

9.3 แหล่งแร่ที่เกิดสัมพันธ์กับตะกอนหรือหินตะกอน(Deposits Associated with Sediments and Sedimentary Rocks)

ในที่นี้เราจำแนกแหล่งแร่ที่เกิดสัมพันธ์กับการเกิดตะกอนและหินตะกอนออกเป็น 4 จำพวกใหญ่ๆ ได้แก่

- ก. แหล่งแร่อันเป็นผลมาจากการผุพัง
- ข. แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับตะกอนเม็ด
- ค. แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับตะกอนเคมี และ
- ง. แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับตะกอนคาร์บอเนต

9.3.1 แหล่งแร่ศิลาแลง (laterite-type deposit)

แหล่งแร่ศิลาแลงเป็นแหล่งแร่ที่พบได้ทั่วไปในสภาพภูมิอากาศอบอุ่นชื้น ตั้งแต่อดีตกาลจนถึงปัจจุบัน ซึ่งส่วนใหญ่แสดงลักษณะสภาพภูมิประเทศที่ปกคลุมด้วยชั้นดินตะกอนที่แสดงหน้าตัดแบบโปรไฟล์(saprolite profile) ซึ่งมีชั้นศิลาแลงของเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นชั้นสะสมตัวหลัก(รูป 9.3.1) กระบวนการเกิดที่แตกต่างกันแต่เป็นผลต่อเนื่องกันได้แสดงให้เห็นใน ตาราง 9.3.1 ในส่วนตอนบนของตารางแสดงถึงชั้นที่เกิดการสะสมตัวด้วยตัวเอง(autochthonous) ซึ่งมักพบว่ามีปริมาณเหล็กสูงหรืออะลูมิเนียมสูงหรือทั้งสองอย่าง และดังนั้นจึงเป็นส่วนที่แข็งและทำให้เกิดเป็นสภาพภูมิประเทศที่ยากต่อการกัดเซาะ

ลักษณะส่วนประกอบสำคัญในเนื้อตะกอนที่ผุพังมา ได้แก่

- ก. แร่ที่ทนต่อการผุพังของหินแม่หรือหินต้นกำเนิด(parent rocks) เช่น พลิกควอร์ตหายาบ, รูไทล์(rutile), เซอร์คอน, อิลมิไนต์, ดินุก, เพชร เป็นต้น แร่ทุกตัวที่กล่าว พบได้ทั่วไปในชั้นสะสมตัว (ไม่ว่าจะเป็นชั้นศิลาแลงหรือไม่)
- ข. ผลผลิตจากสารละลายที่ไม่ผสมกันได้ เช่น แร่ดินขาว (kaolinite) ซึ่งมักพบเห็นได้ในชั้นแซปโรไลต์
- ค. แร่เกิดใหม่ เช่น แร่ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งมักพบในชั้นสะสมตัว และเกิดเป็นศิลาแลง(laterite)จริงๆ("sensu stricto") โดยมีปริมาณ Ni สูงกว่าปกติ เพราะหินดั้งเดิมเป็นพวกหินอัคนีสีเข้มถึงเข้มจัด

ตะกอนหรือหินตะกอนเป็นแหล่งทรัพยากรทางแร่ที่สำคัญของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นน้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติหรือน้ำบาดาล นักสำรวจแร่โลหะก็ให้ความสนใจเรื่องราวโดยเฉพาะสภาพแวดล้อมของการตกตะกอนเหมือนกัน เพราะอยากรู้ว่าแร่โลหะที่มีค่าทางเศรษฐกิจนั้นสะสมตัวก่อนหลังหรือพร้อมกับการสะสมตัวของตะกอนเหล่านั้น เช่น การศึกษาหินคาร์บอเนตพื้นราบ(platform carbonates) เพื่อดูความสัมพันธ์กับการเกิดแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีหรือการสะสมตัวของหินดินดานเพื่อเทียบกับการเกิดแร่ทองแดงในหิน เป็นต้น

หลายคนอาจมองว่าการศึกษาเรื่องเศรษฐธรณีวิทยา(economic geology)นั้นมีความหมายไม่ต่างกับการศึกษาถึงแหล่งแร่ในน้ำร้อนในทุกเรื่อง(ซึ่งเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนมาก) และแม้แต่พวกที่เกิดในอุณหภูมิต่ำที่ค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบกับที่เกิดในสภาพแวดล้อมของหินอัคนีและหินแปร โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่อยู่ในทวีปอเมริกาเหนือ แต่ในปัจจุบันการศึกษาถึงความสัมพันธ์ในเรื่องการเกิดตะกอนและหินตะกอนกับการเกิดสินแร่และแหล่งแร่จะมีความสำคัญขึ้น ด้วยเหตุนี้ นักสำรวจแร่(โลหะ)ซึ่งปกติมักมีพื้นฐานความรู้ด้านกระด้างศิลา(hard rocks)จึงควรมีความรู้พื้นฐานทางด้านละมุนศิลา(soft rocks) ด้วย และนอกเหนือจากเนื้อหินและโครงสร้างแล้ว ควรรู้ถึงที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมการตกตะกอน แอ่งสะสมตะกอน และวิวัฒนาการของแอ่งด้วย เป็นต้น

โดยทั่วไปศิลาแลงมักมีส่วนประกอบและเนื้อหินที่ไม่คงที่ ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากตัวการสำคัญก็คือตัวหินแม่ที่มีส่วนประกอบที่ไม่คงที่ และอาจเป็นผลจากลักษณะธารน้ำที่ต่างกัน หรือมีลักษณะการปลูกพืชที่ต่างกัน รวมทั้งตอนแรกมีความลาดเอียงของพื้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย(ดูตาราง 9.3.2)

ในรายงานของ IGCP 192 ได้เสนอว่าเนื่องจากมีการเรียกชื่อศิลาแลงในหลายแบบ เพื่อให้เป็นแบบแผนเดียวกัน เราจึงควรใช้การจำแนกและการตั้งชื่อศิลาแลง ซึ่งแสดงในรูป 9.3.2 แต่ถ้าเป็นการจำแนกเนื้อหินและโครงสร้างศิลาแลงพบว่ายังไม่มีผู้ใดคิดทำ จากการศึกษาในหลายแห่ง(ตาราง 9.3.3)พบว่าศิลาแลงที่ให้มูลค่าสำคัญทางเศรษฐกิจ ได้แก่

- (1) ศิลาแลงอะลูมินัม ซึ่งสลายตัวมาจากหินแกรนิต หินไซยีนิต(syenite) หินโฟโนไลต์(phonolite) และโดยมีหินโดยรอบเป็นบะซอลต์หรือตะกอน
- (2) ศิลาแลงนิเกิล ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของหินเพอร์ริโดไทต์และหินเซอร์เพนไทน์
- (3) ชั้นศิลาแลงแข็งหรือค่อนข้างแข็ง เพื่อการก่อสร้าง เช่น ทำถนน ฐานราก อิฐบล็อก และตึก
- และ(4)แหล่งแร่เหล็กและแมงกานีสมีความสมบูรณ์ขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการเกิดศิลาแลง

ก. แหล่งแร่อะลูมินัมศิลาแลง (Lateritic Bauxite Deposits)

บ็อกไซต์(bauxites) หมายถึง ศิลาแลง ซึ่งมีปริมาณซิลิกา(Si) และเหล็ก(Fe) รวมกันน้อยกว่า 10% ในหิน (ดูสามเหลี่ยมในรูป 9.3.2 C) แหล่งบ็อกไซต์จัดว่าเป็นแหล่งสะสมตัวของแร่อะลูมินัมไฮดรอกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่เรย์บ์ไซต์(gibbsite- $\text{AlO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) โดยทั่วไปเศรษฐศาสตร์ของแหล่งขนาดที่ตั้ง, ความยากง่ายของการทำเหมือง ถูกกำหนดด้วยปริมาณ Si & Fe ที่ ปรากฏ ซิลิกา(SiO_2) ที่มักปรากฏในแร่ดินขาว($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มีปริมาณไม่เกิน 4-6% ส่วนเหล็กออกไซด์ปรากฏในรูปแร่เหล็กแดง(hematite- Fe_2O_3) หรือเหล็กใบไม้แก่(limonite- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีปริมาณสูงถึง 35% ในบางกรณี แต่ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 10-25% ซิลิกาอิสระเช่นแร่ ควอร์ตซ์มักมีน้อยกว่า 10% ซึ่งแม้ไม่ใช่เม็ดที่แตกหลุดมากล่าวอย่างง่าย แหล่งแร่บ็อกไซต์ส่วนใหญ่เป็นศิลาแลงปนบ็อกไซต์ แต่ไม่ใช่บ็อกไซต์จริงๆ

บ็อกไซต์หรือศิลาแลงอะลูมินัมที่มีความสมบูรณ์พอเหมาะต่อการสกัดเอาสินแร่เพื่อการพาณิชย์นั้นมียู่มากมายหลายแห่ง (ดูรูป 9.3.3) แต่ส่วนใหญ่มีการกระจายตัวในบริเวณที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น ในปัจจุบันมีพบหลายแห่งในทวีปยุโรป ซึ่งเป็นเขตอบอุ่นแต่ที่มีบ็อกไซต์ และศิลาแลงอาจเป็นเพราะอิทธิพล

การหมุนตัวของแผ่นธรณีฐาน ทำให้ทวีปยุโรปเดิมซึ่งอยู่บริเวณแถบร้อนขึ้นมีศิลาแลงและแหล่งแร่ดังกล่าวได้

ความต้องการอะลูมิเนียมจากแหล่งบ็อกไซต์และศิลาแลงบ็อกไซต์หาได้จากการแต่งแร่ (refining process) ซึ่งทำให้ได้ Al_2O_3 บริสุทธิ์หรืออะลูมิเนียมจากผลิตภัณฑ์ของเหมือง แผนภูมิในรูป 9.3.4 A แสดงถึงกระบวนการสำคัญ ตลอดจนขั้นตอนและตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อการทำให้ได้ อะลูมิเนียมที่บริสุทธิ์ ซึ่งตัวที่สำคัญที่สุดในกระบวนการนี้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นตัวทำให้ซิลิกาจากแร่ดินขาว ตกตะกอนในช่วงต้นของกระบวนการ ส่วนในรูป 9.3.4 B แสดงแหล่ง บ็อกไซต์และศิลาแลงอะลูมิเนียมในรูปฮิสโตแกรมหรือกราฟแท่ง แกน y (แนวดิ่ง) แสดงความลึกที่คิดจากหลุมเจาะในชั้นศิลาแลง และแกน x (แนวนอน) คือ ปริมาณ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งปรากฏในแร่ดินขาว ในรูปแถบเป็นหลุมเจาะ 4 หลุม ที่แสดงถึงปริมาณ Al_2O_3 ทั้งหมด ค่าแถวกลางคือค่าที่ได้เมื่อมีการสกัด Al_2O_3 ออกมาและค่าแถวล่างคือ ปริมาณ Al_2O_3 ทั้งหมดจากแถบและแถวกลางรวมกัน

