

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตะกั่ว

ปัจจุบันมีการนำเอาตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างมากมาย ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบจำนวนมาก อุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ปลดปล่อยตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม และมีผลกระทบต่อคุณภาพของสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติอย่างรุนแรง ตะกั่วเป็นธาตุที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ครั้งโบราณ เพราะมีคุณสมบัติเป็นโลหะอ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และทนต่อการผุกร่อนได้ดี มีการนำตะกั่วมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ อาทิ การผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมเคมี เช่นผลิตสีและหมึกพิมพ์

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้สองทาง ทางตรงโดยการที่มนุษย์หรือสัตว์สูดหายใจหรือกินอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้ารบกวนหรือทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายสู่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตในความเข้มข้นที่สูงที่สุด และรองลงมาคือตับ หลังจากนั้นชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะแพร่กระจายอีกครั้ง โดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายอยู่ในผมและฟัน ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายระบบคือ

- ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจาง โดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ ฮีม (Heme) หลายชนิด ทำให้ระดับฮีโมโกลบิน (Haemoglobin) ลดลง

- ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย เป็นอัมพาต ข้อมือข้อเท้าตึง วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัว นอนไม่หลับ หงุดหงิด ตกใจง่าย มึนงง และอาการชัก

- ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟต ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

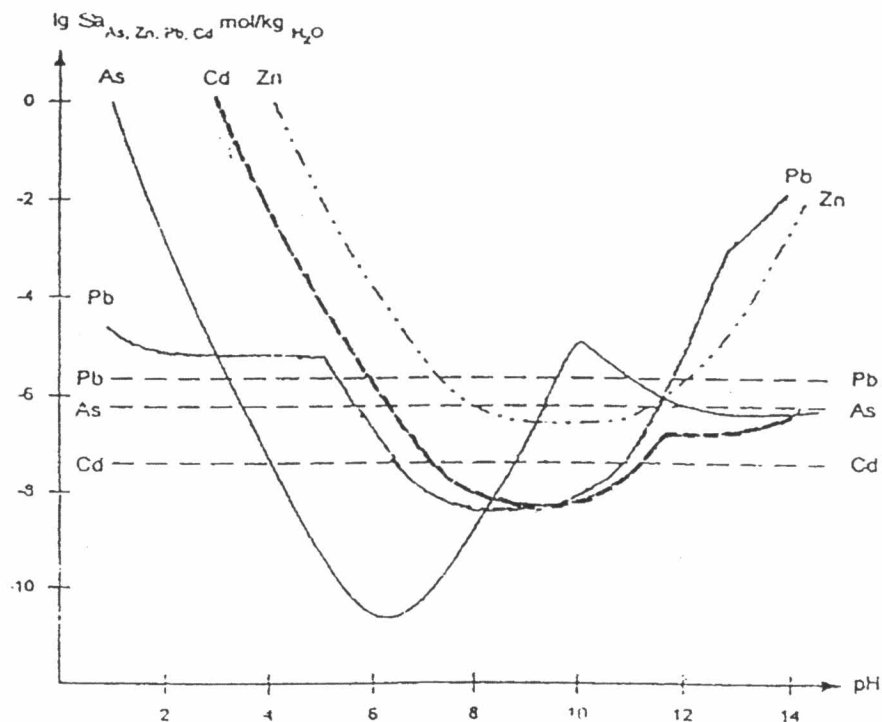
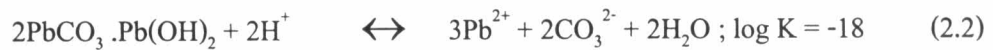
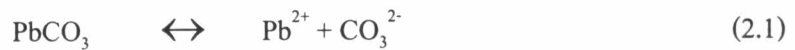
นอกจากนี้แล้วตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจและเส้นเลือด และเป็นสารชักนำทำให้เกิดโรคมะเร็งอีกด้วย

### 2.1.1 กลไกในการละลายน้ำของตะกั่ว

สารตะกั่วที่ปรากฏว่าปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปคาร์บอเนต ( $\text{PbCO}_3$ ) ประกอบกับฟิวดินบริเวณต้นน้ำตามธรรมชาติก็เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนต รวมทั้งกิจกรรมการทำเหมืองแร่ในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการละลายของตะกั่วคาร์บอเนตเป็นหลัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์, 2543)

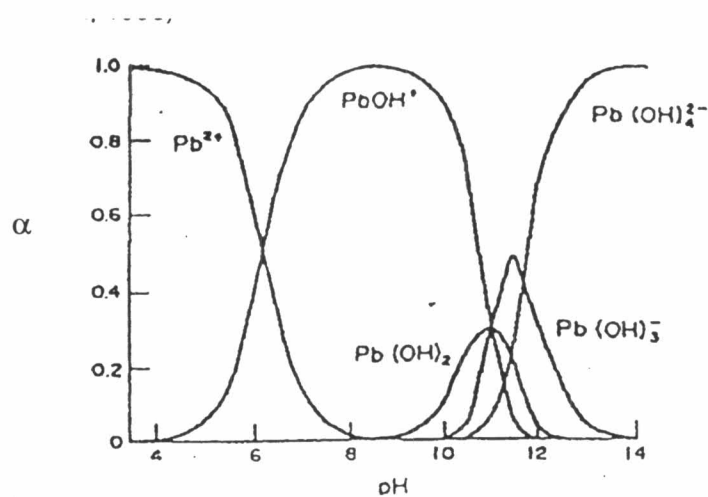
จากรูปที่ 2.1 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่าความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วในธรรมชาติ จะพบว่าความสามารถในการละลายน้ำจะต่ำสุดอยู่ในช่วงพีเอชที่ 7-9 ถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วจะมากขึ้น

ในธรรมชาติจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ตะกั่วคาร์บอเนตเกิดรูปได้หลายรูปที่ละลายน้ำได้ดังสมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งแสดงการแตกตัวและการละลายในสภาพกรดของตะกั่วกลุ่มคาร์บอเนต



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ (Barth, 1985 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์, 2543)

การละลายน้ำของตะกั่วอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) จะได้ค่า  $\log K$  ของ  $\text{Pb(OH)}^+$  เท่ากับ  $-7.9$  สารไฮโดรไลซิสของตะกั่วจะเป็นสารที่พบได้หลายองค์ประกอบ เช่น เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 12 ไม่พบว่ามีตะกอนของ  $\text{Pb(OH)}_2$  เกิดขึ้น แต่จะอยู่ในรูปของสารละลาย จากรูปที่ 2.2 จะแสดงปริมาณตะกั่วไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆที่ระดับความเป็นกรด-ด่างต่างๆกัน โดย  $\text{Pb(OH)}^+$  มีค่า  $\log K_1 = 7.82$ ,  $\text{Pb(OH)}_2$  มีค่า  $\log K_2 = 10.88$ ,  $\text{Pb(OH)}_3^-$  มีค่า  $\log K_3 = 13.94$  และ  $\text{Pb(OH)}_4^{2-}$  มีค่า  $\log K_4 = 16.33$  นอกเหนือจากสารทั้งสี่ตัวที่กล่าวมาแล้วสารละลายจะมี  $\text{Pb(OH)}_4^{4+}$ ,  $\text{Pb}_2(\text{OH})^{3+}$ ,  $\text{Pb(OH)}_4^{2+}$  และ  $\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}$  (Fergusson, 1990)



