บทที่ 2
การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็นหลายประเด็น ประกอบด้วย การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน ประเภทของการอุดหลุมเจาะ จุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะ วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา และการศึกษาวิจัยในการอุดหลุมเจาะ

2.1 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

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

2.2 ประเภทของการอุดหลุมเจาะ

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ที่ทำการอุด โดย Gray and Gray (1992) ได้จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบถาวร (permanent) 2) การอุดแบบชั่วคราว (temporary) 3) การอุดแบบกึ่งถาวร (semi-permanent) Smith (1994) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบชั่วคราว (temporary sealing) 2) การอุดในหลุมเจาะที่ใช้งานอยู่ (sealing actively used borehole) และ 3) การอุดแบบถาวร (sealing for permanent) Fuenkajorn and Daemen (1996) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมทุกประเภทออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ (sealing actively used boreholes) 2) การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้ว (sealing unused boreholes)

2.3 จุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะ

จุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 แบบ คือ การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว และการอุดหลุมเจาะแบบถาวร

2.3.1 การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว เป็นการอุดหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ โดยอุดบริเวณช่องระหว่างท่อกรุ (casing) กับชั้นหินข้างเคียง หรือเป็นการอุดหลุมเจาะที่จะนำมาใช้ในอนาคต วัตถุประสงค์ในการอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว (Smith, 1990) คือ

1) ป้องกันท่อกรุจากการถูกกัดกร่อน
2) ป้องกันการพังทลายของท่อกรุในระดับลึก เนื่องจากแรงดันด้านข้าง
3) ป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะจากแรงดันด้านข้าง
4) ป้องกันการสูญเสียน้ำโคลนในการเจาะบริเวณที่เกิด Lost circulation

2.3.2 การอุดหลุมเจาะแบบถาวร เป็นการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว ซึ่งประเด็นหลักที่ต้องคำนึงถึงในการอุดหลุมเจาะประเภทนี้ก็คือสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการอุดหลุมเจาะแบบถาวร (Smith, 1993; McGinty and Calvert, 1991; Tyler, 1991; Nye, 1991) คือ

1) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากแหล่งปนเปื้อนผิวดินและแหล่งปนเปื้อนที่กักเก็บไว้ใต้ดิน
2) ป้องกันการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน
3) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากชั้นน้ำเสีย
4) ป้องกันภัยเนื่องจากคนหรือสัตว์พลัดตกลงไปในหลุมเจาะ

2.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม

การอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การอุดบรรลุตามจุดมุ่งหมาย คือการเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ ซึ่งมีหลายชนิดให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงด้านเศรษฐศาสตร์ รายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมน้ำบาดาล อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการทิ้งขยะนิวเคลียร์ ได้อธิบายไว้ดังนี้

2.4.1 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดอย่างต่อเนื่อง วัสดุอุดหลุมเจาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

1) **น้ำโคลน** (drilling fluid) น้ำโคลนเป็นวัสดุอุดที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับอุดบริเวณที่ไม่สามารถทำให้แห้งได้ (ไม่สามารถใช้ซีเมนต์ได้) แต่การอุดด้วยน้ำโคลนต้องมีซีเมนต์อุดปิดบริเวณหัวและท้าย (Smith, 1993)

2) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** (portland cement) เป็นวัสดุอุดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5 ประเภท จากการแบ่งโดยสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (American society for testing and materials, C150, standard for portland cement) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 8 ประเภท จากการแบ่งประเภทโดย American petroleum institute (API) (Smith, 1993) สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ออกเป็น 5 ประเภท (Neville, 1981) ประกอบด้วย

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีข้อเสียคือไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงชนิดให้ความร้อนและทนด่างได้ปานกลาง เหมาะสำหรับงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนาๆ และงานสร้างตอม่อขนาดใหญ่ในบริเวณที่อากาศร้อนจัด

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งเร็วหรือซุปเปอร์ซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา เกิดรอยร้าวได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา เหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ เป็นปูนซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว เหมาะสำหรับงานก่อสร้างใหญ่ๆ โดยเฉพาะงานก่อสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับใช้กันโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีความเป็นด่างสูง แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะแข็งตัวช้ากว่าประเภทที่ 1

สำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (API) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากความเหมาะสมของการใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมออกเป็น 8 ประเภท (Smith, 1990) ประกอบด้วย

Class A เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class B เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ทนซัลเฟตได้ปานกลางถึงสูง ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class C เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ให้กำลังสูงในระยะแรก สามารถใช้ได้ทั้งกับสภาวะที่ไม่มีซัลเฟต มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือมีปริมาณซัลเฟตสูง และใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class D เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 6,000–10,000 ฟุต (3,050–4,270 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูง และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class E เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000–14,000 ฟุต (1,830–3,050 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ค่อนข้างสูง และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class F เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000–16,000 ฟุต (1,830–4,880 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟต ปานกลางหรือสูง

Class G และ Class H เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 8,000 ฟุต (2,424 เมตร) สามารถผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือสารที่เป็นตัวหน่วงนอกเหนือจากแคลเซียมซัลเฟตหรือน้ำ เพื่อให้สามารถใช้ในการอุดหลุมเจาะได้ครอบคลุมตลอดทั้งความลึกของหลุมเจาะและในขั้นตอนการผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Class G และ Class H จะมีการผสมหินละลายจากเตาหลอมหรือภูเขาไฟลงไปด้วย สามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นวัสดุในการอุดหลุมเจาะจะอยู่ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาด ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาดและผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือตัวหน่วง ปูนซีเมนต์ผสมทรายและคอนกรีต (Smith, 1993)