แหล่งอะลูมิเนียมชนิดคาร์สต์ (karst bauxite) เหตุที่ต้องแยกแหล่งบ็อกไซต์ชนิด คาร์สต์มาอธิบายต่างหากเป็นเพราะแหล่งดังกล่าวมีลักษณะพิเศษ เพราะเป็นแหล่งเกิดในโพรงคาร์สต์ที่มีผนังชันมาก โดยที่มีหินรอบข้างเป็นหินปูน แต่หินปูนเหล่านี้ไม่ใช่เป็นตัวแหล่งที่ให้แร่บ็อกไซต์ เพราะมีปริมาณ Al และ Fe น้อยเกินกว่าที่จะให้บ็อกไซต์ได้ ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าแท้จริงแล้วแหล่งบ็อกไซต์ได้มาจากส่วนของ หิน Alumino-silicate ที่เดิมอยู่กับหินปูนแต่ปัจจุบันเหลือค้างรอดจากการชะล้างและกัดกร่อน

ข. แหล่งแร่ศิลาแลงนิเกิล

แหล่งแร่ศิลาแลงนิเกิล หมายถึง ศิลาแลงที่เกิดหรือพัฒนาอยู่บนหินแม่ที่มีปริมาณนิเกิลอยู่สูง เช่น หินอัคนีสีเข้มจัดทั้งหลาย รูป 9.3.5 แสดงหน้าตัดของชั้นศิลาแลงที่แสดงปริมาณธาตุนิเกิล และเป็นที่น่าสังเกตว่าช่วงค่าที่ Ni สูงอยู่ข้างใต้ช่วงค่าที่ Fe และ Co สูง ทำนองเดียวกันปริมาณ Si สูงขึ้นในช่วงบน แต่ Al กลับลดลง ส่วนที่เรียกชั้นสินแร่ คือ ช่วงที่ Ni มีค่ามากกว่า 2% ซึ่งในบางแห่งอาจมากถึง 7%

ค. แหล่งแร่ศิลาแลงเหล็กและแมงกานีส

แหล่งแร่ศิลาแลงเหล็กและแมงกานีสนี้นับว่าเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดเหมืองแร่เหล็กที่ใหญ่ที่สุดในปัจจุบันและเป็นแหล่งที่มีปริมาณสำรองสูงมาก จัดได้ว่าแหล่งดังกล่าวเป็นแบบแซนโพรไลต์ (saprolite-type) ซึ่งส่วนใหญ่มีการนำหรือชะล้างเอาธาตุส่วนใหญ่ออกไป ยกเว้น Al (ซึ่งมักมีปริมาณน้อยในสินแร่ที่ไม่ผุพัง)

ส่วน Fe, Ni และซิลิกาบางส่วนอาจเปลี่ยนแปลงแหล่งแร่ตะกอนปฐมภูมิ ซึ่งไม่มีค่าทางเศรษฐกิจ (เช่น หินแม่เหล็กเป็นชั้น, เหล็ก&แมงกานีสซิลิเกต, และเหล็กคาร์บอนเนต) ให้เป็นแหล่งแร่บ็อกไซต์ที่มีค่าทางเศรษฐกิจ ตัวอย่างแหล่งแร่เหล็กที่สำคัญ คือ แหล่ง Hammersley (ออสเตรเลีย), แหล่ง Bolivar (เวเนซุเอลา) และแหล่งแร่แมงกานีสที่สำคัญ คือ แหล่ง Serra do Navio ของบราซิล (ดูรูป 9.3.5 B)

ง. แหล่งศิลาแลงเพื่อการก่อสร้าง (laterite building materials)

ศิลาแลงเป็นวัสดุก่อสร้างที่ดี การนำเอาศิลาแลงมาใช้จึงเป็นวัฒนธรรมที่เก่าแก่ที่สุดแบบหนึ่งของโลก อาจเป็นด้วยการใช้ประโยชน์ของศิลาแลงนี้เองทำให้เราได้ชื่อนี้มาใช้ ปี ค.ศ. 1807 Buchanan ได้อธิบายถึงวัสดุประเภทที่มักใช้ในอินเดีย เพื่อมาทำบล็อกอิฐสำหรับก่อสร้าง เขาได้เลือกภาษาละตินสำหรับอิฐนั้น ซึ่งต่อมาจึงเกิดคำว่า “laterite” ขึ้น การทำศิลาแลงก็ทำได้ง่ายโดยเปิดหน้าดินแล้วตัดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม จากชั้นที่มีการสะสมเหล็กของแซบโปรไลต์ เมื่อตากให้แห้งแบบผึ่งลมผึ่งแดดแล้ว ก็จะแข็งตัวกลายเป็นหินแข็งเอามาทำเป็นวัสดุก่อสร้างได้ดี ดังนั้นจึงนิยมใช้ตั้งแต่สร้างราชวังไปจนถึงปูทางเดินตามถนน ในประเทศไทยก็พบมากมาย ตั้งแต่ปราสาทหินพิมายจนถึงวัดในสมัยปัจจุบัน

จ. แหล่งศิลาแลงปนทองคำ (Auriferous Laterite)

การค้นพบที่มีชื่อเสียงอีกอันหนึ่ง คือ การค้นพบแหล่งทองที่อยู่ในชั้นศิลาแลงทองคำคงมีการเคลื่อนตัวไปในบริเวณที่เกิดการผุพังจนได้ศิลาแลง และเกิดการสะสมตัวใหม่จนได้เป็นชั้นหนึ่งโดยเฉพาะ ณ เมืองบูคคิงตัน ทางตะวันตกของออสเตรเลีย ซึ่งแต่เดิมจัดว่าเป็นบริเวณที่ทำ บ็อกไซต์ แต่ต่อมากลับกลายเป็นแหล่งทองใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งของออสเตรเลีย (โดยประมาณว่าจะทำการผลิตได้ 200,000 ทROY ออนซ์ต่อปี นอกจากนั้นยังพบที่บราซิลและอาฟริกาตะวันตก

9.3.2 แหล่งแร่กระอกรัง และแหล่งสมบรูณียังยวด (Gossan and Supergene Enrichment Deposits)

โดยทั่วไปหินแม่-หรือหินดั้งเดิม-ที่เกิดการผุพังมักเป็นหินจำพวกซิลิเกตและประกอบด้วยแร่ประกอบหิน ซึ่งก็คือกลุ่มแร่ซิลิเกต โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ น้ำฝน อากาศ ออกซิเจน-คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอินทรีย์ ผลที่ได้แม้จะต่อเนื่องและเชื่อมเข้า ซึ่งในที่สุดก็จะได้ แซบโปรไลต์กับซิลิเกตจำพวกมีน้ำและสะสมตัวเป็นชั้นของออกไซด์เหล็ก อะลูมินัม แมงกานีสหรือนิกเกิล

แต่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า คือ สิ่งที่ได้จากการผุพังอันเป็นผลมาจากการแปลงสภาพในหินซึ่งทำให้มีปริมาณธาตุจำพวก Au, Ag, Cu, และ Fe ฯลฯ มากขึ้น โดยที่ธาตุเหล่านี้เกิดในรูปของแร่ซัลไฟด์ และการผุพังแร่เหล่านี้เกิดขึ้นแบบรวดเร็วและรุนแรง, จนในที่สุดแร่ซัลไฟด์เมื่อเกิดการออกซิไดซ์ได้โดยง่ายจะปล่อยกรดออกมา ซึ่งกระบวนการนี้เกิดรวดเร็วกว่าในหินซิลิเกตหลายเท่า

ผลิตผลจากการผุพังเป็นลักษณะที่ช่วยการสำรวจหาสินแร่โลหะต่างๆ ได้และยังเป็นตัวให้แร่ในแหล่งแร่ประเภทนี้ด้วย การทำเหมืองเมื่อประมาณ 5,000 ปีมาแล้ว ก็ทำจากแหล่งแร่กอสซานนี้ ในเหมืองแร่ทองคำที่อำเภอเมืองเลย(บริษัททุ่งคำ)ก็วางแผนการในการหาทองคำจากบริเวณกอสซาน(แหล่งแร่กระอกรัง)ที่เกิดจากการผุพังอย่างรุนแรงนี้(ลึกที่สุดถึง 50 เมตรจากผิวดิน)

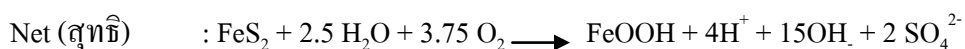
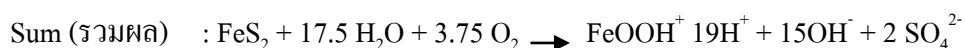
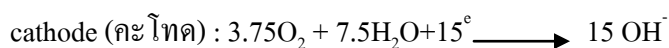
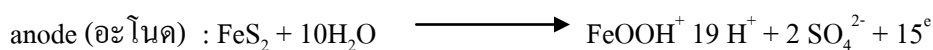
ในที่นี้เราจึงพยายามบัญญัติและนิยามคำศัพท์ที่สำคัญเกี่ยวกับเรื่องนี้ ดังนี้

- 1) หมวก (hat หรือ iron cap และคำที่ไม่ใช่ภาษาอังกฤษ คือ Chapeau de fer, sombrero de hierro) ซึ่งเป็นผลิตผลที่โผล่ให้เห็นและได้จากการผุพังทางเคมีอย่างรุนแรงในหินเดิมที่มีเหล็กอยู่ เช่น ซิลิเกต และคาร์บอนเนต เราอาจเรียกว่า "หมวกเหล็ก" ก็ได้

