

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท สังกะสี เป็นต้น โลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปลดปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรม ต่างชนิดกัน (Dean และคณะ, 1972) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญคือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ เมื่อโลหะเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักเกิดปนอยู่กับแร่สังกะสี ทองแดง และดีบุก ปกติในธรรมชาติแคดเมียมจะรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide) ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญและมีประโยชน์หลายประการ เช่นใช้ในการชุบโลหะ ทำยางพลาสติก โลหะผสม แบตเตอรี่ ผสมเซลล์เนียมทำสี เป็นส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง

เมื่อร่างกายได้รับพิษเนื่องจากการสูดหรือหายใจเอาควันที่มีแคดเมียมเข้าไป อาการที่เกิดขึ้นคือ คอแห้ง ระบายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับแคดเมียมมากขึ้นจะมีอาการหายใจไม่ออก ใจ ถ้ายังคงได้รับแคดเมียมเข้าไปอีกก็อาจตายได้ ส่วนอาการที่เกิดจากการกินอาหารหรือน้ำที่มีแคดเมียมเจือปนคือ อาเจียนและท้องร่วง การได้รับพิษแบบเรื้อรังทำให้เกิดโรคอิไต - อิไต (Itai - Itai disease) ทำให้ผู้ได้รับพิษได้รับความเจ็บปวดทรมานมาก เพราะเกิดอาการกระดูกและไตพิการ ระยะแรกผู้ป่วยจะมีอาการปวดบริเวณสะโพก แขน และขา ส่วนในกรณีของผู้ป่วยที่ได้รับแคดเมียมสะสมมานานจะมีอาการรุนแรงมาก คือ เจ็บปวดทั่วร่างกาย แรงกดของน้ำหนักตัวที่มีต่อกระดูกสันหลังทำให้ร่างกายเตี้ยหรือค่อมลง กระดูกเปราะ ในระยะสุดท้ายผู้ป่วยจะสูญเสียแคลเซียมออกทางปัสสาวะมาก จนกระดูกนุ่มและเสียชีวิตไปในที่สุด

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Dean และคณะ,1972)

Type of industries	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	F	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sb	Sn	Zn
Pulp,paper mills, paperboard,building paper, board mills					●	●			●		●	●			●
Organic chemical, petrochemicals	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Alkalis,chlorine, inorganic chemicals	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Fertilizers	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●
Petroleum refining	●		●	●	●	●	●	●			●	●			●
Basic steel work, foundries			●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●
Basic non-ferrous metals-works,foundries	●	●	●	●	●	●	●		●		●		●		●
Motor vehicles, aircraft-plating,finishing	●	●		●	●	●			●			●			
Flat glass , cement , asbestos products					●										
Textile mill products					●										
Leather tanning					●										
Steam generation power plants					●										●

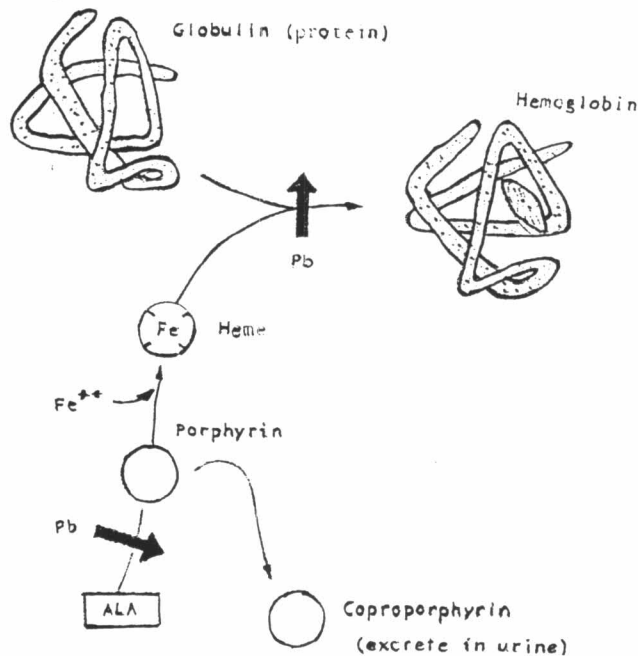
Note: plastic materials,meat products,dairy products,fruits and vegetables,grain milling,beet sugar,beverages and livestock feedlot industries have no heavy metal discharges.

ตะกั่ว (Lead)

ปัจจุบันมีการนำเอาตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างมาก ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก อุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ปลดปล่อยตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก และมีผลกระทบต่อคุณภาพของสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติอย่างรุนแรง ตะกั่วเป็นธาตุที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ครั้งโบราณ เพราะมีคุณสมบัติเป็นโลหะอ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และทนต่อการผุกร่อนได้ดี มีการนำตะกั่วมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ อาทิ การผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมเคมี เช่น ผลิตสีและหมึกพิมพ์

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้สองทาง ทางตรงโดยการที่มนุษย์หรือสัตว์สูดหายใจหรือกินอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้าระบบหรือทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายสู่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตในความเข้มข้นที่สูงที่สุด รองลงมาคือตับ หลังจากนั้นชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่ง โดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายไปอยู่ในนมและฟัน ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายระบบคือ

-ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจางโดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีโม (heme) หลายชนิด ทำให้ระดับฮีโมโกลบิน (haemoglobin) ลดลง กลไกที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการขัดขวางการสังเคราะห์ฮีโมของตะกั่ว (กิตติ เอกอำพน, 2529)

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

- ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟต ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

นอกจากนี้แล้วตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจและเส้นเลือด และเป็นสารชักนำทำให้เกิดโรคมะเร็งอีกด้วย

นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลจะถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด ได้แก่ โรงงานชุบโลหะ ซึ่งจะทำให้ได้โลหะที่ทนทานต่อการผุกร่อน ใช้ในการผลิตเหล็กไม่เป็นสนิมและโลหะผสมชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ใช้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้โลหะนิกเกิลและแคดเมียม (Nickel-cadmium battery) ใช้ผลิตตรงควัดตุในการผลิตสีที่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล และที่สำคัญมากคือฝุ่นนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำนิกเกิลให้บริสุทธิ์และเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมาก

กลไกการออกฤทธิ์ คือจะยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอด และหัวใจ อาการของผู้ได้รับพิษมีดังนี้ ปวดหัว มึนงง คลื่นไส้และอาเจียน แน่นหน้าอก ไอแห้ง ถ้าหากมีอาการรุนแรงมากอาจมีเลือดออกในปอด.

