

### บทที่ 3

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 การทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

**เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2546)** การทำเสถียรและการทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตราย โดยการทำให้เสถียรจะมีการใส่สารเคมีหรือวัสดุอื่นๆ ผสมกับของเสียอันตราย เพื่อไม่ให้สารอันตรายกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดความเป็นพิษของของเสียอันตราย ส่วนการทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการทำให้ของเสียแข็งตัว คือทำให้ของเสียถูกเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพ

##### 3.1.1 หลักการ

การทำเสถียรและการทำก้อนแข็งจะช่วยป้องกันการเกิดการชะของเสีย ซึ่งต่อไปนี้เป็นข้อดีของการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง

3.1.1.1 ช่วยป้องกันการละลายของสารปนเปื้อนออกมา

3.1.1.2 ช่วยลดขนาดพื้นที่ผิวของของเสีย

3.1.1.3 ช่วยเสริมสภาพของของเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วทางด้านกายภาพ ให้อยู่ในสภาพดีมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม

##### 3.1.2 การทำเสถียร (Stabilization)

การทำเสถียร เป็นกระบวนการที่มีการใส่วัสดุหรือสารเพิ่มเติมที่ใช้ลดความอันตรายของของเสีย ทำให้ลดอัตราของการเคลื่อนที่ออกของสารปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม และช่วยลดระดับความเป็นพิษ เปรียบเสมือนเป็นกระบวนการบำบัดของเสีย แต่ลักษณะทางกายภาพอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลง

### 3.1.3 การทำก้อนแข็ง (Solidification)

การทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการที่มีการใส่สารที่ก่อให้เกิดวัสดุแข็งตัวผสมกับของเสียอันตราย ทำให้ได้ของแข็งที่มีความแข็งแรง รับแรงกดได้มากขึ้น และช่วยลดความสามารถของการซึมผ่านได้ วัสดุที่ก่อให้เกิดการแข็งตัวได้แก่ ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ของเสียอันตรายมีเสถียรภาพดีขึ้น

### 3.1.4 กลไกของระบบ

กลไกของระบบการทำเสถียรและการทำงานแข็ง อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลให้ของเสียอันตรายถูกปกปิด หรือถูกยึดเกาะติดจนแน่น ไม่สามารถหลุดออกมาได้ ซึ่ง Lagrega และคณะ (1994) ได้แสดงรายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (Lagrega และคณะ, 1994)

กลไกการจับยึด	รายละเอียด
1. Macroencapsulation	เป็นวิธีทางกายภาพ ซึ่งเป็นลักษณะของรูภายในที่ไม่ต่อเนื่องจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ
2. Microencapsulation	เป็นวิธีทางกายภาพ ซึ่งของเสียจะถูกจับภายในโครงสร้างของผลึก โดยจะจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนมาก
3. Absorption	เป็นวิธีทางเคมีซึ่งใช้ในการปรับปรุงให้ส่วนของลักษณะของก้อน เพื่อให้สะดวกต่อการเป็นก้อน กระบวนการแรกของวิธีนี้ คือ การดูดซับของเหลวที่อยู่ในรูปของเสีย
4. Adsorption	เป็นวิธีการทางเคมี เป็นปรากฏการณ์ที่ผิว และยังเป็นวิธีการทำให้เกิดการจับตัวกันซึ่งอาจจะหมายรวมถึง พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์ วาล์ว มักจะเกิดเมื่อวัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสานของของเสีย
5. Precipitation	เป็นวิธีการทางเคมีเพื่อทำให้เสถียรมากขึ้นโดยเป็นวิธีที่ใช้กับของเสียประเภทอนินทรีย์ สารที่เป็นตัวก่อให้เกิดผลึก ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอเนต และฟอสเฟต
6. Detoxification	เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการทำให้เสถียร เป็นการเปลี่ยนทางเคมีเพื่อให้เกิดในรูปอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย

### 3.1.5 สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binding Agents)

วิธีการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง เป็นวิธีที่อาศัยการเติมสารทำเสถียรหรือสารทำให้อ่อนแข็งซึ่งมีใช้กันหลายชนิด พบได้ทั่วไปเช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่านั้น

#### 3.1.5.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วินิต ช่อวิเชียร (2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม จะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหิน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆที่อุณหภูมิประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน เหล็ก และอลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ

เมื่อเผาวัตถุดิบปูนซีเมนต์ ออกไซด์ของแคลเซียม ซิลิกอน เหล็กและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต ช่อวิเชียร 2539)

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้เร็ว ให้กำลังสูงเกิดความร้อนมาก
- 2) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูงเกิดความร้อนน้อย
- 3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็ว เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง โดยจะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกและจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต
- 4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต รวมกันประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ ซิลิกา และอะลูมินา อยู่มากจะเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูง แต่ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ ซิลิกามากเพียงอย่างเดียวจะเป็นปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาก่อตัวช้า

### 3.1.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.15) และ ASTM แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC)

สำหรับใช้ทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใด ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าปกติ และสำหรับใช้ในงานก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรงหรือในที่ชื้นอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง

มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อยกว่าประเภทที่ 1 โดยจะต้องมีไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใด ที่เกิดความร้อน มีความทนซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์แข็งเร็วหรือซูเปอร์ซีเมนต์

สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเปลี่ยนสัดส่วนโดยเพิ่มปริมาณส่วนผสมของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนตมากขึ้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ

ผลิตขึ้นโดยใช้ไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อย แต่ใช้ไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหยาบ เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำขณะแข็งตัว

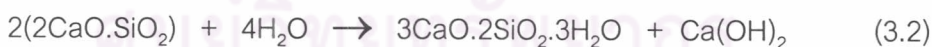
ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง

เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง เพราะมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อยมาก ปกติไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ให้ดีไม่ควรเกิน 4 เปอร์เซ็นต์สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง

### 3.1.5.3 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยสารประกอบดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากัน และเปลี่ยนเป็นวัสดุประสาน ผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวมๆ ว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ประกอบไปด้วยแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (C-S-H) 50 - 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 20 - 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก และมีขนาดเล็ก โดยมีการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นขึ้น เมื่อผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกผสมกับน้ำจะเกิดเป็นไฮเดรตคอมพาวนด์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ (3.1) และ (3.2) ปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยที่แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) จะแยกตัวออกมาจากแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) แล้วเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จนกว่าสารละลายนั้นจะอิ่มตัวไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือจนกว่าสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

- 1) แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) มีสูตรเคมีดังนี้  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจัดเป็นวัสดุประสาน
- 2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, C-H) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

### 3.1.6 การทดสอบหลังผ่านการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง

ในการทดสอบวัสดุใหม่ที่ได้ทำการทำเสถียรและการทำก้อนแข็งแล้ว เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งแรง ความทนทาน ความสามารถด้านทานการชะละลายออกมา และอื่นๆ ทั้งเป็นการวัดเชิงกายภาพ และเชิงเคมี โดยทำการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบหาค่าความสามารถในการรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength )
- 2) การทดสอบหาค่าความหนาแน่น
- 3) การทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด

โดยในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (2540) กำหนดเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ได้แล้วที่ผ่านการทำเสถียร และการทำให้เป็นก้อนแข็งไว้ดังนี้

- 1) สามารถรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1633 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secure Landfill) ได้อย่างปลอดภัย
- 2) มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
- 3) มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายเจือปนในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) โดยตะกั่วไม่เกิน 5 มก./ล. และเบนซีนไม่เกิน 0.5 มก./ล. เป็นไปตามเกณฑ์การสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิภูลและวัสดุที่ไม่ใช่แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และทำเสถียรอย่างสมบูรณ์ ก่อนนำไปฝังกลบ

### 3.2 ความรู้เบื้องต้นด้านการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิง

นภดล กรณ์ศิลป์ และคณะ (2542) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิง เป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมระดับลึก (Deep Ground Improvement) ทั้งนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในด้านต่าง ๆ ที่ได้วางไว้ อาทิเช่น ปัญหาเชิงกล (Mechanical Problem) กล่าวคือเป็นการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นดิน ป้องกัน Deformation ลดแรงดันดิน และเพิ่มเสถียรภาพความลาดชัน ปัญหาเชิงอุทก (Hydrological Problem) กล่าวคือป้องกันการเกิดการกลายเป็นน้ำของดิน และใช้เป็นกำแพงกันดินป้องกันการรั่วซึม และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการจัดการขยะมูลฝอยต่าง ๆ

เมื่อก้าวถึงกระบวนการเกร้าดิงแล้วโดยทั่วไปจะเข้าใจว่า เป็นการอุดช่องว่างด้วยวัสดุที่อยู่ในสภาพของเหลว แล้วต่อมาระยะหนึ่งของเหลวนั้นจะแข็งตัวหรือกลายเป็นดินแข็ง ส่งผลให้วัสดุที่ช่องว่างถูกอุดนั้นที่บดน้ำและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทว่ากระบวนการเจ็ทเกร้าดิงนั้น แตกต่างจากแนวคิดข้างต้น ทั้งนี้เพราะกระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้ประโยชน์ของแรงดันของเหลวซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างน้ำและสารที่ก่อให้เกิดการแข็งตัว (Hardening Agent) ไปทำลายให้ดินแตกตัวออกจากกัน (มิใช่การแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างการจับตัวกันของดิน) และในขณะเดียวกันของเหลวดังกล่าวก็จะเข้าไปรวมตัวกับดินที่แตกตัวดังกล่าว และแข็งตัวขึ้นตามเวลา จนกลายเป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นซึ่งเรียกว่า Grout soil หรือกล่าวโดยสรุปก็คือ เกร้าดิง เป็นกระบวนการที่อาศัย Filling & Replacement Technique ในขณะที่ เจ็ทเกร้าดิงเป็นกระบวนการที่อาศัย Erosion Technique เป็นเกณฑ์นั่นเอง