- 2) Gossan(กอสซาน) หรือเป็นผลผลิตที่มีเหล็กเหลืออยู่หลังจากเกิดการผุพังทางเคมีค้างอยู่เหนือบริเวณแหล่งแร่ซัลไฟด์ ดังนั้น กอสซานจึงประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็กที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น limonite goethite และบางครั้งมีแร่ธาตุจำพวกออกไซด์ของ Cu, Zn, Pb, Au & Ag ปะปนอยู่ด้วย (รูป 9.3.6 A) บางท่านเรียกว่า "แร่เกรอะกรัง"(ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตฯ พ.ศ.2525 คำว่าเกรอะกรังใช้ในความหมายว่า หมักหมมแห้งติดค้างอยู่)
- 3) Supergene enrichment(สมบูรณ์ยิ่งยวด) คือ บริเวณสะสมตัวของธาตุหรือสินแร่บางตัวอันเนื่องมาจากแร่ที่อยู่ข้างบน (รูป 9.3.6 B) มักอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน บริเวณนี้วางตัวอยู่ข้างใต้บริเวณสมบูรณ์ของแร่ซัลไฟด์และออกไซด์ โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นบริเวณที่แร่ซัลไฟด์เดิมในสายแร่เกิดการออกซิไดซ์ขึ้นเอง (รูป 9.3.7 ก และ ข)

กระบวนการเกิดแหล่งกอสซานหรือผืนแร่เกรอะกรังและแหล่งสมบูรณ์ยิ่งยวดนี้ขึ้นอยู่กับออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการอิเล็กโตรไลติกซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องได้เรื่อยๆ จนกว่าแร่ซัลไฟด์ถูกใช้ไปจนหมด

ตัวอย่างข้างล่างนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแร่ไพไรต์ไปเป็นแร่เกอไทต์(goethite)



กระบวนการดังกล่าวยังผลให้ปริมาณของแหล่งลดลงไปประมาณ 13% ในกรณีของแร่ไพไรต์ โดยการจัดกำมะถัน(S) ออกไป ทำให้เราได้ลักษณะโครงร่างสานเกี้ยว(boxwork)นั่นเอง นอกจากนั้นหลายคนเชื่อว่ากระบวนการอิเล็กโตรไลต์นี้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ซึ่งถูกควบคุมโดย

ก) ส่วนประกอบของแร่ซัลไฟด์ที่ปรากฏ กล่าวคือ ยังมีกำมะถันหรือซัลเฟอร์มากยิ่งทำให้มี H^+ หรือค่าความเป็นกรดมากขึ้น

ข) ชนิดของแร่แกนและหินข้างเคียง ถ้าหินข้างเคียงเป็นคาร์บอเนตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผุพังที่ต้านความเป็นกรด(acid-buffering weathering reactions) และ

ค) สภาพนี้ โดยรวมของระบบ เช่น ความเร็ว และปริมาณที่น้ำไหล

โดยทั่วไป นักสำรวจมักใช้วิธีการตามล่าหินโผล่(outcrop-hunting)จากผืนแร่เกรอะกรังหรือกอสซานเหล่านี้ เพราะที่มักปรากฏบนผิวดินคือคราบแร่หรือผืนแร่เหล็กเหลือง (limonite sheet) ซึ่งผสมกันระหว่างออกไซด์และไฮดรอกไซด์ และมักพบซิลิกาในลักษณะอัญรูปหรือเป็นลักษณะผลึกที่ละเอียดมาก โครงสร้างผืนแร่เหล็กเหลืองเหล่านี้มีทั้งพวกที่แข็ง อ่อน หรือเปื่อยยุ่ยก็ได้ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของซิลิกาในผืนแร่หรือก้อนแร่นั้น ๆ

จากการศึกษาวิจัยเราพบว่าผืนแร่เหล็กเหลือง หรือผืนแร่เกรอะกรังที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ

- 1) พวกอยู่กับที่(Indigeneous) เป็นแร่เหล็กเหลืองที่สะสมตัวในบริเวณที่เริ่มการผุพังทางเคมี ทำให้ได้เนื้อหินหรือโครงสร้างหินเดิมเหลือค้าง(relicts) ในรูปโครงร่างสานเกี่ยว(boxworks) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นได้ผืนแร่ดังกล่าวมักเกิดอยู่กับที่(in situ หรือ residual deposit)
- 2) พวกพัดพามา(Transported) ได้แก่ แร่เหล็กเหลืองพบอยู่นอกบริเวณที่เริ่มการผุพังทางเคมีไม่ไกลจากพวกแรกเท่าใดนัก เช่น 2-4 ม จึงมักให้เป็นวงสีแดง (reddish halo) รอบๆ บริเวณที่ผุพัง นั้น
- 3) พวกต่างถิ่นหรือแปลกปลอมมา(Exotic) อาจเรียกได้ว่าเป็นพวกที่ถูกพัดพามาแบบหนึ่งและปรากฏพบนอกแหล่งแร่ซัลไฟด์ บางครั้งอาจเป็นระยะทางไกลถึง 100 ม (Aleva & Westerhoff, 1989) จึงมักได้หินที่เรียกรวมๆ กันว่า "ironstone" หรือหินเหล็ก และบางครั้งอาจมีซิลิกาปะปนในหินเหล็กด้วย เรียกหินแจสเปอร์หรือหินเหล็กแดง (Jasper)

พวกที่เป็นผืนแร่เกอร์องกรัง “จริงๆ” (true gossan) นี้ จึงแตกต่างจากหินเหล็กตรงที่มักประกอบด้วยปริมาณโลหะมากกว่าที่จะปรากฏในแหล่งซัลไฟด์ (ดูตาราง 9.3.4) ดังนั้นในการสำรวจหาแหล่งแร่โลหะพื้นฐานในบริเวณที่รู้ถึงสภาพภูมิอากาศแล้ว การศึกษาถึงธรณีเคมีของผืนแร่เกอร์องกรังนี้จึงเป็นแนวทางการสำรวจที่สำคัญ โดยทั่วไปถ้าสภาพภูมิอากาศแห้งเกินไป โอกาสจะให้ผืนแร่เกอร์องกรัง อาจทำได้ยาก และถ้าหากสภาพภูมิอากาศชื้นจัดจนเกินไป ผลก็ทำให้ผืนแร่เกอร์องกรังสูญเสียโลหะพื้นฐานไปจนเกือบหมด

ในแหล่งแร่ซัลไฟด์ฝังประเภททองแดงเนื้อดอก การเกิดแหล่งแร่สมบูรณ์ยังขาดในบางบริเวณ อาจทำให้ได้ปริมาณสินแร่ เช่น ทองแดงสูงกว่าเดิมหลายเท่า ด้วยเหตุนี้การทำเหมือง เช่น เหมืองเปิดเพื่อสกัดเอาแร่ทองแดงจากแหล่งแร่สมบูรณ์ยังขาดที่มีความสมบูรณ์ 1.2% ของทองแดง เพียงไม่กี่ปี ก็อาจมีรายได้มากพอที่จะเอาไปเปิดเหมืองขนาดใหญ่แต่มีความสมบูรณ์ของแหล่งที่ต่ำกว่าเช่น บริเวณทองแดงเนื้อดอกได้ในที่ความสมบูรณ์เฉลี่ยเพียง 0.4% ของทองแดง ตัวอย่างที่เห็นชัดเจนได้แก่ แหล่ง Ok Tedi ในปาปัวนิวกินีที่ให้ทองคำสมบูรณ์มากในบริเวณส่วนที่ผุพังของแหล่งแร่ จนทำให้เกิดปัญหาขัดแย้งหลายปีระหว่างรัฐบาลของปาปัวนิวกินีกับเจ้าของเหมืองว่าควรจะทำเฉพาะบริเวณส่วนที่สมบูรณ์ยังขาดที่ให้ทองมาก หรือจะทำทั้งแหล่งดี

9.3.3 แหล่งแร่ที่เกิดกับตะกอนเม็ดหรือตะกอนเนื้อประสม-ไม่แข็งตัว

สภาพแวดล้อมของแหล่งแร่ที่เกิดกับตะกอนหรือหินตะกอนแบบนี้ประกอบด้วยผลผลิตจากการผุพังที่ถูกพัดพามาทั้งในรูปเม็ดตะกอนหรือสารละลาย ระยะทางที่ตะกอนถูกพัดพาไปอาจเพียงแต่ไม่กี่สิบกิโลเมตรจากแหล่งกำเนิด(provenance) ไปจนถึงเป็นหลายพันกิโลเมตร โดยทั่วไปให้ถือเป็นกฎว่าตะกอนยังเม็ดหยาบแสดงว่ามีโอกาสพัดพาจากแหล่งกำเนิดได้ไกลน้อยกว่าตะกอนที่มีขนาดละเอียดกว่า ในขณะที่แหล่งกำเนิดของสารละลายที่พาแร่ธาตุโลหะมาด้วยยากที่จะกำหนด ยิ่งตะกอนถูกพัดพามาไกลเพียงใดโอกาสที่ตะกอนจะถูกปนเปื้อนโดยการสะสมปะปนกับตะกอนหรือเศษหินข้างทางยังมีมากไม่ว่าจะเป็นกับตะกอนภูเขาไฟ เศษอินทรีย์วัตถุ เปลือกหอย ซากพืชสัตว์ ซึ่งสารอินทรีย์ที่เน่าเปื่อยในบางบริเวณอาจ

ยังผลให้เกิดภาวะขาดออกซิเจน(reducing condition) ขึ้นได้ในตะกอน และในที่สุดจึงเกิดการสะสมตัวของโลหะหรือแร่ซัลไฟด์ได้จากสารละลายที่ซึมผ่านตะกอนนั้น เช่น การเกิดแร่มากาไซต์ในลานแร่

ในหนังสือเล่มนี้เราแบ่งแหล่งแร่ที่เกิดในตะกอนเมื่อดอกเป็น 2 พวกที่แตกต่างกัน

- ก) พวกที่เกิดจากการสะสมตัวทางกายภาพของสินแร่หนัก (heavy ores) อันเป็นผลมาจากกระบวนการพื้นผิว และถูกพัดพามาโดยน้ำ ทำให้ได้แหล่งแร่ที่เรียกลานแร่ (placers) และ
- ข) พวกที่สะสมตัวโดยสารละลาย ซึ่งมาจากที่ไกลๆ ที่ผุพังหรือเกิดภายในแอ่งตะกอนโดยตรง

พวกหลังนี้อาจเกิดในตะกอนที่เมื่อดมมีหลายขนาด(ตั้งแต่กรวดจนถึงดินเหนียว) และในสภาพแวดล้อมหลายชนิด(ตั้งแต่บนบกถึงในทะเล หรือทะเลสาบถึงแอ่งเกลือระเหย) ทำให้ได้การสะสมตัวเป็นแหล่งแร่หลายรูปแบบ ในตาราง 9.3.5 แสดงถึงรายละเอียดบางประการของแหล่งแร่ที่เกิดสัมพันธ์กับตะกอนและหินตะกอน และได้ทำการเปรียบเทียบกับพวกที่เกิดในหินคาร์บอเนตด้วย