นอกจากนี้ยังพบว่านิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารชักนำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง คนงานที่ประกอบอาชีพเกี่ยวข้องกับการใช้นิกเกิลมีโอกาสเป็นมะเร็งในช่องจมูกและโพรงจมูกสูงกว่าคนปกติประมาณ 150 เท่า

2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

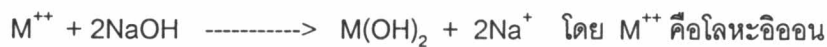
กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1. การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปใต้น้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีคือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาตามสมการนี้



การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric Property) คือจะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพีเอชกว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ มักจะใช้สารเคมีในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์คือการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.2.2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคตไอออน

เอกเซนเจอร์ (Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออน เอกเซนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการนี้จะเหมาะ สำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด(Manahan,1993)

2.2.3. ออกซิเดชันและรีดักชัน(Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ สารเคมีที่ใช้คือคลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชันคือการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่ การบำบัดใช้ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนไลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้ได้ค่าพอเหมาะ ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ถ้ามีการใช้ไฮโปคลอไรต์หรือปูนไลม์มากเกินไปค่าพีเอชจะเป็นค่าสูง ต้องใช้กรดปรับค่าพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป การวิเคราะห์หาค่าปริมาณโลหะที่ต้องการกำจัดก่อนหรือหลังการบำบัด จะเป็นการช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการบำบัดหรือปฏิกิริยาเคมีว่าเกิดขึ้นสมบูรณ์เพียงใด

2.2.4. รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตต และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semi-permeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนวิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ ส่วนระบบการบำบัดที่คล้ายกับรีเวิร์ส ออสโมซิส คือ ระบบอุลตราฟิลเตรชัน(Ultrafiltration) โดยสองระบบนี้มีข้อแตกต่างกันคือระบบรีเวิร์ส ออสโมซิส จะใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แรงดันสูง ส่วนอุลตราฟิลเตรชันใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่แรงดันต่ำ

2.2.5. การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยนํ้าออกนี้เป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับนํ้าเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.2.6. อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงรวมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนรวมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และนํ้าเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.2.7. การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดกาซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.2.8. การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลทินสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 \AA ถึง $20,000 \text{ \AA}$ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในนํ้าดื่ม

2.3 การดูดติดผิว(Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือ ก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิว ของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent โดยกลไกการดูดติด ผิวเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

การดูดติดผิวมี 2 วิธีคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ(Physisorption) และการดูดติดผิวทาง เคมี(Chemisorption) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดูดติดผิวทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของ พลังงานและ/หรือแรงดูดติดผิวทางไฟฟ้า(แรงวันเดอร์วาลส์)ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะ ถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น(Multilayers) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่ชั้นโมเลกุลก่อนหน้านี้ โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น ของโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูง ขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดติดแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดติดผิวมี พลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดติดผิว ระหว่างสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิว ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดติดผิวสามารถเกิด ขึ้นได้

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบ ทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้น เดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เอง เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิว ของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่าง ๆ มาดูดติดผิวได้มีหลายชนิด อาจ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ , แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอ็คติเวเต็ด ซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การ ให้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดติดผิวที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 600 - 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 2.2 ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับที่นิยมใช้กัน (Kenneth, 1992)

Material	Shape	Size (Mesh)	ϵ_p (-)	ρ_b (lb/ft ³)	r_p (°A)	A_s (m ² /g)	Commercial Products
Aluminas							
Active aluminas	G	V	0.25-0.3	50	35-45	235	Alcoa F-1 Reynolds RA-1,RA-3
	S	3-8	0.5-0.6	47-50	40-50	400	Alcoa H-151 Kaiser KA-201
Catalytic- alumina	S	V	0.62	47	45	300	Pechiney CR
Chromatographic -alumina	G	80-200	0.3	58	45	225	Alcoa F-20
Silicas							
Alumino-silicates	C	4-12	0.4	40	-	770	Davison
	S		0.55	55			3A,4A,5A
Magnesia-silica gel	P						13X,700
	G	V	0.33	30	-	300	Florisil
Silica gel	G	V	V	27-45	V	300- 800	Davison silica gel
	S	1/8 in	0.34 - 0.51	41-52	21-28	650- 700	Cecagel Mobil Sorbead R,H
Carbons							
Shell-base	G	V	0.5-0.6	27-34	20	800- 1100	Cochranex FCB
	P	-	0.6-0.8	20-22	30	1200	Barnebey-Cheney JF,JU,YF
Wood-based	G	5-7	-	24	5-10	1400	Supersorbon W
	P	V	-	27-29	3-10	750- 900	Brilonit

ϵ_p = particle porosity, ρ_b = bulk density, r_p = pore size, A_s = surface area

C=cylindrical pellets, G=granular, P=powder, S=spherical beads, T=tablets, V=various

ปัจจุบันสารดูดติดผิวสังเคราะห์ได้ถูกผลิตขึ้นมาหลากหลายชนิดเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่ความคล่องตัวในการใช้และความสามารถในการดูดซับมีน้อยกว่า Activated Carbon แต่สารดูดซับเหล่านี้ก็เหมาะสำหรับการใช้งานบางอย่าง ซึ่งตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของสารดูดซับที่นิยมใช้และคุณสมบัติของสารดูดซับนั้น

2.3.1. กลไกการดูดติดผิว แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดติดผิว ซึ่งพื้นผิวของสารดูดติดผิวมีช่องเหลือห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดติดผิว

2) การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างสารดูดติดผิว เพื่อให้เกิดการดูดติดผิว

3) ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดติดที่ผิวของสารดูดติดผิวซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

2.3.2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

1) ความดันปวน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับ film diffusion และ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันปวนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันปวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิวทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันปวนสูงทำให้ pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิวและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิวมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของสารดูดติดผิว

3) ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดติดผิว

เมื่อเกิดการดูดติดผิว โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นสารที่ยากในการดูดติดผิว ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดติดผิวได้ดี

4) ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวสารดูดติดผิว

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่องว่างของสารดูดติดผิว

5) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิว

6) อุณหภูมิ

ในกรณีการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดติดผิวจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้น

2.3.3 การดูดติดผิวที่สภาวะสมดุลย์ (Adsorption Isotherm)

สามารถอธิบายปรากฏการณ์กระบวนการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นว่า ณ จุดสมดุลย์ของการดูดติดผิว สมรรถนะของสารดูดติดผิว(Adsorption Capacity) สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารดูดติดผิวในน้ำ(C_e) ที่อุณหภูมิคงที่ สมการความสัมพันธ์นี้เรียกว่า "Adsorption Isotherm"

ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่าง Q_e และ C_e นั้นถือว่า โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว(Monolayer) อย่างไรก็ตามกระบวนการดูดติดผิวอาจจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น(Multilayers) โดยโมเลกุลของสารดูดติดผิวจะถูกดูดติดกับชั้นโมเลกุลก่อนหน้า

สมการของ Langmuir และ BET (Kenneth, 1992)

สมการของ Langmuir นั้น ถือว่าการดูดติดผิวเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนสมการของ Brunauer, Emmett, Teller (BET) แสดงการดูดติดผิวแบบหลายชั้น

สมการของ Langmuir

$$Q_e = Q_0 b C / (1 + b C)$$

สมการของ BET

$$Q_e = B C Q_0 / \{ (C_s - C) [1 + (B - 1)(C / C_s)] \}$$

โดยที่

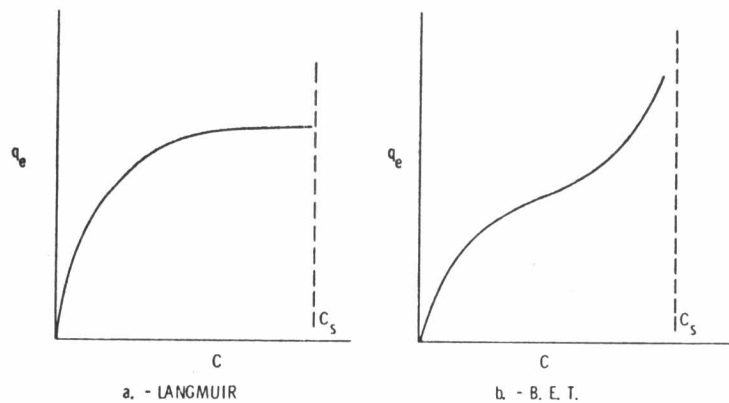
Q_e = สมรรถนะของสารดูดติดผิว คิดเป็นจำนวนโมลหรือน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิว ต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่ภาวะสมดุล

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดติดผิวในน้ำ

B = ค่าคงที่พลังงานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในการดูดติดผิว

Q_0, b = ค่าคงที่



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e และ C_e ของการดูดติดผิวแบบชั้นเดียวและการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Kenneth, 1992)

สมการที่ 1 และ 2 อาจเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 3 และ 4 ดังต่อไปนี้

$$C_e / Q_e = 1 / Q_0 b + C_e / Q_0$$

และ

$$C / [Q_e (C_s - C)] = 1 / B Q_0 + (B - 1) C / (B Q_0 C_s)$$

โดยสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดติดผิวได้จากสมการ

$$\text{LOG} (Q_e - Q_i) = \text{LOG} (Q_e) - kt/2.3$$

2.3.4. ประโยชน์ของการดูดติดผิว

สารดูดติดผิวที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น รส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟัลวิค
- 2) กำจัดคลอรีน
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดไฮโดรคาร์บอน

แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารดูดติดผิวแทน ซึ่งในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีเถ้าลอยมาใช้ในการบำบัดโลหะหนัก

2.4 ซีเถ้าลอย (Fly ash)

ซีเถ้าลอยเป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านลิกไนต์และซีเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองนี้ นำมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ ซึ่งเหมืองแม่เมาะนี้ได้เริ่มผลิตถ่านหินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากการชนิดของถ่านหินตาม rank (ค่า rank เป็นการวัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน American Society For Testing Materials พบว่าถ่านหินในเหมืองแม่เมาะนี้เป็นลิกไนต์ และบางส่วนเป็นซับบิทูมินัส แหล่งลิกไนต์ที่พบเกิดในแอ่งรูปกะทะทางในยุคนิวซีเทอเรีย (Tertiary period) ด้านทิศเหนือเป็นหินบะซอลต์วางตัวบนหินปูน เปลือกดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและหินลูกรัง หนาประมาณ 10 เมตร ส่วนชั้นดินถัดลงไปเป็นดินเหนียวแข็งพวก shale หรือ mudstone วางตัวอยู่บนชั้นถ่านลิกไนต์ ซึ่งมีความหนาของชั้นถ่านประมาณ 15-20 เมตร ชั้นถ่านมีลักษณะเป็นรูปกะทะทางความยาวในแนวเหนือ-ใต้ ประมาณ 6 กิโลเมตร ขนาดกว้างไม่น้อยกว่า 3 กิโลเมตร ทางด้านตะวันออกชั้นลิกไนต์วางตัวในแนวเหนือ 25 องศาตะวันออก ความลาดเอียง 10 ถึง 18 องศา ส่วนด้านเหนือความลาดเอียง 4 ถึง 10 องศา