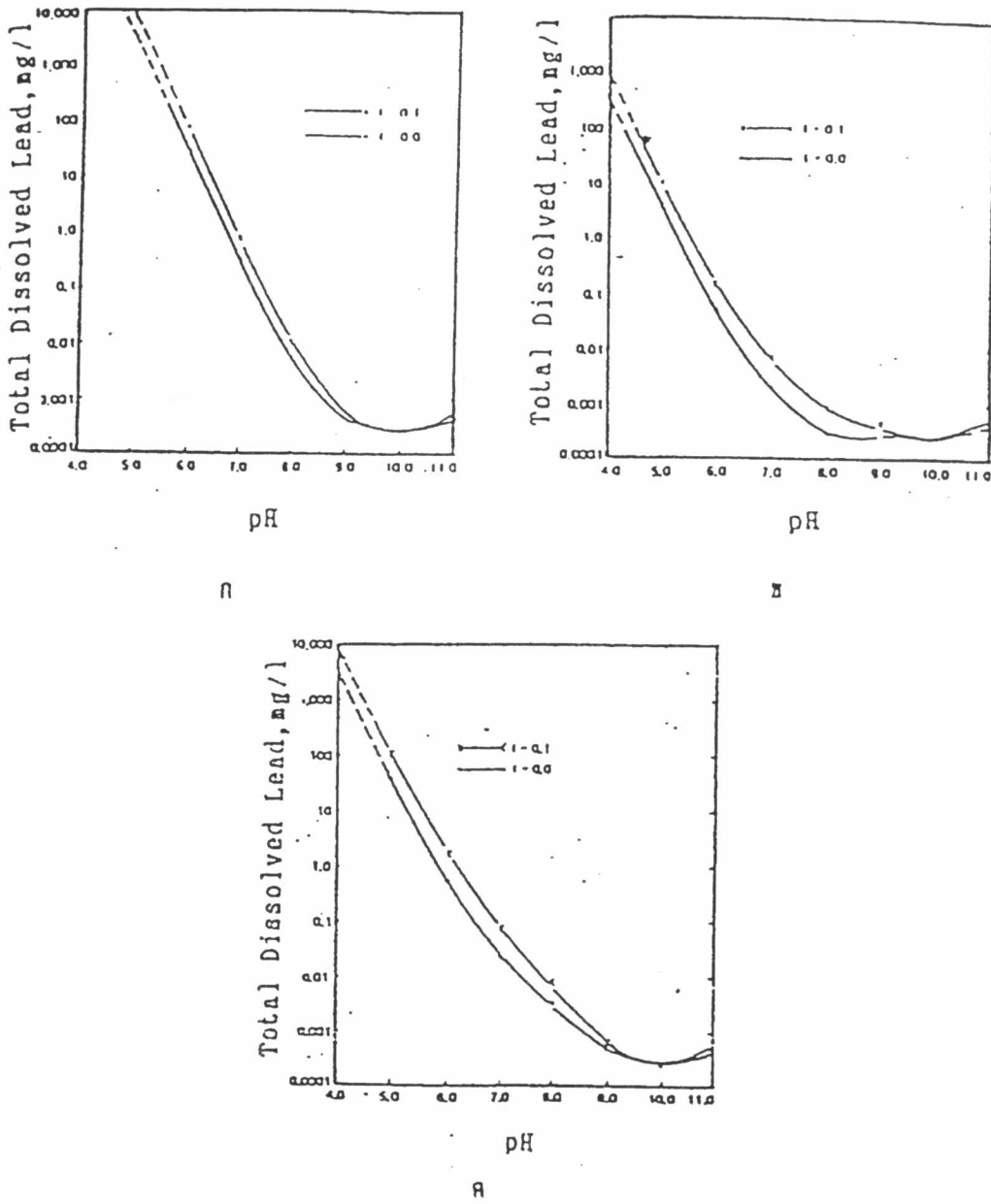
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกไซด์ (Fergusson, 1991)

นอกจากการทำให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกันน้ำแล้ว ในการละลายน้ำของสารประกอบโลหะหนักตะกั่ว ในวิชาHydrometallurgy ก็ได้ใช้สภาพความเป็นกรด-ด่าง หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากเกลือ เช่น กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือแอมมาใช้ในการสกัดเอาสินแร่ออกจากสินแร่ที่มีเกรดต่ำ ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนสภาพความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตะกั่วจะมีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติของกลุ่มทางเคมีของตะกั่วในดินที่เป็นกรด-ด่างภายใต้ Toxic condition นั้น  $\text{Pb(II)}$  จะมี  $\text{Pb}^{2+}$ , Org,  $\text{PbSO}_4$  และ  $\text{PbHCO}_3^+$  เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด และมี  $\text{PbCO}_3$ ,  $\text{PbHCO}_3^+$ ,  $\text{Pb(CO}_3\text{PbHCO}_3)_2^{2-}$  และ  $\text{PbOH}^+$  เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง

### 2.1.2 ตะกั่วในน้ำเสีย

ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองในธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้

ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ทำสี หุ้มสายเคเบิล การทำบัดกรี ทำตัวพิมพ์ ท่อน้ำ ลูกปืน แผ่นตะกั่ว ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว พลาสติก เซรามิก แผ่นเหล็กอบสังกะสีและ โลหะผสมนาาชนิด



รูปที่ 2.3 สมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ความแรงไอออน 0 และ 0.1 โมลาร์ โดยมี  
 ก. CO<sub>2</sub> = 10<sup>-3</sup> โมลาร์  
 ข. CO<sub>2</sub> = 10<sup>-2</sup> โมลาร์  
 ค. CO<sub>2</sub> = 10<sup>-4.87</sup> โมลาร์ (Hem and Duram, 1973 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ สุกรานนทร์รัตน์, 2543)

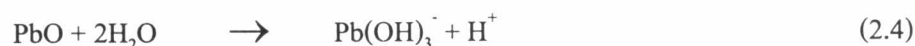
การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติหรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ความสัมพันธ์ของการละลายของตะกั่วในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในความเข้มข้นต่างๆกับพีเอช แสดงในรูป 2.3 นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ คือ ความเป็นด่าง ความกระด้าง และพีเอช ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันกล่าวคือ อัตราส่วนของความเป็นด่าง ซึ่งอยู่ในรูปคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต-ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ความกระด้าง ก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างและพีเอช เช่นเดียวกัน

#### - ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปสารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ ดังสมการ (2.3)



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ (3.4)



#### - ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

#### - ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออนที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนอยู่รูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ (2.5)



ที่พีเอช 8.5-12 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ (2.3) หรืออาจจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนตพื้นฐาน (Basic lead carbonate) ดังสมการ (2.6)



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ตามสมการ (2.4)

## 2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ความยากง่ายในการเดินระบบ และความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

**2.2.1 แบบดั้งเดิม (Conventional treatment) ใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation) ด้วยสารเคมี** เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยการเปลี่ยนรูปโลหะหนักจากโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยกระบวนการทางเคมี การกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกผลึกของแข็งเสียก่อน โลหะบางชนิดมีความเป็นพิษสูงและละลายน้ำได้ดี ต้องทำการรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษแล้วจึงตกตะกอน เช่น  $\text{Cr}^{6+}$  รีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของ  $\text{Cr}^{3+}$  แล้วตกตะกอนเป็น  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ปฏิกิริยารีดิวซ์ และการตกตะกอนจะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับพีเอช ปริมาณและชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสีย ต้องตกตะกอนโลหะหนักทีละชนิด จึงต้องใช้เวลาาน และต้องนำกากตะกอนไปฝังกลบ นอกจากนี้ยังไม่สามารถที่จะลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่มีอยู่ในปริมาณน้อยให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้ และประการสำคัญคือ สูญเสียโลหะที่มีค่า และน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

**2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)** เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งไม่ต้องทำการสร้างตะกอนแข็งในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ แต่เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ที่มีประจุเหมือนกับที่มีอยู่ในสารละลาย กับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด มีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกัน อนุมูลในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด วิธีการนี้มีข้อดีคือ เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบโลหะสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่าย เนื่องจากเรซินสังเคราะห์มีราคาแพงมาก ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำต่ำ หรือมีความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลต่อลิตร เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

**2.2.3 การระเหย (Evaporation)** เป็นการให้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไป ให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้น หรือกลายเป็นกาต้มน้ำร้อน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดความร้อนมาจากเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อน หรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำเสียที่ทำจากบำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่ความเข้มข้นโลหะหนักสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับการแลกเปลี่ยนไอออน แต่จะทำให้ต้นทุนการดำเนินการสูง

**2.2.4 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)** เป็นการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยใช้แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางตัวผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง น้ำเสียที่จะนำไปบำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุมชนที่เกิดด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิของกระบวนการสูง

**2.2.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption)** เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับมลสารไว้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับ น้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ทำให้น้ำทิ้งสะอาด

**2.2.6 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)** เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุมชนโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุมชนโลหะ สารเคมีที่ใช้คือคลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการรีดักชันคือการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุมชนโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่ การบำบัดใช้ไอออน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟิวริกลงไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนไลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้ได้ค่าที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ถ้ามีการใช้ไฮโปคลอไรต์หรือปูนไลม์มากเกินไปค่าพีเอชจะเป็นค่าสูงต้องใช้กรดปรับพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป การวิเคราะห์หาค่าปริมาณโลหะที่ต้องการกำจัดก่อนหรือหลังการบำบัด จะเป็นการช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสมบูรณ์เพียงใด

**2.2.7 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)** วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

**2.2.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)** วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

**2.2.9 การดูดติดผิว (Adsorption)** วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษในสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูดติดผิวที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำโดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้รูพรุนมีขนาดตั้งแต่  $20-20,000 \text{ \AA}^0$  กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม

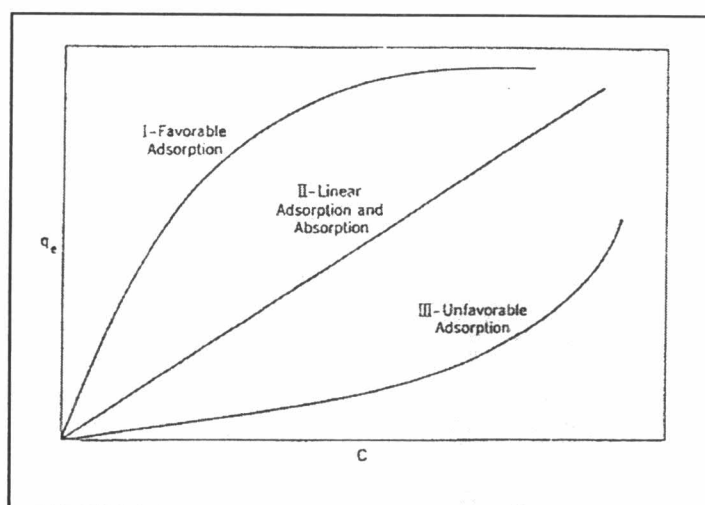
## 2.3 กระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิวถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลาย (ชาลวูวิทซ์ สุภรานนท์ รัชนี, 2543) เป็นที่ทราบกันดีว่า การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพชีวภาพ และ เคมี การดูดติดผิวของของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างสองสถานะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

จากรูปที่ 2.4 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนตั้ง หมายถึง ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็ง และ  $q_c$  บนแกนนอน หมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านข้ามระหว่างหน้า เส้นโค้ง I และ III แสดงถึงการดูดติดผิว โดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งนี้แสดงถึงรูปแบบการดูดติดผิวที่ดี (Favorable) และ



ไม่ดี (Unfavorable) ส่วนเส้นโค้งที่ II แสดงรูปแบบการดูดติดผิวแบบเส้นตรง จะเกิดขึ้นเมื่อสารบนผิวของของแข็ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลือนอยู่ในของเหลว



รูปที่ 2.4 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง (Weber, 1972)

การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf และ Eddy, 1991) การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษซึ่งมีผลกระทบต่อระบบ ชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสตัคจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

### 2.3.1 กลไกการดูดติดผิว และอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

#### 2.3.1.1 กลไกการดูดติดผิว

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interaction) การดูดติดผิวมี 2 วิธีคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดติดผิวทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของพลังงานและ/ หรือแรงดูดติดผิวทางไฟฟ้า (แรงวันเคอร์วาล์ว) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารดูดติดผิวจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่ชั้น โมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารดูดติดผิวหรือตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดติดแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดติดผิวมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดติดผิวระหว่างสารดูดติดผิว ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง โมเลกุลของสารดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากสารดูดติดผิวแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ

### 2.3.1.2 อัตราการเคลื่อนย้าย โมเลกุล

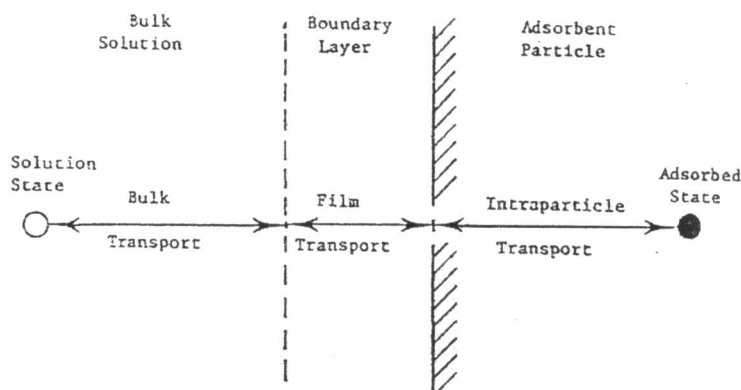
อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะที่สมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน คือ

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Broughton, 1981)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

สารที่มีอำนาจดูดซับโมเลกุลต่างๆ ได้ หรือสารดูดซับมีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอ็คติเวตเต็ด ซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามสารดูดซับประเภทนี้มีข้อเสียคือจับโมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทนี้มีจำกัดมาก

2) แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน อันที่จริงสารดูดซับประเภทนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดซับที่คิดว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่าคือ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามากและสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมักเป็นสารราคาถูกลง ความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดซับอาจมีมากกว่าแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องการฟื้นฟูสภาพ

ปัจจุบันได้มีการผลิตสารดูดติดผิวสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมากมายหลายชนิด เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่มีความสามารถในการดูดติดผิวและความคล่องตัวในการใช้งานน้อยกว่า แอ็คติเวเต็ดคาร์บอน

### 2.3.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวเกิดจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของแข็ง ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง ที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ จะมีค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ หรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้ เทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับนั้นที่อุณหภูมิกงที่ เรียกว่า กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิกงที่ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมมากที่สุด

กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิกงที่นี้ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็ง อัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวทำละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติของตัวถูกละลาย เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลคงแสดงในรูปความสัมพันธ์ของจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของของแข็ง กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิกงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดติดผิวซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ซึ่งรูปแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

#### 1. Langmuir isotherm

มีสมมติฐานที่สำคัญดังนี้คือ

- โมเลกุลดูดติดที่ผิวของของแข็งในตำแหน่งที่แน่นอน
- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่ามีการดูดติดเพียงชั้นเดียว

- พลังงานในการดูดติดมีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดติดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆที่อยู่ใกล้ๆได้

สำหรับการดูดซับของสารละลายไปยังผิวของของแข็งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.7

$$q_e = \left[ \frac{Q^0 b C}{1 + b C} \right] \quad (2.7)$$

โดยที่

$q_e$  = สมรรถนะของสารดูดซับ คัดเป็นจำนวน โมลหรือน้ำหนักของสารถูกดูดซับ ต่อ น้ำหนักของสารดูดซับ

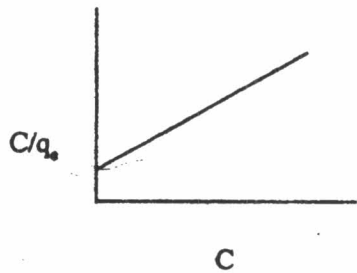
$C$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

$Q^0, b$  = ค่าคงที่

จากสมการที่ 2.7 สามารถนำมาเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{C}{q_e} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{C}{Q^0} \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.8 เมื่อนำ  $C/q_e$  และ  $C$  มาเขียนกราฟจะสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่าง  $C/q_e$  และ  $C$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/q_e$  และ  $C$

จากรูปที่ 2.4 สามารถหาค่า  $Q^0$  ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1/Q^0$  และหาค่า  $b$  ซึ่งเท่ากับ  $1/bQ^0$

## 2. Freundlich isotherm

จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว สมการของ Freundlich เขียนได้ดังสมการที่ 2.9

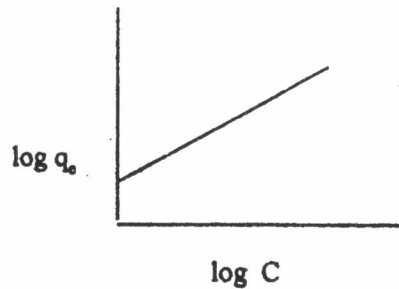
$$q_e = K C^{1/n} \quad (2.9)$$

โดยที่  $K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่

จากสมการที่ 2.9 สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ ดังในสมการที่ 2.10

$$\log q_e = \log K + (1/n) \log C \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_c$  และ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_c$  และ  $\log C$

### 3. BET isotherm

สมการของ Brunauer Emmett, Teller (BET) คล้ายกับสมการของ Langmuir แต่สมการของ Langmuir ถือว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนสมการของ BET แสดงการดูดซับแบบหลายชั้น ดังในสมการที่ 2.11

$$q_c = BCQ^0 / \{(C_s - C)[1 + (B-1)(C/C_s)]\} \quad (2.11)$$

โดยที่

$q_c$  = สมรรถนะของสารดูดซับ คัดเป็นจำนวน โมลหรือน้ำหนักของสารดูดซับต่อ น้ำหนักของสารดูดซับ

$C$  = ความเข้มข้นของสารดูดซับที่ภาวะสมดุล

$C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับในน้ำ

$B$  = ค่าคงที่พลังงานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในการดูดซับ

$Q^0, b$  = ค่าคงที่

สมการที่ 2.5 อาจเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$C / q_c(C_s - C) = 1 / BQ^0 + [(B-1)(C) / BQ^0 C_s] \quad (2.12)$$

## 2.4 การผลิตน้ำตาล (กฤษณ์ จารุทะวีย์, 2545)

### 2.4.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

#### มีขั้นตอนดังนี้

##### 2.4.1.1 การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่าน ไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกย่อยอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

##### 2.4.1.2 การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมากที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เชื้อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

##### 2.4.1.3 การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ขุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำให้น้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก โดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลางและปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวาน กลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่งส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

##### 2.4.1.4 การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (Evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (Syrup) ในหม้อสุดท้าย มีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อม หลังจากผ่านตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (Vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสคิวท (Massequite) เมื่อทำให้แมสคิวท

นี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมที่จะนำไปแยกผลึกต่อไป

#### 2.4.1.5 การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสควิทที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆขนาด 400-600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเม็ลล์น้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

#### 2.4.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอนและเถาลอยชานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

##### 2.4.2.1 กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียมอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับชานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

##### 2.4.2.2 กากอ้อยหรือชานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ชานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี่ยุน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้น โดยปริมาณชานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณชานอ้อยทั้งหมดที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ชานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือชานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก



#### 2.4.2.3 กากตะกอนอ้อย (Filter cake)

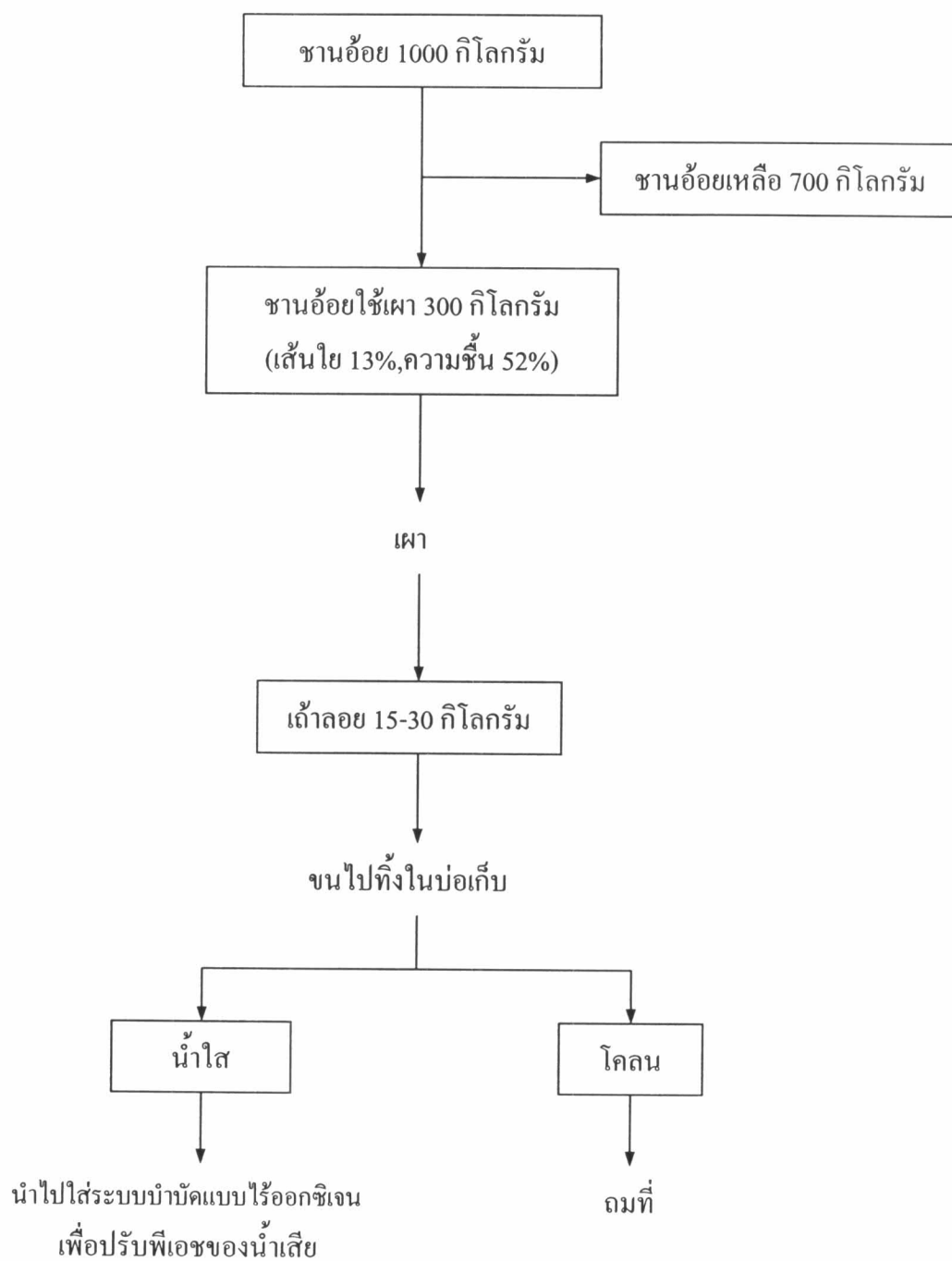
เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและคัลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

#### 2.4.2.4 เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

เถ้าลอยนี้เกิดจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้น ฟูกระจาย จึงมีการฉีคน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับ เถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง

### 2.4.3 การเผาขานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้น

ขานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อยจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดเถ้าลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนเถ้าที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุกเพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.8 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา (สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541)

## 2.5 การหล่อแข็ง

### 2.5.1 คำนิยาม

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency :US EPA) ได้ให้ความหมายของการทำเป็นก้อนแข็งไว้ว่า เป็นเทคนิคที่ใช้กักเก็บ (Encapsulate) ของเสียไว้ในโครงสร้างที่มีความมั่นคงแข็งแรงคล้ายหิน (Monolith) การกักเก็บ อาจจะใช้กับของเสียที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Microencapsulation) หรือใช้กับของเสียขนาดใหญ่ (Macroencapsulatio) การหล่อแข็งไม่จำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างของเสียและตัวยึดประสาน (Solidifying material) แต่จะเชื่อมประสานของเสียให้อยู่ในรูปของแข็งคล้ายหิน การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจะถูกจำกัดโดยการลดขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งมีผลต่อการชะละลาย (Leaching) และ/หรือ โดยการแยกของเสียไปเก็บไว้ในแคปซูล ที่ของเสียไม่สามารถซึมผ่านออกมาได้

จุดประสงค์ของการหล่อแข็ง เพื่อเตรียมกากของเสียอันตรายให้มีคุณสมบัติที่ดีกล่าวคือ เนื้อต่อปฏิกิริยา คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ลดการชะละลายของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม และก้อนหล่อแข็งที่ได้สามารถรับกำลังอัด หรือมีความแข็งแรงพอสมควรสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย

วัสดุประสานที่ใช้เป็นส่วนผสมในการหล่อแข็งเพื่อทำให้เกิดการแข็งตัว ต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

- เพิ่มกำลังรับแรงอัด (Strength)
- ลดความสามารถในการอัดแน่น (Compressibility) ของก้อนหล่อแข็ง
- ลดความต้านทานและความซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ของของเสีย

### 2.5.2 เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย มีดังนี้

2.5.2.1 Cement-Based techniques เป็นกระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ช่วยลดการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งได้ เมื่อหล่อแข็งแล้ว กากของเสียจะมีสภาพเป็นของแข็งคล้ายหิน วิธีนี้เหมาะสำหรับการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก การผสมกับซีเมนต์ที่พีเอชสูงๆ มีแนวโน้มที่จะตรึงโลหะหนักไว้ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ หรือ เกิดคาร์บอเนตไอออนของโลหะหนักอาจเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของสารยึดประสาน หรืออาจถูกดูดซับหรือถูกดูดกลืนไว้ในโครงผลึกของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้

