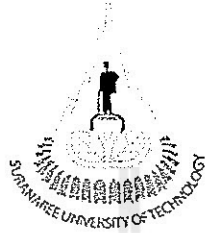


รหัสโครงการ SUT7-712-52-24-53

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในสนาม
โดยวิธีแบบจำลองย้อนกลับ

(Determination of Field Soil-Water Characteristics by Inverse Modeling)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว

มีนาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ จากความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งไปผู้อุดหนุนทุนวิจัยปีงบประมาณ 2552 ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรของศูนย์เครื่องมื่อฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน



อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์
หัวหน้าโครงการวิจัย
กุมภาพันธ์ 2555

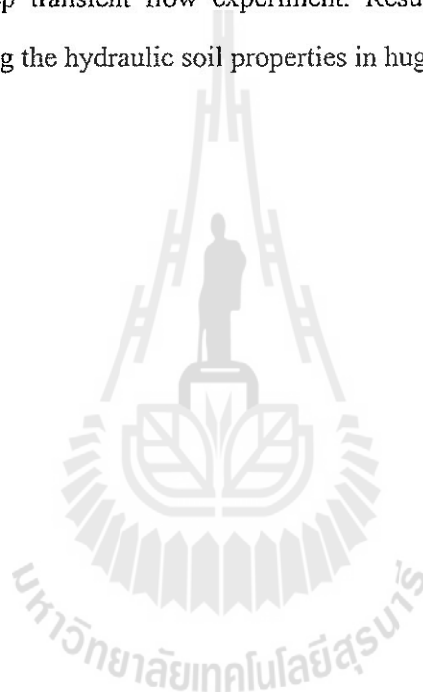
บทคัดย่อ

การหาคุณสมบัติด้านการไหลของดินสามารถทำได้หลายวิธี การใช้แบบจำลองย้อนกลับเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบถูก การนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้จำลองเป็นต้องมีความชำนาญ และมีซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะซึ่งมีราคาแพง งานวิจัยนี้ได้พยายามพัฒนาอุปกรณ์ในการทดสอบ รวมทั้งปรับปรุงซอฟต์แวร์ที่มีอยู่ให้สามารถจัดกระทำแบบจำลองย้อนกลับแบบการไหลเข้าหลายลำดับความดันได้ ผลการศึกษาสามารถนำไปต่อยอดเพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติด้านไหลของดินในสนาม อันจะนำมาซึ่งประสิทธิภาพในการเตือนภัยเหตุดินโคลนถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัยในประเทศไทยได้ต่อไป



Abstract

Determination of hydraulic soil properties can be achieved by various approaches. Inverse modeling is one effective way to determine the hydraulic soil properties. It conveys flexibility and cost effective attribute. This research is to develop a low cost equipment as well as develop and/or enhance the available softwares to perform inverse modeling of the multi-step transient flow experiment. Results from the study can be further used for determining the hydraulic soil properties in huge area.



สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการไหลในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	4
2.2 สมการคอนสทิทิวทีฟทางชลศาสตร์	6
2.3 ซอฟต์แวร์ TOUGH2	12
บทที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลการทดสอบ	19
3.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.2 การทดสอบการไหลเข้าแบบไม่คงตัวหลายระดับความดัน	19
3.3 ผลการทดสอบการไหลเข้าแบบไม่คงตัว	24
บทที่ 4 การจำลองย้อนกลับ	28
4.1 แนวคิดการจำลองย้อนกลับ	28
4.2 แบบจำลองย้อนกลับ	30
4.3 ซอฟต์แวร์ UCODE	33
4.4 อัลกอริทึมสำหรับ TOUGH2-UCODE	35
4.5 สมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการไหล และพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการ	40
4.6 ผลการจำลองย้อนกลับ	41
4.7 โครงสร้างและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อ ยอด	45
เอกสารอ้างอิง	47

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้นซึ่งมีฝนตกชุกในช่วงฤดูมรสุม และจะพบได้ตามข่าวจากสื่อแหล่งต่างๆ ถึงการเกิดความเสียหายของทั้งอาคาร สิ่งปลูกสร้าง รวมทั้งลาดดินทั้งที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือลาดดินตามธรรมชาติ ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีทั้งระดับความเสียหายขนาดเล็กระดับบุคคลหรือชุมชน ไปจนถึงความเสียหายขนาดใหญ่ระดับประเทศ เช่นในปี พ.ศ. 2549 เกิดอุทกภัยและโคลนถล่มในจังหวัดบริเวณภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งเกิดจากฝนตกผิดปกติซึ่งในพื้นที่เดิมเป็นเวลาหลายวัน ทำให้ดินบนภูเขาไม่สามารถอุ้มน้ำฝนที่ตกลงมาได้ จึงส่งผลให้เกิดภาวะน้ำท่วม และภาวะดินถล่ม ทำให้เกิดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนจำนวนมาก มีผู้เสียชีวิตและสูญหายทั้งสิ้น 116 ราย จาก 5 จังหวัดที่ประสบเหตุการณ์อุทกภัยและโคลนถล่มครั้งนี้ ล่าสุดในปี 2554 เกิดเหตุดินถล่มและดินโคลนถล่มที่หมู่บ้านต้นขนุน อ.น้ำปาด จ.อุดรดิตถ์ ทำให้ประชาชนสูญหายและเสียชีวิตจำนวนมาก รูปที่ 1.1 แสดงภาพเหตุการณ์ดินโคลนถล่มทั้งสองเหตุการณ์ที่กล่าวถึง ตัวอย่างที่ยกมาเป็นเพียงหนึ่งในหลายๆ เหตุการณ์ดินโคลนถล่มในประเทศไทย ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา



รูปที่ 1.1a เหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่หมู่บ้านต้นขนุน อ.น้ำปาด จ.อุดรดิตถ์ (หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ ฉบับวันที่ 11 กันยายน 2554)



รูปที่ 1.1b เหตุดินโคลนถล่มที่ จ.อุดรธานีในปี 2549 (<http://www.utdclub.com>)

ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีในเชิงวิศวกรรมว่าสาเหตุเหล่านี้มักเกิดจากการที่ดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นและกำลังรับน้ำหนักหรือกำลังรับแรงของดินลดลง และเมื่อถึงระดับหนึ่งซึ่งกำลังรับแรงของดินลดลงน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกก็จะเกิดการวิบัติตามมา อย่างไรก็ตามเมื่อพุดถึงในเชิงปริมาณ เช่น ปริมาณน้ำฝนจะมีค่าเท่าใด ความชื้นในดินจะต้องมีค่าสูงขึ้นไปถึงระดับเท่าใด จึงจะต้องมีการเตือนภัยหรือเฝ้าระวัง กลับไม่สามารถระบุได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากขาดความรู้ถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับกำลังและการซึมผ่านได้ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ พื้นที่นั้นๆ

ทั้งนี้นอกจากจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือ 1) คุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-Water Characteristics) 2) ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability) แล้วยังจำเป็นต้องซึ่งการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทั้งสองนี้หากเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวโดยตรงเช่น Klute และ Dirksen (1986) Green และคณะ (1986) จะใช้เวลาค่อนข้างมากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง และหากพิจารณาเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่แล้วจะมีค่าใช้จ่ายและเวลามากมหาศาล อีกทั้งผลที่ได้ก็อาจไม่ได้เป็นตัวแทนของดินในพื้นที่จริงๆ เนื่องจากการรบกวนตัวอย่างในการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ทางเลือกหนึ่งในการหาคุณสมบัติข้างต้นของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือการใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย้อนกลับ โดยจะทำการทดสอบการไหลแบบแปรเปลี่ยน (Transient flow experiment) เพื่อวัดค่าที่เกี่ยวข้องกับการไหลกับเวลา เช่นความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงไป อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำค่าที่วัดได้มาทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวทั้งสอง ซึ่งมักทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ก็สามารถทำการทดสอบในสนามได้เช่นกัน เช่น วิธี multi-step transient flow (Perroux และ White, 1988) วิธี cone penetrometer (Gribb, 1996) และวิธี multi-step field extraction (Inoue และคณะ, 1998) หากพิจารณาตามลักษณะของปัญหาแล้ววิธี multi-step extraction ซึ่งเป็นการหาคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากทางด้านเปียก (Wet branch) ในขณะที่ลักษณะของปัญหาที่สนใจจะเป็นคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากทางด้านแห้ง (Dry branch) ดังนั้นจึงตัดวิธีนี้ออกจากการพิจารณา อีกสองวิธีที่เหลือเมื่อเทียบกันแล้วการใช้ cone penetrometer มีราคาของอุปกรณ์ทดสอบสูงและมีความยืดหยุ่นในการคิดแปลงอุปกรณ์น้อยกว่า ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งสนใจที่วิธี multi-step transient flow ซึ่งสามารถทดสอบได้จากทั้งทางด้านเปียก และด้านแห้ง ขึ้นกับสภาพขอบเขต (boundary conditions) ที่กำหนดในการทดสอบ การทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และมีความยืดหยุ่นในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างเร็ว อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่แพง ดังนั้นหากสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการหาคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้สามารถนำหาคุณสมบัติของดินตามลาดดินธรรมชาติและลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพอันจะนำมาซึ่งการทำนายและการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาชุดทดสอบ รวมทั้งเทคนิคการวิเคราะห์แบบย้อนกลับในการหาคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการทดสอบภาคสนามต่อไปได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 โครงการวิจัยนี้เน้นไปที่การหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินและความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ในดินจากการวิเคราะห์แบบจำลองย้อนกลับเป็นหลัก โดยการพิสูจน์ความถูกต้องจะพิสูจน์กับผลคำนวณของแบบจำลองเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองขนาดใหญ่

1.3.2 พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับจำลองการไหลย้อนกลับ ร่วมกับซอฟต์แวร์ที่มีใช้อยู่และได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย คือ TOUGH2 และ UCODE

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการไหลในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

เนื่องจากดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำประกอบด้วยสามองค์ประกอบประกอบด้วยเม็ดดิน น้ำและอากาศ ซึ่งแยกออกได้เป็นสามเฟส ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ของเหลวเป็นส่วนผสมของน้ำและอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ ก๊าซเป็นส่วนผสมของอากาศ และไอน้ำ การไหลของของไหลหลายเฟสในตัวกลางวัสดุพรุนสามารถอธิบายได้ด้วย สมการสมดุลของมวล สมการสมดุลของโมเมนตัม และสมการสมดุลของโมเมนต์ สมการสมดุลของมวลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial(\phi S_{\beta} \rho_{\beta})}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\beta} \mathbf{v}_{\beta}) = 0 \quad (2.1)$$

และสมการสมดุลของโมเมนตัมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$\rho_{\beta} \mathbf{B}_{\beta} + \text{div} \mathbf{T}_{\beta} = \rho_{\beta} \mathbf{a}_{\beta} \quad (2.2)$$

ϕ	ความพรุน [-]
S_{β}	ความอิ่มตัวของเฟส β [-]
ρ_{β}	ความหนาแน่นของเฟส β [ML ⁻³]
\mathbf{v}_{β}	เวกเตอร์ความเร็วของเฟส β [LT ⁻¹]
\mathbf{B}_{β}	เทนเซอร์ความเร่งภายใต้สภาพโน้มถ่วงของเฟส β [LT ⁻²]
\mathbf{T}_{β}	เทนเซอร์หน่วยแรงของเฟส β [ML ⁻¹ T ⁻²]
\mathbf{a}_{β}	เวกเตอร์ความเร่งของเฟส β [LT ⁻²]

สำหรับการอธิบายการไหลของของไหลในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถใช้สมการ Buckingham แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งเป็นพัฒนาจาก Darcy's law ซึ่งใช้อธิบายสมดุลของ โมเมนตัม

$$\mathbf{v}_{\beta} = -\mathbf{K} \frac{k_{r\beta}(\theta)}{\eta_{\beta}} (\nabla p_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) \quad (2.3)$$

\mathbf{K}	เทนเซอร์ของค่าความซึมผ่านได้เฉพาะตัว (intrinsic fluid conductivity tensor) [L ²]
$k_{r\beta}(\theta)$	ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของเฟส β [-]
η_{β}	ความหนืดของเฟส β [ML ⁻¹ T ⁻¹]
θ	ความชื้นเชิงปริมาตร [-]

- p_β ความดันของเฟส β [ML⁻¹T⁻²]
 g เวกเตอร์ของความเร่งภายใต้สภาพโน้มถ่วง [LT⁻²]

โดยค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของแต่ละเฟสจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวของเฟสนั้นๆ ในดิน และเมื่อแทนสมการที่ 2.3 ลงในสมการที่ 2.1 จะได้

$$\frac{\partial(\phi S_\beta \rho_\beta)}{\partial t} = \text{div} \left(\rho_\beta K \frac{k_{r\beta}(\theta)}{\eta_\beta} (\nabla p_\beta - \rho_\beta \mathbf{g}) \right) \quad (2.4)$$

ในการคำนวณการไหลของของไหลหลายเฟส การถ่ายเทมวลระหว่างเฟสของแต่ละองค์ประกอบสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาสมมูลมวลของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยคุณสมบัติส่วนมวล (mass fraction) ขององค์ประกอบ κ ในเฟส β (แสดงด้วยสัญลักษณ์ X_β^κ) ลงในสมการที่ 2.6 แล้วหาผลรวมของทุกเฟส

$$\frac{\partial \left(\sum_\beta X_\beta^\kappa \phi S_\beta \rho_\beta \right)}{\partial t} = \sum_\beta \text{div} \left(X_\beta^\kappa \rho_\beta K \frac{k_{r\beta}(\theta)}{\eta_\beta} (\nabla p_\beta - \rho_\beta \mathbf{g}) \right) \quad (2.5)$$

ใน TOUGH2 จะไม่สนใจการเปลี่ยนรูปของตัวกลาง ดังนั้นความพรุนของตัวกลางจะมีค่าคงที่ และการเคลื่อนที่ของมวลจากการแพร่ (Diffusion) หรือ Fick's law เมื่อนำไปรวมกับสมการที่ 2.5 และรวมแหล่งที่มา และแหล่งรับ (source and sink, q^κ) ของแต่ละองค์ประกอบลงในสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่ 2.6

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial \left(\sum_\beta X_\beta^\kappa S_\beta \rho_\beta \right)}{\partial t} &= \sum_\beta \text{div} \left(X_\beta^\kappa \rho_\beta K \frac{k_{r\beta}(\theta)}{\eta_\beta} (\nabla p_\beta - \rho_\beta \mathbf{g}) \right) \\ &+ \sum_\beta \text{div} (\rho_\beta \mathbf{D}_\beta^\kappa \nabla X_\beta^\kappa) + q^\kappa \end{aligned} \quad (2.6)$$

- \mathbf{D}_β^κ เทนเซอร์การแพร่ขององค์ประกอบ κ ในเฟส β [L²]
 q^κ แหล่งที่มาและแหล่งรับขององค์ประกอบ κ [ML⁻³T⁻¹]

สมการที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลขององค์ประกอบ κ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณการไหล (advective flux) ซึ่งเป็นเทอมแรกทางขวามือของสมการที่ 2.6 และปริมาณการแพร่ (diffusive flux) ซึ่งเป็นเทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 2.6 และเทอมที่สามทางขวามือของ

สมการที่ 2.6 คือแหล่งที่มาและแหล่งรับ ในกรณีที่ก๊าซเป็นฟาสซีฟเฟส และไม่รวมแหล่งที่มา และแหล่งรับ การไหลจะมีเพียงแค่การไหลของของเหลวสมการที่ 2.6 สามารถลดรูป

$$\phi \frac{\partial S_l \rho_l}{\partial t} = \text{div} \left(\mathbf{K} \frac{k_r(\theta) \rho_l}{\eta_l} \nabla (p_l - \rho_l g z) \right) \quad (2.7)$$

ในสถานะไอโซเทอร์มอล ความหนาแน่น และความหนืดของของเหลวจะมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถลดรูปสมการที่ 2.7 ได้เป็นสมการที่รู้จักกันแพร่หลายคือสมการของริชาร์ด (Richards's equation)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{k}(\theta) \nabla h) \quad (2.8)$$

$\mathbf{k}(\theta)$ ความซึมผ่านได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mathbf{K}(k_r \rho_l / \eta_l)$ [LT^{-1}]

h ความสูงทางชลศาสตร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ $z + (p_l / \rho_l g)$ [L]

2.2 สมการคอนสทิทิวทีฟทางชลศาสตร์

เนื่องจากจำนวนสมการสมดุลซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.6 มีจำนวนไม่เพียงพอต่อการหาคำตอบทั้งหมด จึงต้องมีการสร้างสมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำ (capillary pressure) กับความชื้นในดิน และความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้สัมพัทธ์และความชื้นในดิน ซึ่งมีนักวิจัยได้เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยสมการที่มีการเสนอขึ้นมามีจำนวนมาก เนื่องจากการไหลของของไหลในตัวกลางพรุนเป็นศาสตร์ที่ได้รับความสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ในที่นี้จึงขอกกล่าวถึงเฉพาะสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้สมการของ van Genuchten (van Genuchten, 1980) และสมการของ van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976) โดยมีรายละเอียดดังนี้

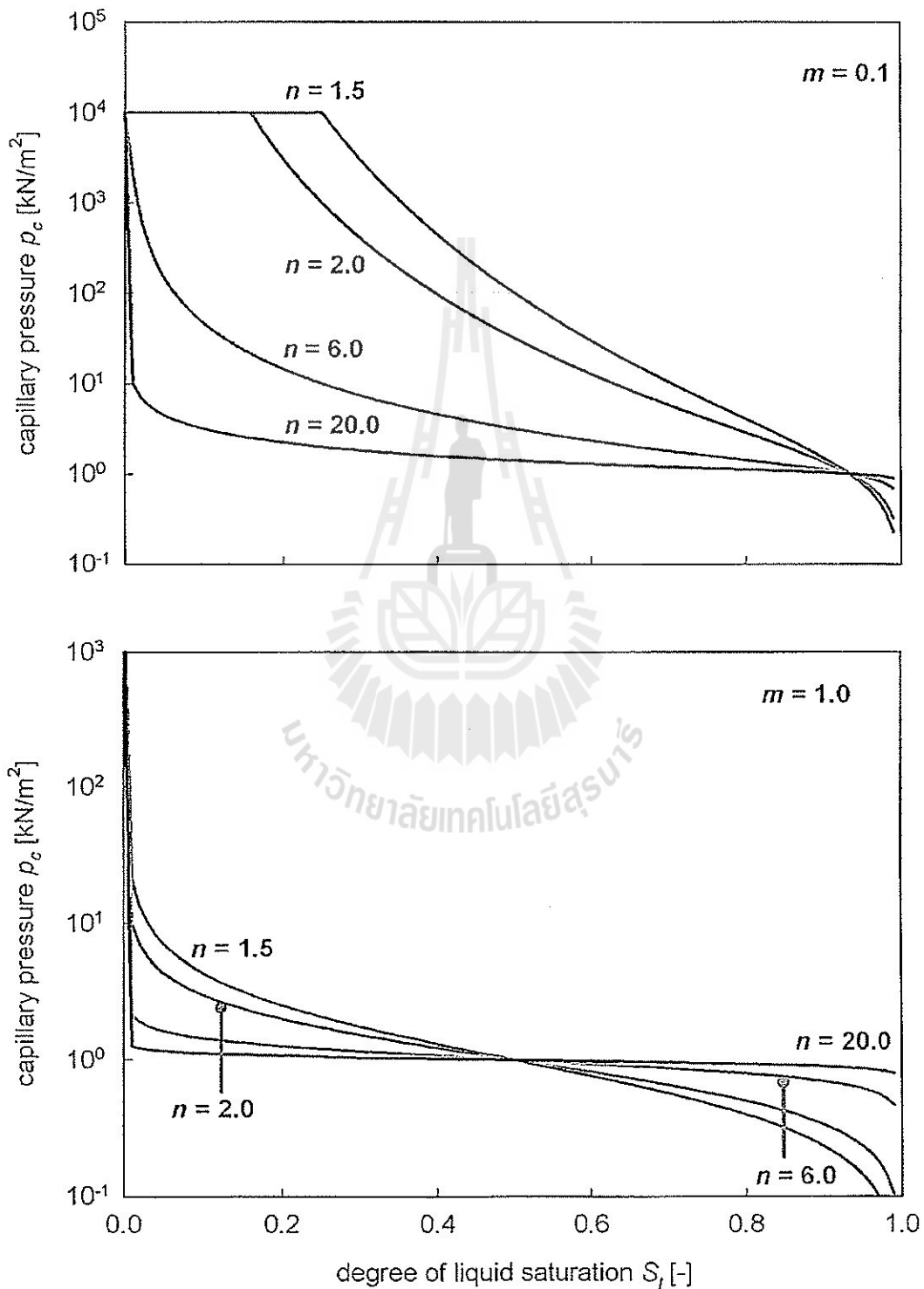
สมการของ van Genuchten เป็นสมการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีรูปแบบสมการที่เข้าใจง่าย และพารามิเตอร์ที่ใช้ก็ง่ายต่อการทำความเข้าใจ สมการของ van Genuchten แสดงได้ดังนี้