ถ่านลิกไนต์มีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาล มักแสดงลักษณะของเนื้อไม้ให้เห็น ถ่านลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของกำมะถัน ถ้ำถ่านและความชื้นค่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์ทางเคมีแบบ Proximate Analysis as Received Basis ของถ่านลิกไนต์แม่เมาะ มีค่าผลเฉลี่ยเป็นน้ำหนักร้อยละ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีแบบ Proximate Analysis ของถ่านลิกไนต์แม่เกาะ
(วารสารณ์ คุนาวนาทิจ, 2536)

องค์ประกอบ	ปริมาณที่พบ	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ความชื้น	28 %	38 %
กำมะถัน	1.5 %	4 %
คาร์บอนคงตัว	25 %	38 %
เถ้าถ่าน	7 %	35 %
สารระเหย	39 %	53 %
ค่าความร้อนเฉลี่ย	1500 แคลอรีต่อกรัม	3200 แคลอรีต่อกรัม

ถ่านลิกไนต์เมื่อถูกบดให้ละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอ การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุ(mineral matter) ที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด กล่าวโดยสรุปถ่านลิกไนต์ที่ได้จะมี 2 สภาพคือ

1) เถ้าลอย (Fly ash, Pulverized fuel ash หรือ Dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า(Electrostatic Precipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ที่ที่เก็บเถ้า(Ash Hopper)

2) เถ้าหนัก (Bottom ash หรือ Wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป(Combustion zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกันเป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่กันเตา บางส่วนของเถ้าจะปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า Slag เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่กันเตา

ปริมาณของเถ้าลอยและเถ้าหนักที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์จะมีประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักถ่านหินที่เผา ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของเถ้าทั้งสองชนิดนี้จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการใช้ถ่านลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

เถ้าลอยที่ออกจากเตาใหม่ ๆ จะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น จากการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์ มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือกลม มีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 มิลลิเมตร พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23 ถึง 2.48 ส่วนในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเถ้าลอยนั้นเป็นการยากมากที่จะแบ่งธาตุแต่ละชนิดให้ออกมาเป็นปริมาณหรือธาตุเดี่ยวๆ โดยอาศัยวิธีทางกายภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาธาตุโดยอาศัยวิธีทางเคมี(Ash analysis) ในรูปร้อยละของออกไซด์

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

แก้วลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าที่ได้หลังจากการเผาไหม้ๆ จะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น มีลักษณะละเอียดจากการวิเคราะห์แก้วลอยลิกไนต์จากแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปร่างของแก้วลอยลิกไนต์มีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม(Sub-round to round) และมีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 มิลลิเมตร

จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของแก้วลอยลิกไนต์ พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23 ถึง 2.48 ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์แก้วลอยลิกไนต์

(ม.ล.วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจำนง และคณะ, 2536)

การทดลองครั้งที่	ค่าความถ่วงจำเพาะ
1	2.48
2	2.42
3	2.48
4	2.32
5	2.23

2.4.2 คุณสมบัติทางเคมี

จากการวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์แก้วลอยลิกไนต์โดยวิธี X-ray fluorescence โดยใช้เครื่องมือ X-ray spectrometer ผลการทดลองพบว่าธาตุที่มีมากที่สุด คือ แคลเซียม(Ca) มีประมาณร้อยละ 15.6 รองลงมาได้แก่ ซิลิคอน(Si) และอลูมิเนียม(Al) คือมีปริมาณร้อยละ 10.5 และ 6.13 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์หาธาตุของซีเมนต์ลอยลิกไนต์โดยวิธี X-ray fluorescence
(ม.ล.วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง และคณะ, 2536)

องค์ประกอบ	ปริมาณเฉลี่ย
Silicon	10.5 %
Aluminium	6.13 %
Iron	10.2 %
Titanium	0.15 %
Sodium	1.25 %
Magnesium	1.29 %
Potassium	1490 ppm
Manganese	955 ppm
Chlorine	nil
Copper	54 ppm
Zinc	145 ppm
Loss on ignition	16.6 %

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองทางเคมีหาสารประกอบในรูปออกไซด์ของโลหะ โดยนำถ้ำลิกไนต์จากลำปางมาทดสอบ ผลการทดสอบนี้ดำเนินการโดยกรมทางหลวง และบางตัวอย่างกรมทางหลวงได้ขอให้กรมทรัพยากรธรณีทดลองเพื่อเป็นการตรวจสอบเพิ่มเติม ทั้งได้รวมผลการทดลองของสยามซีเมนต์เอาไว้ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ซีเมนต์ลอยลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะนี้ ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดถึงร้อยละ 40-48 โดยน้ำหนัก รองลงมาได้แก่ซิลิคอนออกไซด์ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 10-17 โดยน้ำหนัก ปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ และไอออนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก ซัลเฟอร์ออกไซด์มีปริมาณร้อยละ 8-10 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นประกอบไปด้วย MgO , Cl , K_2O , Na_2O และ TiO_2 ในปริมาณเล็กน้อย

ตารางที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์ล้อยิกไนต์ จากเหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง
(ม.ล.วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจาง และคณะ, 2536)

สารประกอบ (%)	ทำการทดลองโดย		
	กรมทางหลวง	สยามซีเมนต์	กรมทรัพยากรธรณี
SiO ₂	17.48	10.90	17.23
Al ₂ O ₃	20.12	5.06	7.48
Fe ₂ O ₃	3.82	19.18	14.51
CaO	41.46	48.46	38.90
MgO	2.25	3.37	4.31
SO ₃	8.11	9.52	10.32
Cl	0.05	-	nil
K ₂ O	0.72	0.31	0.65
Na ₂ O	8.31	0.21	0.94
TiO ₂	14.03	-	0.16
pH	11.52	-	11.60
Ignition Loss	4.57	1.77	5.29
Note		Total S as SO ₃ = 10.14	

2.4.3 ประโยชน์ของซีเมนต์ล้อยิกไนต์

ซีเมนต์ล้อยิกไนต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านี้ ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้นำมาใช้ประโยชน์ดังนี้