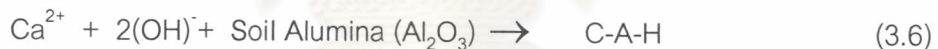
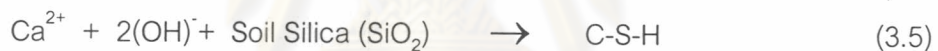
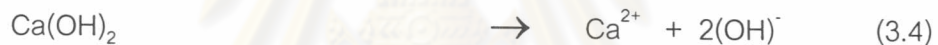
หากย้อนมาคิดถึงวิวัฒนาการของงานปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิงแล้ว จะพบว่ากระบวนการดังกล่าวเป็นแนวทางที่ปรับปรุงมาจากงานเกร้าดิงทั่วๆ ไป กล่าวคือ โดยปกติการนำวิธีเกร้าดิงมาใช้นั้น ก็เพื่อจุดประสงค์ในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินหรือหินให้มีคุณสมบัติด้านการที่บดน้ำ กำลังรับน้ำหนักหรือ Stiffness ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น หัวใจหลักของงานดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเกร้าดิงนั้นจะสามารถทะลุทะลวง และแทรกตัวเข้าไปในชั้นดินหรือหินนั้นได้ดีเพียงพอ ต่อการปรับปรุงให้ได้ผลตามที่ต้องการหรือไม่ จากประสบการณ์พบว่า Cohesionless Soil ที่มีขนาดใหญ่กว่า Medium Sand สามารถปรับปรุงคุณภาพโดยกระบวนการ Low Pressure Permeation Grouting

### 3.2.1 กลไกการพัฒนากำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุงโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิง

ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิงนั้น วัสดุเกร้าดส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ซีเมนต์ ทว่าในปัจจุบันยังได้มีการนำสารผสมเพิ่ม (Additives) อื่น ๆ มาใช้ร่วมด้วย จึงมีความจำเป็นในขั้นต้นที่จะต้องเข้าใจปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยวิธีการดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ต่อไป

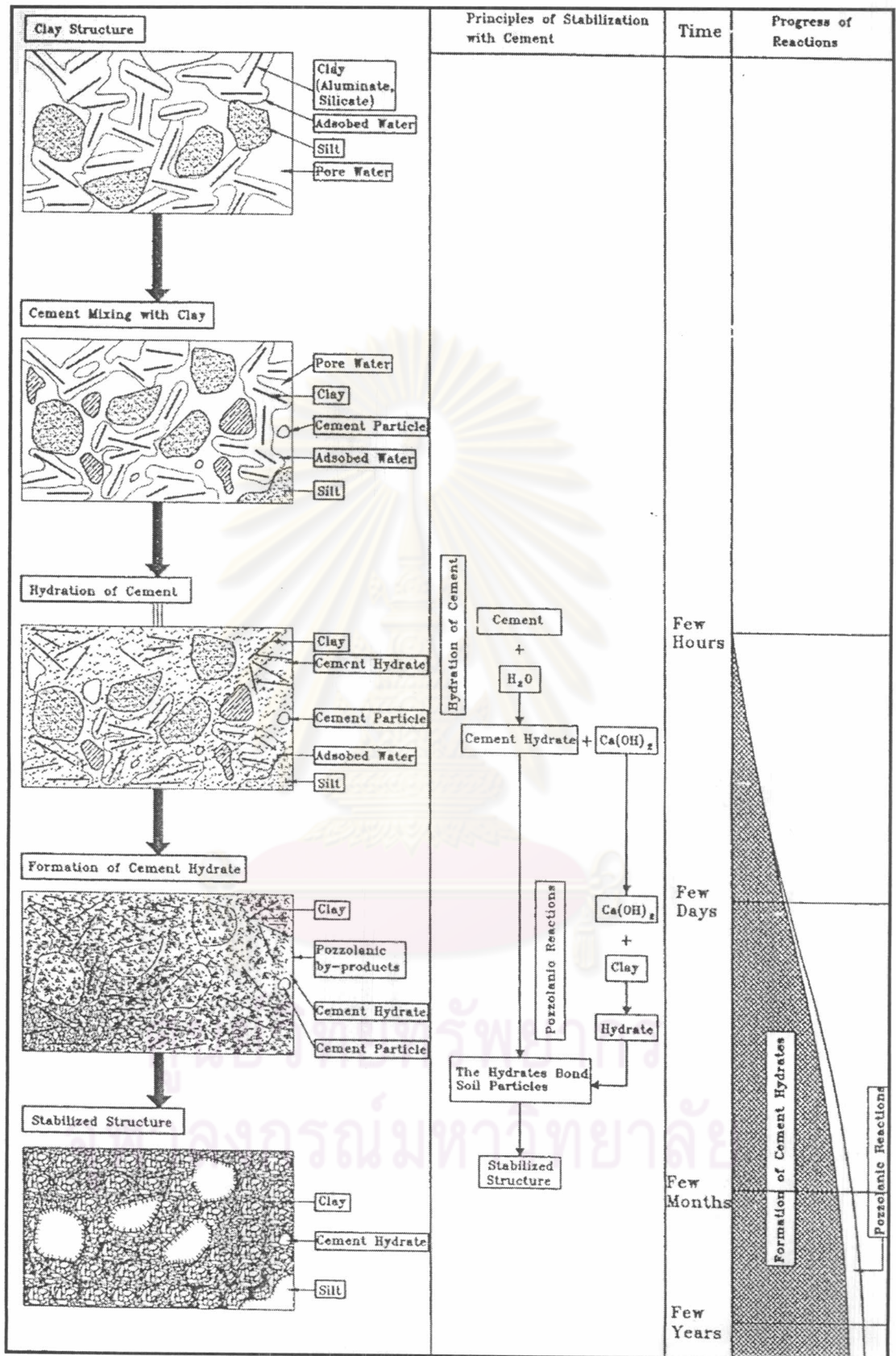
โดยทั่วไปองค์ประกอบซึ่งเป็นออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อันได้แก่  $\text{CaO}$   $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  นั้น เป็นมวลสารพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินเป็นอย่างยิ่ง เมื่อดินได้รับการผสมเข้ากับซีเมนต์แล้ว น้ำในช่องว่างของดิน (Pore Water) จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีเมนต์เป็นกระบวนการแรกซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังสมการที่ (3.1) (3.2) และ (3.3) ที่กล่าวไว้ข้างต้น

ดินบางส่วนที่มีสารจำพวกซิลิกาและอะลูมินา จะสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก โดย C-H จะแตกตัวออกเป็นไอออนของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $(\text{OH})^-$  จะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ดังขั้นตอนต่อไปนี้



กระบวนการที่เกิดขึ้นในสมการที่ (3.5) และ (3.6) นี้ คือ กระบวนการ Pozzolanic Reaction และ Carbonization ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของดินและซีเมนต์ จากสมการดังกล่าว เป็นข้อบ่งชี้ได้อย่างดีว่า ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าดิง หากต้องการให้คุณภาพของดินที่ปรับปรุงมีคุณภาพสูง จำเป็นต้องใช้ปริมาณซีเมนต์อย่างเพียงพอ นอกจากนั้นจะต้องมีการผสมเข้ากับมวลดินได้อย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์นั่นเอง รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์





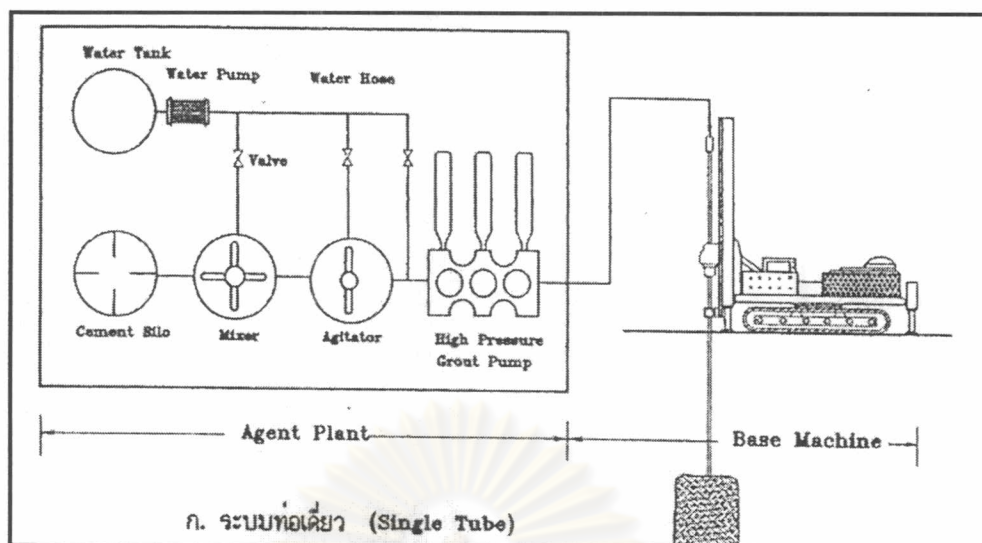
รูปที่ 3.1 กระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ (ขนาด กรณศิลป์ และ คณะ 2542)

### 3.2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างและระบบของเจ็ทเกร้าตัง

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าตัง เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการฉีดน้ำปูนเข้าผสมรวมกับดินด้วยความดันที่สูงมาก (โดยทั่วไปแรงดันที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 200 ถึง 400 บาร์) ผ่านทางรูขนาดเล็กซึ่งมีขนาดประมาณ 1.8 ถึง 3.5 มม. และเรียงตัวอยู่ในแนวรอบรอบส่วนปลายล่างของก้านเจาะส่วนมอนิเตอร์ (Monitor) ในขณะที่ทำงานเครื่องเจาะฉีดน้ำปูนจะหมุนก้านเจาะที่มีปลายล่าง ประกอบด้วยมอนิเตอร์และหัวเจาะทำการเจาะผ่านชั้นดินลงไปช้าๆ พร้อมทั้งฉีดน้ำตัดดินลงไปด้วยความดันสูง เมื่อถึงชั้นความลึกสุดท้ายที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินจะหมุนก้านเจาะ พร้อมทั้งดึงก้านเจาะขึ้นตามอัตราเร็วที่ได้คำนวณไว้ล่วงหน้า ในขณะที่เดียวกันจะทำการฉีดน้ำปูนไปด้วย มวลดินจะถูกทำลายด้วยกระแส น้ำปูนที่มีความเร็วประมาณ 200 เมตรต่อวินาที หรือสูงกว่า จากนั้นอนุภาคดินจะถูกผสมกับน้ำปูนขณะที่ส่วนผสมของมวลดิน และน้ำปูนส่วนเกินจะถูกเคลื่อนย้ายและแทนที่ พลังงานจลน์ของน้ำปูนจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานภายในมวลดินจนสลายหมดไปในชั่วระยะทางหนึ่ง ที่น้ำได้แหวกผ่านเนื้อดินออกไป และจากการหมุนของหัวเจาะซึ่งมีการฉีดน้ำปูนด้วยความดันสูงจะทำให้กระแสน้ำปูนประทุติดดินเสมือนใบพัดของเหลว ที่มีกำลังทะลุทะลวงสูงตัดย่อยดินทั้งอ่อน และแข็งให้ผสมรวมกับน้ำปูนเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่หมุนและดึงก้านเจาะขึ้นอย่างช้าๆ ตามอัตราเร็วที่ได้คำนวณไว้ จะทำให้ได้ดินผสมซีเมนต์ลักษณะคล้ายรูปทรงกรวยซึ่งจะพัฒนากำลังสูงขึ้นตามระยะเวลา สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการก่อสร้าง รวมทั้งอุปกรณ์และระบบต่างๆ ของเจ็ทเกร้าตัง จะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าตัง