ดังที่แสดงในตารางระยะเวลาที่โลหะถูกนำเข้ามาในตะกอนและเกิดการสะสมตัวนั้นมีด้วยกันหลายช่วง ดังนั้นจึงควรรู้จักและทำความเข้าใจกับคำบางคำที่เราอาจพบเห็นบ่อยๆ ในวารสารและตำราต่างประเทศ ซึ่งที่นิยมมีอยู่ 3 คำ ได้แก่

- 1) “syngenetic” ซึ่งหมายถึง การสะสมตัวของแร่ซัลไฟด์หรือสินแร่อื่น พร้อมกับการสะสมตัวของตะกอนเมื่อดมที่อยู่รอบๆ หรือ “อัครกรม”
- 2) “diagenetic” ซึ่งคือ การสะสมของแร่ซัลไฟด์ หรือสินแร่อื่นภายหลังการสะสมตัวของตะกอนเมื่อดมที่อยู่รอบๆ ดังนั้นจึงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างเมื่อดมตะกอนสารอินทรีย์ น้ำใต้ดิน อากาศ กับสารละลายที่ถูกพาขึ้นมาจากที่ลึกของแต่ตะกอน หรือ “วิบากกรรม”
- 3) “epigenetic” หมายถึง การสะสมตัวของแร่ซัลไฟด์ หรือสินแร่อื่นหลังจากที่ตะกอนเกิดการแข็งตัว (post-diagenetic) ดังนั้น จึงเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างตะกอนที่แข็งตัวแล้ว (หรือหินตะกอน) กับสารละลายจากแหล่งภายนอก หรือ “ปฏิกิริยากรรม”

ลานแร่ทองคำ เพชร และดีบุก

คำว่า “ลานแร่” มาจากภาษาสเปน ซึ่งในครั้งนั้นใช้ในความหมายเฉพาะกับสันทราย (sand bar) ในแม่น้ำซึ่งเป็นสถานที่ที่พวกลี้ภัยชาวสเปนในทวีปอเมริกามาพบทองคำ แต่ในปัจจุบันหมายถึงแหล่งแร่ตะกอนร่วนที่มีการสะสมตัวไม่เป็นหินแข็ง(unconsolidated deposit) โดยกระบวนการทางกายภาพในสภาพปกติ แร่ที่หายากว่าหนักกว่า มักเคลื่อนที่ได้ยากกว่าพวกที่ละเอียดและเบากว่า

ในการสะสมตัวเป็นลานแร่ มีสิ่งสำคัญที่สัมพันธ์กัน 4 ประการที่ควรคำนึงถึงคือ

- ก) แหล่งกำเนิด (source) ของแร่หนัก ซึ่งมักเป็นแร่ปฐมภูมิ (primary mineral) เช่น แร่ตระกูลแทนทาไลต์-โคลัมไบต์ จากสายคราหรือเพกมาไทต์ หรืออาจเป็นแร่ทุติยภูมิ (secondary mineral) เช่น แร่โอลิไมน์ต์ หรือแร่กาแนด (โกเมน) ในหินไนส์-หินชีส หรืออาจเป็นลานแร่เดิมที่ถูกพัดพาไปอีกที่ (old placers) เช่น ที่มักพบเห็นในแหล่งแร่ทองคำ

- ข) การผูกพันกักร่อนหรือการปลดปล่อยแร่ (liberation) ไปสู่ลานแร่จากแหล่งกำเนิด โดยปราศจากการแตกสลายของแร่ไปจนมีขนาดเล็ก แร่ยังมีเม็ดละเอียดโอกาสที่จะสะสมตัวในลานแร่ยิ่งทำได้ยาก ดังนั้นบางครั้งนักสำรวจจึงให้ความสำคัญไปที่แหล่งแร่ ณ จุดกำเนิด เช่น แซบโบรไลต์ เพราะที่ตรงนั้น แร่ทุกแร่ในหินผุพังสลายตัวไปเป็นดินเกือบหมด ยกเว้นแร่ควอร์ต กับสินแร่ที่เราสนใจที่เหลือค้างเป็นเม็ดเล็กๆ ฝังปะหรือสะสมตัวเป็นกระจุกๆ อยู่
- ค) การสะสมตัว(concentration) การสะสมตัวของแร่ที่ต้องการหรือสินแร่ให้เป็นแหล่งแร่ที่มีขนาดของแหล่ง และความสมบูรณ์ของแหล่งพอเหมาะเชิงพาณิชย์เป็นเรื่องสำคัญ ตัวกลางสำคัญในการสะสมตัวไม่ใช่น้ำฝน เนื่องจากทำให้เกิดการสะสมที่มีขนาดเล็กเท่านั้น ลมก็มีความเร็วแปรปรวนและทิศทางที่ไม่แน่นอน แต่น้ำผิวดินอาจทำให้เกิดโอกาสที่ดีที่สุดสำหรับเรื่องนี้ แต่ก็กลับพบว่าเราทราบเรื่องการสะสมตัวโดยน้ำจืดเป็นแหล่งแร่น้อยมาก แต่ที่เรา รู้ก็คือแหล่งสะสมตัวมักอยู่ตามหุบเขา การสะสมมักเป็นชั้นเหนือพื้นหุบเขา ส่วนใหญ่มักมีขนาดใหญ่เท่าเม็ดกรวดและยังเป็นเหลี่ยม (angular) และมักเรียกว่า lag gravel (กรวดหล้า) ซึ่งมักถูกพัดพามาช้ากว่าพวกอื่น (ที่มีขนาดเท่ากัน) ในช่วงระยะเวลาของการพัดพา
- ง) การป้องกัน(protection) เมื่อแร่ที่สนใจเกิดการสะสมตัวในลานแร่จำเป็นต้องมีการป้องกันไม่ให้เกิดการกักร่อนผุพัง ซึ่งอาจทำได้โดยการสะสมตัวของตะกอนรุ่นใหม่ที่จะเข้ามาปิดทับ เช่น ลานแร่ดิบบุกของไทย แถบทะเลอันดามันหรืออาจเป็นหินแข็ง เช่น หินบะซอลต์อย่างของประเทศไนจีเรีย

โดยส่วนใหญ่ลานแร่มักเป็นประเภทแรก รูป 9.3.8 d. แสดงค่าที่ใช้เรียกส่วนต่างๆภายในลานแร่ โดยทั่วไปแร่ในลานแร่มีความคงทนต่อการผุพังได้ดี มีความถ่วงจำเพาะค่อนข้างมาก มีความแข็งแรงสูงหรือหุบตีเป็นแผ่นได้ดี (ดูตาราง 9.3.6 ก) ด้วยความคงทนอย่างมากต่อการกักร่อนจึงทำให้แร่เหล่านั้นถูกพัดพาไปได้ไกลอาจเป็นพันกิโลเมตร (Aleva & Westerhof, 1989) ก่อนที่จะมาถึงหาดทรายทำให้เกิดการสะสมตัวเป็นลานแร่ได้หลายรูปแบบ(ดูตาราง 9.3.6 ข) ส่วนทองคำและทองคำขาว (platinum) แม้มีความแข็งแรงไม่มากนัก แต่ด้วยความสามารถในการแผ่เป็นแผ่นได้ดีและความคงทนต่อการผุพังทางเคมีได้มากจึงพัดพาไปได้ไกล และบางครั้งพบว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพัดพาไปยังที่ไกลๆได้เนื่องจากรวมตัวกับเม็ดทองอื่น ด้วยเหตุนี้ทองคำในลานแร่จึงถูกพัดพาไปสะสมตัวใหม่ในชั้นตะกอนที่มีอายุน้อยกว่าได้ เช่น ลานแร่ทองคำเมืองโอตาโก(Otago)ในนิวซีแลนด์ (รูป 9.3.8 ข)

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างลานแร่สำคัญของโลก

ก. ลานแร่ดิบบุกของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (SE Asia Tin Belts)

ลานแร่ที่ว้านี้เกิดมาในช่วงอายุไพลโอซีนถึงไพลสโตซีน ยาวมากว้างตัวในแนวเหนือ-ใต้ ตั้งแต่พม่าเข้ามาในไทย(ทางทิศตะวันตก) ต่อเลยไปทางมาเลเซียและอินโดนีเซีย(แถบเกาะสุมาตรา) ที่เรียกหมู่เกาะบังก้าและมิลินดัง(รูป 9.3.9A) ลานแร่ดิบบุกในไทยส่วนใหญ่เป็นลานแร่อยู่กับที่หรือพลัดไปในระยะสั้นๆ ส่วนใหญ่เป็นลานแร่ธารน้ำ แต่ก็ยังมีบ้างที่เป็นลานแร่หาดทราย เช่น แถบประจวบคีรีขันธ์ถึงชุมพร ส่วนในมาเลเซียลานแร่มักเกิดจากธารน้ำเหมือนกัน แต่มีการพัดพาไปจากแหล่งที่ไกลกว่า(รูป9.3.9B) และมีชั้นกะสะ (pay dirt) หลายชั้นสะสมตัวในร่องของหุบเขา ที่อินโดนีเซียมักพบเป็นลานแร่ดิบบุกเกิดกับที่หรือพลัด

ไปสั้นๆ เหมือนของไทย (<500 ม) แต่ชั้นกะสะมักพบบริเวณพื้นที่หุบเขา ส่วนใหญ่จึงเป็นพวกแหล่งกรวด หล้า ในรูป 9.3.9 A และ B จะเห็นว่าแหล่งมักเกิดอยู่รอบๆ เขาแกรนิต สำหรับแร่ดิบที่สะสมในลานแร่หุบเขาขนาดใหญ่หรือลานแร่นอกชายฝั่งมักถูกปิดทับด้วยตะกอนรุ่นหลังๆ ซึ่งอาจเป็นตะกอนบกหรือทะเลก็ได้ อาจเรียกได้ว่าแหล่งสะสมตัวแบบลานแร่เหล่านี้เป็นลานแร่เก่า (paleo-placers) กว่าสภาพภูมิประเทศที่พบเห็นในปัจจุบัน

ข. ลานแร่ทองคำวิทวอเตอร์สแอนด์ (Witwatersrand Gold Placers)