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาด (neat cement) โดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ คือ ปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 ปอนด์) ต่อน้ำ 5-6 แกลลอน

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาดและผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือสารที่เป็นตัวหน่วง สารที่เป็นตัวเร่งผสมลงไปเพื่อเพิ่มกำลังในระยะแรกและลดระยะเวลาการก่อตัว สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ โดยผสมลงไป 2-4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงใช้ผสมลงไปในซีเมนต์เพื่อลดน้ำหนักของซีเมนต์ และเพื่อควบคุมการสูญหายไปของซีเมนต์ในชั้นหินที่มีการรั่วไหลของน้ำโคลน โดยทั่วไปแล้วสารที่เป็นตัวหน่วงจะผสมเฉพาะในซีเมนต์ที่จะใช้อุดในหลุมเจาะแบบชั่วคราวเท่านั้น จะไม่ใช้ผสมในปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้อุดหลุมเจาะแบบถาวร

ปูนซีเมนต์ผสมทราย (sand cement) โดยทั่วไปจะใช้ทราย 20-40% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมกับปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 ปอนด์) และน้ำประมาณ 7 แกลลอน

คอนกรีต (concrete) เป็นวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับหินคลุกหรือกรวด ใช้สำหรับอุดในหลุมเจาะที่มีขนาดใหญ่ คอนกรีตที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 5 ถุง (94 ปอนด์) ผสมกับหินคลุกหรือกรวดที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3/8 นิ้ว ปริมาตร 1 ลูกบาศก์หลา

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

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา (portland pozzolana cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับสารจำพวกปอซโซลานิก (pozzolanic) โดยผสมลงไป 15-50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานาจึงมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป มีคุณสมบัติที่ขยายตัวน้อย มีความทึบน้ำสูง และให้ความร้อนในการรวมตัวกับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

(2) Ultrafine cement เป็นปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ultrafine cement มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 50-100 ไมโครเมตร ultrafine cement เป็นวัสดุที่เหมาะสำหรับอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราวเนื่องจากมีมวลเบาและให้

กำลังสูงในระยะแรก ส่วน ultrafine cement เหมาะสำหรับอุดในบริเวณที่มีรอยแตกขนาดเล็กเนื่องจากขนาดเม็ดที่เล็กสามารถแทรกเข้าไปอุดรอยแตกได้ง่าย

(3) Epoxy cement เป็นซีเมนต์ชนิดพิเศษ สามารถใช้ได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งซีเมนต์ทั่วไปจะแข็งตัวช้าในสภาวะที่เป็นกรด จึงทำให้ Epoxy cement มีราคาแพงกว่าซีเมนต์ทั่วไป

2.4.2 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

อุตสาหกรรมน้ำบาดาลเป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้วัสดุในการอุดหลุมเจาะหลากหลายประเภท โดย Smith (1993) แนะนำให้ใช้นีทซีเมนต์ (neat cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ผสมกับทราย ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ คอนกรีต และเบนทอไนต์แบบเม็ด ส่วน Mcginty and Calvert (1991) แนะนำให้ใช้ยิปซัมซีเมนต์ (gypsum cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์น้ำน้อย และปูนซีเมนต์แบบต้องอัด (regulated fill-up cement) Nye (1991) แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์ คอนกรีต และน้ำโคลน

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

1) ปูนซีเมนต์ หมายถึงการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน

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

3) ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและเบนทอไนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน ผสมกับเบนทอไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ปริมาณของเบนทอไนต์ที่ใช้ผสมสามารถผสมได้ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำด้วย ในอัตราส่วนเพิ่มน้ำ 1 แกลลอนต่อเบนทอไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์

4) คอนกรีต ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและหินคลุก โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อหินคลุกเท่ากับ 1 ต่อ 2

5) เบนทอไนต์แบบเม็ด ถ้าใช้วิธีการเทจากปากหลุมเจาะจะสามารถใช้ได้ในระดับความลึกไม่เกิน 10 ฟุต

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.4.3 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดิน

วัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดินทั่วไปคือคอนกรีต เช่น การอุดปล่องและช่องเหมืองแร่ การอุดอุโมงค์รถไฟ แบบชั่วคราว ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ (Auld, 1996)

1) คอนกรีตที่ใช้อุดปล่องแร่ มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ทราย 770 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1050 กิโลกรัม

2) คอนกรีตที่ใช้ในการอุดอุโมงค์รถไฟแบบชั่วคราวมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 500 กิโลกรัม ทราย 595 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1,150 กิโลกรัม

2.4.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์

การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ควรพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และเชิงเคมี ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง วัสดุที่ใช้สำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ ประกอบด้วย

1) เบนทอไนต์อัดตัว เป็นวัสดุชนิดแรกๆ ที่ใช้อุดหลุมเจาะสำหรับทิ้งกากนิวเคลียร์ เนื่องจากเบนทอไนต์เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมผ่านต่ำและมีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่ใกล้เคียงกับหินทุกชนิดและมีคุณสมบัติด้านการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีสูงถึง 2.6 MPa เบนทอไนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเบนทอไนต์อัดตัว โดยการผสมเบนทอไนต์กับน้ำสะอาดหรือน้ำเค็มในอัตราส่วนที่เหมาะสม เบนทอไนต์อัดตัวนี้จะมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์เพียงพอที่จะทำให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Ranet al., 1997; Fuenkajorn and Daemen, 1987)

2) ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติครบทั้งในเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และเชิงเคมี เนื่องจากซีเมนต์มีความแข็งและมีการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีประมาณ 4 MPa (Fuenkajorn and Daemen, 1987)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 22 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน 190785
เลขเรียกหนังสือ

2.5 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย

2.5.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

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

การอุดกลบบ่อด้วยดินเหนียว ใช้ดินเหนียวบริสุทธิ์จากสวนหรือท้องนา นวดให้เข้ากันแล้วปั้นเป็นลูกกลมๆ ขนาดประมาณลูกปิงปอง ผึ่งแดดให้แห้งหรือหมาด แล้วใส่ลงในบ่ออย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อป้องกันการติดค้างบางช่วงของบ่อ แต่ถ้าหากมีการติดค้างของดินเหนียวในบ่อ ห้ามใช้ท่อหรือวัสดุอื่นใดกระทุ้งหรือแหย่ลงไปในบ่อ ให้ใช้น้ำจืดสะอาดกรอกลงไปเป็นจังหวะๆ และต่อเนื่อง จนกว่าลูกดินที่ติดค้างอยู่จะหลุดออกจากกันและเลื่อนลงสู่ก้นบ่อ ใน

การนำลูกดินใส่บ่อนี้จะต้องตวงด้วยภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอนและจดบันทึกไว้ เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณดินเหนียวที่ใส่ลงไปนั้นเต็มปริมาตรภายในของบ่อ

การอุดกลบบ่อด้วยซีเมนต์ ให้ผสมซีเมนต์ด้วยเครื่องผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนน้ำ 30 ลิตร ต่อซีเมนต์ 1 ถุง (50 กก.) อัดซีเมนต์ลงในบ่อด้วยเครื่องสูบอัดซีเมนต์ที่สามารถอัดซีเมนต์ได้ภายใต้ความดันไม่น้อยกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในอัตราไม่น้อยกว่า 50 แกลลอนต่อนาที การอัดซีเมนต์ให้อัดผ่านทางท่อที่ต่อลงไปจนเกือบสุดความลึกของบ่อ และอัดเป็นช่วงๆ ช่วงละประมาณ 30 เมตร จนกระทั่งซีเมนต์เต็มบ่อ หากมีการยุบตัวของซีเมนต์ให้เติมซีเมนต์ลงไปอีกจนกว่าซีเมนต์จะหยุดการยุบตัว

2.5.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

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

กฎกระทรวงข้อที่ 39 กำหนดว่า ก่อนดำเนินการสละหลุมผลิต ผู้รับสัมปทานต้องแจ้งเหตุผลและวิธีการที่จะสละหลุมผลิตเป็นหนังสือให้อธิบดีพิจารณา เมื่อได้รับอนุมัติแล้วจึงจะดำเนินการสละหลุมผลิตได้ กฎกระทรวงข้อที่ 40 กำหนดว่า เมื่อเสร็จสิ้นการปฏิบัติงานในที่ใดหรือเมื่อสัมปทานสิ้นอายุ หรือถูกเพิกถอน ผู้รับสัมปทานหรือผู้ซึ่งสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนต้องปฏิบัติดังนี้

ก) ทำพื้นดินและพื้นน้ำให้กลับมีสภาพเหมือนเดิมเท่าที่สามารถจะกระทำได้

ข) ทำกำแพงหรือรั้วล้อมรอบขุม หลุม ร่อง และบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้และยังใช้ประโยชน์อยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่บุคคลหรือสัตว์

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 ให้ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าชั้นน้ำชั้น น้ำมันหรือชั้นก๊าซธรรมชาติเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือชั้นน้ำเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

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

- ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร
- ใช้ลูกยาง (Mechanical Plug) อุดที่ปลายท่อกรุแล้วใช้ซีเมนต์ที่มีความหนาอย่างน้อย 20 เมตร อุดปิดทับบนลูกยาง

ค) การอุดปิดส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ สามารถเลือกวิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ

- ใช้ลูกยางอุดเหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement ทุกส่วนในท่อกรุ
- ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร
- ใช้ซีเมนต์อุดลักษณะเดียวกันในทุกส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ

ง) การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับท่อกรุ ใช้ลูกยางอุดส่วนที่เป็นช่องว่างลักษณะวงแหวน (ท่อกรุท่อนที่อยู่ด้านบนมีขนาดใหญ่กว่า) แล้วใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

จ) การอุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุโดยท่อกรุท่อนที่อยู่ข้างในมีส่วนที่เป็น Squeezed cement ให้อุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุด้วยซีเมนต์ โดยอุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

ฉ) การอุดปิดปากหลุม แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่หลุมเจาะอยู่บนบก ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับปากหลุม
- กรณีที่หลุมเจาะอยู่ในทะเล ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 เมตร อุดขึ้นมาต่ำกว่าระดับปากหลุมไม่เกิน 50 เมตร