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีเจ็ทเกร้าตังแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ซึ่งต้องทำงานควบคู่กันไป กล่าวคือ ส่วนเครื่องจักรหลัก (Base Machine) และส่วน Agent Plant (รูปที่ 3.2) เครื่องจักรหลักจะดำเนินการเกี่ยวกับกระบวนการฉีดอัด และผสมน้ำปูนลงในดิน ในขณะที่ส่วน Agent Plant มีหน้าที่ป้อน Stabilizing Admixtures ให้กับเครื่องจักรหลักอย่างต่อเนื่องและเพียงพอทั้งในด้านปริมาณและความดันต่างๆ โดยหากจำแนกเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีเจ็ทเกร้าตัง โดยพิจารณาจากส่วนผสมที่ใช้ในการทำละลายโครงสร้างของมวลดิน และส่วนผสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน รวมทั้งจำนวนท่อที่ใช้ จะสามารถจำแนกวิธีเจ็ทเกร้าตัง ออกได้เป็น 3 ระบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับงานเจ็ตเกร้าดิง (ขนาด กรรมศิลป์ และคณะ 2542)

ตารางที่ 3.3 การจำแนกระบบเจ็ตเกร้าดิง โดยอาศัยส่วนผสมที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของมวลดินและส่วนผสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน รวมทั้งจำนวนท่อเป็นเกณฑ์ (ขนาด กรรมศิลป์ และคณะ 2542)

ระบบ	ส่วนผสมที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของมวลดิน	ส่วนผสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน	ชื่อเฉพาะ
ท่อเดี่ยว (Single Tube)	Cement Grout		CCP
ท่อดู (Double Tube)	Cement Grout + Air		JSG, JSP, JGP
สามท่อ (Triple Tube)	Air + Water	Cement Grout	CJG, SSS - MAN

แต่ทั้ง 3 ระบบที่กล่าวมา (ท่อเดี่ยว ท่อดู และสามท่อ) มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้างที่มีหลักการเดียวกัน กล่าวคือ ในส่วนของ Agent Plant จะประกอบไปด้วยถังเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เครื่องชั่ง (Weighing Unit) ถังผสม (Mixer) ถังกวน (Agitator) บั๊มอัดฉีดความดันสูง (High Pressure Pump) และเครื่องอัดลม (Air Compressor) ส่วนเครื่องจักรหลักจะเป็นเครื่องเจาะและอัดฉีด รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบเช่น ท่ออัดฉีด (Grout Rod) เป็นต้น

โดยในงานวิจัยครั้งนี้จะเลือกระบบท่อเดี่ยว (Single Tube) ในการปฏิบัติการในสนาม

### 3.2.4 ขั้นตอนการทำเจ็ทเกร้าดิ่ง

ลำดับขั้นตอนการทำเจ็ทเกร้าดิ่ง แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 โดยหากพิจารณาขั้นตอนหลักๆ แล้ว จะสามารถจำแนกขั้นตอนการก่อสร้าง Jet Grouted Column ออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

#### 1) ขั้นตอนการติดตั้ง (Setting Up)

ในขั้นตอนนี้จะต้องดำเนินการปรับพื้นที่ที่จะทำเจ็ทเกร้าดิ่ง ให้อยู่ในแนวระนาบ โดยทำการปรับพื้นที่ให้เรียบและขจัดอุปสรรคที่จะขัดขวางการทำงานออกไป หากพบว่าพื้นที่ก่อสร้างเป็นบริเวณดินอ่อนควรทำการปูแผ่นเหล็ก เพื่อป้องกันเครื่องเจาะและอัดฉีดจมลงในชั้นดินอ่อน จากนั้นทำการสำรวจเพื่อวางตำแหน่งจุดที่จะทำเจ็ทเกร้าดิ่ง ให้ตรงตามแบบก่อสร้าง รวมทั้งตรวจสอบระดับของดินเดิมพร้อมทั้งกำหนดความลึกในการเจาะ และอัดฉีดตามแบบก่อสร้าง จากนั้นจึงเคลื่อนย้ายส่วนเครื่องจักรหลัก เข้าสู่ตำแหน่งเจาะ และทำการตรวจสอบตำแหน่ง สิ่งกีดขวางกระบวนการเจาะ ระดับของเครื่องเจาะและแนวตั้งของเครื่องจักรหลักให้เรียบร้อย

#### 2) ขั้นตอนการเจาะและฉีดล้าง (Drilling and Prejetting)

เมื่อตรวจสอบการดำเนินการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ขั้นตอนการเจาะและฉีดล้างจะเป็นการเจาะนำลงไปในพื้นที่ดินจนถึงระดับสุดท้าย ที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ โดยทำการเจาะโดยใช้หัวเจาะดิน (Drilling Bit) ติดตั้งต่อกับส่วนปลายของท่ออัดฉีด และเจาะโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางหมุนเวียนในการเจาะนำ ขณะดำเนินการเจาะฉีดล้างจะต้องมีการตรวจสอบมุมในการเจาะของก้านเจาะและความลึกในการเจาะอย่างรอบคอบด้วย

#### 3) ขั้นตอนการฉีดทดสอบ (Test Jetting)

การฉีดทดสอบมีวัตถุประสงค์ เพื่อตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ทุกชิ้นทั้งส่วนของเครื่องจักรหลัก และ Agent Plant ว่าอยู่ในสภาวะที่พร้อมจะทำเจ็ทเกร้าดิ่งตามข้อกำหนดทางเทคนิคหรือไม่ โดยในขั้นตอนนี้ ต้องมีการตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ทุกส่วนโดยละเอียด และหากการฉีดทดสอบไม่มีปัญหา ก็จะเริ่มดำเนินการทำเจ็ทเกร้าดิ่งต่อไปได้ทันที แต่หากมีปัญหา ก็จะสามารถแก้ไขได้ทันทีและไม่เกิดผลเสียอันเนื่องจากการไม่ได้คุณภาพของ Jet Grouted Column ที่ทำไป

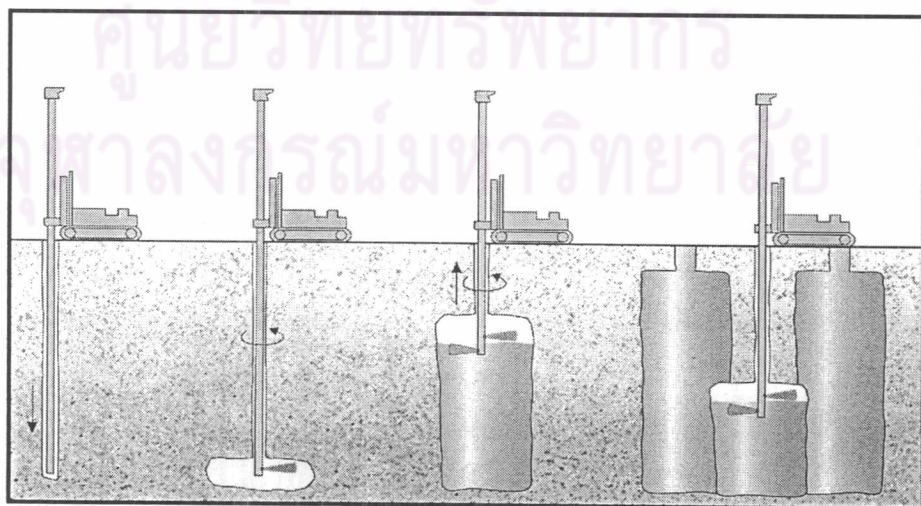
## 4) ขั้นตอนการทำ Jet Grouted Column

หากการฉีดทดสอบไม่มีปัญหา ก็สามารถดำเนินการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงผ่านท่ออัดฉีดและมอเตอร์ เข้าไปผสมกับดินพร้อมทั้งหมุนและดึงก้านเจาะขึ้นเป็นช่วงๆ โดยความเร็วรอบของการหมุน ระยะเวลาในการถอนท่ออัดฉีด ควรควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ ที่ควบคุมโดยโปรแกรมที่กำหนดความเร็วรอบของการหมุน และรวมทั้งเวลาในการถอนท่ออัดฉีดตามที่ได้คำนวณไว้ล่วงหน้า โดยระบบการอัดฉีดเพื่อก่อสร้าง Jet Grouted column มีรายละเอียดดังนี้ (ดูตารางที่ 3.4 ประกอบ)

ระบบท่อเดี่ยว (Single Tube) วิธีการอัดฉีดระบบนี้เป็นวิธีการที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดโดยน้ำปูนจะถูกอัดฉีดเข้าไปผสมกับดินด้วยความดันสูง โดยทั่วไปมักใช้ปั๊มอัดฉีดประเภท Plunger Pump โดยน้ำปูนจะถูกอัดฉีดผ่านหัวฉีด ด้วยความดันที่อาจสูงถึง 600 บาร์ เข้าไปทำลายโครงสร้างและการเกาะตัวของดินและมีการกวนผสมเกิดขึ้นโดยกระแสของน้ำปูน ทำให้ได้วัสดุผสมระหว่างดินและน้ำปูน กระบวนการดังกล่าวจะคงดำเนินต่อไป โดยคงระยะยกและการหมุนท่อในอัตราสม่ำเสมอ จนถึงระดับที่ต้องการหยุดปรับปรุงคุณภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการอัดฉีด โดยระบบท่อเดี่ยว มักให้รัศมีของการปรับปรุงคุณภาพดินในวงแคบ กล่าวคือโดยปกติเส้นผ่าศูนย์กลางของ Jet Grouted Column ไม่เกิน 1 เมตร (ทั่ว ๆ ไปประมาณ 0.6 ถึง 0.8 เมตร)

## 5) ขั้นตอนการยุติการทำ Jet Grouted Column

เมื่อดำเนินการอัดฉีดน้ำปูนถึงระดับที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้างก็เป็นอันเสร็จกระบวนการทำ Jet Grouted column จากนั้นจึงย้ายเครื่องจักรหลักไปยังตำแหน่งถัดไป และเริ่มกระบวนการในขั้นตอนที่ 1) ถึง 4) ในบริเวณถัดไป



รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการทำเจ็ทเกร้าดิง (นภดล กรณ์ศิลป์ และคณะ 2542)