2.5.2.2 Lime-Base techniques เป็นการหล่อแข็งด้วยปูนขาว ผสมกับกากตะกอนของเสียโดยอาศัยปฏิกิริยาการจับตัวแข็งระหว่างปูนขาว (Lime) กับผงซิลิกาอนละเอียดยและน้ำ การแข็งตัวใช้เวลานาน เหมาะที่จะใช้กับกากของเสียพวก สารอนินทรีย์ มากกว่าพวกสารอินทรีย์

เนื่องจากกากของเสียพวกสารอินทรีย์ เมื่อผ่านกรรมวิธีการกำจัดแล้ว ภายหลังจากบ่ม จะได้กากของแข็งที่มีความแข็งแรงลดลง และอาจมีการแพร่ซึมเพิ่มขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกากหล่อแข็งด้วย Cement-Based จะพบว่าก่อนหล่อแข็งที่ได้จาก Lime-Base ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถรับกำลังอัดได้น้อยกว่า

2.5.2.3 Thermoplastic techniques เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่ใช้ บิพูเมน, พาราฟิน หรือ โพลีเอทิลีน ผสมกับกากของเสียแห้ง ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงกากของเสียจะถูกบรรจุหรือถูกเคลือบด้วยสารเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติจะใช้กับกากกัมมันตรังสี

2.5.2.4 Organic Polymer techniques เป็นการหล่อแข็งโดยใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์ เป็นเทคนิคการทำโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างโมโนเมอร์กับกากของเสียโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนที่จะบรรจุและบำบัดต่อไปโมโนเมอร์ที่ใช้คือ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และ วินิลเอสเตอรัสไตรีนโพลีเมอร์

2.5.2.5 Encapsulation techniques เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำและสภาพของสิ่งแวดล้อมได้ดี ข้อเสียคือ เป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากจึงใช้ในการกำจัดกากของเสียที่มีพิษสูงเท่านั้น

2.5.2.6 Self-Cementing techniques เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของ ซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลไซต์ 8-10% จะทำให้เกิด Plasterlike

2.5.2.7 Glassification ใช้สำหรับการหล่อแข็งกากสารกัมมันตรังสีโดยใช้กากตะกอนผสมกับสารซิลิกาแล้วหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของแก้วหรือวัตถุที่เป็นเซรามิก

### 2.5.3 การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อน

วิธีการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อนต้องมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์เบื้องต้นของการบำบัด ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของกากของเสียให้แข็งแรงเป็นก้อนแข็งลดพื้นที่สัมผัส และจำกัดการละลายได้ของสารมลพิษ เมื่อสัมผัสกับของเหลวที่มาชะล้าง

กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ออก ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อนดังนี้

1. สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย
2. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตัน/ลบ.ม.
3. มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ดังระบุในข้อ 5 หมวด

1 ภาคผนวก 1 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งมีชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย คือ

- อาร์เซนิก น้อยกว่า 5 มก./ล.
- แคดเมียม น้อยกว่า 1 มก./ล.
- โครเมียม น้อยกว่า 5 มก./ล.
- ตะกั่ว น้อยกว่า 5 มก./ล.
- ปรอท น้อยกว่า 0.2 มก./ล.
- ซีลีเนียม น้อยกว่า 1 มก./ล.
- เงิน น้อยกว่า 5 มก./ล.

## 2.6 วัสดุประสาน

ในการหล่อแข็งด้วยเทคนิคการใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับวัสดุปอชโซลาน วัสดุประสานที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์และวัสดุปอชโซลาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.6.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสร้างสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหินกรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

#### 2.6.1.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอะลูมินาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

#### 2.6.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO <sub>2</sub>	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.5 – 1.3
TiO <sub>2</sub>	0.1 – 0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 – 0.2
SO <sub>3</sub>	1 - 3

(ที่มา: ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539)

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	33-55
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	15-35
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	7-15
เตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	5-10

(ที่มา: ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539)

### 2.6.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ต้าหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ต้าหรือคอนกรีต

### 2.6.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุธรรมชาติ หรือวัสดุสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยซิลิกาในรูปที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามี Pozzolanic activity กล่าวคือ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดสารประกอบซีเมนต์

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-96 “ปอซโซลาน” หมายถึง วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious property) แต่ถ้าสารปอซโซลานนั้นมีความละเอียดมากๆ และมีน้ำที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

ประเภทของสารปอซโซลาน

สารปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม

1. สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ได้แก่เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูเขาไฟ (Tuff) หินพูน หินโอเปิลเหลือง (Opaline) หินเชิร์ต (Chert) และ Diatomaceous earths เป็นต้น

2. สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolans) ได้แก่วัสดุที่ได้จากการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว หินเชลล์ หินซิลิกา ถ้ำลอย และเถ้าแกลบ เป็นต้น

สารปอซโซลานบางชนิดอาจทำให้เกิดปัญหาเวลานำมาใช้เพราะคุณสมบัติทางกายภาพของมันเอง เช่น Diatomaceous earths เพราะว่าอนุภาคเป็นเหลี่ยมเป็นมุมและมีความพรุนสูงจึงต้องใช้น้ำในการผสมมาก สามารถจะเพิ่มความไวในการเกิดปฏิกิริยาหรือปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 550-1,100 °C โดยอุณหภูมิที่จะใช้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-96 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบเถ้าลอยถ่านหินและปอซโซลานธรรมชาติ หรือปอซโซลานธรรมชาติที่ได้จากการเผาเพื่อใช้เป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral admixture) ในคอนกรีต ได้จำแนกสารประกอบปอซโซลานออกเป็น 3 ระดับ คือ

1. Class N ได้แก่ สารปอซโซลานธรรมชาติ หรือสารปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น หินดินดาน (Shales) หินโอเปิลเหลือง (Opaline) หินเชิร์ต (Chert) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินพุมิกซ์ (Pumice) และ หินปูน (Limestone)

2. Class F ได้แก่ เถ้าลอยโดยปกติเกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส เถ้าลอยในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolanic property)

3. Class C ได้แก่ เถ้าลอยโดยปกติ เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัส เถ้าลอยในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน และมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious property)

## 2.7 เถ้าลอย

เถ้าลอย คือ เถ้าส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ มีขนาดเล็กมาก และอาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่างๆไป ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของเถ้าลอยแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าลอยบางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) จึงมีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

หน่วยงานวิจัยหลายแห่งได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่น ในสหรัฐอเมริกา มี American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นต้น นอกจากนี้ที่สหรัฐอเมริกาแล้ว ที่อังกฤษ แคนาดา เยอรมัน เนเธอร์แลนด์



ญี่ปุ่นและอีกหลายประเทศในโลก ล้วนมีมาตรฐานของตนเองในการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

### 2.7.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยชานอ้อย แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์, เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1

% สารประกอบออกไซด์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2528)	เถ้าลอยลิกไนต์ (อุดม หงษ์ประธานพร, 2532)	เถ้าลอยชานอ้อย
$\text{SiO}_2$	20.20	35.43	51.96
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.42	28.27	1.37
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.92	14.57	0.82
CaO	63.82	11.92	7.26
$\text{K}_2\text{O}$	0.46	2.48	1.32
MgO	1.52	2.13	1.74
$\text{SO}_3$	2.55	2.35	0.11
L.O.I.	2.72	2.56	33.17

### 2.7.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่สำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเผาไหม้และลักษณะการเผาไหม้ โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 จนถึง 0.15 มิลลิเมตร

## 2.8 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาปอซโซลาน

### 2.8.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

ปฏิกริยาไฮเดรชัน เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยมีสารตั้งต้นคือคัลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบใน ปูนซีเมนต์และน้ำ (H<sub>2</sub>O) เมื่อทำปฏิกริยาแล้วจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่เรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ประกอบด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; Ca(OH)<sub>2</sub>) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท เพราะมีปริมาณสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ มีผลึกหยาบ ปฏิกริยาดังกล่าวสามารถเขียนในรูป สมการเคมี ได้ดังนี้

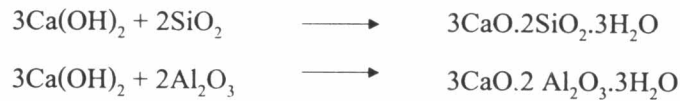


ปฏิกริยานี้จะดำเนินต่อเนื่องโดยที่คัลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจาก คัลเซียมซิลิเกต (CaO·SiO<sub>2</sub>) เข้าทำปฏิกริยากับน้ำ (H<sub>2</sub>O) ได้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ปฏิกริยาจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกริยาไปจนหมด

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้ ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม มีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) นี้ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกริยาต่อไปได้อีก หากมีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกริยา

### 2.8.2 ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

เป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกริยากับซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จากเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามทฤษฎีพื้นฐานนั้นปฏิกริยาจะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ เพื่อจะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบซีเมนต์ สำหรับปฏิกริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึก (Crystalline) จะมีผลต่อปฏิกริยาช้ามาก อัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับความว่องไวในการทำปฏิกริยา (Pozzolanic activity) และอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40 โดยมีปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และคัลเซียมอลูมินาไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีผลต่อการเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า จึงทำให้คอนกรีตซึ่งใช้เถ้าลอยบางชนิด (ชั้นคุณภาพ F) แทนที่ซีเมนต์บางส่วน มีสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปกติ จึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าจึงทำให้เกิดการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย แต่ในกรณีของเถ้าลอยบางชนิด (ชั้นคุณภาพ C) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งในลักษณะเชื่อมประสาน (Cementitious) และปอซโซลาน (Pozzlanic) การพัฒนากำลังในช่วงต้นอาจไม่แตกต่างกันนัก ดังนั้นการใช้สารปอซโซลาน มักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

## 2.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดตะกั่วโดยกระบวนการดูดซับ

**Harison และ laxen, 1983** ได้อธิบายว่าถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความดูดซับตะกั่วได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 และสามารถใช้น้ำทิ้งที่มีปริมาณตะกั่วเข้มข้นสูง แต่มีราคาแพงแม้จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการฟื้นฟูสภาพก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วโดยวิธีนี้ก็ยังสูง

**Yavada และคณะ, 1989** ได้ศึกษาถึงการนำเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์มาใช้ในการดูดซับตะกั่วโดยใช้เถ้าลอยปริมาณ 1 กรัม เขย่าในสารละลายสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเท่ากับ 6.4 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะลดลงจาก 88.10 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลการทดลองเมื่อแปรอุณหภูมิของสารละลายจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียส จะพบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วจะลดลงจาก 83.60 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 68.10 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.4

การทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับของตะกั่วในน้ำและน้ำเสีย ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเป็นสำคัญ เพราะเมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 3 เป็น 6.4 พบว่าการดูดซับของตะกั่วจะเพิ่มขึ้นจาก 13.85 เปอร์เซ็นต์ เป็น 88.10 เปอร์เซ็นต์ และสมการไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช

**อารีย์ ขาญบัณฑิตนันท์, 2536** ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดที่ระยะเก็บกักแตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมง พบว่าถ่านลิกไนต์สามารถลดปริมาณตะกั่วในน้ำที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์และมีระยะกักเก็บที่เหมาะสมคือ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนถ่านลิกไนต์ต่อน้ำโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดคือ 1: 62.50 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด

**จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539** ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ถ่านลิกไนต์แบบแบดจ์ โดยใช้โลหะหนักในการทดลอง 3 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล(Ni) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว(Pb) ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลของระยะเวลาในการกวนและปริมาตรของถ่านลิกไนต์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการกวนเพิ่มขึ้น และระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณถ่านลิกไนต์มากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพบว่า ตะกั่วจะถูกกำจัดเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลเพียงแค่ 30 นาทีเท่านั้น เมื่อใช้ถ่านลิกไนต์ร้อยละ 1 และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลิกไนต์เป็นร้อยละ 10 เวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 10 นาทีเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของถ่านลิกไนต์ในปริมาณต่างๆ กันพบว่าปริมาณ นิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว ที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่านลิกไนต์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.8 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อถ่านลิกไนต์ ตามลำดับ เมื่อใช้ถ่านลิกไนต์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2.5 และ 1 ตามลำดับ

ผลของพีเอช จากการทดลองบ่งชี้ว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ โดยการดูดซับจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าพีเอชสูงกว่าหรือเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดจะต่ำมาก(<20%) และประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นจนกระทั่งใกล้เคียง 100% เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า 8 สำหรับนิกเกิลและแคดเมียม และพีเอชสูงกว่า 6 สำหรับตะกั่ว

สรุปได้ว่าถ่านลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเช่นเดียวกับสารดูดซับอื่นๆ เช่น แอกทิเวตเต็ดคาร์บอน โดยการกำจัดโลหะหนักของถ่านลิกไนต์เกิดจากกระบวนการดูดซับ ร่วมกับการตกตะกอนผลึก

**อุบลรัตน์ วาริษวัฒน์, 2544** ศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมด้วยถ่านกระดุกที่เตรียมจากการเผากระดูกโคกระบือ โดยทำการทดลองแบบแบดจ์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบดจ์พบว่า ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมแต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้โดยถ่านกระดุกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่การเตรียมถ่านกระดุกที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดในการทดลอง

ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยคิดเป็น 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดุกที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้น

เป็น 5 ส่วนแคดเมียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสีย 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ถ่านกระดูกพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนคลิช และการกำจัดแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

ในส่วนการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าสำหรับการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 85.28 และ 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกและสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 4937.14 และ 1851.43 เท่าของปริมาณเบด สำหรับแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 2.62 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก และสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 308.57 และ 137.14 เท่าของปริมาณเบด

#### งานวิจัยที่ใช้ถ่านลอยขานอ้อยในกระบวนการดูดซับ

**Vinod และ Imran , 2000a** ได้ทำการทดลองโดยใช้ถ่านลอยขานอ้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากโรงงานน้ำตาลมากำจัดDDD [2,2-Bis(4-chlorophenyl)-1,1-dichloroethane]และ DDE [2,2-Bis(4-chlorophenyl)-1,1-dichloroethene] จากน้ำเสียที่เกิดจากการผลิตยาฆ่าแมลง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด 93เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.0 โดยมีปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร ที่ขนาดถ่านลอยขานอ้อย 200- 250 ไมโครเมตร ใช้บนถ่านลอยขานอ้อย สมการไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องทั้งแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนคลิชเข้ามาอธิบายได้ โดย DDD และ DDE ถูกดูดซับได้ 93% ที่ พีเอชเท่ากับ 7 ที่ปริมาณ 5 กรัม/ลิตร โดยมีขนาดอนุภาค 200-250 ไมครอนและเมื่อทำการทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดได้ 97 –98 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

**Vinod และ Imran , 2000b** ได้ทำการทดลองโดยใช้ถ่านลอยขานอ้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากโรงงานน้ำตาลมากำจัด ทองแดงและสังกะสี พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดลองแบบกะ และ 95 สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดที่พีเอชเท่ากับ 4.0 สำหรับการกำจัดทองแดง และพีเอชเท่ากับ 5 สำหรับการกำจัดสังกะสี โดยใช้ขนาดอนุภาคถ่านลอยขานอ้อย 200- 250 ไมโครเมตร โดยมีปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร สมการไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องทั้งแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนคลิชและเมื่อทำการทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดได้สูงถึง 93 –98 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

**Vinod และคณะ, 2002** ได้ทำการทดลองโดยใช้ถ่านลอยขานอ้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากโรงงานน้ำตาลมากำจัด Lindane และ Malathion โดยมีสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดคือ ใช้เวลาในการกำจัด 60 นาที ที่พีเอช 6.0 โดยมีปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร และมีขนาดอนุภาค 200- 250 ไมโครเมตร ที่สภาวะนี้สามารถกำจัดได้ถึง 97 - 98 เปอร์เซ็นต์ โดย

รูปแบบการดูดซับเป็นไปตามรูปแบบของแสงมัวร์และแบบฟรอนคลิช ดังนั้นนับได้ว่าเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาไม่แพงอีกด้วย

**Rao และคณะ., 2002** ได้ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการกำจัด  $\text{Cr}^{6+}$  และ  $\text{Ni}^{2+}$  ระหว่างการใช้ชานอ้อย , ถั่วลอจขานอ้อย และถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองแบบกะพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด  $\text{Cr}^{6+}$  ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดได้มากกว่าชานอ้อยและถั่วลอจขานอ้อยตามลำดับ ส่วนการกำจัด  $\text{Ni}^{2+}$  ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดได้มากกว่าถั่วลอจขานอ้อยและชานอ้อยตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าสามารถนำถั่วลอจขานอ้อยและชานอ้อยมาใช้เป็นตัวดูดซับแทนถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาถูก

### งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำเป็นก้อนแข็ง

**กฤษณ์ จารุทะวีย์, 2545** ศึกษาการนำถั่วลอจเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและถั่วลอจขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ต้าพบว่าถั่วลอจทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุพอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าลดลง ส่วนความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา โดยที่ถั่วลอจเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ต้าได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ส่วนมอร์ต้าผสมถั่วลอจขานอ้อยให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะของถั่วลอจเส้นใยปาล์มและถั่วลอจขานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จึงยืนยันได้ถึงความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ในการนำถั่วลอจเส้นใยปาล์มและถั่วลอจขานอ้อยมาใช้ประโยชน์

**อุดม หงษ์ประธานพร, 2532** ศึกษาถึงการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมถั่วลอจและถั่วแกลบ โดยใช้ถั่วลอจจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และถั่วแกลบที่ได้จากการเผาอิฐในจังหวัดราชบุรี พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แต่ในอัตราการแทนที่ของถั่วทั้งสองที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 20 จะให้การพัฒนากำลังในช่วงแรกต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงอายุหลังจะให้กำลังที่สูงกว่าและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถั่วลอจกับถั่วแกลบพบว่าถั่วลอจให้การพัฒนากำลังดีกว่าถั่วแกลบ เนื่องจากมีอนุภาคละเอียดกว่าซึ่งทราบได้จากภาพถ่ายจากกล้อง อิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope)

**Shively และคณะ, 1986** ได้ทำการทดลองนำกากตะกอนโลหะหนักมาบำบัดด้วยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 เป็นวัสดุประสาน มีการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัด กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้มีการสังเคราะห์ขึ้นโดยโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมรวมกัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน พบว่าก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการนำกากตะกอนที่มีอาร์เซนิกและแคดเมียมเป็นองค์ประกอบมาทำให้เป็นก้อนจะให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่กากตะกอนที่ประกอบด้วยโครเมียมหรือตะกั่วไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด การทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง น้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำนายจากความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ประมาณ 100 ถึง 10,000 เท่าและพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ US EPA (สำหรับการสกัดในครั้งแรก) ทั้งในกรณีที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ การละลายของโลหะหนักสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อเริ่มสกัด แคดเมียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้ในการสกัดให้ปานกลาง ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองค่าพีเอชลดลงเหลือน้อยกว่า 6.0 จะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุดสำหรับในช่วงที่สาม เมื่อทำการสกัดต่อไปพีเอชยังคงน้อยกว่า 6.0 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำเริ่มที่จะละลายออกมา โดยโลหะหนักที่ละลายออกมาจากการสกัดแต่ละครั้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

**Weng และ Haung, 1994** ศึกษาถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ในการดูดซับ และการทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement fixation) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับสำหรับโลหะสังกะสีและโลหะแคดเมียมในน้ำเสียที่เจือจาง ได้ผลดังต่อไปนี้คือ

ประสิทธิภาพในการดูดซับของสังกะสี เท่ากับ 0.27 mg/g

ประสิทธิภาพในการดูดซับของแคดเมียม เท่ากับ 0.27 mg/g

และเมื่อทดลองผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ในอัตราส่วน 90: 10 แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่าต้องใช้เวลา 65 วัน จึงจะมีกำลังกดอัดเท่ากับใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ และจากการทดสอบการชะละลายของโลหะตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency Extraction Procedure, USEPA- EP) แสดงว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่าในมาตรฐานน้ำดื่มและสามารถสรุปผลการทดลองจากการหา Compressive strength และ Leaching test แล้วเสนอว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็น Secondary Construction Materials ได้