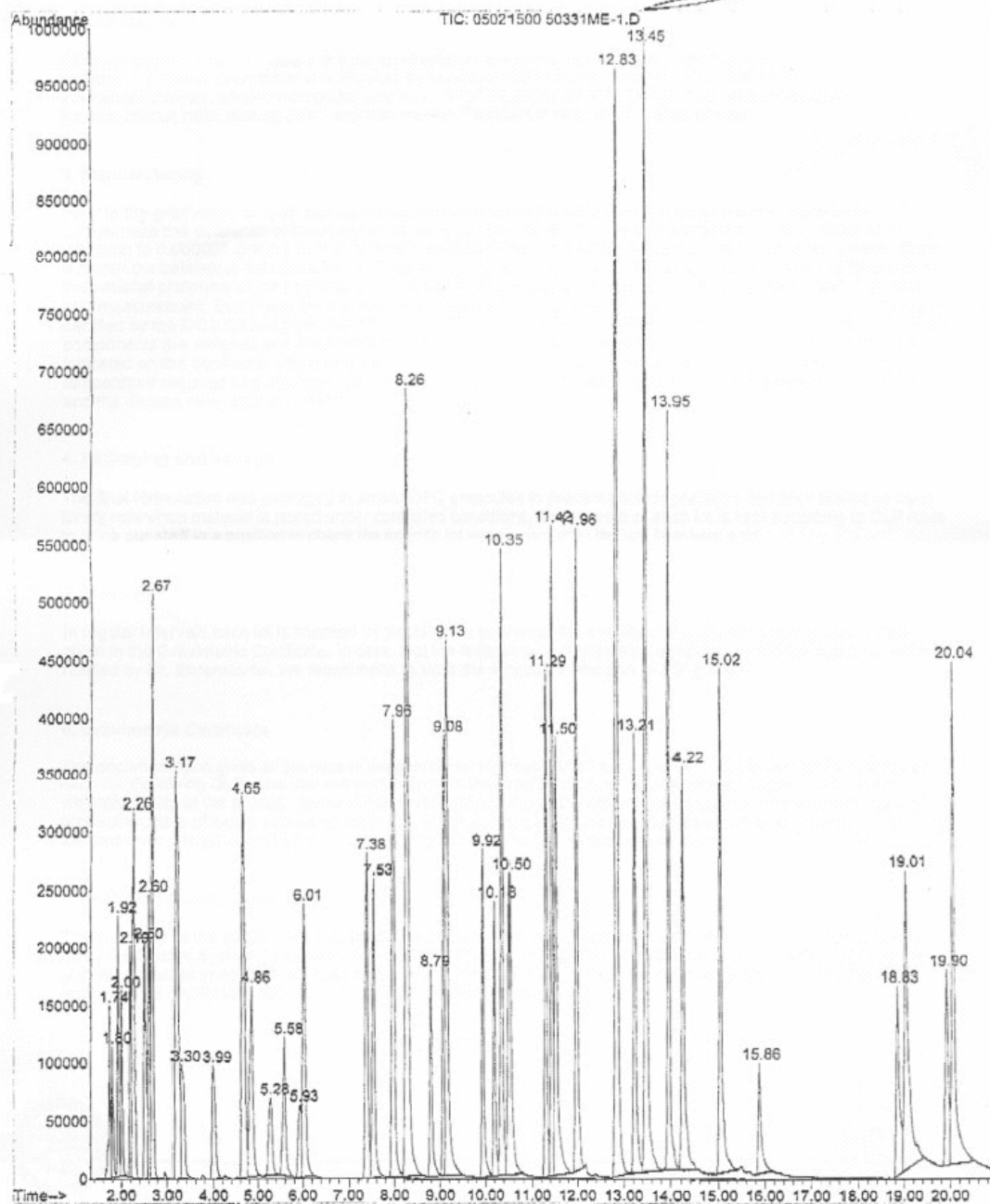
ISO 9001

Labor Dr. Ehrenstorfer-Schäfers · Bgm.-Schlosser-Str. 6 A · 86199 Augsburg · Germany

Phone +49 821 906080 Fax +49 821 9060888 info@analytical-standards.com

The warranty for this product is limited to the purchasing price of this product.