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรมาตรฐานในการทำเจ็ทเกร้าติง (ขนาด กรณิศิลป์ และคณะ 2542)

ตัวแปรสำหรับงาน Jet Grouting	หน่วย	ระบบท่อ เดียว
ความดันในการอัดฉีด		
ความดันน้ำ	MPa	PW
ความดันน้ำปูน	MPa	30 - 55
ความดันอากาศ	MPa	ไม่ใช่
อัตราการไหล		
น้ำ	ลิตร/นาที	PW
น้ำปูน	ลิตร/นาที	60 - 150
อากาศ	ม. <sup>3</sup> /นาที	ไม่ใช่
ขนาด Nozzle		
ฉีดน้ำ	มม.	PW
ฉีดน้ำปูน	มม.	1.8 - 3.0
จำนวนของรูฉีดน้ำ		PW
จำนวนของรูฉีดน้ำปูน		2 - 6
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์		0.8/1 - 2/1
ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้	กก./ม. <sup>3</sup>	400 - 1,000
ความเร็วการหมุนก้านเจาะ	รอบ/นาที	10 - 30
อัตราการยก	นาที/ม.	3 - 8
เส้นผ่าศูนย์กลางของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ โดยประมาณ		
ดินเม็ดหยาบ	เมตร	0.5 - 1.0
ดินเม็ดละเอียด	เมตร	0.4 - 0.8
กำลังของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ		
ดินทราย	Mpa	10 - 30
ดินเหนียว	Mpa	1.5 - 10

PW = Pore Water

### 3.2.5 องค์ประกอบที่มีผลต่อขนาดของ Jet Grouted Column

Bell (1994) ขนาดของ Jet Grouted Column หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะเวลาที่มีของการอัดฉีดน้ำปูน ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายด้าน ทั้งในแง่คุณสมบัติของชั้นดินที่ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพ และตัวแปรที่ใช้ในการทำเจ็ทเกร้าดิง รวมไปถึงระบบที่ใช้ในการดำเนินการ โดยองค์ประกอบที่มีผลต่อขนาดของ Jet Grouted Column มีดังนี้

- 1) ตัวแปรที่มีผลด้านการทำลายโครงสร้างของมวลดินโดยการอัดฉีด
  - ความดัน อัตราการไหลและหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของ Jetting Fluid
  - ความดันของอากาศที่ใช้ในระบบท่อคู่และระบบสามท่อ
- 2) ตัวแปรด้านการยก (Lifting Parameters)
  - อัตราการถอนก้านเจาะ
  - อัตราการหมุน
- 3) ตัวแปรด้านคุณสมบัติของดินที่ได้รับ การปรับปรุงคุณภาพ
  - ขนาดและการคละกันของเม็ดดิน
  - ความหนาแน่นหรือสภาพความเหลวตัว (Density or Consistency)
  - กำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน
  - โครงสร้างของดิน (อาทิเช่น มีลักษณะเป็นเลนส์ มีการวางเป็นแถบหรือเป็นชั้น เป็นต้น)

### 3.3 การจำแนกดิน

การจำแนกประเภทดินนั้นมีมาตรฐานต่างๆอยู่มากมายด้วยกัน แต่ในการวิจัยครั้งนี้ จะเลือกใช้การจำแนกประเภทดินในมาตรฐาน Unified Soil Classification (USC) เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบต่างๆ ของดินโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.5

ตาราง 3.5 การจำแนกดินในมาตรฐาน Unified Soil Classification (มาตรฐาน ASTM D 2487)

การจำแนกประเภททั่วไป			สัญลักษณ์ กลุ่ม	ชื่อกลุ่มดิน	
ดินพวกเม็ด หยาบ	กรวด ข้างบนตะแกรง เบอร์ 4 มากกว่าหรือ เท่ากับครึ่งหนึ่ง ของส่วนที่เป็น เม็ดหยาบ	กรวด	GW	กรวดมีขนาดคละกันดี และกรวดผสมทราย มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	
		สะอาด	GP	กรวดมีขนาดคละกันไม่ดี และกรวดผสมทราย มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	
		กรวดมี เม็ด	GM	กรวดมีตะกอนทรายปน กรวด-ทราย- ตะกอนทรายผสมกัน	
		ละเอียด ปน	GC	กรวดมีดินเหนียวปน กรวด-ทราย- ดินเหนียวผสมกัน	
	ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 น้อยกว่า 50 %	ทราย	ทราย	SW	ทรายมีขนาดคละกันดี และทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย
			สะอาด	SP	ทรายมีขนาดคละกันไม่ดี และทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย
			ทรายมี เม็ด	SM	ทรายมีตะกอนทรายปน ทราย- ตะกอนทรายผสมกัน
			ละเอียด ปน	SC	ทรายมีดินเหนียวปน ทราย- ดินเหนียวผสมกัน



ตาราง 3.5 (ต่อ)

การจำแนกประเภททั่วไป		สัญลักษณ์ กลุ่ม	ชื่อกลุ่มดิน
ดินพวกเม็ด ละเอียด  ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 มากกว่า 50 %	ตะกอนทรายและ ดินเหนียว  ค่า Liquid Limit (L.L.) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 %	ML	ตะกอนทรายอินทรีย์ และทรายเม็ดละเอียด มาก หินฝุ่น ทรายละเอียดปนตะกอนทราย
		CL	ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึง ปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด ดินเหนียวปน ทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียว ล้วน
		OL	ตะกอนทรายอินทรีย์ และดินเหนียวปน ตะกอนทรายอินทรีย์ มีความเหนียวต่ำ
	ตะกอนทรายและ ดินเหนียว  ค่า Liquid Limit (L.L.) มากกว่าหรือเท่ากับ 50 %	MH	ตะกอนทรายอินทรีย์ ทรายละเอียด หรือ ตะกอนทรายปนไมก้าหรือดินเบา ตะกอน ทรายที่ยึดหยุ่น
		CH	ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีความเหนียวสูง และ ดินเหนียวที่มีความหนืดสูง
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีความเหนียวปานกลาง ถึงสูง และตะกอนทรายอินทรีย์
ดินพวกสารอินทรีย์สูง		PT	พีต โคลนสีดำ และดินที่มีสารอินทรีย์สูง
Prefix: G = Gravel, S = Sand, M = Silt, C = Clay, O = Organic Suffix: W = Well Graded, P = Poorly Graded, M = Silty, L = Clay, LL < 50%, H = Clay, LL > 50%			

### 3.4 สารปนเปื้อนที่ใช้ในงานวิจัย

สารปนเปื้อนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะเลือกใช้สารตะกั่วในรูป  $Pb(NO_3)_2$  เป็นตัวแทนของสารตะกั่วในสารละลายเบตเตอริถยนต์ และใช้สารเบนซีน ตัวแทนของสารปนเปื้อนในน้ำมันเครื่องเก่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.1 ตะกั่ว (Pb)

หน่วยข้อเสนอเพศวัตถุอันตรายและความปลอดภัย (2544) ตะกั่ว เป็นโลหะ มีสีเทา ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 207.20 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 327.4 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดเท่ากับ 1,740 องศาเซลเซียส มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 11.34 ใช้เป็นสารเคลือบผิวถังเคลือบผิวท่อ โลหะตะกั่วใช้เป็นตัวดูดซับเสียง ใช้เป็นแผ่นกันขวาง X-ray และเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ใช้เป็นสารผสมสี ใช้เป็นสารกำจัดแมลง ตะกั่วในรูปของ  $PbSO_4$  มีสีขาว ในรูปของ  $PbCrO_4$  มีสีเหลือง และในรูปของ  $Pb_3O_4$  มีสีแดง ตะกั่วได้ถูกใช้เป็นโลหะผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่นเบตเตอริ์ แกนเพลลา เป็นต้น ตะกั่วจะถูกดูดซับได้โดยดินหรือตะกอน โดยเมื่อรวมเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำจะถูกดูดซับได้ด้วยดินได้มาก สารนี้มีแนวโน้มเป็นสารก่อมะเร็ง ตะกั่วสามารถถูกบำบัดได้หลายวิธีได้แก่ วิธีตกตะกอนผลึกเคมีด้วยการใช้ต่าง ไฮดรอกไซด์ ปูนขาว และซัลไฟด์ เป็นต้น

#### 1) องค์ประกอบและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

เลขรหัสซีเอส: 7439-92-1

เลขดัชนีซี: -

มวลต่อโมล: 207.20

เลขอีไอเอ็นซีเอส: 231-100-4

สูตรโมเลกุล: Pb

#### 2) ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย

อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อเด็กในครรภ์ อาจก่อให้เกิดภาวะเจริญพันธุ์บกพร่อง อันตรายเมื่อสูดดม กลืนกิน อันตรายจากการสะสม

### 3) มาตรการปฐมพยาบาล

เมื่อสูดดม: ให้ออกอากาศบริสุทธิ์

เมื่อถูกผิวหนัง: ชะล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก ถอดเสื้อผ้าที่เปื้อนออกทันที

เมื่อเข้าตา: ชะล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก โดยลืมตากว้างในน้ำอย่างน้อย 10 นาที

เมื่อกลืนกิน: ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำปริมาณมาก กระตุ้นให้อาเจียนแล้วนำส่งแพทย์ทันที

ยาระบาย: โซเดียมซัลเฟต (1 ช้อนโต๊ะในน้ำ 0.25 ลิตร) ถ่านกัมมันต์ ห้ามให้กินนม ห้ามให้กินแอลกอฮอล์

### 4) มาตรการการผจญเพลิง

สารดับไฟที่เหมาะสม: เลือกใช้สารดับเพลิงที่เหมาะสมกับวัสดุที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

ข้อมูลอื่น: ไม่ลุกไหม้ติดไฟ

### 5) มาตรการเมื่อมีการปล่อยสารโดยอุบัติเหตุ

ข้อควรระวังส่วนบุคคล: ไม่ควรทำให้เกิดฝุ่น

วิธีทำความสะอาด: กวาดขณะแห้ง ส่งไปกำจัด ทำความสะอาดบริเวณที่ปนเปื้อน

### 6) การเก็บรักษา

การเก็บ: ปิดให้แน่น เก็บในที่แห้ง ณ อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส

### 7) การป้องกันส่วนบุคคล

อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล:

