รหัสโครงการ SUT7-719-46-12-25

รายงานการวิจัย

การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบผู้เชี่ยวชาญ เพื่อใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

Development of Computerized Expert System for Design of Borehole Seals in Rocks

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2546

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2547

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2546 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นางสาวอัมรินทร์ วารินทร์ ผู้ช่วยในการดำเนินงานวิจัย นางสาวกัลญา พับไพธิ์ ผู้พิมพ์รายงาน และ นางฉิมชาภัทร สิทธิคุณ ผู้ตรวจสอบความถูกต้องของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

มีนาคม 2547

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อพัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญในรูปของคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน หลุมเจาะเหล่านี้จะรวมไปถึงหลุมเจาะที่ใช้ในการสำรวจและผลิตน้ำบาดาล ปิโตรเลียม และแหล่งแร่ การวิจัยเริ่มต้นจากการรวบรวมความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญทางด้านการอุดหลุมเจาะ โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์ ทดสอบ และบันทึกอย่างเป็นระบบ โปรแกรม Visual Basic จะใช้เป็นกรอบของระบบ สำหรับเครื่องข่ายของระบบประกอบด้วย วิธีของขบวนการและขั้นตอนในการตัดสินใจซึ่งจะรับข้อมูลคุณลักษณะของพื้นที่ที่ป้อนเข้าไปในระบบโดยผู้ใช้ จากนั้นระบบจะจำแนกและประเมินข้อมูลเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปของการออกแบบและการเลือกสรรวัสดุที่ใช้ในการอุด คุณลักษณะของพื้นที่จะประกอบด้วยข้อมูลทางด้านกลศาสตร์ธรณี ธรณีวิทยา อุทกธรณี ลักษณะของหลุมเจาะ ข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม และขีดความสามารถของการอุดที่ต้องการ ระบบผู้เชี่ยวชาญจะจำแนกข้อมูลเหล่านี้และจะเลือกวัสดุที่ใช้อุดสำหรับแต่ละชั้นหิน โดยอาศัยเกณฑ์ที่ตั้งขึ้นและผลที่ได้จากการทดสอบและการวิจัย วัสดุที่นำมาพิจารณามีหลายชนิดซึ่งจะรวมไปถึงซีเมนต์ เบนทอไนต์ กรวด ทราย ดิน และส่วนผสมของวัสดุเหล่านี้ ขบวนการในการออกแบบจะมีการทำซ้ำแบบวัฏจักรเพื่อหาชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นระบบขององค์ประกอบในการอุด (รวมไปถึงวัสดุ หินรอบหลุมเจาะ และรอยต่อที่ผนังของหลุมเจาะ) จะมีการประเมินในด้านเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์และในด้านความสามารถในการกักเก็บเชิงชลศาสตร์ ในขั้นนี้การออกแบบอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เหมาะสมขึ้น คำแนะนำสุดท้ายจะรวมไปถึงชนิดและคุณสมบัติของวัสดุอุดสำหรับหลุมเจาะนั้น ๆ โดยตัวอย่างของการอุดหลุมเจาะได้ให้ไว้เพื่อแสดงความสามารถของระบบสำหรับลักษณะธรณีวิทยาและลักษณะหลุมเจาะที่หลากหลาย

Abstract

The objective of the research is to develop a computerized expert system for use in the design of borehole sealing in rock formations. Such boreholes include those used in the exploration and production of groundwater, petroleum and mineral resources. Knowledge and experience of an expert on borehole sealing is systematically extracted, compiled, analyzed, tested and documented. Visual Basic is used as a system shell. The network of the expert system comprises paths and decision-making procedures that use site characteristics given by the users, classify and evaluate the information, and lead to the results in terms of the seal design and material selection. The considered site characteristics include geo-mechanics, geology and hydrology of all rock units, borehole configurations, engineering limitations, and seal performance requirements. The system first classifies the input data and selects the sealing material for each rock unit based on the established criteria and the implications from relevant experimental researches. A variety of sealing materials is considered, including cement, bentonite, granular, clay, and their mixtures. The design is iterated to seek the most suitable seal types and properties. The seal system (seal, host rock and their interface) performance is then evaluated in terms of the mechanical stability and containment integrity. Design modification is made here if appropriate. The final recommendations include the site-specific seal types along the borehole and the specification. Examples of borehole sealing are also given to demonstrate to system performance under a variety of geologic and borehole conditions.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก

บทคัดย่อ ..... ข

Abstract ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญภาพ ..... ซ

บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ 5

วิธีดำเนินงานวิจัย 5

ขอบเขตของการวิจัย 7

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ 7

บทที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9

1.1 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน 9

1.1.1 ประเภทของการอุดหลุมเจาะ 9

1.1.2 จุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะ 10

1.1.3 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม 11

1.1.4 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย 16

1.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา 19

1.1.6 การศึกษาและวิจัยการอุดหลุมเจาะ 33

1.2 ระบบปัญญาประดิษฐ์ 39

บทที่ 2 วัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ 49

2.1 วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ 49

2.1.1 วัสดุเม็ดหยาบ 49

2.1.2 เบนทอไนต์ 49

2.1.3 ซีเมนต์ 52

2.1.4 วัสดุผสม 52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 วิธีการอุดหลุมเจาะ (Placement Methods) 52

2.2.1 การเตรียมหลุมเจาะก่อนการอุด 53

2.2.2 การใส่วัสดุอุดลงในหลุมเจาะ 53

บทที่ 3 การสร้างโครงข่ายทางแนวคิด 55

3.1 ขอบเขตและข้อจำกัดของระบบผู้เชี่ยวชาญ 55

3.2 โครงสร้างของระบบผู้เชี่ยวชาญ 55

3.3 การจัดการและการประเมินข้อมูลเบื้องต้น 55

3.4 ขบวนการและกฎที่ใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะ 57

3.4.1 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ (Design Parameters) 58

3.4.2 ความต้องการในการออกแบบ (Function Requirements) 59

3.4.3 ข้อจำกัดในการออกแบบ (Design Constraints) 59

3.4.4 ผลของการเลือกวัสดุและการออกแบบ (Design Solutions) 60

3.4.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกวัสดุ (Selection Criteria) 62

3.4.6 การออกแบบรอบที่สอง (Design Iteration) 65

3.4.7 คุณลักษณะของวัสดุ (Design Specifications) 66

3.5 ขบวนการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ (Design Evaluation) 69

3.5.1 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบการอุดทั้งระบบ 69

3.5.2 ความต้องการในการออกแบบ 69

3.5.3 ข้อจำกัดในการออกแบบ 70

3.5.4 การประเมินประสิทธิภาพทั้งระบบ 70

3.5.5 องค์ประกอบการออกแบบ 72

บทที่ 4 การพัฒนาโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ 73

4.1 แผนภูมิการไหลของระบบผู้เชี่ยวชาญ 73

4.1.1 แผนภูมิการไหลของส่วน Inference Engine 75

4.1.2 แผนภูมิการไหลของส่วน Knowledge Base 79

4.2 กรอบของระบบผู้เชี่ยวชาญ 87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน 91
5.1 การพิจารณาขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตก 91
5.2 การพิจารณาการเคลื่อนตัวและการสั่นสะเทือนของชั้นหิน 92
5.3 การพิจารณาความลึกของชั้นหิน 92
5.4 การพิจารณาคุณสมบัติเชิงเคมีของน้ำบาดาล 92
5.5 การพิจารณาความแข็งของมวลหิน 102
5.6 การพิจารณาการทรุดตัวของเบนทอไนต์ 102
5.7 การพิจารณาชนิดของชั้นหิน 102
5.8 การพิจารณาความหนาของชั้นหิน 102
5.9 การพิจารณาระดับน้ำบาดาล 111
5.10 การพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน 111
5.11 สรุป 111

บทที่ 6 บทสรุปและการวิจารณ์ผล 119
6.1 สรุปผลงานวิจัย 119
6.2 การวิจารณ์ผลงานวิจัย 122

บรรณานุกรม 125
ภาคผนวก 145
ประวัติผู้วิจัย 149

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

5.1 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.1 95

5.2 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.2 96

5.3 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.3 98

5.4 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.4 100

5.5 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับรูปที่ 5.4 แต่พิจารณาคุณสมบัติเชิงเคมีของน้ำบาดาล 101

5.6 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.5 104

5.7 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.6 106

5.8 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.6 (ต่อ) 107

5.9 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.7 109

5.10 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.7 (ต่อ) 110

5.11 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.8 113

5.12 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.8 (ต่อ) 114

5.13 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.9 117

5.14 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.10 118

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การอุดชั้นหินที่มีการไหลของของเหลวในหลุมเปลือย	18
1.2	การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับหลุมเปลือยโดยใช้ซีเมนต์	20
1.3	การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับหลุมเปลือยโดยใช้ Mechanical plug	21
1.4	การอุดปิดส่วน Squeezed cement ด้วย Mechanical plug	22
1.5	การอุดปิดส่วน Squeezed cement ด้วย Cement	23
1.6	การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุ	24
1.7	การอุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุ	25
1.8	การอุดปิดบริเวณปากหลุมเจาะที่อยู่บนบก	26
1.9	การอุดปิดบริเวณปากหลุมเจาะที่อยู่ในทะเล	27
4.1	แผนภูมิหลักของระบบผู้เชี่ยวชาญ	74
4.2	แผนภูมิของส่วนรับข้อมูล (Data acquisitions)	76
4.3	แผนภูมิของการประเมินข้อมูลเบื้องต้นส่วนหน้า	77
4.4	แผนภูมิของการประเมินข้อมูลเบื้องต้นส่วนท้าย	78
4.5	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาระดับน้ำบาดาลและและกลศาสตร์หินในรอบแรก	80
4.6	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาเชิงชลศาสตร์และความต้องการเชิงวิศวกรรมในรอบแรก	81
4.7	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาธรณีวิทยาเคมีในรอบแรก	82
4.8	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินส่วนสุดท้ายในรอบแรก	83
4.9	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณากลศาสตร์หินและเชิงชลศาสตร์ ในรอบที่ 2	84
4.10	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาความต้องการเชิงวิศวกรรม ในรอบที่ 2	85
4.11	แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนสุดท้าย ในรอบที่ 2	86
4.12	แผนภูมิการไหลของกฎการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ	88

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.1 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาขนาดของหลุมเจาะ และความกว้างของช่องในรอยแตก (หลุมเจาะขนาด 0.3 m และความกว้างของช่องในรอยแตก 0.5 cm) 93

5.2 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาขนาดของหลุมเจาะ และความกว้างของช่องในรอยแตก (หลุมเจาะขนาด 0.5 m และความกว้างของช่องในรอยแตก 0.3 cm) 94

5.3 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาการเคลื่อนตัวของชั้นหิน 97

5.4 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความเค้นในชั้นหิน สำหรับหลุมเจาะที่อยู่ระดับลึกมาก 99

5.5 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความแข็งของมวลหิน ความเค้นในมวลหิน และการทรุดของเบนทอไนต์ 103

5.6 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาชั้นหินหลายชนิด ในหลุมเจาะเดียวกัน 105

5.7 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความหนาของชั้นหิน 108

5.8 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระดับน้ำบาดาล 112

5.9 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน (ระยะห่างระหว่างรอยแตกในตัวอย่างนี้เท่ากับ 0.1 m) 115

5.10 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน (ระยะห่างระหว่างรอยแตกในตัวอย่างนี้เท่ากับ 3.5 m) 116

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความรู้และประสบการณ์ของบุคคลหนึ่งเป็นสิ่งที่ไม่มีตัวตนทางกายภาพและยากที่จะอนุรักษ์เอาไว้ โดยทั่วไปแล้วความรู้ของผู้เชี่ยวชาญท่านหนึ่งในองค์กรจะสูญหายไปเมื่อผู้เชี่ยวชาญท่านนั้นจากองค์กรนั้นไป ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) เป็นเครื่องมือและวิธีหนึ่งที่จะอนุรักษ์และเก็บความรู้รวมถึงประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญนั้น ๆ ไว้อย่างถาวร ต่างกับผู้เชี่ยวชาญหรือวิศวกร ระบบผู้เชี่ยวชาญไม่มีวันป่วย แก่ เจ็บ ตาย และไม่เคยลืมปัจจัยทุกอย่างที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบงานนั้น ๆ

ระบบผู้เชี่ยวชาญ คือ คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ ที่เขียนขึ้นโดยการรวบรวมประสบการณ์อย่างมีระบบและแนวทางที่แน่ชัดจากผู้เชี่ยวชาญในสาขาเฉพาะกิจ ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากต่างประเทศในหลาย ๆ ด้าน นับตั้งแต่ปี 1980 ยกตัวอย่างเช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญที่ใช้ตั้งแต่การปรุงอาหารกระป๋อง การคำนวณการโคจรของกระสวยอวกาศ การบริหารและจัดการบุคลากรของบริษัท การคำนวณความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การวางแผนสงครามยุคใหม่ การคำนวณด้านเศรษฐกิจของโลก การออกแบบทางด้านวิศวกรรม และอื่น ๆ อีกมากมาย ระบบผู้เชี่ยวชาญเหล่านี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่องานเฉพาะกิจ และเกือบทั้งหมดถูกสงวนลิขสิทธิ์และปิดเป็นความลับ ดังนั้นการเผยแพร่ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญเหล่านี้โดยอาศัยการถ่ายทอดทางเทคโนโลยีระหว่างประเทศจึงแทบจะเป็นไปไม่ได้

การสร้าง ระบบผู้เชี่ยวชาญไม่ใช่การสร้างฐานข้อมูล แต่เป็นการสร้างแผนผังของแนวคิดเพื่อนำไปสู่คำตอบที่ต้องการในกิจกรรมหนึ่ง ๆ เท่านั้น แผนผังที่สร้างขึ้นนี้ (Neural Network) ก็คือการลอกเลียนแบบประสบการณ์และขบวนการความคิดในสมองของผู้เชี่ยวชาญแล้วนำไปบันทึกไว้อย่างเป็นระบบและถาวรในรูปของคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ การทำงานของระบบผู้เชี่ยวชาญก็คือการป้อนข้อมูลในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งอาจจะไม่เป็นเชิงตัวเลข แต่ผู้เชี่ยวชาญหรือระบบผู้เชี่ยวชาญสามารถให้คำตอบในรูปแบบของการวิเคราะห์และออกแบบจากข้อมูลเหล่านั้นได้ จะเห็นได้ว่าการนำไปสู่คำตอบนี้มีความแตกต่างกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์หรือทางวิศวกรรมซึ่งต้องการข้อมูลในเชิงตัวเลข ขบวนการคำนวณจากสูตรเหล่านี้จำเป็นต้องมีข้อมูลอย่างครบถ้วนมิฉะนั้นแล้วสูตรการคำนวณทางด้านวิศวกรรมก็มิสามารถให้คำตอบได้ ในขณะเดียวกันระบบผู้เชี่ยวชาญไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลครบถ้วน เพราะเครือข่ายที่ถูกสร้างขึ้นในคอมพิวเตอร์จากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญอาจจะสามารถให้คำตอบในปัญหาเดียวกันนั้นได้ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยอยากจะเน้นในที่นี้ว่าระบบผู้เชี่ยวชาญมิได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนการทำงานของวิศวกร แต่ที่จริงแล้วระบบผู้เชี่ยวชาญมีจุดประสงค์ที่จะช่วยวิศวกรหรือหน่วยงานทางวิศวกรรมได้ประกอบกิจกรรมที่

เกี่ยวข้องและซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เสริมสร้างความมั่นใจ ลดข้อผิดพลาด ประหยัดค่าใช้จ่าย และอนุรักษ์องค์ความรู้นั้น ๆ ไว้อย่างถาวร

เป็นที่รู้กันอย่างกว้างขวางว่างานทางด้านวิศวกรรมธรณี หรือวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับดินและหิน เป็นงานที่ต้องเผชิญกับความไม่แน่นอนในเชิงของคุณสมบัติและพฤติกรรมของดินและหินที่นำมาใช้ และการก่อสร้างที่ทำอยู่บนและในชั้นดินชั้นหิน ความไม่แน่นอนนี้เกิดขึ้นจากความต่างกันของเนื้อดินและหิน ความแปรปรวนทางด้านคุณสมบัติและด้านกายภาพ (Inhomogeneous) ความยากลำบากในการคาดคะเนคุณสมบัติเหล่านั้น (Unpredictable) ดังนั้นประสบการณ์และความรู้ของผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิศวกรรมในสาขาที่เกี่ยวข้องจึงมีบทบาทอย่างมากในการวิเคราะห์และออกแบบงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับดินและหิน เพื่อที่จะอนุรักษ์ประสบการณ์ที่มีคุณค่าเหล่านี้ไว้ให้ยั่งยืนและเพื่อที่จะนำประสบการณ์เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง และสม่ำเสมอ จึงมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบปัญญาประดิษฐ์ Artificial Intelligence หรือเรียกย่อ ๆ ว่า AI การพัฒนา AI ทางด้านวิศวกรรมนี้ได้เริ่มขึ้นเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว ดังที่กล่าวไว้โดย Toll (1990), Moula et al (1995) AI ได้พัฒนาขึ้นเฉพาะกิจในหลาย ๆ ด้าน Wharry and Ashley (1986) และ Siller (1987) ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ AI ชื่อ SOICON เพื่อนำมาใช้ในการสำรวจคุณสมบัติของดิน และนำผลที่ได้มาใช้ในการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม Smith and Oliphant (1991) ได้เขียนซอฟต์แวร์ AI ชื่อ ASSIST เพื่อใช้ในการวางแผนการสำรวจคุณสมบัติของดินและหินในภาคสนาม Alim and Munro (1987) ได้พัฒนา AI ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการศึกษาฐานรากที่อยู่ในชั้นดินโดยอาศัยข้อมูลทางด้านการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น งานนี้ต่อมาได้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้นโดย Davey-Wilson and Mistry (1995)

ในส่วนของคุณสมบัติของหินได้มีวิศวกรหลายท่านเขียน AI ซอฟต์แวร์ขึ้นโดยอาศัยคุณลักษณะของหินทางกายภาพเข้ามาประเมินคุณลักษณะของหินทางด้านวิศวกรรมธรณี นอกจากนั้นแล้วยังนำลักษณะทางกายภาพมาใช้จำแนกคุณสมบัติของหินทางด้านกลศาสตร์อีกด้วย วิศวกรเหล่านี้คือ Coulthard (1995), Zhang et al (1988), Juang and Lee (1989), Madhu et al (1995), Butler and Franklin (1990) และ Koczanowski et al (1991) วิศวกรบางกลุ่มได้อาศัยคุณลักษณะทางด้านธรณีวิทยาของดินและหินเพื่อเชื่อมโยงให้สัมพันธ์กับคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ โดยอาศัยประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) วิศวกรเหล่านี้คือ Yi and Lindqvist (1995), Zhang et al (1991), Millar and Clarici (1994) และ Millar and Calderbank (1995)

ระบบผู้เชี่ยวชาญที่ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศไทยมีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมโยธา แทบจะไม่มีระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ช่วยหรือประยุกต์ในอุตสาหกรรมเหล่านี้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์ของไทยที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญชั้นสูงจะถ่ายทอดขบวนการ ความคิด และประสบการณ์ของ

ท่านเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ เพื่ออนุรักษ์ประสบการณ์ที่มีค่าเหล่านี้ไว้อย่างถาวร และเพื่อให้อนุชนรุ่นหลังได้เรียนรู้และพัฒนาซอฟต์แวร์ให้ก้าวไกล ลึกซึ้ง กว้างขวางและแม่นยำมากขึ้น การเก็บประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญเหล่านี้อย่างมีระบบในคอมพิวเตอร์ยังสามารถทำให้มีการปรับเปลี่ยน ดัดแปลง และปรับปรุงเพื่อให้ Expert System ที่พัฒนาขึ้นมีความทันสมัยอยู่เสมอ

ระบบผู้เชี่ยวชาญที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และออกแบบการอุดหลุมเจาะ (Boreholes) ในชั้นของหิน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในงานของวิศวกรรมธรณี เทคโนโลยีน้ำบาดาล เทคโนโลยีปิโตรเลียม วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ ระบบผู้เชี่ยวชาญที่เสนอนี้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ประเทศเราขาดแคลนอย่างมาก ในอดีตการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้วหรือการป้องกันการรั่วซึมของหลุมเจาะที่กำลังใช้งานอยู่เป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่เป็นระบบ ประกอบทั้งไม่มีมาตรการตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วซึมในอนาคต ปัญหานี้ไม่ใช่เป็นปัญหาเฉพาะในประเทศไทย แม้แต่ในต่างประเทศประเด็นที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการอุดหลุมเจาะได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยเฉพาะการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาล (Fuenkajorn and Daemen, 1996b)

หลุมเจาะในที่นี้หมายถึง หลุมเจาะสำรวจหรือเพื่อผลิตทางด้านน้ำบาดาล เหมืองแร่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ การอุดหลุมเจาะจำพวกนี้ในขณะที่กำลังดำเนินการอยู่หรือหลังจากที่เลิกใช้แล้วยังไม่เป็นไปอย่างมีระบบและถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งทำให้เกิดการรั่วซึมหรือปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาล ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางด้านการอุดหลุมเจาะได้มีมานานแล้วก็ตามโดยเฉพาะในชั้นดิน และต่อมาได้พัฒนามาใช้ในชั้นหิน แต่ก็มิได้หมายความว่าหลุมเจาะที่ถูกอุดไปแล้วจะมีสภาพคงทนยาวนานทัดเทียมเท่ากับหินข้างเคียงที่อยู่ตามธรรมชาติ การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้วและหลุมเจาะที่กำลังใช้งานอยู่ทั้งในและต่างประเทศพบว่ามากกว่าร้อยละ 30 ของหลุมเจาะเหล่านี้เกิดการรั่วซึมและบางหลุมถึงขั้นใช้งานไม่ได้เลย นอกจากนั้นแล้วขบวนการตรวจสอบก็ไม่มีการดำเนินการกับหลุมเจาะทุกหลุมที่อุด ส่วนใหญ่หลุมเจาะที่อุดแล้วก็จะถูกอนุโลมว่าไม่มีการรั่วไหลเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอุดหลุมเจาะมาประมวล วิเคราะห์ และประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมในวงกว้าง ทั้งนี้เพื่อลดความผิดพลาด ลดค่าใช้จ่าย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำบาดาลในประเทศ วิธีที่ดีและง่ายที่สุดในปัจจุบันคือการใช้ Expert System เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้

องค์ความรู้ทางด้านการอุดหลุมเจาะในชั้นหินได้พัฒนาขึ้นเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้วกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาความรู้นี้อย่างจริงจังและต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันคือ Prof. J.J.K. Daemen และคณะ (Daemen et al., 1983, 1984, 1986) ถึงแม้การอุดหลุมเจาะในชั้นหินจะมีการดำเนินการมาก่อนหน้านี้แล้วหลายสิบปี แต่ความสำคัญขององค์ความรู้นี้เพิ่งได้ถูกเล็งเห็นเมื่อเริ่มมีแนวคิดที่จะนำเอากากนิวเคลียร์และของเสียทางเคมีไปทิ้งในชั้นหินที่อยู่ในระดับลึก ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบและ

ก่อสร้างการอุดหลุมหรืออุโมงค์ที่นำไปสู่ของเสียเหล่านี้ เพื่อป้องกันมิให้มีการรั่วซึมออกมาสู่ระบบน้ำบาดาล ดังนั้นขบวนการและวัสดุที่ใช้ในการอุดจึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเคมี

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการอุดหลุมเจาะทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นไปที่คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะและผลกระทบในประเด็นต่าง ๆ ที่อาจจะทำให้การอุดหลุมเจาะไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ ยกตัวอย่างเช่น Akgun and Daemen (1994) ได้ศึกษาความสามารถในการต้านแรงเฉือนของซีเมนต์ที่ใช้อุดหลุมเจาะ Daemen and Fuenkajorn (1996) ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบในการอุดหลุมเจาะและอุโมงค์ในชั้นหิน Fuenkajorn and Daemen (1996b, 1997) ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบวัสดุที่ใช้ในการอุดเหมืองใต้ดิน ประเด็นทางด้านวิชาการที่ต้องนำมาพิจารณาในการอุดโพรงใต้ดินที่ใช้ในการเก็บกักกากนิวเคลียร์ได้สรุปไว้โดย Fuenkajorn (1996) ผลกระทบและปัจจัยต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมธรณีและด้านอุทกธรณีที่มีต่อพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในการอุดได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม โดย Fuenkajorn and Daemen (1984, 1986, 1987, 1988, 1991, 1992) ในปี ค.ศ. 1996 Prof. Daemen และผู้วิจัยได้ร่างหนังสือเพื่อรวบรวมข้อมูลและหลักการทางวิชาการทั้งหมดไว้ในหนังสือเล่มหนึ่ง (Fuenkajorn and Daemen, 1996) เพื่อให้องค์ความรู้นี้แพร่หลายออกไปในวงกว้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุโรปและอเมริกา และเพื่อให้วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ในแขนงที่เกี่ยวข้องได้นำเอาองค์ความรู้นี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

โครงการวิจัยที่เสนอมานี้จึงเปรียบเสมือนโครงการเริ่มต้น เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและวิศวกรไทยในแขนงต่าง ๆ ได้ใช้เป็นแบบอย่างและในที่สุดแล้วระบบผู้เชี่ยวชาญต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมของประเทศไทยในอนาคต ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยประหยัดค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ เป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและนำไปสู่การพึ่งตนเองทางด้านวิชาการและทางด้านเศรษฐกิจ

การที่จะอุดหลุมเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพและสัมฤทธิ์ผลจะต้องคำนึงถึงองค์ความรู้หลัก 3 ประการ คือ เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ ประสิทธิภาพต่อการต้านการซึมผ่าน และเสถียรภาพทางเคมีระยะยาว การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอดีตและปัจจุบันมิได้คำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้ ซึ่งทำให้เกิดการรั่วซึมและไม่สัมฤทธิ์ผลดังที่ตั้งจุดประสงค์ไว้

ผู้วิจัยได้รวบรวมและร่างกฎเกณฑ์ที่เกี่ยวกับการอุดหลุมเจาะไว้ ซึ่งจะรวมไปถึงข้อพิจารณาในการออกแบบ ขบวนการในการออกแบบ หลักการของการเลือกสรรวัสดุ และขบวนการในการอุด (Fuenkajorn and Daemen, 1996) แต่เป็นการยากที่จะให้วิศวกรหรือผู้ประกอบการไม่ว่าในหรือต่างประเทศมาศึกษาหนังสือที่ได้ร่างไว้ เหตุผลหลักคือ 1) ผู้ประกอบการหรือวิศวกรไม่มีความรู้

พื้นฐานเพียงพอ 2) หนังสือเล่มนี้ไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร และ 3) ผู้ประกอบการหรือวิศวกรมิได้ตระหนักถึงการอุดหลุมที่ถูกต้องและผลกระทบของความผิดพลาดในการอุดหลุมเจาะ

งานวิจัยนี้จึงนำเอาองค์ความรู้ที่ผู้วิจัยและคณะได้รวบรวมไว้มาจัดระบบให้อยู่ในรูปของระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้ง่ายต่อการใช้ และเห็นว่าองค์ความรู้นี้จะแพร่หลายง่ายขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้ในวงกว้างโดยเฉพาะในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับใช้ในการออกแบบ การเลือกสรรวัสดุที่เหมาะสม และวิธีการเฉพาะสำหรับการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน แนวคิดและประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในการอุดหลุมเจาะจะนำมาสร้างเป็นเครือข่ายของการวิเคราะห์และความรู้ในการออกแบบในรูปของซอฟต์แวร์ คุณลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ และคุณลักษณะทางธรณีวิทยาและอุทกวิทยา และข้อกำหนดทางวิศวกรรมจะนำมาใช้เป็นข้อมูลขั้นพื้นฐาน โดยมีตัวแปรทางด้านวิศวกรรมและทางด้านคณิตศาสตร์น้อยที่สุด เพื่อให้ซอฟต์แวร์นี้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานในวงกว้าง โดยเฉพาะสำหรับวิศวกรใหม่ หรือหน่วยงานและผู้ประกอบการทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) **การจัดเตรียมฐานข้อมูลและแบบสอบถาม** คำถามต่าง ๆ จะเรียบเรียงขึ้นเป็นไปตามลำดับของการวิเคราะห์และออกแบบการอุดหลุมเจาะ โดยคำถามเหล่านี้จะเริ่มต้นตั้งแต่การหาข้อมูลพื้นฐาน เช่น ชนิดของหิน คุณลักษณะทางด้านวิศวกรรม ความลึกและขนาดของหลุมเจาะ วัตถุประสงค์ของหลุมเจาะและการอุด ไปจนถึงคำถามที่ต้องการคำตอบโดยใช้หลักวิชาการชั้นสูง เช่น น้ำหนักและแรงเสียดทานของวัสดุที่ใช้ในการอุด และความดันของชั้นหินและของน้ำที่อยู่ในชั้นหิน เป็นต้น โดยมีการทบทวนคำถามเพื่อให้แน่ใจถึงความสมบูรณ์ในทุก ๆ ด้านของการวิเคราะห์ออกแบบ และวิธีการทางวิศวกรรม

2) **การสัมภาษณ์** แบบสอบถามที่ได้จัดเตรียมขึ้นจะนำมาสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ คำตอบที่ได้จะออกมาเป็นเชิงตัวเลข ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับหลุมเจาะนั้น ๆ คำถามที่นำมาสัมภาษณ์จะครอบคลุมปัจจัยทุกด้านที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญได้รู้ข้อมูลที่มีอยู่ไม่ว่ามากหรือน้อยก็ตาม ในการสัมภาษณ์จะมีการใช้ตัวอย่างภาคสนามของจริงอย่างน้อย 40-50 หลุมเจาะที่มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมธรณีต่าง ๆ กันเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา

3) การวิเคราะห์ ความเห็นที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญจะนำมาวิเคราะห์ในรูปของความสอดคล้องและความขัดแย้งในเนื้อหาของตัวมันเอง การวิเคราะห์จะรวมไปถึงการค้นคว้าจุดบกพร่อง ความขาดแคลนทางวิชาการและความซ้ำซ้อนของความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ ข้อบกพร่องเหล่านี้จะถูกแก้ไขในขั้นตอนนี้ แผนผังที่แสดงถึงการรวบรวมข้อมูล ปัจจัยทางวิศวกรรม ทางเลือก แนวคิด การวิเคราะห์ และในที่สุดผลลัพธ์ในการออกแบบจะถูกร่างขึ้น มีการทบทวนแผนผังเพื่อให้มั่นใจว่าทิศทางของแนวคิดได้ครอบคลุมถึงปัจจัยทุกด้าน และให้แน่ใจว่าทิศทางของแนวคิดนี้ไม่นำไปสู่ทางตัน กล่าวคือ ทุก ๆ ทางมีคำตอบในรูปแบบของการออกแบบ อย่างไรก็ตามถ้าข้อมูลที่นำมาใช้มีน้อยมากจนกระทั่งแม้แต่ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญก็มิอาจออกแบบการอุดหลุมเจาะของชั้นหินนั้น ๆ ได้ เส้นทางของแผนผังในกรณีนี้ก็จะนำไปสู่คำตอบที่ยอมรับว่า "การออกแบบไม่สามารถทำได้ด้วยเหตุผลที่ว่าข้อมูลไม่เพียงพอ" จากทิศทางนี้ผู้เชี่ยวชาญก็สามารถให้คำแนะนำว่าผู้ใช้โปรแกรมควรจะหาข้อมูลเฉพาะเจาะจงเพิ่มเติม

4) การเขียนซอฟต์แวร์ แผนผังของแนวคิดและข้อแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ถูกนำมาเขียนในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่ใช้เป็นโครงสร้างคือ Visual Basic ในการเขียนซอฟต์แวร์นี้จะเน้นไปที่ความง่ายและความสะดวกต่อผู้ใช้ และอยู่ในรูปแบบของการใช้โต้ตอบ (Interactive) โดยกลุ่มผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิศวกรรมธรณี

5) การทบทวนและการตรวจสอบซอฟต์แวร์ เมื่อซอฟต์แวร์ได้เขียนสำเร็จขึ้นจะนำมาใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในพื้นที่จริง อย่างน้อยที่สุดหลุมเจาะที่มีคุณลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ กัน 10 แบบ ได้นำมาทดสอบเพื่อดูว่าซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญสามารถให้คำตอบในเชิงวิเคราะห์และออกแบบได้ทัดเทียมหรือดีกว่าของจริงทั้ง 10 แบบ ถ้ามีความแตกต่างเกิดขึ้นก็จะมีการศึกษาและทบทวนผลที่ได้จากซอฟต์แวร์นั้น และผลที่ได้จากการออกแบบของจริง

6) การเขียนรายงาน ในรายงานฉบับสมบูรณ์จะอธิบายถึงขั้นตอนในการศึกษาอย่างละเอียด ซึ่งรวมไปถึงปัจจัยทางด้านวิศวกรรมธรณีที่ถูกนำมาพิจารณา โครงสร้างของแผนผังที่สะท้อนถึงแนวคิดในการออกแบบ ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบ และขั้นตอนในการทบทวนและตรวจสอบ ซอฟต์แวร์ที่ถูกสร้างขึ้นได้นำมาบันทึกอยู่ใน Compact Disk (CD) เพื่อที่จะทำสำเนาและคู่มือมอบให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอบเขตของการวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยนี้ครอบคลุมการออกแบบการอุดหลุมเจาะ การเลือกสรรวัตถุที่ใช้ในการอุด (ซึ่งรวมไปถึงซีเมนต์ เบนทอไนต์ และหินบด เป็นต้น) และวิธีการติดตั้งวัตถุที่ใช้ในการอุด ปัจจัยที่นำมาพิจารณาจะรวมไปถึงลักษณะทางด้านธรณีวิทยาของชั้นหิน คุณลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ ลักษณะทางอุทกวิทยา จุดประสงค์ของการอุด ลักษณะทางเคมี กิจกรรมที่อยู่ใกล้เคียงกับหลุมที่จะอุด แรงสั่นสะเทือน งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะนำไปสู่ข้อควรระวังและข้อจำกัดในการออกแบบการอุดหลุมเจาะ

งานวิจัยนี้ไม่รวมไปถึงการอุดหลุมเจาะที่อุณหภูมิสูง การอุดอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดิน และการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบในภาคสนาม

คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเชิงเคมีของข้อมูลในชั้นหิน และของวัสดุทางวิศวกรรมที่นำมาใช้ในการอุดได้ถูกประเมินจากข้อมูลในเอกสารอ้างอิง โดยเลือกใช้ค่าเชิงอนุรักษ์เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ วัสดุที่แนะนำเพื่อใช้ในการอุดเป็นวัสดุที่มีใช้และจำหน่ายในประเทศไทย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลที่ได้จากงานวิจัยจะมีผลกระทบโดยตรงกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และโดยอ้อมทางด้านเศรษฐกิจ การอุดหลุมเจาะที่ขุดขึ้นมาเพื่อสำรวจและพัฒนาในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทุก ๆ ด้านอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการที่ทันสมัยจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาล และลดการรั่วซึมของของเสียหรือสิ่งที่ต้องการกำจัดมิให้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมของประชาชน โดยทางอ้อมหน่วยงานรัฐบาลหรือผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องจะลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา แก้ไข และค่าชดเชย อันเนื่องมาจากการอุดหลุมเจาะอย่างไม่ถูกต้อง หรืออันเนื่องมาจากการรั่วซึมหรือปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาล ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขเหล่านี้ถึงแม้จะไม่มีตัวเลขเปรียบเทียบแม้แต่ในต่างประเทศ แต่ก็คาดว่าจะมีสูงกว่าเป็นทวีคูณของค่าใช้จ่ายในการอุดหลุมเจาะอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการตั้งแต่แรก

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน และดำเนินการอุดหลุมเจาะอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ นอกจากนี้ยังสามารถนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในการฝึกอบรมวิศวกรรุ่นใหม่ที่ยังขาดประสบการณ์ ซึ่งช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในขบวนการและกิจกรรมในการฝึกอบรมได้อย่างมาก และในขณะเดียวกันยังนำองค์ความรู้ใหม่นี้มาประยุกต์ใช้ในการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน ซึ่งเป็นงานของหน่วยงานรัฐบาลอื่นหรือบริษัทเอกชนที่เกี่ยวข้อง

หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ในทันทีจะรวมไปถึง

1) กรมทรัพยากรธรณี (กองน้ำบาดาล กองสิ่งแวดล้อมธรณี และกองการเหมืองแร่ เป็นต้น)
2) กรมโยธาธิการ
3) กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน
4) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
5) องค์การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย
6) บริษัทเอกชนหรือผู้ประกอบการที่ดำเนินงานเกี่ยวกับการขุดเจาะน้ำบาดาล น้ำมัน และขุดเจาะสำรวจแร่ เป็นต้น

บทที่ 1
การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในหิน ซึ่งประกอบด้วย ประเภทของการอุดหลุมเจาะ วัตถุประสงค์ และวัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ ซึ่งแบ่งออกเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป วัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมเลียม และวัสดุที่ใช้ในการสำรวจและผลิตน้ำบาดาล การพัฒนาวัสดุเชิงวิศวกรรมเพื่อใช้ในงานอุดหลุมเจาะ และข้อกำหนดในการอุดหลุมเจาะทั้งในประเทศและต่างประเทศ การทบทวนจะรวมไปถึงการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ในสาขาวิชาการต่าง ๆ โดยผลงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยที่ดำเนินงานในต่างประเทศ ข้อสรุปจะเน้นลักษณะของระบบ แนวคิด วิธีการสร้างระบบ ข้อจำกัด และการนำผลไปเปรียบเทียบกับสภาพจริงของงาน ผลของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยจะนำไปสู่แนวทางการสร้างระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับการอุดหลุมเจาะในหินที่เหมาะสม

1.1 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

หลุมเจาะในชั้นหินเป็นหลุมที่เจาะขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายประเภท Smith (1990) แบ่งวัตถุประสงค์ในการเจาะออกเป็น 9 ประเภท คือ 1) หลุมเจาะในภาคอุตสาหกรรมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย 2) หลุมเจาะสำหรับทิ้งของเสีย 3) หลุมเจาะสำหรับผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ 4) หลุมเจาะสำหรับระบายน้ำในเหมือง 5) หลุมเจาะสำหรับการทดสอบ 6) หลุมเจาะสำหรับตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน 7) หลุมเจาะที่ใช้สำหรับการสำรวจ 8) หลุมเจาะในการทำเหมืองแบบละลาย และ 9) หลุมเจาะที่ใช้ตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นหิน