ลานแร่นี้มีอายุเก่าแก่มาก คือ อาเคียน (หรือพรีแคมเบรียน ช่วงล่าง ~2.7 พันล้านปี, ชั้นหินที่มีทองประกอบด้วย กรวดที่เป็นควอร์ตอัดตัวกันแน่น โดยในช่วงล่างมีแร่ไพไรต์แทรกเข้ามาอยู่ แร่ทองคำนี้อยู่ในแร่ไพไรต์อีกที (เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 5 มม) จากการทำแผนที่ธรณีวิทยาเหมือนได้ดินอย่างละเอียดพบว่าปริมาณความสมบูรณ์ของทองคำมีความสำคัญกับท้องน้ำในอดีต (ดูรูป 9.3.10) จากลักษณะนี้ทำให้ได้ข้อมูลปริมาณสำรองใหม่ที่ถูกต้องมากขึ้น จนไปถึงขนาดความลึก 3000 ม โดยอาศัยข้อมูลหลุมเจาะ นอกจากแร่ทองคำแล้วยังพบว่าลานแร่ดังกล่าวยังให้แร่ยูเรเนียมอีกด้วย

แนวทางการสำรวจ

หลักสำคัญในการสำรวจหาลานแร่คือ ให้ดูว่าบริเวณที่ต้องการสำรวจหานั้นประกอบด้วยข้อ พื้นฐาน 4 ข้อหรือไม่ซึ่งได้แก่ แหล่งกำเนิด การปลดปล่อย การสะสมตัว และการปกป้อง นอกจากนั้น การศึกษาชั้นหน้าตัดแบบโปรไฟล์ในพื้นที่ลาดเอียงยังอาจเป็นตัวกำหนดแนวทางหรือวิธีการสำรวจ (รูป 9.3.10 ข) ภาคหน้าตัดของสิ่งผุพังบริเวณที่ลาดชันน้อย แม้จะไม่สมคูลย์ แต่การย้ายมวลอาจพัดพาตะกอนส่วนบนให้เคลื่อนตัวลงไปตามที่ลาดชันได้ (ที่เรียก solifluxion หรือ creep) จนในที่สุดก็ย้ายวัสดุทั้งหมดลงในระบบแม่น้ำลำธารได้ ชั้นจากแบบโปรไฟล์ไร้โครงสร้างจึงเลื่อนขึ้นสู่ข้างบนมาอยู่เหนือชั้นแบบโปรไฟล์มีโครงสร้าง

แร่ธาตุที่คงทน เช่น แร่ควอร์ตจากสายแร่ ก็สะสมตัวเป็นชั้นหิน (stone layer) ซึ่งทำหน้าที่ปกคลุมแบบโปรไฟล์และมีโครงสร้างตามที่เรียก “พรมหิน” (carpedolith) การเก็บตัวอย่างอาจทำได้โดยการขุดหลุม (pits หรือ drilled holes) ซึ่งมักให้ข้อมูลที่ไม่แพงแต่รวดเร็วเกี่ยวกับการที่แร่ทนทานนั้นปรากฏหรือไม่ จากตำแหน่งเก็บ

การสำรวจหาลานแร่ต้องมีการมองละเอียดถึงวิวัฒนาการของสภาพธรณีสัณฐานของระบบธารน้ำเก่า (paleodrainage system) ด้วย แร่หนักที่สะสมตัวบนผิวดินไม่ลึกลงนักสามารถตรวจจับได้ด้วยเครื่องแกมมาเรย์ทางอากาศ หรือซินทิไลเซอร์ภาคพื้นดิน ในทางธรณีเคมีมีการร่อนแร่ด้วยจานร่อน (pan) อาจทำได้ผลดี อย่างไรก็ตามนักสำรวจหลายคนยังเชื่อว่าการตรวจหาด้วยวิธีธรณีเคมีของตะกอนท้องน้ำใช้ไม่ค่อยได้ผลดีนัก

ในหลายกรณีชั้นกรวดให้แร่ที่วางตัวข้างบนสายแร่ที่ถูกทับไว้ และต่อมาปกคลุมด้วยตะกอนเนื้อหินเม็ดละเอียด (เช่น ดินเหนียว, ถ่าน, ทราช) และการตรวจสอบข้อมูลลานแร่สามารถพิสูจน์ได้จากการเจาะหลุมบังก้า หรือถ้าทำได้ขุดหลุมแนวคิง (pitting)

9.3.4 แหล่งแร่ทองแดงในชั้นตะกอนแดง (Red-bed Copper (U,V) Deposits)

แหล่งแร่ทองแดงชนิดนี้เกิดสะสมตัวในสภาพแวดล้อม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นตะกอนทรายที่มีหินดินดานแทรกสลับอยู่ด้วย โดยที่หินทั้งสองพวกนี้มักแสดงชั้นที่เน้นสีแดง ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าตะกอนเกิดในแหล่งสะสมตัวที่ร้อนและแห้งแล้งแบบทะเลทราย และพบว่ามีแร่ทองแดงปรากฏในชั้นตะกอนดังกล่าวนี้

จากการศึกษาที่แหล่งแร่ไวท์ไพน์ (White Pine) รัฐมิชิแกน(สหรัฐ) และที่นาบีเบีย-แซมเบีย (อาฟริกากลาง, รูป 9.3.11) พบว่าปริมาณทองแดงในหินดูจะไม่สัมพันธ์กับโครงสร้างตะกอนของหินรอบข้าง หลักฐานหลายอย่างบ่งชี้ว่าทองแดงน่าจะสะสมตัวในภายหลังเกิดการสะสมตัวของตะกอน ดังนั้นจึงการเพิ่มขึ้นและลดลงของธาตุโลหะบางตัวทำให้เกิดแนวแร่ (mineral zoning) ในแนวคิงเนื่องจากพบว่าที่ธาตุทองแดงมีค่าสูงขึ้นจากบนลงล่าง ขณะที่ธาตุเหล็กมีค่าต่ำลงเมื่อลึกลงไปจากลักษณะนี้ทำให้ได้แร่เป็นแนวๆ จากส่วนล่างขึ้นมาดังนี้ ชั้นล่างสุดคือทองแดงบริสุทธิ์-แคลโคไซด์-บอไนต์-แคลโคไฟไรต์-และในที่สุดถึงชั้นบนสุดคือไฟไรต์ สำหรับแร่บอไนต์และแคลโคไฟไรต์มักพบในปริมาณไม่มากนัก โดยมากพบแร่ซัลไฟด์สะสมตัวในบริเวณชั้นหินตะกอนเม็ดละเอียดสีดาจนถึงเทาเข้มและแสดงชั้นตะกอนถึ และพบว่าตะกอนทรายสีแดงถึงสีจางที่แสดงชั้นตะกอนถึถึงหนามากๆ มักไม่ค่อยได้แร่ซัลไฟด์ ปริมาณที่ให้ปริมาณทองแดงมากในชั้นสอดคล้องกับภาวะที่ชั้นกรวดตีบลงไป

ในบริเวณรัฐโอกลาโฮมา(Oklahoma สหรัฐ) แร่จำพวกคลอไรต์มักเกิดอยู่ร่วมกับแหล่งแร่ทองแดงอายุเพอร์เมียน ทำให้หลายคนคิดว่าคลอไรต์น่าจะเป็นตัวการในการพาเอาโลหะทองแดงมา การเกิดเป็นแหล่งแร่มักพบในบริเวณใกล้ฝั่งที่มีชั้นตะกอนแดงกับเกลือระเหย เช่น แหล่งครีตา (Creta) ซึ่งบริเวณที่ให้ทองแดงมากที่สุดคือชั้นดินดานสีเทาที่แทรกสลับในชั้นตะกอนทราย

นอกจากทองแดงแล้ว ตะกอนแดงเหล่านี้ยังเป็นแหล่งสะสมตัวของแร่ธาตุตัวอื่นด้วย เช่น ยูเรเนียม(U) และวานาเดียม(V) แหล่งผลิตยูเรเนียมส่วนใหญ่ของอเมริกามักสกัดเอาแร่จากแหล่งสินแร่เล็กๆ ในตะกอนทรายบกอายุระหว่างครีเตเชียส-เทอร์เชียรีแถบรัฐโคโลราโด นิวเม็กซิโก และเท็กซัส ซึ่งมักนิยมเรียกแหล่งแร่แบบนี้ว่า แหล่งแร่ยูเรเนียมแบบโรลฟรอนต์(roll-front-type U-deposits) โดยที่สินแร่ยูเรเนียมเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างหินทรายที่ขาดออกซิเจน(reduced) กับที่เพิ่มออกซิเจน(oxidized) ซึ่งเป็นที่เชื่อกันว่า U^{+6} ถูกนำพามาโดยน้ำใต้ดินที่เพิ่มออกซิเจนและตกตะกอนสะสมตัวเมื่อถูกลดออกซิเจนกลายเป็น U^{+4} ซึ่งตัวการในการลดออกซิเจนอาจเป็นพวกสารอินทรีย์ให้ตัวตะกอนทรายหรือก๊าซ H_2S จากแหล่งกำเนิดภายนอก (extrinsic origin) เท่าที่ผ่านมามีการศึกษาเรื่องแร่ยูเรเนียมกันมาก เนื่องจากแร่ยูเรเนียม(และทอเรียม)เป็นแร่ยุทธปัจจัย(strategic minerals) ซึ่งมีความสำคัญทางทหารมาก ความจริงวิวัฒนาการการเกิดบรรยากาศของโลกมีผลกับปริมาณออกซิเจน(ซึ่งสัมพันธ์กับแร่ยูเรเนียม) ตั้งแต่สมัยที่โลกอุบัติขึ้นมา(ดูรูป

9.3.12) ในรูป 9.3.13 จึงแสดงลักษณะเฉพาะของแร่ยูเรเนียมตามช่วงเวลาธรณีกาล ซึ่งนักสำรวจมักใช้ข้อมูลเหล่านี้เป็นแบบจำลองในการสำรวจหาแร่ (รูป 9.3.14 และ 9.3.15) อย่างไรก็ตามหลายคนเชื่อว่าการละลายธาตุยูเรเนียมอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (รูป 9.3.16) และการสะสมตัวอาจแปรผันกับชนิดหินได้ (รูป 9.3.17) และโดยเฉพาะที่พบในรัฐสาคาสชีวาน (ตอนกลางในคานาดา ดูรูป 9.3.18)