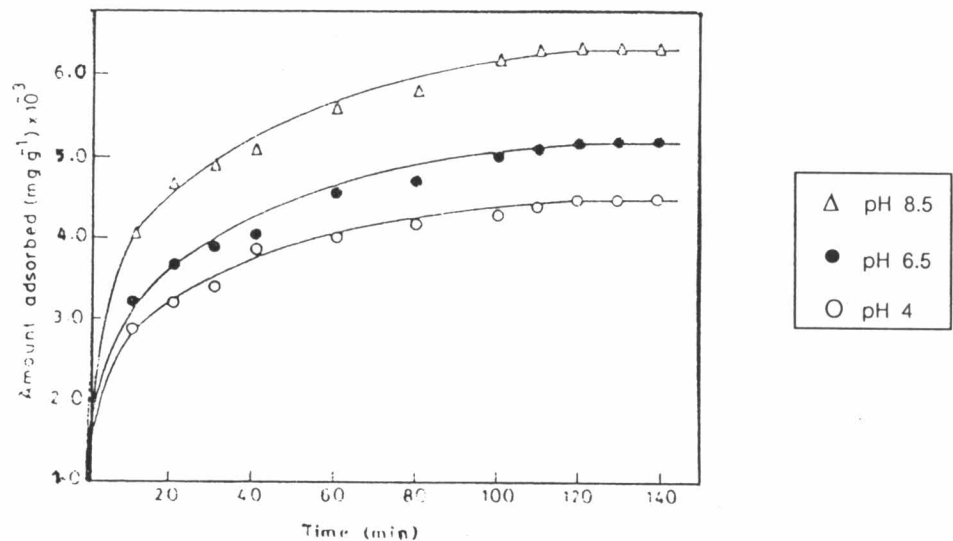
- เป็นส่วนผสมในคอนกรีต (Concrete additive)
- เป็นวัสดุน้ำหนักเบา (Light weight aggregate)
- นำมา Stabilize เพื่อทำพื้นทางหรือรองพื้นทาง
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์
- นำมาเป็น Asphalt filler
- นำมาทำ Concrete block

สำหรับในประเทศไทยได้มีการนำซีเมนต์ล้อยิกไนต์มาใช้ทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์และทางวิศวกรรม นำซีเมนต์ล้อยิกไนต์มาผสมปูนขาวหรือซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตก็ได้นำไปทำถนนภายในโรงไฟฟ้า ใช้เป็นดินถมทำสนามกีฬา ถมทำทางเข้าบ้าน ฯลฯ ซึ่งผลอยู่ในสภาพที่น่าพอใจ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

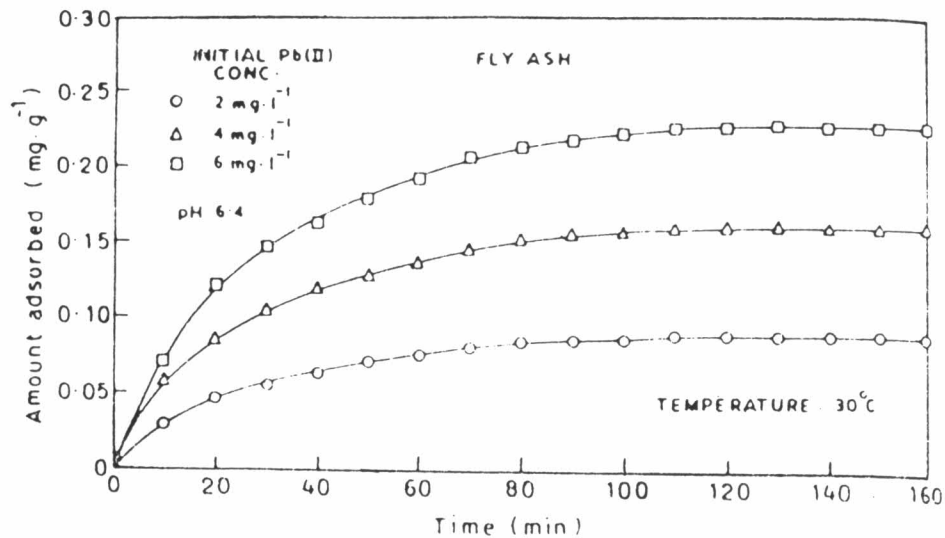
Panday และคณะ (1987) ศึกษาถึงการใช้น้ำที่เฝ้าลออยในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองได้นำน้ำที่เฝ้าลออยปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือโดยใช้ Dithizone method ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอช เท่ากับ 8.5 โดยเวลาที่ใช้น้ำจะให้น้ำเข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจาก 84.80 เปอร์เซ็นต์ เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการของ Langmuir isotherm

ผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมีสูงมาก กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอช จาก 4 เป็นค่าพีเอช 8.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มจาก 11.85 % เป็น 89.82% ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.2 และยังพบอีกด้วยว่า การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับของแคดเมียมกับเวลา (Panday และคณะ, 1987)

Yadava และคณะ (1989) ได้ศึกษาถึงการนำน้ำที่เฝ้าลออยมาใช้ในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้น้ำที่เฝ้าลออยปริมาณ 1 กรัม เขย่าในสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเท่ากับ 6.4 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะลดลงจาก 88.10 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ(Yavada และคณะ, 1989)

และผลการทดลองเมื่อแปรอุณหภูมิของสารละลายจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียสจะพบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วจะลดลงจาก 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 รวมทั้งหาพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่อุณหภูมิของการทดลองแตกต่างกัน ได้แก่ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.7