การป้องกันระบบหายใจ: จำเป็น เมื่อมีฝุ่น

การป้องกันตา: จำเป็น

การป้องกันมือ: จำเป็น

ข้อควรปฏิบัติ เปลี่ยนเสื้อผ้าที่เปื้อนสารเคมี ล้างมือหลังจากการใช้สาร

## 8) สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ลักษณะ: ของแข็ง	สี: ดำออกเทา
กลิ่น: ไม่มีกลิ่น	ค่าพีเอช ไม่มีข้อมูล
จุดหลอมเหลว ประมาณ 327 องศาเซลเซียส	จุดเดือด 1,740 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิติดไฟ ไม่มีข้อมูล	จุดวาบไฟ ไม่มีข้อมูล
ความหนาแน่น 11.34 ก./ซม. <sup>3</sup>	
ความสามารถในการละลาย น้ำ (20 องศาเซลเซียส) ไม่ละลาย	

## 9) ความเสถียรและความไวต่อปฏิกิริยา

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง: ฟลูออรีน สารประกอบแอมโมเนียม โลหะ ในสภาพที่เป็นผง กรดไนตริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโลหะ ในสภาพที่เป็นผง เอไซด์ พิคเครต

## 10) ข้อมูลทางพิษวิทยา

ข้อมูลสำหรับสารประกอบตะกั่วโดยทั่วไป: การได้รับในปริมาณมากเท่านั้นจึงแสดงพิษเฉียบพลัน เนื่องจากสารถูกดูดซึมผ่านกระเพาะ และลำไส้ได้น้อย หลังระยะแฝงหลายชั่วโมงจะรู้สึก รสโลหะ คลื่นไส้ อาเจียน และเสียดท้องอย่างรุนแรง หดสติ การได้รับเป็นเวลานาน ทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแอ (ข้อมือตก) โลหิตจาง และระบบประสาทส่วนกลางผิดปกติ อาจเป็นพิษต่อทารกในครรภ์นั้น หญิงสาวในช่วงวัยเจริญพันธุ์ไม่ควรสัมผัสถูกสารเป็นเวลานาน

## 11) ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

ข้อมูลสำหรับสารประกอบตะกั่วโดยทั่วไป: ผลกระทบทางชีวภาพ: ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ในน้ำ (คำนวณเทียบกับตะกั่วอิสระ) ปลา: ตายตั้งแต่ 1.4 มก./ลิตรขึ้นไป *S. gairdnerii* LC50: 0.14 มก./ลิตร/96 ชั่วโมง *L. idus* LC50: 546 มก./ลิตร ปลาทดสอบ LC50: 236 มก./ลิตร แบคทีเรีย: *Ps. putida* เป็นพิษตั้งแต่ 1.8 มก./ลิตร ขึ้นไป สาหร่าย: *Sc. quadricauda* เป็นพิษตั้งแต่ 3.7 มก./ลิตร ขึ้นไป *M. aeruginosa* 0.45 มก./ลิตร โปรโตซัว: *E. sulcatum* เป็นพิษตั้งแต่ 0.02 มก./ลิตร ขึ้นไป *U. parduczi*

เป็นพิษตั้งแต่ 0.07 มก./ลิตร สัตว์ขาปล้อง: D. magna LC50: 2.5 มก./ลิตร เป็นอันตรายต่อน้ำดื่ม

ข้อมูลอื่นๆเกี่ยวกับระบบนิเวศน์: ไม่ก่อให้เกิดผลต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

#### 3.4.1.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว

สุรพัชร์ พันพานิชย์กุล (2517) แบตเตอรี่ตะกั่ว (Lead storage battery) เป็นเซลล์สะสมพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญ ใช้ทั่วไปในรถยนต์ เรียกทั่วไปว่าแบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่ทั่วไปจ่ายไฟ 6 โวลต์ หรือ 12 โวลต์ ขึ้นกับจำนวนเซลล์ย่อยที่ใช้เป็นองค์ประกอบ โดยภายในแบตเตอรี่มีเซลล์ย่อยหลายเซลล์ต่อเข้าด้วยกันเป็นชุด

แต่ละเซลล์ย่อยมีแผ่นตะกั่วเป็นอานอด และมีแผ่นตะกั่วออกไซด์ ( $PbO_2$ ) เป็นคาโทด ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จุ่มอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เมื่อแบตเตอรี่มีประจุไฟเต็ม) แต่ละเซลล์ย่อยให้ไฟ 2 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ จะมีเซลล์ย่อย 6 เซลล์ต่อกันเป็น 1 ชุด

#### 3.4.1.2 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์

ไสว โฉจนะศุภฤกษ์ (2539) แบตเตอรี่ หมายถึงแหล่งที่สะสมพลังงานในรูปเคมีแล้วจ่ายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบตเตอรี่รถยนต์มีส่วนประกอบดังนี้

- 1) เปลือก (Case) เปลือกแบตเตอรี่รถยนต์ มี 2 ประเภท คือ เปลือกพลาสติกชนิด Polypropylene และเปลือกยางแข็ง หรือยางดำ
- 2) แผ่นธาตุ (Electrodes) มีแผ่นธาตุบวก (Positive electrodes) และแผ่นธาตุลบ (Negative electrodes) มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โครงทำด้วยอัลลอยด์โลหะ ตะกั่วผสมพลวง และเพส (Paste) ซึ่งเป็นส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ กรดซัลฟิวริก น้ำ และสารปรุงแต่งของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แผ่นธาตุที่จุ่มในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นกรดซัลฟิวริก เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุ จะเปลี่ยนเป็นตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ )

- 3) แผ่นกั้น (Separator) เพื่อที่จะกั้นแผ่นธาตุบวก และแผ่นธาตุลบออกจากกัน แผ่นกั้นจะมีความพรุน เพื่อให้น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ไหลผ่านได้ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้น ได้แก่ PVC cellulose กระดาษใยแก้ว และ Micro porous polyethylene
- 4) น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ เป็นกรดซัลฟิวริกเข้มข้นประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังจากการฟอร์มมิ่ง (Forming) และใช้งาน กรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับตะกั่วออกไซด์เป็นตะกั่วซัลเฟต ความเข้มข้นของกรดจะลดลงเหลือประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์

ในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุ (Material Safety Data Sheet, MSDS) ของผลิตภัณฑ์ GS battery ระบุถึงส่วนประกอบในแบตเตอรี่ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สารต่างๆที่เป็นส่วนประกอบในแบตเตอรี่ (BOC Edwards, 2001)

สารประกอบ	ปริมาณ (% โดยนน.)
ตะกั่ว (Pb)	รวมทุกรูป 70
PbO <sub>2</sub>	
PbSO <sub>4</sub>	
กรดซัลฟิวริก	20

#### 3.4.2 เบนซีน (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

หน่วยข้อเสนอเทศวัตถุอันตรายและความปลอดภัย (2544) เบนซีน เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 78.11 มีจุดวาบไฟเท่ากับ -11 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 5.5 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดเท่ากับ 80.1 องศาเซลเซียส มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.8786 มีแรงดันไอ 76 มม.ปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ด้วย acetone ethanol และ diethyl ether ใช้เป็นสารทำละลายสำหรับไขมัน หมึก สี และพลาสติก ใช้เป็นสารเพื่อผลิตในอุตสาหกรรมเคมี ได้แก่ เรซิน พลาสติก ไนลอน ใช้ผลิตระเบิด ได้มาจากการกลั่นน้ำมัน เมื่อถูกผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง เบนซีนสามารถถูกบำบัดได้หลายวิธีได้แก่ วิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

## 1) องค์ประกอบและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

เลขรหัสซีเอสเอส: 71-43-2

เลขดัชนีซีซี: 601-020-00-8

มวลต่อโมล: 78.11

เลขไอเอ็นไอซีเอส: 200-753-7

สูตรโมเลกุล:  $C_6H_6$ 

## 2) ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย

อาจทำให้เกิดมะเร็ง ไวไฟสูง เป็นพิษ: อันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพเมื่อได้รับสารนี้เป็นเวลานานโดยการหายใจ การสัมผัสผิวหนัง และการกลืน

## 3) มาตรการปฐมพยาบาล

เมื่อสูดดม: ให้ออกสูดอากาศบริสุทธิ์ ถ้าจำเป็นให้ใช้การช่วยหายใจแบบปากต่อปาก หรือใช้อุปกรณ์ช่วยหายใจ

เมื่อถูกผิวหนัง: ชะล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก ถอดเสื้อผ้าที่เปื้อนออกทันที

เมื่อเข้าตา: ชะล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก โดยลืมตากว้างในน้ำ นำส่งจักษุแพทย์

เมื่อกลืนกิน: ไม่ควรทำให้อาเจียน ระวังการสำลัก

ยาระบาย: น้ำมันพาราฟิน (3 มล./กก.) โซเดียมซัลเฟต (1 ช้อนโต๊ะในน้ำ 0.25 ลิตร)

นำส่งแพทย์ ล้างท้อง: เฉพาะในกรณีฉุกเฉินและทำด้วยความระมัดระวังอย่างมาก ช่วยให้หายใจสะดวก

## 4) มาตรการการฉุกเฉิน

สารดับไฟที่เหมาะสม: ผงเคมีดับเพลิง และโฟมดับเพลิง

เครื่องดับเพลิง: ผงเคมีดับเพลิง และคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อมูลอันตรายอื่น: ลูกไฟติดไฟได้ ไอระเหยหนักรกว่าอากาศ เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศก่อให้เกิดของผสมที่ระเบิดได้ เก็บห่างจากแหล่งกำเนิดประกายไฟ ป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะก่อให้เกิดแก๊สหรือไอระเหยที่เป็นอันตราย

ข้อมูลอื่น: ห้ามอยู่บริเวณที่อันตรายโดยปราศจากชุดป้องกันสารเคมีที่เหมาะสม และเครื่องช่วยหายใจ และป้องกันไม่ให้น้ำที่ใช้ดับเพลิงแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำบนดินหรือใต้ดิน

### 5) มาตรการเมื่อมีการปล่อยสารโดยอุบัติเหตุ

ข้อควรระวังส่วนบุคคล: ห้ามสูดดมไอระเหย และละอองลอย ไม่ควรสัมผัสกับสาร

วิธีทำความสะอาด: ชั้บด้วยวัสดุดูดซับของเหลว แล้วส่งไปกำจัด ทำความสะอาดบริเวณที่ปนเปื้อน

มาตรการปกป้องสิ่งแวดล้อม: ป้องกันไม่ให้ไหลลงสู่ระบบสุขาภิบาล ดิน หรือสิ่งแวดล้อม เพราะอาจก่อให้เกิดการระเบิด

### 6) การเก็บรักษา

การจัดการ: ป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต

การเก็บ: ปิดให้แน่น เก็บห่างจากแสง บริเวณที่มีการถ่ายเทอากาศได้ดี เก็บห่างจากแหล่งกำเนิดประกายไฟและความร้อน ณ. อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส เข้าได้เฉพาะผู้ที่ได้รับอนุญาต