รูป 9.3.19 ถึง 9.3.24 แสดงลักษณะและสภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งแร่ยูเรเนียมที่สำคัญ ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดร่วมกับรอยเลื่อน และรอยความไม่ต่อเนื่อง บริเวณที่มีการศึกษามากคือบริเวณที่ราบสูงโคโรลาโด (ใน 4 มลรัฐคือ โคโรลาโด-ยูทา-อริโซน่า-นิวเม็กซิโก, รูป 9.3.25) ทำให้บางท่านเรียกแหล่งแร่ยูเรเนียมแบบนี้ว่าแบบโคโรลาโด (Colorado-type) และปัจจุบัน เชื่อว่าการสะสมตัวของยูเรเนียมเกิดบริเวณช่วงต่อของแนวสัมผัสออกซิเจนเพิ่ม-ขาด (redox boundary) ที่เรียก “roll-front” (ดูรูป 9.3.26) สำหรับภาพตัดขวางที่แสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของแร่ยูเรเนียมในชั้นตะกอนแบบต่าง ๆ ได้แสดงในรูป 9.3.27 และ 9.3.28 และการกระจายตัวของแหล่งแร่ยูเรเนียมเมื่อเทียบกับแนวความไม่ต่อเนื่องได้แสดงในรูป 9.3.29 ส่วนการจำแนกแหล่งแร่ยูเรเนียมในแบบอื่น ๆ ได้แสดงในตาราง 9.3.7

9.3.5 แหล่งแร่ตะกั่วในหินทราย (Pb-(Zn-Ag) Sandstone Deposit)

แหล่งแร่ตะกั่วในหินทราย คือแหล่งแร่ที่มีแร่กาลีน่าฝังปะในหินทรายขุน, ทรายสะอาด และทรายปนกรวด ซึ่งวางตัวเหนือฐานหินเปลือกทวีป (sialic basement) และช่วงที่เกิดการสะสมตัวแหล่งแร่คงอยู่ในบริเวณละติจูดต่ำ ในหลายบริเวณ (เช่นรูป 9.3.30) พบว่าหินฐานมักแสดงค่าตะกั่วและโลหะบางตัวที่สูงจนผิดปกติ (เช่น รูป 9.3.30 B) ทำให้เชื่อว่าต้นกำเนิดของแร่อาจมาจากที่ลึก นอกจากนั้นยังพบว่าสภาพแวดล้อมการสะสมตัวของตะกอนเป็นพวกที่เกิดมาจากบนบกหรือทะเลตื้น (รูป 9.3.30 A) เช่นที่ราบกัลดรอนติดทะเลทราย ซึ่งโดยทั่วไปมักเกิดอยู่ร่วมกับหินเกลือระเหย

แหล่งแร่ตะกั่วในหินทรายนี้มักให้แร่ความสมบูรณ์ต่ำโดยเฉลี่ย ซึ่งขอบนอกของแหล่งแร่มักมีความสมบูรณ์น้อย ส่วนใจกลางมักให้ความสมบูรณ์น้อย ขอบเขตของแหล่งแร่กำหนดได้ไม่แน่นอน โดยมากแปรผันตามความสมบูรณ์ของแร่ที่สูงพอทำเหมือง (cut-off grade)

จากการศึกษาวิทยาแร่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าตะกั่วส่วนใหญ่เป็นพวกแร่กาลีน่า (galena) ซึ่งมักมีแร่เงินอยู่ด้วยบ้าง (ยกเว้นที่ Largentiere) และมีแร่ไพไรต์อยู่ด้วยบ้าง ถ้าหากมีสังกะสีอยู่ด้วยมักเกิดอยู่ตอนบนของการลำดับชั้นและมักเป็นแร่สฟาเลอไรต์ โดยที่แร่กาลีน่ามักทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเม็ดตะกอน ดังนั้นปริมาณแร่กาลีน่าจึงสัมพันธ์โดยตรงกับช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนเดิมในหินฐานข้อมูลของแหล่งแร่ประเภทนี้ได้แสดงไว้ในฐานข้อมูลที่ 8

สำหรับแหล่งแร่บริเวณเขตหินเก่าแก่บอลติก (Baltic Shield) นั้นส่วนใหญ่วางตัวเหนือหินแกรนิต หินควอร์ตพอฟไฟร์และหินไนส์ในมหายุคโปรโตโรโซอิก (รูป 9.3.31) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานหินซับซ้อน (basement complexes) ชั้นหินตะกอนที่อยู่บนฐานหินประกอบด้วยหินกรวด หินทรายขุนยุค อีโอแคมเบรียนจนถึงแคมเบรียนและตามด้วยหินดินดานและทรายแป้งอายุแคมเบรียน ต่อจากนั้นจึงเป็นหิน

ทรายและหินกรวดมวลชุดที่สอง แร่กาสิโนเกิดในชั้นตะกอนชั้นล่างๆ หรือหินทรายชุดที่สองคือในหินทราย สะอาดมีอายุประมาณ 560 ถึง 530 ล้านปี (รูป 9.3.31A) แสดงถึงสภาพแวดล้อม ณ ช่วงเวลาที่แร่เกิด

ส่วนทางยุโรปตะวันตก แหล่งแร่ตะกั่วเกิดสัมพันธ์กับหินทรายหลากสีในหินตะกอนที่เรียก “Buntsandstein Basin” ในยุคไทรแอสซิก โดยเฉพาะบริเวณตรงขอบแอ่ง เช่น แหล่งMaubach & Mechernich ของเยอรมันตะวันตก โดยมีฐานหินแปรยุคแคมเบรียน-ดีโวเนียนและบริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของ Largentiere ประเทศฝรั่งเศสในบริเวณขอบของ Hercynian Central Massif (รูป 9.3.31B)

ส่วนบริเวณ Mechernich-Maubach ฐานหินซึ่งมีชั้นหินผุพังอยู่กับที่เกิดอยู่เป็นแห่งๆ ถูกปิดทับ ด้วยหินทรายและหินกรวดเป็นชุดๆ ซึ่งชุดบนๆ มักมีสีแดงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่ Mechernich เป็น หินดินดานสีแดง และพบแร่กาสิโนอยู่ในหินทรายในส่วนกลางและส่วนบนของชุดหินที่ Maubach ปริมาณ แร่กาสิโนลดลงเป็นลำดับ โดยสัมพันธ์กับปริมาณหินดินดานที่เพิ่มขึ้น

แถบที่เรียก “Largentiere” (ลาเจนเทียร์) เป็นกลุ่มแหล่งแร่แสดงความสัมพันธ์กับฐาน ธรณีวิทยาในอดีต เชื่อกันว่าพื้นที่เขตหินเก่ามีปริมาณตะกั่วมากอยู่แล้ว และเป็นตัวแจกจ่ายแร่กาสิโนหรือ ตะกั่วให้กับหินเนื้อประสมเม็ดหยาบที่เกิดบนบริเวณตะกอนกักร่อนติดกับแอ่งเกลือระเหย ซึ่ง Bjorlykke & Sangster (1981) ได้แสดงให้เห็นถึงการกำเนิดแหล่งแร่ตะกั่วชนิดต่างๆ

จากการศึกษาแหล่งตะกั่วเหล่านี้อย่างละเอียดพบว่าแหล่งแร่เหล่านี้จะสัมพันธ์กับสภาพภูมิอากาศ อากาศที่แห้งแล้งและกึ่งทะเลทราย ซึ่งแสดงหลักฐานโดยตะกอนทรายและหินดินดานสี น้ำตาลแดงถึงถึง แดงจัด ซึ่งทำให้คาดคิดกันว่าเมื่อก่อนแผ่นทวีปคงอยู่บริเวณละติจูดต่ำ แล้วต่อมาจึงแผ่นทวีปจึงเคลื่อนตัว มายังละติจูดที่สูงขึ้น(รูป 9.3.32)

แหล่งแร่ตะกั่วในหินทรายซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งแร่ทองแดงในชั้นตะกอนแดงกับแหล่งแร่ หินดินดาน หินปูนทะเล ได้แสดงสรุปการเปรียบเทียบลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญไว้แล้วในตารางที่ 9.3.5

9.3.6 แหล่งแร่ทองแดงในแอ่งทะเลตื้น (Copper Deposits of Shallow Marine Type)

แหล่งแร่ทองแดงระดับโลกมักเกิดในชั้น หินตะกอนหลายชนิดที่เกิดในทะเลตื้นบริเวณขอบ ทวีป ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนและมีชื่อเสียงมากก็คือแหล่งคูปเฟอร์ (Kupferschiefer หรือCopper Shale) ในยุโรปกลาง โดยเฉพาะเยอรมัน และแนวแหล่งแร่แซมเบีย-ไซเรีย(Zambian-Zairian) ในอาฟ ริกากลาง จากการศึกษาในแหล่งแร่ทั้งสองพบว่าต้นกำเนิดของทองแดงจากทวีปอยู่ไกลจากแหล่งชัลไฟต์ ตามชั้น รูป 9.3.33 แสดงการกระจายตัวของแหล่งแร่ทองแดงและชัลไฟต์ตามชั้นในหินตะกอน และรูป 9.3.34 แสดงลำดับชั้นหินตะกอน และการเกิดแหล่งแร่ชัลไฟต์ตามชั้นแบบต่าง ๆ ตั้งแต่บริเวณขอบเขตหิน เก้า(epicratonic) จนถึงเขตนํ้าตื้นติดทวีป(platform marginal) และเขตนํ้าลึก(Hysch)

จากการศึกษาอย่างเป็นระบบพบว่ากำเนิดแหล่งทองแดงดังกล่าวเป็นผลมาจากกระบวนการผุพัง ตลอดจนความรุนแรงและความยาวนานของการผุพัง ทั้งนี้เพราะทองแดง ยูเรเนียม และสังกะสีมักถูกชะล้าง

ออกจากแร่ในหินต้นกำเนิดในบริเวณเขตหินเก่า (cratonic areas) มากกว่าตะกั่วและแบเรียม (Ba) ซึ่งมักถูกสะสมตัวในแร่โปแตสเฟลสปาร์ (K-feldspar) ซึ่งค่อนข้างเสถียรในสภาพอากาศที่ร้อนและแห้งแล้งแบบทะเลทราย โลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมานี้ในที่สุดก็ไหลซึมลงไปสู่ระบบน้ำใต้ดิน และไหลซึมสู่ทะเลในที่สุด ซึ่งในกรณีนี้ น้ำเค็มทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้น โลหะและซิลิกา อินทรีย์วัตถุที่มีอยู่มากมายในแถบชายฝั่ง ทำหน้าที่เป็นตัวลดภาวะออกซิเจนซึ่งยังผลให้โลหะซัลไฟด์ตกตะกอนได้ ด้วยเหตุนี้ชั้นตะกอนสีแดงที่มาจากบนทวีปจึงเปลี่ยนแปลงไปเป็นชั้นตะกอนสีเทา ดำ และขาวที่แสดงถึงภาวะที่ขาดออกซิเจนอย่างรวดเร็ว โดยอาจมีการสลับชั้นกันระหว่างสีแดงและสีเทา ซึ่งแสดงถึงการขึ้นลงๆ ของระดับน้ำทะเล (sealevel oscillation)

ในรายงานการศึกษาของพวกรัสเซีย (ดู Aleva & Westerhof, 1989) มักเรียกชื่อแหล่งแร่แบบนี้ในแง่การเกิดแบบรวมๆ ว่า “แหล่งซึมซับ” (Infiltration Deposit)

ในเอกสารฉบับนี้ได้แยกยกตัวอย่างอธิบายเพิ่มเติมเพียง 2 แหล่งคือ แหล่งคูปเฟอร์ไซเฟอร์และแหล่งแซมเบีย

ก. แหล่งคูปเฟอร์ไซเฟอร์

อาจจัดได้ว่าแหล่งในยุโรปกลางแหล่งนี้มีชื่อเสียงมากที่สุดและเป็นที่ถกเถียงมากที่สุดในโลกแหล่งหนึ่งคือ แหล่งคูปเฟอร์ไซเฟอร์ (รูป 9.3.35) ก และ ข แหล่งนี้หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อภาษาอังกฤษว่า "Copper Shale" (หินดินดานทองแดง) ประกอบด้วยชั้นหินดินดานปนโดโลไมต์ ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยน้อยกว่า 1 เมตร แผ่ปกคลุมพื้นที่บริเวณกว้างครอบคลุมยุโรปเหนือ (ด้วยทะเลที่เรียกเซกเซเดน-Zechstein) แหล่งคูปเฟอร์ไซเฟอร์นี้ทำเหมืองมาหลายศตวรรษ โดยเฉพาะทองแดงตะกั่วและสังกะสี การเกิดแหล่งแร่ไม่ใช่ว่าจะอยู่แต่ในชั้นที่เป็นหินดินดานเท่านั้น แต่ยังเกิดอยู่ในชั้นหินที่วางอยู่ข้างใต้ ซึ่งมักเป็นหินทรายและที่วางอยู่ข้างบนซึ่งเป็นหินคาร์บอนेट (ทั้งหินปูนและโดโลไมต์) (ดูรูป 9.3.34 ก) ด้วยภาวะการตกตะกอนเป็นลำดับแรกๆ ไปเรื่อยๆ ตามระยะทางก่อนหลัง จึงเกิดการสะสมแร่เป็นวงแร่ (mineral zoning) ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งนอกเหนือจากทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีแล้ว แหล่งแร่คูปเฟอร์ไซเฟอร์ยังมีสินแร่ตัวอื่นอีกด้วย เช่น แวนาเดียม(V) โครเมียม(Cr) โมลิบดีนัม(Mo) ทองแดง ทองคำ ทองคำขาว(Pt) ซีลีเนียม(Se) และโรเดียม(Rh) เป็นต้น

ได้มีการเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการเกิดแหล่งแร่ที่นับครั้งแต่ที่เริ่มมีการผลิตแร่ที่สำคัญมีอยู่ 2 กระบวนการคือ อัดตกกรรม(synthetic) และปฏิกิริยาร้อนน้ำยา(hydrothermal epigenetic) แต่ในปัจจุบันนักธรณีวิทยาหลายท่านให้ความสำคัญกับการเกิดแบบวิปากกรรม(diagenetic) มากกว่าอัดตกกรรม(หรือก่อนไปทางปฏิกิริยาร้อนน้ำยามากกว่า

ในรูป 9.3.35 ก แสดงถึงการกระจายบริเวณกว้างของแหล่งแร่คูปเฟอร์ไซเฟอร์ในยุโรป กลางถึงเหนือ และรูป 9.3.35 ข แสดงให้เห็นชัดว่าโดยแท้จริงแล้วแหล่งแร่เกิดแทรกคั่นชั้น(discordant) และแหล่งแร่ยังแสดงถึงการแปลงเปลี่ยนหรือการเปลี่ยนสภาพ(alteration) ในหินทรายที่วางตัวอยู่ข้างใต้ ซึ่งมัก

แสดงออกด้วยพื้นที่สีแดง ("Route Faule") แหล่งแร่ในประเทศเคนยาก็มักเกิดสัมพันธ์กับลักษณะปรากฏ (facies) แบบนี้ อย่างไรก็ตามพบว่าในบางแห่งมีแต่พื้นที่สีแดงในหินทราย แต่ก็ไม่มีสินแร่เหมือนกัน หลายคนสนับสนุนว่าโลหะดังกล่าวข้างต้นอาจถูกพัดพาไปในน้ำใต้ดินและผ่านเข้ามาในหินทรายที่มีรูพรุนซึ่งอยู่ข้างใต้ และเกิดการตกตะกอนของโลหะเมื่อสัมผัสกับชั้นดินโคลนที่มีซัลไฟด์จนได้เป็นแหล่งแร่โลหะขนาดใหญ่ของคูปเฟอร์ไรซ์เฟอร์ไรต์ในหินดินดาน

ข. แหล่งทองแดงแซมเบีย

นับว่าแหล่งนี้ก็เป็นแหล่งทองแดงขนาดยักษ์อีกแหล่งหนึ่งของโลก อยู่แถบประเทศแซร์ (Zaire) กับแซมเบียในอาฟริกากลาง (รูป 9.3.36 A) แหล่งแร่เกิดในปลายมหาสมุทรแอตแลนติกที่เรียกยุคโปรติโรโซอิกตอนปลาย และเกิดในชั้นตะกอนเฉพาะชั้นเท่านั้น ซึ่งก็คล้ายกับของแหล่งคูปเฟอร์ไรซ์เฟอร์ไรต์คือแสดงวงแร่ชัดเจน (รูป 9.3.36 B)

แหล่งแร่เกิดเป็นแนวปริมณฑลแร่ทองแดง (Copper belt) และแบ่งได้เป็น 2 ส่วน (รูป 9.3.37) ในประเทศแซร์ แหล่งแร่เกิดอยู่ในหินตะกอนที่ไม่ถูกแปรสภาพ และวางตัวในแนวราบแม้ถูกตัดด้วยรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (thrust fault) ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ แถบประเทศแซมเบีย หินตะกอนเกิดการแปรสภาพไปเป็นหินแปรนี้มีแร่คอปเปอร์ไรต์เดิน จนถึงพวกที่มีแร่คาร์เนต (โกเมน) เดิน นอกจากนั้นยังแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดด้วย จากการศึกษาพบว่าชุดหินตะกอนของแซมเบียสะสมตัวในสภาพภูมิศาสตร์ที่ขรุขระมากกว่า เช่น บนเขาหินแกรนิต ส่วนของแซร์มักเป็นหินโคลไลต์แต่ของแซมเบียกลับเป็นตะกอนเนื้อประสมที่แซมเบีย ความแตกต่างระหว่างสินแร่กับหินดินดานปรากฏชัดเจนในแนวตะวันตกเฉียงใต้ โดยที่แหล่งแร่เกิดในหินตะกอนเนื้อประสมเม็ดละเอียด ส่วนในแซมเบีย (แถบ Mufulira) แหล่งแร่มี 3 ชั้นตามแนวโค้งในชั้นหินทรายปนอินทรีย์ที่แทรกสลับกับหินโคลไลต์ที่ไม่ให้แร่ เชื่อกันว่าตอนเกิดการสะสมตัวของสินแร่ น้ำทะเลคงเค็มจัดจึงทำให้ได้หินโคลไลต์ในประเทศแซร์ และหินแอนไฮไดรต์ในประเทศแซมเบีย อย่างไรก็ตามแหล่งแร่ทั้งสองให้วิทยาแร่ที่คล้ายกันคือ ทองแดงและโคบอลต์ซัลไฟด์เด่น ขณะที่ตะกั่วและสังกะสีปรากฏไม่มากนัก รูป 9.3.38 และ 9.3.39 แสดงลักษณะตัวแหล่งแร่ของปริมณฑลแร่ ส่วนรูป 9.3.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์ (grade) กับปริมาณ (tonnage) ของแร่ตะกั่วและสังกะสี และรูป 9.3.41 แสดงลักษณะการเกิดแหล่งแร่ตามชั้นในแบบตะกอนฟัน (ดูรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) ให้สังเกตเทียบกับการเกิดทองแดงของแหล่งแร่ไวต์ไพน (รัฐมิชิแกน) ซึ่งแสดงการรูกูล้าน้ำทะเล (รูป 9.3.44) ส่วนภาพเปรียบเทียบแสดงการเกิดของแหล่งแร่จากทวีปอเมริกาเหนือและเยอรมันได้แสดงในรูป 9.3.45 ถึง 9.3.48 ซึ่งรูปหลังสุดแสดงความสัมพันธ์กับแอ่งขนาดด้วยรอยเลื่อน นอกจากนั้นยังพบว่าหลายแหล่งเช่น แหล่งไฮวาตพาสในรัฐ Northwest Territory (คานาดา) ยังเกิดสัมพันธ์กับน้ำลึกหรือไหล่ทวีป (slope facies) (ดูรูป 9.3.49 ก ถึง ง) สำหรับนักสำรวจภาพรวม ๆ ของการเกิดเป็นแหล่งแร่ซัลไฟด์ในหินตะกอนได้แสดงในรูป 9.3.50 ส่วนแบบจำลองการเกิดแหล่งแร่ทองแดงแบบซาบคา ได้แสดงรายละเอียด โดยเฉพาะวิวัฒนาการไว้ในรูป 9.3.51 ให้สังเกตว่ารายละเอียดเกี่ยวกับแหล่งแร่ซัลไฟด์ในตะกอนน้ำลึกได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

9.3.7 แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีตะกอนพื้น (Sedimentary-Exhalative Pb-Zn (-Cu) Deposits)