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha h_c)^n]^m} \quad (2.9)$$

m พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความสมมาตรของเส้นโค้ง [-]

n พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับการกระจายขนาดของโพรง [-]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำกับความชื้นในดิน ต่อไปจะขอเรียกว่าเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-water characteristics curve, SWCC) รูปที่ 2.1 แสดงอิทธิพลของพารามิเตอร์ m และ n ต่อรูปร่างของ SWCC ในสมการของ van Genuchten



รูปที่ 2.1 SWCC โดยใช้สมการของ van Genuchten

พารามิเตอร์ n เป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับการกระจายขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะส่งผลต่อความลาดของเส้นโค้ง SWCC ขนาดของพารามิเตอร์ n ค่าๆแสดงถึงการกระจายของช่องว่างมากส่งผลให้มีความเปลี่ยนแปลงระหว่างความชื้นและแรงดึงน้ำอยู่ในช่วงกว้าง ขณะที่ขนาดของพารามิเตอร์ n สูงๆแสดงถึงการกระจายขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินแคบ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงระหว่างความชื้น และแรงดึงน้ำอยู่ในช่วงแคบไปด้วย

หากพิจารณาการไหลของของไหลผ่านหลอดแคบพิวลาโดยใช้สมการ Hagen-Poiseuille และการกระจายขนาดของหลอดแคบพิวลาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น และแรงดึงน้ำ จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านได้สัมพันธ์กับความชื้น (Mualem, 1976) ดังสมการ สำหรับการไหลของของไหลผ่านหลอดแคบพิวลา

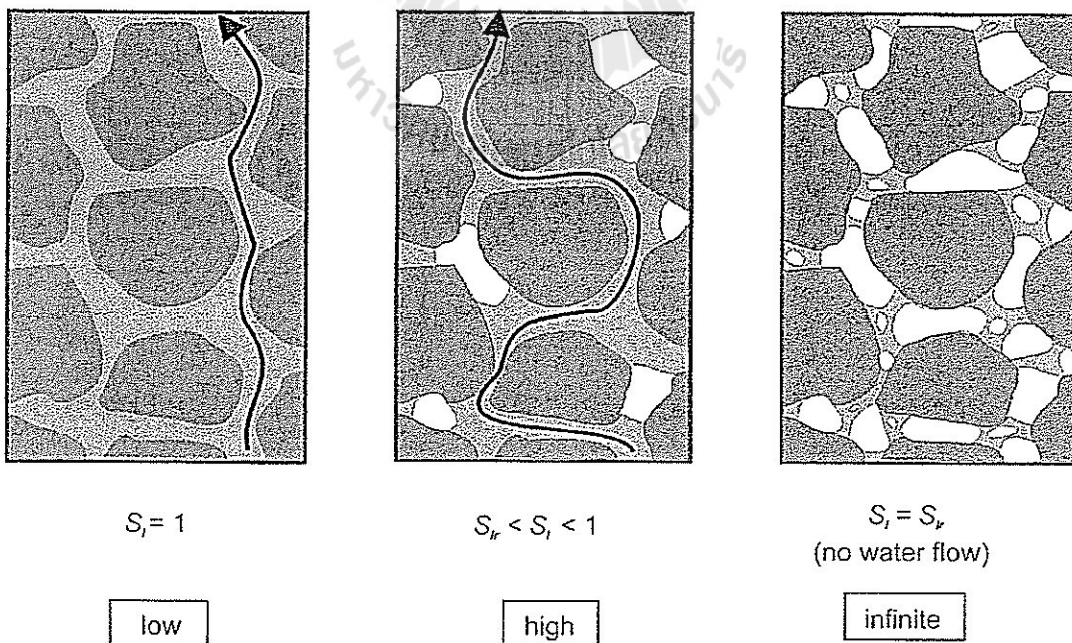
$$k_{rl} = (S_e)^n \left[\frac{\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h_c(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h_c(S_e)} \right]^2 \quad (2.10)$$

$$k_{rg} = (1 - S_e)^n \left[\frac{\int_{S_e}^1 \frac{dS_e}{h_c(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h_c(S_e)} \right]^2 \quad (2.11)$$

k_{rl} ค่าความซึมผ่านได้สัมพันธ์ของของเหลว [-]

k_{rg} ค่าความซึมผ่านได้สัมพันธ์ของก๊าซ [-]

n พารามิเตอร์ซึ่งสัมพันธ์กับความคดเคี้ยว (tortuosity) ในดิน (ดูรูปที่ 2.2) [-]



รูปที่ 2.2 ความคดเคี้ยวในดิน

รูปที่ 2.2 ระยะทางการไหลของของเหลวจะมีระยะสั้นที่สุด เมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และระยะการไหลจะเพิ่มตามการลดลงของความชื้นในดิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะการไหลนี้จะถูกแสดงด้วย พารามิเตอร์ความคดเคี้ยวในดิน (Bear, 1988)

$$\Gamma = \left(\frac{L}{L_c} \right)^2 < 1 \quad (2.12)$$

- Γ ความคดเคี้ยวในดิน [-]
 L ความยาวของดิน [L]
 L_c ความยาวของระยะการไหล [L]

พารามิเตอร์ z ในสมการที่ 2.10 และ 2.11 มีความสัมพันธ์กับความคดเคี้ยวในดินในสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\Gamma = (S_e)^z \quad (2.13)$$

เมื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำกับความชื้นในดินลงในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งเสนอโดย Mualem (Mualem, 1976) สมการของ van Genuchten (สมการ 2.9) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.14

$$h_c = \frac{1}{\alpha} ((S_e)^{-1/m} - 1)^{1/n} \quad (2.14)$$

และเมื่อแทนสมการที่ 2.14 ลงในสมการสมการที่ 2.10 จะได้

$$\int_0^{S_e} \frac{\alpha (S_e)^{1/m} dS_e}{(1 - (S_e)^{1/m})^{1/n}} \quad (2.15)$$

แทน S_e ด้วย \hat{y}^m สมการที่ 2.15 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\alpha m \int_0^{(S_e)^{1/m}} (\hat{y})^{m+1/n-1} (1 - \hat{y})^{-1/n} d\hat{y} \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.16 สามารถจัดรูปได้เป็น

$$\alpha m I_c(\hat{a}, \hat{c}) B(\hat{a}, \hat{c}) \quad (2.17)$$

เมื่อ $B(\hat{a}, \hat{c})$ เป็น complete Beta function และ $I_{\zeta}(\hat{a}, \hat{c})$ เป็น incomplete Beta function โดยที่

$$B(\hat{a}, \hat{c}) = \int_0^1 (\hat{y})^{\hat{a}-1} (1-\hat{y})^{\hat{c}-1} d\hat{y} \quad (2.18)$$

$$I_{\zeta}(\hat{a}, \hat{c}) = \frac{1}{B(\hat{a}, \hat{c})} \int_0^{\zeta} (\hat{y})^{\hat{a}-1} (1-\hat{y})^{\hat{c}-1} d\hat{y} \quad (2.19)$$

และกำหนดให้ ζ, \hat{a} , และ \hat{c} แทนด้วย

$$\zeta = (S_e)^{1/m} \quad \hat{a} = m + 1/n \quad \text{และ} \quad \hat{c} = 1 - 1/n \quad (2.20)$$

เนื่องจาก $I_1(\hat{a}, \hat{c}) = 1$ ตัวหารในสมการที่ 2.10 จะมีค่าเท่ากับ $\alpha m B(\hat{a}, \hat{c})$ เมื่อ S_e เท่ากับ 1.0 ดังนั้นสมการแสดงค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลวคือ

$$k_r = (S_e)' I_{\zeta}(\hat{a}, \hat{c})^2 \quad (2.21)$$

สมการที่ 2.21 เป็นเทอมทั่วไปสำหรับความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลว สำหรับความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของก๊าซสามารถพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกัน จะได้

$$k_{rg} = (S_e)' (1 - I_{\zeta}(\hat{a}, \hat{c}))^2 \quad (2.22)$$

เพื่อให้รูปสมการที่ 2.21 และ 2.22 มีรูปที่ง่ายขึ้นจึงกำหนดให้ (van Genuchten, 1980)

$$m = 1 - 1/n \quad (2.23)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.15 สามารถเขียนใหม่ได้

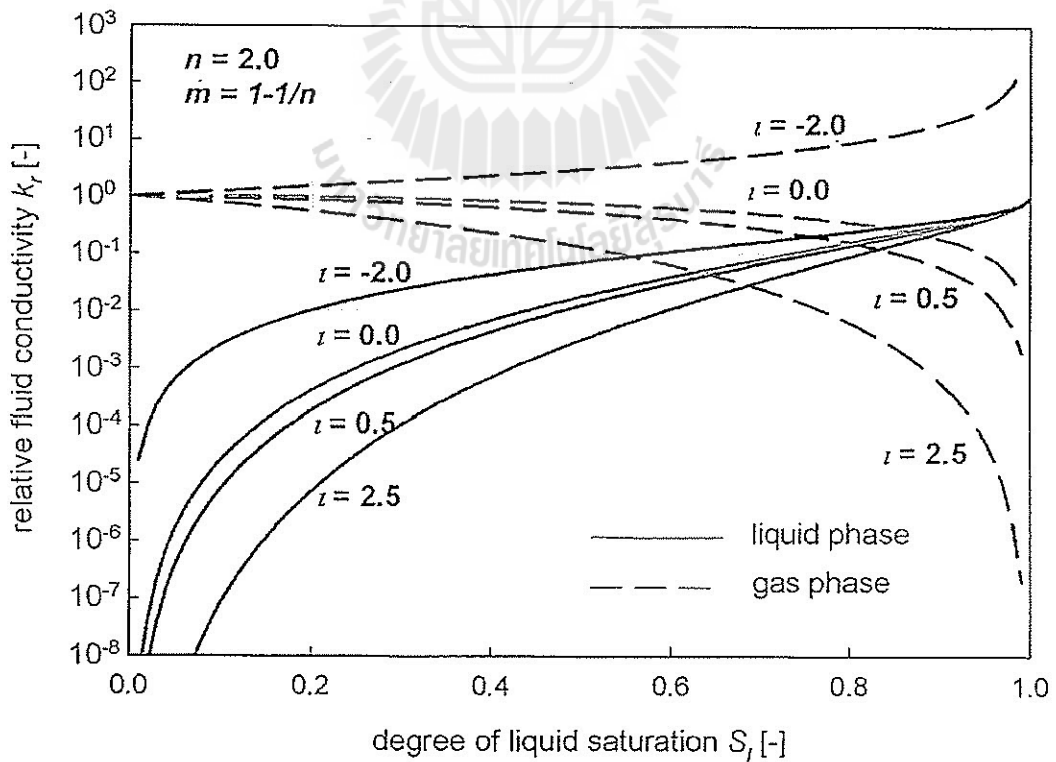
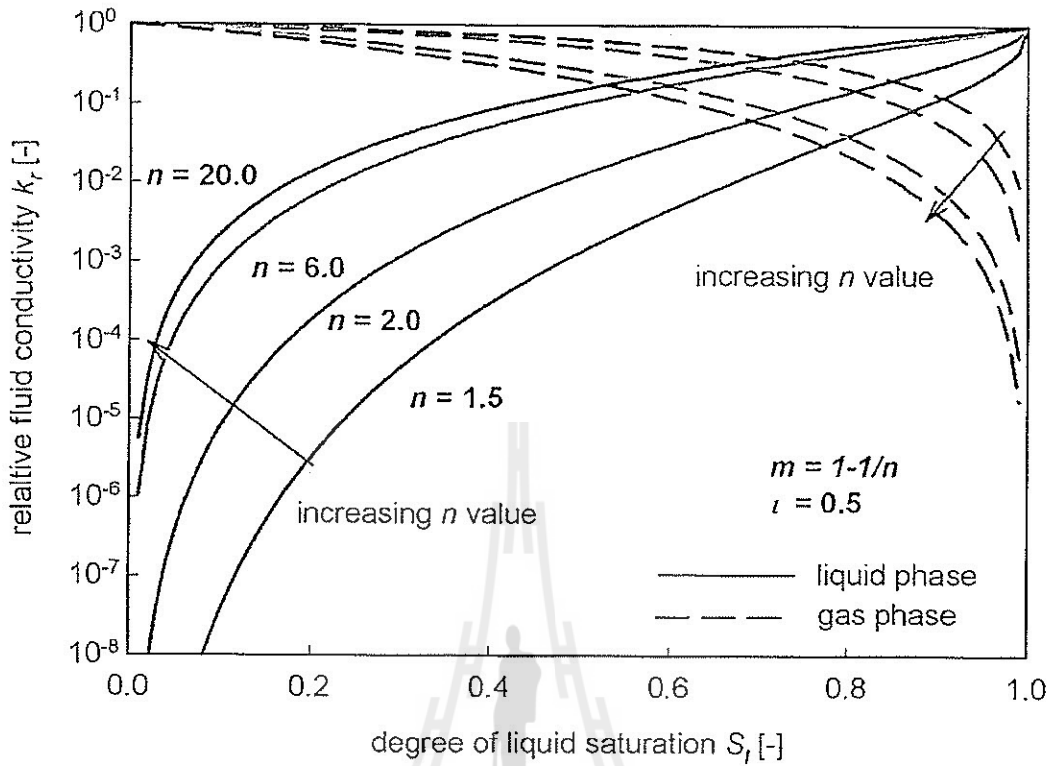
$$\alpha [1 + (1 - (S_e)^{1/m})^m] \quad (2.24)$$

และตัวหารในสมการที่ 2.10 มีค่าเท่ากับ α ดังนั้นสมการที่ 2.10 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$k_r = (S_e)' [1 + (1 - (S_e)^{1/m})^m]^2 \quad (2.25)$$

สมการแสดงความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของก๊าซสามารถพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกันจะได้

$$k_{rg} = (1 - S_e)' [1 - (S_e)^{1/m}]^{2m} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.3 ความซึมผ่าน ได้สัมพัทธ์ของของเหลวและก๊าซ ตามการเปลี่ยนแปลงของ n และ ι

สมการที่ 2.25 และ 2.26 คือสมการที่รู้จักกันกว้างขวางคือ สมการ van Genuchten-Mualem รูปที่ 2.3 แสดงค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลว และก๊าซที่สร้างจากสมการ van Genuchten-Mualem ที่ค่า n และ λ ต่างๆ จากรูปพบว่าเมื่อค่า n สูงจะให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลว สูง เนื่องจากค่า n สูงแสดงถึงการกระจายโพรงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้การไหลของของเหลวเป็นไปได้สะดวก ส่วนการไหลของก๊าซจะตรงกันข้าม นั่นคือค่า n สูงขึ้นจะลดค่าการซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของก๊าซ

รูปที่ 2.3 ยังแสดงอิทธิพลของพารามิเตอร์ λ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความคล้อยในตัวดิน จากรูปจะพบว่าค่า λ สูงจะให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลว และก๊าซต่ำทั้งคู่ ความคล้อยตัวแสดงถึงระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น เมื่อความอิ่มตัวของของไหลลดลง ระยะทางการลดลงของความอิ่มตัวของของไหล ดินที่มีค่าพารามิเตอร์ λ สูงจะมีระยะการไหลของของไหลสูง ส่งผลต่อการลดลงของความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของไหล

Wösten และ van Genuchten (Wösten and van Genuchten, 1988) ได้รวบรวมดินมากกว่า 200 ชนิด และพบว่าพารามิเตอร์ λ มีค่าอยู่ระหว่าง -16 ถึงมากกว่า 2 อย่างไรก็ตามการใช้ค่าพารามิเตอร์ λ ที่ติดลบจะให้ค่าที่ไม่น่าจะเป็นจริง รูปที่ 2.3 ได้แสดงความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของก๊าซเมื่อพารามิเตอร์ λ มีค่าติดลบ จะพบว่าความซึมผ่านได้ของก๊าซจะเพิ่มขึ้น เมื่อความอิ่มตัวของก๊าซลดลง ซึ่งไม่น่าจะเป็นจริง ดังนั้นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ λ ให้มีค่าติดลบจึงควรกำหนดค่าอย่างระมัดระวัง

2.3 ซอฟต์แวร์ TOUGH2

TOUGH2 (Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat) เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับจำลองการไหลของของไหลแบบสามมิติของของไหลหลายเฟสหลายองค์ประกอบผ่านตัวกลางพรุน ในแบบจำลองนี้ สมการสมดุลจะถูกแบ่งออกเป็นเวลา และห้วงเทศะ (space) โดยห้วงเทศะจะถูกแบ่งแบบ integral finite difference (Narasimhan and Witherspoon, 1976) ขณะที่เวลาจะถูกแบ่งแบบ first order finite difference

และด้วยเหตุผลด้านเสถียรภาพในการคำนวณ เหมอแหล่งรับ และแหล่งกำเนิดจะถูกกระทำแบบอิมพลิซิที และเนื่องจากฟังก์ชันจะแสดงในรูปของตัวแปรไม่ทราบค่าที่ระดับเวลาถัดไปทำให้ได้สมการตัวเลขที่ไม่เป็นเชิงเส้น:

$$R_k^{k,i+1} = M_k^{k,i+1} - M_k^{k,i} - \frac{\Delta t}{V_k} \left\{ \sum_j A_{jk} f_{jk}^{k,i+1} + V_k g_k^{k,i+1} \right\} \quad (2.27)$$

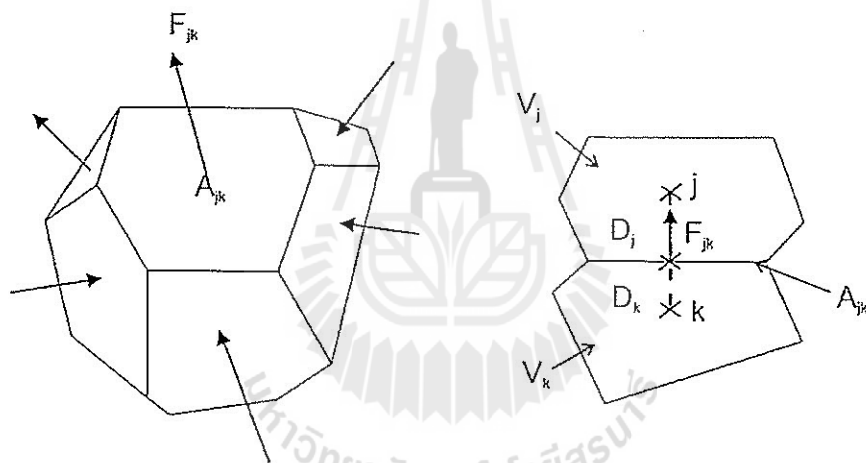
$R_k^{k,i}$ ค่าตกค้าง (residual) ขององค์ประกอบ k ต่อหน่วยปริมาตร k ที่ระดับเวลา i [ML^{-3}]

$M_k^{k,i}$ มวลขององค์ประกอบ k ต่อหน่วยปริมาตร k ที่ระดับเวลา i [ML^{-3}]

V_k ปริมาตรของอิเลเมนต์ k [L^3]

- A_{jk} พื้นที่ที่หน้าสัมผัสระหว่างอิเลเมนต์ j และอิเลเมนต์ k [L^2]
- $f_{jk}^{k'}$ ฟลักซ์เชิงมวลขององค์ประกอบ k ที่หน้าสัมผัสระหว่างอิเลเมนต์ j และอิเลเมนต์ k ที่ระดับเวลา t [ML^{-2}]
- $q_k^{k'}$ เทมของแหล่งรับ และแหล่งกำเนิดขององค์ประกอบ k ต่อหน่วยปริมาตร k ที่ระดับเวลา t [$ML^{-3}T^{-1}$]