File :D:\200409\05021500 50331ME-1.D
Operator : M.K.
Acquired : 7 Apr 2005 2:45 using AcqMethod 200.M
Instrument : Agilent MSD 1
Sample Name: VOC-Mix 15 50331ME
Misc Info :
Vial Number: 11



Dr. Ehrenstorfer

Reference Materials for
Residue Analysis

1. Application

This standard solution is designed for calibration or recalibration of chromatographic systems for the determination of the specified chemical compounds concerning identity and quantification. The product can also be used as reference material for interlaboratory studies to validate analytical procedures.

2. Raw Materials

All raw materials used to prepare this standard solution are of the highest purity (see front page). After our production process each material is checked by several of the following methods, if applicable: UV-, IR-Spectroscopy, Elemental analysis, chromatographical properties (GC/FID, GC/ECD, HPLC/DAD, TLC) and physical properties (phase, colour, odor, melting point) and Karl-Fischer-Titration for detection of traces of water.

3. Manufacturing

Prior to the production for each standard solution we calculate the necessary weight of the neat material to compensate the difference of the purity of the compound to 100 %. We use an electronic balance capable of weighing to 0.000001 g with a built in automatic calibration function, which is executed minimum once a week. Once a month the balance is calibrated with weights complying with the OIML-IR 20 design requirements and traceable to the national prototype of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, the German office of weights and measurement. Every year the balance is calibrated by the manufacturer service technician. This company is also certified by the DQS following the ISO 9001. All steps are documented conform to ISO 9001 requirements. The single components are weighed and filled into a volumetric flask (class A glassware) with the exact quantity of solvent as indicated on the certificate. Solvents are stored and handled in special rooms, which have the constant ambient temperature required from the manufacturer of the volumetric equipment. The tolerance of the weighing procedure and the dilution error adds to a maximum of $\pm 0,5\%$.

4. Packaging and Storage

The final formulation was packaged in amber OPC ampoules to prevent photodegradation and then sealed by hand. Every reference material is stored under controlled conditions. One sample of each lot is kept according to GLP rules to bring our staff in a position to check the specific lot even years after the last item was sold.

5. Stability

In regular intervals each lot is checked for stability. We guarantee the stability of the solution until the expiry date given in the Gravimetric Certificate. In case, that the tests show a degradation within this period the customer will be notified by Dr. Ehrenstorfer. We recommend to store the ampouls in the dark at $20^\circ \pm 4^\circ \text{C}$.

6. Gravimetric Certificate

The documentation gives all the data of the production process with all the information necessary for traceability of each lot. Following GLP rules you are obliged to note the used product, lot number of the product, purity, exact weight/quantity of the product, name of the solvent, lot number of the solvent, exact quantity of the solvent, date of production, date of expiry and signature of the person in charge. Copies have to be authorized by stamp, signature of the person in charge according to our quality management handbook and date of authorization.

7. Analytical Quality Control

The summary of the quality control procedure is documented in the separate Certificate of Analysis. Our company holds the Quality System Certificate DQS-Reg.No.: 2874-01 for the standard from the ISO 9001 / EN 29000 series and the scope as specified. The audit performed by the DQS has verified, that our quality system fulfills the requirements of DIN ISO 9001. © Labor Dr. Ehrenstorfer-Schäfers



1,3,5-Trimethylbenzene	200.000	20130ME	20000.00	1,000 ml
o-Xylene	200.000	41222ME	20000.00	1,000 ml
m-Xylene	200.000	41108ME	20000.00	1,000 ml
p-Xylene	200.000	40819ME	20000.00	1,000 ml
53 Naphthalene	200.000	30507	99.50	20.101 mg

The uncertainty/tolerance of this standard is $\pm 5.0\%$, calculated in accordance with the EURACHEM/CITAC Guide - Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement - Second Edition. The uncertainty given is the expanded combined uncertainty and represents an estimated standard deviation equal to the positive square root of the total variance of the uncertainty of components. The expanded uncertainty is U which is $U_c(y) \cdot K$, where K is the coverage factor at the 95% confidence level ($K=2$). The expanded uncertainty is based on the combination of uncertainties associated with each individual operation involved in the preparation of this product.