2.6 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา

6.2.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

ข้อกำหนดและข้อแนะนำในการอุดกลบบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วหรือการอุดหลุมเจาะแบบถาวร ที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาแนะนำโดย National American Water Works Association (National AWWA) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ส่วน คือ ข้อกำหนดและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการอุดแบบถาวรในหลุมเจาะทดสอบ (test holes) หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (uncomplete wells) และหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (complete wells) (ANSI/AWWA June 24, 1981) (Smith, 1993) ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อแบบถาวรเป็นข้อปฏิบัติที่เจ้าของบ่อจะต้องปฏิบัติตามเมื่อไม่ใช้ประโยชน์จากบ่อนั้นๆ ข้อกำหนดประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ข้อกำหนดทั่วไป 2) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการอุดกลบ และ 3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อกำหนดทั่วไปกำหนดไว้ว่า หลุมเจาะทดสอบ หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ และบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วจะต้องทำการอุดกลบ เพื่อ

- ป้องกันอันตรายต่อชีวิตคนและสัตว์ที่อาจพลัดตกลงไปในหลุมหรือบ่อ
- ป้องกันการปนเปื้อนของน้ำบาดาล
- รักษาแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล
- ป้องกันการผสมกันระหว่างชั้นน้ำบาดาลกับชั้นน้ำเสีย

และการอุดกลบบ่อจะต้องให้มีสภาพใกล้เคียงกับลักษณะทางธรณีวิทยาเดิมก่อนทำการเจาะให้ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

2) ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อ ให้ปฏิบัติดังนี้

- ขนย้ายอุปกรณ์ที่ติดค้างอยู่ในบ่อออกให้หมด
- ในกรณีที่ไม่สามารถถอนหรือดึงอุปกรณ์ที่อยู่ในบ่อออกมาได้ให้ตัดให้เหลือชิ้นส่วนติดค้างให้น้อยที่สุด

- วัสดุที่ใช้อุดคือ ซีเมนต์คอนกรีตหรือดินเหนียว ส่วนวิธีการอุดให้อุดจากก้นบ่อขึ้นมาข้างบน

3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบ ในส่วนของรายงานจะต้องบันทึกอย่างละเอียดครบถ้วนให้สมบูรณ์ที่สุด สามารถใช้อ้างอิงได้ในอนาคตและจะต้องส่งมอบให้กับหน่วยงานของรัฐหรือหน่วยงานท้องถิ่นที่รับผิดชอบ เพื่อแสดงว่าได้มีการอุดกลบบ่ออย่างถูกต้องและสมบูรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยรายละเอียดของรายงานประกอบด้วย

- ความลึกของตำแหน่งที่มีการอุด
- ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด
- ระดับน้ำบาดาล
- การเขียนรายงานจะต้องบันทึกทุกกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขวิธีการในการอุดกลบ

ข้อเสนอแนะในการอุดกลบบ่อบาดาลที่มีชั้นหินในน้ำ (aquifer) ชนิดต่างๆ จะให้คำแนะนำเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการในการอุดบ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ประกอบด้วย 1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย 2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก 3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก 4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลายๆ ชั้น 5) บ่อบาดาลที่เป็นบ่อน้ำพุ โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย (wells in unconsolidated formations) โดยทั่วไปแล้วชั้นน้ำกรวดทรายจะเป็นชั้นน้ำที่อยู่ใกล้ผิวดินไม่มีชั้นดินหรือชั้นหินอื่นปิดทับ ระดับน้ำที่อยู่ในชั้นน้ำชนิดนี้ก็คือระดับน้ำบาดาลที่วัดได้จากปากบ่อ วัสดุที่สามารถใช้อุดในชั้นนี้ได้คือ คอนกรีต ซีเมนต์ ดินเหนียว หรือดินเหนียวและทราย แต่ถ้าชั้นกรวดทรายนี้เป็นชั้นกรวดขนาดใหญ่และมีบ่อที่สูบน้ำจากชั้นนี้ขึ้นไปใช้อยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุด การเลือกใช้วัสดุต้องใช้วัสดุที่ไม่มีผลกระทบต่อบ่อที่มีการใช้น้ำ วัสดุที่แนะนำคือ คอนกรีต หรือกรวดทรายสะอาดที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ถ้าเลือกใช้ซีเมนต์จะต้องหยุดการสูบน้ำจากบ่อระยะหนึ่งจนกว่าซีเมนต์ที่อุดจะแข็งตัว ในส่วนบนสุดของบ่อจนถึงระดับผิวดินวัสดุที่สามารถใช้อุดได้คือ ดินเหนียว คอนกรีต หรือซีเมนต์ สำหรับบ่อที่มีขนาดใหญ่ดินเหนียวเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีที่มีการบรรจุกรวดรอบบ่อกรอง (gravel-packed) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 20-30 ฟุต (6.1-9.1 เมตร) เพื่อให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุดอาจต้องนำกรวดและท่อกรองออกก่อนทำการอุด

2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก (wells in creviced formations) ส่วนใหญ่แล้วชั้นหินที่มีรอยแตกจะวางตัวอยู่ใต้ชั้นดิน วัสดุที่เหมาะสมสำหรับอุดในชั้นนี้คือ ซีเมนต์ หรือคอนกรีต ไม่แนะนำให้ใช้ดินเหนียวหรือทราย เพราะน้ำสามารถไหลพาเอาดินเหนียว

หรือทรายเข้าไปอยู่ในรอยแตกได้ หรืออาจจะใช้ก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ (coarse stone) อุดแทรกสลับกับคอนกรีตเพื่อให้น้ำสามารถไหลผ่านไปสู่หลุมผลิตได้