เมื่อตัวอักษร j และ k แสดงถึงอิเลเมนต์ และตัวอักษร jk แสดงหน้าสัมผัส (พิจารณารูปที่ 2.4 ประกอบ) สมการแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear equation) สามารถจัดการได้โดยใช้การวนรูปแบบ Newton/Raphson โดยการวนรูปจะกระทำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าคงค้าง (residual) สูงสุดมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งโดยปกติการเข้าสู่เกณฑ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายในสามถึงสี่รอบของลูปเท่านั้น แต่หากไม่เกิดการเข้าสู่เกณฑ์แบบจำลองจะทำการลดขนาดของขั้นเวลา (time step) ในการคำนวณลง แล้วจึงทำการคำนวณแบบวนรูปใหม่



รูปที่ 2.4 การแบ่งห้วงทะเลใน TOUGH2 และรูปร่างโครงสร้างของข้อมูล (after Pruess et al., 1999)

โครงสร้างของ TOUGH2 จะแยกออกเป็นส่วนย่อย (module) (ดูรูปที่ 2.5) ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้สมการย่อยสำหรับสถานะการไหลที่แตกต่างกัน (EOS $_i$, $i = 1,2,3..$) การพัฒนาโครงสร้างของ TOUGH2 ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าสมการสมดุลของการไหลของของไหลจะมีรูปสมการเหมือนกัน แม้จะมีจำนวนขององค์ประกอบ และสถานะต่างกัน รวมทั้งธรรมชาติของของไหลแต่ละเฟสจะต่างกันก็ตาม ดังนั้น TOUGH2 จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อจะรองรับส่วนย่อย (EOS) โดยที่แต่ละ EOS จะให้คุณสมบัติทางอุณหภาพของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด เอนทัลปี ฯลฯ เพื่อที่จะนำไปใช้ในสมการการไหลในส่วนหลักของ TOUGH2 จากโครงสร้างดังกล่าว ทำให้

TOUGH2 สามารถใช้จำลองการไหลของของไหลได้หลากหลายชนิด หลากหลายรูปแบบ ตารางที่ 2.1 แสดงรายการของ EOS ที่ TOUGH2 สามารถใช้ได้ในปัจจุบัน

เนื่องจากการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาการไหลในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นของไหลจึงมีเพียงสององค์ประกอบ และสองเฟส คือองค์ประกอบของน้ำ และอากาศ และเฟสของของเหลว และก๊าซ เท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ EOS3 การเลือกใช้ EOS3 แทนที่จะใช้ EOS9 เนื่องจากผู้วิจัยมีแผนในการทำวิจัยต่อในหัวข้อนี้ โดยจะเป็นการศึกษาในภาคสนาม ซึ่งหากเป็นพื้นที่สนามจะมีความยืดหยุ่นกว่า หากสามารถใช้ได้ทั้งน้ำ หรืออากาศ เป็นแหล่งกำเนิด หากใช้ EOS9 จะสามารถใช้น้ำเป็นแหล่งกำเนิดได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

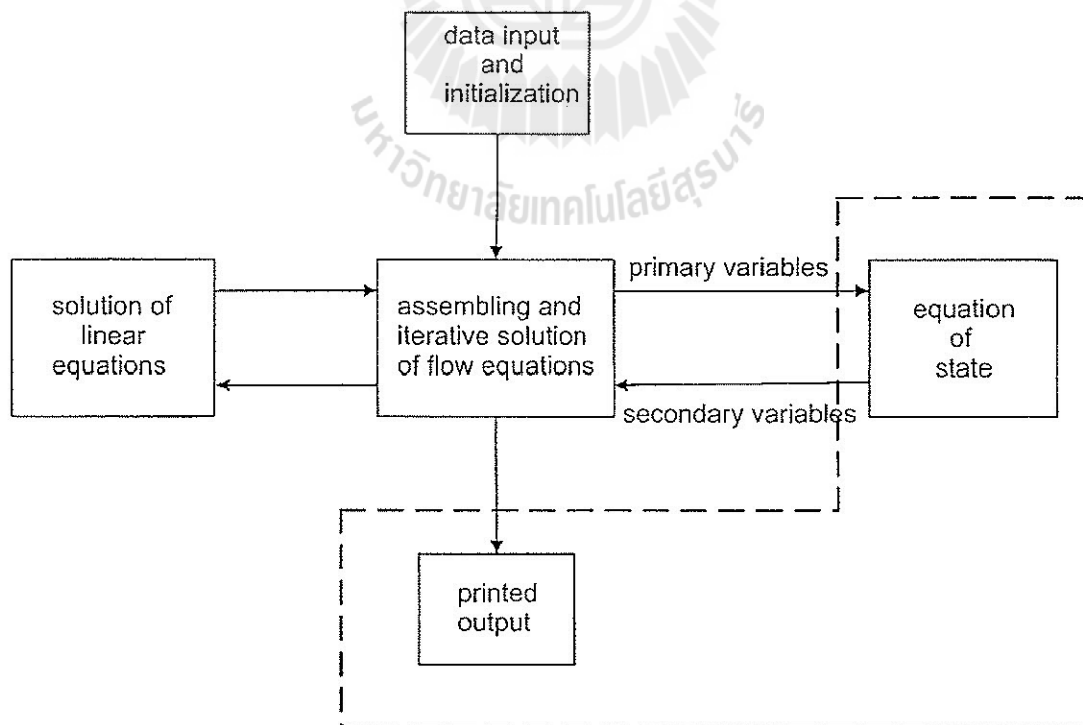
ใน EOS3 คุณสมบัติของน้ำทั้งหมดได้จาก International Formulation Committee steam table equations (Pruess et al., 1999) ส่วนอากาศจะสมมติเป็นก๊าซในอุดมคติ และให้ความดันของก๊าซเฟสมีค่าเท่ากับ $p_g = p_a + p_v$ โดยที่ p_g เป็นความดันของก๊าซ p_a เป็นความดันของอากาศ และ p_v เป็นความดันไอ การละลายของอากาศและน้ำคำนวณจากกฎของเฮนรี (Henry's Law)

ตัวแปรหลักทางอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ใน EOS3 ได้แก่ P X และ T สำหรับของไหลหนึ่งเฟส และ P_g S_g+10 และ T สำหรับของไหลสองเฟส เมื่อ P เป็นความดัน X เป็นสัดส่วนของมวลอากาศ T เป็นอุณหภูมิ P_g สำหรับความดันของก๊าซ S_g สำหรับความอิ่มตัวของก๊าซ สาเหตุที่ต้องบวก 10 ในตัวแปรตัวที่สองในกรณีการไหลสองเฟส เพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างตัวแปรชุดแรก (หนึ่งเฟส) และตัวแปรชุดที่สอง (สองเฟส)

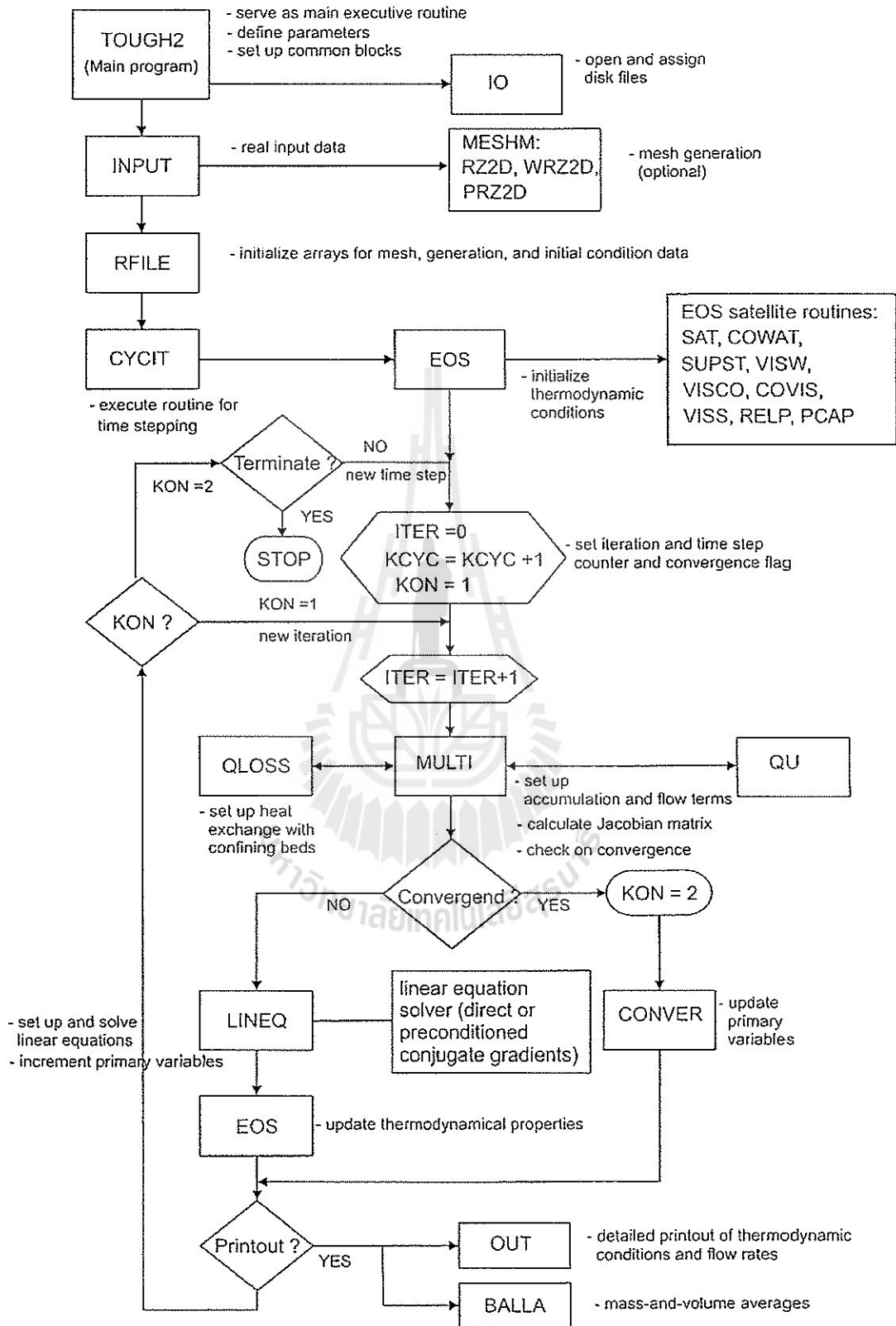
รูปที่ 2.6 แสดง flow chart ของ TOUGH2 รoutines (subroutine) INPUT และ RFILE จะทำหน้าที่ตั้งสถานะเริ่มต้น (initial conditions) สำหรับการจำลอง ลำดับการวนลูปสำหรับขั้นเวลาจะถูกควบคุมโดย routines CYCIT จากสถานะเริ่มต้นที่อ่านจากไฟล์ INPUT คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์จะถูกป้อนมายังโปรแกรมโดย routines EOS จากนั้นจำนวนครั้งของขั้นเวลา (KCYC) จำนวนครั้งของการวนลูป (ITER) และสัญลักษณ์เตือนการลู่เข้า (KON) จะถูกกำหนดในขั้นตอนนี้ ต่อมาสมการสมดุลของการไหลจะถูกสร้างขึ้นจากรoutines (MULTI) และหากมีเทมของแหล่งรับ และ/หรือแหล่งกำเนิด routines QU จะถูกเรียกโดย MULTI จากนั้นจะทำการคำนวณค่าคงค้าง (residuals) ค่าคงค้างที่มากที่สุดจะถูกกำหนดและตรวจสอบกับเงื่อนไขการลู่เข้า หากการลู่เข้ายอมรับได้ โปรแกรมจะเรียกรoutines CONVER เพื่ออัปเดตตัวแปรหลัก แต่หากการลู่เข้ายังไม่สามารถยอมรับได้ โปรแกรมจะเรียกรoutines LINEQ เพื่อเรียกสมการเชิงเส้น หรือสมการไม่เชิงเส้น เพื่อทำการแก้สมการเชิงเส้น การพิมพ์ผลลัพธ์จะถูกกำหนดโดย routines OUT และ BALLA ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้

ตารางที่ 2.1 Module ต่างๆที่สามารถใช้ได้ในปัจจุบัน

Module	คำบรรยาย
EOS1	water with tracer
EOS2	water , CO ₂
EOS3	water, air
EOS4	water, air, with vapour pressure lowering capillarity
EOS5	water, hydrogen
EOS7	water, brine, air
EOS7R	water, brine, radionuclide 1, radionuclide 2, air
EOS8	water, air, oil
EOS9	saturated-unsaturated flow
EWASG	water, NaCl, non-condensable gas



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ TOUGH2 (after Pruess et al., 1999)



รูปที่ 2.6 Flow chart ของ TOUGH2 (after Pruess et al., 1999)

สำหรับ TOUGH2 ข้อมูลเข้า (INPUT) และผลลัพธ์จากการคำนวณ (OUTPUT) จะเป็น ASCII ไฟล์ทั้งหมด INPUT ไฟล์ทั้งหมดจะต้องอยู่ในรูปแบบที่กำหนด และใช้หน่วยในระบบ SI เช่น เมตร วินาที กิโลกรัม องศาเซลเซียส และหน่วยอื่นๆที่เกิดจากการกระทำของหน่วยพื้นฐานในระบบ SI เช่น นิวตัน จูล ปาสคาล เป็นต้น

INPUT ไฟล์ของ TOUGH2 จะถูกจัดเป็นบล็อก ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยตัวอักษรสำคัญห้าตัวอักษร ในหลักที่ 1 ถึง 5 ข้อมูลส่วนแรกจะเป็นชื่อโครงการ และข้อมูลทางอุทกธรณีสำหรับตัวกลางจะแสดงอยู่ในบล็อกข้อมูล ROCK ส่วนจำนวนขององค์ประกอบของของไหล และจำนวนสมการสมดุลจะถูกกำหนดในบล็อกข้อมูล MULTI ส่วนบล็อกข้อมูล START จะมีความสัมพันธ์กับบล็อกข้อมูล INCON และ ELEME และหากไม่มีบล็อกข้อมูล START บล็อกข้อมูล INCON จะต้องมีข้อมูลสำหรับทุกอิลิเมนต์ และจะต้องมีลำดับข้อมูลของแต่ละอิลิเมนต์ตรงกับลำดับในบล็อกข้อมูล ELEME ด้วย

ตารางที่ 2.2 สรุปไฟล์ที่ใช้ใน TOUGH2 ทั้งหมด

ชื่อไฟล์	คำอธิบาย
MESH	ไฟล์รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ TOUGH2 mesh
GENER	ไฟล์รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งรับ และแหล่งกำเนิด
INCON	ไฟล์รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสถานะเริ่มต้นทางอุณหพลศาสตร์
SAVE	ไฟล์รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสถานะทางอุณหพลศาสตร์เมื่อสิ้นสุดการจำลอง
MINC	ไฟล์รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ mesh รูปร่างของตัวกลางที่มีรอยแตก
LINEQ	ไฟล์ที่รวบรวมพารามิเตอร์สำหรับแก้ปัญหาสมการเชิงเส้น
TABLE	ไฟล์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อสิ้นสุดการจำลอง
FOFT	ไฟล์บันทึกข้อมูลสถานะกับเวลา ของแต่ละอิลิเมนต์ เพื่อใช้ในการเขียนกราฟ
COFT	ไฟล์บันทึกข้อมูลสถานะกับเวลา ของแต่ละรอยต่อระหว่างอิลิเมนต์ เพื่อใช้ในการเขียนกราฟ
GOFT	ไฟล์สำหรับข้อมูลแหล่งรับ และแหล่งกำเนิด ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
VERS	ไฟล์สำหรับหน่วยต่างๆที่ใช้ใน TOUGH2

สำหรับบล็อกข้อมูล PARAM จะใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณ เช่นขนาดของชั้นเวลา การรู้เข้า เป็นต้น บล็อกข้อมูล SOLVR จะใช้สำหรับกำหนดตัวเลือกอัลกอริทึมสำหรับแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น พารามิเตอร์สำหรับการวนลูป เป็นต้น บล็อกข้อมูล ELEME จะให้รายการของอีลิเมนต์ทั้งหมด รวมทั้งพิกัด และปริมาตรของทุกๆอีลิเมนต์ด้วย ส่วนบล็อกข้อมูล CONNE จะให้รายการการไหลระหว่างอีลิเมนต์ทั้งหมด บล็อกข้อมูล INCON จะให้ข้อมูลสถานะเริ่มต้นของแต่ละอีลิเมนต์ ทั้งนี้ไฟล์ INPUT จะต้องจบด้วยคำสำคัญ ENDCY โปรแกรมจะไม่สนใจข้อมูลใดๆใน INPUT ไฟล์ที่อยู่เลย ENDCY ไปแล้ว บล็อกข้อมูลที่กล่าวถึงข้างต้น ใช้ได้สำหรับการศึกษาในรายงานวิจัยนี้เท่านั้น หากต้องการทราบรายละเอียดของบล็อกข้อมูลทั้งหมดขอให้ทำการศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือคู่มือการใช้ TOUGH2 (TOUGH2 user's manual (Pruess et al., 1999))

ผลลัพธ์มาตรฐานจากการจำลองจะให้ตัวแปรอุณหภูมิศาสตร์ พร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างอื่น สำหรับทุกๆอีลิเมนต์ โดยจะแสดงในไฟล์ OUTPUT ที่ที่ๆชั้นเวลาที่กำหนดโดยผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดให้เขียนข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางอุณหภูมิศาสตร์ที่ต้องการกับเวลาลงในไฟล์ FOFT (สำหรับอีลิเมนต์) COFT (สำหรับหน้าสัมผัสระหว่างอีลิเมนต์) and GOFT (สำหรับแหล่งรับ และแหล่งกำเนิด) ตารางที่ 2.2 แสดงสรุปไฟล์ทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม TOUGH2 ยกเว้นไฟล์ INPUT และ OUTPUT



บทที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลทดสอบ

3.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ

ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินทราย และดินทรายปนดินตะกอน โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลยภาพ ได้แก่การกระจายขนาดของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน พิกัดอัตราบีร์ก ความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุด ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของดินทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ และเมื่อจำแนกดินในระบบ USCS (Unified soil classification system) สามารถจำแนกดินทั้งสามชนิดได้ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 การกระจายการขนาดเม็ดดินของดินทั้งสามแสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

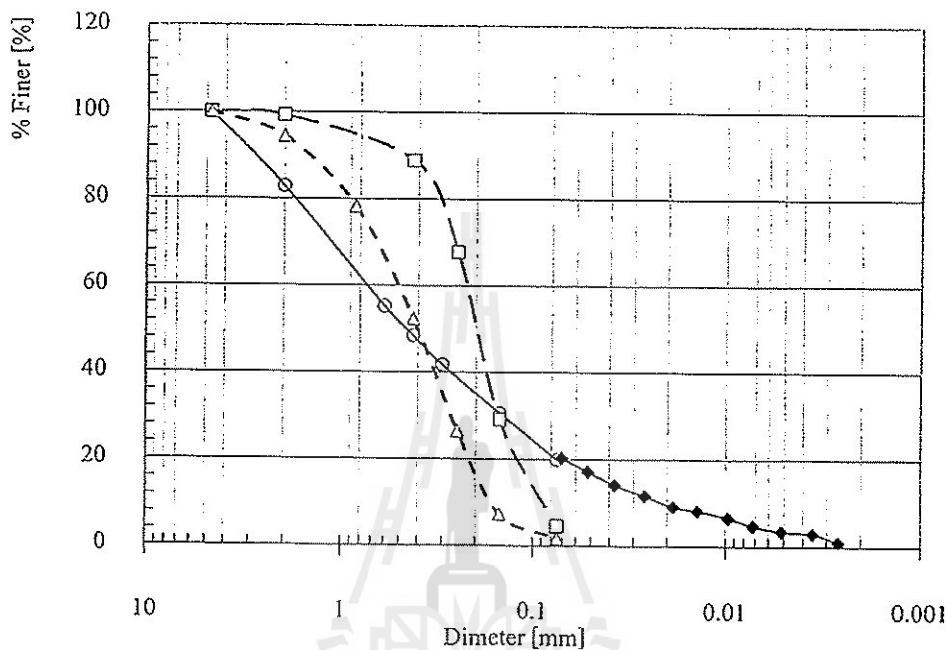
ดิน	ความถ่วงจำเพาะ ของเม็ดดิน G_s [E]	ความหนาแน่น สูงสุด ρ_{max} [g/cm ³]	ความหนาแน่น ต่ำสุด ρ_{min} [g/cm ³]	% ดินเม็ด ละเอียด #200 [%]	สัมประสิทธิ์ความซึม ผ่านได้ k_{20} [cm/sec]
Sand1	2.67	1.76	1.41	1.79	0.2
Sand2	2.69	1.81	1.45	4.54	0.03
Sand3	2.60	1.80	1.18	19.86	0.002

วิธีการทดสอบการไหลเข้าแบบไม่คงตัวหลายระดับความดัน

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติด้านชลศาสตร์ของดิน ได้แก่คุณสมบัติการอุ้มน้ำของดิน และฟังก์ชันการซึมผ่านได้ของดินที่ระดับความชื้นต่างๆ จะใช้การทดสอบการไหลเข้าของน้ำแบบไม่คงตัวหลายระดับความดัน (Multistep water inflow) จึงได้มีการจัดทำชุดทดสอบขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย

- ถังซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร สูง 1.5 เมตร สำหรับเป็นภาชนะบรรจุดิน
- ถังน้ำซึ่งสามารถปรับระดับสูงต่ำได้ ในถังน้ำจะมีลูกลอยสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ
- ท่อน้ำซึ่งปลายด้านหนึ่งต่อกับถังปรับระดับ และอีกด้านเป็นปลายปิด ทำการเจาะรูด้านข้างเพื่อให้ น้ำไหลออก ช่วงที่ทำกรเจาะรูจะมีความยาว 10 เซนติเมตรจากปลายปิด แล้วใส่แผ่นวัสดุโพลีเอทิลีนเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ปลายท่อด้านนี้จะหยั่งลงในดิน โดยให้ระยะหยั่งเท่ากับ 20 เซนติเมตร รูปที่ 3.2 แสดงภาพร่างปลายท่อ
- ถังน้ำหลักสำหรับบรรจุน้ำทั้งหมดที่จะใช้และถ่ายลงถังน้ำปรับระดับเมื่อลูกลอยเปิดวาล์วน้ำ และ

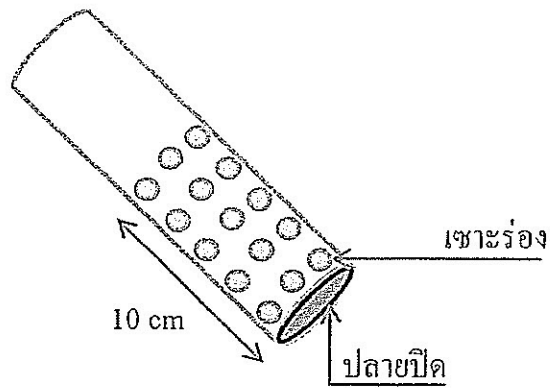
- หัววัดความชื้นในดิน (TDR probe) Decagon EC-5 ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายหัววัดความชื้นในดิน โดยแต่ละการทดสอบจะมีการติดตั้งหัววัดความชื้นทั้งสิ้นสามจุด



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ในการทดสอบ

การกำหนดจุดติดตั้งหัววัดความชื้นจะติดตั้งไว้ใกล้กับตำแหน่งที่ปล่อยน้ำออก เพราะผลจากการทดสอบที่ผู้วิจัยได้ทำ ในงานวิจัยนี้ (ไม่ได้แสดงในรายงาน) พบว่าการติดตั้งหัววัดความชื้น ไกลออกไปจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน นอกจากนี้ การติดตั้งหัววัดความชื้นใกล้ๆกับตำแหน่งที่ปล่อยน้ำออก จะลดอิทธิพลของขอบเขตที่บ่มน้ำที่ขอบถังซีเมนต์

รูปที่ 3.4 แสดงภาพร่างชุดทดสอบการไหลเข้าของน้ำแบบหลายระดับความดัน ก่อนทดสอบจะทำการทาสายมะตอยรอบๆผนังด้านในของถังซีเมนต์เพื่อให้ถังมีความทึบน้ำ (ในการลองทดสอบลองผิดลองถูกหลายครั้ง พบว่าการใช้ยางมะตอยทาขอบผิวของถังสามารถกันการซึมของน้ำเข้าขอบถัง ได้ดีกว่าการใช้แผ่นพลาสติก ซึ่งมักพบการฉีกขาดขึ้นระหว่างการเตรียมแปลงทดสอบ) รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายการเตรียมถังซีเมนต์ก่อนทดสอบ



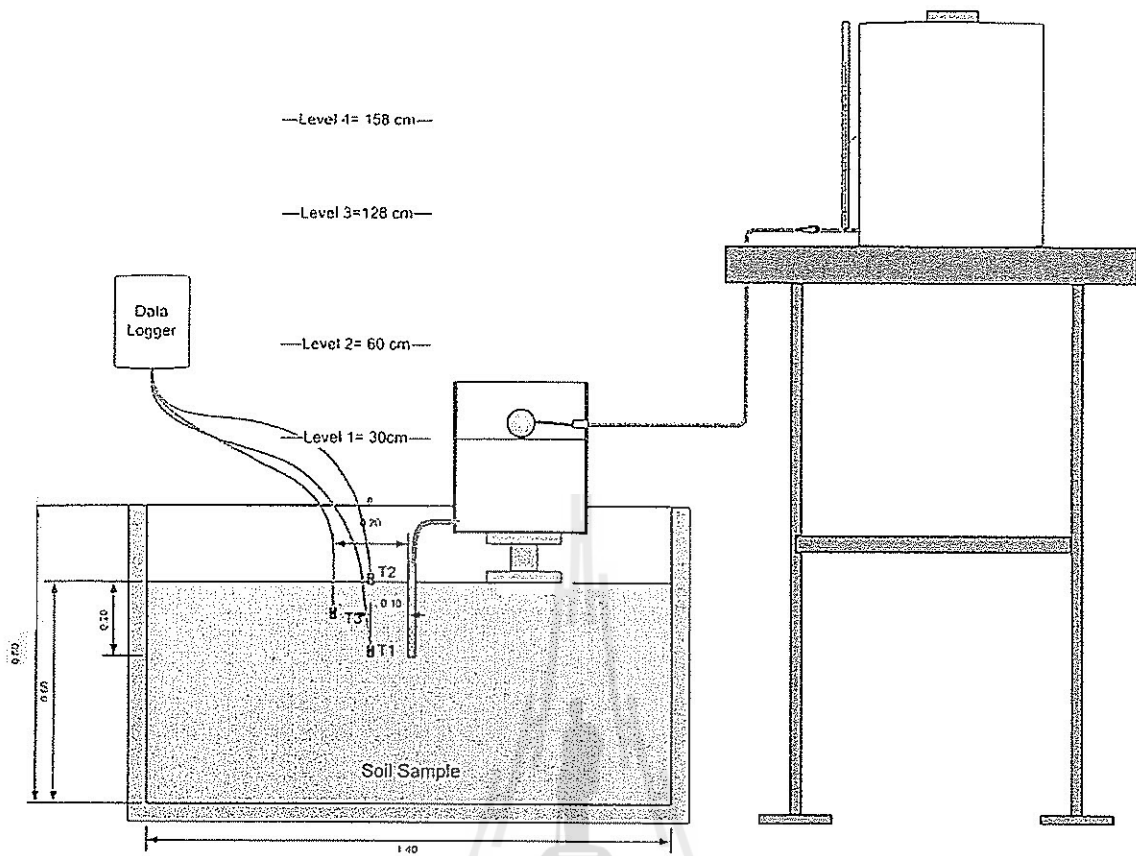
รูปที่ 3.2 ภาพร่างปลายท่อ



รูปที่ 3.3 หัววัดความชื้น Decagon EC-5

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของหัววัดความชื้น Decagon EC-5

ความยาว cm]	ความละเอียด	ความถี่[MHz]	ช่วง
5.0	Mineral soil: $\pm 3\%$ VWC และ $\pm 1-2\%$ VWC สำหรับดินที่ได้รับการสอบเทียบ Rockwool: $\pm 3.0\%$ VWC Potting soil: $\pm 3\%$ VWC	70	0-100% VWC



รูปที่ 3.4 ภาพร่างชุดทดสอบการไหลเข้าของน้ำหลายระดับ

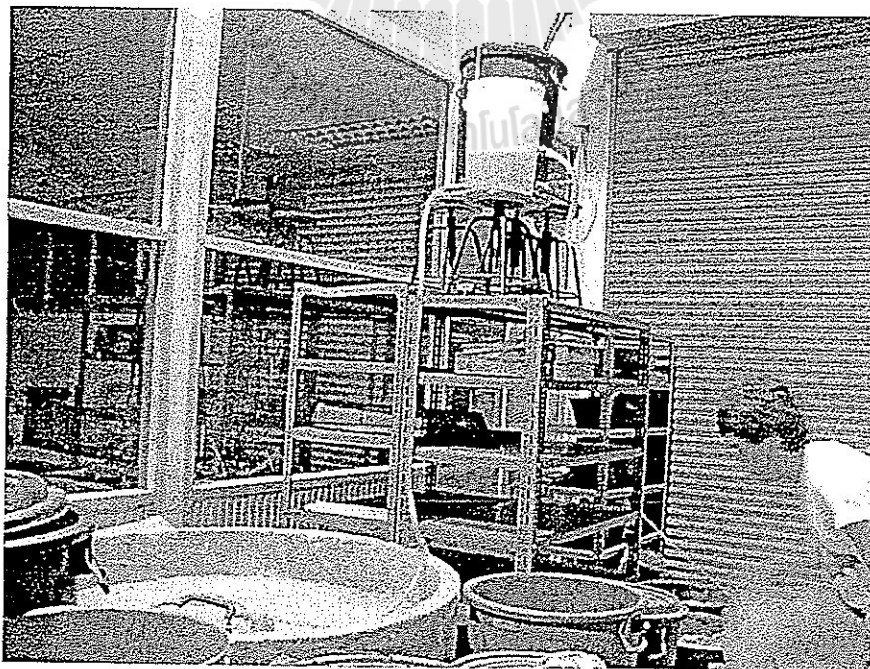


รูปที่ 3.5 การเตรียมถังก่อนทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบจะนำดินมาบดโคลงในถังซีเมนต์ทรงกลมจนกระทั่งดินมีความสูง 1.0 เมตร การบดอัดดินดินจะทำการบดอัดเป็นชั้นๆ โดยควบคุมน้ำหนักดินที่ใช้ และความสูงของแต่ละชั้น และเพื่อให้สามารถควบคุมการบดอัดดินให้มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ จึงทำการบดอัด โดยการบดอัดจะบดอัดดินแห่งเท่านั้น เพราะการบดอัดดินเปียกจะไม่สามารถควบคุมความแน่นของดินแต่ละชั้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นทำการฝังหัววัดความชื้นเมื่อบดอัดถึงระดับที่กำหนดให้ติดตั้งหัววัดความชื้น รูปที่ 3.6 แสดงรูปถ่ายขณะเตรียมตัวอย่างดิน

การทดสอบจะทำการปรับระดับถึงน้ำให้ผิวน้ำในถังอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร เหนือผิวดิน แล้วจึงเปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้าตัวอย่างดิน การบันทึกผลทดสอบจะบันทึกความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา และปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดิน โดยในระหว่างทดสอบชุดบันทึกข้อมูล (Data logger) จะบันทึกความชื้นที่วัดได้จากหัววัดความชื้นทุกๆ 1 นาที และวัดระดับน้ำที่ลดลงในถังน้ำหลักเพื่อนำไปคำนวณปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดินระหว่างการทดสอบทั้งนี้เนื่องจากการวัดปริมาณน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดินมิได้เป็นการวัดแบบอัตโนมัติ จึงทำการวัดเฉพาะเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแต่ละระดับความสูงของถังน้ำเท่านั้น จะหยุดบันทึกเมื่อสังเกตว่าจนระดับน้ำในถังน้ำหลักไม่ลดลงแล้ว

ปรับระดับโดยยกถังขึ้น โดยให้ระดับของผิวน้ำสูงกว่าระดับของผิวดิน 60 เซนติเมตรและ 90 เซนติเมตร โดยแต่ละระดับความสูงของถังน้ำ จะทำการบันทึกความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา และปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดินกับเวลา เช่นเดียวกับการทดสอบเมื่อระดับผิวน้ำในถังอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตรจากผิวดิน



รูปที่ 3.6 ภาพขณะทดสอบการไหลเข้าของน้ำแบบหลายระดับ

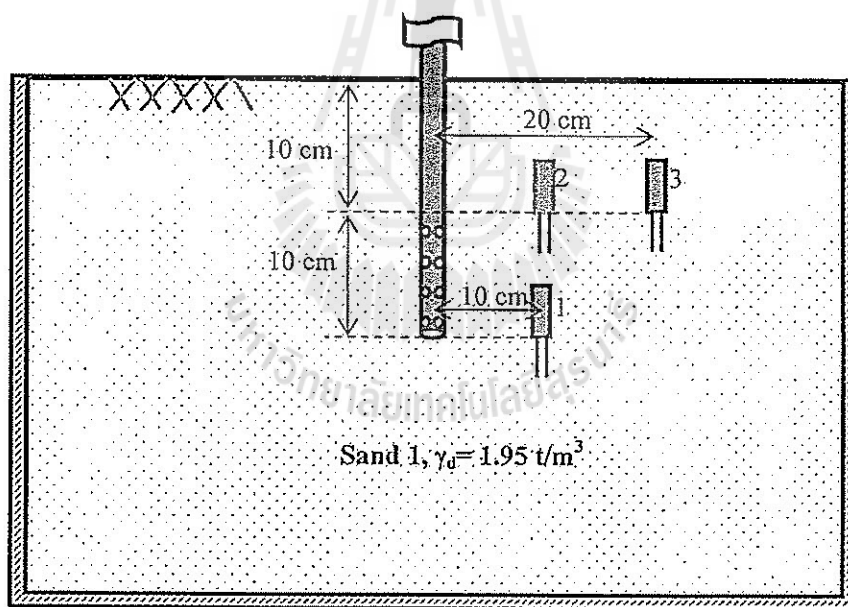
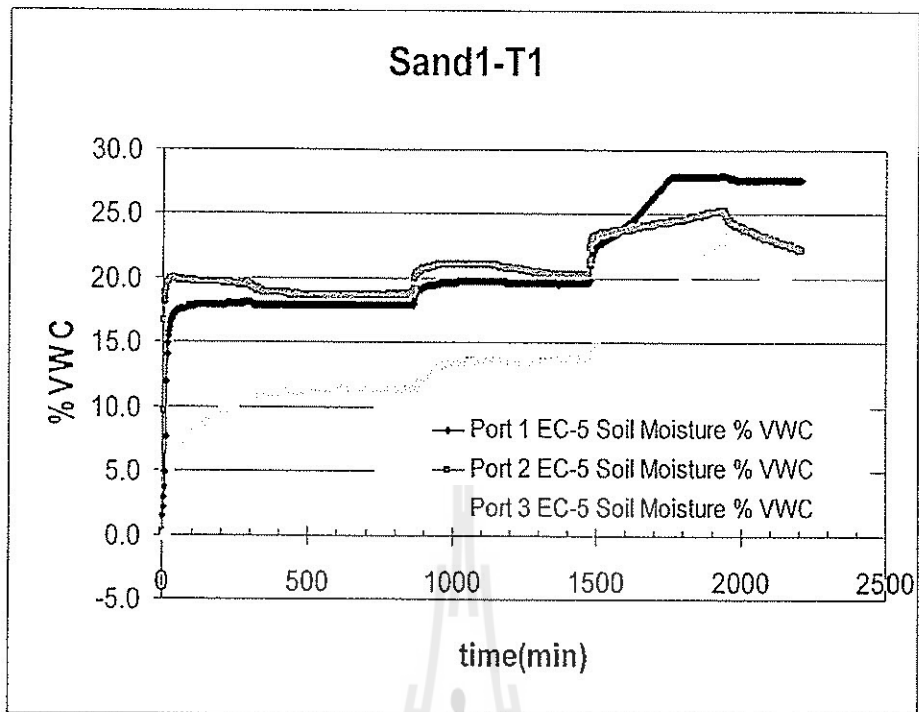
3.3 ผลการทดสอบการไหลเข้าแบบไม่คงตัว

รูปที่ 3.7 ถึง 3.9 แสดงภาพร่างการทดสอบ ตำแหน่งที่วางหัววัดความชื้น ระดับการยกของถังน้ำ ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในดินที่บันทึกได้จากหัววัดความชื้นแต่ละตัว และปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละช่วงการทดสอบของตัวอย่างดินชนิดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

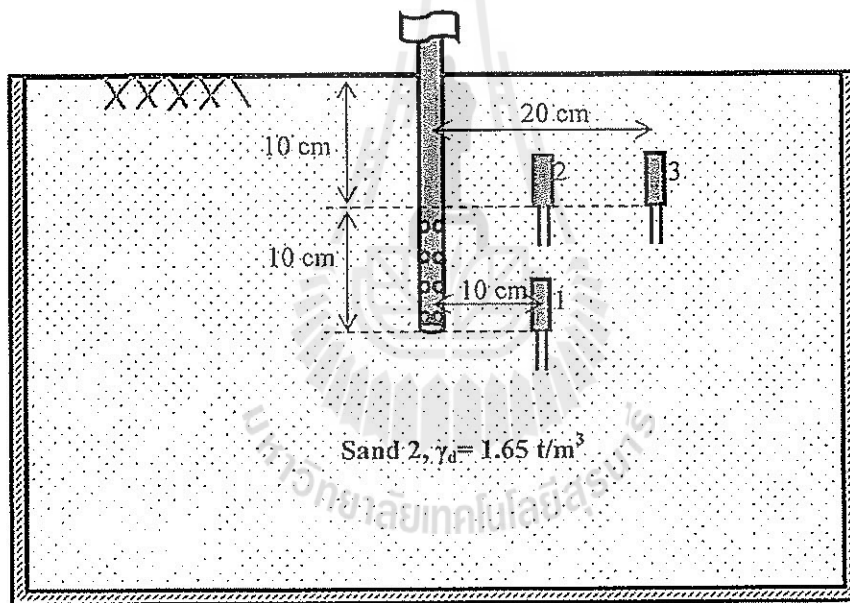
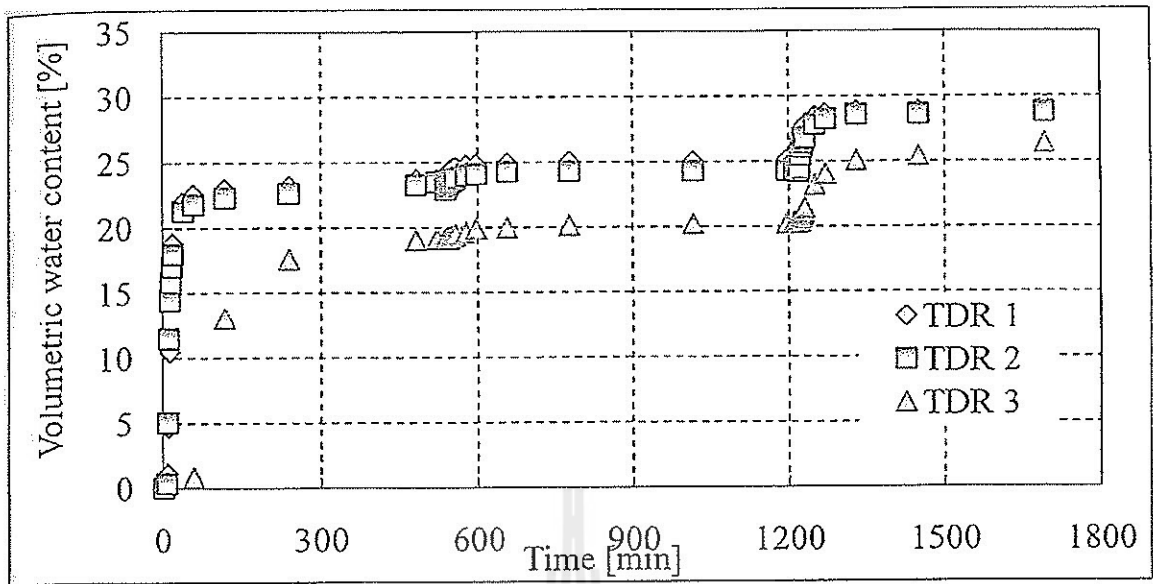
เมื่อดูการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดแต่ละตำแหน่ง พบว่าที่ระยะตามแนวรัศมีห่างจากตำแหน่งที่ปล่อยน้ำเข้าสู่ตัวอย่างดินเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่เวลาต่างๆจะมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าความลึกจะต่างกัน มีเพียงช่วงแรกๆของการทดสอบเท่านั้นที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่หัววัดที่อยู่สูงกว่าปลายท่อจะมีการเพิ่มความชื้นได้ช้ากว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกการพัฒนาของหน้าตัดเปียก (Wetting front) จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมในระยะแรก และเริ่มเปลี่ยนเป็นรูปทรงรีมากขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งรูปร่างการพัฒนาของหน้าตัดเปียกจะเป็นรูปทรงกระบอก เหมือนกับรูปร่างของปลายท่อที่ใช้ปล่อยน้ำ จึงคาดเดาได้ว่ารูปร่างของหน้าตัดเปียกจะขึ้นกับรูปทรงของแหล่งกำเนิด ในที่นี้คือรูปทรงของปลายท่อนั่นเอง

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินที่ตำแหน่งของหัววัดความชื้นแต่ละตัว พบว่าความชื้นในดินที่ตำแหน่งเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก เมื่อระดับถังอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร หรือระดับแรกของการทดสอบ และความชื้นเมื่อเพิ่มระดับความสูงของถังน้ำขึ้นไปอีก จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแต่ละระดับ จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตามระดับความสูงของถังที่ยกขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความชื้น และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างดิน แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดความชื้นอยู่ใกล้เกินไป การเพิ่มระดับถังเพียงตำแหน่งแรก ก็ทำให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจนเกือบถึงระดับสูงสุด ดังนั้นผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.7 ถึง 3.9 จึงแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น เนื่องจากการเพิ่มระดับของถังน้ำเพียงสองระดับเท่านั้น

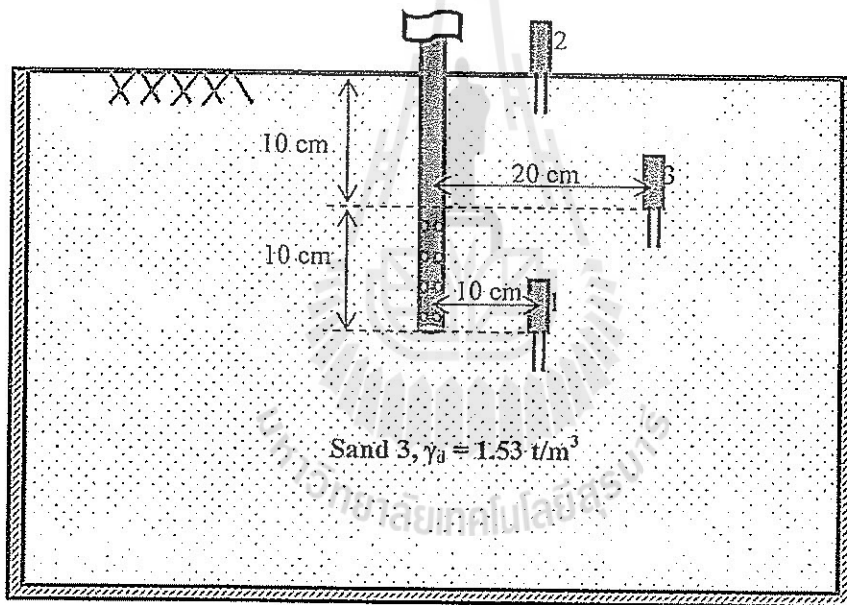
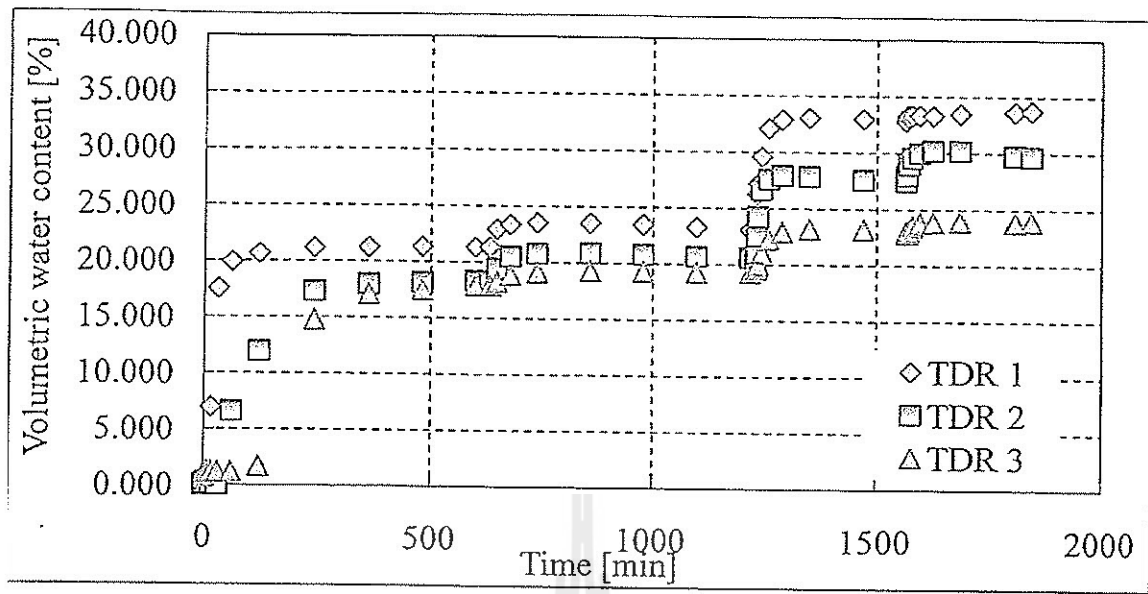
ทั้งนี้สำหรับผลการทดสอบในดินทรายชนิดที่ 1 ที่ระดับความดันสุดท้าย ความชื้นในดินที่ตรวจวัดได้มีค่าขึ้นลงไม่เป็นรูปแบบ เนื่องจากการทดสอบในดินชนิดที่ 1 ใช้แผ่นยางมารูอบถังซีเมนต์ทดสอบ เมื่อแผ่นยางขาดความชื้นในดินจึงตกลงทันที เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการทดสอบในดินชนิดที่ 2 และ 3 คณะผู้วิจัยจึงใช้ยางมะตอยมาทาบอบผนังด้านในของถังซีเมนต์แทน ดังที่ได้กล่าวถึงในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นจากผลการทดสอบการไหลเข้าของน้ำหลายระดับความดันของทราย 1



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงความชื้นจากผลการทดสอบการไหลเข้าของน้ำหลายระดับความดันของทราย 2



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงความชื้นจากผลการทดสอบการไหลเข้าของน้ำหลายระดับความดันของทราย 3

บทที่ 4 การจำลองย้อนกลับ

4.1 แนวคิดการจำลองย้อนกลับ

ในการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะใช้สมการสมดุล และกฎของดาร์ซี รวมทั้งคุณสมบัติด้านการไหลของดิน ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำ และความชื้นในดิน หรือเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (SWCC) รวมทั้งค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของไหลในดินที่ความชื้นต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลของของไหล จะเป็นระดับความอิ่มตัวของของไหล ความดันของของไหล และฟลักซ์ของของไหล เป็นต้น การจำลองในลักษณะดังกล่าวเป็นการจำลองเพื่อหาคำตอบที่ต้องการ ซึ่งในการจำลองจะต้องทราบคุณสมบัติต่างๆ ทั้งคุณสมบัติของของไหล และคุณสมบัติด้านการไหลของดิน หรืออาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติเหล่านี้เป็นความต้องการพื้นฐานในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข

ในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข คุณสมบัติด้านการไหลของดิน จะสมมติว่าสามารถอธิบายได้ด้วยชุดของสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งต่อไปจะกล่าวถึงรวมๆ ในชื่อ สมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการไหล เช่น สมการของ van Genuchten ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำ กับความชื้นในดิน และ van Genuchten-Mualem ในการอธิบายความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ เป็นต้น ซึ่งสมการเหล่านี้ต้องการพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่ถูกต้องสำหรับดินชนิดหนึ่งๆ เพื่อให้การจำลองการไหลในดินเป็นไปอย่างถูกต้อง

การหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลของดินในห้องปฏิบัติการ เมื่อหาคุณสมบัติด้านไหลของดินได้แล้ว จึงค่อยหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสม โดยการฟิตสมการกับผลการทดสอบ การกระทำดังกล่าวเป็นการหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง โดยวิธีตรง

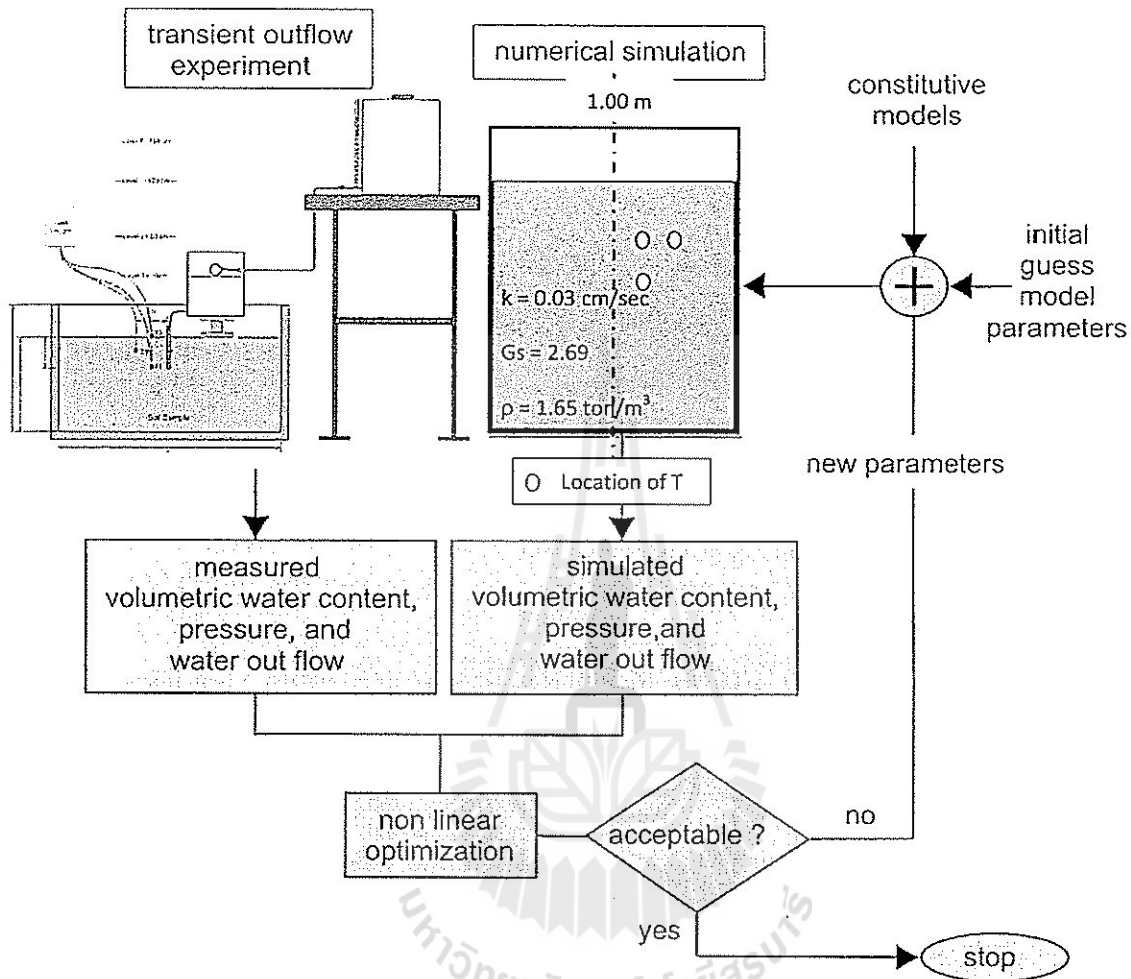
อย่างไรก็ตามการกระทำดังกล่าว จะใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างมาก นอกจากนี้การทดสอบเพื่อหา คุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน ก็กับการทดสอบเพื่อหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ ไม่สามารถกระทำพร้อมกันได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่นกว่า คือการทดสอบการไหลแบบแปรปรวน (transient flow) โดยระหว่างทดสอบจะมีการวัด ระดับความอิ่มตัวของของไหล ความดันของของไหล และฟลักซ์ของของไหล โดยทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ แล้วนำไปเทียบกับผลการจำลองการไหลเชิงตัวเลข ในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข จะเริ่มต้น โดยการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองขึ้นมาชุดหนึ่ง หลังจากนั้นให้แบบจำลองเชิงตัวเลขคำนวณ ระดับความอิ่มตัวของของไหล ความดันของของไหล และ ฟลักซ์ของของไหล ที่บันทึกระหว่างการทดสอบ แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่บันทึกไว้ และผลการจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข หากความแตกต่างมีค่ามากเกินไปจนจุดที่ยอมรับได้ พารามิเตอร์สำหรับ

แบบจำลองจะถูกกำหนดเข้าไปใหม่ เมื่อแบบจำลองเชิงตัวเลขได้ผลการคำนวณมา ก็จะนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลทดสอบอีกครั้ง โดยจะทำการเปลี่ยนชุดของพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนพบว่าความแตกต่างระหว่างผลทดสอบที่บันทึกไว้ กับผลการจำลองเชิงตัวเลข มีค่าใกล้เคียงกัน ขั้นตอนที่กำลังกล่าวถึงข้างต้นจะกระทำต่อเนื่องซ้ำๆ จนกระทั่ง การเปลี่ยนขนาดของพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง หรือการเปลี่ยนขนาดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) มีค่าน้อยกว่าที่กำหนด เทคนิคดังกล่าวเรียกว่าเทคนิคการจำลองแบบย้อนกลับ (Inverse modeling)

รูปที่ 4.1 แสดงสรุปการจำลองย้อนกลับที่ใช้ในรายงานวิจัยนี้ การไหลแบบแปรปรวน (Transient flow) ที่ใช้ในรายงานวิจัยนี้ เป็นการไหลแบบแปรปรวนหลายลำดับ (Multi step transient flow) รายละเอียดการทดสอบการไหลแบบแปรปรวนหลายลำดับ และผลทดสอบการไหลแบบแปรปรวน กล่าวถึงในบทที่ 3 ผลการทดสอบการไหลแบบแปรปรวนแบบหลายลำดับ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินกับ เวลา ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการทดสอบแต่ละลำดับ จะถูกนำมาใช้ในการจำลองแบบย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติการต้าน ไหลของดินที่นำมาใช้ทดสอบ ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากระดับของอุณหภูมิต่ำ และความดันของก๊าซขณะทดสอบมีค่าไม่สูง จึงสามารถวัดปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำได้ ดังนั้นความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric water content) สามารถคำนวณได้โดยตรงจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of liquid saturation)

ข้อดีของการใช้แบบจำลองย้อนกลับในการหาคุณสมบัติด้านการไหลของดิน คือความง่ายในการทดสอบ ความเป็นอิสระในการเลือกลักษณะของขอบเขต (Boundary conditions) นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำ และความชื้นในดิน และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของไหลในดินที่ความชื้นต่างๆ สามารถหาได้พร้อมๆ กัน ผ่านการทดสอบเพียงครั้งเดียว โดยสรุปการจำลองย้อนกลับสามารถหาคำตอบได้หากประกอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

- สามารถหาคำตอบได้
- มีความเป็นเอกภาพ กล่าวคือคำตอบที่แท้จริงมีเพียงคำตอบเดียว
- มีเสถียรภาพ กล่าวคือคำตอบที่ได้ต้องไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 4.1 Flow chart เทคนิคการจำลองย้อนกลับ

4.2 แบบจำลองย้อนกลับ

การจำลองย้อนกลับในปัญหาการไหลของของไหล คือการประมาณชุดของพารามิเตอร์ b จากข้อมูลที่วัดจากการทดสอบ (ได้แก่ ความดันของของไหล ฟลักซ์ของของไหล และ ความอิ่มตัวของของไหล เป็นต้น) จำนวน ND ข้อมูล และจากข้อมูลอิสระของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ จำนวน NPR ข้อมูล เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $O(b)$ มีค่าน้อยที่สุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $O(b)$ คือการวัดความใกล้เคียงระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$O(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{ND} W_i (y_i - y'_i(\mathbf{b}))^2 + \sum_{p=1}^{NPR} W_p (P_p - P'_p(\mathbf{b}))^2 \quad (4.1)$$

- $O(\mathbf{b})$ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ [1]
 \mathbf{b} เวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่าจำนวน NP พารามิเตอร์ [1]
 NP จำนวนของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ [-]
 ND จำนวนของข้อมูลจากการวัดหรือจากการทดสอบ [-]
 y_i ข้อมูลจากการทดสอบหรือจากการวัดที่ i^{th} [1]
 y'_i ค่าจากการจำลองเชิงตัวเลขที่สอดคล้องกับค่าจากการวัดที่ i^{th} [1]
 W_i น้ำหนักของการวัดที่ i^{th} [-]
 NPR จำนวนของข้อมูลเบื้องต้น [-]
 P_p ข้อมูลเบื้องต้นที่ p^{th} ที่จะถูกรวมในการลดถอย [1]
 P'_p ค่าที่ p^{th} จากการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเบื้องต้นที่ p^{th} [1]
 W_p น้ำหนักของข้อมูลเบื้องต้นที่ p^{th} [-]

เทอม $(y_i - y'_i(\mathbf{b}))$ and $(P_p - P'_p(\mathbf{b}))$ คือค่าคงค้าง (residual) ส่วนเทอม $(W_i)^{0.5}(y_i - y'_i(\mathbf{b}))$ และ $(W_p)^{0.5}(P_p - P'_p(\mathbf{b}))$ คือค่าคงค้างหลังการถ่วงแล้ว ซึ่งการให้น้ำหนักถ่วงเพื่อ

- ลดอิทธิพลของการวัดที่มีความถูกต้องต่ำ และเพิ่มอิทธิพลของการวัดที่มีความถูกต้องสูง
- ในกรณีที่มีการวัดค่ามากกว่า 2 ประเภท การถ่วงน้ำหนักจะทำให้ค่าการวัดทุกประเภทถูกถ่วงให้มีหน่วยที่เท่ากัน ทำให้ไม่เกิดความลำเอียงในการหาผลรวมของค่าคงค้าง

รายละเอียดในการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก Hill (1998) สำหรับรายงานวิจัยนี้ไม่ได้รวมข้อมูลเบื้องต้นลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนั้นสมการที่ 4.1 สามารถเขียนใหม่สำหรับรายงานวิจัยนี้ดังนี้

$$O(\mathbf{b}) = (\mathbf{y} - \mathbf{y}'(\mathbf{b}))^T \mathbf{W}(\mathbf{y} - \mathbf{y}'(\mathbf{b})) = \mathbf{e}^T \mathbf{W} \mathbf{e} \quad (4.2)$$

- \mathbf{y} เวกเตอร์ของการวัด [1]
 \mathbf{y}' เวกเตอร์ของค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข [1]
 \mathbf{W} เมตริกค่าถ่วงน้ำหนัก [-]
 \mathbf{e} เวกเตอร์ค่าคงค้าง [1]

หากให้เวกเตอร์ $y'(b) = Xb$ เมื่อ X เป็นเมตริกความไว (Jacobian) มีขนาดเท่ากับ $ND \times NP$ จะได้ว่าองค์ประกอบของเมตริกความไวสามารถแสดงได้ดังนี้

$$X_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial b_j} \quad i = 1, \dots, ND \quad j = 1, \dots, NP \quad (4.3)$$

และเมื่อแทนสมการที่ 4.3 ลงในสมการที่ 4.2 แล้วให้อนุพันธ์ของสมการที่ 4.2 เทียบกับพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง เท่ากับศูนย์จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial O(b)}{\partial b} &= (-X)^T (W)(y - Xb) + (y - Xb)^T (W)(-X) = 0 \\ 2\{X^T W X b - X^T W y\} &= 0 \\ b &= \frac{X^T W y}{X^T W X} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ในปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) เทคนิคการหาค่าสมการแบบวนลูบจะถูกนำมาใช้ โดยแทนเวกเตอร์ y ด้วยเวกเตอร์คงค่า $[y - y'(b_r)]$ และให้เวกเตอร์ d_r เป็นการอัปเดตพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$d_r = \frac{(X_r)^T (W)(y - y'(b_r))}{(X_r)^T (W)(X_r)} \quad (4.5)$$

ในบางกรณีที่การวนลูบไม่สามารถลดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ วิธีออปติไมซ์แบบ Marquardt-Levenberg จะถูกนำมาใช้ โดยการแทนที่ $X^T W X$ ในสมการ 4.4 ด้วย $X^T W X + I m_r$ ทำให้ได้สมการที่ 4.6

$$d_r = \frac{X_r^T W (y - y'(b_r))}{(X_r^T W X_r + I m_r)} \quad (4.6)$$

- r จำนวนลูบขณะทำการประมาณพารามิเตอร์ [-]
- X_r เมตริกความไวของเวกเตอร์ b_r ซึ่งองค์ประกอบของเมตริกคือ $\partial y_i / \partial b_j$ [1]
- d_r เวกเตอร์อัปเดตพารามิเตอร์สำหรับการวนลูบรอบต่อไป [1]
- I เวกเตอร์หนึ่งหน่วยขนาด $NP \times NP$ [-]
- m_r Marquardt พารามิเตอร์ [-]

4.3 ซอฟต์แวร์ UCODE

UCODE (Poeter and Hill, 1998) เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองย้อนกลับที่ถูกออกแบบมาให้ใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขทุกประเภท เนื่องจาก UCODE ไม่ได้ฝังตัวอยู่ในซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขอื่นๆ การติดต่อกันระหว่าง UCODE และซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขจะกระทำผ่าน text หรือ ASCII ไฟล์เท่านั้น ดังนั้นเงื่อนไขเพียงอย่างเดียวสำหรับซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขที่จะใช้กับ UCODE ได้ คือจะต้องอ่านไฟล์นำเข้า และแสดงผลลัพธ์เป็น text หรือ ASCII ไฟล์ เท่านั้น

UCODE จะทำหน้าที่ในการจัดกระทำกับไฟล์นำเข้า และไฟล์ผลลัพธ์ กล่าวคือ UCODE จะทำหน้าที่ควบคุมซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขด้วยเซตของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่า เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัด กับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลข จัดกระทำการลดรอยแบบไม่เชิงเส้น และให้ข้อมูลทางสถิติเพื่อประเมินความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ประมาณได้

รูปที่ 4.2 แสดง flowchart การคำนวณของ UCODE แต่ละรูปการคำนวณ พารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณจะถูกเปลี่ยน โดยการเปลี่ยนขนาดของพารามิเตอร์ในรายงานวิจัยนี้กำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ ความไวของผลการคำนวณต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์สามารถทราบได้หลังจากพารามิเตอร์ทุกตัวถูกเปลี่ยน ในขณะที่เดียวกันความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดซึ่งถ่วงน้ำหนักแล้ว และค่าจากการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งถ่วงน้ำหนักแล้ว หรือค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนัก ความไว และค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนักนี้ จะถูกนำไปใช้ในการอัปเดตพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง ในรูปต่อไป ซึ่ง UCODE จะทำการประมาณพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองโดยขั้นตอนดังกล่าว จนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขการลู่เข้าซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้งาน

ใน UCODE จะใช้ Marquardt-Levenberg ในการลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สมการทั่วไปสำหรับการอ็อปติไมซ์แสดงดังสมการที่ 4.7

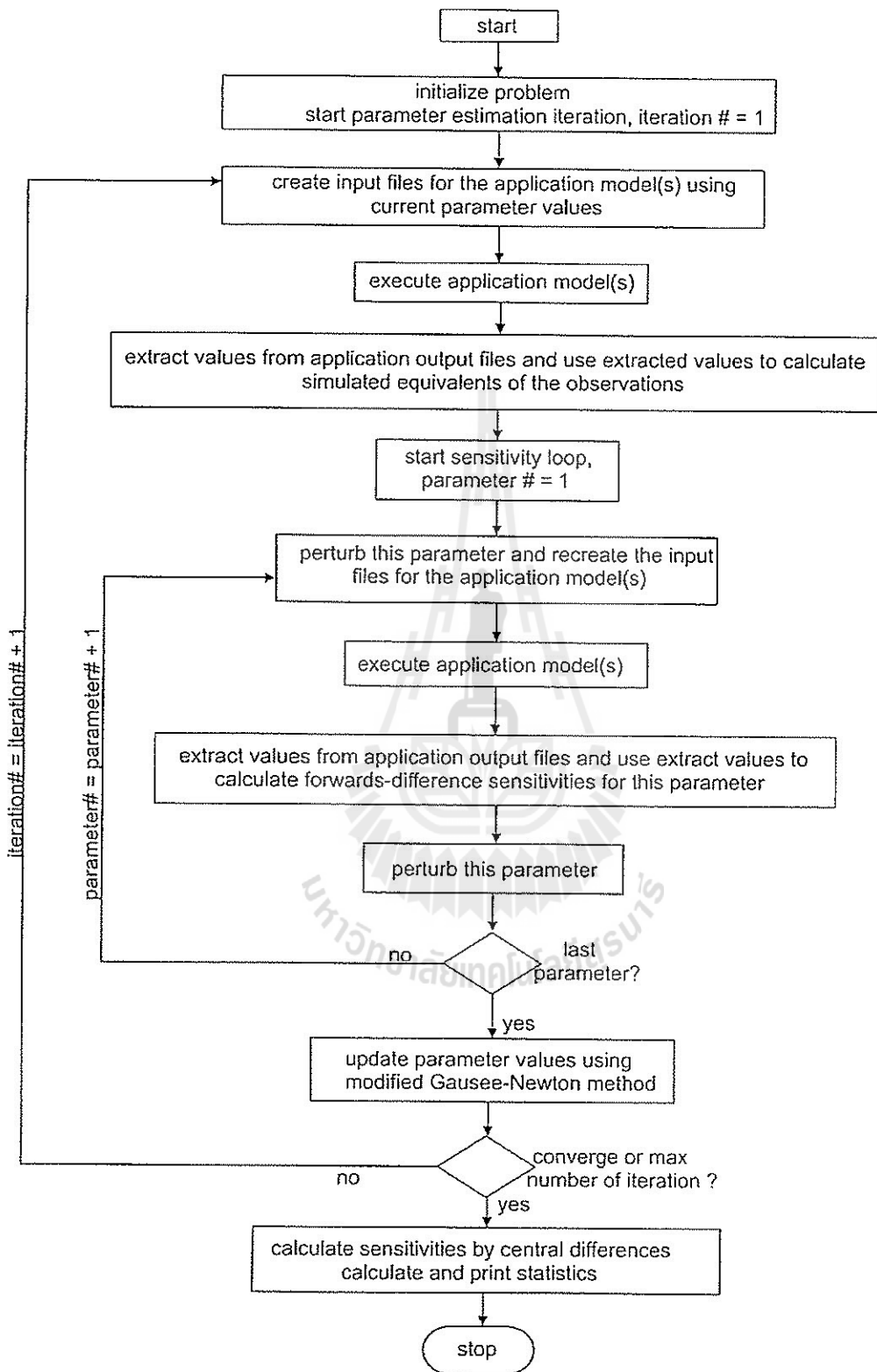
$$Cd_r = \frac{C^T X_r^T W (y - y'(b_r))}{(C^T X_r^T W X_r C + Im_r)} \quad (4.7a)$$

$$b_{r+1} = \varpi_r d_r + b_r \quad (4.7b)$$

C เกลอเมตริกซึ่ง c_{jj} มีค่าเท่ากับ $(X^T W X)^{-1/2}$ [-]

ϖ_r damping พารามิเตอร์ [-]

m_r Marquardt พารามิเตอร์ [-]



รูปที่ 4.2 Flow chart การคำนวณใน UCODE (after Poeter and Hill, 1998)

พารามิเตอร์ Marquardt พารามิเตอร์ถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดกระทำการถดถอย เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่มีแนวโน้มจะลดลงระหว่างการกระทำการถดถอย โดย Marquardt พารามิเตอร์จะเพิ่มขึ้นดังสมการ $m_r^{new} = 1.45m_r^{old} + 0.001$ จนกระทั่งพบว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เริ่มลดลง ส่วน damping พารามิเตอร์จะถูกใช้เมื่อต้องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่ทำการประมาณให้มีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดโดยผู้ใช้ และเมื่อการอัปเดตพารามิเตอร์มีทิศทางตรงกันข้าม

4.4 อัลกอริทึมสำหรับเชื่อม TOUGH2 และ UCODE

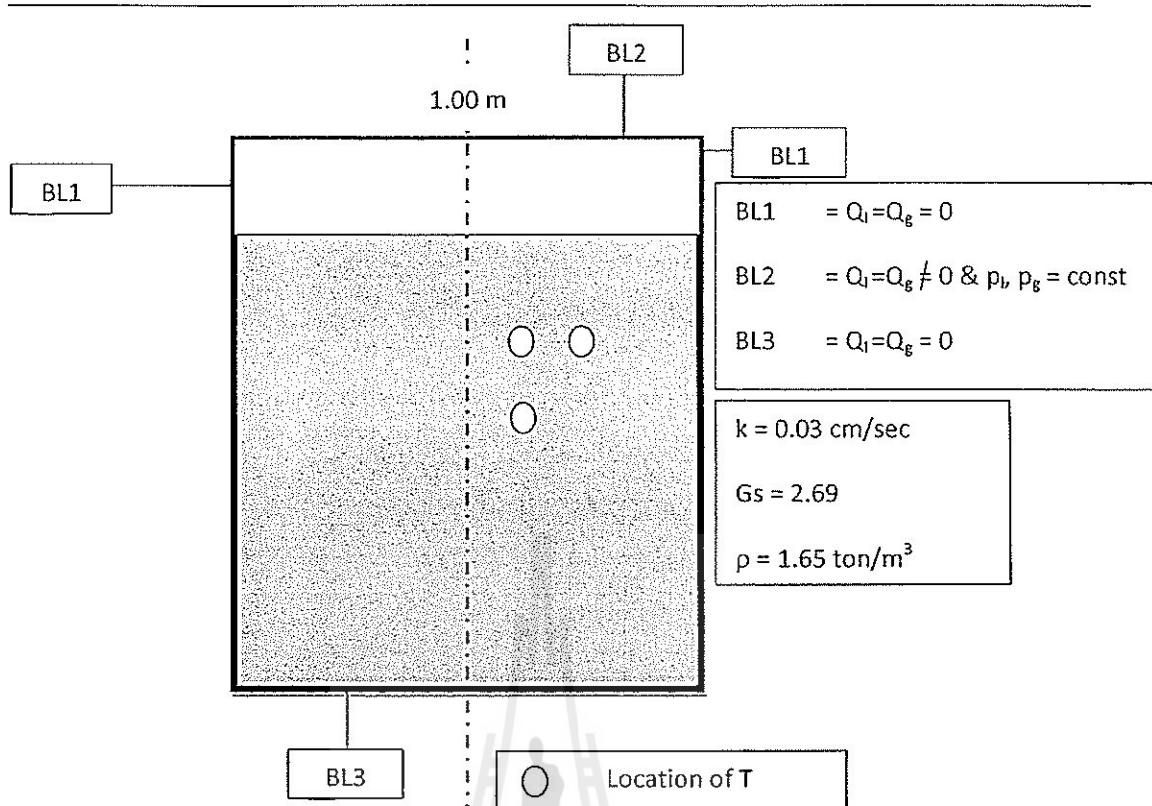
การทดสอบในรายงานวิจัยนี้ต้องการไฟล์ข้อมูลเจ็ดประเภทประกอบด้วย 1) ไฟล์ universal input 2) ไฟล์ extracted 3) ไฟล์ preparation input 4) ไฟล์ template 5) ไฟล์ TOUGH2 input 6) ไฟล์ TOUGH2 output และ 7) ไฟล์ข้อมูล ParMod เพื่อจะทำการจำลองย้อนกลับการทดสอบการไหลแบบหลายลำดับด้วย TOUGH2 และ UCODE

ไฟล์ universal input ประกอบด้วยตัวแปรสำหรับควบคุมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น คำสั่งในการควบคุม TOUGH2 รวมทั้งค่าที่ได้จากการวัด และความไม่แน่นอนของค่าจากการวัด ส่วน ไฟล์ extracted จะประกอบด้วยข้อมูลที่ทำให้ทราบว่าสามารถอ่านค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขที่ต้องการได้จากส่วนใดในไฟล์ TOUGH2 output

ไฟล์ preparation จะให้ข้อมูลได้แก่ ชื่อของไฟล์ template และชื่อของไฟล์ TOUGH2 input นอกจากนี้ยังให้ข้อมูลสำหรับพารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณ ได้แก่ ชื่อของพารามิเตอร์ ช่วงค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ขนาดการเปลี่ยนพารามิเตอร์

ไฟล์ template คือ ไฟล์ TOUGH2 input ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณจะถูกแทนที่ด้วยชื่อของพารามิเตอร์ซึ่งถูกจำกัดด้วยเครื่องหมายพิเศษ ในการจำลองย้อนกลับ UCODE จะอ่านไฟล์ template และไฟล์ preparation เพื่อจัดกระทำกับไฟล์ TOUGH2 input โดยการแทนชื่อพารามิเตอร์ด้วยค่าของอัปเดตพารามิเตอร์

สำหรับบทนี้ข้อมูลจากการทดสอบการไหลแบบหลายลำดับซึ่งกล่าวถึงในบทที่ 3 จะถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติด้านการไหลของดินที่ใช้ทดสอบในบทที่ 3 โดยการจำลองการไหลเชิงตัวเลขจะกระทำโดยซอฟต์แวร์ TOUGH2 รูปที่ 4.3 แสดงภาพร่างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบหลายขั้นในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยขอบเขตด้านข้างและด้านล่างเป็นขอบเขตที่บ้น้ำ ส่วนขอบเขตด้านบนเป็นขอบเขตแบบคงเงื่อนไขทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ความดันอุณหภูมิ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นต้น ส่วนสภาวะเริ่มต้นได้จากค่าที่วัดได้จริงในห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มทำการทดสอบ



รูปที่ 4.3 แบบจำลองเชิงตัวเลขใน TOUGH2 สำหรับหับจำลองการไหลในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากการทดสอบเป็นการเพิ่มความดันน้ำแบบหลายระดับ โดยหลังจากเพิ่มความดันน้ำที่ระดับแรกทิ้งไว้ระยะหนึ่งแล้ว จะทำการเพิ่มความดันน้ำลงไปทีละระดับความดันถัดไป ดังนั้นในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข จะต้องจำลองแบบต่อเนื่องเป็นลำดับๆ โดยในการจำลองเชิงตัวเลขของความดันระดับที่ 1 จะเริ่มด้วยสถานะเริ่มต้น (initial conditions) ที่ทราบค่าจากการวัดในห้องปฏิบัติการก่อนการทดสอบการไหล สำหรับการจำลองในขั้นถัดไปจะใช้สถานะเริ่มต้นของการจำลองขั้นถัดไปจากสถานะสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการจำลองก่อนหน้า ดังนั้นตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ความดันของก๊าซ ระดับความอิ่มตัวของก๊าซ และอุณหภูมิ เมื่อสิ้นสุดการจำลองเชิงตัวเลขก่อนหน้าจะต้องถูกอ่านและนำมาใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขในลำดับถัดไป ขั้นตอนข้างต้นจะถูกระทำซ้ำๆ จนกระทั่งการจำลองเชิงตัวเลขครบทุกระดับความดันที่ทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การกระทำดังกล่าวตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์จากผลการจำลองเชิงตัวเลขก่อนหน้าจะต้องถูกอ่าน เพื่อนำมากำหนดเป็นสถานะเริ่มต้นของการจำลองถัดไป ซึ่งการให้ TOUGH2-UCODE กระทำในลักษณะดังกล่าวได้ ผู้วิจัยได้เขียน code สำหรับอ่านค่าตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ แล้วนำไปเก็บในไฟล์ template ที่จะใช้สำหรับจัดการการจำลองเชิงตัวเลขในลำดับถัดไป โดย code ที่พัฒนาขึ้นจะอ่านสามไฟล์ได้แก่ ไฟล์ ParMod ไฟล์ SAVE และไฟล์ TOUGH2 input เพื่อที่จะสร้างไฟล์ template ขึ้นมาใหม่

TITLE												
ROCKS												
MAT	NAD	DROK		PER(1)	PER(2)	PER(3)	CWET	SPHT				
COM		EXPAN	CDRY	TORTX	GK	XKD3	XKD4					
IRP		RP(1)	RP(2)	RP(3)	RP(4)	RP(5)	RP(6)	RP(7)				
ICP		CP(1)	CP(2)	CP(3)	CP(4)	CP(5)	CP(6)	CP(7)				
MULTI ^(optional)												
NK	NEQ	NPH	NB	NKIN								
START ^(optional)												
MOP:123456789012345678901234												
PARAM												
MAT	MCYC	MSEC	MCYPR	MOP(I), I=1,2,4		TEXP	BE					
KDATA	TSTRAT	TIMAX	DELTEN or NDLT	DELTMX	ELST	GF	REDLT	SCALE				
	DLT(1)	DLT(2)	DLT(3)	DLT(4)								
						DLT(M)	(M≤8*NDLT)					
	RE1	RE2	U	WUP	WNR	DFAC						
	DEP(1)		DEP(2)		DEP(3)		DEP(4)					
SOLVR ^(optional)												
MATSLV		RITMAX	CLOSUR									
ZEROCS	ORROCS											
ELEM												
EL	NE	NSEQ	NADD	MA1	MA2	VOLX	AHTX	PMX	X	Y	Z	
CONNE												
EI1	NE	EI2	NE	NSEQ	NAD1	NAD2	ISOT	D1	D2	AREAX	BETAX	SIGX
INCON												
EL	NE	NSEQ	NADD	PORX								
		X1		X2		X3		X4				
EL	NE	NSEQ	NADD	PORX								
		X1		X2		X3		X4				
EL	NE	NSEQ	NADD	PORX								
		X1		X2		X3		X4				
EL	NE	NSEQ	NADD	PORX								
		X1		X2		X3		X4				
ENDCY												

1st part 2nd part 3rd part

รูปที่ 4.4 โครงสร้างของไฟล์ TOUGH2 input และไฟล์ template

- ไฟล์ข้อมูลชื่อ ParMod ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ทางธรณีอุทกของวัสดุที่จะศึกษา ชื่อสมการคอนสทิทิวทีฟที่จะใช้ และชื่อของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ
- ไฟล์ข้อมูลชื่อ SAVE ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรสถานะที่จุดสิ้นสุดการจำลองเชิงตัวเลข แต่ละขั้นของความคืบหน้า
- ไฟล์ TOUGH2 input ของการจำลองก่อนหน้า

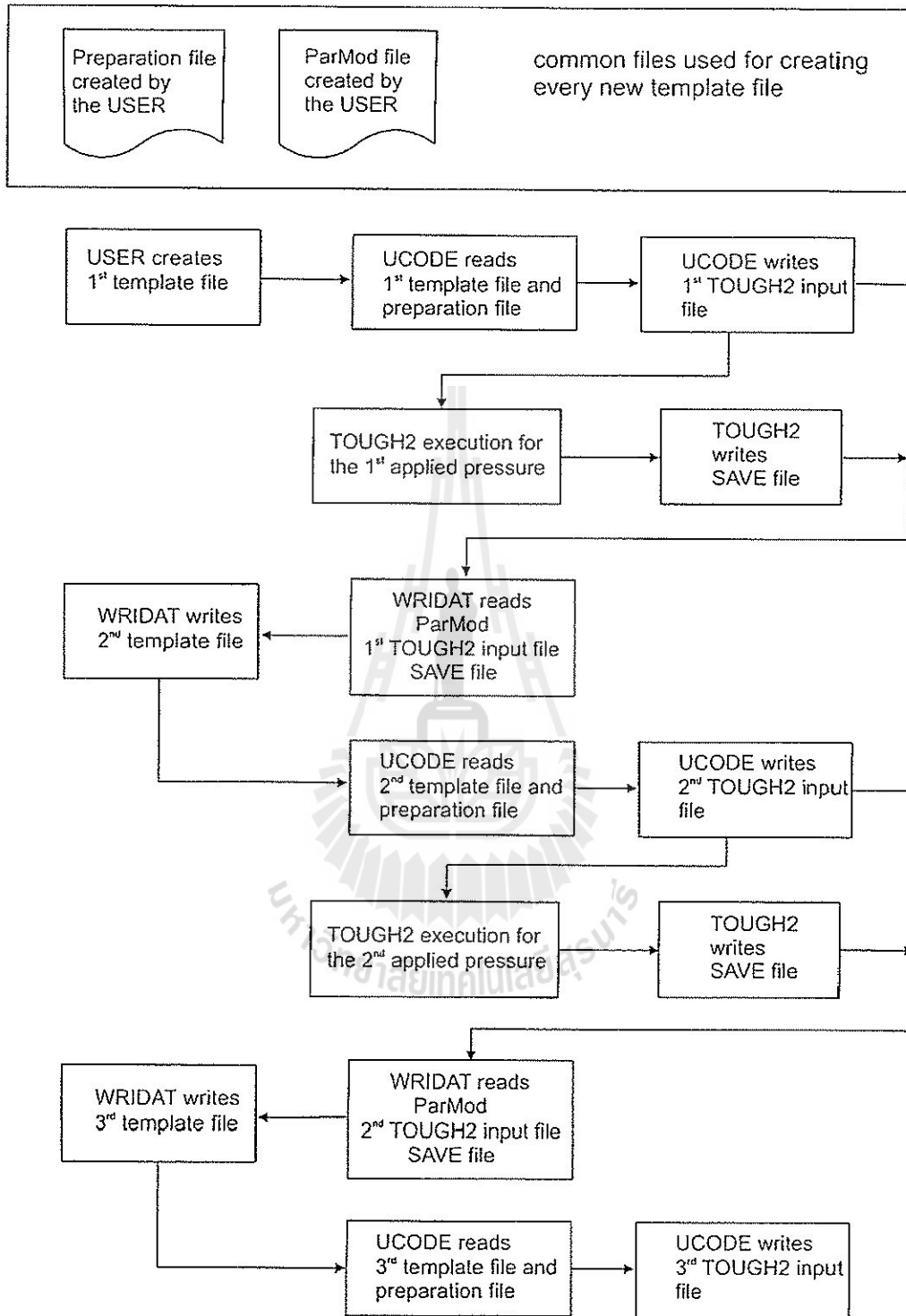
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบของไฟล์ TOUGH2 input เนื่องจากไฟล์ template ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นด้วยรูทีนย่อย WRIDAT มีรูปแบบเหมือนกับไฟล์ TOUGH2 input เพียงแค่ค่าของพารามิเตอร์ที่จะประมาณ จะถูกแทนด้วยชื่อของพารามิเตอร์เท่านั้น ดังนั้นรูปที่ 4.4 จึงแสดงรูปแบบของไฟล์ template ด้วย

ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 ไฟล์ template จะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกจะเป็นส่วนของพารามิเตอร์ทางธรณีอุทกของวัสดุที่ต้องการหา ส่วนที่สาม จะเป็นส่วนที่ระบุตัวแปรสถานะทางอุณหพลศาสตร์ ขณะเริ่มต้นการจำลองเชิงตัวเลข ส่วนที่สองคือส่วนที่เหลือ ซึ่งจะเหมือนกันทุกประการกับไฟล์ TOUGH2 input ดังนั้นเมื่อรูทีนย่อย WRIDAT อ่านไฟล์ ParMod ไฟล์ SAVE และไฟล์ TOUGH2 input จะสามารถเขียนไฟล์ template ได้อย่างสมบูรณ์

หลังจากที่ไฟล์ template ใหม่ถูกสร้างขึ้นแล้ว UCODE จะอ่านไฟล์ template ใหม่ที่สร้างขึ้นพร้อมกับอ่านไฟล์ไฟล์ preparation เพื่อจะทำการสร้างไฟล์ TOUGH2 input ใหม่ ซึ่งไฟล์ TOUGH2 input ใหม่จะถูกนำไปใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขใน TOUGH2 รูปที่ 4.5 แสดง Flowchart ของไฟล์ที่ถูกใช้ใน TOUGH2-UCODE เพื่อที่จะสร้างไฟล์ TOUGH2 input ใหม่ สำหรับการจำลองในลำดับถัดไป โดยในขั้นต้นผู้ใช้จะต้องสร้างไฟล์ template สำหรับระดับความดันน้ำขั้นแรกก่อน (1st template file) รวมทั้งต้องสร้างไฟล์ preparation และไฟล์ ParMod ด้วย

ในการจำลองเชิงตัวเลข UCODE จะอ่านไฟล์ template ที่หนึ่ง และไฟล์ preparation เพื่อที่จะนำไปสร้างไฟล์ TOUGH2 input สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันแรก ซึ่งไฟล์ TOUGH2 input และเมื่อสิ้นสุดการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันแรก TOUGH2 จะสร้างไฟล์ SAVE ขึ้นมา จากนั้นไฟล์ template ใหม่สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันในขั้นถัดไป

การเขียนไฟล์ template ใหม่ที่กล่าวถึงในย่อหน้าที่แล้วจะกระทำโดยรูทีนย่อย WRIDAT โดยการรวบรวมข้อมูลจากไฟล์ สามประเภท ได้แก่ไฟล์ ParMod ไฟล์ SAVE และไฟล์ TOUGH2 input โดยไฟล์ TOUGH2 input นั้นจะเป็นไฟล์ของการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันขั้นแรก เมื่อ WRIDAT อ่านข้อมูลจากไฟล์ทั้งสามแล้วจะทำการเขียนไฟล์ template สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันขั้นที่สอง เมื่อการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันขั้นที่ 2 สำเร็จลง กระบวนการเดียวกันจะถูกทำซ้ำ เพื่อสร้างไฟล์ template สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันถัดไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะถูกทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนการจำลองเชิงตัวเลขครบทุกระดับตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.5 Flowchart ของไฟล์ที่ใช้ใน TOUGH2-UCODE เพื่อการจำลองข้อยกกลับแบบหลายระดับ

ความคืบหน้า

4.5 สมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการไหล และพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการ

สมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการไหลมีอยู่หลายสมการ อย่างไรก็ตามในรายงานวิจัยนี้จะใช้สมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการไหลที่เสนอโดย van Genuchten (1980) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำ และความชื้นในดิน และ van Genuchten-Mualem (1976) สำหรับความซึมผ่านได้สัมพันธ์ที่ระดับความอิ่มตัวของของไหลระดับต่างๆ ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับความนิยมใช้อย่างกว้างขวาง และจัดรูปสมการที่ 2.9 และเพื่อลดข้อของรูปสมการจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง m และ n ดังสมการที่ 2.29 จะได้สมการของ van Genuchten (1980) ดังนี้

$$\begin{aligned} p_c &= p_o ((S_e)^{-n/n-1} - 1)^{1/n} & S_e > 0 \\ p_c &= p_{max} & S_e \leq 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

และจัดรูปสมการที่ 2.25 และ 2.26 ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ n จะได้

$$k_r = (S_e)^n [1 + (1 - (S_e)^{n/n-1})^{1-1/n}]^2 \quad (4.9)$$

$$k_{rg} = (1 - S_e)^n [1 - (S_e)^{n/n-1}]^{2(1-1/n)} \quad (4.10)$$

เนื่องจากสมการที่ 4.8 ถึงสมการที่ 4.10 ไม่ได้เป็นสมการสำเร็จที่ใช้ใน TOUGH2 ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องเพิ่มสมการดังกล่าวลงไปใน code ของ TOUGH2 (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 แสดงสรุปพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองในสมการคอนสทิทิวทีฟ เครื่องหมายจุดในตาราง (*) แสดงถึงพารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณด้วยแบบจำลองย้อนกลับ TOUGH2-UCODE สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้เนื้อแท้ (intrinsic permeability) $K = 7.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ หาได้จากการทดสอบความซึมผ่านได้ของดินที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ค่าระดับอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุด $S_{e, \infty} = 0.98$ เป็นค่าที่ได้จากการวัดในระหว่างการทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ และให้ค่าแรงดึงน้ำสูงสุด $p_{max} = 1.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่นิยมใช้สำหรับกำหนดแรงดึงน้ำสูงสุด

การใช้พารามิเตอร์ K เป็นค่าคงที่ดังตารางที่ 4.1 เป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งที่ทำให้การจำลองย้อนกลับสามารถหาคำตอบได้ แม้จะมีงานวิจัยหลายๆงานวิจัย ที่ใช้พารามิเตอร์ K เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณก็ตาม อย่างไรก็ตาม Nützmann et al. (1998) ซึ่งทำการจำลองย้อนกลับหลายๆแบบ และพบว่า การจำลองย้อนกลับโดยใช้พารามิเตอร์ K เป็นค่าคงที่จะช่วยเพิ่มความเป็นเอกภาพให้คำตอบได้ดีกว่า

ตารางที่ 4.1 สรุปพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในรายงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์		สมการคอนสทิทิวทีฟ van Genuchten & van Genuchten-Mualem
K	$[m^2]$	7.7×10^{-12}
N	$[-]$	\cdot
S_{lr}	$[-]$	\cdot
S_{ls}	$[-]$	0.98
l/p_o	$[N/m^2]^{-1}$	\cdot
p_{max}	$[N/m^2]$	1.0×10^7
l	$[-]$	\cdot

- พารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ

4.6 ผลการจำลองย้อนกลับ

เพื่อที่จะตรวจสอบผลการจำลองย้อนกลับด้วย TOUGH2-UCODE โดยใช้สมการ van Genuchten และ van Genuchten-Mualem มีตัวแปรทางสถิติหลายตัวที่สามารถใช้บ่งชี้ได้ นอกจากนี้การตรวจสอบผลการจำลองย้อนกลับด้วยพื้นผิวการตอบสนอง (response surface) ก็เป็นวิธีที่นิยมใช้ และให้การแปรความที่ตีวิธีหนึ่ง พื้นผิวการตอบสนองคือเส้นชั้นความสูงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ที่เป็นฟังก์ชันกับคู่ของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ

พิกัดที่แสดงค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนพื้นผิวการตอบสนองจะแสดงค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการประมาณพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง การวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ อาทิเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ ระดับความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ รวมทั้งการคาดการณ์ความยุ่งยากในระหว่างการจำลองย้อนกลับ

รูปที่ 4.6 แสดงพื้นผิวการตอบสนองที่แสดงในรูปสามมิติ โดยการแสดงจะจับคู่พารามิเตอร์ที่จะประมาณทั้ง 4 พารามิเตอร์ ซึ่งจับคู่ได้ทั้งหมด 6 คู่ ได้แก่ $n-S_r$, $n-l/p_o$, $n-l$, S_r-l/p_o , S_r-l , และ l/p_o-l . รูปที่ 4.6a แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ n และพารามิเตอร์ S_r จากรูปพบว่าค่า n ประมาณ 3.5 และ $S_r = 0$ จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด นอกจากนี้บริเวณที่จุดต่ำสุดลักษณะของพื้นผิวเป็นแอ่งวงรี ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตทิศทางของแอ่ง จะพบว่าที่ค่าพารามิเตอร์ห่างจากค่าตอบ แอ่งมีทิศทางการวางตัวขนานไปกับ

แกน n ซึ่งแสดงว่าพารามิเตอร์ n อาจจะไม่ลู่เข้าสู่ค่าตอบหากมีการกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ n เริ่มต้นห่างจากคำตอบมากเกินไป

รูปที่ 4.6b แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ n และพารามิเตอร์ $1/p_0$ จากรูปพบว่าค่า n ประมาณ 3.5 และ $1/p_0$ ประมาณ 1.5×10^{-4} [N/m²]⁻¹ จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด พื้นผิวการตอบสนองแสดงรูปร่างแอ่งกะทะวงรีแคบๆ เลยออกไปพบว่าแอ่งมีแนวยาวขนานไปกับแกนพารามิเตอร์ n ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ n มีความไวต่ำกว่าพารามิเตอร์ $1/p_0$ ดังนั้นความไม่แน่นอนของการประมาณพารามิเตอร์ n จะสูงกว่าของพารามิเตอร์ $1/p_0$ และพื้นผิวนี้แสดงให้เห็นอีกครั้งว่าพารามิเตอร์ n อาจจะไม่ลู่เข้าสู่ค่าตอบหากมีการกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ n เริ่มต้นห่างจากคำตอบมากเกินไป

รูปที่ 4.6c แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ n และพารามิเตอร์ z จากรูปพบว่าค่า n ประมาณ 3.5 และ z ประมาณ 2.5 จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด และพื้นผิวการตอบสนองแสดงรูปร่างแอ่งกะทะวงรี โดยวงรีมีขนาดใหญ่และมีรูปร่างชัดเจนกว่าสองรูปที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่ค่าพารามิเตอร์ห่างจากคำตอบ แอ่งมีทิศทางการวางตัวขนานไปกับแกน n ซึ่งแสดงว่าพารามิเตอร์ n มีความไวต่ำกว่าพารามิเตอร์ z ดังนั้นความไม่แน่นอนของการประมาณพารามิเตอร์ n จะสูงกว่าของพารามิเตอร์ z และพื้นผิวนี้แสดงให้เห็นอีกครั้งว่าพารามิเตอร์ n อาจจะไม่ลู่เข้าสู่ค่าตอบหากมีการกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ n เริ่มต้นห่างจากคำตอบมากเกินไป

รูปที่ 4.6d แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ $1/p_0$ และพารามิเตอร์ S_r ตำแหน่งที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่ชัดเจนนัก แต่สามารถประมาณจากรูปพบว่าค่า $1/p_0$ ประมาณ 1.5×10^{-4} [N/m²]⁻¹ และ $S_r = 0$ จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด พื้นผิวการตอบสนองแสดงรูปร่างเป็นแอ่งแนวยาวขนานไปกับแกนของพารามิเตอร์ S_r แสดงถึงความไวของพารามิเตอร์ S_r มีค่าต่ำกว่าของพารามิเตอร์ $1/p_0$ ดังนั้นความไม่แน่นอนของการประมาณพารามิเตอร์ S_r จะสูงกว่าของพารามิเตอร์ $1/p_0$ และพื้นผิวนี้แสดงให้เห็นว่าการจำลองย้อนกลับจะไม่ลู่เข้าหาคำตอบหากการกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ S_r เริ่มต้นห่างจากคำตอบมากเกินไป

รูปที่ 4.6e แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ S_r และพารามิเตอร์ z จากรูปพบว่าค่า $S_r = 0$ และ z ประมาณ 2.5 จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด และพื้นผิวการตอบสนองแสดงรูปร่างแอ่งกะทะวงรี โดยวงรีมีขนาดใหญ่กินพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง และมีรูปร่างชัดเจนที่สุด แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ S_r และพารามิเตอร์ z มีค่าต่ำ และพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ไม่มีปัญหาในการลู่เข้าหาคำตอบระหว่างการจำลองย้อนกลับ แม้ว่าจะมีการกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ทั้งสองห่างจากคำตอบมากที่สุดก็ตาม

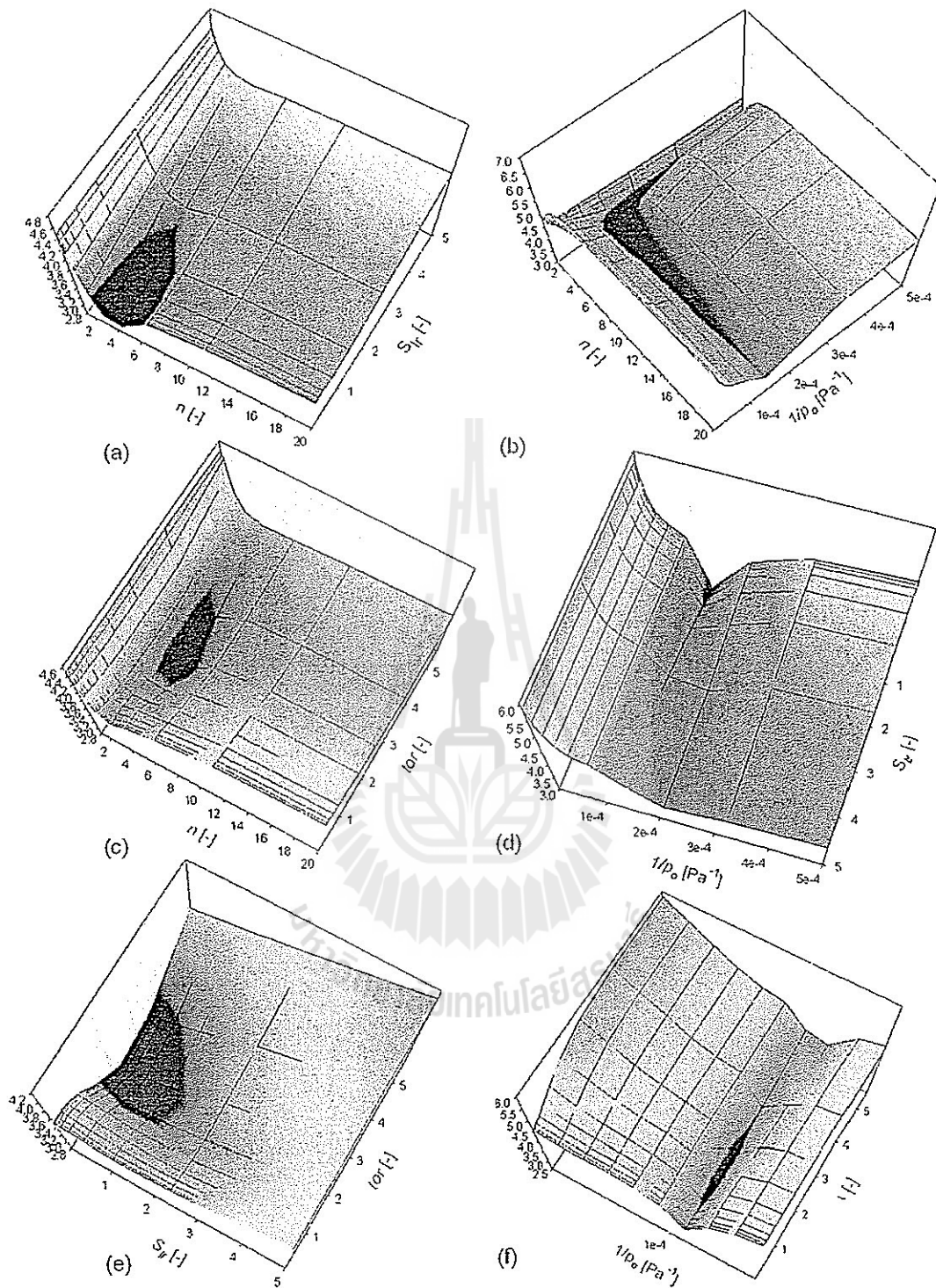
รูปที่ 4.6f แสดงพื้นผิวการตอบสนองสำหรับคู่ของพารามิเตอร์ $1/p_0$ และพารามิเตอร์ ϵ ตำแหน่งที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่ชัดเจนนัก แต่สามารถประมาณจากรูปพบว่าค่า $1/p_0$ ประมาณ $1.5 \times 10^{-4} \text{ [N7m}^2\text{]}^{-1}$ และ ϵ ประมาณ 2.5 จะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด พื้นผิวการตอบสนองแสดงรูปร่างเป็นแอ่งแนวาวขนานไปกับแกนของพารามิเตอร์ ϵ แสดงถึงความไวของพารามิเตอร์ ϵ มีค่าต่ำกว่าของพารามิเตอร์ $1/p_0$ ดังนั้นความไม่แน่นอนของการประมาณพารามิเตอร์ ϵ จะสูงกว่าของพารามิเตอร์ $1/p_0$

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าสถิติสำหรับค่าคงค้ำจากการจำลองย้อนกลับด้วย UCODE

Statistic for residuals	
Maximum weighted residual	3.27
Minimum weighted residual	-5.91
Average weighted residual	-0.406
Number of residuals ≥ 0	62
Number of residuals < 0	85
Number of run	9

ตารางที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์ค่าคงค้ำจากการจำลองย้อนกลับด้วย UCODE จากตารางพบว่าค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 3.27 ถึง -5.91 จำนวนของค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนักที่เป็นบวกมีจำนวน 62 และจำนวนค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนักที่เป็นลบมีจำนวน 85 จากจำนวนทั้งสิ้น 147 จำนวน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความค่อนข้างสมมาตรระหว่างค่าบวก และค่าลบ จำนวนค่าบวกลบต่อเนื่อง (number of run) เท่ากับ 9 ซึ่งถือว่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมด 111 จำนวน ซึ่งแปลความได้ว่าค่าคงค้ำถ่วงน้ำหนักมีโอกาสน้อยกว่า 2.5% ที่จะไม่มีความลำเอียง (Hill, 1998)

ผลลัพธ์อีกประการจากการจำลองย้อนกลับด้วย UCODE คือค่าพารามิเตอร์ในช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีความหมายทางสถิติคือมีโอกาสเป็นไปได้ 95% ที่ค่าจริงจะตกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นนี้ นอกจากนี้ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่น 95% นี้ยังสามารถบ่งถึงความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ พารามิเตอร์ที่มีช่วงความเชื่อมั่น 95% แดบจะมีความแม่นยำในการประมาณสูงกว่าพารามิเตอร์ที่มีช่วงความเชื่อมั่นกว้าง ตารางที่ 4.3 แสดงผลการประมาณพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่ได้จากการศึกษา



รูปที่ 4.5 พื้นผิวการตอบสนองของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนแกนของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณ ตารางที่ 4.3 ผลการประมาณพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองที่ได้จากการศึกษา

Model parameters

Fixed model parameters

K	$[m^2]$	5.7×10^{-12}
S_b	$[-]$	0.99

Estimated model parameters

95% confidence

n	$[-]$	3.8	3.35-4.01
S_r	$[-]$	0	0
$1/p_o$	$[N/m^2]^{-1}$	1.75×10^{-4}	$1.67 \times 10^{-4} - 1.80 \times 10^{-4}$
l	$[-]$	2.76	2.41-3.19

Correlation matrix

	n	S_r	$1/p_o$	l
n	1	0	-0.38	-0.64
S_r	0	1	0	0
$1/p_o$	-0.38	0	1	0.82
l	-0.64	0	0.82	1

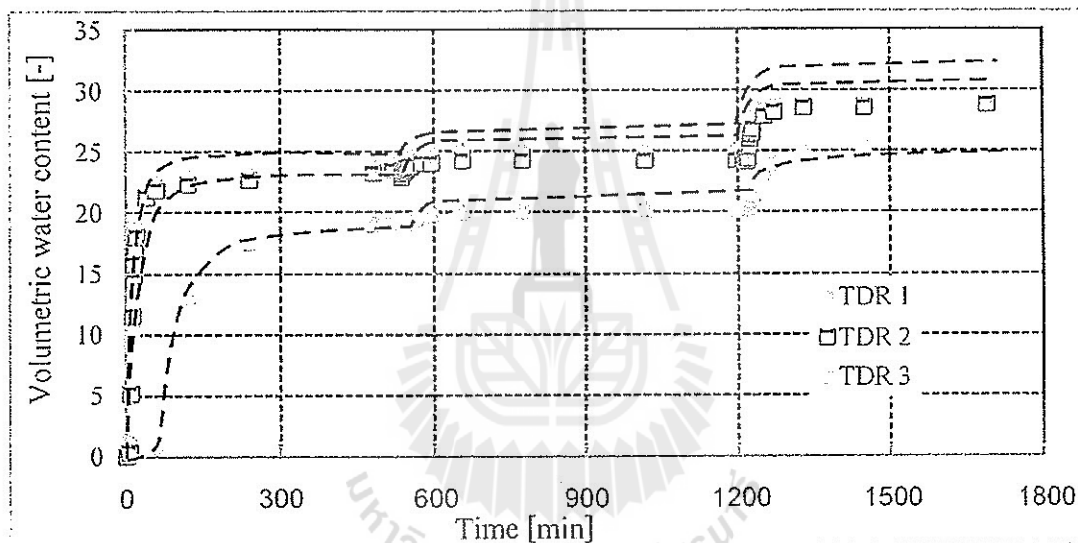
รายงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการประมาณคุณสมบัติด้านไหลของดินโดยใช้การทดสอบการไหลแบบไม่คงตัว และนำผลทดสอบไปคำนวณย้อนกลับ (back calculation) แบบอัตโนมัติ ซึ่งเรียกว่าการจำลองย้อนกลับ (inverse modeling) ซึ่งการหาคุณสมบัติการไหลโดยวิธีนี้มีความยืดหยุ่นในการ

4.7 สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อ

รายงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการประมาณคุณสมบัติด้านไหลของดินโดยใช้การทดสอบการไหลแบบไม่คงตัว และนำผลทดสอบไปคำนวณย้อนกลับ (back calculation) แบบอัตโนมัติ ซึ่งเรียกว่าการจำลองย้อนกลับ (inverse modeling) ซึ่งการหาคุณสมบัติการไหลโดยวิธีนี้มีความยืดหยุ่นในการเตรียมการทดสอบมากกว่า นอกจากนี้หากต้องการหาคุณสมบัติด้านการไหลในสนามซึ่งกินพื้นที่กว้าง การเก็บตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบหาคุณสมบัติด้านการไหลโดยตรงจะกินเวลานาน และมี

ค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงมาก การทดสอบที่เสนอในรายงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติด้านไหลในสนามได้อย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองย้อนกลับต้องการข้อมูลจำนวนมาก เพื่อให้คำตอบถูกต้องที่สุด ดังนั้นการทดสอบแบบหลายความดันจึงเป็นแนวทางที่ถูกเสนอในหลายๆงานวิจัย แต่การจะจัดทำแบบจำลองย้อนกลับ แบบหลายระดับความดัน โดยใช้ UCODE จำเป็นต้องเข้าใจการทำงานของ UCODE เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังต้องการรูทีนย่อยสำหรับเขียนไฟล์ template เพื่อการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระดับความดันต่างๆ ไปด้วย รายงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงโดยละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการจัดกระทำกับไฟล์ต่างๆ รวมทั้งแสดงรูทีนย่อย (ศึกษาในภาคผนวก) เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถนำไปใช้ใน งานที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับผลการจำลองเชิงตัวเลขหลังการจำลองย้อนกลับของดินชนิดที่ 2

เอกสารอ้างอิง

- 1) พิมพ์พิไทยรัฐ. หน้า 1 หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ ฉบับประจำวันศุกร์ที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2555
- 2) Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods, A. Klute, Ed. Soil Sc.Soc. of America. Madison, WI.
- 3) Green, R.E., Ahuja, L.R., Chong. S.K., 1986. Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils: Field methods. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1 - Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. Agronomy Monograph 9, pp. 771-798.
- 4) Van Genuchten, M.Th. (1980). A Close-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- 5) Mualem, Y. (1976). A New model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resour. Res. 12, 513-522.
- 6) Bear, J.: 1988, Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier, New York.
- 7) Wösten, J. H. M., and M. Th. van Genuchten. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 52(6): 1762-1770.
- 8) Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P.A., 1976, An Integrated Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow in Porous Media, Water Resources Research, vol. 12, no. 1, pp. 57-64.
- 9) Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis (1999), TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA.
- 10) Poeter, E.P. and M.C. Hill, 1998, Documentation of UCODE: A computer Code for Universal Inverse Modeling, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4080, 116 pp.
- 11) Hill, M.C., 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geol. Surv. Water-Resour., 98-4005.



SUBROUTINE WRIDAT

C THIS SUBROUTINE WRITES DATA FILE "THUC2.DAT" and "THUC2.TPL" WHICH WILL BE USED

C AS INPUT DATA FOR THUC2.EXE

COMMON/SOLI/COM(27),EXPAN(27),CDRY(27),TORT(27),GK(27)

COMMON/SOLII/XKD3(27),XKD4(27)

COMMON/RPCAP/IRP(27),RP(7,27),ICP(27),CP(7,27),IRPD,RPD(7),AICPD,CPD(7)

common/nnn/nkin,nkin1

COMMON/SVZ/NOITE,MOP(24)

COMMON/DOP/ENTH,KDATA,QUAL

COMMON/DMN/INUM,IPRINT,MCYC,MCYPR,MSEC,TZERO,TIMP1

COMMON/tim/IT,DELAf,ITPR,TIS(100),ITCO,NOWTIM,DELTMX

COMMON/BIND/DIFFO,TEXP,BE

COMMON/DFM/TIMAX,REDLT

COMMON/DM/DELTEN,DELTEX,FOR,FORD

COMMON/STEP/ELST

COMMON/DX/K,N,SCALE

COMMON/DG/WUP,WNR



COMMON/CONTST/RE1,RE2,RERM,NER,KER,DFAC

COMMON/AMMIS/MA,IPIV,U,IAB,NZ

COMMON/DLT/NDLT,DLT(100)

COMMON/SOLVR1/matslv,nmaxit,nvcc,juunnk,issoo,nactdi

COMMON/SOLVR2/ritmax,closur

COMMON/SOLVR3/ordrng,oprocs,zprocs,coord

character*1 h1

character*5 eof,egoft

character*10 ecoft

C

CHARACTER*5 ELEM1,ELEM2,MAT,ELST,VER,WORD,MA12,NAM

CHARACTER*3 EL,MA1,EL1,EL2,SL

CHARACTER MA2*2,TYPE*4,ITAB*1

CHARACTER*2 ordrng,oprocs,zprocs

CHARACTER*5 coord

COMMON/E1/ELEM(1)

COMMON/E4/PHI(1)



COMMON/P1/X(1)

COMMON/NN/NEL,NCON,NOGN,NK,NEQ,NPH,NB,NK1,NEQ1,NBK,NSEC,NFLUX

COMMON/CYC/KCYC,ITER,ITERC,TIMIN,SUMTIM,GF,TIMOUT

COMMON/SOLID/NM,DM(27),POR(27),PER(3,27),CWET(27),SH(27)

COMMON/SOCH/MAT(27)

COMMON/BALA/TFM0(27),TVM0(27),TFE0(27),TVE0(27),TSE0(27)

COMMON/POV6/TSTART

CHARACTER*5 ELEM,ELEMT

INTEGER ITChi

REAL XTEMP(50),TISChi(30)

C

CHARACTER*5 MATST,NADST

CHARACTER*10 DMST,PORST,PER1ST,PER2ST,PER3ST,CWETST,SHST

CHARACTER*10 COMST,EXPANST,CDRYST,TORTST,GKST

CHARACTER*5 IRPST,IPCST

CHARACTER*10 RP1ST,RP2ST,RP3ST,RP4ST,RP5ST,RP6ST,RP7ST

CHARACTER*10 CP1ST,CP2ST,CP3ST,CP4ST,CP5ST,CP6ST,CP7ST




```

C #####
OPEN(1001,FILE='THUC1.DAT',STATUS='REPLACE')
OPEN(2001,FILE='THUC1.TPL',STATUS='REPLACE')
C #####
WRITE(1001,93) 'INVERSE MODELLING'
WRITE(2001,93) 'INVERSE MODELLING'
WRITE(1001,1)
WRITE(2001,1)
1 FORMAT('ROCKS-----1-----2-----3-----4-----5-----*---X-6-----7-----8')
OPEN(401,FILE='ParMod1.tpl',STATUS='OLD')
READ(401,1001) MATST,NADST,DMST,PORST,PER1ST,PER2ST,PER3ST,aCWETST,SHST
1001 FORMAT(2A5,7A10)
READ(401,1002) COMST,EXPANST,CDRYST,TORTST,GKST
1002 FORMAT(5A10)
READ(401,1003) IRPST,RP1ST,RP2ST,RP3ST,RP4ST,RP5ST,RP6ST,RP7ST
1003 FORMAT(A5,5X,7A10)
READ(401,1004) ICPST,CP1ST,CP2ST,CP3ST,CP4ST,CP5ST,CP6ST,CP7ST
1004 FORMAT(A5,5X,7A10)

```



```
CLOSE(UNIT=401)
```

```
DO100 I=1,NM
```

```
C Assign NADchi = 3 to make sure that THUC1.exe will read three more lines after reading material type
```

```
C including COM, EXPAN, CDRY, TORX, GK and lines containing parameters both for
```

```
C relative permeability and capillary pressure functions.
```

```
NADchi = 3
```

```
;
```

```
WRITE(1001,2) MAT(I),NADchi,DM(I),POR(I),(PER(I,I),I=1,3),
```

```
ACWET(I),SH(I)
```

```
2 FORMAT(A5,I5,7E10.4)
```

```
IF(I.EQ.1)THEN
```

```
WRITE(2001,1001) MATST,NADST,DMST,PORST,PER1ST,PER2ST,PER3ST, aCWETST,SHST
```

```
ELSE
```

```
WRITE(2001,2) MAT(I),NADchi,DM(I),POR(I),(PER(I,I),I=1,3), ACWET(I),SH(I)
```

```
ENDIF
```

```
WRITE(1001,3) COM(I),EXPAN(I),CDRY(I),TORT(I),XGK(I)
```

```
3 FORMAT(8E10.4)
```

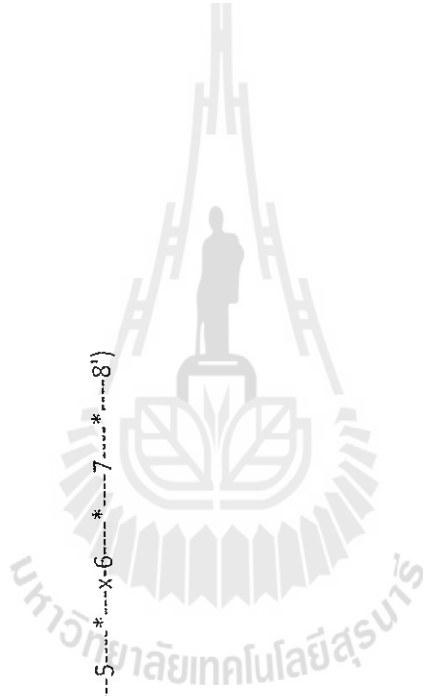
```
IF(.EQ.1)THEN
WRITE(2001,1002) COMST,EXPANST,CDRYST,TORTST,GKST
ELSE
WRITE(2001,3) COM(I),EXPAN(I),CDRY(I),TORT(I),XGK(I)
ENDIF

WRITE(1001,4) IRP(I),(RP(I,I),I=1,7)
WRITE(1001,4) ICP(I),(CP(I,I),I=1,7)
4 FORMAT(I5,5X,7E10.4)

IF(.EQ.1)THEN
WRITE(2001,1003) IRPST,RP1ST,RP2ST,RP3ST,RP4ST,RP5ST,RP6ST,RP7ST
WRITE(2001,1004) ICPST,CP1ST,CP2ST,CP3ST,CP4ST,CP5ST,CP6ST,CP7ST
ELSE
WRITE(2001,4) IRP(I),(RP(I,I),I=1,7)
WRITE(2001,4) ICP(I),(CP(I,I),I=1,7)
ENDIF
```



```
100 CONTINUE
WRITE(1001,5)
WRITE(2001,5)
5 FORMAT(5H )
C
WRITE(1001,11)
WRITE(2001,11)
11 FORMAT('MULTI---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---X-6---*---7---*---8')
WRITE(1001,12) NK,NEQ,NPH,NB,nkin
WRITE(2001,12) NK,NEQ,NPH,NB,nkin
12 FORMAT(16I5)
C
WRITE(1001,21)
WRITE(2001,21)
21 FORMAT('START---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---X-6---*---7---*---8')
C
WRITE(1001,31)
WRITE(2001,31)
```



```
31 FORMAT('PARAM-----1-MOP* 123456789012345678901234-----*-----5-----*-----
```

```
x-6-----*-----7-----*-----8')
```

```
MCYCchi=MCYC/10
```

```
WRITE(1001,32) NOITE,KDATA,MCYCchi,MSEC,MCYPR,(MOP(I),I=1,24),XDIFFO,TEXP,BE
```

```
WRITE(2001,32) NOITE,KDATA,MCYCchi,MSEC,MCYPR,(MOP(I),I=1,24),XDIFFO,TEXP,BE
```

```
32 FORMAT(2I2,3I4,24I1,4E10.4)
```

```
TSTARTchi=0
```

```
DELTIMchi=5100
```

```
TIMAXchi=TSTARTchi+DELTIMchi
```

```
WRITE(1001,33) TSTARTchi,TIMAXchi,DELLEN,aDELTMX,ELST,GF,REDLT,SCALE
```

```
WRITE(2001,33) TSTARTchi,TIMAXchi,DELLEN,aDELTMX,ELST,GF,REDLT,SCALE
```

```
33 FORMAT(4E10.4,A5,5X,3E10.4)
```

```
IF(DELLEN.GE.0.) GOTO 300
```

```
NDLT=-INT(DELLEN)
```

```
DO20 N=1,NDLT
```

```
WRITE(1001,34)(DLT(J+8*(N-1)),J=1,8)
```



```

20  WRITE(2001,34)(DLT(J+8*(N-1)),J=1,8)
34  FORMAT(8E10.4)
300 CONTINUE
WRITE(1001,34) RE1,RE2,U,WUP,WNR,DFAC,FOR
WRITE(2001,34) RE1,RE2,U,WUP,WNR,DFAC,FOR
WRITE(1001,5)
WRITE(2001,5)
WRITE(1001,41)
WRITE(2001,41)
41  FORMAT('SOLVR-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8')
WRITE(1001,42) matslv,zprocs,oprocs,ritmax,closur
WRITE(2001,42) matslv,zprocs,oprocs,ritmax,closur
42  FORMAT('1,2x,a2,3x,a2,2(e10.4)')
C
WRITE(1001,43)
WRITE(2001,43)
43  FORMAT('TIMES-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8')

```



ITiChi = 13

WRITE(1001,44) ITiChi,ITiChi

WRITE(2001,44) ITiChi,ITiChi

44 FORMAT(2I5)

TISChi(1) = 60

TISChi(2) = 120

TISChi(3) = 240

TISChi(4) = 360

TISChi(5) = 480

TISChi(6) = 600

TISChi(7) = 900

TISChi(8) = 1200

TISChi(9) = 1500

TISChi(10) = 1800

TISChi(11) = 2700

TISChi(12) = 3600

TISChi(13) = 5100



```
WRITE(1001,45)(TISCChi(i),i=1,ITIChi)
WRITE(2001,45)(TISCChi(i),i=1,ITIChi)
45 FORMAT(8E10.4)
WRITE(1001,51)
WRITE(2001,51)
51 FORMAT('ELEM-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8')
CLOSE(UNIT=4)
OPEN(110,FILE='MESH',MODE='READ')
READ(110,93) WORDchi
500 READ(110,52) EL,N,MA2,VOLX,AHTX,pmx,Xxchi,Yychi,Zzchi
52 FORMAT(A3,I2,I3X,A2,2E10.4,4E10.4)
IF(EL.EQ.' ' .AND.N.EQ.0) GOTO 600
WRITE(1001,52) EL,N,MA2,VOLX,AHTX,pmx,Xxchi,Yychi,Zzchi
WRITE(2001,52) EL,N,MA2,VOLX,AHTX,pmx,Xxchi,Yychi,Zzchi
GOTO 500
600 WRITE(1001,5)
WRITE(2001,5)
```



```
WRITE(1001,61)
WRITE(2001,61)
61 FORMAT('CONNE---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---X-6---*---7---*---8')

READ(110,93) WORDchi

601 READ(110,62) EL1,N1,EL2,N2,ISOT,D1,D2,AREAX,BETAX,sigx
62 FORMAT(A3,I2,A3,I2,15X,I5,5E10,4)
(IF(EL1.EQ.' ' .AND.N1.EQ.0) GOTO 700
IF(EL1.EQ.'+++') GOTO 700
WRITE(1001,62) EL1,N1,EL2,N2,ISOT,D1,D2,AREAX,BETAX,sigx
WRITE(2001,62) EL1,N1,EL2,N2,ISOT,D1,D2,AREAX,BETAX,sigx

GOTO 601

700 CLOSE(UNIT=110)

WRITE(1001,5)
WRITE(2001,5)
WRITE(1001,71)
WRITE(2001,71)
71 FORMAT('GENER---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---X-6---*---7---*---8')

WRITE(1001,5)
```

WRITE(2001,5)

WRITE(1001,81)

WRITE(2001,81)

81 FORMAT('INCON---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---X-6---*---7---*---8')

DO800 NN=1,NEL-1

DO800 N=1,NEL-NN

NLOC=(N-1)*NK1

NLOCP=N*NK1

IF(ELEM(N).GT.ELEM(N+1))THEN

ELEMT=ELEM(N)

PHIT=PHI(N)

DO801 I=1,NK1

XTEMP(I)=X(NLOC+I)

801 CONTINUE

ELEM(N)=ELEM(N+1)

PHI(N)=PHI(N+1)

DO802 I=1,NK1



```
X(NLOC+1)=X(NLOCP+1)
802 CONTINUE
ELEM(N+1)=ELEM1
PHI(N+1)=PHI1
DO803 I=1,NK1
X(NLOCP+I)=XTEMP(I)
803 CONTINUE
ENDIF
800 CONTINUE
X(1)=1.093E+05
DO 804 N=1,NEL
NLOC=(N-1)*NK1
C
WRITE(1001,82) ELEM(N),PHI(N),(X(NLOC+I),I=1,NK1)
WRITE(2001,82) ELEM(N),PHI(N),(X(NLOC+I),I=1,NK1)
82 FORMAT(A5,10X,E15.8/(4E20.13))
804 CONTINUE
```



```
WRITE(1001,5)
```

```
WRITE(2001,5)
```

```
WRITE(1001,91)
```

```
WRITE(2001,91)
```

```
91 FORMAT('COFT ----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*---X-6----*----7----*----8')
```

```
WRITE(1001,5)
```

```
WRITE(2001,5)
```

```
WRITE(1001,93)'ENDCY'
```

```
WRITE(2001,93)'ENDCY'
```

```
93 FORMAT(A)
```

```
CLOSE(UNIT=1001)
```

```
CLOSE(UNIT=2001)
```

```
RETURN
```

```
END
```