Solvent Information

Solvent	Lot No.	Exact Quantity (ml)
Methanol	68864	100.00

Analytical Data

Method 1 GC/MSD	Inj. Volume (μ l)	1.00	RT 1
Column DB-5, 30 m, ID 0.25 mm	Inj. Temp.	200	Col. Temp. 40-200
Method 2	Inj. Volume (μ l)		RT 2
Column	Flow (ml/min)		Gradient
Eluent A			
Eluent B			

Identity check MS, RT

Comment The mix was prepared by addition of 50ml stock solution 05031500 lot 50315ME 400ng/ μ l and 10ml 12422500 cis-1,2-Dichloroethene lot 50331ME and 10ml 12422000 1,1-Dichloroethane lot 50331ME and 10ml 16982000 Styrene Lot 41004ME 12490000 1,3-Dichloropropene; total 400 μ g/ml, 47% cis-, 53% trans-.
No RTs as method development is not complete.

Certified on 07/04.2005

by Dr. J. Heidrich



Reg. No. 2874-01

Labor Dr. Ehrenstorfer-Schäfers · Bgm.-Schlosser-Str. 6 A · 86199 Augsburg · Germany
Phone +49 821 906080 Fax +49 821 9060888 info@analytical-standards.com
The warranty for this product is limited to the purchasing price of this product.



ลำดับ	Volatile Organic Compounds (VOCs)	Y	R ²
1	Benzene	$5.66 \times 10^5 C + 1.21 \times 10^6$	0.989
2	Carbon tetrachloride		
3	1, 2 - Dichloroethane	$2.61 \times 10^5 C + 3.2 \times 10^5$	0.999
4	1, 1 - Dichloroethylene		
5	cis - 1, 2 Dichloroethylene	$3.39 \times 10^5 C + 4.85 \times 10^5$	0.998
6	trans - 1, 2 - Dichloroethylene	$1.32 \times 10^5 C + 1.99 \times 10^5$	0.996
7	Dichloromethane	$2.5 \times 10^5 C + 2.2 \times 10^5$	0.998
8	Ethylbenzene	$5.94 \times 10^5 C + 8.58 \times 10^5$	1.000
9	Styrene	$5.09 \times 10^5 C + 9.18 \times 10^5$	0.999
10	Tetrachloroethylene	$2.38 \times 10^4 C + 4.77 \times 10^5$	0.998
11	Toluene	$5.81 \times 10^5 C + 1.75 \times 10^6$	0.998
12	Trichloroethylene	$2.38 \times 10^4 C + 2.77 \times 10^5$	0.998
13	1,1,1 - Trichloroethane	$9.89 \times 10^4 C + 2.74 \times 10^5$	0.996
14	1,1,2 - Trichloroethane	$2.5 \times 10^4 C + 2.98 \times 10^5$	0.996
15	m, p - Xylenes	$1.47 \times 10^5 C + 2.01 \times 10^6$	0.983
16	O - Xylenes	$5.81 \times 10^5 C + 1.23 \times 10^6$	0.999

หมายเหตุ: Y = Response, C = Concentration

TEC FAX NO. :035 221431

Quantitation Report (Not Reviewed) 2/4

Data File : C:\MSDCHEM\1\DATA\050810\VOC5.D Vial: 1
 Acq On : 10 Aug 2005 10:09 Operator:
 Sample : voc5 Inst : instrumen
 Misc : Multiplr: 1.00
 Sample Amount: 0.00