### 7) การป้องกันส่วนบุคคล

อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล:

การป้องกันระบบหายใจ: จำเป็น เมื่อมีไอระเหย/ละออง ตัวกรองชนิด A (ตามมาตรฐาน DIN 3181) สำหรับไอระเหยของสารอินทรีย์ เครื่องปิดปาก และจมูกเพื่อกรองอากาศ

การป้องกันตา: จำเป็น

การป้องกันมือ: จำเป็น

ควรสวมใส่ชุดป้องกันที่เหมาะสมกับบริเวณทำงาน โดยพิจารณาจากความเข้มข้นและปริมาณสารอันตรายที่ใช้ ควรมีการตรวจสอบความทนทานต่อสารเคมีของชุดป้องกันโดยตัวแทนจำหน่าย

อุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ: ชุดป้องกันที่ทนไฟ

ข้อควรปฏิบัติ เปลี่ยนเสื้อผ้าที่เปื้อนสารเคมีทันที ทาครีมป้องกันผิวหนัง ล้างมือและหน้า หลังจากการใช้สาร ห้ามกินอาหารและดื่มในบริเวณทำงาน



## 8) สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ลักษณะ: ของเหลว	สี: ไม่มีสี
กลิ่น: เฉพาะตัว	ค่าพีเอช: ไม่มีข้อมูล
จุดหลอมเหลว: 5 องศาเซลเซียส	จุดเดือด: 80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิติดไฟ: 555 องศาเซลเซียส	จุดวาบไฟ: -11 องศาเซลเซียส
ความดันไอ: (20องศาเซลเซียส) 100 มิลลิบาร์	
ความหนาแน่น: (20องศาเซลเซียส) 0.88 ก./ซม. <sup>3</sup>	
ความสามารถในการละลายน้ำ: (20องศาเซลเซียส) 1.8 ก./ลิตร	

## 9) ความเสถียรและความไวต่อปฏิกิริยา

สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง: การให้ความร้อน

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง: กรดแร่ กำมะถัน ฮาโลเจน สารประกอบของฮาโลเจน-ฮาโลเจน ไดออกไซด์ (เช่น กรดไนตริก ไอโซน สารประกอบเปอร์ออกซี สารประกอบจำพวกออกซีฮาโลเจน และโครเมียม (VI) ออกไซด์ ) และฮาโลเจนเตตไฮโดรคาร์บอน (ที่มีโลหะเบาเป็นส่วนประกอบ)

ข้อมูลเพิ่มเติม: ใอน้ำ-ระเหย อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง และเป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับ ยาง และพลาสติกชนิดต่างๆ สารเคมีในสภาพที่เป็นไอระเหยหรือแก๊ส เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดการระเบิดได้

## 10) ข้อมูลทางพิษวิทยา

ข้อมูลเพิ่มเติมทางพิษวิทยา: เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

เมื่อสัมผัสผิวหนัง: ระคายเคือง ระงับอันตรายจากการซึมผ่านผิวหนัง ผิวหนังสูญเสียไขมัน อาจเกิดการอักเสบตามมา

เมื่อเข้าตา: ระคายเคืองต่อเยื่อเมือก

เมื่อกลิ้งกิน: คลื่นไส้อาเจียน อาจทำให้สำลักเนื่องจากการอาเจียน

เมื่อร่างกายดูดซึม: ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ หัวใจเต้นผิดปกติ ความดันโลหิตลดลง หายใจลำบาก กระสับกระส่าย ชัก ง่วงซึม หลอดเลือดเลี้ยงหัวใจตีบตัน ระบบหายใจล้มเหลว และถึงแก่ความตาย

## 11) ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

## ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

ผลกระทบทางชีวภาพ: เป็นพิษต่อ สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ เป็นพิษต่อปลาและแพลงก์ตอน การเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของกลืนโปรตีนจากปลา ทำให้แหล่งน้ำเดิมเป็นพิษ ถ้าปล่อยลงสู่ดินหรือน้ำ อาจเกิดการผสมกับอากาศเหนือผิวน้ำ ให้ของผสมที่เป็นพิษ และระเบิดได้ อาจก่อให้เกิดผลเสียระยะยาวต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ

ความเป็นพิษต่อปลา: *L.idus* LC50: 33 มก./ลิตร *C.auratus* LC50: 46 มก./ลิตร/ 24 ชั่วโมง

ความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย: *Ps.pudita* EC0: 92 มก./ลิตร

พิษต่อไรน้ำ: *Daphnia magna* LC50: 1130 มก./ลิตร

ความเป็นพิษต่อสาหร่าย: *Sc.quadricauda* EC0: > 1400 มก./ลิตร aquatic organisms LC50: 10 มก./ลิตร/ 96 ชั่วโมง

ข้อมูลอื่นๆเกี่ยวกับระบบนิเวศน์: ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

ปริมาณเบนซินในน้ำมันเครื่องเก่าแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่เป็นสารอันตรายบางชนิดในน้ำมันเครื่องเก่าในปี ค.ศ. 1983 (ดัดแปลงจาก Mueller Associates, Inc., 1989)

สารประกอบ	จำนวน ตัวอย่าง	ตัวอย่างที่ พบสารปนเปื้อน		ความเข้มข้น เจลลี่ (ppm)	ความเข้มข้น มัตยฐาน (ppm)	ความเข้มข้น เพอร์เซน ไทล์ที่ 75	ความเข้มข้น เพอร์เซน ไทล์ที่ 90	ช่วงความเข้มข้น	
		จำนวน	%					ต่ำสุด	สูงสุด
ตะกั่ว	835	760	91	664.50	240	740	1,200	0	21,700
สังกะสี	810	799	98	580.28	480	872	1,130	มากกว่า 0.5	8,610
เบนซิน	236	118	50	961.20	20	110	300	มากกว่า 1	55,000
โทลูอีน	242	198	81	2,200.48	380	1,400	4,500	มากกว่า 1	55,000
ไซลีน	235	194	82	3,385.54	550	1,400	3,200	มากกว่า 1	139,000

### 3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

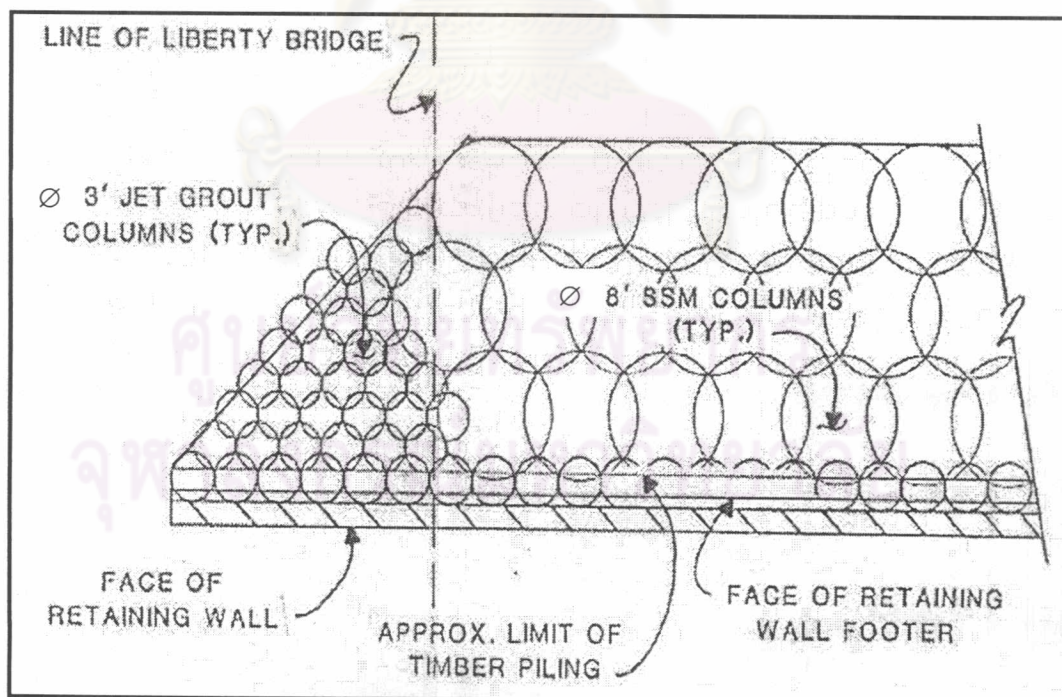
Walker (1992) ใช้เจ็ทเกร้าดิ่ง ในการทำการทำเสถียรและการทำงานก่อนแข็ง และปรับปรุงดินที่อยู่ริมกำแพงกันดิน บริเวณ Liberty Bridge ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อจัดการกับสาร Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) ที่ปนเปื้อนในดิน และเพิ่มกำลังให้ดินเพื่อป้องกันไม่ให้อำนาจกันดินเสียหาย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำเจ็ทเกร้าดิ่งมีดังนี้

ความดันน้ำปูน	5,000 ปอนด์ต่อนิ้ว <sup>2</sup>
อัตราการยก	1 ฟุตต่อนาที
อัตราการไหลน้ำปูน	40 - 45 แกลลอนต่อนาที
อัตราการหมุน	1 รอบต่อนาที

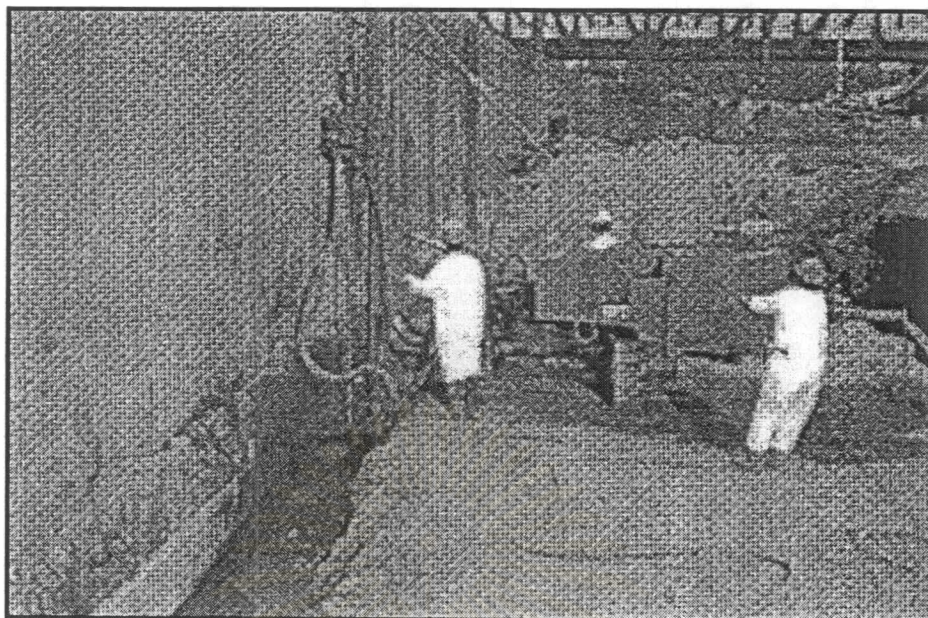
โดยผังแนวการทำเจ็ทเกร้าดิ่ง และการทำงานในสนาม แสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5