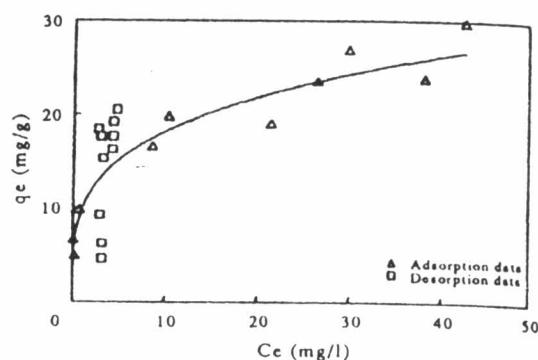
ตารางที่ 2.7 ค่าทางอุณหพลศาสตร์ที่อุณหภูมิแตกต่างกันของการดูดซับตะกั่ว(Yavada และคณะ, 1989)

Temperature (°C)	Thermodynamic parameters		
	$-\Delta G^\circ$	$-\Delta H^\circ$	$-\Delta S^\circ$
20	0.951	9.442	35.471
30	0.661	6.403	23.314
40	0.472	-	-

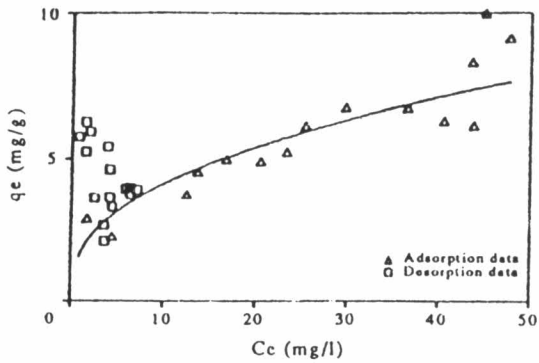
Roy และ คณะ (1991) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างภายหลังจากที่มีการทำให้โลหะหนักคงรูปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์เถ้าลอย โดยในการทดลองได้ใช้กากตะกอนที่มีโลหะหนัก 4 ชนิด คือ โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม และปรอท ผลการทดลองเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อซีเมนต์เถ้าลอย (F-grade) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.43 เมื่อใช้เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope), XRD (X-Ray Diffraction) และ EDM (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) พบว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นสารที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในซีเมนต์เถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ มีลักษณะเป็น irregular และจาก XRD จะพบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium Silicate Hydrate) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(Calcium Aluminate Hydrate) และยิปซัม(Gypsum)

Diamadopoulos และ คณะ (1993) ศึกษาวิจัยเรื่องการนำซีเมนต์เถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำ โดยในการทดลองนี้จะใช้ซีเมนต์เถ้าลอย 1 กรัม เพื่อกำจัดอาร์เซนิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4(รูปที่ 2.5 ก),ค่าพีเอชเท่ากับ 7(รูปที่ 2.5 ข) และค่าพีเอชเท่ากับ 10(รูปที่ 2.5 ค) ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าความเข้มข้นที่เหลือของอาร์เซนิก ในน้ำจะขึ้นอยู่กับเวลา กล่าวคือที่ 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นก็จะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และที่พีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 30มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อซีเมนต์เถ้าลอย 1 กรัม และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่าเมื่อเทียบกับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ

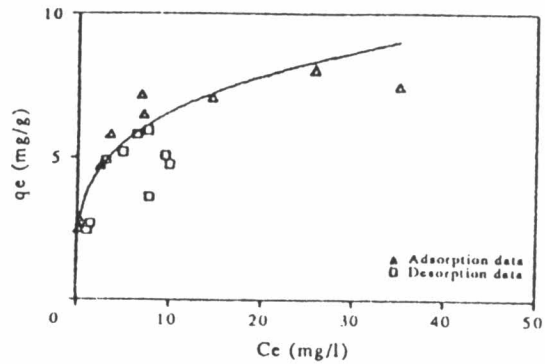
สำหรับผลการทดลองการคายการดูดซับจากผิวซีเมนต์เถ้าลอย พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 จะมีการคายการดูดซับต่ำที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 10 จะมีการคายการดูดซับเท่ากับ 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 ก ค่าพีเอชเท่ากับ 4



รูปที่ 2.5 ข ค่าพีเอชเท่ากับ 7



รูปที่ 2.5 ค ค่าพีเอชเท่ากับ 10

รูปที่ 2.5 แสดงผลการทดลองการดูดซับและการคายการดูดซับของอาร์เซนิก (Diamadopolous และคณะ, 1993)

Tiwari และคณะ (1993) ศึกษาถึงการนำซี้ถ้ำล่อยมาใช้ในการกำจัดโลหะแมงกานีสจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพของการกำจัด จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้น ค่าพีเอช และอุณหภูมิ โดยเมื่อความเข้มข้น เริ่มต้น เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช เท่ากับ 8 จะใช้เวลาเพื่อให้ เข้าสู่สมดุลย์เท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยสามารถกำจัดได้ 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้ค่าพีเอช เท่ากับ 9 จะสามารถกำจัดได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

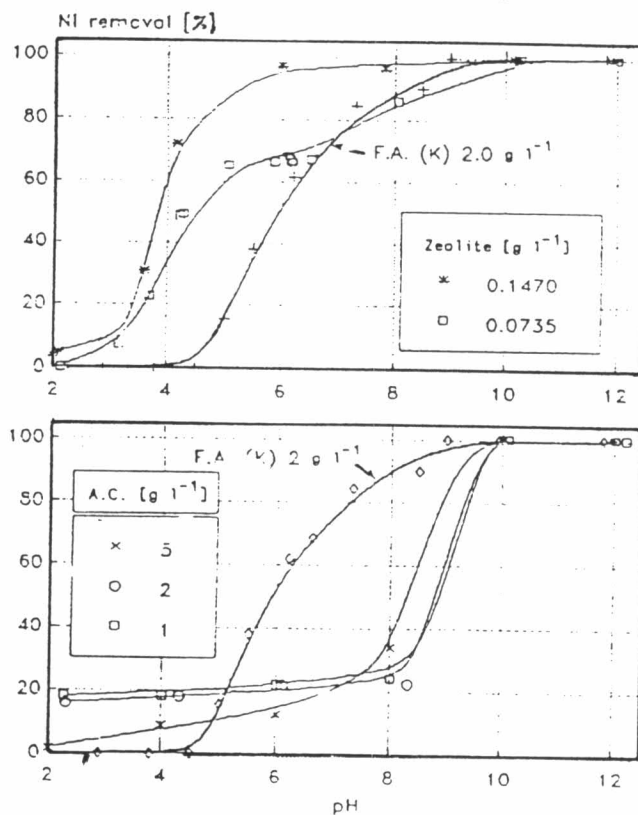
Mavros และคณะ (1993) ได้ศึกษาถึงการนำซี้ถ้ำล่อยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม การใช้ถ่านหิน มาใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดโดยใช้ซี้ถ้ำ ล่อยจากโรงไฟฟ้าการเคียและเมกาโลโปลิส ซึ่งอยู่ทางภาคเหนือและภาคใต้ของกรีก ตามลำดับ ซึ่ง ตารางที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบของซี้ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าทั้งสอง

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบของซี้ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าการเคียและเมกาโลโปลิส (Mavros และคณะ, 1993)

สารประกอบ(%)	แหล่งที่มาของซี้ถ้ำล่อย	
	โรงไฟฟ้าการเคีย	โรงไฟฟ้าเมกาโลโปลิส
SiO ₂	29 %	39 %
Al ₂ O ₃	12 %	15 %
Fe ₂ O ₃	5 %	8 %
CaO	44 %	22 %

โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นในการทดลอง เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที ที่ค่าพีเอช 8.5 - 9 จะสามารถกำจัดโลหะนิกเกิลได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงค่าพีเอช กลางๆ พบว่า การกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณซี้เถ้าลอยที่ถูกเติมลงในสารละลายเป็นสำคัญ นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของซี้เถ้าลอยอีกด้วย เช่น ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 พบว่าซี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าการเคียว สามารถกำจัดนิกเกิลได้ 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ซี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเมกาโลโปลิสสามารถกำจัด นิกเกิลได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

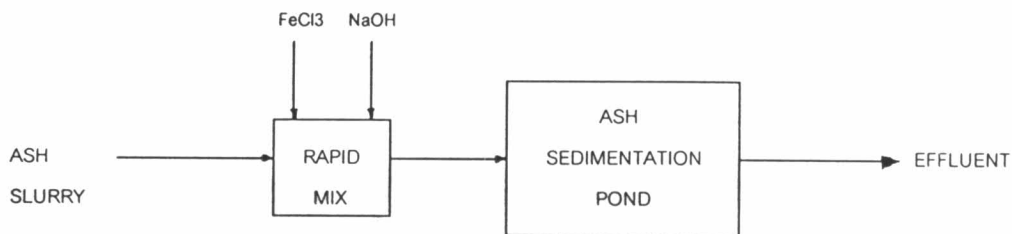
การทดลองในขั้นต่อมา ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของซี้เถ้าลอยกับการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ และคาร์บอน พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะนิกเกิลได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ ส่วนการใช้คาร์บอนพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่าการใช้ซี้เถ้าลอย ที่ค่าพีเอชต่ำกว่าค่าพีเอชของการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลของซี้เถ้าลอย ถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์สังเคราะห์ (Mavros และคณะ, 1993)

Lagnese และ Dzombak (1993) ศึกษาการใช้ถังการให้ Ash Sedimentation Pond ในโรงไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานจากถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการบำบัดดังแสดงในรูปที่ เพื่อเป็น ขั้นตอนหนึ่งของการบำบัดน้ำภายในโรงไฟฟ้าที่มีการเจือปนของโลหะ โดยอาศัยปฏิกิริยาการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของซี้เถ้าลอย และ/หรือ Iron Oxyhydroxide โดยในการทดลองนี้จะเน้นการกำจัดอลูมิเนียม แมงกานีส และอาร์เซนิก ในน้ำ โดยใช้ซี้เถ้าลอยและซี้เถ้ากั้นเตาในการควบคุมค่าพีเอช ภายใต้

ได้สภาวะที่มีการกวนน้อยที่สุด (Weak Mixing Condition) รวมทั้งมีการเติมเฟอริกคลอไรด์เพื่อส่งเสริมการดูดซับบน Iron Oxyhydroxide ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าควรควบคุมค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัดให้อยู่ในช่วง 8 - 8.5 จะทำให้แมงกานีสที่มีในน้ำลดลงจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 จะทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่พีเอชนี้การเติมเฟอริกคลอไรด์จะไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำ แต่กรณีที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7.5 จะพบว่ามีความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำสูงมากขึ้น ส่วนผลการทดลองของอลูมิเนียมจะให้ผลใกล้เคียงกับแมงกานีส ต่างกันตรงที่ค่าพีเอชคือ ที่พีเอชใกล้เคียงกับ 7 จะทำให้มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่เหลือในน้ำต่ำที่สุดคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการบำบัดโลหะหนักของ Ash Sedimentation Pond (Lagnese และ Dzombak, 1993)

Weng และ Huang (1994) ศึกษาถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้ซีเมนต์ลอยในการดูดซับ และการทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement fixation) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ลอยเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับโลหะสังกะสีและโลหะแคดเมียมในน้ำเสียที่เจือจาง ได้ผลดังต่อไปนี้คือ

ประสิทธิภาพในการดูดซับของสังกะสี เท่ากับ 0.27 mg/g

ประสิทธิภาพในการดูดซับของแคดเมียม เท่ากับ 0.27 mg/g

และเมื่อทดลองผสมปูนซีเมนต์กับซีเมนต์ลอยในอัตราส่วน 90:10 แล้วทดสอบกำลังกดอัดของคอนกรีต พบว่าต้องใช้เวลา 56 วัน จึงจะมีกำลังกดอัดเท่ากับที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ และจากการทดสอบการชะละลายของโลหะตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency - Extraction Procedure , USEPA - EP) แสดงว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่าในมาตรฐานน้ำดื่ม และสามารถสรุปผลการทดลองจากการหา Compressive Strength และ Leaching Test แล้วเสนอว่าสามารถใช้ซีเมนต์ลอยเป็น Secondary Construction Materials ได้