MS Integration Params: VOC_SIM.E
 Quant Time: Aug 10 13:17:58 2005 Quant Results File: VOC_SIM.RES

Quant Method : C:\MSDCHEM\1\METHODS\VOC_SIM.M (Chemstation Integrator)
 Title : voc_water
 Last Update : Wed Aug 10 13:14:50 2005
 Response via : Initial Calibration
 DataAcq Meth : VOC_SIM

Internal Standards	R.T.	QI on	Response	Conc	Units	Dev (Min)
Target Compounds						Qvalue
1) 1,1-dichloroethene	0.00	61	0	N.D.		
2) dichloromethane	2.63	49	1496157	5.10	ppb	97
3) trans-1,2-dichloroethene	2.92	61	860954	5.17	ppb	# 67
4) cis-1,2-dichloroethene	4.20	61	2225393	5.14	ppb	98
5) 1,1,1-trichloroethane	5.07	97	787711	5.19	ppb	# 24
6) carbon tetrachloride	0.00	117	0	N.D.		
7) benzene	5.70	78	4096174	5.09	ppb	99
8) 1,2-dichloroethane	5.71	62	1648988	5.09	ppb	98
9) trichloroethene	6.69	130	757341	5.12	ppb	100
10) toluene	8.34	91	4579524	5.14	ppb	98
11) 1,1,2-trichloroethane	8.72	97	930520	5.07	ppb	98
12) tetrachloroethene	8.89	166	849065	5.27	ppb	91
13) ethylbenzene	9.96	91	3857340	5.05	ppb	97
14) m,p-xylenes	10.12	91	6817425	10.77	ppb	98
15) o-xylene	10.51	91	4131039	5.00	ppb	95
16) styrene	10.51	104	3509400	5.09	ppb	91

(#) = qualifier out of range (m) = manual integration (+) = signals summed
 VOC5.D VOC_SIM.M Wed Aug 10 13:17:58 2005

MEKTEC FAX NO. :035 221431 Nov. 22 2005 10:47AM P 1
 Quantitation Report (Not Reviewed)
 Data File : C:\MSDCHEM\1\DATA\050810\VOC5.D Vial: 1
 Acq On : 10 Aug 2005 10:09 Operator:
 Sample : voc5 Inst : Instrumen
 Misc : Multiplr: 1.00
 Sample Amount: 0.00
 MS Integration Params: VOC_SIM.E
 Quant Time: Aug 10 13:17:58 2005 Quant Results File: VOC_SIM.RES
 Quant Method : C:\MSDCHEM\1\METHODS\VOC_SIM.M (Chemstation Integrator)
 Title : voc_water
 Last Update : Wed Aug 10 13:14:50 2005
 Response via : Initial Calibration
 DataAcq Meth : VOC_SIM

Internal Standards	R.T.	QIon	Response	Conc	Units	Dev(Min)
Target Compounds						Qvalue
1) 1,1-dichloroethene	0.00	61	0	N.D.		
2) dichloromethane	2.63	49	1496157	5.10	ppb	97
3) trans-1,2-dichloroethene	2.92	61	860954	5.17	ppb	# 67
4) cis-1,2-dichloroethene	4.20	61	2225393	5.14	ppb	98
5) 1,1,1-trichloroethane	5.07	97	787711	5.19	ppb	# 24
6) carbon tetrachloride	0.00	117	0	N.D.		
7) benzene	5.70	78	4096174	5.09	ppb	99
8) 1,2-dichloroethane	5.71	62	1648988	5.09	ppb	98
9) trichloroethene	6.69	130	757341	5.12	ppb	100
10) toluene	8.34	91	4579524	5.14	ppb	98
11) 1,1,2-trichloroethane	8.72	97	930520	5.07	ppb	98
12) tetrachloroethene	8.89	166	849065	5.27	ppb	91
13) ethylbenzene	9.96	91	3857340	5.05	ppb	97
14) m,p-xylenes	10.12	91	6817425	10.77	ppb	98
15) o-xylene	10.51	91	4131039	5.00	ppb	95
16) styrene	10.51	104	3509400	5.09	ppb	91