1.1.1 ประเภทของการอุดหลุมเจาะ

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินสำหรับอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ สามารถจำแนกตามจุดมุ่งหมายของการอุด โดยการจำแนกที่ทำกันอย่างหลากหลายทั่วไปจะใช้เกณฑ์ที่ต่างกันเช่น Gray and Gray (1992) จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) การอุดแบบถาวร (Permanent sealing)

2) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary sealing)

3) การอุดแบบกึ่งถาวร (Semi-permanent sealing)

Smith (1994) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary sealing)

2) การอุดในหลุมเจาะที่ใช้งานอยู่ (Sealing actively used borehole) และ

3) การอุดแบบถาวร (Permanent sealing)

Fuenkajorn and Daemen (1996b, 1996c) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมทุกแขนงออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การอุดในหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ (Sealing actively used boreholes)

2) การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (Sealing unused boreholes)

1.1.2 จุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะ

โดยทั่วไปจุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะสามารถจำแนกเป็น 2 แบบตามลักษณะการใช้งาน คือ การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว และการอุดหลุมเจาะแบบถาวร

1) การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว เป็นการอุดในหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ โดยอุดในบริเวณช่องระหว่างท่อกรุ (Casing) กับชั้นหินข้างเคียง หรือเป็นการอุดในหลุมเจาะที่จะนำมาใช้ในอนาคต วัตถุประสงค์ในการอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว (Smith, 1990) คือ

(1) ป้องกันท่อกรุจากการถูกกัดกร่อน

(2) ป้องกันการพังทะลายของท่อกรุในระดับลึก เนื่องจากแรงดันด้านข้าง

(3) ป้องกันการพังทะลายของหลุมเจาะจากแรงดันด้านข้าง

(4) ป้องกันการสูญเสียน้ำโคลนในการเจาะในบริเวณที่เกิด Lost circulation

2) การอุดหลุมเจาะแบบถาวร เป็นการอุดในหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว ซึ่งประเด็นหลักที่ต้องคำนึงถึงในการอุดหลุมเจาะประเภทนี้ก็คือด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการอุดหลุมเจาะแบบถาวร (Smith, 1993; McGinty and Calvert, 1991; Tyler, 1991; Nye, 1991) คือ

(1) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากแหล่งปนเปื้อนผิวดินและแหล่งปนเปื้อนที่กักเก็บไว้ใต้ดิน

(2) ป้องกันการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน

(3) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากชั้นน้ำเสีย

(4) ป้องกันภัยเนื่องจากคนหรือสัตว์พลัดตกลงไปในหลุมเจาะ

1.1.3 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม

การอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ มีปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การอุดบรรลุตามจุดมุ่งหมาย คือ การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ ซึ่งวัสดุที่ใช้อุดก็มีหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะและปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายด้าน รวมไปถึงทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย รายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมน้ำบาดาล อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการทิ้งขยะนิวเคลียร์ได้อธิบายไว้ดังนี้

1) **วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม** อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดอย่างต่อเนื่อง วัสดุอุดหลุมเจาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม สามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

(1) น้ำโคลน (Drilling Fluid) เป็นวัสดุอุดที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับอุดในบริเวณที่ไม่สามารถทำให้แห้งได้ ซึ่งไม่สามารถใช้ซีเมนต์ได้ แต่การอุดด้วยน้ำโคลนต้องมีซีเมนต์อุดปิดหัวและท้าย (Smith, 1993)

(2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เป็นวัสดุอุดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีคุณสมบัติเหมาะสมทั้งทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5 ประเภท จากการแบ่งโดยสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials, ASTM C150, Standard for Portland Cement) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 8 ประเภท จากการแบ่งประเภทโดย American Petroleum Institute (API) (Smith, 1993)

ASTM แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ออกเป็น 5 ประเภท (Neville, 1981) คือ

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีข้อเสียคือไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงชนิดให้ความร้อนและทนด่างได้ปานกลาง เหมาะสำหรับงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันหนา ๆ และงานสร้างตอม่อขนาดใหญ่ในบริเวณที่อากาศร้อนจัด

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งเร็วหรือซุเปอร์ซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาและเกิดรอยร้าวได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา เหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว เช่น เสาเข็ม คอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ เป็นปูนซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว เหมาะสำหรับงานก่อสร้างใหญ่ ๆ โดยเฉพาะงานก่อสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีความเป็นด่างสูง แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะแข็งตัวช้ากว่าประเภทที่ 1

สำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียม API แบ่งปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยแบ่งจากความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมออกเป็น 8 ประเภท (Smith, 1990) คือ

Class A เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ft (1,830 m) ปูนซีเมนต์ Class A มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM

Class B เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ทนซัลเฟตได้ปานกลางถึงทนซัลเฟตได้สูง ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ft (1,830 m) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ตามมาตรฐาน ASTM

Class C เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ให้กำลังสูงในระยะแรก สามารถใช้ได้ทั้งกับสภาวะที่ไม่มีซัลเฟต มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือมีซัลเฟตสูง และใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ft (1,830 m) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ตามมาตรฐาน ASTM

Class D เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 6,000 ft ถึง 10,000 ft (3,050 m ถึง 4,270 m) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง สามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class E เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000 ft ถึง 14,000 ft (1,830 m ถึง 3,050 m) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันค่อนข้างสูง และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class F เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000 ft ถึง 16,000 ft (1,830 m ถึง 4,880 m) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงมาก และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class G และ Class H เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 8,000 ft (2,424 m) เป็นปูนซีเมนต์ที่สามารถผสมสารหรือสารตัวหน่วงที่นอกเหนือจากแคลเซียมซัลเฟตหรือน้ำ เพื่อให้สามารถใช้ในการอุดหลุมเจาะได้ครอบคลุมตลอดทั้งความลึกของหลุมเจาะ และในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Class G และ Class H จะมีการผสมหินละลายจากเตาหลอมหรือภูเขาไฟลงไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้สามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นวัสดุในการอุดหลุมเจาะจะอยู่ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาด ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาดและสารที่เป็นตัวเร่งหรือตัวหน่วง ปูนซีเมนต์ผสมทรายและคอนกรีต (Smith, 1993)

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาด (Neat Cement) โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ คือ ปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 lb) ต่อน้ำ 5-6 แกลลอน

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาดและผสมสารที่เป็นตังเร่งหรือสารที่เป็นตัวหน่วง สารที่เป็นตัวเร่งผสมลงไปเพื่อเพิ่มกำลังในระยะแรกและลดระยะเวลาการก่อตัว สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งโดยทั่ว ไปได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ โดยผสมแคลเซียมคลอไรด์ลงไป 2-4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงใช้ผสมเพื่อลดน้ำหนักของซีเมนต์ และควบคุมการสูญหายไปของซีเมนต์ในชั้นหินที่มีการรั่วไหลของน้ำโคลน โดยทั่วไปแล้วสารที่เป็นตัวหน่วงจะผสมเฉพาะในซีเมนต์ที่จะใช้อุดหลุมเจาะแบบชั่วคราวเท่านั้น จะไม่ใช้ผสมในปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้อุดหลุมเจาะแบบถาวร

ปูนซีเมนต์ผสมทราย (Sand Cement) โดยทั่วไปจะใช้ทราย 20-40% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมกับปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 lb) และน้ำประมาณ 7 แกลลอน

คอนกรีต (Concrete) เป็นวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับหินคลุกหรือกรวด ใช้สำหรับอุดในหลุมเจาะที่มีขนาดใหญ่ คอนกรีตที่นิยมใช้สำหรับอุดสาหกรรมปิโตรเลียม จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 5 ถุง (94 lb) ผสมกับหินคลุกหรือกรวดที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3/8 inch ปริมาตร 1 yard^3

(3) ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ ที่ใช้ในอุดสาหกรรมปิโตรเลียม (Economides et al., 1998) ประกอบด้วย

- Portland Pozzolana Cement ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา เป็นปูนชนิดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับสารจำพวกปอซโซลานิก (Pozzolanic) โดยใช้ปอซโซลานิกผสมลงไป 15-50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานาจึงมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป มีคุณสมบัติขยายตัวน้อยและมีความทึบน้ำสูง ให้ความร้อนในการรวมตัวกับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

- Ultrafine Cement เป็นปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 50-100 ไมโครเมตร Ultrafine cement เป็นวัสดุที่เหมาะสำหรับอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราวเนื่องจากมีมวลเบาและให้กำลังสูงในระยะแรก และเหมาะสำหรับอุดในบริเวณที่มีรอยแตกขนาดเล็ก เนื่องจากขนาดเม็ดที่เล็กทำให้สามารถแทรกเข้าไปอุดรอยแตกที่มีขนาดเล็กได้ง่าย

- Epoxy Cement เป็นซีเมนต์ชนิดพิเศษ สามารถใช้ได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งซีเมนต์ทั่วไปจะแข็งตัวช้าในสภาวะที่เป็นกรด จึงทำให้ Epoxy cement มีราคาแพงกว่าซีเมนต์ทั่วไป

2) วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

อุตสาหกรรมน้ำบาดาลก็เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้วัสดุในการอุดหลุมเจาะหลากหลายประเภท Smith (1993) แนะนำให้ใช้ นีทซีเมนต์ (Neat cement) ปูนซีเมนต์ผสมกับทราย ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ คอนกรีต และเบนทอไนต์แบบเม็ด Mcginty and Calvert (1991) แนะนำให้ใช้ ยิปซัมซีเมนต์ (Gypsum cement) ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์น้ำน้อย และปูนซีเมนต์แบบตวงวัด (Regulated fill-up cement) Nye (1991) แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์ คอนกรีต และน้ำโคลน

วัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลข้อกำหนดในประเทศสหรัฐอเมริกาที่แนะนำโดย Smith (1993) ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมทราย ปูนซีเมนต์ผสมเบนทอไนต์ คอนกรีต และเบนทอไนต์แบบเม็ด ซึ่งสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ในที่นี้คือใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน

ปูนซีเมนต์ผสมกับทราย ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและทราย โดยใช้ปูน 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2

ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและเบนทอไนต์ โดยใช้ปูน 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอนและผสมกับเบนทอไนต์ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ปริมาณของเบนทอไนต์ที่ใช้สามารถผสมได้ถึง 8% แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำด้วย ในอัตราส่วนเพิ่มน้ำ 1 แกลลอนต่อเบนทอไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์

คอนกรีต ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและหินคลุก โดยใช้ปูน 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อหินคลุกเท่ากับ 1 ต่อ 2

เบนทอไนต์แบบเม็ด ถ้าใช้วิธีการเทจากปากหลุมเจาะจะสามารถใช้ได้ในระดับความลึกไม่เกิน 10 ft

3) วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดิน

วัสดุในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดินโดยทั่วไปที่ใช้ในการอุดปล่องแร่ หรือการอุดแบบชั่วคราวในอุโมงค์รถไฟ คือ คอนกรีต (Auld, 1996)

คอนกรีตที่ใช้อุดปล่องแร่ มีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ทราย 770 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1050 กิโลกรัม

คอนกรีตที่ใช้ในการอุดแบบชั่วคราวในอุโมงค์รถไฟ มีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 500 กิโลกรัม ทราย 595 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1150 กิโลกรัม

4) วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์

การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และเชิงเคมี มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง วัสดุที่ใช้สำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกาก-นิวเคลียร์ ประกอบไปด้วย

เบนทอไนต์อัดตัว เป็นวัสดุชนิดแรก ๆ ที่ใช้อุดหลุมเจาะสำหรับทิ้งกากนิวเคลียร์ เนื่องจากเบนทอไนต์เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมผ่านต่ำและมีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่ใกล้เคียงกับหินทุกชนิดและมีคุณสมบัติด้านการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีสูงถึง 2.6 MPa เบนทอไนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเบนทอไนต์อัดตัว โดยการผสมเบนทอไนต์กับน้ำสะอาดหรือน้ำเค็มในอัตราส่วนที่เหมาะสม เบนทอไนต์อัดตัวนี้จะมีทั้งคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และ

ชลศาสตร์เพียงพอที่จะทำให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Ran et al., 1997; Fuenkajorn and Daemen, 1987)

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติครบทั้งในเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเคมี เนื่องจากซีเมนต์มีทั้งคุณสมบัติด้านความแข็งและการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีประมาณ 4 MPa (Fuenkajorn and Daemen, 1987)

1.1.4 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย

1) การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

การอุดกลบบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้ว ตาม พ.ร.บ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 กำหนดให้ใช้ดินเหนียวบริสุทธิ์หรือซีเมนต์เป็นวัสดุในการอุดกลบเท่านั้น

การอุดกลบบ่อด้วยดินเหนียว ใช้ดินเหนียวบริสุทธิ์จากสวนหรือท้องนา นวดให้เข้ากันดีแล้วปั้นเป็นลูกกลม ๆ ขนาดประมาณลูกปิงปอง ผึ่งแดดให้แห้งหรือหมาด แล้วใส่ลงในบ่อให้ต่อเนื่องกันตลอดเวลาเพื่อป้องกันการติดค้างบางช่วงของบ่อ แต่ถ้าหากมีการติดค้างของดินเหนียวในบ่อห้ามใช้ท่อหรือวัสดุอื่นใดกระทุ้งหรือแหย่ลงไปในบ่อ ให้ใช้น้ำฉีดสะอาดกรอกลงไปเป็นจังหวะ ๆ และต่อเนื่อง จนกว่าลูกดินที่ติดค้างอยู่จะหลุดออกจากกันแล้วเลื่อนลงสู่ก้นบ่อ ในการนำลูกดินใส่บ่อนี้จะต้องตวงด้วยภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอนและจดบันทึกไว้ เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณดินเหนียวที่ใส่ลงไปนั้นเต็มปริมาตรภายในของบ่อ

การอุดกลบบ่อด้วยซีเมนต์ ให้ผสมด้วยเครื่องผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนน้ำ 30 ลิตร ต่อซีเมนต์ 1 ถุง (50 kg) อัดซีเมนต์ลงในบ่อด้วยเครื่องสูบอัดซีเมนต์ ที่สามารถอัดซีเมนต์ได้ภายใต้ความดันไม่น้อยกว่า 50 psi ในอัตราไม่น้อยกว่า 50 แกลลอนต่อนาที ในการอัดซีเมนต์นี้ ให้อัดผ่านทางท่อที่ต่อลงไปจนเกือบสุดความลึกของบ่อ และอัดเป็นช่วง ๆ ช่วงละประมาณ 30 m จนกระทั่งซีเมนต์เต็มบ่อ หากมีการขยุบตัวของซีเมนต์ให้เติมซีเมนต์ลงไปอีกจนกว่าซีเมนต์จะหยุดการขยุบตัว

2) การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ข้อกำหนดเกี่ยวกับการอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในประเทศไทยได้บรรจุไว้ในกฎกระทรวงฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2514) แก้ไขเพิ่มเติมโดยกฎกระทรวงฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2524) โดยข้อกำหนดเกี่ยวกับการสละหลุมบรรจุอยู่ในกฎกระทรวงข้อที่ 39 และข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติหลังจากละทิ้งหรือสิ้นสุดการปฏิบัติงานบรรจุอยู่ในกฎกระทรวงข้อที่ 40

กฎกระทรวงข้อที่ 39 กำหนดว่า ก่อนดำเนินการสละหลุมผลิตผู้รับสัมปทานต้องแจ้งเหตุผลและวิธีการที่จะสละหลุมผลิตเป็นหนังสือให้อธิบดีพิจารณา เมื่อได้รับอนุมัติแล้วจึงจะดำเนินการสละหลุมผลิตได้

กฎกระทรวงข้อที่ 40 กำหนดว่า เมื่อเสร็จสิ้นการปฏิบัติงานในที่ใดหรือเมื่อสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอน ผู้รับสัมปทานหรือผู้ซึ่งสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนต้องปฏิบัติดังนี้

(ก) ทำพื้นดินและพื้นน้ำให้กลับมีสภาพเหมือนเดิมเท่าที่สามารถจะกระทำได้

(ข) ทำกำแพงหรือรั้วล้อมรอบขุม หลุม ร่องและบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้และยังใช้ประโยชน์อยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่บุคคลหรือสัตว์

(ค) ถมขุม หลุม ร่องและบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้แต่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไป ให้กลับมีสภาพเหมือนเดิมเท่าที่สามารถจะกระทำได้ เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่นหรือผู้รับสัมปทานตกลงกับเจ้าของหรือผู้ครอบครองที่ดินนั้นแล้ว

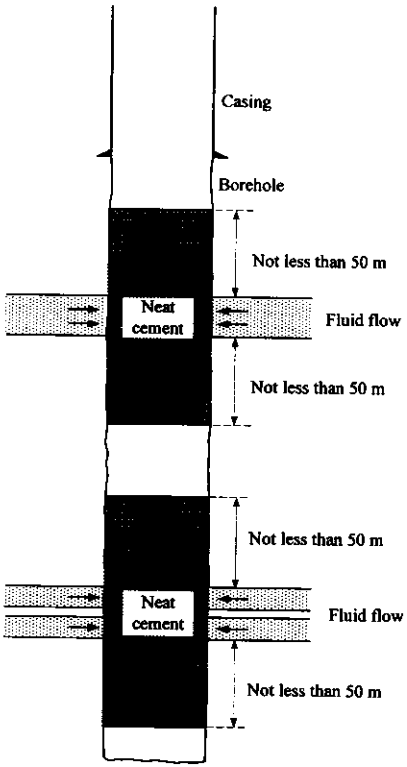
(ง) รื้อถอนฐานคอนกรีต โครงก่อสร้างและอาคารที่อยู่อาศัย นำเครื่องจักร อุปกรณ์ และวัสดุอื่นใดที่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไปแล้วออกจากบริเวณหลุมสำรวจหรือหลุมผลิตและเผาเศษปิโตรเลียมในบริเวณนั้นให้หมด ทั้งนี้เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่น

(จ) ขนย้ายหรือทำลายสิ่งที่กีดขวาง รบกวนหรือเป็นอันตรายต่อการคมนาคม การประมงหรือทรัพย์สินของแผ่นดินหรือบุคคลอื่น เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่น

โดยที่ผู้รับสัมปทานหรือผู้ซึ่งสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนจะต้องกระทำการตามข้อกำหนดให้แล้วเสร็จภายในสามเดือน นับแต่วันที่เสร็จสิ้นการปฏิบัติงานหรือวันที่สัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนแล้วแต่กรณี

ในส่วนกฎกระทรวงข้อที่ 40 ข้อย่อยที่ ค) เกี่ยวกับการถมขุม หลุม ร่องและบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้แต่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไป ได้กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้วัสดุและวิธีการในอุดกลบบ่อไว้ดังนี้

(ก) ในกรณีที่หลุมเจาะเป็นหลุมเปลือย การอุดชั้นน้ำ ชั้นน้ำมันหรือชั้นก๊าซธรรมชาติเพื่อป้องกันการรั่วซึมและป้องกันการปนเปื้อน ให้ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าชั้นน้ำ ชั้นน้ำมัน หรือชั้นก๊าซธรรมชาติเป็นระยะอย่างน้อย 50 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือชั้นน้ำเป็นระยะอย่างน้อย 50 m ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การอุดชั้นหินที่มีการไหลของของเหลวในหลุมเปลือย
(กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)

(ข) การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างปลายท่อกรุ (Casing shoe) กับหลุมเปลือย สามารถเลือกวิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ

(1) ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 m ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.2

(2) ใช้ลูกยาง (Mechanical plug) อุดที่ปลายท่อกรุแล้วใช้ซีเมนต์ที่มีความหนาอย่างน้อย 20 m อุดปิดทับบนลูกยาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.3

ค) การอุดปิดส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ สามารถเลือกวิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ

(1) ใช้ลูกยางอุดเหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement ทุกส่วนในท่อกรุ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.4

(2) ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 m ใช้ซีเมนต์อุดลักษณะเดียวกันในทุกส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.5

ง) การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับท่อกรุ ใช้ลูกยางอุดส่วนที่เป็นช่องว่างลักษณะวงแหวน (ท่อกรุท่อนที่อยู่ด้านบนมีขนาดใหญ่กว่า) แล้วใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 m ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.6

จ) การอุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุโดยท่อกรุท่อนที่อยู่ข้างในมีส่วนที่เป็น Squeezed cement ให้อุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุด้วยซีเมนต์ โดยอุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 m ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.7

ฉ) การอุดปิดปากหลุม แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

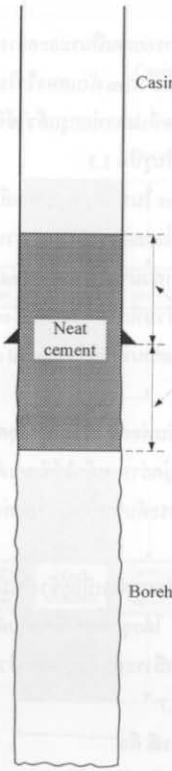
(1) กรณีที่หลุมเจาะอยู่บนบก ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 m อุดขึ้นมาจนถึงระดับปากหลุม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.8

(2) กรณีที่หลุมเจาะอยู่ในทะเล ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 m อุดขึ้นมาต่ำกว่าระดับปากหลุมไม่เกิน 50 m ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.9

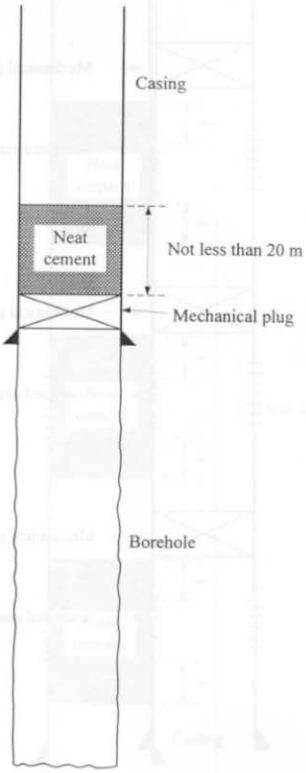
1.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา

1) การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

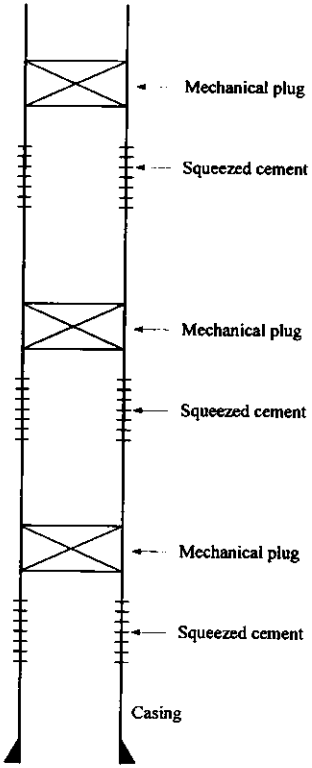
ข้อกำหนดและข้อแนะนำในการอุดกลบบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วหรือการอุดหลุมเจาะแบบถาวร ที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาแนะนำโดย National American Water Works Association (National AWWA) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ส่วนคือ ข้อกำหนดและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับ



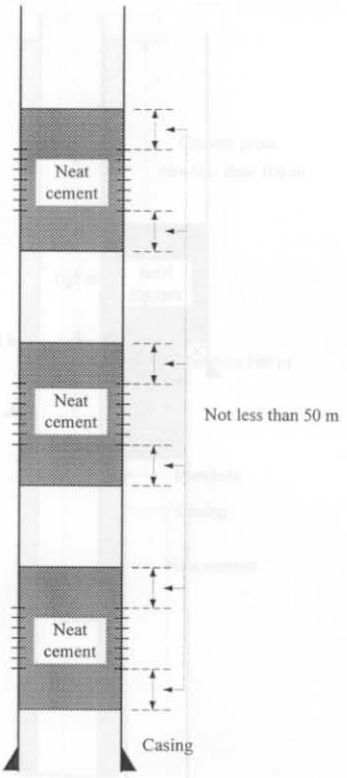
รูปที่ 1.2 การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับหลุมเปลือยโดยใช้ซีเมนต์
(กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



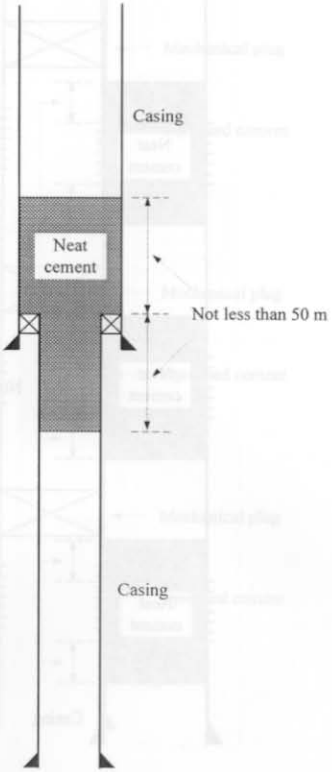
รูปที่ 1.3 การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับหลุมเปลือยโดยใช้ Mechanical plug (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



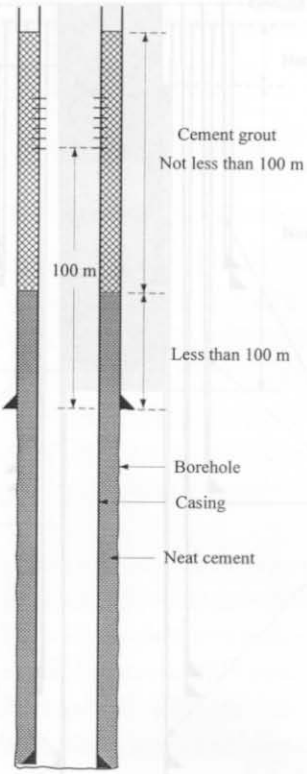
รูปที่ 1.4 การอุดปิดส่วน Squeezed cement ด้วย Mechanical plug
(กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



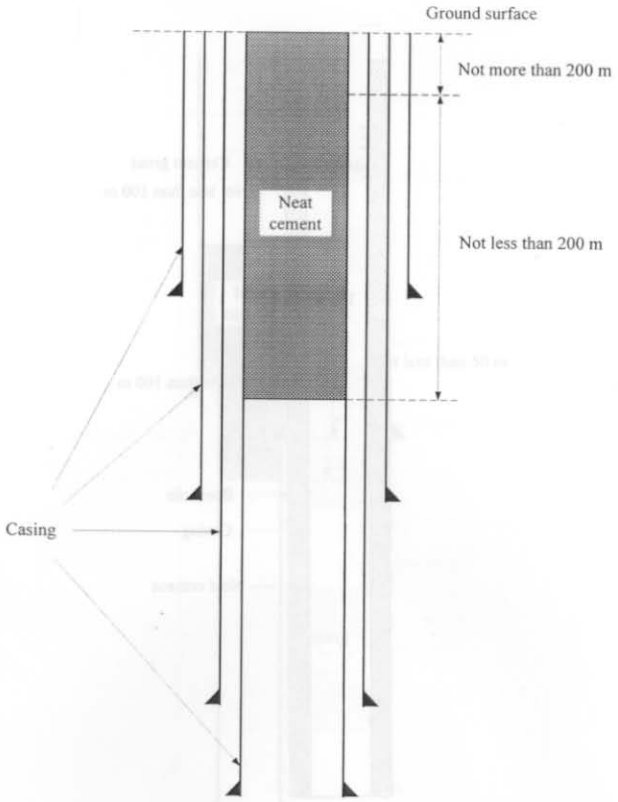
รูปที่ 1.5 การอุดปิดส่วน Squeezed cement ด้วย Cement (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



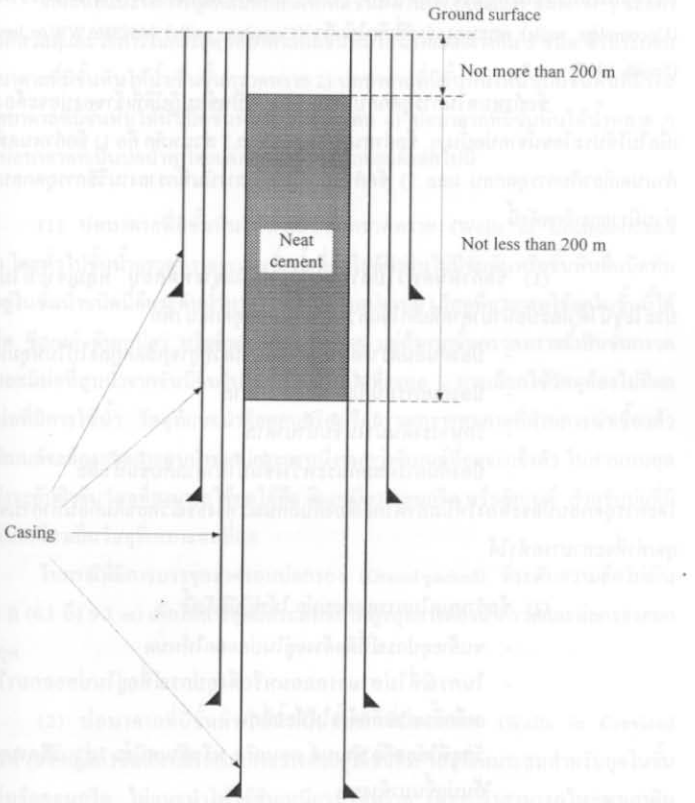
รูปที่ 1.6 การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุ (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



รูปที่ 1.7 การอุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุ (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



รูปที่ 1.8 การอุดปิดบริเวณปากหลุมเจาะที่อยู่บนบก (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)



รูปที่ 1.9 การอุดปิดบริเวณปากหลุมเจาะที่อยู่ในทะเล (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2524)

การอุดแบบถาวรในหลุมเจาะทดสอบ (Test holes) หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (Uncomplete wells) และหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (Complete wells) (ANSI/AWWA June 24,1981) (Smith, 1993)

ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อแบบถาวรเป็นข้อปฏิบัติที่เจ้าของบ่อจะต้องปฏิบัติตามเมื่อไม่ใช้ประโยชน์จากบ่อนั้น ๆ ข้อกำหนดประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ข้อกำหนดทั่วไป 2) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการอุดกลบ และ 3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

(1) ข้อกำหนดทั่วไปกำหนดไว้ว่าหลุมเจาะทดสอบ หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ และบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วจะต้องทำการอุดกลบ เพื่อ

- ป้องกันอันตรายต่อชีวิตคนและสัตว์ที่อาจพลัดตกลงไปในหลุมหรือบ่อ
- ป้องกันการปนเปื้อนของน้ำบาดาล
- รักษาแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล
- ป้องกันการผสมกันระหว่างชั้นน้ำบาดาลกับชั้นน้ำเสีย

โดยการอุดกลบบ่อจะต้องให้มีสภาพใกล้เคียงกับลักษณะทางธรณีวิทยาเดิมก่อนทำการเจาะให้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

(2) ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อ ให้ปฏิบัติดังนี้

- ขนย้ายอุปกรณ์ที่ติดค้างอยู่ในบ่อออกให้หมด
- ในกรณีที่ไม่สามารถถอนหรือดึงอุปกรณ์ที่อยู่ในบ่อออกมาได้ให้ตัดให้เหลือชิ้นส่วนติดค้างให้น้อยที่สุด
- วัสดุที่ใช้อุดคือ ซีเมนต์ คอนกรีต หรือดินเหนียว ส่วนวิธีการอุดให้อุดจากก้นบ่อขึ้นมาข้างบน

(3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบจะต้องบันทึกรายงานอย่างละเอียด ครบถ้วน และสมบูรณ์ที่สุด สามารถใช้อ้างอิงได้ในอนาคตและจะต้องส่งมอบให้กับหน่วยงานของรัฐหรือหน่วยงานท้องถิ่นที่รับผิดชอบ เพื่อแสดงว่าได้มีการอุดกลบบ่ออย่างถูกต้องและสมบูรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว รายละเอียดของรายงานประกอบด้วย

- ความลึกของตำแหน่งที่มีการอุด
- ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด
- ระดับน้ำบาดาล
- การเขียนรายงานจะต้องบันทึกทุกกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขวิธีการอุดกลบ

ข้อเสนอแนะในการอุดกลบบ่อบาดาลที่มีชั้นหินในน้ำ (Aquifer) ชนิดต่าง ๆ จะมีคำแนะนำเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการในการอุดบ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย 1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย 2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก 3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก 4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลาย ๆ ชั้น และ 5) บ่อบาดาลที่เป็นบ่อน้ำพุ โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย (Wells in Unconsolidated Formations) โดยทั่วไปชั้นน้ำกรวดทรายจะเป็นชั้นน้ำที่อยู่ใกล้ผิวดินไม่มีชั้นดินหรือชั้นหินอื่นปิดทับ ระดับน้ำที่อยู่ในชั้นน้ำชนิดนี้คือระดับน้ำบาดาลที่วัดได้จากปากบ่อ วัสดุที่สามารถใช้อุดในชั้นนี้ได้ คือ คอนกรีต ซีเมนต์ ดินเหนียว หรือดินเหนียวและทราย แต่ถ้าหากชั้นกรวดทรายนี้เป็นชั้นกรวดขนาดใหญ่และมีบ่อที่สูบน้ำจากชั้นนี้ขึ้นไปใช้อยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุด การเลือกใช้วัสดุต้องไม่มีผลกระทบต่อบ่อที่มีการใช้น้ำ วัสดุที่แนะนำคือคอนกรีตหรือกรวดทรายสะอาดที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ถ้าเลือกใช้ซีเมนต์จะต้องหยุดการสูบน้ำจากบ่อระยะหนึ่งจนกว่าซีเมนต์ที่อุดจะแข็งตัว ในส่วนบนสุดของบ่อจนถึงระดับผิวดินวัสดุที่สามารถใช้อุดได้คือ ดินเหนียว คอนกรีต หรือซีเมนต์ สำหรับบ่อที่มีขนาดใหญ่ดินเหนียวเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด

ในกรณีที่มีการบรรจุกรวดรอบบ่อกรอง (Gravel-packed) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 20 ft ถึง 30 ft (6.1 ถึง 9.1 m) เพื่อให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุดอาจต้องนำกรวดและท่อกรองออกก่อนทำการอุด

(2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก (Wells in Creviced Formations) ส่วนใหญ่แล้วชั้นหินที่มีรอยแตกจะวางตัวอยู่ใต้ชั้นดิน วัสดุที่เหมาะสมสำหรับอุดในชั้นนี้คือซีเมนต์หรือคอนกรีต ไม่แนะนำให้ใช้ดินเหนียวหรือทราย เพราะน้ำสามารถไหลพาเอาดินเหนียวหรือทรายเข้าไปอยู่ในรอยแตกได้ หรืออาจจะใช้ก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ (Coarse stone) อุดแทรกสลับกับคอนกรีตเพื่อให้น้ำสามารถไหลผ่านไปสู่หลุมผลิตได้

(3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก (Wells in Uncreviced Formations) ชั้นหินให้น้ำที่ไม่มีรอยแตกส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชั้นหินแข็งเช่นหินทราย วัสดุที่แนะนำให้ใช้อุดในชั้นนี้คือดินเหนียว ซึ่งสามารถอุดได้โดยไม่ต้องสูบน้ำออกจากบ่อและส่วนบนของบ่อจนถึงผิวดินแนะนำให้อุดด้วยซีเมนต์ คอนกรีต หรือดินเหนียว แต่ถ้าเป็นบ่อที่มีการผลิตอยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุดในชั้นนี้ให้อุดด้วยทรายที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว (Smith, 1993)

(4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลาย ๆ ชั้น (Multiple Aquifer Wells) การอุดในบ่อน้ำบาดาลประเภทนี้ก็เพื่อป้องกันการไหลเข้าไปปะปนกันของชั้นน้ำแต่ละชั้น วัสดุที่ใช้อุดคือซีเมนต์คอนกรีต หรือทราย สำหรับกรณีที่แรงดันน้ำไม่มากให้ใช้ทรายอุดแทรกสลับกับซีเมนต์หรือคอนกรีต แต่ถ้าแรงดันน้ำมากให้ใช้วิธีการอุดเหมือนกับการอุดในบ่อน้ำพุ ในกรณีที่ใช้คอนกรีตหรือลูกยางในการอุดให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่มีการผลิต หรือถ้าไม่ทราบว่าเป็นชั้นน้ำชนิดใดให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่แทรกสลับระหว่างชั้นน้ำ

(5) บ่อน้ำบาดาลพุ (Wells With Artesion Flow) การอุดในบ่อน้ำบาดาลพุไม่สามารถอุดด้วยซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ วัสดุที่สามารถอุดเพื่อปิดกั้นเหนือชั้นน้ำพุ เพื่อไม่ให้น้ำดันขึ้นมาคือหินคลุกขนาดใหญ่ (ไม่เกิน 1/3 ของขนาดบ่อ) ฝอยตะกั่ว (Lead wool) ผงเหล็ก (Steel shavings) ลูกยาง (A well packer) ท่อนไม้ ตะกั่วหล่อ (Cast-lead plug) หรือแท่งคอนกรีตที่หล่อสำเร็จ แต่ต้องเป็นแท่งที่มีความยาวกว่าขนาดของบ่อหลายเท่า เพื่อไม่ให้เกิดการเอียง

2) การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้วในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมของประเทศสหรัฐอเมริกาประกอบด้วย ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ และข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ โดยแต่ละข้อกำหนดมีรายละเอียดดังนี้

ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ (General Requirements)

หลุมเจาะทุกหลุมที่จะละทิ้งต้องแน่ใจว่าไม่ลึกถึงบริเวณไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon zone) ไม่มีชั้นน้ำจืด ไม่มีผลกระทบกับผู้ใช้ในบริเวณใกล้เคียง (Outer Continental Shelf, OCS) และจะต้องมีการป้องกันของเหลวในชั้นหินไม่ให้ไหลเข้าไปในบ่อหรือไหลปนเปื้อนกับน้ำทะเล หลุมเจาะที่มีการใช้ไม่นานหรือหมดประโยชน์จะต้องทำการอุด แต่ถ้าการอุดหลุมเจาะเหล่านั้นมีผลต่อหลุมผลิตที่อยู่ข้างเคียงจะต้องได้รับการรับรองจากผู้เชี่ยวชาญว่าไม่มีผลกระทบกับสภาพแวดล้อมเสียก่อนจึงจะไม่ต้องทำการอุดกลบหลุม

ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ (Approvals)