3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก (wells in uncreviced formations) ชั้นหินให้น้ำที่ไม่มีรอยแตกส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชั้นหินแข็ง เช่น หินทราย วัสดุที่แนะนำให้ใช้อุดในชั้นนี้คือดินเหนียว ซึ่งสามารถอุดได้โดยไม่ต้องสูบน้ำออกจากบ่อ ส่วนบนของบ่อจนถึงผิวดินแนะนำให้อุดด้วยซีเมนต์ คอนกรีต หรือดินเหนียว แต่ถ้ามีบ่อที่มีการผลิตอยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุดในชั้นนี้ให้อุดด้วยทรายที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว (Smith, 1993)

4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลายๆ ชั้น (multiple aquifer wells) การอุดในบ่อน้ำบาดาลประเภทนี้ก็เพื่อป้องกันการไหลเข้าไปปนกันของชั้นน้ำแต่ละชั้น วัสดุที่ใช้อุดคือ ซีเมนต์ คอนกรีต หรือทราย สำหรับกรณีที่แรงดันน้ำไม่มากให้ใช้ทรายอุดแทรกสลับกับซีเมนต์หรือคอนกรีต แต่ถ้าแรงดันน้ำมากให้ใช้วิธีการอุดเหมือนกับการอุดในบ่อน้ำพุ ในกรณีที่ใช้คอนกรีตหรือลูกยางในการอุดให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่มีการผลิต หรือถ้าไม่ทราบว่าชั้นน้ำใดเป็นชั้นน้ำที่มีการผลิตให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่แทรกสลับระหว่างชั้นน้ำ

5) บ่อน้ำบาดาลพุ (wells with artesion flow) การอุดในบ่อน้ำบาดาลพุไม่สามารถอุดด้วยซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ วัสดุที่สามารถอุดเพื่อปิดกั้นเหนือชั้นน้ำพุเพื่อไม่ให้น้ำดันขึ้นมาคือ หินคลุกขนาดใหญ่ (ไม่เกิน 1/3 ของขนาดบ่อ) ฝอยตะกั่ว (lead wool) ผงเหล็ก (steel shavings) ลูกยาง (a well packer) ท่อนไม้ ตะกั่วหล่อ (cast-lead plug) หรือแท่งคอนกรีตที่หล่อสำเร็จแต่ต้องเป็นแท่งที่มีความยาวกว่าขนาดของบ่อหลายเท่า เพื่อไม่ให้เกิดการเอียง

6.2.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้วในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมของประเทศสหรัฐอเมริกาประกอบด้วย ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ และข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ โดยแต่ละข้อกำหนดมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ (general requirements) หลุมเจาะทุกหลุมที่จะละทิ้งต้องแน่ใจว่าลึกลงไปไม่อยู่ในบริเวณไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon zone) ไม่มีชั้นน้ำจืด ไม่มีผลกระทบกับผู้ใช้ในบริเวณใกล้เคียง (outer Continental Shelf, OCS) และจะต้องมีการป้องกันของเหลวในชั้นหินไหลเข้าไปในบ่อหรือปนเปื้อนกับน้ำทะเล หลุมเจาะที่มีการใช้ไม่นานหรือหมดประโยชน์จะต้องทำการอุด แต่ถ้าการอุดหลุมเจาะเหล่านั้นมีผลต่อหลุมผลิตที่อยู่ข้างเคียงจะต้องได้รับการรับรองจากผู้เชี่ยวชาญว่าไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเสียก่อนจึงจะงดเว้นการอุดกลบหลุม

2) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ (approvals) เจ้าของหลุมจะต้องไม่ละทิ้งหรือทำการอุดหลุมเจาะโดยปราศจากผู้เชี่ยวชาญ และเจ้าของหลุมเจาะจะต้องส่งแบบรายงานการอุดกลบ MMS-332 from (Notice of Intent/ Report of Well Abandonment) ซึ่งจะต้องส่งรายงานหลังจากอุดเสร็จภายใน 30 วัน โดยปฏิบัติดังนี้

ก) แบบรายงานการอุดกลบต้องมีข้อมูลที่ประกอบด้วย ข้อมูลการเจาะ (well log) ข้อมูลการทดสอบ (test data) คำอธิบายรายละเอียด (description) และแผนงานที่ซึ่งประกอบด้วยความลึกของหลุมเจาะ ชนิด ตำแหน่ง ความยาวของวัสดุอุด (plugs) แผนการทำ Mudding การผสมซีเมนต์ การเจาะท่อกรุ การทดสอบ การดึงก้านเจาะและปัญหาที่พบ

ข) แบบรายงานขั้นต่อไปจะประกอบด้วยคำอธิบายของวิธีอุดหลุมเจาะที่สมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยประเภทของวัสดุที่ใช้ ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด และวิธีการตัดก้านเจาะ ดึงก้านเจาะ ขนาดของก้านเจาะ ความลึกของก้านเจาะ และจำนวนของก้านเจาะที่ดึงออกมา

3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ (permanent abandonment)

ก) การอุดเพื่อปิดชั้นน้ำมัน ก๊าซ ชั้นน้ำสะอาดที่อยู่ในหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างชั้นน้ำมัน ก๊าซ ชั้นน้ำสะอาด เป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสิ่งเจือปน และการอุดจะต้องได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญในพื้นที่

ข) การอุดเพื่อปิดหลุมเปลือยที่อยู่ต่อจากท่อกรุ ต้องอุดบริเวณรอยต่อระหว่างปลายท่อกรุกับหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วย 2 วิธี คือ

- อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ฟุต และไม่เกิน 100 ฟุต สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงที่ระดับต่ำกว่าท่อกรุอย่างน้อย 100 ฟุต และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 650 ฟุต
- ถ้าหลุมเปลือยที่อยู่ใต้ท่อกรุเคยมีหรือคาดว่าจะมีชั้นหินที่ทำให้เกิดการสูญเสียการไหล (lost circulation) ให้อุดด้วยการติดตั้งลูกยาง (Bridge plug) ห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางโดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต

ค) การอุดเพื่อปิดชั้นที่มีการกรุ (isolating perforated intervals) ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างชั้นที่มีการกรุเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วยวิธีการต่อไปนี้

- อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ฟุต และไม่เกิน 100 ฟุต สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงระดับต่ำกว่าชั้นที่มีการกรุอย่างน้อย 100 ฟุต และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 50 ฟุต
- อุดด้วยการติดตั้งลูกยางห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางและซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต
- อุดด้วยซีเมนต์ โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากชั้นที่มีการกรุขึ้นมาด้านบน 100 ฟุต ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ฟุต

ง) การอุดในบริเวณที่มีเศษชิ้นส่วนของท่อกรุที่เกิดจากการตัดหรือการรื้อถอนติดค้างอยู่ ให้อุดโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง คือ

- กรณีที่มีท่อกรุ 2 ท่อน ถ้าเศษชิ้นส่วนทั้งหมดเป็นของท่อกรุที่อยู่ข้างใน ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างเศษชิ้นส่วนท่อกรุเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วย 2 วิธี คือ อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยางติดตั้งห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 50 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง โดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต และอุดด้วยซีเมนต์โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบน 100 ฟุต ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ฟุต
- กรณีที่เศษชิ้นส่วนท่อกรุเป็นของท่อกรุท่อนล่างซึ่งมีขนาดเล็กกว่าท่อกรุท่อนบน (เหมือนกับเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ในหลุมเปลือยที่ต่อจากท่อกรุ) การอุดสามารถเลือกอุดได้ 2 วิธี คือ อุดปิดเฉพาะเศษชิ้นส่วนท่อกรุและอุดปิดหลุมเปลือยที่มีเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ข้างใน ซึ่งสามารถทำตามวิธีการที่กล่าวไว้ในข้อ (ก) และ (ข)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

จ) การอุดช่องว่าง (annular space) ที่อยู่ในหลุมเปลือยจะต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 200 ฟุต

ฉ) การอุดบริเวณปากหลุม ต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 150 ฟุต ในท่อกรุที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยระดับบนสุดของแท่งซีเมนต์จะต้องอยู่ที่ระดับ mud line หรือต่ำกว่าไม่เกิน 150 ฟุต

ช) การทดสอบการติดตั้งและตำแหน่งของวัสดุที่อุด สามารถตรวจสอบโดย
- ทดสอบด้วยการใช้ท่อที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 15,000 ปอนด์ กระแทกบนซีเมนต์ ที่ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง
- ทดสอบโดยใช้แรงดันที่มีค่าความดันไม่ต่ำกว่า 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในการทดสอบจะต้องให้ความดันไม่เกิน 10% ในระยะเวลา 15 นาที

ซ) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมเจาะ ชั้นที่ไม่ถูกอุดหรือช่องว่างที่อยู่ระหว่างซีเมนต์แต่ละช่วงที่ยังมีของเหลวค้างอยู่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเหลวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แรงดันที่เกิดจากของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลเสียต่อการอุดทำให้ประสิทธิภาพในการอุดลดลง

ฌ) การจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะ อุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะหรือสิ่งกีดขวางทุกชนิด จะต้องขนย้ายมาไว้ที่ระดับต่ำกว่า mud line อย่างน้อย 15 ฟุต หรือตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ สำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในทะเลการจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะให้ทำตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ

ญ) ข้อกำหนดสำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในพื้นที่ที่เย็นจัด (permafrost area) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมที่อยู่ติดกับชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าอุณหภูมิของชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดสนิม ซีเมนต์ที่ใช้อุดชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะต้องออกแบบให้แข็งตัวก่อนที่จะกลายเป็นน้ำแข็งและจะต้องให้ความร้อนต่ำเมื่อเกิดกระบวนการ Hydration

2.7 การศึกษาและวิจัยในการอุดหลุมเจาะ

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

Fuenkajorn and Daemen (1987) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์และเบนทอไนต์กับชั้นหิน โดยนำตัวอย่างการอุดหลุมเจาะซีเมนต์และเบนทอไนต์อัดตัวมาทดสอบ Piping test เพื่อศึกษาและหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายของซีเมนต์และการบวมตัวของเบนทอไนต์ การศึกษาความเค้นเนื่องจากการบวมตัวของเบนทอไนต์อัดตัว ได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือในระบบปิดซึ่งไม่มีการไหลเข้า-ออกของน้ำ และระบบเปิดที่ปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง การศึกษาความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์ ทดสอบโดยการอุดซีเมนต์ในท่อเหล็กที่มีความหนาต่างกัน

ผลการทดสอบปรากฏว่าเบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบปิดไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการบวมตัว แต่เบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบเปิดเกิดการบวมตัวและสามารถวัดค่าความเค้นในแนวแกนและแนวรัศมีได้ 7.5 MPa และ 2.6 MPa ส่วนการทดสอบหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์พบว่า ความเค้นในแนวรัศมีที่เกิดจากการขยายตัวของซีเมนต์ในท่อที่หนากว่าวัดได้ 4.7 MPa และความเค้นในแนวรัศมีในท่อที่บางวัดได้ 2.7 MPa

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินด้วยเบนทอไนต์ควรอุดใต้ระดับน้ำบาดาลจึงจะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ และการอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ควรอุดในชั้นหินแข็งเนื่องจากจะทำให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงกว่าการอุดในชั้นหินที่มีความอ่อน

Akgun (1996) ศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของแท่งซีเมนต์ขนาดต่างๆ ที่จะใช้อุด สามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ 1) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งกับรัศมีของแท่งซีเมนต์ และ 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ มีการเตรียมซีเมนต์ด้วยการ Dowell-schlumberger คือ ใช้ Self-stress II Cement grout ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API Standard No. RP-10 B (1996)) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.4, 13, 25 และ 51 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38 ถึง 94 mm และความยาวมีค่าระหว่าง 102-178 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0, 4.0 และ 8.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ push-out test ค่าแรงกระทำ (Load) เริ่มต้นที่ 4450 N และเพิ่มแรงกระทำครั้งละ 4450 N ทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งซีเมนต์เกิดการแตก (fail) จากนั้นบันทึกค่า แรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงความยาวทั้งด้านบนและด้านล่างของแท่งซีเมนต์ทุกๆ 30 วินาที จนกว่าตัวอย่างจะแตก

จากการทดสอบคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของซีเมนต์ที่ศึกษา คือ ความแข็งในแนวแกน (axial strength) ความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหิน (bond strength) และความแข็งเฉือนสูงสุด (peak shear strength) ผลการทดสอบปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าสูงสุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์เท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนทอไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ (crushed tuff) ด้วยการนำตัวอย่างการอุดทั้งหมดมาทดสอบความซึมด้วยวิธี constant head, standard falling head และ modified falling head ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ 1) คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ผสมกับเบนทอไนต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 2) ขนาดของตัวอย่าง และ 3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนทอไนต์และในการทดสอบ ขนาดของตัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

การทดสอบการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ ได้ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ใช้เบนทอไนต์ปริมาณ 15-25% และ 35% โดยน้ำหนัก และหินย่อยของหินทัฟฟ์ที่มีความคละและค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอแตกต่างกัน 5 ชนิด การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของตัวอย่างประกอบด้วย การทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาว (longitudinal flow tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกน polyaxial permeability tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่มีอุณหภูมิสูง (high-temperature permeability tests) และการทดสอบ Piping tests

ผลการทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาวแสดงให้เห็นว่าการใช้หินย่อยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสูงผสมกับเบนทอไนต์จะทำให้ได้ค่าความซึมผ่านต่ำ และค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ในการผสม ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกนพบว่าค่าความซึมผ่านในแนวนอนสูงกว่าความซึมผ่านในแนวตั้ง และความแตกต่างระหว่างค่าความซึมผ่านในแนวนอนและในแนวตั้งจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่มีอุณหภูมิสูงพบว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 35°C มีค่าสูงที่สุด

และที่อุณหภูมิสูงถึง 60°C พบว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 25% มีค่าลดลง 10% และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 35% มีค่าลดลง 50% เมื่อเทียบกับการวัดที่อุณหภูมิ 21°C ผลการทดสอบ Piping tests พบว่าค่าความซึมผ่านในแนวตั้งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปล่อยให้ไหลผ่านโดยไม่ปิดรูด้านล่างและน้ำที่ไหลออกจากรูที่อยู่ด้านข้างมีปริมาณน้อยกว่า 2% ของปริมาณน้ำที่ไหลออกมาด้านล่างของตัวอย่าง

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะโดยใช้เบนทอไนต์สามารถทำให้ค่าความซึมผ่านลดลงได้ด้วยการใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตผสมกับเบนทอไนต์หรือใช้เบนทอไนต์อุดในหลุมเจาะที่น้ำบาดาลมีส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟต แต่การอุดเบนทอไนต์ในน้ำที่มีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ค่าความซึมผ่านเพิ่มขึ้น ส่วนการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ควรใช้ปริมาณของเบนทอไนต์ไม่น้อยกว่า 25% โดยน้ำหนัก เศษหินย่อยหรือวัสดุเม็ดหยาบที่ใช้ผสมควรจะมีความคละกันดี (well-graded) ใช้น้ำในการผสม 23.5% และในการอัดตัว (compaction) ของวัสดุผสมควรให้เป็นไปตาม Standard proctor compaction หรือสูงกว่ามาตรฐาน