ปริมาณความเข้มข้นของ TPH อยู่ในช่วง 50 -10,000 ppm ในช่วงความลึกตั้งแต่ที่ระดับผิวดินจนถึงที่ความลึก 25 ฟุต (7.6 เมตร) ซึ่งเป็นชั้นน้ำใต้ดิน

ผลการทดลองปรากฏว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 400-700 ปอนด์ต่อนิ้ว<sup>2</sup> (28 - 49 กก./ซม.<sup>2</sup>)



รูปที่ 3.4 ผังแนวการทำเจ็ทเกร้าดิ่ง (Walker, 1992)



รูปที่ 3.5 การทำเจ็ดเกร้าดิ่งในพื้นที่ (Walker, 1992)

Allan และ Kukacka (1995) ใช้ Blast Furnace Slag ผสมกับปูนซีเมนต์ในการทำเสถียรดินที่มีการปนเปื้อนของ โครเมียม ทั้งในรูป Cr (III) และ Cr (VI) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 200 – 6,000 ppm โดยปริมาณ Slag อัตราส่วนของน้ำปูนต่อดิน และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ จะทำการปรับเปลี่ยนหลายๆ ค่า เพื่อให้ค่าต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐาน

โดยผลการทดลองได้ปริมาณ Cr (III) และ Cr (VI) ในน้ำชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้ โดยการเพิ่มปริมาณ Slag ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 6 – 36 เมกกะปาสคาล และการซึมน้ำอยู่ที่  $10^{-11}$  ถึง  $10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที

Arocha McCoy และ Jackman (1996) ได้ศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของ สารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ที่ปนเปื้อนในดิน ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ระเหย จะติดอยู่กับดินได้ดีเนื่องจากไม่ละลายน้ำ ด้วยการทำให้เสถียรและการทำก้อนแข็ง โดยศึกษาจากการที่สารประกอบอินทรีย์ระเหย โดนดูดซับและถูกล้อมจับโดยสารซิลิกา สารที่ใช้ทำการดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ แกลบ และยางรถยนต์บด แล้วทำการทดสอบการชะละลายของโหลอื่น ทั้งในส่วนที่เป็นน้ำชะ และส่วนที่ระเหยออกมา

ผลการทดลองปรากฏว่า การใช้ยางรถยนต์บดเป็นสารที่ใช้ทำการดูดซับนั้นได้ผลดีมาก เมื่อนำมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง กับโหลอื่นที่ปนเปื้อนในดิน

Day Zarlinski และ Jacobson (1997) ใช้เจ็ดเกวี่ริง ในการทำเสถียรและการทำก้อน แข็งกับดินในพื้นที่อุตสาหกรรมที่นิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 4,100 ม.<sup>3</sup> ที่ถูกปนเปื้อน ไปด้วย แคดเมียม

โดยมีปริมาณ แคดเมียม อยู่ในดินประมาณ 130 มก./กก. และการทำ TCLP ได้ความ เข้มข้นของ แคดเมียม เท่ากับ 2.2 มก./ล. ซึ่งเกินค่ามาตรฐาน

ผลการทดลองปรากฏว่า ความเข้มข้นของ แคดเมียม ในน้ำชะมีค่าต่ำกว่า 1.0 มก./ล.ซึ่ง ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน และค่า UCS ของตัวอย่างมีค่ามากกว่า 17 กก./ซม.<sup>2</sup>

Nedwed และ Clifford (1997) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ โรงงานที่ดำเนินการนำแบตเตอรี่ เก่ากลับมาใช้ใหม่ (lead battery recycling sites LBRSS) ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีการ รายงานข้อมูลต่างๆดังนี้

- ปริมาณของตะกั่วในดินตามกฎหมาย
- ขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่

และพบว่าที่โรงงานถลุงตะกั่วจะพบตะกั่วที่ระยะความลึกไม่เกิน 3.00 เมตร จากผิวดิน เนื่องจากตะกั่วจะถูกดูดซับโดยดินเป็นอย่างดี แต่ตะกั่วจะสามารถเคลื่อนที่ออกจากดินได้อีกหาก เพียงเติมกรดลงไปเพียงเล็กน้อย ฉะนั้นโดยทั่วไปจะพบการปนเปื้อนของตะกั่วในดินและในฝุ่น

ซึ่งข้อมูลต่างๆแสดงอยู่ในตารางที่ 3.8 และ 3.9

ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของปริมาณตะกั่วในดินสำหรับดินในเขตที่พักอาศัย (Nedwed และ Clifford, 1997)

สถานที่	หน่วย มก./กก.
สหรัฐอเมริกา	500 – 1,000
แคลิฟอร์เนีย	1,000
มินนิโซต้า	500
USEPA	400
แคนาดา	375
เนเธอร์แลนด์	150
อังกฤษ	500

ตารางที่ 3.9 รูปของตะกั่วที่พบในดิน (Nedwed และ Clifford, 1997)

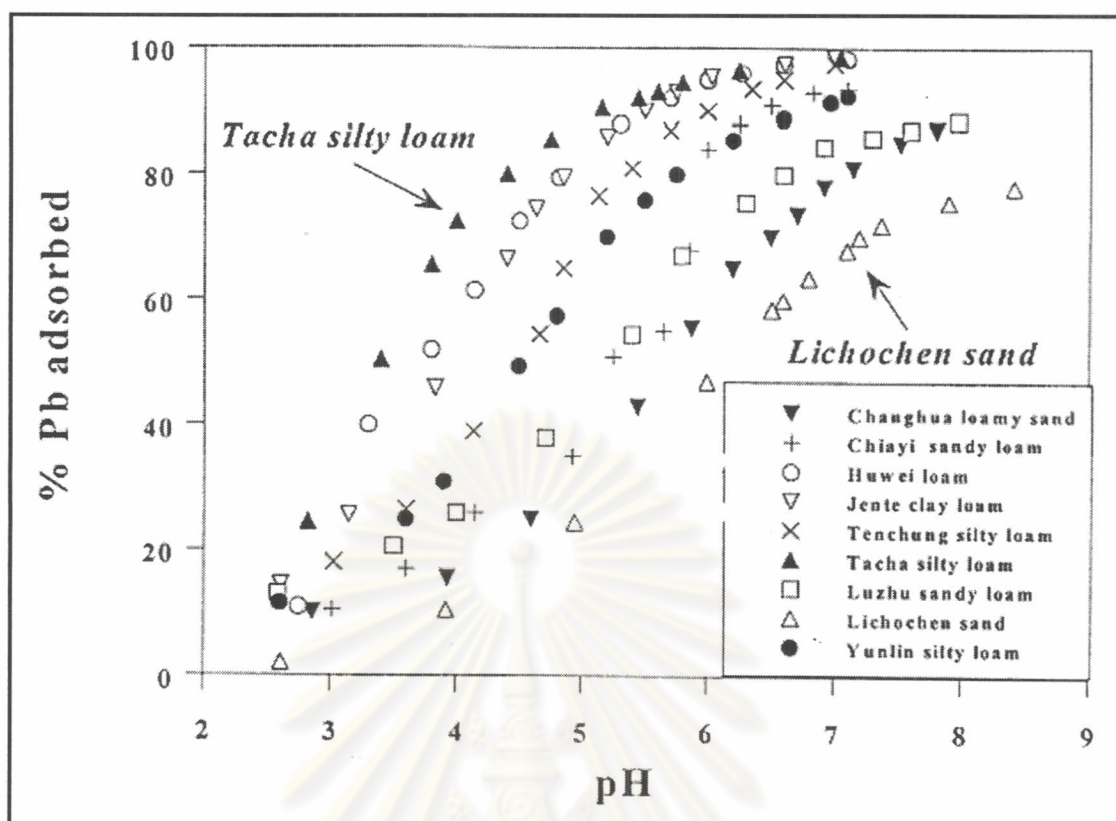
สถานที่	รูปของตะกั่ว
United Scrap	PbSO <sub>4</sub> PbO <sub>x</sub> และ Pb <sup>0</sup>
Arcanum	PbSO <sub>4</sub> และ Pb <sup>0</sup>
C&R Battery	PbSO <sub>4</sub> PbCO <sub>3</sub> และ Pb <sup>0</sup>
Lead Product Company	PbSO <sub>4</sub> PbCO <sub>3</sub> และ Pb <sup>0</sup>
Houston Scrap Company	PbSO <sub>4</sub>
Houston Lead Company	PbSO <sub>4</sub> PbCO <sub>3</sub> และ Pb <sup>0</sup>

Suen และคณะ (1998) ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะในดิน โดยใช้ตัวอย่างดิน 15 ชนิด ในประเทศไต้หวัน และตะกั่วในการวิจัย ซึ่งค่าพีเอชเป็นปัจจัยหลักเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับโลหะในดิน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ซึ่งผลการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติของดินในประเทศไต้หวัน (Suen และคณะ, 1998)

ชื่อดิน	พีเอช	ปริมาณดินเหนียว (%)	ออกไซด์ในดิน (%)			สารอินทรีย์ในดิน (%)
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	
Beichatianshan silty loam	3.9	44.5	1.029	0.496	0.046	8.3
Changhua loamy sand	3.5	16.1	0.121	0.079	0.017	0.8
Chiayi sandy loam	6.8	9.7	0.638	0.443	0.001	1.1
Guanyin sandy loam	5.6	9.5	0.784	1.374	0.021	2.3
Huwei loam	7.4	20.2	0.810	0.638	0.060	5.4
Jente clay loam	4.8	28.0	0.584	0.748	0.055	5.1
Kaohsiung silty loam	7.1	20.8	0.505	0.410	0.038	4.0
Keelung silty clay	6.6	27.1	0.860	0.721	0.095	5.5
Lichoche sand	4.2	6.5	0.746	0.248	0.010	0.4
Luzhu sandy loam	4.9	7.8	1.095	0.161	0.001	1.8
Tacha silty loam	5.2	13.6	0.778	1.154	0.042	11.2
Taichung silty loam	6.6	6.4	0.417	0.144	0.003	1.3
Tenchung silty loam	6.7	24.3	0.917	0.620	0.022	3.0
Yuenlin silty clay loam	6.4	34.2	1.442	1.271	0.024	6.7
Yunlin silty loam	6.9	9.5	0.243	0.133	0.009	1.6