เจ้าของหลุมจะต้องไม่ละทิ้งหรือทำการอุดหลุมเจาะโดยปราศจากผู้เชี่ยวชาญ และเจ้าของหลุมเจาะจะต้องส่งแบบรายงานการอุดกลบ MMS-332 form (Notice of intent/ report of well abandonment) และจะต้องส่งรายงานหลังจากอุดเสร็จภายใน 30 วัน โดยปฏิบัติดังนี้

ก) แบบรายงานการอุดกลบต้องมีข้อมูลที่ประกอบด้วย ข้อมูลการเจาะ (Well log) ข้อมูลการทดสอบ (Test data) คำอธิบายรายละเอียด (Description) และแผนงานที่ประกอบด้วยความลึกหลุมเจาะ ชนิด ตำแหน่ง ความยาวของวัสดุอุด (Plugs) แผนการทำ Mudding การผสมซีเมนต์ การเจาะท่อกรุการทดสอบ การดึงก้านเจาะและปัญหาที่พบ

ข) รายงานขั้นต่อไปจะประกอบด้วยคำอธิบายของวิธีการอุดหลุมเจาะแบบสมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยประเภทของวัสดุที่ใช้ ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด และข้อมูลในข้อ ก) วิธีตัดก้านเจาะ การดึงก้านเจาะ ขนาดของก้านเจาะ ความลึกของก้านเจาะ และจำนวนของก้านเจาะที่ดึงออกมา

ข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ (Permanent Abandonment)

ก) การอุดเพื่อปิดชั้นน้ำมัน ชั้นก๊าซ และชั้นน้ำสะอาดที่อยู่ในหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างเป็นระยะอย่างน้อย 100 ft ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนและการอุดจะต้องได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญในพื้นที่

ข) การอุดเพื่อปิดหลุมเปลือยที่อยู่ต่อจากท่อกรุ ต้องอุดบริเวณรอยต่อระหว่างปลายท่อกรุกับหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 100 ft ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วย 2 วิธี คือ

(1) อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (Cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับ โดยให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ft และไม่เกิน 100 ft สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงระดับที่ต่ำกว่าท่อกรุอย่างน้อย 100 ft และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 650 ft

(2) ถ้าหลุมเปลือยที่อยู่ได้ท่อกรุเคยมีหรือคาดว่าจะมีชั้นหินที่ทำให้เกิดการสูญเสียการไหล (Lost circulation) ให้อุดโดยการติดตั้งลูกยาง (Bridge plug) ห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ft แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางโดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ft

ค) การอุดเพื่อปิดชั้นที่มีการกรุ (Isolating perforated intervals) ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างชั้นที่มีการกรุ เป็นระยะอย่างน้อย 100 ft ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วยวิธีการต่อไปนี้

(1) อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (Cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับ โดยให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ft และไม่เกิน 100 ft สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงระดับที่ต่ำกว่าชั้นที่มีการกรุอย่างน้อย 100 ft และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 50 ft

(2) อุดด้วยการติดตั้งลูกยางห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ft แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางโดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ft

(3) อุดด้วยซีเมนต์ โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากชั้นที่มีการกรุขึ้นมาด้านบน 100 ft ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ft

ง) การอุดในบริเวณที่มีเศษชิ้นส่วนของท่อกรุที่เกิดจากการตัดหรือการรื้อถอนติดค้างอยู่ ให้อุดโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง คือ

(1) กรณีที่มีท่อกรุ 2 ท่อน ถ้าเศษชิ้นส่วนทั้งหมดเป็นของท่อกรุที่อยู่ข้างใน ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างเศษชิ้นส่วนท่อกรุ เป็นระยะอย่างน้อย 100 ft ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วยวิธี 2 วิธี คือ อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยางติดตั้งห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบนระยะ 50 ft แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง โดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ft และอุดด้วยซีเมนต์ โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบน 100 ft ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ft

(2) กรณีที่เศษชิ้นส่วนท่อกรุเป็นของท่อกรุท่อนล่างซึ่งมีขนาดเล็กกว่าท่อกรุท่อนบน (เหมือนกับว่าเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ในหลุมเปลือยที่ต่อจากท่อกรุ) การอุดสามารถเลือกอุดได้ 2 วิธี, คือ อุดปิดเฉพาะเศษชิ้นส่วนท่อกรุและอุดปิดหลุมเปลือยที่มีเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ข้างใน ซึ่งสามารถทำตามวิธีการที่กล่าวไว้ในข้อ (ก) และ (ข)

จ) การอุดช่องว่าง (Annular space) ที่อยู่ในหลุมเปลือยจะต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 200 ft

ฉ) การอุดบริเวณปากหลุม ต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 150 ft ในท่อกรุที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยระดับบนสุดของแท่งซีเมนต์จะต้องอยู่ที่ระดับ Mud line หรือต่ำกว่าไม่เกิน 150 ft

ช) การทดสอบการติดตั้งและตำแหน่งของวัสดุที่อุดสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ท่อที่มีน้ำหนักของท่อไม่ต่ำกว่า 15,000 ปอนด์ กระแทกบนซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง แต่ไม่ต้องทดสอบในซีเมนต์ที่ปิดทับอยู่เหนือลูกยางหรืออุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ ใช้แรงดันที่มีค่าความดันไม่ต่ำกว่า 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในการทดสอบแรงดันซึ่งจะต้องลดไม่เกิน 10% ในระยะเวลา 15 นาที

ซ) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมเจาะ ชั้นที่ไม่ถูกอุดหรือช่องว่างที่อยู่ระหว่างซีเมนต์แต่ละช่วงที่ยังมีของเหลวค้างอยู่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเหลวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แรงดันที่เกิดจากของเหลวที่เพิ่มขึ้นส่งจะผลเสียต่อการอุดทำให้ประสิทธิภาพในการอุดลดลง

ฌ) การจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะ อุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะหรือสิ่งกีดขวางทุกชนิดจะต้องขนย้ายมาไว้ที่ระดับต่ำกว่า Mud line อย่างน้อย 15 ft หรือตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ สำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในทะเลการจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะให้ดำเนินการตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ

ญ) ข้อกำหนดสำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในพื้นที่ที่เย็นจัด (Permafrost area) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมที่อยู่ติดกับชั้นน้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าอุณหภูมิของชั้นน้ำกลายเป็นน้ำแข็งซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดสนิม ซีเมนต์ที่ใช้อุดจะต้องออกแบบให้แข็งตัวก่อนที่จะกลายเป็นน้ำแข็งและจะต้องให้ความร้อนต่ำเมื่อเกิดกระบวนการ Hydration

1.1.6 การศึกษาและวิจัยการอุดหลุมเจาะ

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา ผู้ที่ทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้อย่างจริงจังคือ Prof. Jaak J.K. Daemen และคณะ (Fuenkajorn and Daemen, 1996) งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และทางด้านเคมีของวัสดุในการอุด งานวิจัยบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 จนถึงปัจจุบันได้ทำการศึกษาและสรุปไว้ดังนี้

Fuenkajorn and Daemen (1987) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์และเบนทอไนต์กับชั้นหิน โดยนำตัวอย่างการอุดหลุมเจาะซีเมนต์และเบนทอไนต์อัดตัวมาทดสอบ Piping test เพื่อศึกษาและหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์และการบวมตัวของเบนทอไนต์ การศึกษาความเค้นเนื่องจากการบวมตัวของเบนทอไนต์อัดตัว ได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ

1) ระบบปิดซึ่งไม่มีการไหลเข้า-ออกของน้ำ
2) ระบบเปิดที่ปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง

ซึ่งการศึกษาความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์ สามารถทดสอบได้โดยการอุดซีเมนต์ในท่อเหล็กที่มีความหนาต่างกัน

ผลการทดสอบปรากฏว่าเบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบปิดไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการบวมตัว แต่เบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบเปิดเกิดการบวมตัวและสามารถวัดค่าความเค้นในแนวแกนและแนวรัศมีได้ 7.5 MPa และ 2.6 MPa ส่วนการทดสอบหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์พบว่า ความเค้นในแนวรัศมีจากการขยายตัวของซีเมนต์ในท่อที่มีความหนากว่า (วัดได้ 4.7 MPa) และความเค้นในแนวรัศมีในท่อที่บางกว่า (วัดได้ 2.7 MPa)

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินด้วยเบนทอไนต์ควรอุดใต้ระดับน้ำบาดาลจึงจะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ และการอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ควรอุดในชั้นหินแข็งเนื่องจากจะทำให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงกว่าการอุดในชั้นหินที่อ่อนกว่า

Akgun (1996) ศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของแท่งซีเมนต์ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน สามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ 1) ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งกับรัศมีของแท่งซีเมนต์ และ 2)) ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ ซีเมนต์ของ Dowell-schlumberger ใช้ Self-stress II Cement grout ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API Standard) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง มีรัศมี 6.4, 13, 25 และ 51 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38 ถึง 94 mm และความยามีค่าระหว่าง 102-178 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 4.0 และ 8.0 โดยซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Push-out test ค่าแรงกระทำ (Load) เริ่มต้นที่ 4450 N และเพิ่มแรงกระทำครั้งละ 4450 N ทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งซีเมนต์เกิดการแตก (Fail) จากนั้นบันทึกค่าแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงความยาวทั้งด้านบนและด้านล่างของแท่งซีเมนต์ทุก ๆ 30 วินาที จนกว่าตัวอย่างจะแตก

จากการทดสอบคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของซีเมนต์ที่ศึกษาคือ ความแข็งในแนวแกน (Axial strength) การยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์กับหิน (Bond strength) และความแข็งเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) ปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งทั้ง 3 ตัวมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 8.0

ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ได้ทำการทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนทอไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ (Crushed tuff) ตัวอย่างการอุดทั้งหมดจะถูกทดสอบความซึมด้วยวิธี constant head, standard falling head และ modified falling head ซึ่งใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมดจำนวน 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ

1) คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ผสมกับเบนทอไนต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ
2) ขนาดของตัวอย่าง
3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test

ผลการทดสอบระบุว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนทอไนต์และในการทดสอบ ขนาดของตัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

การทดสอบการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ โดยตัวอย่างการอุดทั้งหมดจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้ใช้เบนทอไนต์ปริมาณ 15%, 25% และ 35% โดยน้ำหนักและหินย่อยของหินทัฟฟ์ที่มีความคละและค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอแตกต่างกัน 5 ชนิด การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของตัวอย่างประกอบด้วย การทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาว (Longitudinal flow tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกน (Polyaxial permeability tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่มีอุณหภูมิสูง (High-temperature permeability tests) และการทดสอบ Piping tests

ผลการทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาวแสดงให้เห็นว่าการใช้หินย่อยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสูงผสมกับเบนทอไนต์จะทำให้ได้ค่าความซึมผ่านที่มีค่าต่ำ และค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ในการผสม ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกนพบว่า ค่าความซึมผ่านในแนวนอนสูงกว่าแนวตั้ง และความแตกต่างระหว่างค่าความซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้งจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่อุณหภูมิสูงพบว่าตัวอย่างที่อุณหภูมิ 35°C มีค่าสูงที่สุด และที่อุณหภูมิ สูงถึง 60°C ตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 25% มีค่าลดลง 10% และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 35% มีค่าลดลง 50% เมื่อเทียบกับการวัดที่อุณหภูมิ 21°C ผลการทดสอบ Piping tests พบว่าค่าความซึมผ่านในแนวตั้งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปล่อยให้ไหลผ่านโดยไม่ปิดรูด้านล่างและน้ำที่ไหลออกจากรูที่อยู่ด้านข้างมีปริมาณน้อยกว่า 2% ของปริมาณน้ำที่ไหลออกมาด้านล่างของตัวอย่าง

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะโดยใช้เบนทอไนต์สามารถทำให้ค่าความซึมผ่านลดลงได้ด้วยการใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตผสมกับเบนทอไนต์ หรือใช้เบนทอไนต์อุดในหลุมเจาะน้ำบาดาลที่มีส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟต แต่การอุดเบนทอไนต์ในน้ำที่มีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ค่าความซึมผ่านเพิ่มขึ้น ส่วนการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ควรใช้ปริมาณของเบนทอไนต์ไม่น้อยกว่า 25% โดยน้ำหนัก เศษหินย่อยหรือวัสดุเม็ดหยาบที่ใช้ผสมควรจะมีความคละกันดี (Well-graded) ใช้น้ำในการผสม 23.5% และในการอัดตัว (Compaction) ของวัสดุผสมควรให้เป็นไปตาม Standard proctor compaction หรือสูงกว่ามาตรฐาน

South and Fuenkajorn (1996) ทดสอบการใช้ซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ โดยศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านเนื้อหินกับซีเมนต์ที่อุด รวมทั้งศึกษา Tension Zone ในบริเวณรอยต่อระหว่างแท่งซีเมนต์กับชั้นหิน และศึกษาการอุดหลุมเจาะที่ความลึกต่าง ๆ กัน โดยจำลองแรงดันทั้งในแนวแกนและด้านข้างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างหินมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm และยาว 30 cm ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางหัวท้ายมีความยาว 1/3 ของความยาวของตัวอย่างหิน และตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 จะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางจนทะลุ (ลักษณะเป็นวงแหวน) แล้วอุดด้วยซีเมนต์มีความยาว 5 cm ที่ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างหิน โดยมีลักษณะเหมือนกลุ่มแรกจะแตกต่างกันตรงที่วัสดุที่อุดอยู่ตรงกึ่งกลางซึ่งกลุ่มแรกเป็นเนื้อหิน ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นซีเมนต์ ตัวอย่างหินที่ใช้ประกอบด้วยหิน 5 ชนิดที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย หินแกรนิต 2 ตัวอย่าง หินบะซอล์ต 1 ตัวอย่าง และหินทัฟฟ์ 2 ตัวอย่าง ซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดมีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ Class A ผสมกับน้ำที่ 50% โดยน้ำหนัก Dowell additive D53 10% สารเพิ่มการขยายตัวและ D65 1% ซีเมนต์ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute, 1986) ซีเมนต์ที่ผสมเสร็จมีค่าความหนาแน่น 1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร มีความแข็ง 26.2 MPa (บ่มที่ 43°C เป็นเวลา 14 วัน) มีการขยายตัว 0.18% (หลัง 14 วัน) มีความเค้นในแนวรัศมีภายหลัง 25 วัน วัดได้ 4 MPa ค่าความซึมผ่าน 8.65×10^{-13} m/s การทดสอบการไหลผ่านจะทำโดยการใช้ Permeameter โดยปล่อยน้ำจากปั๊มให้ไหลผ่านรูในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินจากหัวสู่ท้าย และเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามสภาวะการอุดอยู่ในระดับลึก 1000, 600 และ 300 m จึงใส่แรงในแนวแกน (Axial load) และความเค้นด้านข้าง (Confining stress) ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่ความเค้นในแนวแกน 23 MPa ใช้ความดันด้านข้าง 20 MPa (1000 m) ที่ความเค้นในแนวแกน 15 MPa ใช้ความดันด้านข้าง 13.5 MPa (600 m) และที่ความเค้นในแนวแกน 8.5 MPa ใช้ความดันด้านข้าง 7.0 MPa (300 m) และความดันน้ำที่ใช้ในแต่ละระดับความลึกคือ 10. 7 และ 3.5 MPa

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านแท่งซีเมนต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์เท่ากับความซึมผ่านของชั้นหิน สามารถวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FREESURF และค่าอัตราการไหลจะเพิ่มเป็นเส้นตรงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินมากกว่า 100 และเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plane2d-FE พบว่า Tension Zone จะไม่เพิ่มขึ้นถ้าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์น้อยกว่า 75% ของความเค้นในแนวสัมผัสที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ (Tangential stress)

ผลการทดสอบแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะ ณ จุดใด ๆ ว่า

(1) Expansive cement เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสามารถอุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ดี

(2) ในชั้นหินแข็งควรใช้ซีเมนต์ในการอุด เนื่องจากการติดตั้งซีเมนต์ในหินแข็งจะให้พันธะทางชลศาสตร์บริเวณรอยต่อดีที่สุด

(3) ค่าความซึมผ่านของวัสดุที่อุดควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่าของค่าความซึมผ่านของชั้นหิน

(4) ซีเมนต์ควรใช้อุดตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพราะในสภาวะที่แห้งซีเมนต์จะหดตัวและแตกจึงทำให้มีค่าความซึมผ่านสูงมาก

(5) การเลือกใช้ซีเมนต์หรือเบนทอไนต์ให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งในหลุมเจาะจะทำให้การอุดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีการอุดด้วยเบนทอไนต์ควรอุดแทรกด้วยซีเมนต์เป็น Key seal

Agkun (1997) ทำการทดสอบ Push-out test เพื่อหาวัสดุที่มีเหมาะสมในเชิงกลศาสตร์สำหรับการอุดหลุมเจาะขนาดใหญ่ในชั้นเกลือหิน ซึ่งวัสดุที่ศึกษาและใช้ในการทดสอบเป็นซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการขยายตัวได้แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Self-stress I cement และ Salt-bond II cement โดย Self-stress I ได้จากการผสมกันของ Self-stress cement 659 กรัม กับน้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl-saturated brine) 493 กรัม ส่วน Salt-bond II cement ได้จากการผสมกันของปูนซีเมนต์ Class H จำนวน 1000 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว 450 กรัม Liquid additive D604 จำนวน 64 กรัม และ Anti-foam agent (M45) จำนวน 4.4 กรัม ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ซีเมนต์ที่อุดรูทดสอบในตัวอย่างหินและเกลือหินที่ไม่เหลืออยู่มีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ

จากการทดสอบปรากฏว่าการอุดด้วย Self-stress cement ให้ค่าความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 2.2 MPa (22% ของค่าความเสียดทานระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) และการอุดด้วย Salt-bond cement ให้ค่าความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 6.1 MPa (60% ของค่าความเสียดทานระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) เพราะฉะนั้นการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินควรจะใช้ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมตาม Salt-bond II cement เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ran et al. (1997) ศึกษาคุณสมบัติของเบนทอไนต์อัดตัวแบบเคลื่อนที่ (Dynamic compaction) โดยศึกษาตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม และตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือในการผสม คุณสมบัติที่ศึกษาคือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเบนทอไนต์อัด

ตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความซึมผ่าน ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ผลกระทบของพลังงานในการอัดตัว น้ำหนักของลูกตุ้ม ความหนาของการอัดตัว และการผสมน้ำเกลือ เบนทอไนต์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ โซเดียมเบนทอไนต์ มีความถ่วงจำเพาะ 2.79 มีค่าความหนาแน่นก้อน 1.23 Mg/m^3 มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 8.7-10.5% มีความสามารถในการบวมตัวถึง 28 ml/g การอัดเบนทอไนต์แบบเคลื่อนที่ทำได้ด้วยการอัดเบนทอไนต์ 3 ถึง 10 ชั้น และใช้ลูกตุ้มในการอัด 2 ถึง 8 ครั้ง หรือใช้แรงในการอัดตัวตั้งแต่ 5,400 ถึง 21,000 kN

ผลการทดสอบพบว่า เบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.74 Mg/m^3 มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0-18% ส่วนเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.86 Mg/m^3 มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ 12% และการเพิ่มพลังงานและลูกตุ้มในการอัดเบนทอไนต์จะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดมีค่าลดลงและทำให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นการออกแบบการอุดหลุมเจาะด้วยเบนทอไนต์อัดตัวควรว่าการใช้น้ำเกลือในการผสมเบนทอไนต์อัดตัว เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่นในการผสมซึ่งจะทำให้มีค่าความพรุนและค่าความซึมผ่านต่ำกว่า

Akgun and Daemen (2002) ศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การอุ้มตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็งของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (Expensive cement) โดยการทดสอบแบบ Push-out test ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์ และรัศมีของตัวอย่างการอุดกับความแข็งของซีเมนต์ เตรียมซีเมนต์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50% เติมสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10% และสารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง มีรัศมี 6.35, 12.7, 25.4 และ 50.8 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ 1) แห้งสนิท 2) เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำน้อย และ 3) เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำปานกลาง

จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกน ความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหิน และความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรอุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลเพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

1.2 ระบบปัญญาประดิษฐ์

ระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence – Rich and Knight, 1991) หรือเรียกย่อ ๆ ในที่นี้ว่า "AI" การนำ AI เข้ามาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมหินเริ่มขึ้นเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว AI คือ การสร้างเครือข่ายของแนวคิด (Neural network) หรือขบวนการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะที่มีความซับซ้อน มีปัจจัยที่ต้องพิจารณามากมาย และมีเงื่อนไขการตัดสินใจที่แน่นอนในแต่ละขั้นตอน เครือข่ายของแนวคิดก็เปรียบเสมือนแผนภูมิที่มีแนวทางมุ่งไปหาคำตอบ โดยนำข้อมูลและปัจจัยทั้งหมดที่มีอยู่มาพิจารณา AI จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประเมินเสถียรภาพหรือการออกแบบในวิศวกรรมหินที่ต้องเผชิญกับปัญหาที่ซับซ้อนและมีความแปรปรวนของปัจจัยที่นำมาพิจารณาเช่นกัน AI ไม่ใช่ฐานข้อมูล (Database) แต่เป็นระบบที่สร้างขึ้นให้มีกลไกในการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างครบถ้วน และจะมีการประเมินด้วยข้อแม้และเงื่อนไขเพื่อมุ่งไปสู่คำตอบที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ AI จึงถูกเขียนให้อยู่ในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้มีความสะดวกในการใช้และการปรับปรุงแก้ไข

ขบวนการของการพิจารณา AI อย่างง่าย ๆ อาจจะถูกออกแบบให้เป็นไปตามหลักการที่มีอยู่แล้ว เช่น การจำแนกมวลหินในระบบ Q system (Hoek and Brown, 1980) หรือในระบบ RMR (Goodman, 1989) เป็นต้น โปรแกรมของ AI ที่ซับซ้อนขึ้นจะเขียนโดยอาศัยสูตรทางคณิตศาสตร์และทางสถิติเข้ามาช่วยในการประเมินและประมวลข้อมูล โดยจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลที่นำมาพิจารณา ซึ่งข้อมูลที่ใส่เข้าไปอาจจะครบถ้วนหรือไม่ครบก็ได้ AI ที่มีการนำประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาประกอบในการพิจารณาตัดสินใจและออกแบบบางครั้งอาจจะเรียกชื่อเป็นระบบองค์ความรู้ (Knowledge-base system) หรือระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) ซึ่งกระบวนการเขียนโปรแกรมทั้งสองระบบก็จะเหมือนกันกับระบบ AI เพียงแต่ว่าวิจารณญาณของผู้เชี่ยวชาญในการแก้ปัญหาเฉพาะอันหนึ่งจะถูกถ่ายทอดและจัดอย่างเป็นระบบในรูปของเครือข่ายแนวคิด และได้มีผู้อธิบายถึงระบบปัญญาประดิษฐ์ไว้ในเรื่องต่าง ๆ Adeli (1988b) จำแนกการทำงานของระบบปัญญาประดิษฐ์ไว้ 3 แบบ คือ

1) แบบ Forward chaining เป็นระบบที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรด้านเข้าน้อยกว่ากลุ่มของคำตอบที่อยู่ด้านนอก วิธีนี้กลุ่มตัวแปรในด้านเข้าจะเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบที่จะมุ่งสู่คำตอบที่เหมาะสมและมีอยู่มากมาย
2) แบบ Backward chaining เป็นระบบที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรด้านเข้ามากกว่ากลุ่มคำตอบที่เป็นผลเฉลยด้านออก ซึ่งวิธีนี้คำตอบจะเป็นจุดเริ่มต้นของการทำงานที่มุ่งสู่กลุ่มตัวแปรในด้านเข้าที่เหมาะสมกับคำตอบ และ
3) แบบ Combination เป็นการรวมทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน

Adeli (1988b) อธิบายถึงข้อดีและข้อเสียของระบบปัญญาประดิษฐ์ไว้ว่า ระบบปัญญาประดิษฐ์มีข้อดีคือ สามารถคิดได้อย่างเป็นระบบตามที่ผู้เชี่ยวชาญวางแนวทางไว้ สามารถคิดได้อย่างรวดเร็วและไม่ลืมตัวแปรที่ต้องนำมาพิจารณา ไม่โกหก สับเพร่าหรือตัดสินใจผิดพลาด สามารถตรวจสอบข้อมูลที่เข้ามาในระบบได้ในแต่ละขั้นตอน และสามารถปรับปรุงแก้ไขระบบที่วางไว้ได้ง่าย ส่วนข้อเสียของระบบปัญญาประดิษฐ์ คือ ขาดทักษะทางความคิดและขาดวิจารณญาณ ใช้ได้กับเฉพาะกลุ่มตนเท่านั้น และมีขอบเขตที่จำกัดในการแก้ปัญหา ซึ่ง Adeli (1988b) อธิบายขั้นตอนของการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ไว้ตามลำดับ ดังนี้

1) รวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น จากหนังสือ วารสาร บทความ รายงานการประชุม
2) ตั้งคำถามเพื่อที่จะใช้ในการสอบถามผู้เชี่ยวชาญ
3) นำคำถามไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญและนำคำตอบมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์
4) ทดสอบการทำงานของระบบโดยเทียบกับวิธีอื่น ๆ หรือกับกรณีศึกษา

Shinha and Sengupta (1989) ได้อธิบายถึงลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของระบบผู้เชี่ยวชาญว่าประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1) ส่วนฐานองค์ความรู้
2) ส่วนสื่อสารกับฐานองค์ความรู้
3) ส่วนสื่อสารกับผู้ใช้ โดยมีส่วนฐานองค์ความรู้เป็นศูนย์กลางของระบบ และแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ต่างกันออกไป

วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบปัญญาประดิษฐ์ในงานวิศวกรรมธรณีทั่วไปและวิศวกรรมหินมีอยู่มากมายหลายแขนงด้วยกัน ดังที่สรุปไว้โดย Moula et al. (1995) ซึ่งได้รวบรวมการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ในปี 1993 โดยเน้นทางด้านการประยุกต์งานวิศวกรรมดิน แสดงถึงประสิทธิภาพของการนำระบบปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมธรณี และได้ประมาณการไว้ว่าในศตวรรษหน้าระบบปัญญาประดิษฐ์จะถูกพัฒนาใช้กันอย่างกว้างขวางขึ้น ต่อมา Toll (1995) ได้รวบรวมวรรณกรรมของการพัฒนางานทางด้าน AI กับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านธรณีเทคนิค วรรณกรรมนี้ได้ครอบคลุมไปถึงงานด้านระบบผู้เชี่ยวชาญและเครือข่ายความคิด โดยทำการจำแนกตามลักษณะงานคือระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้สำหรับการคัดเลือกสถานที่ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยวางแผนการสำรวจพื้นที่ระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ช่วยในการแปรข้อมูลการสำรวจทางธรณีเทคนิค ลักษณะของพื้นดิน การจำแนกดินและหิน และการแปรความหมายของตัวแปรทาง

ด้านธรณีเทคนิค ระบบปัญญาประดิษฐ์ทางด้านงานวิศวกรรม ฐานรากทั้งงานดินและหิน ระบบปัญญาประดิษฐ์โครงสร้างกั้นดินและหิน ความลาดเอียงมวลดินและหิน ระบบปัญญาประดิษฐ์ของงานทางด้านอุโมงค์หรือการขุดเจาะใต้พื้นผิว เช่น การทำเหมืองใต้ดิน การปรับปรุงดิน ระบบน้ำใต้ดิน การก่อสร้างเขื่อน ถนน และงานดินอื่น ๆ เป็นต้น

ในส่วนของการหาคุณสมบัติของหินมีวิศวกรหลายท่านได้พัฒนาระบบปัญญา-ประดิษฐ์ขึ้น โดยอาศัยคุณลักษณะของหินและดินทางกายภาพเข้ามาประเมินคุณลักษณะทางด้านวิศวกรรมธรณี นอกจากนั้นแล้วยังนำลักษณะทางกายภาพมาใช้จำแนกคุณสมบัติของหินและดินทางด้านกลศาสตร์อีกด้วย

Wharry and Ashley (1986) ได้พัฒนาระบบฐานข้อมูลชื่อว่า SOILCON เพื่อนำมาใช้ในการสำรวจหาคุณสมบัติของดิน และนำผลที่ได้มาใช้ในงานก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค SOILCON สามารถช่วยในการแก้ปัญหาในเรื่องระดับความต้องการของการสำรวจด้านธรณีเทคนิค โดยอยู่บนพื้นฐานด้านความต้องการทางโครงสร้างและจำนวนของข้อมูลที่ต้องการรู้ในพื้นที่นั้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดอัตราความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดกับงานใต้พื้นผิว และช่วยเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือของข้อมูล

Zhang et al. (1988) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญทางด้านการจำแนกมวลหินเพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมหิน ลักษณะของการพัฒนาโปรแกรมจะใช้ประโยชน์จากการรวบรวมองค์ความรู้และกระบวนการทางความคิดของผู้เชี่ยวชาญมาสร้างเป็นระบบคอมพิวเตอร์ โดยโครงสร้างพื้นฐานของระบบประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) ระบบฐานข้อมูล ประกอบด้วยวิธีการที่ผู้เชี่ยวชาญใช้ในการแก้ปัญหา
2) ส่วนวินิจฉัยปัญหา เป็นกระบวนการนำฐานความรู้มาใช้ในการแก้ปัญหา
3) ระบบจดจำและจัดเก็บลักษณะปัญหา

โดยระบบจะถูกพัฒนาและผ่านการวิเคราะห์อย่างละเอียดรอบคอบจากผู้เชี่ยวชาญในภาคสนาม องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมที่อยู่ในรูป AI และกระบวนการนำเสนอความรู้ให้ออกมาในรูปของระบบคอมพิวเตอร์เป็นกระบวนการของการพัฒนาที่สำคัญ มีการจำแนกมวลหินโดยใช้ระบบของ GU เป็นหลัก โดยมีหลักการคือ ใช้โครงสร้างแผ่นเรียบต่าง ๆ เช่น รอยแตกเรียบ (Joints plane) แนวชั้นหิน (Bedding plane) รอยเลื่อน (Fault plane) และแผ่นเรียบอื่น ๆ เป็นต้น

Sirat and Tolbot (2001) ได้พัฒนาระบบ AI เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รอยแตกของมวลหิน โปรแกรมมีชื่อว่า ANNs มีระบบการทำงานประกอบด้วยระบบการจำแนกและระบบการทำนายลักษณะความแตกต่างของชุดรอยแตกใน Crystalline rocks และ ANNs ยังเป็นระบบทางคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วยข่องของกระบวนการมากมายที่เชื่อมเกี่ยวกันด้วยลักษณะของปัญหาที่มีอยู่ และระบบสามารถเรียนรู้ได้จากตัวอย่างที่เข้ามาโดยใช้ประโยชน์ในเรื่องความแตกต่างทางกลศาสตร์เป็นตัวพิจารณา

Singh and Goel (2001) ได้พัฒนาระบบ AI เพื่อช่วยในการทำนายคุณสมบัติความแข็งของหิน Schist โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทาง Petrographic ของหิน ลักษณะการทำงานของระบบจะเป็นแบบ Backward chaining และนำไปใช้ในการทำนายค่าแรงกดแกนเดียว (Uniaxial compressive strength) ค่าแรงดึง (Tensile strength) และดัชนีจุดกด (Axial point load strength index) โดยมีวิธีการประเมินจากองค์ประกอบของแร่ในเนื้อหิน ขนาดเม็ดของเนื้อหิน การเรียงตัวของแร่ อัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้างของเม็ดหิน ลักษณะรูปร่างของเม็ดหิน น้ำหนักที่เทียบกับพื้นที่เม็ดหิน และทิศทางการวางตัวของแนวเส้น ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปเพื่อที่ระบบจะนำไปใช้ในการประเมิน ซึ่งจะมีการนำผลไปเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างหิน 4 ชนิด ประกอบด้วย Quartzite schist, Chlorite schist, Quartz mica schist และ Biotite schist

ในด้านการออกแบบงานวิศวกรรมธรณี Ghosh et al. (1987) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อใช้ในการออกแบบการค้ำยันในอุโมงค์ของเหมืองถ่านหิน ระบบฐานความรู้ประกอบด้วย 54 กฎ หรือ 57 วิธีการ การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาสามารถใช้ระบบ Backward chaining คือ มีผลลัพธ์ของปัญหาเป็นจุดเริ่มต้นของฐานความรู้ และทำการวิเคราะห์ลักษณะที่เป็นไปได้ของผลเฉลยที่เป็นจุดเริ่ม ใช้ M.1 เป็นเปลือกของระบบ มีการทดสอบเปรียบเทียบผลโดยใช้ปัญหาจากกรณีศึกษา และทดสอบกับข้อมูลจริงที่ได้จากสภาพเหมืองถ่านหิน

Tominaga et al. (1989) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อใช้สำหรับงานควบคุมอากาศในเหมืองถ่านหิน Horonai ซึ่งเป็นเหมืองใต้ดิน การพัฒนาระบบมีจุดประสงค์เพื่อนำอากาศเย็นส่งลงไปในเหมืองเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับคนงานและทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น การออกแบบระบบการไหลเวียนของอากาศกระทำโดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ มีพื้นฐานการออกแบบมาจากวิธีการคำนวณพื้นฐานและประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบ คำแนะนำการออกแบบจะถูกนำมาสร้างเป็นเครือข่ายแนวความคิดและนำไปสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Neaupane and Adhikari (2002) ได้พัฒนาระบบ AI มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์ใต้ดิน โดยมีข้อสมมติฐานว่า การทรุดตัวของอุโมงค์จะขึ้นกับความลึกและปริมาณมวลดินที่หายไปมากกว่าค่าความแข็งของดิน ระดับน้ำบาดาลและลักษณะการก่อสร้าง ทางเครือข่ายความคิดประกอบด้วย 3 ชั้น คือ

1) ชั้นใส่ข้อมูล
2) ชั้นประเมินข้อมูล
3) ชั้นผลเฉลย

Grivas and Reagan (1988) ได้พัฒนาระบบฐานข้อมูลความรู้ที่เรียกว่า SRABCON ซึ่งใช้สำหรับประเมินความไม่มีเสถียรภาพ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของดินสำหรับงานความลาดเอียงดินที่เกิดจากธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ระบบการทำงานของซอฟต์แวร์เป็นแบบ Backward chaining มีส่วนประกอบของระบบ 6 ส่วน คือ

1) ส่วนของการวินิจฉัยปัญหา ซึ่งเป็นส่วนที่ทำการจำแนกชนิดของปัญหาโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการสำรวจการเคลื่อนตัวของความลาดเอียงประกอบด้วยชนิดของวัสดุ อัตราการเคลื่อนตัว ลักษณะรูปร่างของพื้นที่ ลักษณะความเป็นไปได้ของการเคลื่อนตัว ระดับสภาวะการแยกตัวของการแทนที่มวล ความสัมพันธ์กับโครงสร้างธรณี สถานะของการเคลื่อนตัวในปัจจุบัน และอื่น ๆ

2) ส่วนรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วยลักษณะทางธรณีวิทยาของสถานที่ตั้งความลาดเอียงมวลดินและธรณีวิทยารอบข้าง ซึ่งอาจหาได้จากแผนที่แสดงเส้นความสูง การสำรวจโดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ การออกสำรวจภาคสนาม ข้อมูลทางด้านหลุมเจาะ และการทดสอบตัวอย่างในห้องทดลอง ข้อมูลทางด้านปริมาณน้ำบาดาล ปริมาณน้ำฝน และข้อมูลด้านการติดตั้งเครื่องตรวจวัด เป็นต้น

3) ส่วนการวิเคราะห์ปัญหา ประกอบด้วยการประเมินความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของความลาดเอียงมวลดิน โดยจะอยู่บนพื้นฐานของสิ่งที่พบ ณ ที่นั้นที่พอจะหาได้ และลักษณะการเคลื่อนตัวซึ่งอาจแยกด้วยชนิดของวัสดุ มีการตั้งสมมติฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาและทดสอบสมมติฐานโดยมีการออกสำรวจภาคสนาม มีการขุดหลุมเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องทดลอง การทบทวนประวัติการก่อสร้าง รวมถึงการจดบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ในพื้นที่

4) ส่วนการประเมินเสถียรภาพของความลาดเอียง ในส่วนนี้จะประกอบด้วยการวิเคราะห์หรือส่วนเทคนิคทางตัวเลขที่ใช้ในการประเมินค่าความปลอดภัยของความลาดเอียง มีการใช้สมการความสมดุลจำกัด (Limit equilibrium) ช่วยในการประเมินค่าความปลอดภัย (Factor of safety) และมีการใช้ Finite element method (FEM) มาช่วยในการหาค่าความเค้น (Stresses) และค่าการเปลี่ยนรูปร่างในเนื้อดิน

5) ส่วนการปรับปรุงเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการทำเพื่อมุ่งหวังให้ความลาดเอียงของมวลดินมีเสถียรภาพมากขึ้น การเลือกวิธีการแก้ไขจะเป็นไปตามขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา มีการสร้างตัวอย่างการพังทลาย และการวิเคราะห์เสถียรภาพ

6) ส่วนการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นเรื่องของการวิเคราะห์ราคาและเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะ วิธีการปรับปรุง การออกแบบ และการตรวจสอบ

Sinha and Singupta (1989) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อใช้ในการประเมินเสถียรภาพความลาดเอียงของมวลหิน แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) ส่วนฐานข้อมูลองค์ความรู้

2) ส่วนวินิจฉัย

3) ส่วนเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้กับระบบ

โดยมีส่วนฐานข้อมูลเป็นศูนย์กลางของระบบ ประกอบด้วยกฎเกณฑ์ วิธีการ และฐานองค์ความรู้ที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหา ส่วนวินิจฉัยจะประกอบด้วยกฎเกณฑ์และหลักการซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกับส่วนฐานข้อมูลองค์ความรู้ และส่วนท้ายสุดคือส่วนที่ช่วยในการเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้กับระบบ โดยจะใช้ภาษา Prolog ในการทำงาน ซึ่งจะประกอบไปด้วยลักษณะรูปร่างภายนอกของระบบที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้ และกฎเกณฑ์ในรูปของความเป็นเหตุเป็นผลกัน แบ่งการวินิจฉัยออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) การตรวจสอบโดยมีผลที่ออกมาในรูปชนิดของมวลดินไหล (Landslide) โดยมีการพิจารณาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยชนิดของวัสดุที่ประกอบกันเป็นความลาดเอียง ลักษณะปัจจุบันของสภาพแวดล้อมความลาดเอียงที่เคลื่อนตัว และลักษณะปัจจุบันของส่วนที่เคลื่อนตัว เช่น ส่วนฐานของความลาดเอียง