South and Fuenkajorn (1996) ทดลองการใช้ซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ โดยศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านเนื้อหินกับซีเมนต์ที่อุด รวมทั้งศึกษา Tension Zone ในบริเวณรอยต่อระหว่างแท่งซีเมนต์กับชั้นหิน และศึกษาการอุดหลุมเจาะที่ความลึกต่างๆ กัน โดยจำลองแรงดันทั้งในแนวแกนและด้านข้างที่แตกต่างกัน ด้วยตัวอย่างหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm ยาว 30 cm ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรกจะถูกเจาะรูบริเวณเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางส่วนหัวและส่วนท้ายเป็นความยาว 1/3 ของความยาวตัวอย่างหิน และตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 จะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางจนทะลุ (ลักษณะเป็นวงแหวน) แล้วอุดด้วยซีเมนต์มีความยาว 5 cm ที่ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างหิน ตัวอย่างหินจะมีลักษณะเหมือนกลุ่มแรก แต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่อุดอยู่ตรงกึ่งกลางซึ่งกลุ่มแรกเป็นเนื้อหินส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นซีเมนต์ ตัวอย่างหินที่ใช้มี 5 ชนิด ประกอบด้วย หินแกรนิต 2 ตัวอย่าง หินบะซอลต์ 1 ตัวอย่าง และหินทัฟฟ์ 2 ตัวอย่าง ซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดมีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 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) และมีการขยายตัว 0.18% (หลัง 14 วัน) มีความเค้นในแนวรัศมีภายหลัง 25 วัน วัดได้ 4 MPa ค่าความซึมผ่าน 8.65×10^{-13} m/s การทดสอบการไหลผ่านจะทำโดยการใช้ Permeameter ด้วยการปล่อยน้ำจากปั๊มให้ไหลผ่านรูในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินจากหัวสู่ท้ายของตัวอย่างหินและเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามสภาวะที่การอุดอยู่ในระดับลึก 1000,

600 และ 300 เมตร จึงใส่แรงในแนวแกน (axial load) และความเค้นด้านข้าง (confining stress) ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่แรงในแนวแกน 23 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 20 MPa (1000 เมตร) ที่แรงในแนวแกน 15 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 13.5 MPa (600 เมตร) และที่แรงในแนวแกน 8.5 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 7.0 MPa (300 เมตร) และแรงดันน้ำที่ใช้ในแต่ละระดับความลึกคือ 10.7 และ 3.5 MPa

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านแท่งซีเมนต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินน้อยกว่า 1 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FREESUEF และค่าอัตราการไหลจะเพิ่มเป็นเส้นตรงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินมากกว่า 100 และเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plane2d-FE พบว่า Tension zone จะไม่เพิ่มขึ้นถ้าความเค้นจากการขยายตัวของซีเมนต์น้อยกว่า 75% ของความเค้นในแนวสัมผัสที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ (tangential stress) จากผลการทดสอบสามารถแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะ ณ จุดใดๆ ได้ดังนี้

- Expansive cement เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสามารถอุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ดี
- ในชั้นหินแข็งควรใช้ซีเมนต์ในการอุด เนื่องจากการติดตั้งซีเมนต์ในหินแข็งจะให้พันธะทางชลศาสตร์บริเวณรอยต่อดีที่สุด
- ค่าความซึมผ่านของวัสดุที่อุดควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า ของค่าความซึมผ่าน ของชั้นหิน
- ควรใช้ซีเมนต์อุดตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพราะในสภาวะที่แห้งซีเมนต์จะหดตัวและแตกจึงทำให้มีค่าความซึมผ่านสูงมาก
- การเลือกใช้ซีเมนต์หรือเบนทอไนต์ให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งในหลุมเจาะจะทำให้การอุดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีการอุดด้วยเบนทอไนต์ควรอุดแทรกด้วยซีเมนต์เป็น Key seal

Agkun (1997) ทำการทดสอบ Push-out test เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในเชิงกลศาสตร์สำหรับการอุดหลุมเจาะขนาดใหญ่ในชั้นเกลือหิน วัสดุที่ศึกษาและใช้ในการทดสอบเป็นซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติขยายตัวได้แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Self-stress I cement และ Salt-bond II cememt 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 ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบของตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง

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

Ran et al. (1997) ศึกษาคุณสมบัติของเบนทอไนต์อัดตัวแบบเคลื่อนที่ (dynamic compaction) โดยศึกษาตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม และตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือในการผสม คุณสมบัติที่ศึกษาคือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเบนทอไนต์อัดตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความซึมผ่าน 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 3-10 ชั้น และใช้ลูกตุ้มในการอัด 2 ถึง 8 ครั้ง หรือใช้แรงในการอัดตัวตั้งแต่ 5,400 ถึง 21,000 kN

ผลการทดสอบพบว่า เบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.74 Mg/m^3 ซึ่งมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0-18% ส่วนเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.86 Mg/m^3 ซึ่งมีปริมาณความชื้นที่ 12% การเพิ่มพลังงานและลูกตุ้มในการอัดเบนทอไนต์จะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดมีค่าลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะด้วยเบนทอไนต์อัดตัวควรใช้น้ำเกลือในการผสมเบนทอไนต์ เนื่องจากให้ค่าความแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่นในการผสมซึ่งจะทำให้มีค่าความพรุนต่ำและมีค่าความซึมผ่านที่ต่ำกว่า

Akgun and Daemen (2000) ศึกษาอิทธิพลของปริมารการอุ้มตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็งของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (expensive cement) ด้วยการทดสอบแบบ Push-out test ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์ และรัศมีของตัวอย่างการอุดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50% เติมสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10% และสารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบัน

ปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.35, 12.7, 25.4 และ 50.8 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบของตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำปานกลาง

จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกน ความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหิน และความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรจะออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลเพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