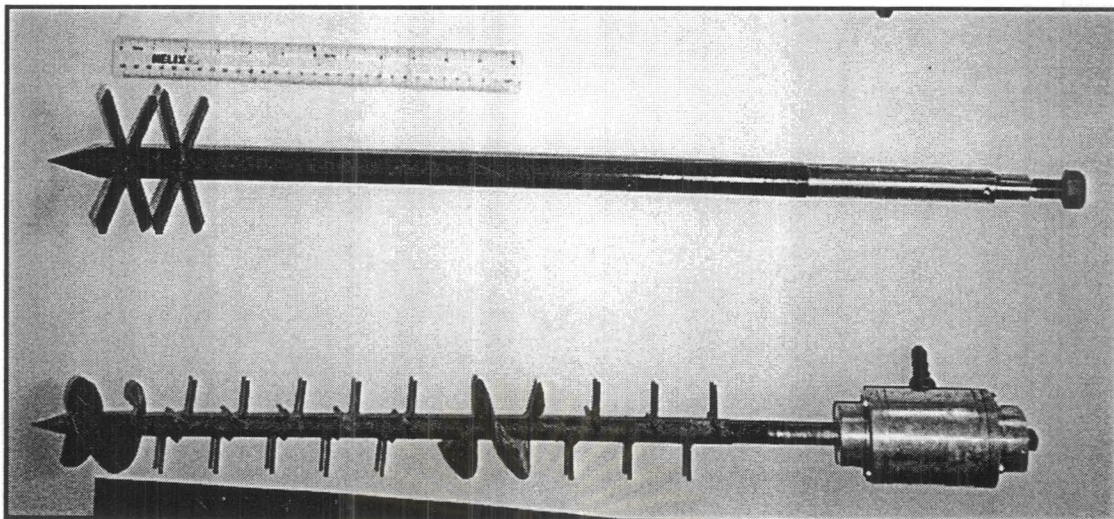


รูปที่ 3.6 การดูดซับของตะกั่วในดิน 9 ชนิด โดยมีความเข้มข้นของตะกั่วตั้งต้น  $1 \times 10^{-4}$  M. อัตราส่วนดินต่อน้ำ = 1 g./ 100 ml. และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Suen และคณะ, 1998)

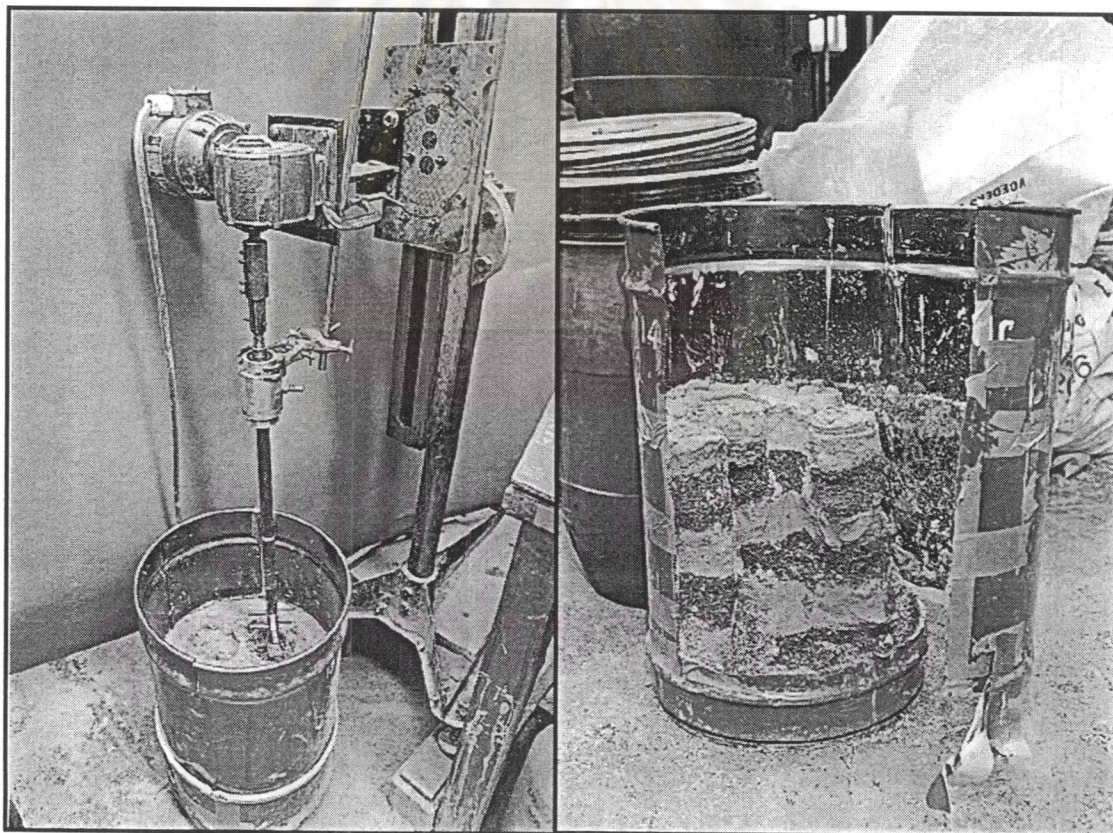
Tabba และ Ayotamuno (2000) ศึกษาเกี่ยวกับการผสมทรายที่แบ่งเป็นชั้นๆ ที่มีการปนเปื้อน โดยเป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการบำบัดแบบในพื้นที่ต่อไป

ในการทดลอง ให้ความปนเปื้อนในรูปของสารละลายไซเดียมคลอไรด์ หรือเกลือแกงเพราะเกลือแกงพบได้ในดินธรรมชาติและผสมของเสียลงไปเช่น น้ำมันเก่า และยาฆ่าแมลง โดยมีความเข้มข้นถึง 8,000 มก./ล.

โดยในการทดลองเลือกใช้หัวเจาะ 2 แบบดังรูปที่ 3.7 โดยที่หัวเจาะแบบที่ 2 ทำการผสมได้ดีกว่า เนื่องจากผสมได้สม่ำเสมอ และมีการสรุปผลการทดลองในตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.7 รูปหัวเจาะ 2 แบบ โดยแบบที่ 1 อยู่ด้านบน และแบบที่ 2 อยู่ด้านล่าง (Tabba และ Ayotamuno, 2000)



รูปที่ 3.8 การผสมทรายในห้องปฏิบัติการ (Tabba และ Ayotamuno, 2000)



ตารางที่ 3.11 การสรุปผลการทดลอง (Tabba และ Ayotamuno, 2000)

ตัวแปร	กำลังรับแรงอัด	ความสามารถในการชะละลาย	พีเอชของน้ำชะละลาย
เพิ่มความเข้มข้นของน้ำปูน	เพิ่มขึ้น	การดูดซับเชิงเส้น	เพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับ Cement/Bentonite
ชนิดของน้ำปูน	Cement/Fly Ash ให้ค่ามากกว่า Cement/Bentonite	ไม่มีความแตกต่าง	ค่าพีเอชมาก สำหรับ Cement/Bentonite
จำนวนครั้งในการผสม	ไม่มีผล	ไม่มีผลสำหรับดินที่มีเนื้อเดียว แต่ในดินที่เป็นชั้นควรผสม 2 ครั้งเพื่อให้ได้ผลเหมือนกับดินที่มีเนื้อเดียว	เพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับการผสม 2 ครั้ง
เปรียบเทียบการผสม (ผสมด้วยมือกับผสมด้วยเครื่อง)	ผสมด้วยมือให้ค่าสูงกว่า	ผสมด้วยเครื่องจะให้ผลดีกว่า	ไม่มีความแตกต่าง
การแบ่งเป็นชั้นของตัวอย่าง	ให้ค่าต่ำลง	ขึ้นอยู่กับความเป็นเนื้อเดียวกันของสารปนเปื้อน	ค่าพีเอชมาก
เปรียบเทียบระยะเวลาบ่ม (7 และ 28 วัน)	เหมือนกับคอนกรีต	ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมีค่าต่ำกว่าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันสำหรับ Cement/Bentonite
Degree of saturation	ไม่มีผลกับ Coarse Sand แต่จะลดลงสำหรับ Fine Medium Sand	เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า Moisture Content	ไม่มีผล

Cavalca และคณะ (2000) ศึกษากลุ่มแบคทีเรียที่สามารถเจริญในสารละลาย naphtha เพื่อนำมาใช้บำบัดสารเบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน (Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylene, BTEX) ที่ปนเปื้อนดินชั้นล่างใต้โรงงานที่ตั้งอยู่ในเมืองมิลาน ประเทศอิตาลี ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 18 เมตรจากผิวดินมาทำการวิเคราะห์

Yukselen และ Alpaslan (2001) ศึกษาการชะละลายของโลหะที่ปนเปื้อนในดินจากกิจกรรมทางด้านเหมืองแร่ โดยทำการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง กับดินที่มีการปนเปื้อนของทองแดง และเหล็ก ในบริเวณโรงถลุงแร่เก่าทางตอนเหนือของประเทศ ไชปรัส

โดยทำการปรับค่าของส่วนผสมระหว่าง ปูนขาว ปูนซีเมนต์ และดินที่ปนเปื้อน และได้ค่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 1/15 ของสารเคมีต่อดินที่ปนเปื้อน โดยถ้าใช้ปูนขาว สามารถลดความสามารถในการละลายน้ำของ ทองแดง และเหล็ก ได้ถึง 94 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

และถ้าใช้ปูนซีเมนต์ สามารถลดความสามารถในการละลายน้ำของ ทองแดง และเหล็ก ได้ถึง 48 และ 71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในช่วงพีเอช ที่เป็นกรด

Shih และ Lin (2003) ทำการทำเสถียร และการทำก้อนแข็ง กับดินที่ถูกปนเปื้อนไปด้วย อาร์เซนิก ที่ถูกทิ้งจากกระบวนการถลุงทองแดง ความเข้มข้น 2 – 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพีเอชต่ำมาก ประมาณ 1.8 – 3.6 โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ As(III) หรือ As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และมีปริมาณถึง 700 ตันในพื้นที่ที่ทำการศึกษา และมีอนุภาคอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มม.

การใช้ปูนซีเมนต์ในการทำเสถียรให้ได้ปริมาณอาร์เซนิก ในน้ำชะต่ำกว่าค่ามาตรฐานนั้น จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงมาก (ประมาณ 6 เท่าของ ซีเมนต์ ต่อ ของเสี้ยว) เนื่องจากของเสี้ยวมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสรวมมาก



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย