

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไล (Alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขเชิงอะตอม (Atomic number) ในช่วง 23-92 และอยู่ในคาบที่ 4-7

2.1.1 ตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุหมู่ IVA ของตารางธาตุ เลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 จุดเดือด 1,620 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 327.4 องศาเซลเซียส มีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร ตะกั่วบริสุทธิ์จะมีสีขาวอมฟ้า ลักษณะวาวเป็นประกาย การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วจะอยู่ในรูป PbO , Pb_3O_4 และ PbO_2 (Rochow and Abel, 1973)

ประโยชน์ของตะกั่ว

มนุษย์รู้จักใช้ตะกั่วมาเป็นเวลานาน โดยใช้สินแร่ตะกั่วได้แก่ กาลีนา (Galena, PbS) เซรัสไซต์ (Cerrusite, $PbCO_3$) และแองกลีไซต์ (Anglesite, $PbSO_4$) เนื่องจากตะกั่วมีสมบัติที่ง่ายต่อการใช้ คือ หลอมได้ง่าย มีลักษณะอ่อนมาก ง่ายต่อการตัดและขึ้นรูป จึงถูกนำมาใช้ทำเป็นแผ่นหรือท่อ ตะกั่วในรูปอนินทรีย์ใช้ทำประโยชน์มาก เช่น ใช้ทำจนวนหุ้มสายเคเบิล, จนวนกัมมันตรังสี, ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว, ใช้ทำเม็ดสี เช่น ตะกั่วขาว ($2PbCO_3$, $Pb(OH)_2$) และตะกั่วแดง (Pb_3O_4 , $CaPbO_4$, $PbCrO_4$) , ใช้เป็นสารตัวเติมในน้ำมันเบนซิน, ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตท่อน้ำและท่อพีวีซี รวมทั้งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตแบตเตอรี่และโลหะบัดกรี (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2539)

พิษของตะกั่ว

มนุษย์ได้รับพิษตะกั่วมาตั้งแต่โบราณกาล ในสมัยโรมันมีการใช้ตะกั่วทำท่อส่งน้ำ จนมีผู้สันนิษฐานว่าเหตุผลหนึ่งที่ทำให้จักรวรรดิโรมันล่มสลายเป็นเพราะพิษของตะกั่วในน้ำดื่ม และแม้แต่ในยุโรปสมัยกลางก็ใช้ตะกั่วทำหลังคา รางระบายน้ำ และท่อ ซึ่งตะกั่วในท่อส่งน้ำจะละลายเมื่อพีเอชของน้ำลดลงหรือน้ำที่มีกรดคาร์บอนิกสูง ทำให้องค์การอนามัยโลก (WHO) ต้องกำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่มให้มีค่าไม่เกิน 100 ส่วนในพันล้านส่วน

ตะกั่วเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์โดยการแพร่กระจายที่สำคัญ 2 ทาง คือ ทางห่วงโซ่อาหาร และการสูดละอองตะกั่วเข้าไป แหล่งใหญ่ของตะกั่วสู่คน ได้แก่ การปนเปื้อนในอากาศ โดยมนุษย์ได้รับตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ผ่านทางอากาศ สำหรับตะกั่วที่มนุษย์ได้รับทางน้ำและอาหารในผู้ใหญ่จะดูดซึมสู่กระแสเลือดได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ในเด็กจะดูดซึมได้สูงถึง 40-50 เปอร์เซ็นต์ สารตะกั่วจึงเป็นพิษในเด็กได้มากกว่าผู้ใหญ่ ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ที่อวัยวะต่าง ๆ เช่น สมอง ตับ ม้าม ปอด และมากที่สุดที่กระดูก สามารถอยู่ในร่างกายได้นานถึง 16-27 ปี นอกจากนี้ การเจ็บป่วยซึ่งเกิดขึ้นโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ก็เกิดขึ้นได้โดยเฉพาะในเด็ก โดยเด็กที่มีอายุระหว่าง 6 เดือนถึง 2 ขวบ มักมีอุปนิสัยที่เรียกว่า Pica คือการชอบหยิบของต่าง ๆ เข้าปาก ซึ่งมักจะเกิดกับเด็กที่ขาดธาตุเหล็ก หากเด็กเหล่านี้หยิบเศษสีที่ลอกตามฝาผนังเข้าไปทานก็จะเกิดพิษตะกั่วได้ เพราะโดยทั่วไปนั้นสีทาบ้านจะมีการผสมตะกั่วไว้เป็นจำนวนมาก ดังเช่นเด็กในสหรัฐอเมริกาปีละประมาณ 200,000 คน ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสลัมจะได้รับพิษจากตะกั่วเนื่องจากการกินเศษสีทาบ้านเข้าไป (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต, 2543)

อาการเป็นพิษแบบเฉียบพลันเนื่องจากตะกั่วมีหลายแบบ เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน กล้ามเนื้อกระดูก เป็นต้น หากได้รับตะกั่วต่อเนื่องกันเป็นเวลานานจะทำให้เกิดโรคพิษตะกั่วต่ออวัยวะและระบบต่าง ๆ ของร่างกายดังนี้

1. ระบบเลือด

ตะกั่วจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับระบบเลือด เนื่องจากตะกั่วจะเข้าขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) โดยไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เฮม (Heme) ซึ่งเป็นหน่วยที่บรรจุเหล็กอยู่ในเม็ดเลือดแดง และเข้ารบกวนการสังเคราะห์โปรตีนโกลบูลิน (Globulin protein) การสร้างเม็ดเลือดแดงที่ไขกระดูกจึงลดลง ทำให้ร่างกายมีเม็ดเลือดแดงน้อยจึงเกิดโรคโลหิตจาง ผู้ป่วยจะมีอาการซีด อ่อนเพลียง่าย

เป็นลมและมีอาการวูบง่าย นอกจากนี้ตะกั่วยังเป็นตัวการที่ทำให้เลือดมีความสามารถในการนำพาออกซิเจนลดลงอีกด้วย

2. ระบบประสาท

ตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาท ทำให้เนื้อสมองบวม ยับยั้งการทำงานของสารเคมีในสมองและทำลายเยื่อหุ้มปลายประสาท ผู้ป่วยจะมีอาการปวดศีรษะ อาจมีอาการชัก เดินเซ ควบคุมการทรงตัวไม่ดี ปวดหัวเรื้อรัง ชา อารมณ์แปรปรวน งุนงง เชื่องซึม หนาวสั่นได้ง่าย ความจำเสื่อม เป็นโรคจิตอ่อน ๆ คิดช้า ในเด็กเล็กอาจพบพัฒนาการทางสมองช้ากว่าปกติ

3. ไต

ในรายที่มีอาการรุนแรงเฉียบพลัน ท่อไตส่วนต้นจะถูกทำลาย การดูดซึมกลับของน้ำตาลที่ไตลดลง ในรายที่เป็นเรื้อรังอาจเกิดภาวะไตวายและไตพิการ

4. ระบบสืบพันธุ์

ผลของตะกั่วต่อระบบสืบพันธุ์ คือ ทำให้อสุจิของเพศชาย และไข่ของเพศหญิง ผิดปกติ ผู้ป่วยด้วยโรคพิษตะกั่วเรื้อรังจะเป็นหมัน ประจำเดือนมาผิดปกติ รวมทั้งอาการอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับระบบสืบพันธุ์ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2539 อ้างถึงใน สุรพงศ์, 2538 ; สุพิธา, 2536) นอกจากนี้ พิษของสารประกอบตะกั่วจะทำให้เกิดการแท้ง เพราะตะกั่วสามารถซึมผ่านทางรกเข้าไปถึงเด็กทารกในครรภ์ได้โดยเริ่มตั้งแต่สัปดาห์ที่ 12 ของการตั้งครรภ์ ปริมาณตะกั่วจะเพิ่มขึ้นในทารกตลอดระยะตั้งครรภ์จนครบกำหนด ตัวอ่อนของสัตว์บางชนิดเมื่อได้รับตะกั่วเข้าไปแล้วอาจพิการ เช่น ลูกไก่หลังฟักจะมีหัวใจผิดปกติ เป็นต้น (นิธิยา รัตนাপนนท์และวิบูลย์ รัตนูปนนท์, 2543)

การปนเปื้อนของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เกิดได้ทั้งจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การถลุงแร่ จากคังและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และจากไอเสียรถยนต์ที่ควันจะเป็นแหล่งแพร่กระจายที่สำคัญของตะกั่ว การปนเปื้อนของตะกั่วในดินเกิดได้จากการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครก (Sewage sludge) และอินทรีย์วัสดุเหลือใช้ (Organic waste) ต่าง ๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี เช่น

ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุเหลือใช้ในครัวเรือน (Domestic waste) ตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ จะแพร่กระจายสู่พืช สัตว์ และมนุษย์ ทั้งจากการสัมผัสกับตะกั่วโดยตรง และในวงจรของห่วงโซ่อาหาร โดยตะกั่วจะเข้าสู่พืช 2 ทาง คือ ทางรากและทางใบ เมื่อเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์ซึม ตะกั่วที่เข้าทางรากส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากฝอยและรากขนาดเล็ก ส่วนการสะสมของตะกั่วในสัตว์ มักพบในปลา กุ้ง และหอยที่อาศัยในแหล่งน้ำที่ถูกเจือปนด้วยตะกั่วอย่างรุนแรง ซึ่งจะแพร่กระจายไปสู่สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ จากการกินต่อกันเป็นทอด ๆ

2.1.2 ทองแดง

ทองแดง (Copper) เป็นธาตุหมู่ IB ของตารางธาตุ เลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 จุดเดือด 2595 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1083 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชัน +1 และ +2 ลักษณะอ่อน ดัดง่าย นำไฟฟ้าได้ดี รูปที่ละลายได้ที่พบมากที่สุดคือ Cu^{2+} (Cotton and Wilkinson, 1980)

ประโยชน์ของทองแดง

ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อน และง่ายต่อการแปรรูป จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก เช่น นำไปทำโลหะผสม เหรียญ และอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำทองแดงไปใช้เป็นส่วนผสมของยาปราบศัตรูพืช เช่น สารฆ่ารา รวมทั้งผสมทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใยและเซรามิก

พิษของทองแดง

แหล่งเป็นพิษของทองแดงในเขตเมืองส่วนใหญ่จะมาจากสีทาบ้าน ท่อน้ำดื่มที่มีทองแดงผสม ไอเสียจากโรงงานและรถยนต์ และทองแดงจากอากาศเสียดบนผิวใบไม้ เมื่อร่างกายได้รับทองแดงสะสมอยู่ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดโรค Wilson disease หากได้รับทองแดงปริมาณสูงอย่างเฉียบพลันจะเกิดอาการอาเจียน ทองร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจถึงแก่ชีวิตได้

การปนเปื้อนของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งของการปนเปื้อนทองแดงในดินที่สำคัญมี 4 แหล่งใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ ฝุ่นผงจากโรงงาน น้ำโสโครกและน้ำทิ้งจากการบำบัดน้ำเสียในเมือง น้ำจากเหมืองแร่ และจากสารฆ่าราที่เข้าทองแดง ซึ่งในดินที่มีการปนเปื้อนอาจพบทองแดงในพืชในปริมาณที่สูง ปริมาณทองแดงในพืชทั้งต้นที่ถือว่ามี การปนเปื้อนคือ 20 ส่วนในล้านส่วน โดยที่มีการสะสมทองแดงอยู่ที่รากมากที่สุด และมีในเมล็ดในปริมาณต่ำ ทองแดงที่ปนเปื้อนในดินในปริมาณสูงจะทำให้ปริมาณแบคทีเรียในดินลดลง และชะงักการเจริญเติบโตในระยะเจริญวัยของเชื้อรา อย่างไรก็ตาม โอกาสที่จะพบทองแดงในดินแพร่กระจายสู่มนุษย์นั้นแทบจะไม่มีเลย แต่มักจะมีโทษต่อพืชได้ง่าย นอกจากนี้หากมีการปนเปื้อนของทองแดงในน้ำแล้วจะมีการถ่ายทอดไปสู่ปลา ทองแดงจะเป็นอันตรายต่อปลาได้ง่ายเพราะปลาเป็นสัตว์ที่ไวต่อพิษของทองแดงมาก

2.1.3 สังกะสี

สังกะสี (Zinc) เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุ เลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 7.14 เลขออกซิเดชัน +2 สามารถทนทานต่อการผุกร่อนได้ดี (Aylett, 1973)

ประโยชน์ของสังกะสี

ประโยชน์ของสังกะสีในทางอุตสาหกรรม ได้แก่ การชุบโลหะโดยใช้สังกะสีเคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่าย การทำบรอนซ์ ทองเหลือง สี น้ำยารักษาคุณภาพไม้ และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น โลชั่นบำรุงผิว ยาสระผมกันรังแค ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค และใช้ในทางการเกษตรโดยใช้เป็นสารคลุกเมล็ดฆ่าเชื้อรา

พิษของสังกะสี

สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เยื่อบุทางเดินอาหารผุกร่อน ไตวาย โลหิตจาง ซ็อก และถึงแก่ชีวิตได้ (Bailey and Ollis, 1986)

การปนเปื้อนของสังกะสีสู่สิ่งแวดล้อม

สังกะสีที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมักจะเกิดจากน้ำโสโครก ขยะอุตสาหกรรม (Industrial waste) ปุ๋ย และสารฆ่าศัตรูพืช นอกจากนี้อุตสาหกรรมโลหะที่มีใช้แร่เหล็กและการใช้กากตะกอนน้ำโสโครกก็เป็นแหล่งปนเปื้อนสังกะสีที่สำคัญสู่ดินบน สังกะสีจะสะสมในดินบนแล้วจะถูกชะลงสู่ดินล่างเมื่อสภาพดินเป็นกรดและมีการชะละลายสูง แต่เนื่องจากสังกะสีสามารถละลายได้ดีเมื่อเทียบกับจุลธาตุอื่น ๆ ในดิน โอกาสในการปนเปื้อนสังกะสีสู่สภาพแวดล้อมอื่นจึงมีอยู่สูง เมื่อพืชดูดดึงสังกะสีจากดินไปใช้จะแสดงอาการเป็นพิษในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดการปนเปื้อนสังกะสีในดินแล้ว ครึ่งชีวิตแรก (First half life) ของสังกะสีจะใช้เวลานานกว่า 70 ถึง 81 ปี จึงจะลดปริมาณในดินลงได้ครึ่งหนึ่ง (ปิยะมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2539)

2.2 ดินลูกรัง (Lateritic soil)

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พุทธศักราช 2544 ได้ให้ความหมายของคำศัพท์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินลูกรังไว้ดังนี้

Lateritic soil ดินลูกรัง : ดินที่มีการสลายตัวและพัฒนามาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นเป็นส่วนใหญ่ มีเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณสูง อันเป็นผลมาจากกระบวนการเกิดศิลาแลง (Laterization) ส่วนใหญ่เป็นดินสีแดง น้ำตาล หรือเหลือง มักพบเม็ดลูกรังและเม็ดกรวดผสมปนอยู่

Laterite ศิลาแลง, แม่รัง : วัสดุที่ผ่านกระบวนการผุพังมาเป็นระยะเวลายาวนาน มีลักษณะเป็นรูปพรุนทั่วไป มีสีสนิมเหล็กหรือสีอิฐ ส่วนประกอบสำคัญทางเคมีของศิลาแลงคือออกไซด์ของเหล็กและ/หรืออะลูมิเนียม โดยอาจมีแร่ควอตซ์และแคลไซต์ปนอยู่ด้วย ส่วนธาตุที่เป็นต่างและซิลิกेटมีอยู่น้อยมาก หากมีสารประกอบเหล็กอยู่มากพอก็อาจนำไปใช้เป็นวัตถุดิบถลุงเอาเหล็ก หรือหากมีสารประกอบอะลูมิเนียมมากพอก็อาจนำไปถลุงเอาโลหะอะลูมิเนียมได้ ศิลาแลงมีลักษณะเด่นคือเป็นรูปพรุนทั่วไป และมีเนื้อเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์มากกว่าอะลูมิเนียมออกไซด์

ศิลาแลงที่พบในประเทศไทยมีอยู่ 2 แบบ คือ

1. แบบที่เชื่อมยึดจับตัวกันแน่นหรือเป็นแผ่นต่อเนื่องเป็นฟืด เรียกว่าศิลาแลงหรือแม่รัง มักพบเป็นฟืดใหญ่อยู่ใต้หน้าดินธรรมชาติ ลักษณะที่สำคัญคือขณะที่เปิดหน้าดินลงไปถึงตัวศิลาแลงนั้นจะพบว่าไม่แข็งนัก สามารถใช้ขวานหรือเหล็กสกัดหรือใช้ชะแลงเบ็กร่องเซาะงัดออก

เป็นแหล่งสีเหลืองมใหญ่ ๆ ได้ แหล่งศิลาแลงนี้เมื่อยกขึ้นมาแล้วจะต้องรีบตากด้วยขวานหรือมีดหนัก ๆ ให้เข้ารูปตามต้องการก่อนจะแข็งตัว เมื่อปล่อยให้แห้งสนิทแล้วจะแข็งตัวขึ้นกว่าเดิมมากมายจนใช้วางเรียงเป็นอิฐ สิ่งก่อสร้าง หรือประกอบทำโต๊ะได้ ดังจะเห็นได้จากลานพื้น กำแพงผนัง หรือ พระปรางค์ในโบราณสถานต่าง ๆ แม้ในปัจจุบันนี้ทางจังหวัดเชียงใหม่ก็นิยมผลิตขึ้นมาใช้ก่อสร้างวัด กำแพงบ้าน หรือทำเครื่องประดับต่าง ๆ ตกแต่งสวนหรือตัวสิ่งปลูกสร้าง

2. แบบที่เกาะตัวกันแบบหลวม ๆ ลักษณะร่วน เรียกว่า ลูกรัง นิยมใช้ทำถนนหนทาง เพราะเมื่อได้รับการบดอัดและชื้นขึ้นด้วยน้ำแล้วจะจับตัวกันแน่นดีกว่าดินหรือทรายธรรมดา (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

นอกจากนี้ยังมีความหมายของคำศัพท์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินลูกรังดังต่อไปนี้ (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์และวุฒิชัย วัชวุฒิกเกียรติ, 2528 อ้างถึงใน Alexander and Cady, 1962)

1. Laterite rock หมายถึง ลูกรังที่เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ จะแสดงสมบัติเป็นหินมากกว่าดิน เช่น หินศิลาแลง เป็นต้น
2. Laterite gravel หมายถึง ลูกรังที่มีลักษณะคล้าย laterite rock แต่เป็นเม็ดแข็งขนาดเม็ดหยาบ ไม่ได้มีการรวมตัวเป็นก้อนอย่าง laterite rock
3. Sesquioxides หรือ เซสควิออกไซด์ หมายถึง Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของลูกรัง
4. Latosols หรือ แลโทซอลส์ หมายถึง กลุ่มดินหนึ่งในอันดับดินโซนัล (Zonal soil order) ตามระบบการจำแนกดินของกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา พ.ศ.2481 เป็นดินสีแดงสมบัติทางกายภาพดี มีการเกาะยึดตัวของอนุภาคดินดี มีความจุในการแลกเปลี่ยนเบสต่ำ เนื้อดินเป็นดินเหนียวประเภทกิจกรรมต่ำ (Low activity clay) ดินมีการพัฒนามาเป็นระยะเวลายาวนาน มีเหล็กและอะลูมิเนียมในปริมาณสูง มีแร่ที่ละลายตัวง่ายอยู่น้อยมาก ส่วนมากพบในบริเวณที่เป็นป่าไม้และมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

ดินลูกรังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตรมรสุมซึ่งมีอากาศร้อนและฝนตกชุก ทำให้ประเทศไทยเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของศิลาแลงและดินลูกรังแหล่งหนึ่งของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีแหล่งของศิลาแลงและดินลูกรังเกิดแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้างตลอดทั้งภาค ดินลูกรังจะมีขนาดใหญ่เล็กแปรเปลี่ยนไปตามชั้นดินและบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดของดินลูกรัง ปัจจัยดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ดินลูกรังมีคุณสมบัติแปรเปลี่ยนได้ตั้งแต่ดีมากไปจนถึงเลวมาก

2.2.1 การเกิดศิลาแลง (Laterization)

กระบวนการเริ่มต้นของการเกิดศิลาแลงคือ กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อน (Tropical weathering) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และเคมีฟิสิกส์ อันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของแร่ในหินต้นกำเนิด เกิดเป็นแร่ดินเหนียวประเภทสองชั้น (Two layer clay minerals) และออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของลูกรัง ได้แก่ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 และ MnO_2 สะสมอยู่ในปริมาณสูง กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. กระบวนการสลายตัวทางเคมี (Decomposition) เป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่ทำให้แร่เดิมในหินถูกทำลายและทำให้เกิดสารใหม่ประเภทออกไซด์ต่าง ๆ เช่น SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O เป็นต้น ซึ่งปรากฏในรูปของอนินทรียสาร

2. กระบวนการก่อกำเนิดลูกรัง (Laterization) เป็นกระบวนการที่ SiO_2 ถูกชะล้างพัดพาออกไปภายใต้สภาวะการระบายน้ำที่เหมาะสม เหลือ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 และ MnO_2 ไว้เป็นส่วนใหญ่

กระบวนการทั้งสองกระบวนการจะเกิดตามธรรมชาติ กระบวนการทางเคมีฟิสิกส์จะมีผลทำให้เกิดแร่ดินเหนียวในกลุ่มของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite group) เป็นสำคัญ ภายใต้กระบวนการสลายตัวทางเคมีฟิสิกส์ที่ยาวนาน แร่ดินเหนียวและซิลิกาจะถูกชะล้างพัดพาออกไปจากมวลดิน เหลือสารที่เป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียม เช่น ยิบไซต์ (Gibbsite) หรือออกไซด์ของเหล็ก เช่น โลมอไนต์ (Limonite) หรือ เกอไทต์ (Goethite) กระบวนการชะล้างพัดพาดังกล่าวนี้รู้จักกันโดยทั่วไปว่า กระบวนการเกิดศิลาแลง (Laterization process)

3. กระบวนการสูญเสียความชื้นตามธรรมชาติ (Dehydration and Desiccation) เป็นกระบวนการที่เกิดการสูญเสียความชื้นในเซสควออกไซด์บางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้เกิดการแข็งตัว นอกจากนี้การสูญเสียความชื้นในสารละลายที่มีเหล็กออกไซด์ปนอยู่ในสภาพของคอลลอยด์ จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นและเกิดการตกผลึกของเหล็กออกไซด์ อันเป็นผลให้เกิดออกไซด์ของเหล็กในรูปของโลมอไนต์ ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), เกอไทต์ (FeOOH) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)

ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นในลูกรังเนื่องมาจากการที่ออกไซด์ของเหล็กทั้งสามชนิดดังกล่าว เคลือบอยู่บนอนุภาคดิน กระบวนการก่อกำเนิดลูกรังอันยาวนานจะทำให้ปริมาณของเหล็กออกไซด์ รอบ ๆ อนุภาคดินเพิ่มหนามากขึ้นจนกลายเป็นเม็ดลูกรังที่เรียกว่า Laterite gravel (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และวุฒิชัย วัชรวิเชียร, 2528)

2.2.2 สีของดินลูกรัง

ดินลูกรังส่วนใหญ่มักจะมีสีแดง และจะมีสีแดงเข้มหรือสีแดงอ่อนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ที่เป็นส่วนประกอบของออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และแมงกานีส โดยทั่ว ๆ ไป สีของดินเกิดจาก

1. สารอินทรีย์ ดินจะมีสีดำ น้ำตาล และเทา
2. แร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของดินลูกรัง
 - แร่เหล็ก ดินจะมีสีแดง ส้ม เหลือง น้ำเงิน และเขียว
 - แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโปแตสเซียม ดินจะมีสีขาว
 - อะลูมิเนียม ดินจะมีสีขาว
 - แมงกานีส ดินจะมีสีดำ และน้ำตาล

นอกจากนี้ จะพบว่าบริเวณเชิงลาดสูงสุดของเนินเขาที่มีการระบายน้ำดี มักมีดินลูกรังที่มีสีแดงไปจนถึงน้ำตาลแกมแดง หรือสีแดงแกมน้ำตาล และบางครั้งอาจมีสีแดงสดหรือสีแดงแกมม่วง สีแดงเหล่านี้แสดงถึงการมีเหล็กออกไซด์ประเภทฮีมาไทต์ในดิน ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่พบได้ทั่วไปในดินบริเวณพื้นที่ที่มีสภาพอากาศร้อนไม่ว่าจะเป็นแบบร้อนชื้นหรือร้อนแห้งแล้ง (McBride, 1994) ในบริเวณตอนกลางของเนินเขาและที่ต่ำลงมา การระบายน้ำจะดีน้อยกว่าบริเวณสูงสุดของเนินเขา ทำให้ดินมีความชื้นนานและปริมาณน้ำที่เป็นส่วนประกอบของเหล็กในดินจะมากขึ้น ดินลูกรังจะมีสีน้ำตาลหรือสีเหลืองมากกว่าสีแดง เหล็กออกไซด์ในดินลูกรังบริเวณนี้ส่วนใหญ่จะเป็นฮีมาไทต์และไลมอไนต์ แสดงให้เห็นว่ายิ่งต่ำลงมาดินจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลแกมแดงมาเป็นสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลแกมส้มจนถึงสีน้ำตาลแกมเหลือง หรือเหลืองแกมน้ำตาล

2.2.3 สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง

1. พีเอชของดินลูกรังจะเปลี่ยนแปลงไปตามความลึก แต่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4-8 แสดงว่าดินลูกรังจะเกิดในบริเวณที่มีสภาวะเป็นกรด

2. ดินลูกรังจะมีเหล็กเป็นแร่ธาตุพื้นฐานที่สำคัญอยู่ในปริมาณ 20-90 เปอร์เซ็นต์ โดยอยู่ในรูปของออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) หรือแร่ฮีมาไทต์ (Tan, 1996)
3. ดินลูกรังจะมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ โดยจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 ที่ชั้นผิวดิน
4. ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินลูกรังจะมีมากน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพืชพรรณ เมื่อเกิดการชะล้างและกระบวนการก่อกำเนิดดินลูกรังมากขึ้น ปริมาณคาร์บอเนตในดินจะน้อยลง
5. ดินลูกรังส่วนใหญ่จะมีการกระจายขนาดเม็ดดี จัดเป็นพวกดินที่มีขนาดคละดี
6. ดินลูกรังจะมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.67 ถึง 3.46 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กออกไซด์ที่ประกอบอยู่ในดินลูกรัง ถ้าในดินลูกรังมีปริมาณของเหล็กออกไซด์มากก็จะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากด้วย
7. ดินลูกรังมีคุณสมบัติในการแข็งตัวได้เองเมื่อสูญเสียความชื้นในตัวเอง ที่เรียกว่า Self-hardening property และจะไม่คืนสู่สภาพเดิมภายหลังจากรับความชื้นเพิ่มเติมเข้าไปใหม่

2.2.4 การสำรวจแหล่งดินลูกรังในประเทศไทย

ในปี พ.ศ.2512 ได้มีการสำรวจแหล่งดินลูกรังในประเทศไทยโดย Vallerga และ Rananand จนได้ข้อสรุปดังนี้

1. ในประเทศไทยจะพบดินลูกรังมากกว่าลูกรัง ดินลูกรังที่พบมักจะพบในลักษณะของกรวด (Gravel) ทราย (Sand) ดินตะกอน (Silty) และดินเหนียว (Clay) ที่มีออกไซด์ของเหล็กปนอยู่ในปริมาณสูง ลูกรังที่จับเกาะกันเป็นก้อนใหญ่จะไม่ค่อยพบบ่อยนัก
2. ดินลูกรังที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวงมักจะได้รับการขุดและการดินผสมเป็นกองอันประกอบไปด้วยดินตะกอนและดินเหนียวที่มีเหล็กออกไซด์ปริมาณสูงผสมรวมกันกับเม็ดลูกรังซึ่งมีความแข็งแตกต่างกัน ลูกรังที่เกิดเป็นก้อนใหญ่หรือเป็นผืดแข็งติดต่อกันจะไม่นำมาใช้ในการก่อสร้างทางหลวง
3. สภาวะที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดดินลูกรังในประเทศไทยได้แก่สภาวะที่มีแร่เหล็กหรืออะลูมิเนียมเกิดสะสมอยู่ในปริมาณสูง อย่างน้อยที่สุดร้อยละ 1-2 สภาวะที่ดินมีการระบายน้ำดี สภาวะที่มีออกซิเจนในน้ำใต้ดินสูง และสภาวะที่สิ่งแวดล้อมมีสภาพเป็นกรด รวมทั้งสภาวะที่ภูมิประเทศมีความเหมาะสมที่จะก่อให้เกิดการชะล้างในชั้นดินได้ดี
4. ความแข็งแรงของเม็ดดินลูกรังอาจจะเพิ่มขึ้นได้ภายหลังจากการขุดและการแผ่ดินลูกรังแล้วปล่อยให้ไวกกลางแจ้งเพื่อให้ดินลูกรังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศ วงจรของ

การเปียกสลับกับแห้งจะช่วยให้ออกซิเจนแทรกซึมลึกเข้าไปในเม็ดลูกรังและเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง อันทำให้เม็ดลูกรังแข็งมากยิ่งขึ้น

5. ดินลูกรังเป็นวัสดุก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง พื้นทาง และผิวทางชั่วคราวได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทยมีความต้านทานต่อการสลายตัวในน้ำได้สูงมาก ทั้งนี้เมื่อกล่าวโดยทั่วไปแล้วเป็นที่เข้าใจกันว่าดินส่วนใหญ่ที่เกิดในแถบร้อนและชุ่มชื้นจะมีแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นพวกเคโอลิไนต์และพวกไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นเพราะดินพวกนี้เป็นดินที่มีอายุมาก แร่ดินเหนียวที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จึงเป็นพวกที่ยากต่อการสลายตัวผุพังได้ต่อไป แร่ดินเหนียวที่คงทนและผุพังสลายตัวได้ยากที่สุดได้แก่พวกออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม รองลงมาได้แก่เคโอลิไนต์, มอนต์มอริลโลไนต์, เวอร์มิคิวไลต์ และอิลไลต์ตามลำดับ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ดินลูกรังเป็นดินที่มีไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมประกอบอยู่เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นดินลูกรังจึงเป็นวัสดุที่มีความคงตัวสูง สามารถใช้เป็นพื้นทางของถนนในบริเวณที่มีฝนตกชุกได้ เพราะแม้ว่าจะอยู่ในบริเวณที่มีความชื้นสูง ดินลูกรังก็ยังคงสภาพเป็นเม็ดแข็งโดยไม่มีแนวโน้มที่จะแตกตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ดินลูกรังจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นผิวทางชั่วคราวของถนนที่ไม่ได้ลาดยาง เพราะเม็ดลูกรังจะไม่แตกเป็นเม็ดละเอียดเมื่อถูกน้ำหรือความชื้นในอากาศ

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูด (Sorptions) เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อมและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ช่วยให้เข้าใจถึงความเป็นไปและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังนำไปใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อน การดูดมักใช้ในความเข้าใจที่ว่าเป็นการเคลื่อนที่หรือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากวัฏภาคหนึ่งไปสู่อีกวัฏภาคหนึ่ง (Sawyer et al., 1994) โดยทั่วไปการดูดมี 2 ชนิด คือ การดูดซับ (Adsorption) และการดูดซึม (Absorption)

1. การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้า (Surface phenomenon) โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) โดยมีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ ส่วนอีกวัฏภาคหนึ่งจะมีไอออนหรือโมเลกุลที่มีแนวโน้มในการจับตัวกันอยู่บนผิวหน้าของวัฏภาคของแข็ง การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ

2. การดูดซึม (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Bulk phenomenon) โดยเกิดขึ้นทั่วทั้งวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น การดูดซึมของก๊าซออกซิเจนสู่น้ำ และการดูดซึมของดีดีทีสู่ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน เป็นต้น

ระบบการดูดซับที่ประกอบด้วยวัสดุภาคเดียวเรียกว่า ระบบเนื้อเดียว (Homogeneous system) และถ้าประกอบด้วยหลายวัสดุภาคเรียกว่า ระบบเนื้อผสม (Heterogeneous system) โดยมีขอบเขตระหว่างวัสดุภาคเรียกว่าผิวสัมผัส (Interface) โดยที่ระบบเนื้อผสมนี้อาจอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่สมดุลก็ได้ ในระบบเนื้อผสมซึ่งประกอบด้วยโมเลกุล อะตอม และไอออน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุภาคจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสก่อน และเมื่อโมเลกุลที่เคลื่อนที่แบบจลน์กระทบพื้นผิวใด ๆ โมเลกุลอาจสะท้อนกลับออกจากพื้นผิวเป็นมุมเท่ากับที่ตกกระทบ หรืออาจอยู่ที่พื้นผิวช่วงเวลาหนึ่ง และกลับออกมาในทิศทางที่ไม่ขึ้นกับทิศทางที่เข้ามา ซึ่งจะเป็นกรณีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น โดยเวลาช่วงที่อยู่บนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวและโมเลกุล อุณหภูมิของพื้นผิว และพลังงานจลน์ของโมเลกุล

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิว สามารถพบได้ที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง-แก๊ส, ของเหลว-แก๊ส, ของเหลว-ของแข็ง, ของเหลว-ของเหลว และของแข็ง-ของแข็ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสนี้จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากวัสดุภาคหนึ่งไปยังอีกวัสดุภาคหนึ่ง (ปิยะพร บารมี, 2542)

2.3.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลว สารที่ไปเกาะเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งหรือของเหลวที่พื้นผิวของมันถูกสารนั้นเกาะเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

การดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็ง การดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพ (Physisorption) และทางเคมี (Chemisorption) เมื่อโมเลกุลในวัสดุภาคแก๊ส (Gas phase) หรือวัสดุภาคของเหลว (Liquid phase) ยึดติดกับผิวของของแข็ง เนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) เกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attractive force) อย่างอ่อน ๆ ระหว่างโมเลกุลซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยว

ระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับด้วยการดึงดูดของแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองโดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดชั้นหลาย ๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร การดูดซับทางกายภาพนี้จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดส่วนที่หนาและผันกลับไม่ได้ (Irreversible) การดูดซับทางกายภาพมักจะเป็นแบบไม่เฉพาะ (Nonspecific) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้จะไม่ติดต่อกับเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการเคลื่อนที่อยู่นอกระบบผิวหน้านั้น (Sawyer et al., 1994) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นตรงกับอุณหภูมิและค่าไอออนิกสเตรงท์ (Ionic strength) ของสารละลาย แต่มักจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (pH) และสารเชิงซ้อนที่ปะปนอยู่ในวัฏภาคของเหลว (Allard et al., 1987) ทั้งนี้ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะสามารถผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยจะสามารถเกิดการปลดปล่อยหรือคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (Desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในปริมาณมาก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะทำให้เกิดการคายความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว (พล. สาททอง, 2518)

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเป็นแรงที่แข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะ ณ บริเวณเฉพาะ (Specific) ใด ๆ บนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็ง เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี อาจเกิดการดูดซับได้ช้าและผันกลับไม่ได้เป็นบางส่วน โดยทั่วไปสารที่ถูกดูดซับจะเกิดเป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) เนื้อผิวหน้าของสารดูดซับโดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจากบริเวณผิวหน้านั้นไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุล 1 ชั้นแล้วความสามารถในการดูดซับของมันจะลดลง จึงเกิดการผันกลับได้ยากนอกจากจะมีการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูง ๆ แล้วสารที่ถูกดูดซับจึงจะแยกตัวออกมาจากสารดูดซับได้ (Sawyer et al., 1994) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) รวมทั้งยังมีการใช้พลังงานความร้อนในการผันกลับของปฏิกิริยาด้วย ทั้งนี้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นผิวของของแข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย (Allard et al., 1987)

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการดูดซับอีกประเภทหนึ่งคือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับที่บอกลักษณะด้วยการดึงดูดทางไฟฟ้า ระหว่างสารถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ โดยที่การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของการดูดซับประเภทนี้เช่นกัน กล่าวคือ ไอออนของสารถูกดูดซับซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวหน้าเป็นผลมาจากการดึงดูดทางศักย์ไฟฟ้า (Electrostatic attraction) ซึ่งดึงดูดไอออนสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ รวมทั้ง ไอออนของสารถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันซึ่งแปะติดอยู่กับสารดูดซับ โดยทั่วไปนั้น ไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนต์ (Trivalent ions) จะถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนแบบโมนอวาเลนต์ (Monovalent ions) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ นอกจากนี้ ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมา แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะตัดสินว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารดูดซับใด ๆ จะมีการดูดซับแบบใดแบบหนึ่งที่กล่าวมาเกิดขึ้นเพียงแบบเดียวบนสารดูดซับนั้น (Sawyer et al., 1994)

การดูดซับทางกายภาพจะต่างจากการดูดซับทางเคมีตามข้อกำหนดเหล่านี้คือ

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำโดยมีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมีที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (Multimolecular layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่หนึ่งแล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย (ปิยะพร บารมี, 2542)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. สารดูดซับ ได้แก่ ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ขนาดรูพรุน (Pore size) และองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของสารดูดซับ
2. สารที่ถูกดูดซับ ได้แก่ ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น ขนาดของโมเลกุล ความมีขั้วของโมเลกุล องค์ประกอบทางเคมีของสารที่ถูกดูดซับ เป็นต้น
3. ความดันหรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ
4. ภาวะในระบบของการดูดซับ เช่น พีเอช ปริมาณสารเชิงซ้อน ปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่และไอออนิกสเตรนธ์ของวัฏภาคของเหลว อุณหภูมิของระบบ เป็นต้น
5. เวลาที่อยู่ในระบบ

2.3.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption)

ลักษณะของการดูดซับหรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารปนเปื้อน มี 3 ขั้นตอนสำคัญ คือ

1. การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับจากวัฏภาคของเหลวหรือแก๊สเข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับหรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ
2. การแพร่กระจายของมวลสารที่ถูกดูดซับจากรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ
3. การดูดซับคือการทำโมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับจากสารละลายไปแปะติดอยู่ที่วัฏภาคของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ 2 ขั้นตอนที่ผ่านมา คาดว่าภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองนี้

2.3.4 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกกำจัดอย่างหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลานาน ดังที่ทราบได้จากการใช้ถ่านเพื่อกำจัดกลิ่นและรสของน้ำซึ่งมีการบันทึกไว้เป็นภาษาสันสกฤตมานานกว่า 2,000 ปี การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่เริ่มจากที่มีผู้ค้นพบว่าถ่านสามารถกำจัดสีของสารละลายได้ จึงมีการพัฒนาคุณสมบัติของถ่านเรื่อยมาจนกระทั่งได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษ การดูดซับจึงจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม (Tien, 1994)

ประโยชน์จากการดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น

- การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากน้ำดื่ม เช่น สารพวกไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) สารปราบศัตรูพืช และสารประกอบอินทรีย์คลอรีนต่าง ๆ (Chlorinated organic compounds)
- การกำจัดกลิ่น รส และสีออกจากน้ำดื่ม
- การกำจัดสีออกจากน้ำมันพืช
- การบำบัดน้ำเสียหรือของเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical process) หรือในกระบวนการบำบัดขั้นที่ 3 (Tertiary treatment)
- แยกพาร์ฟินและไอโซพาร์ฟินออกจากกัน

2.4 การดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ

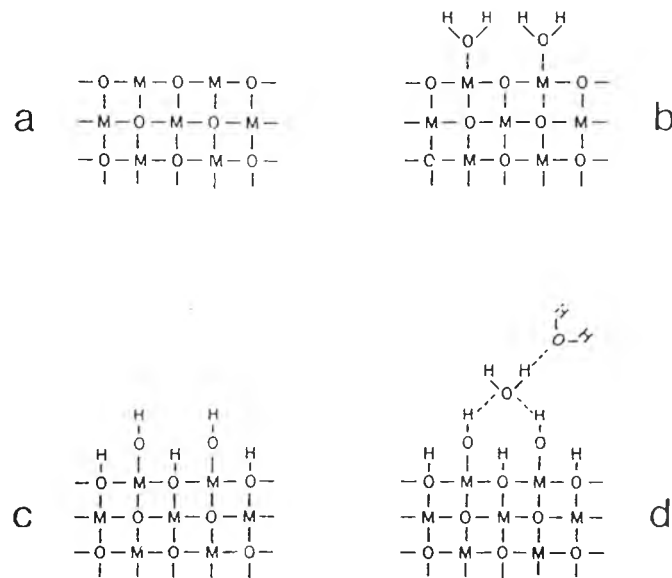
ไฮดรอกไซด์ของโลหะ (Hydrous metal oxide) คือ ของแข็งที่ในตัวของมันเองมีส่วนประกอบที่เป็นไอออนบวกของโลหะตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปรวมอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์ของโลหะจึงครอบคลุมถึงสารประกอบโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) เนื่องจากเป็นสารซึ่งมีลักษณะทางเคมีของบริเวณผิวหน้าที่ถูกไฮเดรต (Hydrate) ได้ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Kinniburgh and Jackson, 1981)

การดูดซับไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาไม่กี่นาที การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของพื้นผิวที่พร้อมจะรับไอออนจากสารละลาย โดยที่การดูดซับตัวถูกละลายบนไฮดรอกไซด์จะเกิดได้ดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติต่าง ๆ ทางกายภาพและเคมีของแร่ธาตุนั้น ๆ ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ลักษณะสมบัติเหล่านี้จะรวมไปถึงส่วนประกอบทางเคมี รูปร่างลักษณะของสาร การกระจายขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวสัมผัส และความพรุน รวมทั้งธรรมชาติและปริมาณของบริเวณพื้นผิวที่ดูดซับได้ นอกจากนี้ การดูดซับไอออนต่าง ๆ บนไฮดรอกไซด์ยังขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายเป็นอย่างมาก โดยการดูดซับไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นตามพีเอช ส่วนการดูดซับไอออนลบนั้นจะมีค่าสูงสุดที่พีเอชต่ำ ๆ และจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Dzombak and Morel, 1990) ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนต่าง ๆ บนไฮดรอกไซด์ของโลหะ เช่น ไอออนิกสเตรงธ์ของสารละลาย ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ และไอออนอื่น ๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งจะเข้ามาเป็น

ตัวแข่งขันในการดูดซับบนไฮดรอกไซด์ของโลหะ (Benjamin and Leckie, 1980 ; Kinniburgh and Jackson, 1981)

2.4.1 กลไกในการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์

เมื่อออกไซด์ของโลหะสัมผัสกับน้ำจะเกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่ผิวของโลหะจากการดูดซับที่แยกโมเลกุลของน้ำออกจากกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ

จากรูปที่ 2.1 ในขั้นแรก (รูป a) ไอออนของโลหะในชั้นผิวหน้าของออกไซด์ที่ยังแห่งอยู่จะยังไม่มีโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับ เมื่อโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับกับบริเวณที่ยังว่างอยู่ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเกิดพันธะได้โดยการดูดซับทางเคมี (รูป b) จะทำให้ผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอน (H) ที่เคลื่อนย้ายมาจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้แล้ว โดยโปรตอนดังกล่าวนี้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมาสู่ออกซิเจนไอออนที่ประกอบอยู่ในชั้นผิว (รูป c) โดยอาจมีการดูดซับน้ำเข้าไปเพิ่มเติมได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (รูป d) (Dzombak and Morel, 1990)

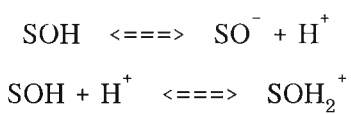
ไฮดรอกไซด์ของโลหะจะแสดงพฤติกรรมแบบที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) ในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของออกไซด์สามารถจะยึดหรือปล่อยโปรตอนได้

ทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโยกย้ายโปรตอนมีประจุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมัน (Dzombak and Morel, 1990) ความเป็นกรดของพื้นผิวเป็นสมบัติที่สำคัญของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีการมี หมู่ฟังก์ชันที่ผิวจะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับชนิดและขอบเขตของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนที่มีการเชื่อมต่อของผิว (Interfacial reaction) เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับและการจับตัวเป็นก้อน บริเวณ ซึ่งเป็นกรดบนพื้นผิวแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (Leckie, 1986)

1. บริเวณที่เป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis acid site) เป็นบริเวณที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เช่น บริเวณที่เป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ซึ่งอยู่ในขอบของผลึก
2. บริเวณที่เป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted acid site) เป็นบริเวณที่ให้โปรตอน เช่น $Si-OH$, $Fe-OH$, $Al-OH$ หรือ H_3O^+

ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งกรดและเบสดังที่กล่าวมา สามารถเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่น ๆ ของสารละลาย ปฏิกิริยากรด-เบสที่เกิดขึ้นบนผิวของออกไซด์ของโลหะจะสามารถอธิบายถึงลักษณะได้จากการได้รับหรือสูญเสียโปรตอนมากกว่าที่จะอธิบายด้วยการแลกเปลี่ยนไฮดรอกซิลไอออน

ปฏิกิริยาที่ใช้อธิบาย คือ



โดยที่ SOH คือ หมู่ไฮดรอกซิลทั่วไปบนผิวของออกไซด์ของโลหะหลังจากสัมผัสกับน้ำ

ดังนั้นปฏิกิริยาที่โปรตอนถูกแทนที่โดยไอออนของโลหะหรือลิแกนด์เพื่อที่จะแลกเปลี่ยนภายในหมู่ไฮดรอกซิลจะมีลักษณะเดียวกับการเกิดสารเชิงซ้อน ดังแสดงในตารางที่ 1

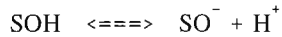
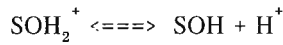
2.4.2 การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์จากกระบวนการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ

การศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางเคมีของไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก โดยมีการศึกษาทดลองเพื่อนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย ดังนี้ (Kinniburgh and Jackson, 1981)

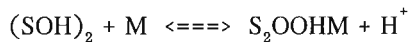
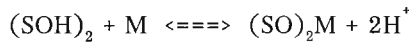
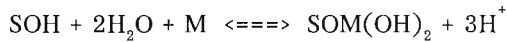
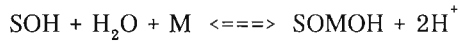
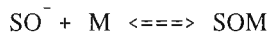
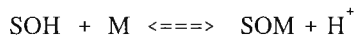
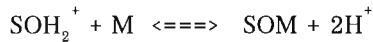
ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้บนพื้นผิวซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันออกไซด์กับตัวถูกละลาย
(Leckie, 1986)

Surface Reactions

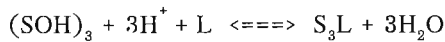
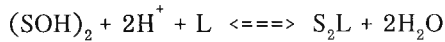
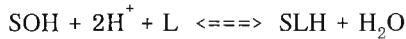
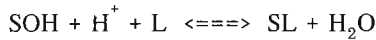
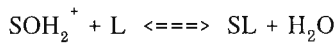
Proton/Surface Reactions



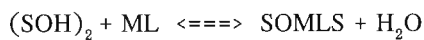
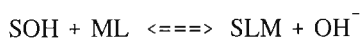
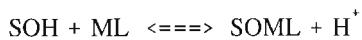
Metal/Surface Reactions (Inner-Sphere)



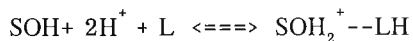
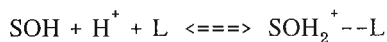
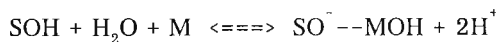
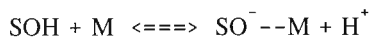
Ligand/Surface Reactions (Inner-Sphere)



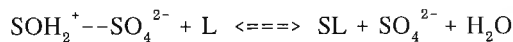
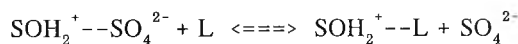
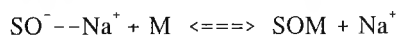
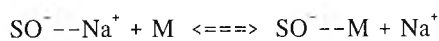
Mixed Ligand (Ternary) Reactions (Inner-Sphere)



Ion Pair Reactions (Outer-Sphere)



Exchange Reactions



ด้านวิศวกรรม เช่น การแยกแร่, การบำบัดน้ำเสีย และการผสมโลหะ

ด้านการแพทย์ เช่น การใช้ในทางเภสัชกรรมเพื่อทำยาแก้ท้องเฟ้อ

ด้านวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม มีการศึกษาด้านต่าง ๆ คือ

- ดิน : การกักประจุลบ มลพิษทางดินที่เกิดจากโลหะหนัก ความเป็นกรดของดิน เสถียรภาพของดิน เป็นต้น
- แม่น้ำ : การสำรวจด้านเคมีทางธรณีวิทยาของแม่น้ำ การเคลื่อนย้ายของสารอาหาร และของเสียต่าง ๆ จากการดูดซับ เป็นต้น
- ทะเลสาบ : การกักและปลดปล่อยสารอาหารในทะเลสาบ การฟื้นฟูสภาพของ ทะเลสาบ เป็นต้น
- มหาสมุทร : ศึกษาอัตราการเกิดตะกอนของมหาสมุทร การดูดจับโลหะที่เป็น จุลธาตุในมหาสมุทร เป็นต้น

การศึกษาวิจัยเพื่อนำไฮดรอกไซด์ของโลหะไปใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมและ วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อมนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยมักจะเป็นการศึกษาเพื่อบำบัดน้ำเสียโดย การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษและโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูป ต่าง ๆ รวมทั้งการศึกษาสภาพการดูดซับโลหะหนักในดินและตะกอนซึ่งมีแร่ในรูปไฮดรอกไซด์ ของโลหะเป็นส่วนประกอบ งานวิจัยต่าง ๆ มีดังนี้

Aualitia และ Pickering (1987) ศึกษาการดูดซับทองแดง ปรอท และแคดเมียม ปริมาณน้อยด้วยสารอนินทรีย์บางชนิดได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส ($\alpha\text{-MnO}_2$), อะลูมิเนียม (Al(OH)_3) และเหล็ก (Fe(OH)_3) รวมทั้งสินแร่เหล็กและแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ฮีมาไทต์, โลมอไนต์, เคโอลิไนต์, อิลไลต์ และมอนต์โมริลโลไนต์ โดยแปรผันความเข้มข้น ของสารละลายโลหะให้อยู่ในช่วง 10-100 ไมโครกรัมต่อลิตร และพีเอช 3-9 พบว่าการดูดซับ จะเพิ่มขึ้นตาม pH ที่สูงขึ้น โดยมีลำดับในการดูดซับทั่วไปคือ สารที่ถูกดูดซับ $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ และ สารดูดซับ $\alpha\text{-MnO}_2 > \text{Fe(OH)}_3 > \text{Al(OH)}_3 > \text{แร่ดินเหนียว} > \text{สินแร่เหล็ก}$

Chakravarty, Prasad และ Raupainwar (1998) ศึกษาการกำจัดทองแดงด้วย ฮีมาไทต์ขนาดอนุภาค 200 ไมโครเมตร ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ Fe_2O_3 80%, CaO 4.80% และ SiO_2 4.0% ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้สารละลายทองแดงซึ่งเตรียมจาก

$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีการแปรผันค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-9 เขย่าเป็นเวลานาน 15-135 นาที พบว่าฮีมาไทต์สามารถดูดซับทองแดงได้ตั้งแต่พีเอช 3 โดยเริ่มมีจุดอิ่มตัวซึ่งการดูดซับจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 75 นาที ในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นและค่าพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงพีเอช 7.8-9 จะไม่มีความแตกต่างของปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับ

Kinniburgh, Jackson และ Syers (1976) ศึกษาการดูดซับธาตุหมู่ที่ 2, ธาตุทรานซิชัน และโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมซึ่งเตรียมขึ้นในรูปเจลจากการตกตะกอน สารถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาได้แก่ Mg, Ca, Ba, Sr, Pb, Cu, Zn, Ni, Cd และ Co เตรียมขึ้นในรูปสารละลายซึ่งมีสารเหล่านี้ผสมกันอยู่อย่างละ 0.125×10^{-3} โมล ปรับค่าพีเอชให้แปรผันในช่วง 3-10 พบว่าลำดับในการเลือกดูดซับไอออนบวกของธาตุหมู่ที่ 2 โดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กคือ $\text{Ba} > \text{Ca} > \text{Sr} > \text{Mg}$ โดยไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมคือ $\text{Mg} > \text{Ca} > \text{Sr} > \text{Ba}$ โดยที่การเลือกดูดซับของสารดูดซับทั้งสองจะยิ่งเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อค่าพีเอชต่ำลง และพบว่าลำดับในการเลือกดูดซับธาตุทรานซิชันและโลหะหนักโดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กคือ $\text{Pb}(3.1) > \text{Cu}(4.4) > \text{Zn}(5.4) > \text{Ni}(5.6) > \text{Cd}(5.8) > \text{Co}(6.0) > \text{Sr}(7.4) > \text{Mg}(7.8)$ โดยอะลูมิเนียม คือ $\text{Cu}(4.8) > \text{Pb}(5.2) > \text{Zn}(5.6) > \text{Ni}(6.3) > \text{Co}(6.5) > \text{Cd}(6.6) > \text{Mg}(8.1) > \text{Sr}(9.2)$ ตัวเลขในวงเล็บคือค่าพีเอชในช่วง ± 0.2 ซึ่งสารนั้นจะถูกดูดซับได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

Kalbasi, Racz และ Loewen-Rudgers (1978) ศึกษาการดูดซับสังกะสีโดยเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ทดลองโดยใช้ Al_2O_3 (Corundum) และ Fe_2O_3 (Hematite) ขนาด 270 mesh เป็นสารดูดซับสังกะสีจากสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 80 พีพีเอ็ม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าพีเอชด้วย 0.01N NaOH 1-12 มิลลิลิตร โดยเขย่านาน 24 ชั่วโมง พบว่าการดูดซับขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเป็นอย่างมาก โดยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามพีเอชที่สูงขึ้น และยังพบว่า Fe_2O_3 สามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่า Al_2O_3 ที่ระดับพีเอชเดียวกัน

Orumwense (1995) ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำโดยการดูดซับด้วยดินเหนียวประเภทเคโอลินิต์ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็น SiO_2 44.14 เปอร์เซ็นต์, Al_2O_3 41.42 เปอร์เซ็นต์ และ Fe_2O_3 0.87 เปอร์เซ็นต์ ทดลองโดยใช้ดินเหนียวขนาด 200 mesh (75 ไมโครเมตร) น้ำหนัก 1 กรัมเป็นสารดูดซับตะกั่วจากสารละลาย $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยมีการแปรผันค่าต่าง ๆ ได้แก่ พีเอชของสารละลายให้มีค่าในช่วง 3-9.5 อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาสัมผัส 20-160 นาที พบว่าการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัส จากนั้นจะดูดซับได้คงที่ในแต่ละค่าความเข้มข้นเมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 120 นาที และประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ อุณหภูมิสูง และพีเอชเป็นกรด

Lo, Jeng และ Lai (1997) ศึกษาคุณสมบัติของทรายที่เคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์ในการดูดซับทองแดง นิกเกิล และแคดเมียมซึ่งละลายอยู่ในสารละลายที่มีค่าไอออนิกเสตรง์ 0.1N NaNO_3 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวทรายและคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักของทรายดังกล่าว พบว่าเมื่อเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์ที่พีเอชสูงจะได้เกอไทต์ ($\alpha\text{-FeOOH}$) เป็นสารเคลือบซึ่งจะให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลแต่จะมีสภาพของการต้านทานกรดได้ต่ำ เมื่อเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะได้ฮีมาไทต์ ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) เป็นสารเคลือบซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักด้วยการดูดซับบนทรายที่เคลือบด้วยเหล็กกับการตกตะกอนทางเคมี พบว่าการดูดซับมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าและกำจัดได้มากกว่าการตกตะกอน

Lai, Chen, Wei และ Lee (2001) ศึกษาลักษณะการดูดซับแคดเมียมและเหล็กบนทรายที่เคลือบผิวด้วยเกอไทต์ โดยทำการทดลองทั้งแบบแบทช์และแบบบรรจุคอลัมน์เพื่อทดสอบการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดจากสารละลาย จากการทดลองแบบแบทช์พบว่าไอออนของแคดเมียมและตะกั่วจะถูกดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดคือ 319,704 μg ต่อทราย 1 กรัม ที่พีเอช 5.0 ค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดคือ 702,124 μg ต่อทราย 1 กรัมที่พีเอช 6.0 จากการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าทรายเคลือบเกอไทต์สามารถกำจัดแคดเมียมและตะกั่วได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

Namasivayam และ Ranganathan (1995) ศึกษาการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิลโดยการดูดซับด้วยสารดูดซับที่เป็นของเสียประเภทไฮดรอกไซด์ของเหล็กและโครเมียมซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตปุ๋ย ทำการทดลองทั้งแบบแบทช์ (Batch) และฟิกซ์เบด (Fixed bed) การทดลองแบบแบทช์ใช้สารดูดซับเขย่าพร้อมทั้งสารละลายโลหะหนักปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที การทดลองแบบฟิกซ์เบดทำโดยการบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์แก้วให้มีการสัมผัสกับสารละลายโลหะหนักซึ่งมีอัตราการไหล 0.06 ลิตรต่อชั่วโมง การทดลองทั้งสองจะใช้สารละลายที่มีค่าพีเอช 3.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยมีการแปรผันขนาดอนุภาคของสารดูดซับ ปริมาณสารดูดซับ และไอออนิกเสตรง์ของสารละลาย พบว่าการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่พบผลกระทบจากค่าไอออนิกเสตรง์อย่างชัดเจนต่อ

การดูดซับ ในการทดลองดูดซับสารละลายที่มีโลหะหนักทั้งสามชนิดผสมกันอยู่ พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสารดูดซับเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว > แคดเมียม > นิกเกิล และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

McKenzie (1980) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็กจำนวน 12 ชนิด โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และทองแดง ออกไซด์ของแมงกานีส 9 ชนิดที่ใช้เป็นสารดูดซับได้แก่ B9 Birnessite, B14 Birnessite, B36 Birnessite, B38 Birnessite, C15 Fine-grained cryptomelane, C17 Cryptomelane, C37 Fine-grained poorly crystalline cryptomelane, ρ -MnO₂ และ γ -MnO₂ ออกไซด์ของเหล็ก 3 ชนิด ที่ใช้เป็นสารดูดซับได้แก่ เกอไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์ ทดลองการดูดซับโดยใช้สารดูดซับ 0.1 กรัม ผสมกับสารละลายโลหะหนักปริมาตร 20 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการปรับค่าพีเอชในขณะที่เขย่าให้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 8.0 พบว่าการดูดซับตะกั่วด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าการดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์ถึง 40 เท่า ตะกั่วจะถูกดูดซับด้วยสารดูดซับทุกชนิดได้ดีกว่าโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ที่ทำการศึกษายกเว้นเกอไทต์

Gadde, Herbert และ Laitinen (1974) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสที่เตรียมขึ้นจากการตกตะกอน โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และไทเทเนียม ทดลองโดยใช้สารละลายที่มีโลหะหนักชนิดเดียวผสมอยู่ พบว่าการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ทั้งสองชนิดสามารถเรียงลำดับโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้จากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว > สังกะสี > แคดเมียม > ไทเทเนียม

Namasivayam และ Ranganathan (1993) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (Cr⁶⁺) ที่มีอยู่ในสารละลายและในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม โดยการดูดซับด้วยสารดูดซับที่เป็นของเสียประเภทไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe³⁺) และโครเมียม (Cr³⁺) ซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตปุ๋ย ทำการทดลองโดยใช้สารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมในช่วง 5-30 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่ากับสารดูดซับเป็นเวลานาน 1-180 นาที ปริมาณสารดูดซับ 100-1,200 มิลลิกรัมต่อสารละลาย 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 24, 29 และ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 4.5-10 พบว่าการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโครเมียมและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามไอโซเทอร์มทั้งแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช การกำจัดโครเมียมในเชิงปริมาณที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยสารดูดซับหนัก 500 มิลลิกรัม จะพบเมื่อพีเอชมีค่า 5.6 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมมีค่า

สูงสุดคือกำจัดไปได้ประมาณ 60–75% ที่พีเอช 5.0 และยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม จะมีการลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้น

Barrow, Bowden, Posner และ Quirk (1981) ศึกษาเพื่อทดสอบความสามารถของ แบบจำลองในการอธิบายในเชิงปริมาณเกี่ยวกับการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีบนเกอไทต์ พบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายได้ทั้งการเพิ่มขึ้นของการดูดซับโลหะพร้อม ๆ กับพีเอชที่เพิ่มขึ้น และการปลดปล่อยโปรตอนที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับ โดยที่ CuOH^+ และ ZnOH^+ จะเป็นชนิด ของทองแดงและสังกะสีที่ถูกดูดซับ ส่วนหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของการดูดซับซึ่งสูงขึ้นตามค่าพีเอช เนื่องจากไอออนเหล่านี้จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น สำหรับตะกั่วนั้นจะมีไอออน ในรูป Pb^{2+} เป็นชนิดที่ถูกดูดซับ ซึ่งในกรณีนี้การเพิ่มขึ้นของการดูดซับตามค่าพีเอชจะเนื่องจาก ประจุที่ลดลงบนผิวหน้าทำให้เกิดการผลักลดลง และยังพบว่าโลหะหนักทั้งสามชนิดนี้เมื่ออยู่ใน สารละลายคลอไรด์จะถูกดูดซับได้ดีกว่าในสารละลายไนเตรท

Duker, Ledin, Karlsson และ Allard (1995) ศึกษาการดูดซับสังกะสีในสารละลายที่มี กรดฟุลวิก (Fulvic acid) ผสมอยู่ ดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของ ซิลิกา, อะลูมิเนียม และเหล็ก ได้แก่ ควอทซ์ (Quartz) ไฮดราจิลไลต์ (Hydrargillite) และ เกอไทต์ (Geothite) ตามลำดับ ทำการทดลองแบบแบทช์โดยใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 10^6 โมล ไอออนิกสเตนธ์ 0.01 โมล ทำการแปรผันพีเอชในช่วง 3–10 โดยให้มีกรดฟุลวิก ความเข้มข้นต่าง ๆ ผสมอยู่ พบว่าการดูดซับจะขึ้นอยู่กับพีเอชในทุก ๆ ระบบที่ไม่มีกรดฟุลวิกซึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ 50 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 7.6 การมีกรดฟุลวิกผสมอยู่จะทำให้ การดูดซับสังกะสีด้วยควอตซ์ลดลง ส่วนการดูดซับสังกะสีด้วยไฮดราจิลไลต์และเกอไทต์จะลดลง จากที่ดูดซับได้ 50 เปอร์เซ็นต์ที่ค่าพีเอช 6.8 เมื่อสารละลายมีกรดฟุลวิกผสมอยู่ 2 มิลลิกรัมต่อ ลิตร แต่สารดูดซับทั้งสองจะดูดซับได้เพิ่มขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 6.5 และดูดซับได้ลดลงเมื่อพีเอช มากกว่า 6.5 เมื่อมีกรดฟุลวิกผสมอยู่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

White และ Asfar-Siddique (1997) ศึกษาการกำจัดแมงกานีส (Mn^{2+}) และเหล็ก (Fe^{2+}) ออกจากน้ำดื่มโดยการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่เตรียมขึ้นจาก การตกตะกอนโดยมี KMnO_4 เป็นสารตั้งต้น ซึ่งจะได้ MnO_2 3 แบบเป็นสารดูดซับ ได้แก่ แบบที่ได้ จากไดออกไซด์จากเปอร์แมงกาเนตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แบบที่ได้จากเปอร์แมงกาเนตและ แมงกานีสไอออน และแบบที่ได้จากสารทั้งสามอย่าง พบว่าแมงกานีสไดออกไซด์แบบแรกสามารถ กำจัดแมงกานีสออกจากน้ำได้ดีที่สุดโดยมีกลไกการกำจัดคือการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองถึงความสามารถในการนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ โดยพบว่าสามารถ

นำแมงกานีสไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้บางส่วนโดยการใช้ก๊าซคลอรีนหรือไฮโปคลอไรท์เข้าช่วย ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปทางเคมีที่ใช้ในงานบำบัดน้ำ

Kinniburgh และ Jackson (1982) ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นและพีเอช ต่อการดูดซับแคลเซียมและสังกะสีด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กในรูปเจล ทำการทดลองดูดซับ แคลเซียมที่พีเอช 8 และการทดลองดูดซับสังกะสีที่พีเอช 5.5 และ 6.5 ในสารละลายที่มี ไอออนิกสเตรนจ์ 1M NaNO_3 ความเข้มข้นของแคลเซียมและสังกะสีอยู่ในช่วง 10^{-7} - 10^{-2} โมล พบว่าการดูดซับสังกะสีในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 10^{-4} - 10^{-2} โมล ที่พีเอช 6.5 จะมีค่าสูงกว่า การดูดซับที่พีเอช 5.5 ถึง 10 เท่า การดูดซับสังกะสีที่พีเอช 5.5 จะมีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับ แคลเซียมที่พีเอช 8.0

Karthikeyan, Elliott และ Chorover (1999) ศึกษาบทบาทของการตกตะกอนที่เกิด บริเวณผิวสัมผัสระหว่างการดูดซับทองแดงด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม การทดลองได้ทำที่พีเอช 6.9 เพื่อให้เกิดการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนของทองแดงเพื่อศึกษา อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับในการกำจัดประจุบวก พบว่าในสภาวะที่ อัตราส่วนของสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับมีค่าต่ำ ไฮดรอกไซด์ของเหล็กจะมีความสามารถในการ กำจัดทองแดงได้สูงกว่าไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียม โดยที่การตกตะกอนร่วมจะสามารถ กำจัดทองแดงจากสารละลายได้สูงกว่าการดูดซับในไฮดรอกไซด์ทั้งสองชนิด เมื่ออัตราส่วน ระหว่างสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับมีค่าสูงจะมีการตกตะกอนที่ผิวของสารดูดซับ รวมทั้ง ความสามารถในการกักประจุบวกสุทธิของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติและความสามารถในการ ละลายของตะกอนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวร่วมระหว่างออกไซด์กับน้ำ

Jenne (1968) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการดูดและคาย โลหะหนักของดินและได้สรุปว่าไฮดรอกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีบทบาทที่สำคัญ ในการควบคุมความเข้มข้นของแมงกานีส เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสีในดินและน้ำ ในแหล่งน้ำที่มีตะกอน การดูดและการคายโลหะหนักเหล่านี้จะเกิดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับปัจจัย ต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของโลหะชนิดนั้นที่ละลายอยู่ ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดอื่นที่ปะปน พีเอช และจำนวนและความแข็งแรงของคีเลตอินทรีย์และไอออนเชิงซ้อนแบบอินทรีย์ที่มีอยู่ใน สารละลาย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักในดินและน้ำในแหล่ง น้ำจืดได้แก่ สารอินทรีย์ ดินเหนียว คาร์บอนเนต และการตกตะกอนตามธรรมชาติเพื่อกำจัดสาร ต่าง ๆ ออกมาในรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์