(#) = qualifier out of range (m) = manual integration (+) = signals summed
 VOC5.D VOC_SIM.M Wed Aug 10 13:17:58 2005

MEKTEC FAX NO. :035 221431 Nov. 22 2005 10:43AM P 1
 Quantitation Report (Not Reviewed)
 Data File : C:\MSDCHEM\1\DATA\050810\BLK_1.D Vial: 1
 Acq On : 10 Aug 2005 9:36 Operator:
 Sample : blk_1 Inst : Instrumen
 Misc : Multiplr: 1.00
 Sample Amount: 0.00
 MS Integration Params: VOC_SIM.E
 Quant Time: Aug 10 13:21:18 2005 Quant Results File: VOC_SIM.RES
 Quant Method : C:\MSDCHEM\1\METHODS\VOC_SIM.M (Chemstation Integrator)
 Title : voc_water
 Last Update : Wed Aug 10 13:17:52 2005
 Response via : Initial Calibration
 DataAcq Meth : VOC_SIM

Internal Standards	R.T.	QIon	Response	Conc	Units	Dev(Min)
Target Compounds						Qvalue
1) 1,1-dichloroethene	0.00	61	0	N.D.		
2) dichloromethane	0.00	49	0	N.D.		
3) trans-1,2-dichloroethene	0.00	61	0	N.D.		
4) cis-1,2-dichloroethene	0.00	61	0	N.D.		
5) 1,1,1-trichloroethane	0.00	97	0	N.D.		
6) carbon tetrachloride	0.00	117	0	N.D.		
7) benzene	0.00	78	0	N.D.		
8) 1,2-dichloroethane	0.00	62	0	N.D.		
9) trichloroethene	0.00	130	0	N.D.		
10) toluene	8.34	91	656938	Below Cal		98
11) 1,1,2-trichloroethane	0.00	97	0	N.D.		
12) tetrachloroethene	0.00	166	0	N.D.		
13) ethylbenzene	9.96	91	35582	Below Cal	#	53
14) m,p-xylenes	10.12	91	34249	Below Cal		98
15) o-xylene	10.51	91	13521	Below Cal	#	60
16) styrene	10.51	104	108900	Below Cal	#	1

(#) = qualifier out of range (m) = manual integration (+) = signals summed
 BLK_1.D VOC_SIM.M Wed Aug 10 13:21:18 2005