Parsa และ คณะ (1996) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก โดยจะศึกษาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนและปริมาณซีเมนต์ลอย

แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด ในการทดลองได้ใช้ซีเมนต์ลอม C-grade และ F-grade ซึ่ง C-grade จะประกอบด้วยซิลิกอน 60 - 65 เปอร์เซ็นต์ อลูมิเนียม 25 - 30 เปอร์เซ็นต์ และธาตุชนิดอื่นๆ รวมกันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วน F-grade จะมีส่วนประกอบของซิลิกอนต่ำกว่า พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมระหว่างกากตะกอนและปริมาณซีเมนต์ลอมที่เหมาะสมประมาณ 3 วินาที ที่ 1.4 - 6.9 MPa. แล้วทำการวัดปริมาณโครเมียมที่อยู่ในน้ำชะละลาย และจากการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) พบว่าปริมาณโลหะโครเมียมที่ถูกชะละลายมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EPA

งานวิจัยภายในประเทศ

นฤมิต คินิมาน (2538) ศึกษาการทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีไอดี ให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และแกลลยลิกไนต์ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความชื้นได้ โดยทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ปรอท โครเมียม และเหล็ก จากผลการทดลองพบว่า การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมแกลลยลิกไนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 เป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่โครเมียมมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวและเหล็กมีค่าต่ำมาก ปูนซีเมนต์ผสมแกลลยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท โครเมียม และเหล็ก เท่ากับ 30.7, 50 และ 90 % ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนมีค่า 3600 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักแห้ง

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์(2539) ศึกษาการใช้แกลลยลิกไนต์ในการกำจัดสี โดยศึกษาที่ใช้ในการทดลองมี 7 ประเภท ดังนี้คือ สีเอสดี, สีเบสิก, สีรีแอคทีฟ, สีซัลเฟอร์, สีไดเรกต์, สีดิสเพอร์ส และ สีฟักเมนต์ พบว่า การปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายสีในช่วง 4 - 8 ไม่ค่อยมีผลต่อการดูดซับสีของซีเมนต์ลอมมากนัก แต่ประเภทสีเอสดี มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของไอออนประจุลบ ในส่วนประกอบของสีกับผิวภายนอกของซีเมนต์ลอม และได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสี พบว่าการนำซีเมนต์ลอมไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอุณหภูมิช่วง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำในสภาพแวดล้อมธรรมชาติของประเทศไทย จะมีผลต่อการดูดซับเล็กน้อย

สำหรับค่าสารอินทรีย์ในรูปของ COD นั้น สีต่างชนิดกันจะมีค่า COD แตกต่างกัน คือมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง 42 - 146 มิลลิกรัมต่อลิตร และการใช้ซี้เถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสี จะช่วยลดค่า COD ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 20.8 - 89.4

จากการนำซี้เถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้กับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมภายหลังการบำบัดจากระบบตะกอนเร่ง จะได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียหลังจากบำบัดด้วยซี้เถ้าลอย (อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์, 2539)

รายการวิเคราะห์	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ค่าเฉลี่ย		
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	%removal
pH	8.06	9.78	8.11	10.18	8.08	9.98	-
COD(mg/l)	150.4	135.4	79.68	66.40	115	100	13.04
Color(Abs.)	0.576	0.478	0.521	0.440	0.548	0.459	16.24

บุรฉัตร ฉัต วัระ (2540) ศึกษาคุณสมบัติของบล็อกปูถนนราคาถูกโดยใช้ซี้เถ้าลอยแม่เมาะซึ่งผลิตโดยใช้เครื่องอัดคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติและจำแนกประเภทของบล็อกปูถนนที่ใช้ซี้เถ้าลอยแม่เมาะในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน รวมทั้งทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกคอนกรีตที่ใช้ Pozzolana ที่ต่างชนิดกัน โดยใช้ซี้เถ้าแกลบและซี้เถ้าจากเปลือกถั่วเป็นตัวเปรียบเทียบ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตนั้นทดสอบกับบล็อกคอนกรีตที่มีอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.10 ส่วนการทดสอบความต้านทานต่อการกด จะทดสอบกับบล็อกคอนกรีตที่มีอายุ 30 วัน และการทดสอบการดูดซึมน้ำจะทดสอบกับบล็อกคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน ส่วนการทดสอบเวลาในการก่อตัว พบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุซี้เมนต์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 2 - 8 เปอร์เซ็นต์ ตามความเหมาะสมในการหล่อ ผลการทดลองสรุปว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของซี้เถ้าจากเปลือกถั่วก็สามารถใช้ผสมแทนที่ซี้เมนต์ได้เช่นกัน

ส่วนการทดสอบความต้านทานต่อการกด จะทดสอบกับบล็อกคอนกรีตที่มีอายุ 30 วัน และการทดสอบการดูดซึมน้ำจะทดสอบกับบล็อกคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน ส่วนการทดสอบเวลาในการก่อตัว พบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุซี้เมนต์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 2 - 8 เปอร์เซ็นต์ ตามความเหมาะสมในการหล่อ ผลการทดลองสรุปว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของซี้เถ้าจากเปลือกถั่วก็สามารถใช้ผสมแทนที่ซี้เมนต์ได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ
(บุตรฉัตร ฉัตรวิระ, 2540)

Sample Code	Compressive Strength at Different Ages (MPa)			
	3 days	7 days	14 days	28 days
FA100	4.66	9.26	8.98	8.86
LMF65(1:2)	10.08	13.36	15.18	15.21
LMF75(1:3)	6.67	9.28	9.32	12.91
LMF85(1:4)	8.69	10.21	12.98	15.05
OPF25(3:1)	18.29	23.71	23.72	26.98
OPF35(2:1)	29.91	32.16	35.70	38.91
OPF45(1:1)	24.26	25.83	40.47	41.18
OPF65(1:2)	15.84	16.24	17.18	22.19

หมายเหตุ LM = Lime, F or FA = Fly Ash, OP = Ordinary Portland Cement