2) การตรวจสอบชนิดของการพังทลายที่จะเกิดขึ้น โดยลักษณะการพังทลายจะออกมาในรูปของการเกิดหินตก การพังแบบแผ่นเรียบ การพังแบบรูปลิ่ม การพังแบบโค้ง และการพังแบบพลิกคว่ำ โดยการพังแบบโค้งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับมวลหินที่มีรอยแตกมากและถี่ (Heavily jointed) และมวลหินที่มีอัตราการผุกร่อนสูง

3) วิธีแก้ไขชนิดของการไหลที่เกิดขึ้น หากเป็นการไหลต่างชนิดกันก็ต้องการวิธีแก้ปัญหาที่ต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามจะต้องอยู่บนพื้นฐานทางกลศาสตร์ และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

Denby and Kizil (1991) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญให้เป็นระบบที่ช่วยในการประเมินความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดสำหรับการออกแบบเหมืองถ่านหินแบบเปิด โดยได้พัฒนาต่อมาจากระบบผู้เชี่ยวชาญที่ชื่อว่า ESDS เป็นระบบที่ช่วยในการประเมินความเสี่ยงและออกแบบความลาดเอียงมวลหินที่พัฒนาด้วย Prolog และตั้งอยู่บนพื้นฐานของความรู้ที่ประกอบด้วยหลักการมากกว่า 150 หลักการ และมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย รอยเลื่อนของรอยแตก ข้อมูลในขอบเขตของรอยเลื่อน การกระทำเก่าที่มีอยู่ในบริเวณนั้น ๆ ระดับน้ำใต้ดิน รูปสัณฐานความลาดเอียงของมวลหิน ความโค้งของความลาดเอียงมวลหิน ค่าคุณภาพของมวลหิน และวิธีการเจาะระเบิด แต่ต่อมาพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นโดยเฉพาะในระบบของการบำรุงรักษาและการติดต่อกับชุดโปรแกรมอื่น ๆ ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงกลไกการทำงานของระบบใหม่ โดยการเปลี่ยนมาใช้เปลือกของระบบที่

เรียกว่า Xi-Plus ข้อดีของระบบนี้คือ สามารถทำงานได้ดีบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้ภาษาการทำงานที่กะทัดรัดและง่ายต่อการเข้าใจของมนุษย์ และสามารถเชื่อมติดต่อกับชุดโปรแกรมอื่น ๆ ภายนอกได้ดี ESDS ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่จะทำงานได้ 2 ระบบ คือ การทำงานแบบมีการตอบโต้กันระหว่างผู้ใช้กับระบบ และการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยระบบแรกจะเป็นการทำงานที่เป็นไปตามคำถามที่กำหนดขึ้นโดยเริ่มจากคำถามง่าย ๆ เช่น ลักษณะธรณีวิทยาของสถานที่ จุดประสงค์ของการออกแบบความลาดเอียงของมวลหินและจุดประสงค์ของการทำงาน สำหรับวิธีแรกนี้จะมีข้อดีคือทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้อย่างคร่าว ๆ ถึงวิธีการทำงานของระบบ ในส่วนของการทำงานที่เป็นแบบอัตโนมัติระบบต้องการข้อมูลที่อยู่ในรูปอิเล็กทรอนิกส์ของข้อมูลทางธรณีวิทยาและรูปร่างแผนผังผู้ใช้จะต้องทำการ Digitizing โครงร่างของงานที่จะทำโดยใช้ AutoCAD สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของระบบทั้งสองวิธีจะอยู่ในรูปของลักษณะการพังทลายพร้อมคำอธิบาย รวมทั้งภาพโครงร่าง (Graphic model) และจากการทดสอบการทำงานของโปรแกรมเบื้องต้นพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นในส่วนของผลที่จะออกมาในรูปของภาพโครงร่าง พบว่ามีการทำงานได้ช้า (ใช้เวลาในการทำงานมากกว่า 8 ชั่วโมง) ในการประมวลภาพโครงร่าง จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานในส่วนนี้มาเป็นการทำงานด้วย Pascal ซึ่งให้ผลการทำงานที่เร็วขึ้น (ต่ำกว่า 5 นาที)

Hao and Zhang (1994) ได้สร้างระบบฐานข้อมูลเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงของมวลหิน โดยใช้ประสบการณ์ความชำนาญและจากกรณีศึกษานำมาสร้างเป็นลักษณะโครงสร้างต้นไม้ มีการนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นในการประเมินเสถียรภาพความลาดเอียงของมวลหินมาพิจารณา เช่น คุณลักษณะการเรียงตัวของชั้นหิน ชนิดของชั้นหิน ชนิดของโครงสร้างมวลหิน ลักษณะสภาพแวดล้อม รูปร่างความลาดเอียงของมวลหิน คลื่นไหวสะเทือน แรงทางด้านวิศวกรรม ปริมาณน้ำในบรรยากาศ และกระบวนการผุกร่อน เป็นต้น ระบบใช้ Fuzzy set theory สำหรับช่วยในกระบวนการแสดงชุดของความไม่ต่อเนื่อง (Joint set) ใช้ภาษา C++ ในการควบคุมการทำงานของระบบ มีโครงสร้างโดยรวมของฐานข้อมูลประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1) Task file
2) Parameter file และ
3) Rule file

ระบบฐานข้อมูลจะใช้ทั้งระบบ Forward chaining และ Backward chaining หรือใช้ทั้ง 2 ระบบในกรณีที่ปัญหามีความซับซ้อนมาก ๆ

Faure et al. (1995) ได้สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญที่มีชื่อว่า XPENT นำมาช่วยวิเคราะห์ในเรื่องเสถียรภาพความลาดเอียงของมวลหินและมวลดิน วินิจฉัยถึงชนิดของปัญหาดินถล่ม (Landslide) ซึ่งเป็นไปตามข้อมูลพื้นฐานประกอบด้วย ข้อมูลทางด้านธรณีวิทยา พืช ลักษณะธรณี

สัณฐานทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก และอุทกธรณีวิทยา XPENT ประกอบด้วย 3 ส่วนที่ทำหน้าที่ต่างกัน คือ

1) ส่วนสื่อสารกันระหว่างระบบกับผู้ใช้
2) ส่วนสื่อสารกันระหว่างระบบกับฐานข้อมูล
3) ส่วนสื่อสารกันระหว่างระบบกับโปรแกรมการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

โดย XPENT จะประยุกต์ใช้ได้กับ 6 ลักษณะมวลดิน คือ

1) หินแข็ง
2) ดินเหนียวที่มีการอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) หินไม่แข็ง (Weak rock) และชุดดินและหินที่มีความซับซ้อนมาก ๆ
3) หินที่ผุกร่อน (Weathered soil) และพวกหินที่ผุพังอยู่กับที่ (Residual soil)
4) ดินลมหอบ (Loess)
5) ดินที่ไม่มีความเชื่อมติด (Cohesionless soil)
6) ดินเหนียวอ่อน (Soft clay)

ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของ XPENT ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

1) DOGE เป็นส่วนที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านธรณีเทคนิคและตรวจสอบข้อมูลว่าสามารถนำไปใช้ได้หรือไม่
2) ISQUES เป็นส่วนที่ช่วยในการเชื่อมต่อฐานข้อมูล
3) DIAG เป็นส่วนที่วิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมของความลาดเอียงที่พิจารณา
4) PACOS เป็นส่วนที่ช่วยในการออกแบบระบบการตรวจวัด ตรวจสอบ และแก้ไขการคำนวณ

XPENT มีการใช้ KOD method หรือ The Knowledge orientated design เป็นตัวช่วยในการประเมินเสถียรภาพความลาดเอียง โดยจะใช้ได้กับลักษณะมวลดินที่เป็นแบบเนื้อเดียวกัน

Homoun and Masri (1998) ได้พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญที่มีชื่อว่า CSEES เพื่อช่วยในการประเมินความเป็นไปได้ของการพังทลายที่เกิดจากความลาดเอียงของมวลดินและลาดดินถม โดยใช้ Fuzzy sets theory คือ การปรับปรุงเทคนิคการเลียนแบบที่เรียกว่า Monte corlo technique เป็นวิธีการที่ได้มาซึ่งความเป็นไปได้ด้านการพังทลายของความลาดเอียงของมวลดิน และรวมเข้ากับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของความลาดเอียง เช่น ลักษณะทางธรณีวิทยา ภูมิประเทศ ธรณีสัณฐาน ปริมาณน้ำฝน พืช และลักษณะการระบายน้ำ เป็นต้น มีการตรวจสอบผลการวิเคราะห์และประเมินโดยการนำผลไปเปรียบเทียบกับสภาพจริงของปัญหา

วรากร ไม้เรียง และ วรรณี สุขสาตร (2540) ได้สร้างระบบองค์ความรู้เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงของมวลดินในประเทศไทย โดยจะเห็นว่าปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางด้านการก่อสร้างในลักษณะโครงสร้างใหญ่ ๆ เช่น งานเขื่อนดิน งานถมดินบนชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยบ่อยครั้งมักเกิดการพังทลายของชั้นลาดเอียงมวลดิน ทำให้เกิดความเสียหายคิดเป็นมูลค่ามากมายหลายร้อยหลายพันล้านบาท และการประเมินตัวเลขความเสียหายยังไม่สามารถประเมินได้ชัดเจนมากนัก เนื่องจากประเทศไทยยังขาดการจัดการข้อมูลที่เป็นระบบ ดังนั้นจึงได้คิดสร้างระบบฐานข้อมูลซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงมวลดินด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีการพัฒนาประกอบด้วยการจำแนกประเภทการพังทลายของความลาดเอียงมวลดิน การรวบรวมวิธีการปรับปรุงแก้ไขเสถียรภาพความลาดเอียงมวลดินว่ามีขั้นตอนดำเนินการอย่างไร โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลและองค์ความรู้จากบทความทางวิชาการ จัดทำแบบสอบถามและบทสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ และทำการจัดกลุ่มของข้อมูลและองค์ความรู้ ซึ่งประกอบด้วย 3 กลุ่ม คือ กลุ่มของข้อมูลแสดงภาพชั้นดิน กลุ่มวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงมวลดิน และกลุ่มการปรับปรุงเสถียรภาพความลาดเอียงของมวลดิน โดยมีขั้นตอนและวิธีการสร้างระบบฐานข้อมูลดังนี้

1) ศึกษาจากประสบการณ์ในการปฏิบัติงานด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงมวลดินในประเทศไทยที่ได้จากองค์กรหรือหน่วยงานราชการ เช่น กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ เป็นต้น โดยทำการตั้งคำถามและให้ผู้เชี่ยวชาญขององค์กรนั้น ๆ เป็นผู้ตอบคำถาม
2) ทำการทบทวนเอกสาร สิ่งตีพิมพ์ และทฤษฎีทางด้านความลาดเอียงมวลดิน
3) สร้างฐานข้อมูลการพังทลายของความลาดเอียงมวลดินด้วยการรวบรวมข้อมูลทางด้านลักษณะการพังทลายของความลาดเอียงมวลดิน
4) สร้างเป็นระบบฐานความรู้ สำหรับจุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงมวลดินคือการหาค่าต่ำสุดของค่าความปลอดภัย

ซึ่งมีการกำหนดรูปแบบของการพังทลายที่เกิดขึ้นในความลาดเอียงมวลดินไว้ 3 ลักษณะดังนี้

1) การพังทลายแบบโค้งหรือ Circular
2) การพังทลายแบบแผ่นหน้าเรียบ (Translation on planar surface) มักจะเกิดขึ้นกับชั้นดินบาง ๆ ที่วางตัวอยู่บนชั้นหินหรือดินแข็ง
3) การเคลื่อนตัวของมวลดินรูปลิ่ม

ตามหน้าที่มีค่าอ่อนหนึ่งแนวหรือมากกว่าหนึ่งแนว การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงของมวลดินจะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปัญหาในสมดุลจำกัด (Limit equilibrium analysis) โดยอยู่ภายใต้กฎของการพังทลายของ Coulomb

จะเห็นได้ว่าถึงแม้เทคโนโลยีทางด้าน Artificial intelligence ได้เกิดขึ้นมาเพียง 20 ปี เท่านั้น แต่ก็มี AI ซอฟต์แวร์มากมายที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเฉพาะกิจในหลาย ๆ ด้านโดยผู้เชี่ยวชาญและวิศวกรนับร้อยท่าน นอกจากเอกสารอ้างอิงที่ได้กล่าวข้างต้นยังมีบทความอีกมากมายที่ได้กล่าวถึงการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ และนำมาประยุกต์ใช้ในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณี อย่างไรก็ตามซอฟต์แวร์ AI ด้านการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่ศึกษาในโครงการวิจัยนี้ยังไม่มีผู้ใดเขียนขึ้นในเมืองไทย ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงถือได้ว่าเป็นโครงการใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นองค์ความรู้ใหม่ของงานวิศวกรรมธรณีในประเทศไทย

บทที่ 2
วัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ ในส่วนของวัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะจะเน้นไปที่ชนิดและคุณสมบัติที่สำคัญที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบรวมทั้งการเลือกสรรวัสดุที่เหมาะสม คุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบและผลการวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งเนื้อหาส่วนใหญ่ได้สรุปไว้ในบทที่ 1 แล้ว ส่วนวิธีการอุดหลุมเจาะจะเน้นไปที่วิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง นอกจากนั้นในบทที่ 3 ก็จะกล่าวถึงคุณลักษณะเฉพาะ (Specifications) ของวัสดุแต่ละชนิดที่จะคัดเลือกมาใช้ในระบบผู้เชี่ยวชาญโดยละเอียดต่อไป

2.1 วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ

วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถจำแนกในที่นี้ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) วัสดุเม็ดหยาบ (Granular materials) 2) เบนทอไนต์ (Bentonitic materials) 3) ซีเมนต์ (Cementitious materials) และ 4) วัสดุผสม (Mixture materials) ซึ่งแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 วัสดุเม็ดหยาบ

วัสดุเม็ดหยาบ ได้แก่ กรวด (Gravel) ทราย (Sand) และหินย่อย (Crushed rock) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความซึมผ่านค่อนข้างสูงและมีข้อจำกัดด้านความลึก แต่เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ทรายมีขนาด 0.06-2.0 mm มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-2}-10^{-7} m/s กรวดมีขนาด 2.0-60 mm มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 1-10^{-3} m/s (Freeze and Cherry, 1979) กรวด ทรายหรือหินย่อยที่จะใช้อุดหลุมเจาะจะต้องมีความคละกันดี (Well graded) มีค่า Coefficient of uniformity (C_u) มากกว่าหรือเท่ากับ 16 และมีขนาดเม็ดที่ใหญ่ที่สุด (Maximum particle size) ไม่เกิน 1/10 ของขนาดหลุมเจาะ (Daemen and Fuenkajorn, 1996)

2.1.2 เบนทอไนต์

เบนทอไนต์มีแร่ที่เป็นส่วนประกอบหลัก คือ แร่มอนมอริลโลไนต์ ซึ่งอยู่ในกลุ่มของแร่ดินเหนียวสเมกไทต์หรือที่เรียกว่าดินเหนียวที่สามารถบวมตัวได้ แร่มอนมอริลโลไนต์มีสูตรเคมี คือ $(OH)_4Al_4Si_8Q_{20}{\cdot}nH_2O$ ประกอบด้วยแผ่นอลูมินารูปแปดเหลี่ยมที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นซิลิการูปแปดเหลี่ยม 2 แผ่น การจับตัวกันระหว่างแผ่นค่อนข้างหลวมทำให้เป็นแร่ธาตุที่ไม่อยู่ตัว

ดังนั้นเมื่อเปียกจึงดูดซับน้ำได้มากหลังจากนั้นจึงเกิดการบวมตัวและขยายตัว การบวมตัวของแร่มอนมอริลไนต์ทำให้เบนทอไนต์มีคุณสมบัติความคันเนื่องจากการขยายตัวและมีความซึมผ่านที่ต่ำ โดยเบนทอไนต์ มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-7}-10^{-11} m/s สามารถขยายตัวได้ถึง 12-15 เท่าของขนาดเดิม (Papp, 1996) และมีค่าความคันเนื่องจากการขยายตัวระหว่าง 1-15 MPa ความหนาแน่นแห้งมีค่าระหว่าง 1.4-1.8 t/m^3 (Pusch and Bergstrom, 1980)

แร่มอนมอริลโลไนต์สามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ตามชาตุหลักที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออน คือ กลุ่มแคลเซียม และกลุ่มโซเดียม ดังนั้นเบนทอไนต์จึงมี 2 ประเภท คือ แคลเซี่ยมเบนทอไนต์ และโซเดียมเบนทอไนต์ เบนทอไนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะจำแนกออกเป็น 4 คุณลักษณะ คือ 1) High-solids bentonite grout 2) เบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Chips or tablets bentonite) 3) เบนทอไนต์เม็ดละเอียด (Granular bentonite) และ 4) เบนทอไนต์อัดตัว (Pre-compressed bentonite)

1) **High-solids bentonite grout** เป็นวัสดุที่ใช้เบนทอไนต์ผงหรือเบนทอไนต์เม็ดละเอียดผสมกับน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะด้วยวิธีการ Grout โดยการผสมจะใช้เบนทอไนต์อย่างน้อย 20% และจะมีค่าความซึมผ่านประมาณ 10^{-10} m/s ข้อดีของการใช้ High-solids bentonite grout ในการอุดหลุมเจาะ คือ (Papp, 1996)

(1) สามารถอุดได้โดยไม่เกิดการติดค้าง (Bridge) และเป็นของเหลวที่มีความข้นสม่ำเสมอ

(2) สามารถอุดในชั้นที่มีค่าความซึมผ่านสูงได้ และสามารถแทรกเข้าไปอุดในช่องว่างระหว่างเม็ดได้

(3) การก่อตัวของ High-solids bentonite grout มีโครงสร้างที่ทำให้การอุดมีเสถียรภาพ

(4) สามารถยึดติดกับท่อกรุหรือหลุมเจาะได้ดีเนื่องจากการบวมตัวของเบนทอไนต์

(5) สามารถผสมได้ง่ายและไม่มีปัญหาอันเนื่องมาจากการแข็งตัวก่อนกำหนด

2) **เบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือแบบเม็ด** เบนทอไนต์แบบเกล็ดจะมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดไม่สม่ำเสมอโดยมีขนาดระหว่าง 0.63-1.91 cm มีค่าความชื้นระหว่าง 12%-16% เนื่องจากเบนทอไนต์แบบเกล็ดมีค่าความชื้นที่สูงและบวมตัวค่อนข้างช้า เมื่อเทเบนทอไนต์แบบเกล็ดลงไปถึงระดับน้ำบาดาลจะทำให้สามารถผ่านลงไปได้โดยไม่เกิดการติดค้าง ส่วนเบนทอไนต์แบบเม็ดจะมีขนาดที่สม่ำเสมอกว่า คือมีขนาดระหว่าง 0.63-1.26 cm มีค่าความชื้นน้อยกว่า 10% การใช้เบนทอไนต์แบบเม็ดในการอุดหลุมเจาะจึงมักจะพบปัญหาการติดค้างที่ระดับน้ำบาดาล เนื่อง

จากเบนทอไนต์แบบเม็ดมีค่าความชื้นที่ต่ำ การดูดซับน้ำจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เบนทอไนต์แบบเม็ดมีความเหนียวและเกาะกันเป็นก้อนอยู่ที่ระดับน้ำบาดาล เบนทอไนต์แบบเกล็ดและแบบเม็ดใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 15 m (Papp, 1996)

3) **เบนทอไนต์เม็ดละเอียด** มีขนาดเล็กกว่าเบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือเม็ด ใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะโดยใช้วิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ

(1) เทลงไปในหลุมเจาะจากปากหลุม แต่มักมีปัญหาเกิดการติดค้าง (Bridge plug) เมื่อเทลงไปถึงระดับน้ำบาดาลในหลุมเจาะ

(2) ใช้ผสมกับน้ำ โดยใช้เศษเบนทอไนต์ 1.5-2 ปอนด์ต่อน้ำ 1 แกลลอน และผสม Polymer-water ลงไปด้วยเพื่อลดเวลาในการก่อตัวและการขยายตัว (Smith, 1994)

4) **เบนทอไนต์อัดตัว** เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะที่ใช้เบนทอ ไนต์เม็ดละเอียดหรือเบนทอไนต์แบบเม็ดผสมกับน้ำหรือน้ำเกลือแล้วนำไปอัดตัวในแม่แบบ (Mold) ซึ่งการเตรียมเบนทอไนต์อัดตัวมีขั้นตอนดังนี้ (Ran et. al, 1997)

(1) ชั่งน้ำหนักของเบนทอไนต์ และหาปริมาณน้ำหรือน้ำเกลือที่จะใช้ผสม ซึ่งใช้สูตรดังนี้

$$W_a = W[(100-W_i)/100]\,[(W_c-W_i)/100] \qquad 2.1$$

โดยที่

W_a = น้ำหนักของน้ำหรือน้ำเกลือที่ต้องใช้ผสมกับเบนทอไนต์

W = น้ำหนักของเบนทอไนต์

W_i = ความชื้นที่มีอยู่ในเบนทอไนต์ก่อนนำมาอัดตัว

W_c = ความชื้นในเบนทอไนต์อัดตัว

(2) นำเบนทอไนต์และน้ำหรือน้ำเกลือที่เตรียมไว้มาผสมกัน โดยการผสมต้องฉีดน้ำให้เป็นฝอยหรือพรมน้ำลงในเบนทอไนต์และคลุกเคล้าให้เข้ากัน ต้องค่อย ๆ เพิ่มปริมาณน้ำและคลุกเคล้าเพื่อไม่ให้เบนทอไนต์จับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นนำเบนทอไนต์ที่ผสมเสร็จมาบ่มไว้ในถังพลาสติกแล้วปิดไว้ไม่ให้สัมผัสกับอากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 72 ชั่วโมง ในการบ่มต้องบ่มเบนทอไนต์ 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งถังพลาสติก

(3) วิธีการบดอัดเบนทอไนต์ตามมาตรฐาน ASTM D1557 สามารถใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก (Rammer) แบบมาตรฐาน 10 lb (44.5 N) หรือแบบพิเศษ 20 lb (80 N) ส่วนแม่แบบ (Mold) ใช้ได้ทั้งแม่แบบมาตรฐานเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 in หรือ 6 in (10 cm หรือ 15 cm) และแม่แบบชนิดปรับเปลี่ยนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 in, 2.0 in ถึง 4.0 in (3.8 cm, 5.0 cm ถึง 10 cm) การบดอัดทำ 5 ชั้น ถ้าใช้ลูกตุ้มน้ำหนักแบบมาตรฐานให้บดอัดชั้นละ 50-100 ครั้ง หรือถ้าใช้ลูกตุ้มน้ำหนักพิเศษให้บดอัดชั้นละ 25-100 ครั้ง

2.1.3 ซีเมนต์

วัสดุอุดหลุมเจาะกลุ่มซีเมนต์ ประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ชนิดธรรมดา (Normal neat cement) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, II, III, และ VI

2) ปูนซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต (High sulfate resistant cement) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V

3) คอนกรีตชนิดธรรมดา (Normal concrete) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, II, III, และ VI ผสมกับมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ

4) คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต (High sulfate resistant concrete) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ผสมกับมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ

รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุกลุ่มซีเมนต์ได้ให้ไว้ในบทที่ 1

2.1.4 วัสดุผสม

วัสดุผสม คือ เบนทอไนต์ผสมกับกรวด ทราย หรือหินย่อย โดยใช้เบนทอไนต์ 35% โดยน้ำหนัก ผสมกับกรวด ทราย หรือหินย่อยขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ

2.2 วิธีการอุดหลุมเจาะ (Placement Methods)

วิธีการอุดหลุมเจาะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมหลุมเจาะก่อนอุด และ 2) การใส่หรือบรรจุวัสดุอุดลงในหลุมเจาะ

2.2.1 การเตรียมหลุมเจาะก่อนการอุด

การเตรียมหลุมเจาะก่อนการอุดมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้

1) ทำความสะอาดหลุมเจาะ โดยการเจาะหรือสูบเอาเศษหินและอุปกรณ์ที่ผุกร่อนออกจากหลุมเจาะ

2) อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ยังติดค้างอยู่ในหลุมเจาะ เช่น ท่อ ท่อสูบน้ำ ท่อกรองและท่อกรุต้องดึงออกจากหลุมเจาะให้หมด แต่ถ้าไม่สามารถดึงออกมาได้ให้เจาะหรือตัดท่อเพื่อให้วัสดุที่ใช้อุดสามารถไหลเข้าไปอุดช่องว่างที่อยู่ข้างนอกท่อได้

3) ใช้แคลิเปอร์ลอก (Caliper log) เพื่อหาขนาดที่แท้จริงของหลุมเจาะในแต่ละความลึกและหาตำแหน่งของท่อกรุที่ยังติดค้างอยู่ ถ้าเป็นหลุมเจาะขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 6 นิ้ว) และมีความต้องการทางด้านการป้องกันมลพิษ หลุมเจาะเหล่านั้นควรจะมีการสำรวจด้วยกล้องโทรทัศน์ (Video log)

4) ทำการคำนวณปริมาตรของช่องว่างในหลุมเจาะแต่ละช่องความลึกเพื่อนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุที่จะใช้อุด

2.2.2 การใส่วัสดุอุดลงในหลุมเจาะ

1) คำนวณปริมาตรของวัสดุอุดจากเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะในแต่ละความลึกและจากความยาวของวัสดุอุดที่ได้ออกแบบไว้

2) การอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุเม็ดหยาบ สามารถอุดโดยวิธีการเทจากปากบ่อลงไปถึงตำแหน่งที่ต้องการอุดโดยตรง หรือใช้วิธีการเทผ่านท่อลงไปโดยให้ปลายท่ออยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการอุด

3) การอุดหลุมเจาะด้วย High-solids bentonite grout มีวิธีการอุดดังนี้

(1) ใช้เครื่องสูบน้ำที่มีกำลังเพียงพอที่จะสามารถสูบน้ำออกจากหลุมเจาะให้หลุมเจาะแห้งก่อนที่จะทำการอุด

(2) ใช้เครื่องปั๊มสูบ High-solids bentonite grout แล้วฉีดอุดในตำแหน่งที่ต้องการ โดยอุดตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่ล่างสุดแล้วค่อย ๆ ยกหัวฉีดขึ้นมา

4) การอุดหลุมเจาะด้วยเบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือแบบเม็ด สามารถอุดโดยวิธีการเทจากปากบ่อลงไปถึงตำแหน่งที่ต้องการอุดโดยตรง หรือใช้วิธีการเทผ่านท่อลงไปโดยให้ปลายท่ออยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการอุด แต่การอุดด้วยวิธีนี้ต้องตรวจสอบว่ามีการติดค้างของเบนทอไนต์หรือไม่และสามารถใช้ท่อกระทุ้งเพื่อลดปัญหาการติดค้างได้ระดับหนึ่ง

5) การอุดหลุมเจาะด้วยเบนทอไนต์อัดตัว มีวิธีการอุดดังนี้

(1) สูบน้ำออกจากหลุมเจาะให้แห้ง

(2) นำเบนทอไนต์อัดตัวที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในตำแหน่งที่ต้องการอุด

6) การอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์หรือคอนกรีต มีวิธีการอุดดังนี้

(1) สูบน้ำออกจากหลุมเจาะให้แห้ง

(2) ใช้เครื่องปั๊มสูบซีเมนต์หรือคอนกรีตฉีดลงในตำแหน่งที่ต้องการ โดยอุดตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่ล่างสุดขึ้นมา

7) การอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับทราย กรวด หรือหินย่อย มีขั้นตอนดังนี้

(1) สูบน้ำออกจากหลุมเจาะให้แห้ง

(2) ใช้เครื่องปั๊มสูบวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับทราย กรวด หรือหินย่อย ฉีดลงในตำแหน่งที่ต้องการ โดยอุดตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่ล่างสุดขึ้นมา

บทที่ 3
การสร้างโครงข่ายทางแนวคิด

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการสร้างโครงข่ายทางแนวคิดเพื่อสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญโดยใช้ผลที่ได้จากการสัมภาษณ์และการวิเคราะห์องค์ความรู้ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ โดยเนื้อหาจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ 1) ขอบเขตและข้อจำกัดขององค์ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ 2) โครงสร้างของระบบผู้เชี่ยวชาญ 3) การรับข้อมูลและการประเมินข้อมูลเบื้องต้นของระบบ (ส่วน Inference Engine) 4) ขบวนการและกฎที่ใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะแต่ละชั้นหิน และขบวนการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ (Knowledge base)

3.1 ขอบเขตและข้อจำกัดของระบบผู้เชี่ยวชาญ

ระบบผู้เชี่ยวชาญสามารถออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินทุกชนิดแต่ไม่รวมถึงชั้นดินที่ปกคลุมอยู่ด้านบน (Top soil) และไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นดิน ระบบผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแนวดิ่งซึ่งจะไม่ครอบคลุมการอุดในอุโมงค์และเหมืองใต้ดิน ระบบจะสามารถออกแบบได้ในกรณีที่มีข้อมูลเพียงพอ ดังนั้นผู้ใช้ต้องป้อนข้อมูลเกี่ยวกับหลุมเจาะที่ต้องการอุดที่เพียงพอในระดับหนึ่งซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.3

3.2 โครงสร้างของระบบผู้เชี่ยวชาญ

ระบบผู้เชี่ยวชาญถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนที่รับข้อมูลและให้ผลลัพธ์ซึ่งเป็นส่วนที่โต้ตอบกับผู้ใช้ (User) ในส่วนนี้จะเรียกว่า Inference engine และจะมีการประเมินเบื้องต้นในเชิงความเพียงพอและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับ 2) ส่วนที่จะทำการออกแบบ ซึ่งเป็นส่วนที่รวบรวมกฎของการออกแบบ (Design rules) และทำการคำนวณ ประเมิน และเลือกสรรวัสดุที่เหมาะสมในการอุดหลุมเจาะนั้น ๆ ในส่วนนี้จะเรียกว่า Knowledge base ผลที่ได้จากส่วนนี้จะส่งกลับไปที่ Inference engine และส่งต่อไปยังผู้ใช้

3.3 การจัดการและการประเมินข้อมูลเบื้องต้น

ในการจัดการข้อมูลระบบจะจำแนกข้อมูลที่ผู้ใช้ใส่เข้ามาออกเป็น 7 กลุ่มหลัก คือ 1) ข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวกับหลุมเจาะ (Borehole information) 2) ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ (Borehole conditions) 3) ข้อมูลเกี่ยวกับอุทกธรณีวิทยาเคมี (Hydrological chemistry

information) 4) ข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำบาดาล (Groundwater information) 5) ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยา (Geological conditions) 6) ข้อมูลเกี่ยวกับกลศาสตร์หิน (Geomechanical information) และ 7) ข้อมูลความต้องการเชิงวิศวกรรม (Engineering requirements) โดยแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยรายละเอียดดังนี้

1) **ข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวกับหลุมเจาะ** ประกอบด้วย
   (1) ชื่อหลุมเจาะ (Borehole name)
   (2) ตำแหน่งของหลุมเจาะ (Borehole location)
   (3) ความสูงจากระดับน้ำทะเล (Borehole elevation)
   (4) ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับทะเลหรือชายฝั่ง (Distance of borehole from the sea)
   (5) อายุของหลุมเจาะ (Age)

2) **ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ** ประกอบด้วย
   (1) เส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ (Borehole diameter)
   (2) ความลึกทั้งหมดของหลุมเจาะ (Borehole depth)
   (3) ขนาดและความลึกของท่อกรุ (Size and depth of casing)
   (4) จำนวนชั้นหินที่เรียงลำดับในหลุมเจาะ (Formation number)

3) **ข้อมูลเกี่ยวกับอุทกธรณีวิทยาเคมี** ประกอบด้วย
   (1) ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำบาดาล (NaCl)
   (2) ปริมาณโซเดียมซัลเฟตในน้ำบาดาล (SO_4)

4) **ข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำบาดาลและการเปลี่ยนแปลง**

5) **ข้อมูลเกี่ยวกับการลักษณะทางธรณีวิทยา** ประกอบด้วย
   (1) ชนิดของหินในแต่ละชั้นหิน (Rock type)
   (2) ความลึกของแต่ละชั้นหิน (Formation depth)

6) **ข้อมูลเกี่ยวกับกลศาสตร์หินของแต่ละชั้นหิน** ประกอบด้วย
   (1) จำนวนชุดของรอยแตก (Number of joint sets)
   (2) ระยะห่างของแต่ละชุดรอยแตก (Joint spacing)
   (3) ความกว้างของช่องในรอยแตก (Joint aperture)

(4) ความแข็งของหิน (Rock strength)

(5) ความซึมผ่านของหิน (Rock permeability)

7) **ข้อมูลความต้องการเชิงวิศวกรรม** ประกอบด้วย

(1) การเคลื่อนตัวของพื้นดิน (Ground deformation)

(2) การไหวสะเทือน (Ground vibration)

ในการประเมินข้อมูลเบื้องต้นระบบจะตรวจสอบว่าข้อมูลที่รับมาครบถ้วนหรือขาดข้อมูลใดไปบ้าง ข้อมูลที่ขาดหายไปมีความสำคัญในการออกแบบมากหรือน้อย และข้อมูลที่ขาดหายไปนั้นระบบสามารถกำหนดได้จากฐานข้อมูลที่มีอยู่ได้หรือไม่ ข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบได้แก่

1) เส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ
2) ความลึกของหลุมเจาะ
3) ขนาดและความลึกของท่อกรุ
4) จำนวนชั้นหินที่เรียงลำดับในหลุมเจาะ
5) ปริมาณโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟตในน้ำบาดาล
6) ระดับน้ำบาดาล
7) ความลึกของแต่ละชั้นหิน
8) ระยะห่างของแต่ละชุดรอยแตก
9) ความกว้างของช่องในรอยแตก
10) ชนิดของหินในแต่ละชั้น

ซึ่งถ้าขาดข้อมูลที่จำเป็นทั้ง 10 ประการดังกล่าวข้างต้น ระบบจะไม่สามารถเลือกสรรวัสดุและออกแบบการอุดหลุมเจาะได้ ในกรณีนี้ในส่วนของ Inference engine จะแจ้งผู้ใช้ว่าระบบไม่สามารถออกแบบได้และแนะนำให้ผู้ใช้หาข้อมูลเพิ่มเติม ส่วนในกรณีที่ข้อมูลที่จำเป็นทั้ง 10 ประการมีครบถ้วนจะส่งข้อมูลเหล่านี้เข้าสู่ขบวนการเลือกวัสดุและการออกแบบ ซึ่งจะอยู่ในส่วนของ Knowledge base

3.4 ขบวนการและกฎที่ใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะ

การออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินเป็นไปตามระเบียบวิธีการออกแบบ (Design methodology) เชิงวิศวกรรม ซึ่งประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก คือ 1) ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ (Design parameters) 2) ความต้องการในการออกแบบ (Functional requirements)

3) ข้อจำกัดในการออกแบบ (Design constraints) 4) ผลลัพธ์ของการออกแบบ (Design solutions) 5) วัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะ (Design components) และ 6) คุณลักษณะของวัสดุแต่ละชนิด (Design specifications)

3.4.1 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ (Design Parameters)

ปัจจัยที่ระบบนำมาใช้ในการออกแบบ คือ ข้อมูลที่ผ่านการประเมินเบื้องต้นแล้ว ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 โดยระบบจะนำข้อมูลของแต่ละชั้นหินมาพิจารณาเพื่อเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมที่สุด ปัจจัยที่ระบบนำมาพิจารณาในการออกแบบ ประกอบด้วย

1) ระดับน้ำบาดาล นำไปใช้พิจารณาว่าชั้นหินที่จะอุดอยู่ได้หรือบนระดับน้ำบาดาล

2) ค่าความซึมผ่านของมวลหิน นำไปใช้พิจารณาเลือกชนิดของวัสดุ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลค่าความซึมผ่านของมวลหินแต่มีข้อมูลค่าความซึมผ่านของหินหรือชนิดของหิน ข้อมูลระยะห่างของแต่ละชุดรอยแตกและความกว้างของช่องในรอยแตก ระบบก็สามารถประเมินค่าความซึมผ่านของมวลหินได้

3) ความฉีกของชั้นหิน นำไปคำนวณความเค้นสัมผัสที่ผนังของหลุมเจาะ (Tangential stress)

4) ความแข็งของมวลหิน นำไปใช้พิจารณาเปรียบเทียบกับความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะเพื่อกำหนดว่ามีความต้องการทางด้านเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์หรือไม่ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลความแข็งของมวลหินแต่มีข้อมูลความแข็งของหินหรือชนิดของหินและข้อมูลระยะห่างของแต่ละชุดรอยแตก ระบบจะสามารถประเมินความแข็งของมวลหินได้

5) ปริมาณโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟตในน้ำบาดาล หรือระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับทะเลหรือชายฝั่ง นำไปพิจารณาว่าชั้นน้ำบาดาลเป็นน้ำจืดหรือน้ำเค็ม

6) เส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ นำไปใช้ในการกำหนดขนาดที่ใหญ่ที่สุดของวัสดุมวลหยาบที่จะนำมาใช้อุด

7) ระยะห่างของแต่ละชุดรอยแตก นำไปใช้ในการคำนวณค่าความแข็งของมวลหินและการคำนวณหาค่าความซึมผ่านของมวลหิน

8) ความกว้างของช่องในรอยแตก นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความซึมผ่านของมวลหินและใช้ในการกำหนดขนาดที่เล็กที่สุดของวัสดุมวลหยาบที่จะนำมาใช้อุด

3.4.2 ความต้องการในการออกแบบ (Functional Requirements)

ความต้องการในการออกแบบ เป็นปัจจัยเบื้องต้นที่ต้องกำหนดสำหรับหลุมเจาะนั้น ๆ เพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุที่สามารถสนองต่อความต้องการเชิงวิศวกรรมมากที่สุด จากข้อมูลที่นำมาพิจารณาสามารถประเมินได้ว่าชั้นหินที่ต้องการอุดมีความต้องการในเชิงหน้าที่ลักษณะใด ซึ่งความต้องการในเชิงหน้าที่นี้จะประกอบด้วย

1) ความต้องการเชิงชลศาสตร์ โดยการพิจารณาจากระดับน้ำบาดาล และค่าความซึมผ่านของชั้นหิน ถ้าชั้นหินอยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลแสดงว่ามีความต้องการเชิงชลศาสตร์และค่าความซึมผ่านของชั้นหินจะเป็นตัวกำหนดค่าความซึมผ่านของวัสดุที่นำมาอุดหลุมเจาะในตำแหน่งที่มีความต้องการเชิงชลศาสตร์

2) ความต้องการเชิงกลศาสตร์ โดยการพิจารณาจากความแข็งและความลึกของชั้นหิน โดยคำนวณความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะที่ระดับความลึกของชั้นหิน ถ้าความเค้นที่กระทำมีค่าสูงกว่าความแข็งของชั้นหินแสดงว่าหลุมเจาะมีโอกาสที่จะพังสูง ดังนั้นการอุดหลุมเจาะในชั้นหินนี้จึงมีความต้องการเชิงกลศาสตร์ คือต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งเพียงพอที่จะค้ำยันมวลหินที่อยู่รอบหลุมเจาะ

3) ความต้องการเชิงเคมี โดยการพิจารณาจากปริมาณโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟตในน้ำบาดาลหรือระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับทะเลหรือชายฝั่ง ถ้าปริมาณโซเดียมคลอไรด์มากกว่า 500 ppm หรือปริมาณโซเดียมซัลเฟตมากกว่า 1,000 ppm (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537) หรือระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับทะเลหรือชายฝั่งไม่เกิน 500 เมตร แสดงว่าน้ำบาดาลอาจจะมีสภาพเป็นน้ำเค็ม ส่งผลให้หลุมเจาะที่จะอุดมีความต้องการเชิงเคมี คือต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถอุดหลุมเจาะที่อยู่ในชั้นน้ำบาดาลที่เป็นน้ำเค็มหรือมีความคงทนต่อการกัดกร่อนของน้ำเค็ม

ในชั้นหินรอบหลุมเจาะอันหนึ่งอาจจะมีความต้องการในเชิงหน้าที่ประการเดียว สองประการ หรือทั้งสามประการก็ได้ ซึ่งระบบจะเป็นตัวกำหนดจากข้อมูลที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามา

3.4.3 ข้อจำกัดในการออกแบบ (Design Constraints)

ข้อจำกัดในการออกแบบเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบการอุดหลุมเจาะ เพื่อให้การออกแบบสอดคล้องกับสภาวะในท้องถิ่น ข้อจำกัดในการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่พิจารณาในงานวิจัยนี้จะมีสองประการ คือ ข้อจำกัดเชิงเศรษฐศาสตร์ และข้อจำกัดทางด้านวัสดุและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องถิ่น

3.4.4 ผลของการเลือกวัสดุและการออกแบบ (Design Solutions)

ระบบกำหนดวัสดุที่ใช้สำหรับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินรวม 9 ชนิด คือ 1) วัสดุเม็ดหยาบ (Granular materials) 2) เบนทอไนต์ (Bentonite) 3) เบนทอไนต์อัดตัว (Pre-compressed bentonite) 4) เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย (Mixture of bentonite and granular materials) 5) ซีเมนต์ชนิดธรรมดา (Normal Portland cement) 6) ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต (High sulfate resistance cement) 7) คอนกรีตชนิดธรรมดา (Normal concrete) 8) คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต (High sulfate resistance concrete) และ 9 หินบด (Crushed rock) เกณฑ์ในการเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดได้มาจากการศึกษาและวิจัยในการอุดหลุมเจาะของนักวิชาการตามที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 และจากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องของผู้เชี่ยวชาญ

ผลของการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชั้นหิน (Design solutions) อาจปรากฏว่ามีวัสดุที่เหมาะสมมากกว่า 1 ชนิดสำหรับชั้นหินนั้น ๆ ซึ่งสามารถทำให้ผู้ใช้ใช้วิจารณญาณในเชิงเศรษฐศาสตร์และในเชิงความเพียงพอและเหมาะสมของวัสดุอุดในแต่ละท้องถิ่นเพื่อเลือกวัสดุที่จะใช้อีกทีหนึ่ง

ข้อกำหนดพื้นฐาน (Design criteria) และความสามารถ (Performance) ของวัสดุแต่ละชนิดสามารถอธิบายโดยสังเขปดังต่อไปนี้

1) **วัสดุเม็ดหยาบ** ในที่นี้คือวัสดุที่มีขนาดเม็ดทรายถึงเม็ดกรวดที่มีขนาด 0.006–6 เซนติเมตร

(1) ใช้อุดในชั้นหินแข็งที่ไม่มีความต้องการทางกลศาสตร์

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่าน 10^{-2}-10^{-7} m/s

(3) สามารถใช้ได้ในระดับความลึกไม่เกิน 100 เท่าของขนาดของหลุมเจาะ

(4) สามารถอุดได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็มและเหนือระดับน้ำบาดาล

2) **เบนทอไนต์**

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่ไม่มีความต้องการทางกลศาสตร์

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-7}- 10^{-14} m/s

(3) สามารถอุดได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม

(4) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของพื้นดิน

(5) ไม่เหมาะสำหรับอุดในชั้นหินที่มีรอยแตก

3) **เบนทอไนต์อัดตัว**

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่มีความต้องการทางกลศาสตร์ เนื่องจากมีความเค้นในแนวรัศมีสูงสุดถึง 2.6 MPa (Fuenkajorn and Daemen, 1987)

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-7}-10^{-14} m/s

(3) สามารถอุดได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม

(4) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของพื้นดินและแรงไหวสะเทือน

(5) สามารถใช้ได้ในระดับความลึกไม่เกิน 100 เท่าของขนาดหลุมเจาะ

4) **เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย** เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเบนทอไนต์มากแต่มีราคาถูกกว่า

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่ไม่มีความต้องการทางกลศาสตร์

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-7}-10^{-12}m/s

(3) สามารถอุดได้ทั้งในชั้นน้ำจืดและชั้นน้ำเค็ม

(4) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากแรงไหวสะเทือน

5) **ซีเมนต์ชนิดธรรมดา มีข้อกำหนดหรือเกณฑ์ในการเลือกใช้ดังนี้**

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่มีความต้องการทางกลศาสตร์ เนื่องจากมีความแข็งมากถึง 26.2 MPa และมีความเค้นในแนวรัศมีประมาณ 4 MPa

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-8}-10^{-13} m/s

(3) เหมาะสำหรับอุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล

(4) เหมาะสำหรับอุดในชั้นน้ำจืด

(5) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากแรงไหวสะเทือน

6) **ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต**

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่มีความต้องการทางกลศาสตร์

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-8}-10^{-13} m/s

(3) เหมาะสำหรับอุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล

(4) เหมาะสำหรับอุดในชั้นน้ำเค็ม

(5) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากแรงไหวสะเทือน

7) **คอนกรีตชนิดธรรมดา** เป็นวัสดุที่มีเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์มากแต่มีราคาถูกกว่า

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่มีความต้องการทางกลศาสตร์ เนื่องจากมีความแข็ง 20.59-49.04 MPa (ประณต กุลประสูตร, 2538)

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-8}-10^{-12} m/s

(3) เหมาะสำหรับอุดในตำแหน่งที่อยู่ได้ระดับน้ำบาดาล

(4) เหมาะสำหรับอุดในชั้นน้ำจืด

(5) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากแรงไหวสะเทือน

8) **คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต**

(1) ใช้อุดในชั้นหินที่มีความต้องการทางกลศาสตร์

(2) ใช้อุดในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่านระหว่าง 10^{-8}-10^{-12} m/s

(3) เหมาะสำหรับอุดในตำแหน่งที่อยู่ได้ระดับน้ำบาดาล

(4) เหมาะสำหรับอุดในชั้นน้ำเค็ม

(5) สามารถอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากแรงไหวสะเทือน

9) **หินบด** คือเศษหินที่ได้มาจากการขุดเจาะหลุมนั้น ๆ

(1) ใช้เมื่อต้องการให้วัสดุอุดมีความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์กับหินข้างเคียงในเชิงธรณีเคมี

(2) ใช้ในชั้นหินที่อยู่บนและล่างระดับน้ำบาดาล

(3) ใช้ในชั้นหินที่มีค่าความซึมผ่าน 10^{-2}-10^{-7} m/s

3.4.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกวัสดุ (Selection Criteria)

ระบบเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินโดยพิจารณาจากปัจจัยหลัก 5 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) ระดับน้ำบาดาล 2) กลศาสตร์ 3) ชลศาสตร์ 4) ความต้องการเชิงวิศวกรรม-ศาสตร์ และ 5) ธรณีวิทยาเคมี

วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชั้นหินแต่ละชั้นจะต้องมีคุณสมบัติครบหรือครอบคลุมตามที่พิจารณาจากปัจจัยทั้ง 6 กลุ่ม ดังนั้นในขั้นตอนการเลือกใช้วัสดุระบบจะทำการพิจารณา 2 รอบ (Design iteration) กล่าวคือ การพิจารณาในรอบแรกจากปัจจัยทั้ง 6 กลุ่ม จะเป็นการแนะนำวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละชั้นหิน ถ้าตามความต้องการในการออกแบบมีความต้องการเชิงชลศาสตร์หรือเชิงกลศาสตร์หรือเชิงเคมีเพียงอย่างเดียว การพิจารณาในรอบแรกอาจจะเพียงพอและวัสดุที่แนะนำก็เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าตามความต้องการในการออกแบบมีทั้งความต้องการเชิง

ชลศาสตร์ เชิงกลศาสตร์และเชิงเคมี การพิจารณาในรอบแรกอาจจะไม่มีวัสดุชนิดใดที่มีคุณสมบัติครบตามที่ต้องการ เมื่อรอบแรกไม่สามารถแนะนำวัสดุที่เหมาะสมได้ ระบบจะทำการพิจารณาอีกครั้งในรอบที่ 2 ซึ่งในรอบนี้ปัจจัยที่นำมาพิจารณาจะประกอบด้วย 3 กลุ่ม คือ 1) กลศาสตร์ 2) ชลศาสตร์ และ 3) ความต้องการเชิงวิศวกรรมศาสตร์ โดยกฎเกณฑ์จะถูกปรับให้ยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งจะแนะนำวัสดุที่เหมาะสมรองลงมาจากการพิจารณาในรอบแรก แต่ก็เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินได้

ในวิธีการเลือกใช้วัสดุในรอบแรก ระบบจะพิจารณาจากปัจจัย 5 กลุ่ม ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งปัจจัยแต่ละกลุ่มมีวิธีการในการเลือกใช้วัสดุดังนี้

1) **ปัจจัยทางด้านระดับน้ำบาดาล** ระบบพิจารณาว่าระดับความลึกที่สุดของชั้นหินอยู่ได้ระดับน้ำบาดาลหรือไม่ (จากข้อมูลที่ได้รับจากผู้ใช้) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) กรณีที่ระดับความลึกที่สุดของชั้นหินอยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต

(2) กรณีที่ระดับความลึกที่สุดของชั้นหินอยู่เหนือระดับน้ำบาดาล วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว หรือเบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย

2) **ปัจจัยเชิงกลศาสตร์** ระบบพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชั้นหินกับความเค้นในแนวสัมผัสที่ผนังของหลุมเจาะ ในการพิจารณาเชิงกลศาสตร์ระบบจะทำการคำนวณความเค้นสัมผัสที่ผนังของหลุมเจาะและในกรณีชั้นหินที่มีรอยแตกแต่ผู้ใช้ไม่ทราบค่าความแข็งของมวลหิน (Rock mass strength, $\sigma_{rock\ mass}$) ระบบจะประเมินให้ โดยใช้สมการ(Hoek and Brown, 1980)

$$\sigma_{rock\ mass} = s^{\frac{1}{2}} * \sigma_{intact} \qquad (3.1)$$

โดยที่ s = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหิน (ในที่นี้ใช้ค่า s ที่สัมพันธ์กับคุณภาพของมวลหิน จากตารางที่นำเสนอโดย D.R. McCreath ในปี ค.ศ. 1984)

σ_{intact} = ความแข็งของหินที่ไม่มีรอยแตก (MPa)

การคำนวณความเค้นสัมผัสที่ผนังของหลุมเจาะ (σ_θ)ใช้สมการ (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_\theta = (3.281 * BT * 1.1 * 2) / 145 \quad (3.2)$$

โดยที่ BT = ระดับลำดับชั้นของแต่ละชั้นหิน (m)

σ_θ = ความเค้นสัมผัสในผนังหลุมเจาะ (MPa)

ในการคำนวณใช้ความหนาแน่นเชิงความลึก (Density gradient) ของหิน = 1.1 psi/ft เมื่อทราบค่าความแข็งของชั้นหินหรือมวลหินกับความเค้นในแนวเส้นสัมผัสแล้ว ระบบจะเปรียบเทียบค่าที่ได้ แล้วแบ่งการเลือกวัสดุออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) กรณีที่ชั้นหินมีค่าความแข็งสูงกว่าค่าความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะ ในกรณีนี้แสดงว่าหลุมเจาะจะไม่พัง ดังนั้นวัสดุที่ใช้จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีความต้องการเชิงกลศาสตร์ วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว หรือเบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย

(2) กรณีที่ชั้นหินมีค่าความแข็งต่ำกว่าค่าความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะ ในกรณีนี้แสดงว่าหลุมเจาะจะมีโอกาสพังได้ เนื่องจากชั้นหินมีความสามารถในการรับแรงต่ำกว่าความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะ ดังนั้นวัสดุที่ใช้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์เพียงพอที่จะสามารถรับแรงกระทำของความเค้นได้ วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ เบนทอไนต์อัดตัว ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต

3) **ปัจจัยเชิงชลศาสตร์** ระบบเลือกใช้วัสดุจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของชั้นหินและของวัสดุที่ใช้อุด การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของมวลหิน (Rock mass permeability, $K_{rock\ mass}$) ใช้สมการ (Hoek and Bray, 1981)

$$K_{rock\ mass} = 981 * (J_a)^2 / (0.0101 * 12 * J_s * 100^2) \quad (3.3)$$

โดยที่ J_a = ระยะเปิดของรอยแตก (cm)

J_s = ระยะห่างระหว่างรอยแตก (m)

$K_{rock\ mass}$ = สัมประสิทธิ์ของความซึมผ่าน (m/s)

การเลือกวัสดุจะต้องเลือกวัสดุที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านน้อยกว่าหรือเท่ากับสิบเท่าของค่าความสามารถในการซึมผ่านของชั้นหินข้างเคียง ระบบได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) กรณีที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของชั้นหินมีค่ามากกว่า 10^{-7} m/s วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ กรวดหรือทราย ซึ่งมีค่าความสามารถในการซึมผ่านอยู่ระหว่าง 10^{-1} ถึง 10^{-6} m/s

(2) กรณีที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของชั้นหินมีค่าน้อยกว่า 10^{-7} m/s วัสดุที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต ซึ่งมีค่าความสามารถในการซึมผ่านอยู่ระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-14} m/s

4) ความต้องการเชิงวิศวกรรมศาสตร์ เกณฑ์เกี่ยวกับความต้องการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่ระบบนำมาพิจารณา ได้แก่ โอกาสในการแตกของวัสดุอุดเนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นหินรอบหลุมเจาะ และจากการสั่นสะเทือน (Ground vibration) ในกรณีนี้วัสดุที่แนะนำ ได้แก่ เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว หรือเบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย

5) ปัจจัยเชิงอุทกธรณีวิทยาเคมี เกณฑ์เกี่ยวกับอุทกธรณีวิทยาเคมีที่ระบบนำมาพิจารณา คือ ปริมาณโซเดียมซัลเฟตและปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำบาดาล และระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับแหล่งน้ำเค็มหรือทะเล ถ้าปริมาณโซเดียมซัลเฟตในน้ำบาดาลมากกว่าหรือเท่ากับ 1000 ppm หรือ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำบาดาลมากกว่าหรือเท่ากับ 250 ppm แสดงว่าหลุมเจาะนั้นอยู่ภายใต้สภาวะน้ำเค็ม และถ้าระยะห่างระหว่างหลุมเจาะกับทะเลหรือแหล่งน้ำเค็มน้อยกว่า 500 เมตร ก็แสดงว่าหลุมเจาะนั้นอยู่ภายใต้สภาวะน้ำเค็มเช่นกัน ในกรณีนี้วัสดุที่แนะนำ ได้แก่ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต

3.4.6 การออกแบบรอบที่สอง (Design Iteration)

วิธีการเลือกใช้วัสดุในการพิจารณารอบที่ 2 ระบบจะพิจารณาจากปัจจัย 2 กลุ่ม คือ 1) การพิจารณาเชิงกลศาสตร์ และ 2) การพิจารณาเชิงชลศาสตร์

1) **ปัจจัยเชิงกลศาสตร์** ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชั้นหินกับความเค้นสัมผัสที่ผนังของหลุมเจาะ (Tangential stress) จะถูกนำมาพิจารณาอีกครั้งในรอบที่ 2 แต่วัสดุที่แนะนำในกรณีที่ชั้นหินมีค่าความแข็งสูงกว่าค่าความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะจะแตกต่างจากรอบแรก วัสดุที่แนะนำ คือ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต

2) **ปัจจัยเชิงชลศาสตร์** ในรอบที่ 2 นี้ระบบจะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาเชิงชลศาสตร์เหมือนกับรอบแรก แต่จะแนะนำวัสดุในกรณีที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของชั้นหินมีค่ามากกว่า 10^{-7} m/s แตกต่างจากรอบแรก วัสดุที่แนะนำ คือ กรวดหรือทราย เบนทอไนต์ เบนทอไนต์อัดตัว เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย ปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต หรือคอนกรีตทนซัลเฟต

3.4.7 คุณลักษณะของวัสดุ (Design Specifications)

วัสดุแต่ละชนิดที่จะใช้อุดหลุมเจาะควรมีคุณลักษณะตามที่กำหนด การอุดหลุมเจาะจึงจะบรรลุตามจุดมุ่งหมายและมีประสิทธิภาพสูงสุด

1) **วัสดุเม็ดหยาบ** (กรวดหรือทราย) กรวดหรือทรายที่จะใช้อุดหลุมเจาะควรมีคุณลักษณะ4 ประการ คือ (Daemen and Fuenkajorn, 1996)

(1) มีความคละกันดี (Well graded)

(2) มีค่า Coefficient of uniformity (C_u) มากกว่าหรือเท่ากับ 16

(3) มีขนาดเม็ดที่ใหญ่ที่สุด (Maximum particle size) ไม่เกิน 1/10 ของขนาดของหลุมเจาะ

(4) มีขนาดเม็ดที่เล็กที่สุด (Minimum particle size) ไม่เล็กกว่าความกว้างของช่องในรอยแตก (Joint aperture)

2) **เบนทอไนต์** ประกอบด้วย 3 ชนิดหลัก คือ เบนทอไนต์ผง (Powder bentonite) เบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Chips or tablets bentonite) และเบนทอไนต์เม็ดละเอียด (Granular bentonite)

(1) เบนทอไนต์ผงใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะด้วยการผสมกับน้ำ โดยเบนทอไนต์ผง 1-2 ปอนด์ผสมกับน้ำ 1 แกลลอน (Smith, 1990)

(2) เบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือเม็ด เบนทอไนต์แบบเกล็ดจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอโดยมีขนาด 0.63-1.91 เซนติเมตร และเบนทอไนต์แบบเม็ดจะมีขนาดที่สม่ำเสมอโดยมีขนาด 0.63-1.26 เซนติเมตร ใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะโดยการเทลงไปในหลุมเจาะจากปากหลุม (Papp, 1996)

(3) เบนทอไนต์เม็ดละเอียดมีขนาดเล็กกว่าเบนทอไนต์แบบเกล็ดหรือเม็ด ใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะโดยใช้วิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ 1) เทลงไปในหลุมเจาะจากปากหลุมแต่มักมีปัญหาเกิดการติดค้าง (Bridging) เมื่อเทลงไปถึงระดับน้ำบาดาลในหลุมเจาะ 2) ใช้ผสมกับน้ำ โดยใช้เศษเบนทอไนต์ 1.5-2 ปอนด์ต่อน้ำ 1 แกลลอน และผสม Polymer-water ลงไปด้วยเพื่อลดเวลาในการก่อตัวและการขยายตัว (Smith, 1994)

3) **เบนทอไนต์อัดตัว** การใช้เบนทอไนต์อัดตัวเป็นวัสดุอุดหลุมเจาะมี 2 ชนิด คือ ใช้เบนทอไนต์เม็ดละเอียดผสมกับน้ำจืด และใช้เบนทอไนต์เม็ดละเอียดผสมกับน้ำเกลือ (Ran et al., 1997) ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณลักษณะดังนี้

(1) ใช้เบนทอไนต์เม็ดละเอียดผสมกับน้ำ ใช้น้ำไม่เกิน 18% (Dry density 1.74 g/cm^3) อัดเบนทอไนต์ (Compacted) 6 ครั้งด้วย Modified proctor (16,200 kN-m/m^3)

(2) ใช้เบนทอไนต์เม็ดละเอียดผสมกับน้ำเกลือ ใช้น้ำเกลือประมาณ 12.7% (Dry density 1.86 g/cm^3) อัดเบนทอไนต์ (Compacted) 6 ครั้งด้วย Modified proctor (16,200 kN-m/m^3)

4) **เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย** วัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับกรวดหรือทราย ควรมีคุณลักษณะ 4 ประการ คือ (Ouyang and Daemen, 1996)

(1) ใช้เบนทอไนต์ 35% ผสมกับกรวดหรือทราย 65%

(2) กรวดหรือทราย มีความคละกันดี (Well graded)

(3) ใช้กรวดหรือทรายมีที่ขนาดเม็ดใหญ่ที่สุด (Maximum particle size) ไม่เกิน 1/10 ของขนาดของหลุมเจาะ

(4) ใช้กรวดหรือทรายที่มีขนาดเม็ดเล็กที่สุด (Minimum particle size) ไม่เล็กกว่าความกว้างของช่องในรอยแตก (Joint aperture)

5) **ซีเมนต์ชนิดธรรมดา** วัสดุอุดหลุมเจาะที่เป็นซีเมนต์ชนิดธรรมดามีหลายอัตราส่วนผสมที่ใช้อยู่ทั่วไป คือ

(1) ปูนซีเมนต์ API class A (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I) ผสมกับน้ำที่ 50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์, Dowell additive D 53 10% โดยน้ำหนัก สารเพิ่มการขยายตัวและ D65 1% โดยน้ำหนัก (American Petroleum Institute, 1986)

(2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I หรือ II (API class A) 1 ถุง ผสมกับน้ำ 5.2 แกลลอน (Smith, 1993)

(3) ปูนซีเมนต์ API class A ผสมกับน้ำที่ 46% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ (Economides et al., 1998)

6) **ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต** มี 2 อัตราส่วนผสม คือ

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type V ผสมกับน้ำ 50% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2537)

(2) ปูนซีเมนต์ API class C ผสมกับน้ำ 56% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ หรือ ปูนซีเมนต์ API class G ผสมกับน้ำ 44% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ หรือ ปูนซีเมนต์ API class H ผสมกับน้ำ 38% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (Economides et al., 1998)

7) **คอนกรีตชนิดธรรมดา** มีคุณลักษณะที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I หรือ II ผสมกับน้ำ 55% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับทรายและกรวดเท่ากับ 1 : 1.5 : 3 โดยใช้ทรายที่มีขนาด 2-4.5 มิลลิเมตร และกรวดมีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/5 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ (ประณต กุลประสูตร, 2538)

8) **คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต** มีคุณลักษณะที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type V ผสมกับน้ำ 50% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2537) อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับทรายและกรวดเท่ากับ 1:1.5:3 โดยใช้ทรายที่มีขนาด 2-4.5 มิลลิเมตร และกรวดมีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/5 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ (ประณต กุลประสูตร, 2538)

3.5 ขบวนการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ (Design Evaluation)

ขบวนการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ มีระเบียบวิธีการออกแบบเชิงวิศวกรรม ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ 1) ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ 2) ความต้องการในการออกแบบ 3) ข้อจำกัดในการออกแบบ 4) การประเมินประสิทธิภาพทั้งระบบ (Design solutions) 5) องค์ประกอบการออกแบบ (Design components)

3.5.1 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบการอุดทั้งระบบ

แนวคิดของการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ คือ ปัจจัยหรือข้อมูลที่ระบบจะนำมาพิจารณาว่าวัสดุที่ถูกเลือกมาสำหรับแต่ละชั้นหินนั้นมีความเหมาะสมหรือมีความเป็นไปได้หรือไม่ในเชิงปฏิบัติ โดยปัจจัยหรือข้อมูลที่ระบบนำมาพิจารณาในการออกแบบ ประกอบด้วย

1) **ความลึกของชั้นหิน** นำไปใช้พิจารณาว่าวัสดุที่ถูกเลือกมามีข้อจำกัดด้านความลึกหรือไม่

2) **ความหนาของชั้นหิน** นำไปใช้พิจารณาเปรียบเทียบกับชั้นหินที่วางตัวอยู่บนและล่างว่ามีความหนาแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด และนำความหนาของชั้นหินไปเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ และความลึกของชั้นหิน จากนั้นนำไปคำนวณความเค้นที่กระทำกับหลุมเจาะ

3.5.2 ความต้องการในการออกแบบ

ความต้องการในการออกแบบสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ (Mechanical stability) 2) เสถียรภาพเชิงชลศาสตร์ (Hydrological containment) 3) ความเข้ากันได้เชิงเคมี (Chemical compatibility) และ 4) ความเป็นไปได้ในเชิงปฏิบัติ (Practical)

1) **เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์** การออกแบบจะต้องมีเสถียรภาพหรือประสิทธิภาพในการค้ำยันและมีความคงทนอยู่ได้เป็นเวลานาน และในระยะยาวความสามารถในการค้ำยันและความคงทนซึ่งเป็นความต้องการเชิงกลศาสตร์จะมีผลต่อความต้องการเชิงชลศาสตร์ด้วย

2) **เสถียรภาพเชิงชลศาสตร์** ระบบพิจารณาความคงทนหรือคงที่ของคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ของวัสดุแต่ละชนิดในระยะยาว

3) ความเข้ากันได้เชิงเคมี วัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะจะต้องมีคุณสมบัติทางเคมีที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์และเสถียรภาพเชิงชลศาสตร์ของการอุดหลุมเจาะในระยะยาว และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำบาดาล อีกทั้งวัสดุต้องมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเชิงเคมีของชั้นหินและน้ำบาดาล

4) ความเป็นไปได้ในเชิงปฏิบัติ ระบบต้องพิจารณาว่าลำดับและปริมาณของวัสดุที่ถูกเลือกสำหรับแต่ละชั้นหินตลอดความลึกของหลุมเจาะสามารถทำได้จริงในทางปฏิบัติหรือไม่

3.5.3 ข้อจำกัดในการออกแบบ

ข้อจำกัดที่สำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ คือ **ข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์** วัสดุที่ถูกคัดเลือกว่ามีความเหมาะสมสำหรับแต่ละชั้นหินเมื่อผ่านการประเมินทั้งระบบแล้วอาจต้องใช้วัสดุชนิดอื่นเพราะมีข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ

3.5.4 การประเมินประสิทธิภาพทั้งระบบ

การประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ ประกอบด้วยการประเมิน 3 ส่วน คือ 1) การประเมินการทรุดตัวของเบนทอไนต์ 2) การประเมินความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเชิงความลึก และ 3) การประเมินความหนาของชั้นหินและความยาวของวัสดุอุด

1) การประเมินการทรุดตัวของเบนทอไนต์ เนื่องจากเบนทอไนต์เป็นดินเหนียว ซึ่งมีคุณสมบัติในการทรุดตัวหรืออัดตัวแน่นขึ้น และช่องว่างระหว่างเม็ดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นการใช้เบนทอไนต์เป็นวัสดุในการอุดหลุมเจาะจะต้องพิจารณาอัตราการทรุดตัวของเบนทอไนต์ด้วย ซึ่งการทรุดตัวของเบนทอไนต์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้ (Sower, 1979)

$$U = -655.74(T)^6 + 2733(T)^5 - 4475.2(T)^4 + 3680.2(T)^3 - 1660.9(T)^2 + 470.84(T) + 0.2541 \quad (3.4)$$

$$T = [t(1+e_{initial})k] / [\gamma_w (H/2)^2 * a_v]$$

$$a_v = [e_{initial} - e_{final}] / [\Delta\sigma_v]$$

โดย U = Percent of consolidation (%)

T = Time factor

a_v = อัตราการทรุดตัว (m^2/kN)

t = เวลา (วินาที)

k = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s)

$e_{Initial}$ = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มแรก

e_{final} = อัตราส่วนช่องว่างสุดท้าย

$\Delta\sigma_v$ = ความเค้นกดในแนวดิ่ง (MPa)

γ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (kN/m^3)

H = ความหนาที่พิจารณา (m)

ในกรณีที่คาดหวังการอุดระยะยาวระบบคำนวณระยะทรุดตัวทั้งหมดของเบนทอไนต์ที่เวลาผ่านไป 1,000 ปี ถ้าพบว่าระยะทรุดตัวของเบนทอไนต์มากกว่า 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ระบบจะแนะนำให้ใส่ Key seal ตรงกึ่งกลางความยาวของเบนทอไนต์ แต่ถ้าระบบประเมินการทรุดตัวแล้วพบว่าระยะทรุดตัวของเบนทอไนต์น้อยกกว่า 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ระบบก็จะแนะนำให้ใช้การอุดด้วยเบนทอไนต์โดยไม่ต้องใส่ Key seal

2) การประเมินความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเชิงความลึก ระบบจะประเมินความเป็นไปได้ในเชิงความลึกสำหรับวัสดุอุดหลุมเจาะ 2 ชนิด คือ

(1) วัสดุเม็ดหยาบ เมื่อระบบพบว่าชั้นหินใด ๆ ถูกแนะนำว่าวัสดุอุดหลุมเจาะที่เหมาะสมที่สุด คือ วัสดุเม็ดหยาบ ระบบจะทำการตรวจสอบความลึกของชั้นหินนั้น ๆ ถ้าพบว่าชั้นหินอยู่ที่ระดับความลึกไม่เกิน 100 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ระบบจะแนะนำว่าชั้นหินสามารถใช้วัสดุเม็ดหยาบในการอุดได้ แต่ถ้าพบว่าชั้นหินอยู่ที่ระดับความลึกมากกว่า 100 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ระบบจะแนะนำว่าชั้นหินไม่สามารถใช้วัสดุเม็ดหยาบในการอุดได้ให้ใช้ซีเมนต์หรือคอนกรีตแทน

(2) เบนทอไนต์อัดตัว สำหรับชั้นหินที่ไม่สามารถใช้เบนทอไนต์อัดตัวได้ คือ ชั้นหินที่อยู่ลึกกว่า 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ซึ่งเมื่อระบบประเมินแล้วพบว่าชั้นหินที่แนะนำให้ใช้เบนทอไนต์อัดตัวอยู่ที่ระดับลึกกว่า 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ ระบบจะแนะนำให้ใช้ซีเมนต์หรือคอนกรีตแทน

3) **การประเมินความหนาของชั้นหิน** ระบบจะประเมินความหนาของทุกชั้นหินที่เรียงตัวในหลุมเจาะ ถ้าพบว่าชั้นหินใดมีความหนาน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะและเมื่อเปรียบเทียบความหนากับชั้นหินที่อยู่บนหรือล่างแล้ว พบว่า 100 เท่าของความหนาของชั้นหินนั้นน้อยกว่าความหนาของชั้นหินที่อยู่บนหรือล่าง ระบบจะแนะนำให้ใช้วัสดุชนิดเดียวกับชั้นหินที่อยู่บนหรือล่าง ซึ่งขึ้นกับค่าความซึมผ่านของหินที่วางตัวอยู่ข้างบนและล่างเป็นอย่างไรด้วย

3.5.5 องค์ประกอบการออกแบบ

ในการประเมินประสิทธิภาพทั้งระบบ ระบบจำแนกองค์ประกอบสำหรับการออกแบบเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) การเปลี่ยนความยาวของการอุดหลุมเจาะ (Changing seal length) และ 2) การเปลี่ยนชนิดของวัสดุ (Changing seal type)

1) **การเปลี่ยนความยาวของการอุดหลุมเจาะ** จะเกิดขึ้นในกรณีที่ระบบประเมินการทรุดตัวของเบนทอไนต์และประเมินความหนาของชั้นหิน ในกรณีที่มีการทรุดตัวของเบนทอไนต์มากกว่า 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะระบบจะแนะนำให้ใส่ Key seal ที่กึ่งกลางความยาวของเบนทอไนต์ ซึ่งทำให้ความยาวของเบนทอไนต์ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม ส่วนกรณีการประเมินความหนาของชั้นหินจะทำให้ความยาวของวัสดุที่ใช้อุดในชั้นหินที่อยู่บนหรือล่างที่ 100 เท่าของความหนาน้อยกว่าความหนาของชั้นหินที่อยู่บนหรือล่าง จะมีความยาวเพิ่มขึ้น

2) **การเปลี่ยนชนิดของวัสดุ** จะเกิดขึ้นในกรณีที่ระบบประเมินความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเชิงความลึกและประเมินความหนาของชั้นหิน ในกรณีที่ระบบประเมินความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเชิงความลึกวัสดุจะถูกเปลี่ยนเป็นซีแมนต์หรือคอนกรีต ส่วนกรณีการประเมินความหนาของชั้นหินวัสดุจะถูกเปลี่ยนให้เป็นวัสดุที่ใช้อุดในชั้นที่อยู่ด้านบนหรือล่าง

บทที่ 4
การพัฒนาโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายการพัฒนาโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน ซึ่งจำแนกเป็น 2 องค์ประกอบหลัก คือ 1) แผนภูมิการไหลของระบบผู้เชี่ยวชาญ (Flowchart) และ 2) กรอบของระบบผู้เชี่ยวชาญ (System shell)

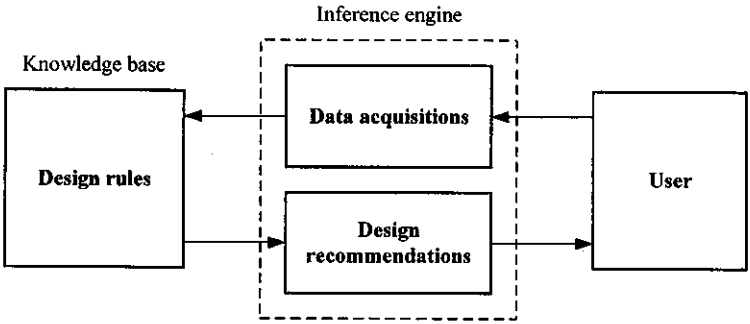
4.1 แผนภูมิการไหลของระบบผู้เชี่ยวชาญ

แผนภูมิการไหลของเครือข่ายทางความคิดของระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

1) แผนภูมิการไหลของส่วน Inference engine
2) แผนภูมิการไหลของส่วน Knowledge base

ในการสร้างแผนภูมิการไหลจะใช้สัญลักษณ์แทนข้อมูลเพื่อให้การนำเสนอกระชับขึ้นตามชนิดของวัสดุและปัจจัยที่นำมาพิจารณาเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแผนภูมิและการพัฒนาโปรแกรม โดยสัญลักษณ์แต่ละตัวที่ใช้ในแผนภูมิการไหลของระบบผู้เชี่ยวชาญจะตรงกับสัญลักษณ์ที่กำหนดในซอฟต์แวร์มีความหมายดังนี้

GT	=	ระดับน้ำบาดาล
F(n)	=	ความลึกที่ระดับล่างสุดของชั้นหินชุดที่ n
A1	=	วัสดุเม็ดหยาบ
A2	=	เบนทอไนต์แบบเม็ด
A3	=	เบนทอไนต์อัดตัว
A4	=	เบนทอไนต์ผสมกับวัสดุเม็ดหยาบ
A5	=	ซีเมนต์ชนิดธรรมดา
A6	=	คอนกรีตชนิดธรรมดา
A7	=	ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต
A8	=	คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต
M1(n)	=	วัสดุสำหรับชั้นหินชุดที่ n จากการพิจารณาระดับน้ำบาดาล
M2(n)	=	วัสดุสำหรับชั้นหินชุดที่ n จากการพิจารณาเชิงกลศาสตร์
M3(n)	=	วัสดุสำหรับชั้นหินชุดที่ n จากการพิจารณาเชิงชลศาสตร์
M4(n)	=	วัสดุสำหรับชั้นหินชุดที่ n จากการพิจารณาความต้องการเชิงวิศวกรรม



รูปที่ 4.1 แผนภูมิหลักของระบบผู้เชี่ยวชาญ

$M5(n)$ = วัสดุสำหรับชั้นหินชุดที่ n จากการพิจารณาอุทกธรณีวิทยาเคมี

$\sigma_\phi(n)$ = ความเค้นที่กระทำต่อชั้นหินชุดที่ n

$\sigma_c(n)$ = ความแข็งของหินชุดที่ n

K_{soil} = ค่าความซึมผ่านของวัสดุ

$K_{Rock}(n)$ = ค่าความซึมผ่านของหินชุดที่ n

$MF(n)$ = วัสดุที่แนะนำสำหรับอุดในหินชุดที่ n

4.1.1 แผนภูมิการไหลของส่วน Inference Engine

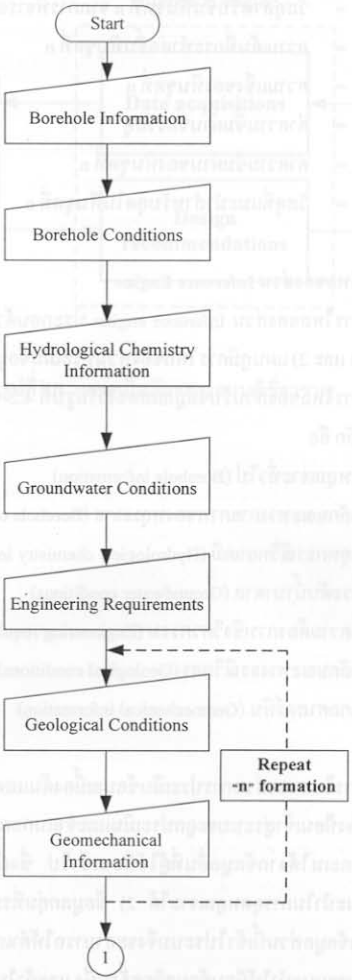
แผนภูมิการไหลของส่วน Inference engine ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) แผนภูมิการไหลของส่วนรับข้อมูล และ 2) แผนภูมิการไหลของส่วนประเมินข้อมูลเบื้องต้น

แผนภูมิการไหลของส่วนรับข้อมูลแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ข้อมูลที่ระบบรับเข้ามาจากผู้ใช้ ประกอบด้วย 7 กลุ่มหลัก คือ

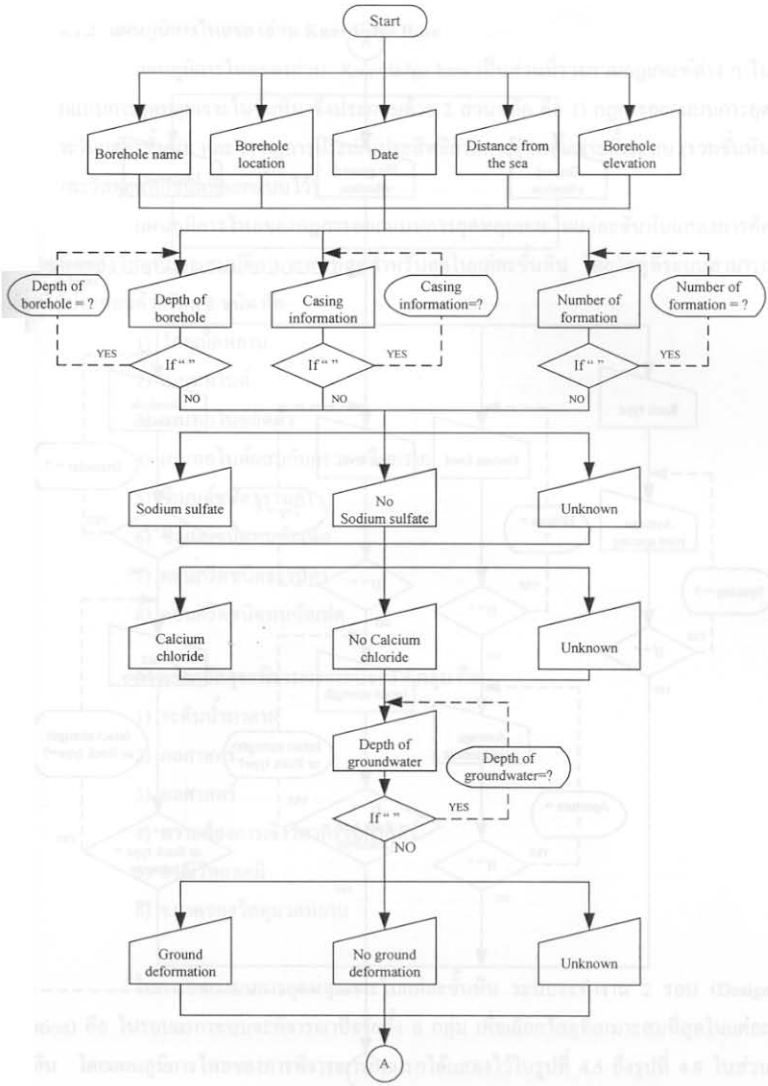
1) ข้อมูลหลุมเจาะทั่วไป (Borehole information)
2) ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ (Borehole conditions)
3) ข้อมูลอุทกธรณีวิทยาเคมี (Hydrological chemistry information)
4) ข้อมูลระดับน้ำบาดาล (Groundwater conditions)
5) ข้อมูลความต้องการเชิงวิศวกรรม (Engineering requirements)
6) ข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยา (Geological conditions)
7) ข้อมูลกลศาสตร์หิน (Geomechanical information)

แผนภูมิการไหลของส่วนการประเมินข้อมูลเบื้องต้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยข้อมูลทั้งหมดที่ผู้ใช้ต้องป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกประเมินและจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ข้อมูลกลุ่มที่ระบบสามารถคาดคะเนได้จากข้อมูลอื่นที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไป ซึ่งถ้าผู้ใช้ไม่ทราบข้อมูลส่วนนี้ ระบบก็ยังสามารถให้คำแนะนำในการอุดหลุมเจาะได้ 2) ข้อมูลกลุ่มที่ระบบไม่สามารถคาดคะเนได้ ดังนั้นผู้ใช้จำเป็นต้องป้อนข้อมูลส่วนนี้เข้าไประบบจึงจะสามารถให้คำแนะนำในการอุดหลุมเจาะได้ ถ้าผู้ใช้ไม่ป้อนเข้าไประบบจะแนะนำให้ป้อนข้อมูลอีกครั้งหนึ่ง และถ้าในครั้งที่ 2 ผู้ใช้ก็ยังไม่มีข้อมูลป้อนเข้าสู่ระบบ ระบบก็จะแนะนำว่าไม่สามารถออกแบบได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ

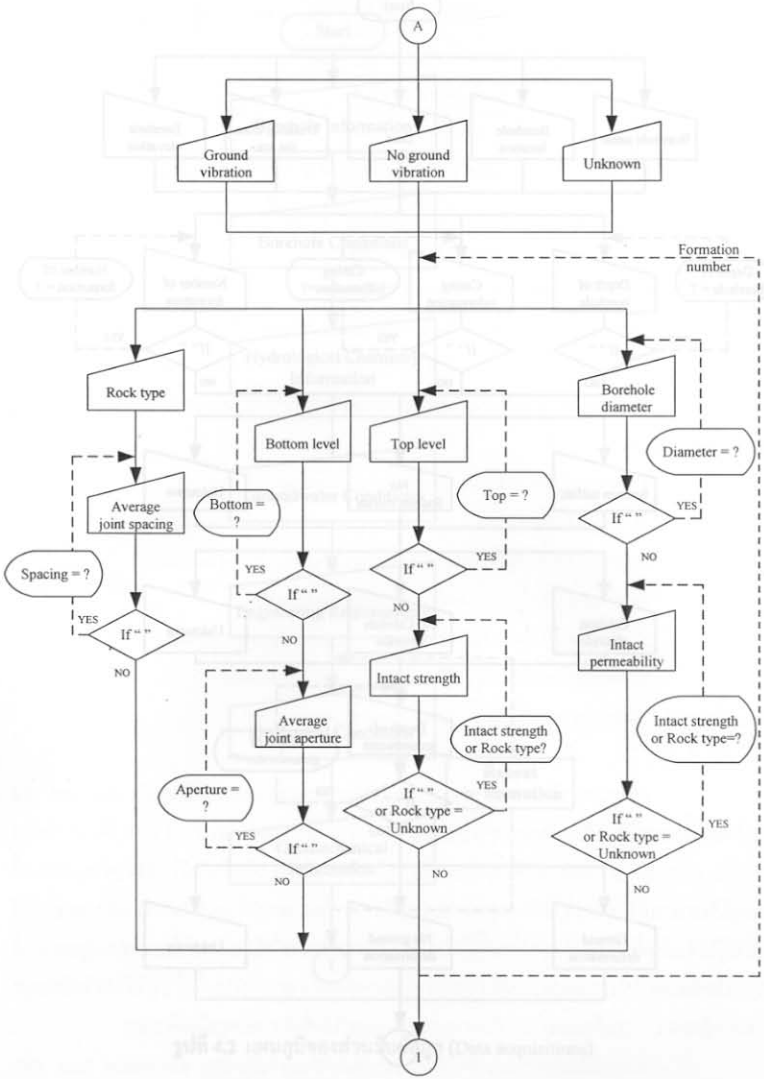
ข้อมูลที่รับเข้ามาจะถูกจัดให้เป็นระบบและส่งต่อไปยังส่วน Knowledge base เพื่อทำการออกแบบต่อไป ในส่วน Inference engine นี้ยังทำหน้าที่รับผลของการออกแบบที่ได้จาก Knowledge base และแสดงผลนี้ให้กับผู้ใช้



รูปที่ 4.2 แผนภูมิของส่วนรับข้อมูล (Data acquisitions)



รูปที่ 4.3 แผนภูมิของการประเมินข้อมูลเบื้องต้นส่วนหน้า



รูปที่ 4.4 แผนภูมิของการประเมินข้อมูลเบื้องต้นส่วนท้าย

4.1.2 แผนภูมิการไหลของส่วน Knowledge Base

แผนภูมิการไหลของส่วน Knowledge base เป็นส่วนที่รวบรวมกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) กฎการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหิน และ 2) กฎการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ (รวมชั้นหินทุกชั้นและวัสดุอุดทุกชนิดที่ออกแบบไว้)

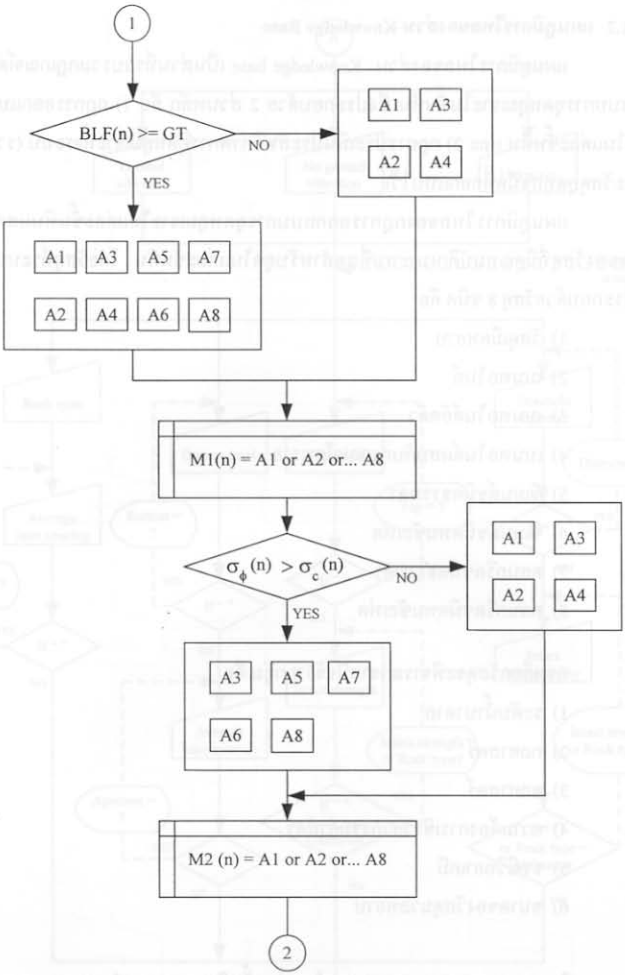
แผนภูมิการไหลของกฎการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินแสดงการคัดเลือกชนิดของวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับอุดในแต่ละชั้นหิน โดยวัสดุที่ระบบสามารถเลือกใช้ประกอบด้วยวัสดุ 8 ชนิด คือ

1) วัสดุเม็ดหยาบ
2) เบนทอไนต์
3) เบนทอไนต์อัดตัว
4) เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย
5) ซีเมนต์ชนิดธรรมดา
6) ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต
7) คอนกรีตชนิดธรรมดา
8) คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต

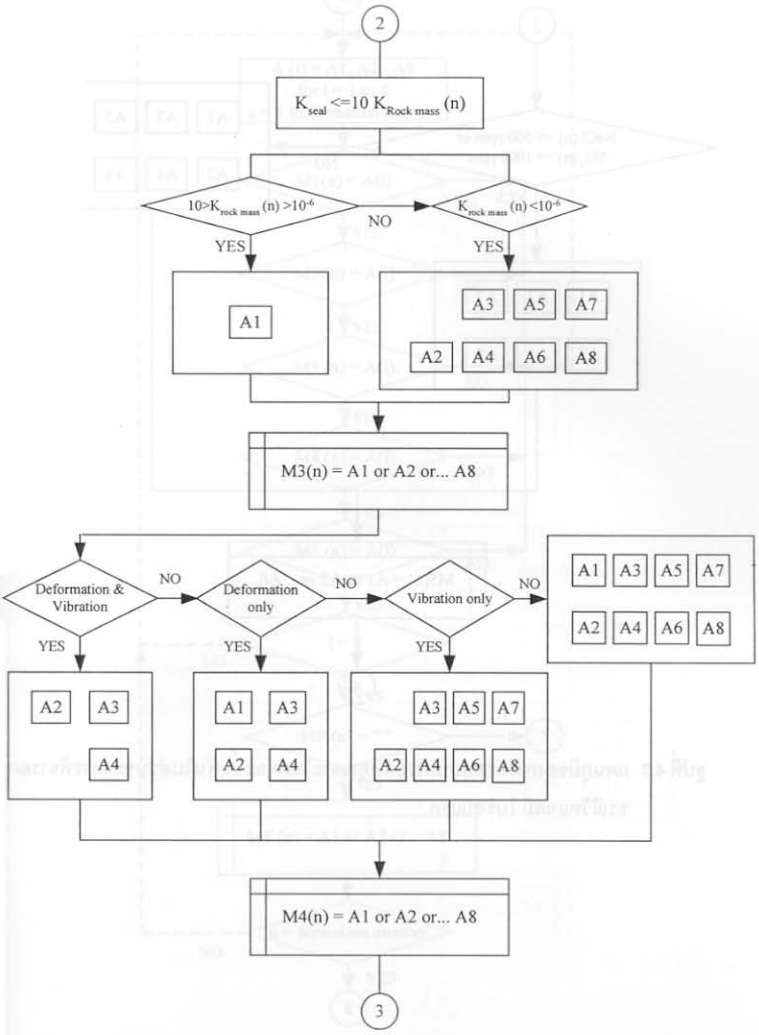
การเลือกวัสดุจะพิจารณาจากปัจจัย 6 กลุ่ม คือ

1) ระดับน้ำบาดาล
2) กลศาสตร์
3) ชลศาสตร์
4) ความต้องการเชิงวิศวกรรมศาสตร์
5) ธรณีวิทยาเคมี
6) ขนาดของวัสดุมวลหยาบ

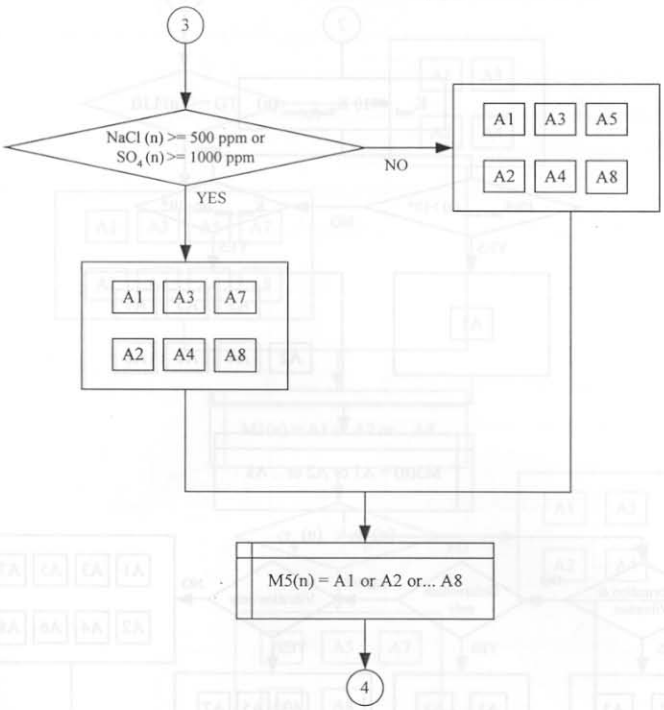
ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหิน ระบบจะทำงาน 2 รอบ (Design iteration) คือ ในรอบแรกระบบจะพิจารณาปัจจัยทั้ง 6 กลุ่ม เพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละชั้นหิน โดยแผนภูมิการไหลของการพิจารณารอบแรกได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 ในส่วนการพิจารณาในรอบที่ 2 ระบบจะพิจารณาจากปัจจัย 3 กลุ่ม คือ 1) กลศาสตร์ 2) ชลศาสตร์ และ 3) ความต้องการเชิงวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งแสดงแผนภูมิการไหลไว้ในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11



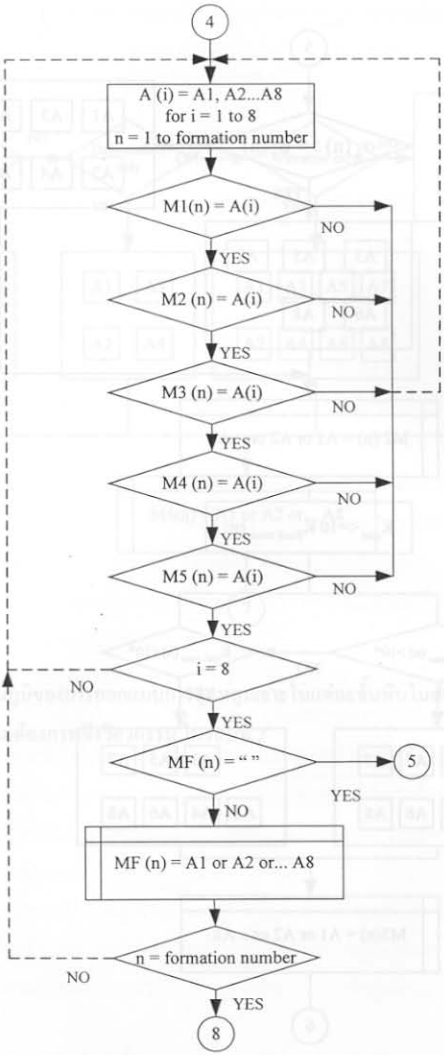
รูปที่ 4.5 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาระดับน้ำบาดาลและกลศาสตร์หินในรอบแรก



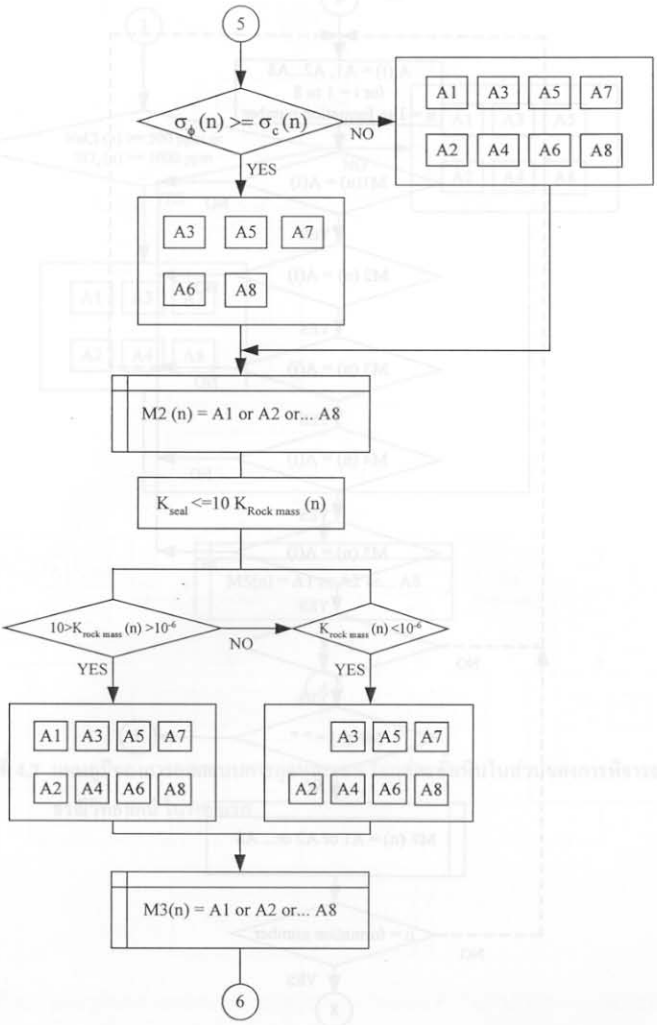
รูปที่ 4.6 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหิน ในส่วนของการพิจารณาเชิงชลศาสตร์และความต้องการเชิงวิศวกรรมในรอบแรก



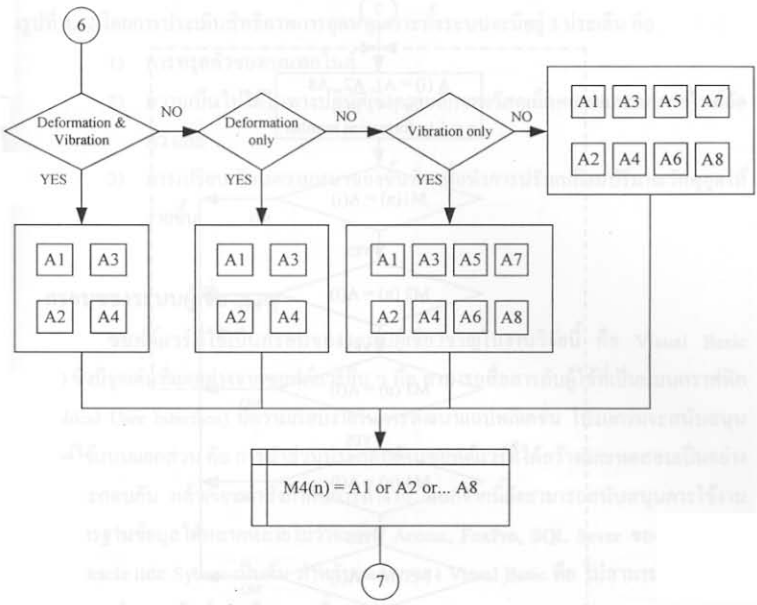
รูปที่ 4.7 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาธรณีวิทยาเคมี ในรอบแรก



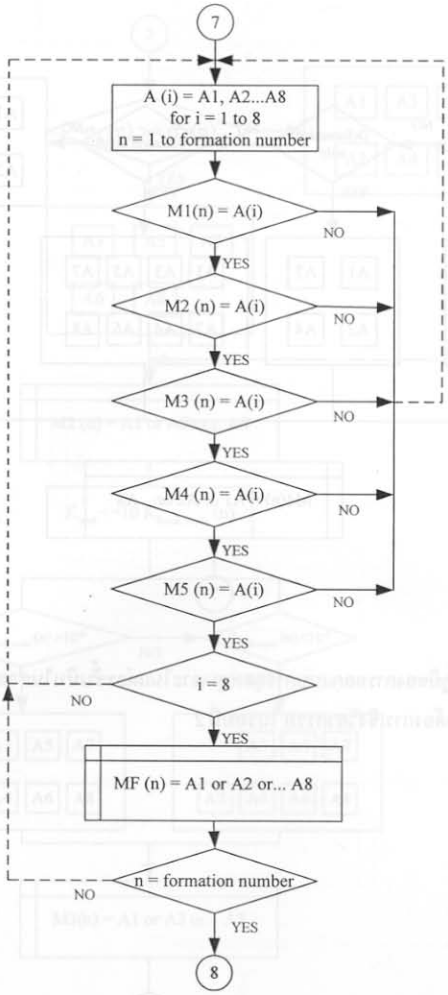
รูปที่ 4.8 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินส่วนสุดท้ายในรอบแรก



รูปที่ 4.9 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณากลศาสตร์หินและเชิงชลศาสตร์ ในรอบที่ 2



รูปที่ 4.10 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนของการพิจารณาความต้องการเชิงวิศวกรรม ในรอบที่ 2



รูปที่ 4.11 แผนภูมิของการออกแบบการอุดหลุมเจาะในแต่ละชั้นหินในส่วนสุดท้าย ในรอบที่ 2

แผนภูมิการไหลของกฎการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 โดยการประเมินสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบจะมีอยู่ 3 ประเด็น คือ

1) การทรุดตัวของเบนทอไนต์
2) ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเชิงความลึกของวัสดุเม็ดหยาบและเบนทอไนต์อัดตัว และ
3) การเปรียบเทียบความหนาของชั้นหินเพื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณวัสดุอุดให้ง่ายขึ้น

4.2 กรอบของระบบผู้เชี่ยวชาญ

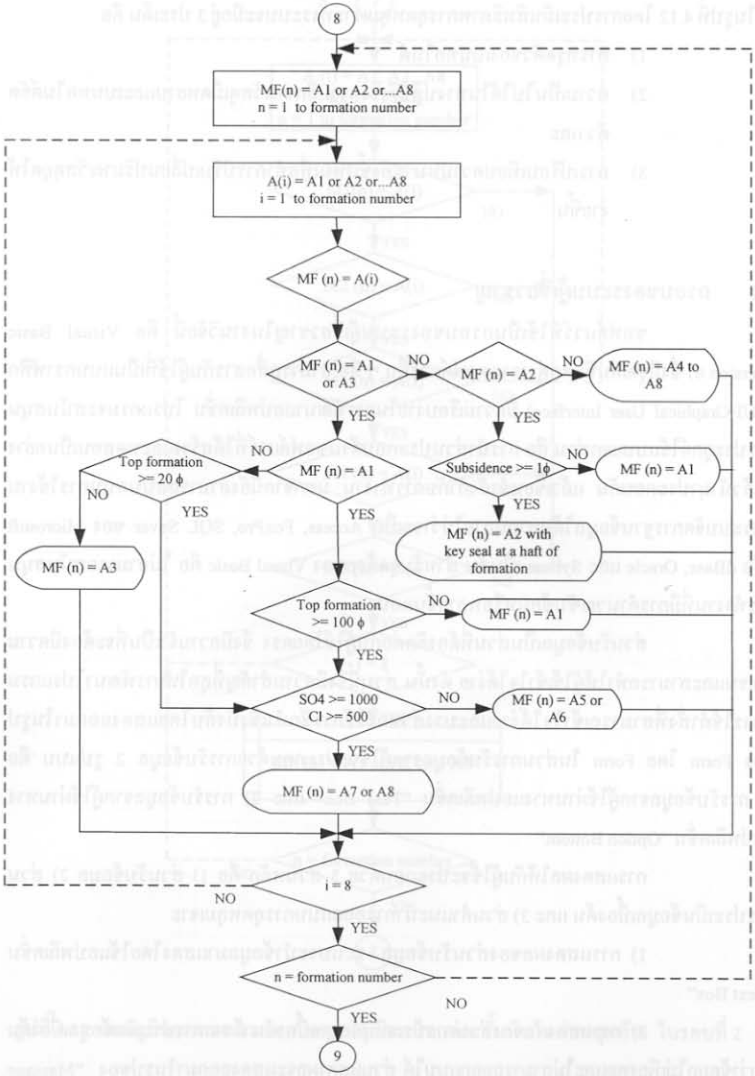
ซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นกรอบของระบบผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัยนี้ คือ Visual Basic (Version 6) ซึ่งมีจุดเด่นที่แตกต่างจากซอฟต์แวร์อื่น ๆ คือ สามารถสื่อสารกับผู้ใช้ที่เป็นแบบกราฟฟิก (GUI-Graphical User Interface) มีความเรียบง่ายในการพัฒนาแอปพลิเคชั่น โปรแกรมจะสนับสนุนการประยุกต์ใช้แบบแยกส่วน คือ การนำส่วนประกอบด้านซอฟต์แวร์ที่ได้สร้างและทดสอบเป็นอย่างดีแล้วนำมาประกอบกัน แล้วเขียนคำสั่งกำกับการทำงาน นอกจากนี้ยังสามารถสนับสนุนการใช้งานกับระบบจัดการฐานข้อมูลได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็น Access, FoxPro, SQL Sever ของ Microsoft หรือ dBase, Oracle และ Sybase เป็นต้น สำหรับจุดด้อยของ Visual Basic คือ ไม่สามารถสนับสนุนการทำงานที่มีการคำนวณซับซ้อนหรือหลายขั้นตอน

ส่วนรับข้อมูลเป็นส่วนที่ต้องติดต่อกับผู้ใช้โดยตรง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีความชัดเจนและสามารถทำให้ผู้ใช้เข้าใจได้ง่าย ดังนั้น ส่วนนี้จึงมีความสำคัญที่สุดในการพัฒนาโปรแกรม มีการใช้คำสั่งที่สามารถเข้าใจได้ง่ายและบางส่วนจะใช้การชักนำเชิงบังคับโดยแสดงออกมาในรูปของ Form โดย Form ในส่วนการรับข้อมูลจากผู้ใช้จะประกอบด้วยการรับข้อมูล 2 รูปแบบ คือ 1) การรับข้อมูลจากผู้ใช้ผ่านทางแอปพลิเคชั่น "Text Box" และ 2) การรับข้อมูลจากผู้ใช้ผ่านทางแอปพลิเคชั่น "Option Bottom"

การแสดงผลให้กับผู้ใช้จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนรับข้อมูล 2) ส่วนการประเมินข้อมูลเบื้องต้น และ 3) ส่วนคำแนะนำการออกแบบการอุดหลุมเจาะ

1) การแสดงผลของส่วนรับข้อมูล ระบบจะนำข้อมูลมาแสดงโดยใช้แอปพลิเคชั่น "Text Box"

2) การแสดงผลของส่วนการประเมินข้อมูลเบื้องต้น ถ้าผลการประเมินข้อมูลเบื้องต้นพบว่าข้อมูลไม่เพียงพอและไม่สามารถออกแบบได้ ส่วนแสดงผลจะแสดงออกมาในรูปของ "Massage Box" เพื่อให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูลส่วนที่ขาดหายไป



รูปที่ 4.12 แผนภูมิการไหลของกฎการประเมินประสิทธิภาพการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ

3) การแสดงผลส่วนคำแนะนำการออกแบบการอุดหลุมเจาะ เมื่อระบบพิจารณาแล้วว่าข้อมูลที่รับมาเพียงพอที่จะสามารถออกแบบได้ และการออกแบบได้ผ่านกระบวนการที่ใช้ในการพิจารณาการออกแบบในแต่ละชั้นหินและการประเมินประสิทธิภาพการออกแบบการอุดหลุมเจาะทั้งระบบแล้ว ผลของการออกแบบจะออกมาในรูปของการให้คำแนะนำว่าแต่ละชั้นหินควรใช้วัสดุอุดชนิดใด ซึ่งจะแสดงผลโดยใช้แอปพลิเคชั่น "Text Box"

บทที่ 5
ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

เนื้อหาในบทนี้เสนอตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้ซอฟท์แวร์ระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยตัวอย่างการออกแบบหลุมเจาะจะที่มีความแตกต่างกันในเชิงลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ อุทกธรณีวิทยาเคมี ระดับน้ำบาดาล ธรณีวิทยาของแต่ละชั้นหิน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหิน และในเชิงความต้องการทางวิศวกรรม การพิจารณาลักษณะและคุณสมบัติของหลุมเจาะที่แตกต่างกันเหล่านี้จะใช้การพิจารณา 10 ประการ และจะนำเสนอในเชิงเปรียบเทียบเพื่อแสดงศักยภาพของระบบผู้เชี่ยวชาญที่ได้พัฒนาขึ้น ข้อพิจารณาเหล่านี้คือ

1) การพิจารณาขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตก
2) การพิจารณาการเคลื่อนตัวและการสั่นสะเทือนของชั้นหิน
3) การพิจารณาความลึกของชั้นหิน
4) การพิจารณาคุณสมบัติเชิงเคมีของน้ำบาดาล
5) การพิจารณาความแข็งของมวลหิน
6) การพิจารณาการทรุดตัวของเบนทอไนต์
7) การพิจารณาชนิดของชั้นหิน
8) การพิจารณาความหนาของชั้นหิน
9) การพิจารณาระดับน้ำบาดาล
10) การพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน

ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่นำเสนอในบทนี้จะเน้นไปที่หลุมเจาะที่เลิกใช้แล้วในอุตสาหกรรมสำรวจและผลิตน้ำบาดาล แหล่งแร่ และการกักเก็บของเสียจากโรงงาน ส่วนหลุมเจาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้มีการออกแบบไว้อย่างเป็นระบบแล้ว นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุและขั้นตอนในการอุดไว้พอสมควร และมีความล้ำหน้ากว่าหลุมเจาะในอุตสาหกรรมอื่น ดังนั้น ตัวอย่างการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจึงไม่นำมากล่าวถึงในบทนี้

5.1 การพิจารณาขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตก

ขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตกจะมีผลต่อการออกแบบการอุดหลุมเจาะโดยใช้วัสดุเม็ดหยาบ ซึ่งขนาดของหลุมเจาะเป็นตัวกำหนดขนาดที่ใหญ่ที่สุดของวัสดุเม็ดหยาบและความกว้างของช่องในรอยแตกจะเป็นตัวกำหนดขนาดที่เล็กที่สุดของวัสดุเม็ดหยาบ

(ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.5) ดังนั้นหลุมเจาะที่มีขนาดและความกว้างของช่องว่างในรอยแตกที่ต่างกัน การออกแบบวัสดุเม็ดหยาบเพื่อใช้ในการอุดก็จะมีขนาดแตกต่างกัน ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่มีขนาดและความกว้างของช่องว่างในรอยแตกที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 และในส่วนของข้อมูลและผลการออกแบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2

5.2 การพิจารณาการเคลื่อนตัวและการสั่นสะเทือนของชั้นหิน

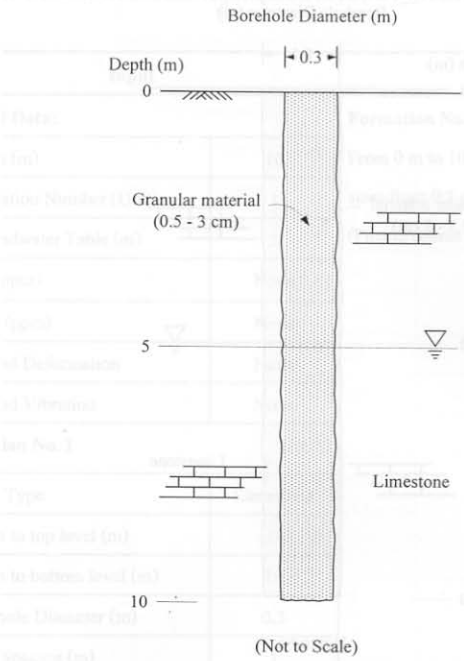
การเคลื่อนตัวของชั้นหินเป็นข้อจำกัดในการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่ใช้วัสดุในกลุ่มซีเมนต์และกลุ่มวัสดุเม็ดหยาบ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นหินทำให้วัสดุที่ไม่มีความยืดหยุ่นแตกหรือหักซึ่งส่งผลให้วัสดุที่ใช้อุดมีค่าความซึมผ่านสูงขึ้น ดังนั้นการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวและการสั่นสะเทือนของชั้นหินจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุกลุ่มซีเมนต์และวัสดุเม็ดหยาบ โดยเลือกใช้วัสดุประเภทเบนทอไนต์หรือวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับวัสดุเม็ดหยาบแทน (ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.3)

5.3 การพิจารณาความลึกของชั้นหิน

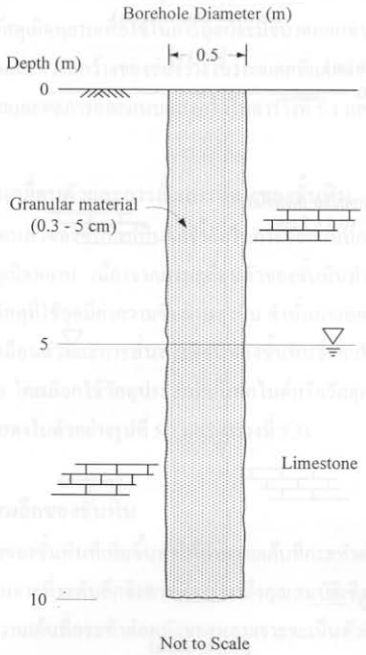
ความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเค้นที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะเพิ่มขึ้น การออกแบบการอุดหลุมเจาะที่ระดับลึกจึงควรพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะด้วย โดยความเค้นที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะจะเป็นตัวกำหนดค่าความสามารถในการรับแรงของวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ ถ้าความเค้นที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะสูงกว่าค่าความสามารถในการรับแรงของหินก็อาจจะทำให้หินรอบหลุมเจาะเกิดการแตกได้ ดังนั้นการอุดหลุมเจาะที่ระดับลึกจึงควรเลือกใช้วัสดุกลุ่มซีเมนต์เพื่อช่วยในการค้ำยันและให้ความคันในแนวรัศมีบนผนังของหลุมเจาะ ซึ่งจะส่งผลให้หลุมเจาะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และตารางที่ 5.4)

5.4 การพิจารณาคุณสมบัติเชิงเคมีของน้ำบาดาล

คุณสมบัติเชิงเคมีหรือสภาวะความเค็มของน้ำบาดาลหรือน้ำที่มีค่าโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคลอไรด์สูง อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีกับวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในกลุ่มซีเมนต์และส่งผลให้ความทนทานในการใช้งานลดลง ดังนั้นการอุดหลุมเจาะที่อยู่ในสภาวะน้ำเค็มจะต้องเลือกใช้วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาต่อซัลเฟตหรือเลือกใช้วัสดุที่มีความสามารถต่อต้านการกัดกร่อนของน้ำเค็ม เช่น ซีเมนต์ที่ทนซัลเฟต เป็นต้น (รูปที่ 5.4 และตารางที่ 5.5)



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตก (หลุมเจาะขนาด 0.3 m และความกว้างของช่องในรอยแตก 0.5 cm)



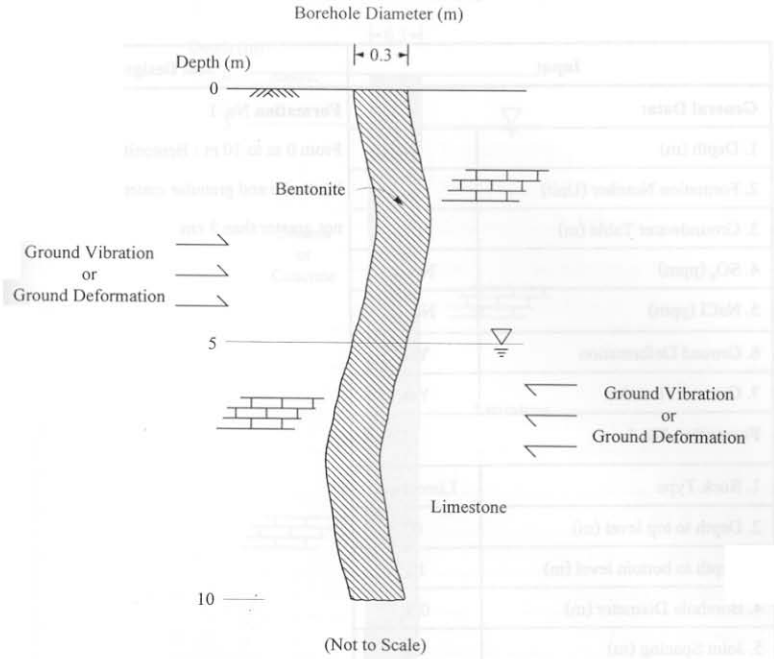
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาขนาดของหลุมเจาะและความกว้างของช่องในรอยแตก (หลุมเจาะขนาด 0.5 m และความกว้างของช่องในรอยแตก 0.3 cm)

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.1

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	10	From 0 m to 10 m : Granular material, particle
2. Formation Number (Unit)	1	sizes from 0.5 cm to 3 cm
3. Groundwater Table (m)	5	(Fine to coarse gravel)
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	10	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.5	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.01E-01	
3. Tangential Stress (MPa)	0.996	

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.2

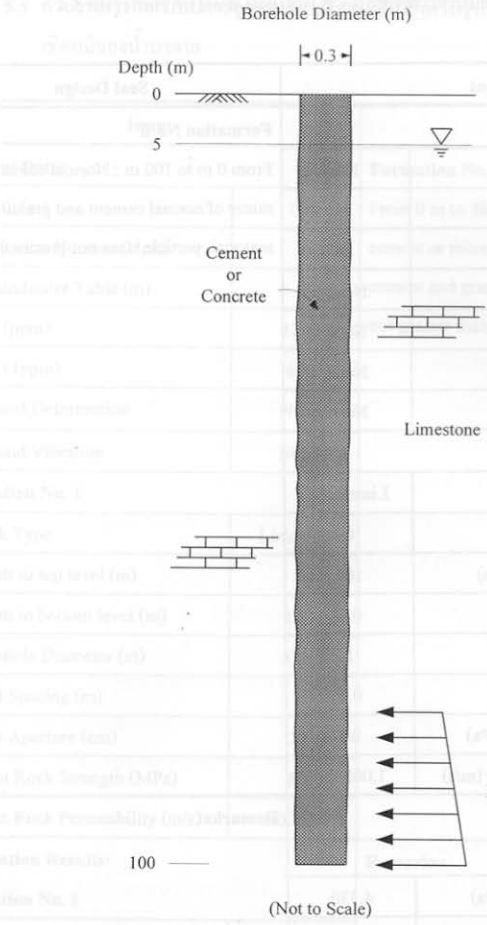
Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	10	From 0 m to 10 m : Granular material,
2. Formation Number (Unit)	1	particle sizes from 0.3 cm to 5 cm (Fine to
3. Groundwater Table (m)	5	coarse gravel)
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	10	
4. Borehole Diameter (m)	0.5	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.3	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	2.19E-02	
3. Tangential Stress (MPa)	0.996	



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาการเคลื่อนตัวของชั้นหิน

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.3

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	10	From 0 m to 10 m : Bentonite or mixer of
2. Formation Number (Unit)	1	bentonite and granular material, particle sizes
3. Groundwater Table (m)	5	not greater than 3 cm
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	Yes	
7. Ground Vibration	Yes	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	10	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.5	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.01E-01	
3. Tangential Stress (MPa)	0.996	



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความเค้นในชั้นหิน สำหรับหลุมเจาะที่อยู่ระดับลึกมาก

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.4

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	100	From 0 m to 100 m : Normal cement or
2. Formation Number (Unit)	1	mixer of normal cement and granular
3. Groundwater Table (m)	5	material, particle sizes not greater than 3 cm
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	100	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.5	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.01E-01	
3. Tangential Stress (MPa)	9.956	

ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับรูปที่ 5.4 แต่พิจารณาคุณสมบัติเชิงเคมีของน้ำบาดาล

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	100	From 0 m to 100 m : High sulfate resistant cement or mixer of high sulfate resistant cement and granular material, particle sizes not greater than 3 cm
2. Formation Number (Unit)	1	
3. Groundwater Table (m)	5	
4. SO_4 (ppm)	1200	
5. NaCl (ppm)	600	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	100	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.5	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results: **Formation No. 1**		**Remarks:**
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.01E-01	
3. Tangential Stress (MPa)	9.956	

5.5 การพิจารณาความแข็งของมวลหิน

ความแข็งมวลหินเป็นตัวกำหนดค่าความสามารถในการรับแรงของวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะร่วมกับค่าความเค้นที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ เนื่องจากมวลหินที่มีค่าความแข็งสูงแม้จะอยู่ในหลุมเจาะที่ระดับลึกหลุมเจาะก็จะไม่พัง ดังนั้นการอุดหลุมเจาะในชั้นหินที่มีความแข็งสูงและอยู่ในระดับลึกสามารถใช้วัสดุที่ไม่ต้องมีหน้าที่ค้ำยันผนังของหลุมเจาะ (ซึ่งจะทำการคำนวณในระบบผู้เชี่ยวชาญ) เช่น วัสดุกลุ่มเบนทอไนต์หรือวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์และวัสดุเม็ดหยาบแทนซีเมนต์ (รูปที่ 5.5 และตารางที่ 5.6)

5.6 การพิจารณาการทรุดตัวของเบนทอไนต์

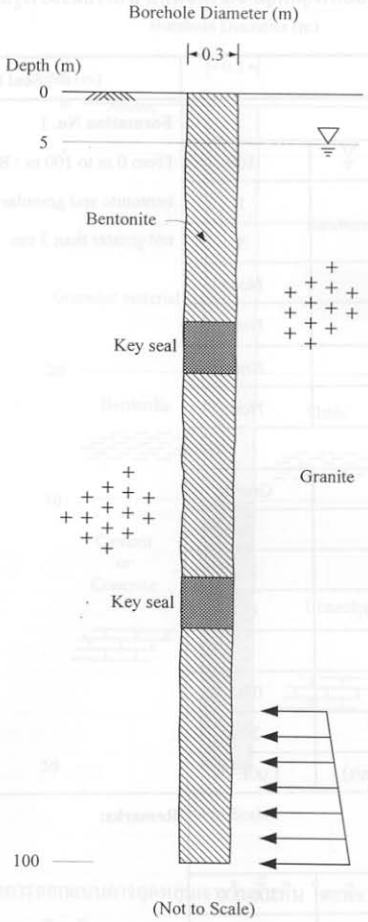
เนื่องจากเบนทอไนต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทรุดตัว (Consolidate) ตามกาลเวลา ดังนั้นการใช้วัสดุอุดหลุมเจาะในกลุ่มเบนทอไนต์ควรพิจารณาระยะการทรุดตัวของเบนทอไนต์และป้องกันการทรุดตัวของเบนทอไนต์ไม่ให้เกิน 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ โดยคำนวณการทรุดตัวของเบนทอไนต์ในช่วง 1,000 ปีหลังการอุด การป้องกันการทรุดตัวสามารถทำโดยการใส่ Key seal ในช่วงทุก 30 เมตรของความลึกของหลุมเจาะที่มีเบนทอไนต์เป็นวัสดุอุด Key seal อาจจะเป็นซีเมนต์หรือเป็นคอนกรีตก็ได้ (รูปที่ 5.5 และตารางที่ 5.6)

5.7 การพิจารณาชนิดของชั้นหิน

ในหลุมเจาะที่มีชั้นหินหลายชั้นและประกอบด้วยหินหลายชนิด ผลการออกแบบการอุดหลุมเจาะจะแตกต่างกันตามชนิดหินที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละชนิดหินมีคุณสมบัติทางกายภาพ กลศาสตร์และชลศาสตร์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.7 และ 5.8

5.8 การพิจารณาความหนาของชั้นหิน

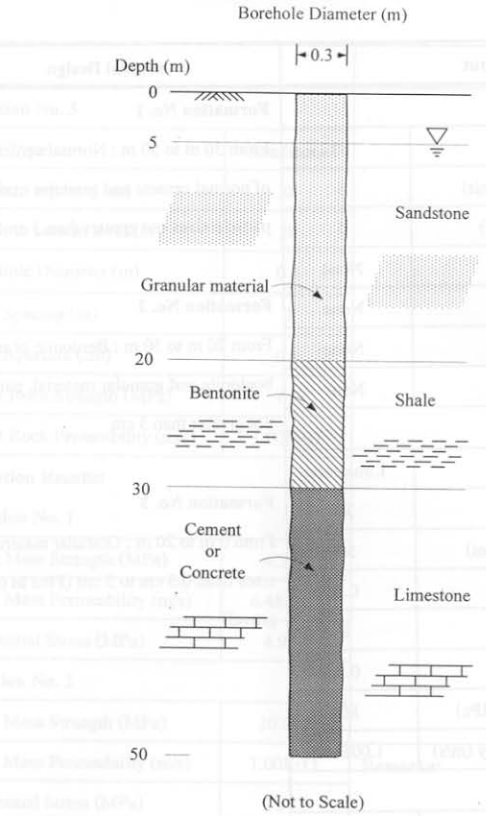
ชั้นหินที่เรียงตัวกันในหลุมเจาะแต่ละชั้นหินมีความหนาแตกต่างกันไป ชั้นหินที่มีความหนาน้อยกว่าขนาดของหลุมเจาะและมีความหนาน้อยมาก (<1/100) เมื่อเทียบกับชั้นหินที่วางตัวอยู่บนและล่าง การออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินนี้จะใช้วัสดุสำหรับอุดเหมือนกับวัสดุที่ใช้อุดในชั้นหินที่วางตัวอยู่ด้านบน โดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในขบวนการใส่วัสดุอุดในหลุมเจาะแสดงดังรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.9 และ 5.10



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความแข็งของมวลหิน ความเค้นในมวลหิน และการทรุดของเบนทอไนต์

ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.5

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	100	From 0 m to 100 m : Bentonite or mixer of
2. Formation Number (Unit)	1	bentonite and granular material, particle sizes
3. Groundwater Table (m)	5	not greater than 3 cm
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Granite	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	100	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	5	
6. Joint Aperture (cm)	0.02	
7.Intact Rock Strength (MPa)	200	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-08	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	200.000	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.30E-06	
3. Tangential Stress (MPa)	9.956	



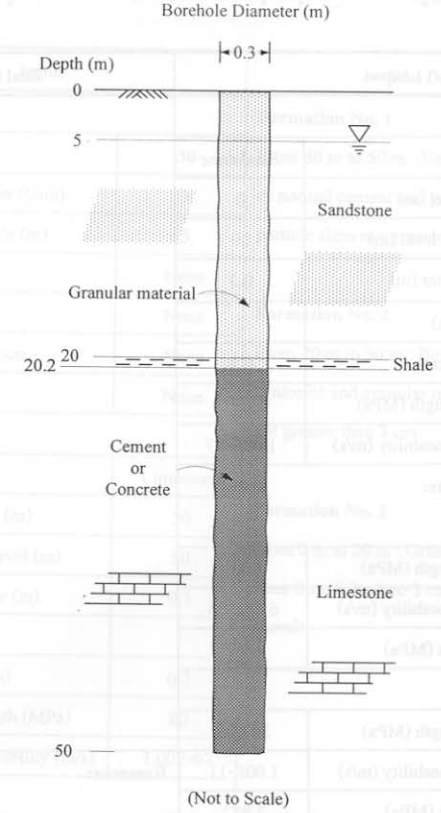
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาชั้นหินหลายชนิดในหลุมเจาะเดียวกัน

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.6

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	50	From 30 m to 50 m : Normal cement or mixer of normal cement and granular material, particle sizes not greater than 3 cm
2. Formation Number (Unit)	3	
3. Groundwater Table (m)	5	
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	**Formation No. 2**
6. Ground Deformation	None	From 20 m to 30 m : Bentonite or mixer of bentonite and granular material, particle sizes not greater than 3 cm
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	**Formation No. 3**
2. Depth to top level (m)	30	From 0 m to 20 m : Granular material, particle sizes from 0.3 cm to 3 cm (Fine to coarse gravel)
3. Depth to bottom level (m)	50	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.2	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Formation No. 2		
1. Rock Type	Shale	
2. Depth to top level (m)	20	
3. Depth to bottom level (m)	30	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	None	
6. Joint Aperture (cm)	None	
7. Intact Rock Strength (MPa)	30	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-11	

ตารางที่ 5.8 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.6 (ต่อ)

Input		Seal Design
Formation No. 3		
1. Rock Type	Sandstone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	20	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	2	
6. Joint Aperture (cm)	0.3	
7. Intact Rock Strength (MPa)	65	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results: **Formation No. 1**		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	6.48E-03	
3. Tangential Stress (MPa)	4.978	
Formation No. 2		
1. Rock Mass Strength (MPa)	30.000	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.00E-11	**Remarks:**
3. Tangential Stress (MPa)	2.987	
Formation No. 3		
1. Rock Mass Strength (MPa)	3.518	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.09E-02	
3. Tangential Stress (MPa)	1.991	



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาความหนาของชั้นหิน

ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.7

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	50	From 20.2 m to 50 m : Normal cement or
2. Formation Number (Unit)	3	mixer of normal cement and granular
3. Groundwater Table (m)	5	material, particle sizes not greater than 3 cm
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	**Formation No. 2**
6. Ground Deformation	None	From 20 m to 20.2 m : Granular material,
7. Ground Vibration	None	particle sizes from 0.3 cm to 3 cm (Fine to
Formation No. 1		coarse gravel) same Formation No.3
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	20.2	**Formation No. 3**
3. Depth to bottom level (m)	50	From 0 m to 20 m : Granular material,
4. Borehole Diameter (m)	0.3	particle sizes from 0.3 cm to 3 cm (Fine to
5. Joint Spacing (m)	1	coarse gravel)
6. Joint Aperture (cm)	0.2	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Formation No. 2		
1. Rock Type	Shale	
2. Depth to top level (m)	20	
3. Depth to bottom level (m)	20.2	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	None	
6. Joint Aperture (cm)	None	
7. Intact Rock Strength (MPa)	30	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-11	

ตารางที่ 5.10 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.7 (ต่อ)

Input		Seal Design
Formation No. 3		
1. Rock Type	Sandstone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	20	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	2	
6. Joint Aperture (cm)	0.3	
7. Intact Rock Strength (MPa)	65	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results:		
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	6.48E-03	
3. Tangential Stress (MPa)	4.978	
Formation No. 2		
1. Rock Mass Strength (MPa)	30.000	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.00E-11	**Remarks:**
3. Tangential Stress (MPa)	2.011	
Formation No. 3		
1. Rock Mass Strength (MPa)	3.518	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.09E-02	
3. Tangential Stress (MPa)	1.991	

5.9 การพิจารณาระดับน้ำบาดาล

ระดับน้ำบาดาลเป็นตัวกำหนดสภาวะที่เปียกหรือแห้งของหลุมเจาะ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดชนิดของวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ เนื่องจากวัสดุบางชนิดไม่เหมาะสมที่จะใช้อุดในหลุมเจาะที่แห้ง เช่น วัสดุกลุ่มซีเมนต์และกลุ่มเบนทอไนต์ แต่วัสดุกลุ่มเม็ดหยาบสามารถใช้อุดได้ทั้งในหลุมเจาะที่แห้งและเปียก ดังนั้นการอุดหลุมเจาะที่บนระดับน้ำบาดาลควรใช้วัสดุเม็ดหยาบ และที่จมอยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลควรใช้วัสดุกลุ่มซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.11 และ 5.12

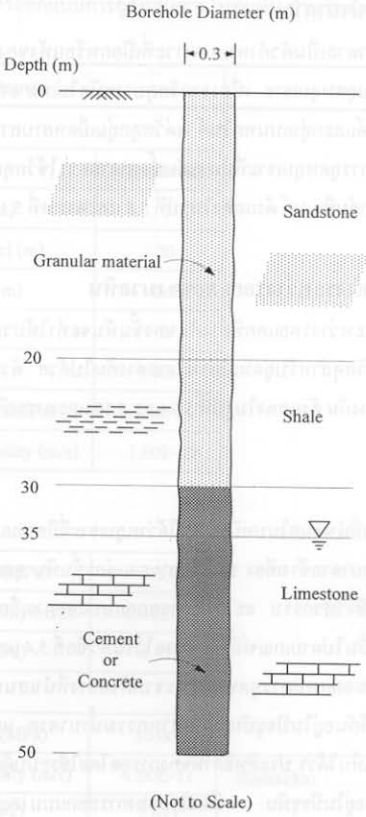
5.10 การพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน

ระยะห่างระหว่างรอยแตกที่ต่างกันของชั้นหินจะทำให้มวลหินมีค่าความแข็งที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะแตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่างการอุดหลุมเจาะที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 และตารางที่ 5.13 และ 5.14

5.11 สรุป

จากตัวอย่างที่นำเสนอในบทนี้จะเห็นได้ว่าหลุมเจาะที่มีความแตกต่างกันในเชิงกายภาพอุทกธรณีวิทยาเคมี ระดับน้ำบาดาลข้างเคียง ธรณีวิทยาของแต่ละชั้นหิน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหิน และความต้องการเชิงวิศวกรรม จะให้ผลการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.4 และ 5.5

เมื่อนำการออกแบบการอุดหลุมเจาะจากตัวอย่างที่นำเสนอในบทนี้มาเปรียบเทียบกับวิธีและการออกแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล แหล่งแร่ และการกักเก็บ (ดังที่นำเสนอในบทที่ 1) จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของการอุดโดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบจะดีกว่าการออกแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ถึงแม้ผลของการออกแบบโดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญจะใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการก่อสร้าง แต่จะอยู่บนพื้นฐานของหลักการทางวิชาการอย่างถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้การป้องกันการปนเปื้อนและมลพิษจากชั้นน้ำใต้ดินหรือบนดินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย



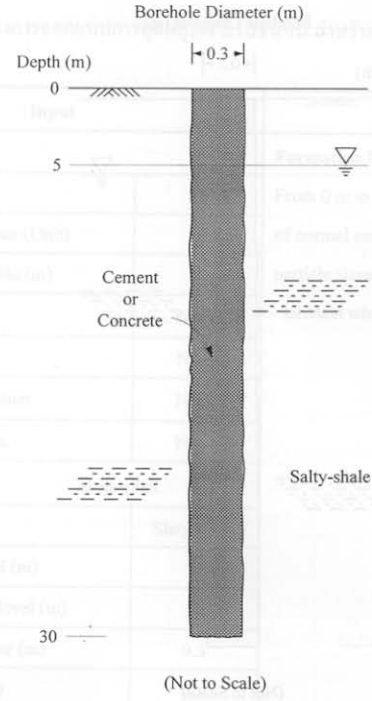
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระดับน้ำบาดาล

ตารางที่ 5.11 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.8

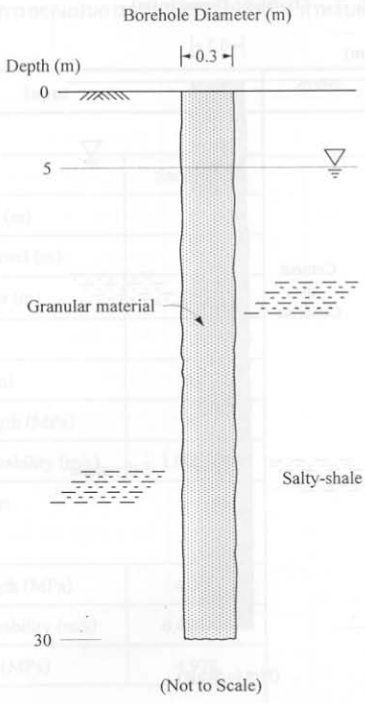
Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1** From 30 m to 50 m : Normal cement or mixer of normal cement and granular material, particle sizes not greater than 3 cm **Formation No. 2** From 20 m to 30 m : Granular material, particle sizes not greater than 3 cm (Fine to coarse gravel) **Formation No. 3** From 0 m to 20 m : Granular material, particle sizes from 0.3 cm to 3 cm (Fine to coarse gravel)
1. Depth (m)	50	
2. Formation Number (Unit)	3	
3. Groundwater Table (m)	35	
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	30	
3. Depth to bottom level (m)	50	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	1	
6. Joint Aperture (cm)	0.2	
7. Intact Rock Strength (MPa)	80	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Formation No. 2		
1. Rock Type	Shale	
2. Depth to top level (m)	20	
3. Depth to bottom level (m)	30	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	None	
6. Joint Aperture (cm)	None	
7. Intact Rock Strength (MPa)	30	
8.Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-11	

ตารางที่ 5.12 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.8 (ต่อ)

Input		Seal Design
Formation No. 3		
1. Rock Type	Sandstone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	20	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	2	
6. Joint Aperture (cm)	0.3	
7. Intact Rock Strength (MPa)	65	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-07	
Calculation Results: **Formation No. 1**		
1. Rock Mass Strength (MPa)	4.330	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	6.48E-03	
3. Tangential Stress (MPa)	4.978	
Formation No. 2		
1. Rock Mass Strength (MPa)	30.000	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.00E-11	**Remarks:**
3. Tangential Stress (MPa)	2.987	
Formation No. 3		
1. Rock Mass Strength (MPa)	3.518	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	1.09E-02	
3. Tangential Stress (MPa)	1.991	



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน (ระยะห่างระหว่างรอยแตกในตัวอย่างนี้เท่ากับ 0.1 m)



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างรอยแตกของมวลหิน (ระยะห่างระหว่างรอยแตกในตัวอย่างนี้เท่ากับ 3.5 m)

ตารางที่ 5.13 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.9

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	30	From 0 m to 10 m : Normal cement or mixer
2. Formation Number (Unit)	1	of normal cement and granular material,
3. Groundwater Table (m)	5	particle sizes not greater than 3 cm
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Slaty-shale	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	30	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	0.1	
6. Joint Aperture (cm)	0.03	
7. Intact Rock Strength (MPa)	15	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-08	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	0.026	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	2.19E-04	
3. Tangential Stress (MPa)	2.987	

ตารางที่ 5.14 ตัวอย่างการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน สำหรับตัวอย่างรูปที่ 5.10

Input		Seal Design
General Data:		**Formation No. 1**
1. Depth (m)	30	From 0 m to 10 m : Granular material,
2. Formation Number (Unit)	1	particle sizes from 0.03 cm to 3 cm
3. Groundwater Table (m)	5	(Medium sand to coarse gravel)
4. SO_4 (ppm)	None	
5. NaCl (ppm)	None	
6. Ground Deformation	None	
7. Ground Vibration	None	
Formation No. 1		
1. Rock Type	Limestone	
2. Depth to top level (m)	0	
3. Depth to bottom level (m)	30	
4. Borehole Diameter (m)	0.3	
5. Joint Spacing (m)	3.5	
6. Joint Aperture (cm)	0.03	
7. Intact Rock Strength (MPa)	15	
8. Intact Rock Permeability (m/s)	1.00E-08	
Calculation Results:		**Remarks:**
Formation No. 1		
1. Rock Mass Strength (MPa)	15.000	
2. Rock Mass Permeability (m/s)	6.24E-06	
3. Tangential Stress (MPa)	2.987	

บทที่ 6
บทสรุปและการวิจารณ์ผล

6.1 สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อพัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญในรูปของคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์เพื่อใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน หลุมเจาะเหล่านี้ได้รวมไปถึงหลุมเจาะที่ใช้ในการสำรวจและผลิตน้ำบาดาล ปิโตรเลียม และแหล่งแร่ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ

1) การจัดเตรียมฐานข้อมูลและแบบสอบถาม
2) การสัมภาษณ์
3) การวิเคราะห์
4) การเขียนซอฟท์แวร์
5) การทบทวนและตรวจสอบซอฟท์แวร์
6) การเขียนรายงานเพื่อนำเสนอผลงาน

ในขั้นแรกของงานวิจัยได้มีการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้รวมไปถึงการอุดหลุมเจาะในชั้นหินและก่อนำระบบปัญญาประดิษฐ์หรือระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมธรณี ผลจากการศึกษาและงานวิจัยในอดีตจากต่างประเทศระบุว่า ในช่วง 25 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาทางด้านทฤษฎี การทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามเพื่อศึกษาและออกแบบวัสดุทางด้านวิศวกรรม (ซีเมนต์ กรวด ทราย ดินเหนียว) ที่จะนำมาใช้ในการอุดหลุมเจาะ งานวิจัยส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเชิงเคมีของวัสดุนั้น ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าการอุดหลุมเจาะในชั้นหินจะมีประสิทธิภาพยืนยาวหลายสิบปี ซึ่งผลจากงานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้ได้นำเสนอในบทที่ 1 ของรายงานนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทางด้านระบบผู้เชี่ยวชาญพบว่าการนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของหินจะสามารถทำการออกแบบหรือตัดสินใจ รวมทั้งสร้างความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของหินในเชิงตัวเลขได้อย่างรวดเร็ว และยังจะช่วยให้ผู้ที่ใช้ระบบนั้น ๆ มีความมั่นใจยิ่งขึ้นในขณะที่ต้องเผชิญกับความไม่แน่นอนในเชิงการกระจายตัวและในเชิงคุณสมบัติของชั้นหินหรือมวลหินที่อยู่ในธรรมชาติ

ผลที่ได้จากการสัมภาษณ์และการวิเคราะห์องค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญการอุดหลุมเจาะสามารถนำมาประมวลและจำแนกออกเป็น 5 ส่วน คือ

1) ขอบเขตและข้อจำกัดองค์ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ
2) แนวคิดในการออกแบบของผู้เชี่ยวชาญ
3) การประเมินข้อมูลเบื้องต้น
4) ขบวนการที่ผู้เชี่ยวชาญใช้ในการออกแบบ
5) ขบวนการประเมินประสิทธิภาพของการอุดหลุมเจาะทั้งระบบ

ข้อมูลที่ผู้เชี่ยวชาญนำมาใช้ในการออกแบบถือว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้น สามารถจำแนกออกเป็น 7 กลุ่มหลัก คือ

1) ข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวกับหลุมเจาะ
2) ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ
3) ข้อมูลเกี่ยวกับอุทกธรณีวิทยาเคมี
4) ข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำบาดาล
5) ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยา
6) ข้อมูลเกี่ยวกับกลศาสตร์หิน
7) ข้อมูลความต้องการเชิงวิศวกรรม

ข้อมูลเหล่านี้จะถูกประเมินเบื้องต้น โดยระบบจะตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มาเพียงพอหรือไม่ ข้อมูลที่ขาดหายไปมีความสำคัญในการออกแบบมากน้อยเพียงใด และข้อมูลที่ขาดหายไปนั้นระบบสามารถกำหนดได้จากฐานข้อมูลที่มีอยู่ได้หรือไม่ ต่อมาระบบจะกำหนดหรือตัดสินว่าผู้ใช้จำเป็นต้องหาข้อมูลมาเพิ่มเติมหรือไม่ แต่ถ้ามีข้อมูลเพียงพอในเบื้องต้นระบบจะเริ่มขบวนการออกแบบการอุดหลุมเจาะนั้น ๆ

ระเบียบวิธีการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก คือ

1) ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ (Design Considerations)
2) ความต้องการในการออกแบบ (Functional Requirements)
3) ข้อจำกัดในการออกแบบ (Design Constraints)
4) ผลลัพธ์ของการออกแบบ (Design Solutions)
5) วัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะ (Design Components)
6) คุณลักษณะของวัสดุแต่ละชนิด (Design Specifications)

ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบจะประกอบด้วย ระดับน้ำบาดาล ค่าความซึมผ่านของมวลหิน ความลึกของหิน ความแข็งของมวลหิน คุณสมบัติเชิงเคมีของมวลหิน ขนาดของหลุมเจาะ และคุณลักษณะของรอยแตก ซึ่งปัจจัยทั้งหมดนี้จะนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดว่าการอุดหลุมเจาะ

ที่ตำแหน่งนั้น ๆ มีความต้องการในการออกแบบอย่างไรบ้าง อาทิ ความต้องการเชิงชลศาสตร์ ความต้องการเชิงกลศาสตร์ และความต้องการเชิงเคมี เป็นต้น นอกจากนั้นในขบวนการการออกแบบยังสามารถอนุญาตให้ผู้ใช้ตั้งข้อจำกัดในการออกแบบได้ เช่น ข้อจำกัดของวัสดุที่มีอยู่และข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

ในส่วนผลลัพธ์ของการออกแบบระบบได้กำหนดผลลัพธ์ไว้ 8 ลักษณะ ซึ่งสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ คือ

1) วัสดุเม็ดหยาบ
2) เบนทอไนต์
3) เบนทอไนต์อัดตัว
4) เบนทอไนต์ผสมกับกรวดหรือทราย
5) ซีเมนต์ชนิดธรรมดา
6) ซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต
7) คอนกรีตชนิดธรรมดา
8) คอนกรีตชนิดทนซัลเฟต

องค์ประกอบหรือส่วนผสมของวัสดุเหล่านี้จะถูกแยกย่อยออกไปอีกขั้นหนึ่ง โดยใช้เกณฑ์ 6 ประการ คือ

1) ระดับน้ำบาดาล
2) กลศาสตร์
3) ชลศาสตร์
4) ความต้องการเชิงวิศวกรรม
5) ธรณีวิทยาเคมี
6) ขนาดของวัสดุมวลหยาบ

หลังจากที่ได้พิจารณาเกณฑ์ทั้ง 6 ประการนี้แล้ว ระบบจะกำหนดคุณลักษณะ (Specifications) ของวัสดุแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้อุดหลุมเจาะ

ในการประเมินประสิทธิภาพของการอุดหลุมเจาะทั้งระบบจะใช้ระเบียบวิธีการออกแบบเชิงวิศวกรรมเช่นเดียวกัน กล่าวคือ จะมีการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การพิจารณาความต้องการในการออกแบบ การพิจารณาข้อจำกัดในการออกแบบ การประเมินประสิทธิภาพทั้งระบบ และการกำหนดองค์ประกอบของแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งในขบวนการชุดที่ 2 นี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงความยาวและชนิดของวัสดุที่นำมาอุดในหลุมเจาะเพื่อให้เหมาะสมขึ้น

งานวิจัยนี้ได้มีการสร้างแผนภูมิการไหลของระบบผู้เชี่ยวชาญ (Flowchart) เพื่อนำมาประกอบในการพัฒนาคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์ โดยได้นำ Visual basic version 6 มาใช้เป็นกรอบของระบบ ซึ่งจะสามารถทำให้ผู้ใช้สามารถใช้คำสั่งตอบได้กับระบบในขณะที่ป้อนข้อมูลเพื่อให้ได้ผลของการออกแบบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความสามารถของระบบผู้เชี่ยวชาญในเชิงรายละเอียดและเชิงความครอบคลุมคุณลักษณะของหลุมเจาะที่หลากชนิด โดยการให้ระบบทำการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่มีคุณลักษณะต่างกันในชั้นหินที่มีความหลากหลายในเชิงธรณีวิทยา โดยการออกแบบตัวอย่างการอุดหลุมเจาะเหล่านี้ได้ยกประเด็นการพิจารณาขึ้นหลายประการ เช่น ขนาดของหลุมเจาะ ชนิด ความหนา ความลึก ความแข็งของชั้นหิน และระดับน้ำบาดาล เป็นต้น ผลที่ได้จากการทำงานของระบบระบุว่า ระบบสามารถคัดเลือกวัสดุและออกแบบการอุดหลุมเจาะได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ และสามารถเลือกสรรวัสดุที่เหมาะสมได้หลากชนิดและสอดคล้องกับความหลากหลายของลักษณะทางด้านธรณีวิทยาที่ได้ยกตัวอย่างขึ้น

6.2 การวิจารณ์ผลงานวิจัย

1. การออกแบบการอุดหลุมเจาะในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่หลุมเจาะในอุตสาหกรรมการสำรวจและผลิตน้ำบาดาลและแหล่งแร่ ซึ่งยังขาดเทคโนโลยีและแนวทางที่เหมาะสม ส่วนหลุมเจาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้มีการออกแบบไว้อย่างเป็นระบบตามหลักวิชาการพอสมควรแล้ว และค่อนข้างล้ำหน้ากว่าอุตสาหกรรมทางด้านอื่น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงไม่เน้นการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

2. การออกแบบการอุดหลุมเจาะโดยระบบผู้เชี่ยวชาญที่เป็นผลจากงานวิจัยนี้อาจเพิ่มค่าใช้จ่ายในการอุดสูงกว่าการอุดหลุมเจาะที่ได้ดำเนินการมาในอดีตจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การอุดหลุมเจาะจากคำแนะนำของระบบผู้เชี่ยวชาญจะถูกต้องตามหลักวิชาการและสอดคล้องกับงานวิจัยและการศึกษาที่ได้ดำเนินการมากว่า 20 ปีในต่างประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้วิศวกรมีความมั่นใจในประสิทธิภาพของการอุด และป้องกันผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

3. ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในระบบผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ประการนั้นอาจจะไม่ครอบคลุมสภาวะและสิ่งแวดล้อมของหลุมเจาะบางแห่งได้ทั้งหมด เพราะยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ เช่น หลุมเจาะที่อยู่ใต้แม่น้ำหรืออ่างเก็บน้ำ และหลุมเจาะที่อยู่ในภูมิอากาศเยือกเย็น เป็นต้น ดังนั้นวิศวกรควรตรวจสอบและพิจารณาปัจจัยทั้งหมดในพื้นที่เข้ามาประกอบด้วย

4. หลุมเจาะที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ถูกจำกัดขอบเขตไว้เพียงหลุมเจาะที่อยู่ในแนวดิ่งและมีทิศทางลงเท่านั้น แต่หลุมเจาะในชั้นหินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ได้ดินอาจมีทิศทางที่ไม่อยู่ในแนวดิ่ง (เอียงขึ้น เอียงลง หรืออยู่ในแนวระนาบ) หลุมเจาะที่ไม่ได้อยู่ในแนวดิ่ง

เหล่านี้จะไม่สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการอุดหลุมเจาะได้ ซึ่งขบวนการออกแบบการอุดหลุมเจาะเหล่านี้อาจมีความต้องการการศึกษาและวิจัยในอนาคต

5. วัสดุที่ใช้ในการอุดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและใช้ในอุตสาหกรรมที่มีอยู่อย่างกว้างขวาง เช่น ซีเมนต์ กรวด และทราย นอกจากนี้ยังมีวัสดุชั้นสูงที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมยังมีอีกหลายชนิด เช่น การใช้สารสังเคราะห์ต่าง ๆ แต่เนื่องจากสารสังเคราะห์ทางเคมีมีราคาสูงและมีใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะเท่านั้น วัสดุเหล่านี้จึงไม่รวมอยู่ในคำแนะนำของระบบผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัยนี้

6. ในส่วนของวิธีการอุดหรือขั้นตอนการอุดสำหรับวัสดุแต่ละชนิดได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้เพียงคร่าว ๆ เท่านั้น โดยเน้นที่หลักการและขั้นตอนที่สำคัญ ส่วนอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ประกอบในขบวนการการอุดสามารถนำอุปกรณ์ที่มีอยู่ในพื้นที่หรือท้องถิ่นที่มีความเหมาะสมมาประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย

7. แนวคิดในการออกแบบของแต่ละผู้เชี่ยวชาญอาจมีความแตกต่างกัน ดังนั้นคำแนะนำในการออกแบบการอุดหลุมเจาะที่เสนอไว้ในงานวิจัยนี้อาจจะแตกต่างกับแนวคิดของผู้เชี่ยวชาญหรือวิศวกรท่านอื่น ซึ่งในประเด็นนี้มิได้หมายความว่ามีผู้ใดถูกหรือผิด แต่ควรจะตัดสินจากผลการออกแบบว่าคำแนะนำที่ต่างกันนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด

บรรณานุกรม

กรมทรัพยากรธรณี (2535) พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 : แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติน้ำบาดาล ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2535. กรุงเทพ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี (2524) กฎกระทรวง ประกาศกรมทรัพยากรธรณี ออกตามความในพระราชบัญญัติปิโตรเลียม พ.ศ. 2514 : แก้ไขเพิ่มเติมโดยกฎกระทรวง ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2524. กรุงเทพ : กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี.

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2546) กลศาสตร์หินพื้นฐาน. กรุงเทพ : บริษัท อีซึ่น เพ้นท์ โปรดัก, 210 หน้า.

ชัชวาล เศรษฐบุตร (2537) คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพ : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค)

ประณต กุลประสูตร (2538) เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. กรุงเทพ : บริษัท อมรินทร์ พริ้นติ้ง แอนด์ พับบลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน)

พิภพ สุนทรสมัย (2539) วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง. กรุงเทพ : บริษัท ส. เอเชียเพรส จำกัด

วรากร ไม้เรียง และวรรณี สุขสาสตร (2540) ระบบฐานความรู้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย ในการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4 จัดโดย สจช. ร่วมกับ ว.ส.ท. วันที่ 12-14 พฤศจิกายน 2540

สุรฉัตร สัมพันธารักษ์ (2540) วิศวกรรมปฐพี. กรุงเทพ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

Adams, T.M. and Bosscher, P.J. (1995) Integration of GIS and knowledge-based systems for subsurface characterization, in Expert Systems for Civil Engineers: Integrated & Distributed Systems (eds Maher, M.L. & Tommelein, I.), New York: ASCE.

Adeli, H. (1988a) An Overview of expert systems in civil engineering. In H. Adeli (ed.). Expert Systems in Contruction and Structural engineering. London: Chapman and Hall, pp. 5-83.

Adeli, H. (1988b) Artificial intelligence and expert systems. In H. Adeli (ed.). Expert Systems in Construction and Structural engineering. London: Chapman and Hall, pp. 1-12.

Adeli, H. (1988c) AI techniques and the development of expert systems. In H. Adeli (ed.). Expert Systems in Construction and Structural engineering. London: Chapman and Hall, pp. 13-21.

Akgun, H. (1997) An assessment of borehole sealing in a salt environment. Environmental Geology. 31: 34-41.

Akgun, H. (1996) "Strength Parameters of Cement Borehole Seals in Rock," Sealing of Borehole and Underground Excavation in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 28-39.

Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (1994) Performanced assessment of cement grout borehole plugs in basalt. Engineering Geology, 37, 137-48.

Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (1997) Analytical and experimental assessment of mechanical borehole sealing performance in rock. Engineering Geology. 47(3): 233-241.

Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (2002) Influence of degree of saturation on the borehole sealing performance of an expansive cement grout. Cement and Concrete Research. 30(2): 281-289.

Alim, S. and Munro, J. (1987) PROLOG-Based Expert Systems in Civil Engineering, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, Vol. 83, pp. 1-14.

Amer, M.I. and Abdel Rahman, M.M. (1994) Sheet Pile Knowledge Based Expert System, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, pp. 417-422.

Arockiasamy, M., Radhakrishnan, N., Sreenivasan, G. and Lee, S. (1991) KBES Applications to the Selection and Design of Retaining Structures, Proc. Geotechnical Engineering Congress, Geotechnical Special Publication No. 27, (eds. McLean, F.G., Campbell, D.A. & Harris, D.W.), Boulder, Colorado: ASCE, pp. 391-402.

Asgian, M.I., Arulmoli, K., Miller, W.O. and Sanjeevan, K. (1988) An expert system for diagnosis and treatment of dam seepage problems, in Microcomputer knowledge-based expert systems in Civil Eng. (ed. Adeli, H.), ASCE: New York, pp. 118-126.