EKTEC

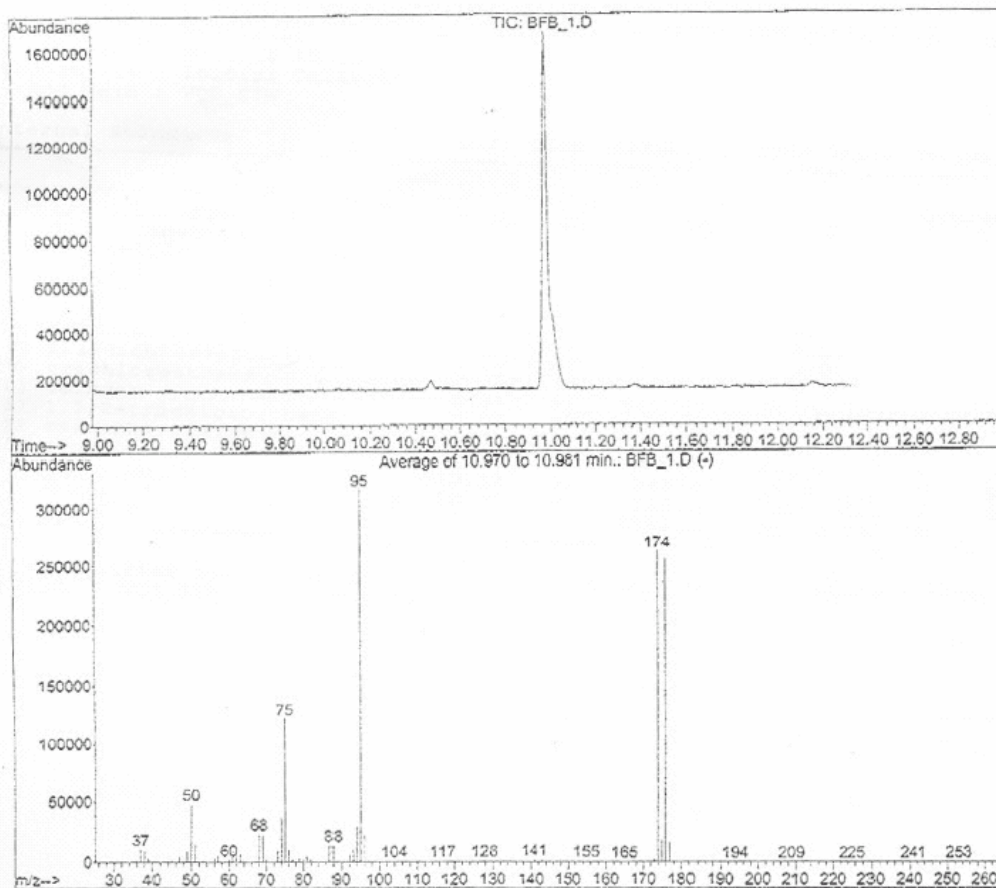
FAX NO. :035 221431

Nov. 22 2005 10:43AM P 2

BFB

Data File : C:\MSDCHEM\1\DATA\050809\BFB_1.D
 Acq On : 9 Aug 2005 10:28 am
 Sample : bfb_1
 Misc :
 MS Integration Params: events.e
 Method : C:\MSDCHEM\2\METHODS\ENVDEF.M (Chemstation Integrator)
 Title :

Vial: 1
 Operator:
 Inst : Instrumen
 Multiplr: 1.00



AutoFind: Scans 1891, 1892, 1893; Background Corrected with Scan 1882

Target Mass	Rel. to Mass	Lower Limit%	Upper Limit%	Rel. Abn%	Raw Abn	Result Pass/Fail
50	95	15	40	15.1	47895	PASS
75	95	30	60	38.2	120921	PASS
95	95	100	100	100.0	316267	PASS
96	95	5	9	7.1	22468	PASS
173	174	0.00	2	0.5	1375	PASS
174	95	50	100	82.7	261482	PASS
175	174	5	9	7.0	18400	PASS
176	174	95	101	97.2	254245	PASS
177	176	5	9	6.5	16583	PASS

BFB_1.D ENVDEF.M

Tue Aug 09 10:43:41 2005

ภาคผนวก ๓

ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม Visual MODFLOW/MT3DMS

Site: Sai Noi Landfill, Nonthaburi, Thailand

MODFLOW/MODPATH/MT3DMS Modeling

INPUT :

Mesh Dimension

Enter Number of columns	35
Enter minimum X (m)	641500
Enter maximum X (m)	643000
Enter Number of rows	45
Enter minimum Y (m)	1548000
Enter maximum Y (m)	1550000
Enter Number of layers	1
Enter minimum Z (m)	-10.5
Enter maximum Z (m)	0

Grid

Rows	approximately 100 meters/25 meters in landfill area
Columns	approximately 100 meters/25 meters in landfill area
Layers	0-10.50 meters (assumed ground surface elevation = 0)

Time

Start time	= 0 day (default value)
Stop time	= 18,250 days

Properties of Flow Model

Hydraulic Conductivity

K_x	$= 1.50 \times 10^{-4}$ cm/sec
K_y	$= 1.50 \times 10^{-4}$ cm/sec
K_z	$= 1.50 \times 10^{-5}$ cm/sec