ASTM C150 (1998) "Standard for Portland Cement" . Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Cement; Lime; Gypsum. U. S. A.: American Society for Testing and Materials.

ASTM D1557. "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lb/ft^3, 2,700 kN-m/m^3)". Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Soil and Rock; Dimension stone; Geosynthetics. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

Basheer, I.A. and Najjar, Y.M. (1995) A Neural-Network For Soil Compaction, Proc. 5th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, Davos, Switzerland (eds. Pande, G.N. & Pietruszczak, S.), Rotterdam: Balkema, pp. 435-440.

Basheer, I.A., Reddi, L.N. and Najjar, Y.M. (1996) Site Characterization by Neuronets - An Application to the Landfill Siting Problem, Ground Water, Vol. 34, No. 4, pp. 610-617.

Bearman, R.A., Barley, R.W. and Hitchcock, A. (1990) The Development of a Comminution Index for Rock and the use of an Expert System to Assist the Engineer in Predicting Crushing Requirements, Minerals Engineering, Vol. 3, No. 1-2, pp. 117-127.

Boissier, D. and Henry, E. (1995) Generation of Foundations - A Methodological Approach for a Knowledge-Based System, Proc. 6th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (eds. Pahl, P.J. & Werner, H.), Rotterdam: Balkema, pp. 1333-1340.

Bowles, J.E. (1982) foundation analysis and design. New York : McGraw-Hill.

Butler, A.G. and Franklin, J.A. (1990) Classex - An Expert System for Rock Mass Classification, in Static And Dynamic Considerations in Rock Engineering (ed. Brummer, R.), Brookfield VT: Balkema, pp. 73-80.

Cai, J.G., Zhao, J. and Hudson, J.A. (1998) Computerization of Rock Engineering System using Neural Networks with an Expert System. Rock Mechanics and Rock Engineering. 31 (3): 135-152.

Chahine, J.R. and Janson, B.N. (1987) Interfacing Databases with Expert Systems: a Retaining Wall Management Application, Microcomputers in Civil Eng., 2, 1, pp. 19-38.

Chouicha, M.A., Siller, T.J. and Charlie, W.A. (1994) An Expert-System Approach to Liquefaction Analysis: 2. Evaluation, Computers and Geotechnics, Vol. 16, No. 1, pp. 37-69

Coulthard, M.A. (1995) Report - Expert-Systems as a Guide to Safer Rock Excavation Design, Proc. EUROCK 93: Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Lisbon (eds. Ribeiroesousa, L. & Grossmann, N.F.), Rotterdam: Balkema, Vol. 2, pp. 1147-1161.

Coulthard, M.A. and Van Ciesielski (1991) Expert System to Choose a Stress-Analysis Program for Rock Excavation Design, in Computer Methods and Advances in Geomechanics, (eds. Beer, G., Booker, J.R., Carter, J.P.), Brookfield VT: Balkema, Vol. 1, pp. 51-56.

Crouthamel, D.R., Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen (1993) "In Situ Flow Testing of Cement Borehole Plug in Welded Tuff," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 30, pp. 1503-1506, presented at the 34th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 27-30, University of Wisconsin, Madison.

Daemen, J.J.K. and Fuenkajorn, K. (1996) "Design of Boreholes Seals - Processes, Criteria and Considerations," Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 267-279.

Daemen, J.J.K., Greer, W.B., Adisoma, G.S., Fuenkajorn, K., Sawyer, W.D., Jr., Akgun, H. and Kousari, B. (1984) Rock Mass Sealing - Annual Report June 1983 - May 1984, NUREG/CR-4174, published by Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 360 pp.

Daemen, J.J.K., Greer, W.B., Fuenkajorn, K., Akgun, H., Schaffer, A., Kimbrell, A.F., Avery, T.S., Williams, J.R. and Roko, R.O. (1986) Experimental Assessment of Borehole Plug Performance, Annual Report NUREG/CR-4642, published by US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 478 pp.

Daemen, J.J.K., South, D.L., Greer, W.B., Stormont, J.C., Dischler, S.A., Adisoma, G.S., Colburn, N.I., Fuenkajorn, K., Miles, D.E., Kousari, B. and Bertuca, J. (1983) Rock Mass Sealing - Annual Report June 1983 - May 1984, NUREG/CR-3473, published by US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 281 pp.

Davey-Wilson, I.E.G. (1993) Evaluation of Artificial-Intelligence and Hypertext Approches to a Geotechnical Expert-System. In B.H.V. Topping and A.I. Khan (eds.). Information Technology for Civil and Structural Engineers. Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 109-113.

Davey-Wilson, I.E.G. (1991a) Geotechnical Laboratory Test Simulation using AI Techniques, in Artificial Intelligence and Civil Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 119-124.

Davey-Wilson, I.E.G. (1991b) Development of a Prolog Based Expert System for Groundwater Control, Computers and Structures, 40, 1, pp. 185-189.

Davey-Wilson, I.E.G. and May, I.M. (1989) Development of a knowledge-based system for the selection of groundwater control methods, Computers and Geotechnics, 7, pp. 189-203.

Davey-Wilson, I.E.G. and Mistry, K. (1995) An Intelligence Database to Predict Geotechnical Parameters, in Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering (ed Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 105-111

Denby, B. and Kizil, M.S. (1991) Application of Expert Systems in Geotechnical Risk Assessment for Surface Coal Mine Design, Int. Jnl. of Surface Mining and Reclamation, 5, 2, pp. 75-82.

Dixon, D.A., Wan, A. W. L., Graham, J. and Campbell, S.L. (1993) Assessment of self-sealing and self-healing abilities of dense, high-bentonite-content sealing materials. Proc. 1993 joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering, Montreal, Quebec.

Economides, M.J., Watters, L.T. and Dunn-Norman, S. (1998) Petroleum well construction. Chichester : John Wiley & Sons.

Ellis, G.W., Yao, C., Zhao, R. and Penumadu, D. (1995) Stress-Strain Modeling of Sands using Artificial Neural Networks, Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 429-435

Fairhurst, C. and Lin, D. (1985) Fuzzy Methodology in Tunnel Support Design in Research and Engineering Applications in Rock Masses (ed. Ashworth, E.), Proc. 26th US Rock Mechanics Symposium, Accord MA: International Publishers Service Inc, pp. 269-278.

Faure, R.M., Mascarelli, D., Vaunat, J., Leroueil, S. and Tavenas, F. (1995) Present State of Development of XPENT, Expert-System for Slope Stability Problems, Proc. 6th Int. Symp. Landslides, Christchurch (ed. Bell, D.H.), Rotterdam: Balkema, pp. 1671-1678.

Faure, R.M., Mascarelli, D., Zelfani, M., Charveriat, L., Gandar, J. and Mosuro, O. (1991) XPENT - An Expert System for Slope Stability, in Artificial Intelligence and Civil Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 143-147.

Feng, X. and Lin Y. (1992) Knowledge-based Expert System for Support Design in Tunnel Engineering, Proc. 5th Int. Conf. Underground Space and Earth Sheltered Structures, (ed. Boyer L.L.), Delft, the Netherlands, pp. 789-797.

Fisher, D.J., O'Neill, M.W. and Abaya, E.L. (1993) An Expert-System Application for Drilled Shaft Construction, Proc. 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations, Bored And Auger Piles, Ghent (ed. Van Impe, W.F.), Rotterdam: Balkema, pp. 377-379.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. The united state of America : McGraw-Hill, Inc.

Fuenkajorn, K. (1985) "Experimental Assessment of Borehole Wall Drilling Damage in Basaltic Rocks," M.S. Thesis, Mining and Geological Engineering Department, University of Arizona, Tucson.

Fuenkajorn, K. (1988) "Borehole Closure in Salt," Ph.D. Dissertation, Mining and Geological Engineering Department, University of Arizona, Tucson.

Fuenkajorn, K. (1996) "Overview of Research Effort on Sealing of Boreholes, Shafts and Ramps in Welded Tuff," Proc. Workshop on Rock Mechanics Issues in Repository Design and Performance Assessment, September 19-20, 1994, Washington, DC.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1984) "Experimental Assessment of Borehole Wall Drilling Damage in Basaltic Rocks," Rock Mechanics in Productivity and Protection: Proceedings of the 25th U.S. Symposium, June 25-27, Northwestern University, Evanston, IL, pp. 774-783.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986a) "Rock-Cement Interface Effects on Borehole Plug Permeability," Waste Management'86: Proceedings of the Waste Management Symposium, March 2-6, Tucson, Arizona, Vol. 2 - High Level Waste, pp. 251-256.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986b) "Shape Effect on Ring Test Tensile Strength," Key to Energy Production: Proceedings of the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 23-25, University of Alabama, Tuscaloosa, pp. 155-163.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986c) Experimental Assessment of Borehole Wall Drilling Damage in Basaltic Rocks, Technical Report, NUREG/CR-4641, published by Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 265 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1987) "Mechanical Interaction between Rock and Multi-component Shaft or Borehole Plugs," Rock Mechanics: Proceedings of the 28th U.S. Symposium, June 29 - July 1, University of Arizona, Tucson, pp. 165-172.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988a) "Borehole Closure in Salt," Key Questions in Rock Mechanics: Proceedings of the 29th U.S. Symposium, June 13-15, University of Minnesota, Minneapolis, pp. 191-198.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988b) Borehole Closure in Salt, Technical Report, NUREG/CR-5243, published by Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 450 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1991a) "Brine-Mixed Bentonite Borehole Plugs," Proceedings of the Waste Management'91 Symposium, Feb. 24-28, Tucson, Arizona.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1991b) "Cement Borehole Plug Performance in Welded Tuff," Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science: Proceedings of the 32nd U.S. Symposium, June 10-12, University of Oklahoma, Norman, pp. 723-732.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1992a) Borehole Deformation and Stability in Welded Tuff, Technical Report, NUREG/CR-5687, published by Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 58 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K., (1992b) "Borehole Sealing," Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, CA, pp. 5.1-5.21.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K., (1992c) "Drilling-Induced Fractures in Borehole Walls," Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers, February, Vol. 44, No. 2, pp. 210-216.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1996a) "Design Guideline for Mine Sealing," The 1996 Arizona Conference, Tucson, Arizona, December 8-9.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1996b) "Sealing of Boreholes in Rock - An Overview," Proc. 2nd North American Rock Mech. Symposium, Montreal, Quebec, Canada, pp. 1447-1454.

Fuenkajorn, K. and Daemenc J.J.K. (authors & editors) (1996c) Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, 322 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1997) "Mine Sealing: Design Guidelines and Considerations," Tailings and Mine Waste '97, Colorado State University, Fort Collins, January 13-17, pp. 59-68.

Fuenkajorn, K. and Serata, S. (1992) "Geohydrological Integrity of CAES in Rock Salt," Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, CA, pp. 4.1-4.21.

Fuenkajorn, K. and Stormont, J.C. (1997) "Geomechanics and Geohydrological Issues in," Mine Sealing," 1997 SME Annual Meeting & Exhibit, Denver, Colorado, February 24-27.

Gass, T (1991) The impact of abandoned wells on ground water quality. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Ghosh, A., Harpalani, S. and Daemen, J.K.K. (1987) Expert System for Coal Mine Roof Bolt Design, Proc. 28th US Rock Mechanics Symposium, Tuscon, Arizona (eds I.W. Farmer, J.K.K. Daemen, C.S. Desai, C.E. Glass, S.P. Neuman), pp. 1137-1144.

Gokay, M.K. (1993) Developing Computer Methodologies for Rock Engineering Decisions, PhD thesis, Imperial College, University of London.

Goodman, R.E. (1989) Introduction to rock mechanics. New York : John Wiley & Son.

Gray, T.A. and Gray, R.E. (1992) Mine closure, sealing, and abandonment. SME mining handbook. 1,2 : 659-674.

Greer, W. B. and Daemen, J. J. K. (1991) Analyses and Field Tests of the Hydraulic Performance of Cement Grout Borehole Seals. US Nuclear Regulatory Commission Rep. NUREG/CR-5684, Washington, DC.

Greer, W. B. and Daemen, J. J. K. (1992) Hydraulic performance tests of a cement grout borehole seal. SME Trans., 292, 1911-7.

Grivas, D.A. and Reagan, J.C. (1988) An Expert System for the Evaluation and Treatment of Earth Slope Instability, Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne (ed. Bonnard, C.), Brookfield VT: Balkema, pp. 649-654.

Hadipriono, F.C., Diaz, C.F. and Wolfe, W.E. (1991) Toward the Development of A Knowledge Base Expert System for Determining the Causes of Foundation Failures, Proc. Conf. on Computational Structures Technology, Edinburgh: Civil-Comp Press.

Halabe, V. and Einstein, H.H. (1994) SIMSECTION: Knowledge based User Interface for Tunnelling, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, pp. 429-434.

Hao, S.Y. and Zhang, Q (1994) An Expert-System for Stability Analysis of Rock Slope, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, pp. 435-439.

Harr, M.E. (1962) Groundwater and seepage. The united state of America : McGraw-Hill, Inc.

Hirokane M., Mikami, I., Yagashira, K. and Ohmori, S. (1993) Knowledge Acquisition and Evaluation for Selection of Slope-protection Structures, in Knowledge Based Systems for Civil and Structural Engineering (ed. Topping B.H.V.), CIVIL-COMP Press, Edinburgh, pp. 161-169.

Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) Rock slope engineering. London : Institution of mining and metallurgy.

Hoek, E. and Brown, E.T. (1980) Underground excavations in rock. London : Institution of mining and metallurgy.

Hoek, E. and Brown, J.W. (1980) Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotechnical Engineering Div., A.S.C.E., Vol. 106, No. GT9 : 1013-1035.

Homoud, A.S. and Masri, G.A. (1998) An Expert System for Evaluating Failure Potential of Cut Slopes and Embankments Using Fuzzy Sets Theory. Geotechnical Engineering Bullentin Vol. 7, No. 4 : 249-276.

Hudson, J.A. (1992) Rock Engineering Systems : Theory and Practice, New York : Ellis Horwood.

Hutchinson, P.J., Rosenman, M.A. and Gero, J.S. (1987) RETWALL: An Expert System for the Selection and Preliminary Design of Earth Retaining Structures, Knowledge-based Systems, 1, 1, pp. 11-23.

Illinois department of mines and minerals (1991) Sealing abandoned water well. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Izadi, M., Puzenat, Y., Chambon, R. and Flavigny, E. (1995) An Expert-System for the Design of Shallow Foundations, in Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 121-127.

Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1979) Fundamentals of rock mechanics. London : Chapman and Hall.

Juang, C.H. and Lee, D.H. (1989) Development of an Expert System for Rock Mass Classification, Civil Engineering Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 147-156.

Kato, N., Sugiyama, T. and Tsuboi, T. (1995) An Expert-System for the Planning and Progress of Foundation Work, in Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 67-73

Koczanowski, M., Mostyn, G. and MacGregor, F. (1991) An Expert System for Rock Rippability Assessment. In Proc. 7th International Congress on Rock Mechanics. Aachen, Brookfield VT: Balkema, Vol. 1, pp. 275-279.

King, R.L. and Signer, S.P. (1994) Using Artificial Neural Networks for Feature Detection in Coal Mine Roofs, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, pp. 1853-1857.

Kizil, M.S. and Denby, B. (1990) Geotechnical Risk Assessment using Expert Systems for Surface Coal-Mine Design, in Mine Planning and Equipment Selection 1990 (eds. Singhal, R.K., Vavra, M.), Brookfield VT: Balkema, pp. 295-304.

Koczanowski, M., Mostyn, G. and MacGregor, F. (1991) An Expert System for Rock Rippability Assessment, Proc. 7th International Congress On Rock Mechanics, Aachen, Brookfield VT:Balkema, Vol. 1, pp. 275-279.

Konkoly, G.M. (1986) A Shallow Trench Design Expert System, Master's Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.

Kotdawala, S.J. and Hossain, M. (1994) Knowledge and Data-Driven Expert-System for Soil Compaction, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, Vol. 1, pp. 465-470.

Lee, C. and Sterling, R. (1992) Identifying Probable Failure Modes for Underground Openings using a Neural Network, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 29, No. 1, pp. 49-67.

Lok, M. (1987) LOGS: A Prototype Expert System to Determine Stratification Profile from Multiple Boring Logs, Master's thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Madhu, S., Juang, C.H., Chen, J.W. and Lee, D.H. (1995) A Knowledge-Based Approach to Rock Mass Classification and Tunnel Support Selection, Civil Engineering Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 307-325.

Maher, M.H. and Williams, T.P. (1991) A Hybrid Expert System for Design with Geosynthetics, Proc. Geotechnical Engineering Congress, Geotechnical Special Publication No. 27, (eds. McLean, F.G., Campbell, D.A. & Harris, D.W.), Boulder, Colorado: ASCE, pp. 241-252.

Mannsbart, G. and Resl, S. (1993) An Expert-System for the Design of Geotextiles, Geotextiles And Geomembranes, Vol. 12, No. 5, pp 441-450.

Manteufel, R.D., Fuenkajorn, K., Bonano, E.J. and Gureghian, A.B. (1994) Review Comments on SAND93-1184: A Strategy to Seal Exploratory Boreholes in Unsaturated Tuff, Technical Report, published by Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, for the US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC

McGinty, J.E. and Calvert, D.G. (1991) Cementing off, plugging and redrilling. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Mi, Z. and Jieliang, P. (1989) An Expert System of Predicting and Preventing Surface Settlement Caused by Shield-Driven Tunneling in City, Proc. Int. Conf. on Expert Systems in Engineering Applications, China: Huazhong University of Science and Technology Press, pp. 466-472.

Millar, D. and Clarici, E. (1994) Investigation of Backpropagation Artificial Neural Networks in Modeling the Stress-Strain Behavior of Sandstone Rock, Proc. 1994 IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway NJ: IEEE Service Center, pp. 3326-3331.

Millar, D.L. and Calderbank, P.A. (1995) On the Investigation of a Multilayer Feedforward Neural-Network Model of Rock Deformability Behavior, Proc. 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo (eds. Fujii, T.), Rotterdam: Balkema, pp. 933-938.

Millar, D.L. and Hudson, J.A. (1994) Performance Monitoring of Rock Engineering Systems using Neural Networks, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A - Mining Industry, Vol. 103, pp. A3-A16

Moon, H.K., Na, S.M. and Lee, C.W. (1995) Artificial Neural-Network Integrated with Expert-System for Preliminary Design of Tunnels and Slopes, Proc. 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan, (eds Fujii, T.), Rotterdam: Balkema, Vols 1 & 2, pp. 901-905.

Moula, M. (1993) Aknowledge based system to assist in the selection of appropriate geotechnical field tests, PhD Thesis, University of Durham, 186 p.

Moula, M., Toll, D.G. and Vaptismas, N. (1995) Knowledge-based systems in geotechnical engineering, Geotechnique, 45, 2, pp. 209-221.

Najjar, Y.M. and Basheer, I.A. (1996) Utilizing Computational Neural Networks for Evaluating the Permeability of Compacted Clay Liners, Geotechnical & Geological Engineering, 14, 3, pp. 193-212.

Neaupane, K.M. and Adhikari, N.R. (2002) Application of Neural Network for the Prediction of Settlements above Tunnels. Research and Development Journal Vol.13 (1) : 9-17.

Neville, A.M. (1981) Properties of concrete. England : Longman Group Limited.

Norkin, D.D. (1985) Expert System for Geotechnical Site Characterisation, Master's dissertation, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.

Nye, J.D. (1991) Abandoned wells : How one state deals with them. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Ohnishi, Y. and Soliman, M. (1995) Seepage Under Concrete Dam Founded on Rock Formation using Artificial Neural Networks, International Workshop on Rock Foundation, Tokyo (eds. Yoshinaka, R., Kikuchi, K.), Rotterdam: Balkema, pp. 355-360.

Oliphant, J., Ibrahim, J.A.R. and Jowitt, P.W. (1996) ASSIST: A Computer-based Advisory System for Site Investigations, Proc. Instn. Civ. Engrs Geotechnical Engineering, 119, pp. 109-122.

Olmo, C.D. et al. (1996) Thermo mechanical properties of deep argillaceous formations. Engineering geology. 41 : 87-101.

Ouyang, S. and Daemen, J. J. K. (1996) "Performance of Bentonite and Bentonite/Crushed Rock Borehole Seals," Sealing of Borehole and Underground Excavation in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 65-95.

Ozgenoglu, A. and Ocal, A. (1994) SEVDUR - An Expert-System For Slope Stability Analysis, Proc. 3rd Int. Symp. Mine Planning And Equipment Selection, Istanbul (eds. Pasamehmetoglu, A.G., Karpuz, C., Eskikaya, S., Hizal, T.), Rotterdam: Balkema, pp. 625-628.

Papp, J.E. (1996) "Sodium Bentonite as a Borehole Sealant," Sealing of Borehole and Underground Excavation in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 280-297.

Parikh, S.A. and Kameswara Rao, N.S.V. (1991) An Expert System for Civil Engineering Applications, Proc. Geotechnical Engineering Congress, Geotechnical Special Publication No. 27, (eds. McLean F.G., Campbell D. A. and Harris D.W.), Boulder, Colorado: ASCE, pp. 413-421.

Pfeifle, T. W. (1991) Consolidation, Permeability, and Strength of Crushed Salt/Bentonite Mixtures with Application to the WIPP. Sandia National Lab. Rep. SAND90-7009, Albuquerque.

Pusch, R., and Bergstom, A. (1980) "Highly Compacted Bentonite for Borehole and Shaft Plugging" Workshop on Borehole and Shaft Plugging, Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency, Columbus, Ohio, May 7-9.

Ran, C., Daemen, J.J.K., Schuhen, M.D. and Hansen, F.D. (1997) Dynamic compaction properties of bentonite. Rock Mech. & Min. Sci. 34(1-4).

Reddish, D.J., Dunham, R.K. and Yao, X.L. (1994) An Expert-System For Assessment of Surface Structural Damage In Mining Areas, in Risk and Reliability in Ground Engineering (ed. Skipp, B.O.), London: Thomas Telford, pp. 134-144.

Reddish, D.J., Yao, X.L. and Dunham, R.K. (1995) Risk Assessment of Surface Structural Damage due to Mining Subsidence - An Integrated Computer-Based Approach, Trans. Inst. Mining And Metallurgy Section A - Mining Industry, Vol. 104, pp. A139-A143.

Rehak, D.R., Christiano, P.P. and Norkin, D.D. (1985) SITECHAR: An Expert System Component of a Geotechnical Site Characterization Workbench, in Applications of Knowledge-based Systems to Engineering Analysis and Design (ed. Dym C.L.), Am. Soc. Mech. Eng.: New York, pp. 117-133.

Reid, G. and Stewart, D. (1986) A large scale toppling failure at Afton. In Singhal, R.K. (ed.). International Symposium on Geotechnical Stability in Surface Mining. Netherlands: A.A. Balkema, pp. 215-223.

Rich, E., and Knight, K. (1991). Artificial Intelligence. McGraw-Hill, Inc., New York, 621 pp.

Rowlinson, S. (1989) Knowledge Based Systems: Potential in Design and Management, Proc.4th Int. Conf. A.I. techniques and applications for Civil and Structural Engineering Computing, Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 21-26.

Santamarina, J.C. and Chameau, J.L. (1987) Expert Systems for Geotechnical Engineers, Jnl. Computing in Civil Eng., 1, 4, pp. 241-252.

Sieh, D., King, D. and Gientke, F. (1988) Dam Seepage Analysis Using Artificial Intelligence, in Planning Now for Irrigation and Drainage in the 21st Century, New York: ASCE, pp. 417-422.

Siller, J.T. (1987) Expert Systems in Geotechnical Engineering, in Expert Systems for Civil Engineers: Technology and Applications, (ed. Maher M.L.), New York: ASCE, pp. 77-84.

Singh, B. and Goel, R.K. (2001) Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering. Netherland: Elsevire Science Ltd.

Sinha, A.K. and Singupta, M. (1989) Expert system approach to slope stability. Mining Science and technology. Vol. 8 : 21-29.

Sirat, M. and Talbot, C.J. (2001) Application of artificial neural networks to fracture analysis at the Aspo HRL, Sweden: fracture sets classification. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 38 : 621-639.

Smith, D.K. (1993) Handbook on Plugging and Abandonment. Oklahoma: Penn Well Publishing Company.

Smith, D.K. (1990) Cementing. The united state of America : The society of petroleum engineers Inc.

Smith, I.G.N. and Oliphant, J. (1991) The Use of a Knowledge-Based System for Civil Engineering Site Investigations, in Artificial Intelligence and Civil Engineering (ed. Topping B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 105-112.

Smith, S.A. (1994) Well & borehole sealing. Ohio : Ground water publishing co.

South, D.L. and Fuenkajorn, K. (1996) "Laboratory Performance of Cement Boreholes Seals," Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 9-27.

Sowers, G.F. (1979) Soil mechanics and foundations : Geotechnical engineering. New York : Macmillan publishing co., Inc.

Sterling, R.L. and Lee, C.A. (1992) A Neural Network - Expert System Hybrid Approach for Tunnel Design, Proc. 33rd United-States Symp. on Rock Mechanics, Santa Fe (eds. Tillerson, J.R. & Wawersik, W.R.), Brookfield VT: Balkema, pp. 501-510.

Stormont, J. C. (1990c) Gas permeability Changes in Rock Salt During Deformation, PhD Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson.

Thomas, P.R., Kor, F.H. and Matheson, G.D. (1992) Development of a Knowledge-Based System for Ground Investigation in Rock, Proc. EUROCK 92: Rock Characterization, Chester (ed. Hudson, J.A.) London: Thomas Telford, pp. 159-162.

Thomaz, J.E. and Altschaeffl (1994) GeoSYS, a System for Site Investigation Support, Proc. 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M.) Rotterdam: Balkema, pp. 487-489.

Toll D.G., Moula, M., Oliver, A. and Vaptismas, N. (1992) A Knowledge Based System for Interpreting Site Investigation Information, in Geotechnique et Informatique, Proc. Int. Conf. on Geotechnics and Computers, Paris: Presses de l'cole Nationale de Ponts et Chausses, pp. 607-614.

Toll, D.G. (1990) Do Geotechnical Engineers need Expert Systems?, Ground Engineering 23, 3, pp. 32-36.

Toll, D.G. (1994) Interpreting Site Investigation Data using a Knowledge Based System, Proc. 13th Conference of Int. Soc. Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi: New Delhi, Oxford & IBH Publ. Co., Vol.4, pp. 1437-1440.

Toll, D.G. (1995) The Role of a Knowledge-based System in Interpreting Geotechnical Information, Geotechnique, 45, 3, pp. 525-531.

Toll, D.G. and Barr, R.J. (1995) Computer-aided Learning for Geotechnical Engineering, in Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 269-274.

Toll, D.G. and Giolas, A (1995) A Knowledge-Based System for Estimation of Geotechnical Properties, in Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 113-119.

Tominaga, Y ., Kon, N., Arakawa, M. and Yamaguchi, S. (1989) Development of an expert system for climate control underground. Today 's technology for the mining and metallurgical industries. Japan : Dotesios Printers Ltd.

Trautman, C.H. and Kulhawy, F.H. (1995) CUFAD+: Foundation design with knowledge-based advisors, Chapter 7 in Expert Systems for Civil Engineers: Integrated & Distributed Systems (eds Maher, M.L. & Tommelein, I.) New York: ASCE.

Tyler, G. (1991) The Impact of Abandoned Wells on Ground Water Quality. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

USEPA (1989) Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers. US Environmental Protection Agency Rep. EPA/625/4-19/025.

Wang, S., Xiao, S. and Jia, Z. (1994) An Engineering Geology Expert System of Shearing Zone, Proc. 7th Int. Cong. Int. Assoc. Engineering Geology, Lisbon (eds. Oliveira, R., Rodrigues, L.F., Coelho, A.G., Cunha, A.P.) Rotterdam: Balkema, pp. 4489-4494.

Wharry M.B., and Ashley D.B. (1986). Resolving Subsurface Risk in Construction Using an Expert System. Tech. Report UTCEPM-86-1. University of Texas: Austin.

Wiseman, G., Zeitlen, J.G., Komornik, A. and Katke, F.G. (1987) An Expert System Approach to Expansive Soil Problems, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, New Delhi, Balkema: Rotterdam, Vol. 1, pp. 211-216.

Wislocki, A.P. and Bentley, S.P. (1991) An Expert System for Landslide Hazard and Risk Assessment, Computers & Structures, Vol. 40, No. 1, pp. 169-172.

Wong K.C., Poulos, H.G. and Thorne, C.P. (1989) Site Classification by Expert Systems, Computers and Geotechnics, 8, pp. 133-156.

Wong K.C., Poulos, H.G. and Thorne, C.P. (1991) Development of Expert Systems for Pile Foundation Design, Trans. Inst. of Engineers, Vol. CE33, n.2, pp. 119-127.

Xu, Q. and Huang, R.Q. (1994) Artificial Neural Network Methods for Spatial Prediction of Slope Stability, Proc. 7th Int. Cong. Int. Assoc. Engineering Geology, Lisbon (eds. Oliveira, R., Rodrigues, L.F., Coelho, A.G., Cunha, A.P.) Rotterdam: Balkema, pp. 4725-4728.

Yao, X.L., Reddish, D.J. and Whittaker, B.N. (1992) Application of an Expert System to Assess Building Damage due to Mining Subsidence, in Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production (eds. Singhal, R.K., Mehrotra, A.K., Fytas, K. & Collins, J.L.) Brookfield VT: Balkema, pp. 1341-1353.

Yehia, N.A.B. and El-Hajj, A.H. (1987) A Knowledge Based Approach for the Design of Spread Footings, in Application of A.I. techniques to Civil and Structural Engineering (ed. Topping, B.H.V.), Edinburgh: Civil-Comp Press, pp. 119-124.

Yi, H. and Lindqvist, P.A. (1995) The Prediction of Rock Quality Parameters by Using Neural-Network Models, Proc. 4th Int. Symp. Mine Planning and Equipment Selection, Calgary (eds. Singhal, R.K., Mehrotra, A.K., Hadjigeorgiou, J., Poulin, R.), Rotterdam: Balkema, pp. 933-937.

Yu, T.R. and Vongpaisal, S. (1996) New Blast Damage Criteria for Underground Blasting, CIM Bulletin, Vol. 89, No. 998, pp 139-145.

Zhang, Q., Mo, Y.B. and Tian, S.F. (1988) An Expert System for Classification of Rock Masses, Proc. 29th U.S. Symposium, Minneapolis (eds. Cundall, P.A., Sterling, R.L. & Starfield, A.M.) Brookfield VT:Balkema, pp. 283-288.

Zhang, Q., Song, J.R. and Nie, X.Y. (1991) Application of Neural Network Models to Rock Mechanics and Rock Engineering, Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 28, No. 6, pp. 535-540

Zhang, Q., Tian, S.F., Mo, Y.B., Dong, X.Z. and Hao, S.Y. (1993) An Expert-System for Prediction of Karst Disaster in Excavation of Tunnels or Underground Structures through a Carbonate Rock Area, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 373-378.

Zheng, H., Mikroudis, G.K., Pamukcu, S. and Hu, Z.X. (1989) BABE: An Expert System for Structural Design of Bridge Abutments and Piers, in Computer Utilization in Structural Engineering, Proc. Structures Congress '89, New York: ASCE, pp. 372-381.

Zhou, Y.Q. (1994) An Expert-System for the Prediction of Slope Stability, Proc. 7th Int. Cong. Int. Assoc. Engineering Geology, Lisbon (eds. Oliveira, R., Rodrigues, L.F., Coelho, A.G., Cunha, A.P.) Rotterdam: Balkema, pp. 4483-4488.

ภาคผนวก

คู่มือการใช้โปรแกรม

1. ระบบของคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ (System Requirements)
   1.1 ความเร็วของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ไม่น้อยกว่า 700 MHz
   1.2 มีหน่วยความจำ (RAM) ไม่น้อยกว่า 64 MB
   1.3 มีหน่วยเก็บข้อมูล (Hard disk space) ไม่น้อยกว่า 40 MB
   1.4 มีส่วนควบคุมการแสดงผล (Display Controller) ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 1024×768 จุด
   1.5 มีระบบการทำงานด้วย WINDOWS 2000 หรือ WINDOWS XP

2. ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม
   2.1 ติดตั้ง BSR Program โดย Double click ที่ปุ่ม "SETUP_1" แล้ว Click ปุ่ม "Next" ไปจนถึงหน้าที่พร้อมจะติดตั้ง แล้ว Click ที่ปุ่ม "Install"
   2.2 ติดตั้ง System shield wizard สำหรับ BSR Program โดย Double click ที่ปุ่ม "SETUP_2" ในหน้า Setup type ให้เลือกแบบ Custom ส่วนในหน้า Choose destination location ให้เลือกเป็น C:\BSR ส่วนหน้าอื่น ๆ ให้ Click "Next" ไปจนถึงหน้าที่พร้อมจะติดตั้ง แล้ว Click ที่ปุ่ม "Install"

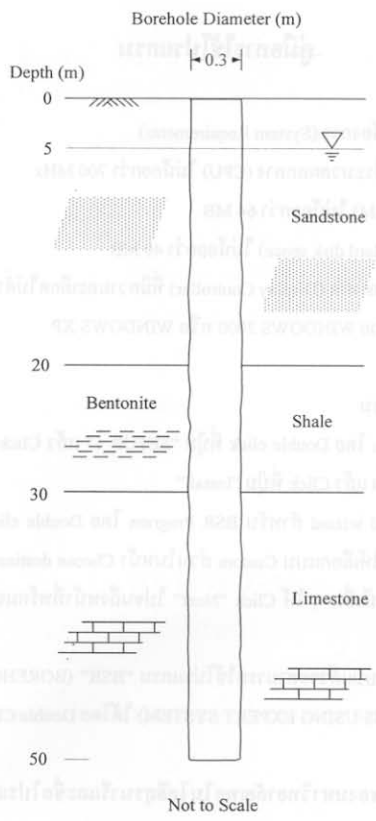
   เมื่อติดตั้งโปรแกรมในระบบแล้วจะสามารถใช้โปรแกรม "BSR" (BOREHOLE SEAL DESIGN IN ROCK FORMATIONS USING EXPERT SYSTEM) ได้โดย Double Click ที่ Icon "BSR"

3. หน้าแรกเป็นสัญลักษณ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและชื่อโปรแกรม "BOREHOLE SEAL DESIGN IN ROCK FORMATIONS USING EXPERT SYSTEM"

4. หน้าที่ 2 โปรแกรมแสดงแบบจำลองของการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน โดยจะมีให้เลือก 3 ปุ่มสำหรับควบคุมการทำงาน คือ "About", "Cancel" และ "Next" และเมื่อ Click "About" จะแสดงรายละเอียดของที่มา แนวคิด ขอบเขตและข้อจำกัด และขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม เป็นต้น

5. หน้าที่ 3 แสดงข้อตกลงทางกฎหมายของการใช้โปรแกรม ซึ่งถ้าผู้ใช้ยอมรับข้อตกลงระบบพร้อมทำงาน

6. หน้าที่ 4 แสดงส่วนรับข้อมูลทั่วไปของหลุมเจาะ ซึ่งรวมไปถึงลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะ ระดับน้ำบาดาล อุทกธรณีวิทยาเคมี และความต้องการเชิงวิศวกรรม



รูปที่ ก-1 ตัวอย่างที่อ้างถึงในคู่มือสำหรับการป้อนข้อมูลชั้นหิน

7. หน้าที่ 5 เป็นต้นไป แสดงส่วนรับข้อมูลของแต่ละชั้นหิน ซึ่งประกอบด้วยชนิดของหิน ความลึก ขนาดของหลุมเจาะ ระยะห่างเฉลี่ยของแต่ละชุดรอยแตก ความกว้างของช่องในรอยแตก ความแข็งของหิน และค่าความซึมผ่านของหิน ตัวอย่างการป้อนข้อมูลชั้นหินชุดที่ 1 จากตัวอย่างหลุมเจาะในรูปที่ ก-1 แสดงดังนี้
   7.1 ชนิดของชั้นหิน ป้อนเป็นชื่อเต็ม เช่น Sandstone หรือ sandstone
   7.2 ความลึกของชั้นหิน ป้อนข้อมูลความลึกจากน้อยไปมาก เช่น จาก 0 m ถึง 20 m
   7.3 ขนาดของหลุมเจาะ เป็นขนาดจริงของหลุมเจาะในแต่ละชั้นหิน เช่น 30 cm
   7.4 ระยะห่างเฉลี่ยของแต่ละชุดรอยแตก เป็นข้อมูลจำเป็นที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบ ในกรณีเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตกให้ป้อนระยะห่างเฉลี่ยของแต่ละชุดรอยแตก เท่ากับ 0
   7.5 ความกว้างของช่องในรอยแตก ในกรณีเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตกให้ป้อนความกว้างของช่องในรอยแตก เท่ากับ 0
   7.6 ความแข็งของหิน การป้อนข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ
      - กรณีที่ไม่ทราบชนิดของหิน จำเป็นจะต้องป้อนข้อมูลความแข็งของหินเข้าสู่ระบบ
      - กรณีที่ทราบชนิดของหิน ซึ่งสามารถใส่เป็น Sandstone, Claystone, Shale, Limestone, Basalt, Granite, Schist, Chert, Chalk, Rocksalt, Potash, Coal, Siltstone, Marble, Phylite, Tuff, Rhyolite, Gabbro, Amphibolite, Quartzite, Slaty Shale หรือ Dolomite ซึ่งถ้าไม่ทราบข้อมูลความแข็งของหิน ไม่ต้องป้อนข้อมูลความแข็งของหินก็ได้
   7.7 ค่าความซึมผ่านของหิน การป้อนข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ
      - กรณีที่ไม่ทราบชนิดของหิน จะต้องป้อนค่าความซึมผ่านของหินเข้าสู่ระบบ
      - กรณีที่ทราบชนิดของหิน เช่น Sandstone, Claystone, Shale, Limestone, Basalt, Granite, Schist, Rocksalt, Siltstone หรือ Dolomite เป็นต้น ซึ่งถ้าไม่ทราบค่าความซึมผ่านของหิน ไม่ต้องป้อนข้อมูลค่าความซึมผ่านของหินก็ได้

8. ในส่วนแสดงผลประกอบด้วย ข้อมูลทั้งหมดของหลุมเจาะที่ผู้ใช้ใส่เข้าไป และผลการออกแบบการอุดหลุมเจาะ ซึ่งส่วนแสดงผลจะปรากฏเมื่อ Click ปุ่ม "Submit" ในหน้าสุดท้ายของส่วนรับข้อมูล และ Click ปุ่ม "Ok" เมื่อปรากฏคำถาม "Do you want to display report"

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในสาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา "Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock" ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelp Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์