Storage

$$S_s = 1 \times 10^{-5} \quad (1/m)$$

$$S_y = 0.20$$

$$\text{Effective porosity} = 0.15$$

$$\text{Total porosity} = 0.35$$

Properties of Transport Model

$$\text{Longitudinal Dispersivity} = 40 \text{ m}$$

$$\text{Horiz./Long. Dispersivity} = 0.10$$

$$\text{Vert./ Long. Dispersivity} = 0.01$$

$$\text{Diffusion Coefficient} = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}$$

Boundaries

Constant Head (estimated by calibration) see figure Constant Head Boundary

$$= -0.50 \text{ m along South boundary}$$

$$= -3.00 \text{ m along North boundary}$$

$$= -2.50 \text{ m pond near landfill site}$$

Recharge

$$\text{All area} = 0 \text{ mm/yr}$$

$$\text{Landfill area} = 1.50 \text{ mm/yr}$$

Particles

Individual particle placed along landfill perimeter

Calibrate

Add observation

MT3DMS :

$$\text{Default initial concentration} = 0 \text{ } \mu\text{g/L}$$

$$\text{Constant concentration} = 16,525 \text{ } \mu\text{g/L}$$

Assign single on source cell in landfill area

Chemical Reaction

Option/Defaults No kinetic, No reaction

RUN :

Steady - State

Basic

Initial head-constant by layer using -0.50 m.

Solver

WHS solver

Recharge

Recharge is only applied to top grid layer

Layer

Layer 1 Type 1 – Unconfined Aquifer

Run

MODFLOW

MODPATH

Run

MT3DMS

Advection

Upstream Finite Difference (UFD)

Output/Times steps

Simulation time 18,250 days

Max. transport steps 100,000

Specify max step size 365

Save simulation results at : specified time (180, 365, 730, 3650, 7300, 9125, 10950, 14600, 18250) days

OUTPUT :

MAP

Contours of concentration interval 2,000 µg/L

1. Concentration distribution at 9,373 days (At Present)
2. Concentration distribution at 18,250 days (Not Remediation)
3. Concentration distribution at 18,250 days (Remediation)
4. Head equipotential lines (At Present)

Contours generated at highest and slowest resolution

Pathline see attached (pathline of flow & transport)

ภาคผนวก ก

ส่วนเพิ่มเติมของผลการใช้โปรแกรม Visual MODFLOW/MT3DMS

ข้อมูลเบื้องต้นการณ

Well Name	Well Type	X	Y	Active	Radius	Z _{Min}	Z _{Max}
		coordinate	coordinate		(m)	(m)	(m)
BH-1	Concentration	642225.00	1548524.99	true	0.1	-10.5	0
BH-2	Concentration	642200.25	1548874.63	True	0.1	-10.5	0
BH-3	Concentration	642224.99	1549124.56	True	0.1	-10.5	0
BH-4	Concentration	642449.88	1548724.65	true	0.1	-10.5	0

ผลการคำนวณความเข้มข้น TCE กับเวลาด้วย MT3DMS

กรณีที่ไม่มีการฟื้นฟู (100 ปี)

Time	BH-3
(days)	(µg/L)
365	0
730	6.12126E-7
3650	0.972925
7300	7.75205
9125	12.821
10950	20.4473
14431	50.7814
18250	103.285
21900	176.211
25550	271.542
29200	389.456
32850	526.818
36500	681.643

กรณีที่มีการฟื้นฟู (100 ปี)

Time	BH_3
(days)	(µg/L)
365	0
730	0
3650	3.90198E-27
7300	1.73015E-24
9125	4.07198E-23
10950	3.40753E-22
14600	4.35845E-21
18250	3.14709E-20
21900	1.5225E-19
25550	5.56259E-19
29200	1.6634E-18
32850	4.29131E-18
36500	9.8925E-18

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ร้อยตรีวิจิตร ศรีวงษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 15 พฤษภาคม 2517
สถานที่เกิด	บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยหัวหน้าหมวด ขย.ทบ.
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	2254 กรมยุทธโยธาทหารบก แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	Swedish International Development Cooperation Agency (SIDA)