แหล่งแร่ตะกอนพื้นหรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ “แหล่งแร่ SEDEX” (ย่อมาจาก sedimentary-exhalative) ซึ่งมีลักษณะหลายอย่างคล้ายกับแหล่งแร่ VMS ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน (ดูหัวข้อ 9.2) เพราะทั้งคู่เป็นแหล่งแร่ที่พ่นจากทะเล (submarine exhalative) ที่แตกต่างกันชัดเจนที่ตรงที่แหล่งแร่ VMS เกิดอยู่ในหินภูเขาไฟ และมีความเกี่ยวข้องกับขบวนการหินอัคนี ขณะที่แหล่งแร่ตะกอนพื้น (หรือ SEDEX) เกิดอยู่ในชั้นตะกอนทะเลหนา โดยพบหลักฐานของขบวนการหินอัคนีหรือหินภูเขาไฟน้อยมากถึงไม่พบเลย นักสำรวจส่วนใหญ่พบว่าแหล่งตะกอนพื้นเกิดอยู่กับหิน ดินดานหรือบางครั้งเกิดในหินคาร์บอนेटผลึกละเอียด (ที่เรียกแบบไอริชหรือ Irish-type) และน้อยครั้งที่เกิดในตะกอนเนื้อประสมผลึกหยาบ เช่น แหล่งรอสพินา (Rosh Pinah) ในประเทศนามิเบีย (Namibia) ถ้าพบเห็นหินอัคนีมักปรากฏเฉพาะแห่ง เช่น ถ้ำภูเขาไฟชั้นบางหรือผนังหินอัคนีสีเข้ม ซึ่งการที่ปรากฏเป็นหินอัคนีแบบนี้ก็ไม่เป็นที่แปลกใจสำหรับนักสำรวจเนื่องจากอาจเกิดสัมพันธ์กับการแปรสัณฐานแบบดึงออก (extension tectonics) ในตอนเกิดแอ่งตะกอนดินดานภายในทวีปหรือขอบทวีป (epi-หรือ intra-continental shale basins)

แหล่งแร่ SEDEX ที่สำคัญๆ ของโลก ได้แก่ แหล่งซัลลิแวน (Sullivan) รัฐบริติชโคลัมเบียของแคนาดา, แหล่งเมกแกน (Meggen) และแหล่งแรมเมสต์เบอร์กของเยอรมันนี และแหล่งเมาท์อีซา และแหล่งแม่น้ำแมกอาเทอร์ (McArthur River) ของออสเตรเลีย (ดูในฐานข้อมูลที่ 9) บางท่านอาจจัดแหล่งโบรเคนฮิล (Broken Hill) ของออสเตรเลียเป็น SEDEX ที่ต่อมาได้รับการแปรสภาพ เป็นที่น่าสังเกตว่าแหล่งที่กล่าวมานี้เกิดสะสมตัวอยู่ในช่วงอายุ 1,700-1,400 ล้านปี (มหายุคพรีแคมเบรียน) และประมาณ 500 ล้านปีถึง 320 ล้านปี (มหายุคพาเลโอโซอิกตอนต้น) แทบทั้งสิ้น

ลักษณะที่สำคัญของแหล่งแร่ SEDEX มีดังต่อไปนี้

ก) ชั้นหินส่วนใหญ่ประกอบด้วยชั้นบางๆ (lamination) ของสินแร่ซัลไฟด์เม็ดละเอียดซึ่งวางตัวภายในและขนานกับชั้นตะกอน (stratiform deposit) ที่ห่อหุ้มชั้นแร่ นั้น โดยการตกตะกอนของสินแร่ซัลไฟด์บนพื้นทะเล

ข) ในบริเวณชิดกับหรือใกล้กับตัวแหล่งแร่ มักแสดงลักษณะการแปลงเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลง โดยน้ำยาร้อน (hydrothermal alteration) จำพวกซิลิกาที่เรียก “silicification” ชัดเจน หรือมีสินแร่ซัลไฟด์เกิดลักษณะฝังประ (disseminated) และเป็นร่างแห (stockwork) อยู่บ้าง หรืออาจเกิดแบบสายแร่เชิงซ้อนของซัลไฟด์ ซึ่งแสดงถึงการพ่นปะทุปล่องกลาง (exhalative centre) บนพื้นทะเล

ค) เห็นวงแร่ชัดเจนทั้งแนวราบและแนวตั้ง เช่นตามแนวราบ ตัวสินแร่ที่สำคัญๆ ได้แก่ Cu-Pb-Zn-Ba และตามแนวตั้งเป็น Cu-Zn-Pb-Ba ซึ่งทั้งนี้อาจเป็นเพราะเกิดการเย็นตัวและจางหายอย่างรวดเร็วจากแนวปล่อง ทำให้แร่เกิดการตกตะกอนได้ (ดูรูป 9.3.52)

- ง) ลักษณะธรณีเคมีของไอโซโทปกัมมันต์ แสดงถึงแหล่งกำเนิดจากที่ลึกของสินแร่ตะกั่วและสังกะสี
- จ) การสะสมตัวของแร่แบไรต์ภายในชั้นตะกอน (stratiform barite) มักเกิดพบเห็นมากมายในบริเวณส่วนปลายของแหล่งหรือส่วนที่ปิดทับข้างบน
- ฉ) ซิลิกาที่มีเนื้อละเอียดพบเห็นบ่อยภายในชั้นตะกอนที่มีแร่ซัลไฟด์และแบไรต์ หินเชิร์ตอาจเกิดฝังชั้นอิสระหรือเป็นก้อนๆ ได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของตะกอนที่สะสมตัวอยู่ก่อนแล้ว

นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งแร่ SEDEX มักพบเห็นในสภาพการแปรสัณฐานได้หลายแบบ (ดูรูป 9.3.53 และตาราง 9.3.8)

- 1) แอ่งตะกอนภายในเขตทวีปเก่าแก่ (intracratonic) หรือขอบทวีป (epicratonic) ที่จัดเป็นแอ่งตะกอนปฐมภูมิ (primary basin) ซึ่งมีขนาดใหญ่เป็นร้อยตารางกิโลเมตร เช่น แอ่งตะกอนอลาโคเจน (ดูรูป 9.3.53 และ 9.3.54 A)
- 2) การแปรสัณฐานพร้อมการสะสมตัวของตะกอน ก่อให้เกิดการขยายตัวของแอ่งจนมีสภาพเป็นแอ่งตะกอนทุติยภูมิ (secondary basin) ในขนาดหลายสิบตารางกิโลเมตร
- 3) เกิดภาวะแอ่งตะกอนลำดับที่สาม (third-order basin) ซึ่งเป็นตะกอนแอ่งออกซิเจน จัดว่ามีพลังงานต่ำ ซึ่งขนาดตะกอนประมาณ 0.100 x 1.0 กม และมีรอยเลื่อนมีพลัง
- 4) เกิดแนวเส้นโครงสร้างและขอบของแหล่งแร่พบบริเวณของแอ่งปฐมภูมิและแอ่งทุติยภูมิในตอนช่วงเกิดสะสมตัวของตะกอน
- 5) พบเห็นการกระทำของหินอัคนีน้อยมากตอนเกิดการตกตะกอนของสินแร่ โดยมีเพียงชั้นบางของแก้วภูเขาไฟหรือผนังหินอัคนีสีเข้ม(รูป 9.3.54 B)

แหล่งที่มีผู้นิยมศึกษากันมากได้แก่ที่เหมืองซัลลิแวน (Sullivan mine) เมืองคิมเบอร์เลย์ (Kimberley) รัฐบริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา ซึ่งมีความยาวของตัวสินแร่ถึง 1.9 กิโลเมตร และมีความกว้าง 1.3 กม ส่วนที่หนาที่สุดประมาณถึง 50 เมตร วางตัวอยู่ในชั้นหินกรวดภายในหมวด (intraformational conglomerate) ซึ่งแสดงการแตกหัก (brecciated) และเกิดการเปลี่ยนสภาพแบบทัวร์มาลีน (tourmalinization) (ดูรูป 9.3.54 C)

แหล่งแร่ประกอบด้วยแนวแร่หลายแนวด้วยกัน โดยที่แต่ละแนวแร่แสดงลักษณะเฉพาะตัวซึ่งอาจจัดได้เป็น 4 แนวแร่ คือ

- +1) แนวมวลสินแร่ตะวันตก (western massive ore zone) หนาประมาณ 50 เมตร ส่วนใหญ่ประกอบด้วยมวลสินแร่ซัลไฟด์หนาจนแทบไม่เห็นชั้นแร่ และที่พบรองลงมาคือหินตะกอนแปร ภายในแนวนี้นี้แร่ที่สำคัญคือพิไรต์ที่ตัวสินแร่เป็นรูปเลนซ์ แสดงลักษณะเฉพาะเพราะมวลสินแร่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือที่ส่วนฐาน
- +2) แนวชั้นแร่ตะวันออก (eastern bedded zone) หนาที่สุดประมาณ 36 เมตร แสดงลักษณะเฉพาะเพราะปรากฏเป็นชั้นสม่ำเสมอชัดเจน โดยมีแนวแร่ย่อย 5 แนว และแสดงรอยต่อระหว่างชั้นชัดเจน ชั้นที่ให้สินแร่

มากหนาประมาณ 24 เมตร ซึ่งประกอบด้วยชั้นย่อยหนาตั้งแต่ 3 ถึง 30 ซมของแร่พิไรไรต์ สฟาเลอไรต์ และ กาลีนา ขนาดเม็ดแร่มีตัวแก่ 5 ถึง 500 μm เฉลี่ยประมาณ 100 μm

+3) แนวช่องเปลี่ยน (transition zone) คือ มวลสายแร่ตรงกลางแหล่ง ซึ่งเป็นช่วงที่เปลี่ยนจากแนวมวลสินแร่ ตะวันตกไปยังแนวชั้นแร่ตะวันออก

+4) แนวการเกิดแร่ผนังส่วนล่าง (footwall mineralization zone) ประกอบด้วยชั้นแร่ที่ห่อหุ้มหินข้างเคียง ซึ่งได้แก่แร่พิไรไรต์ และสฟาเลอไรต์ และบางช่วงแสดงสายแร่ตัดขวางชั้นหินข้างเคียงด้วยบ้าง

+5) แนวการเกิดแร่ผนังส่วนบน (Hangingwall mineralization zone) ประกอบด้วยชั้นหินข้างเคียงหรือชั้น หินดั้งเดิม (host rock) จำพวกหินทรายสกปรกปนควอร์ต และหินทรายแป้งเป็นส่วนใหญ่ ส่วนตอนบนเป็น หินดินดานที่มีแร่พิไรไรต์ ซึ่งแสดงชั้นตะกอนถี่ๆ

สำหรับนักสำรวจแหล่งแร่ซัลไฟแวนแสดงลักษณะการเปลี่ยนสภาพที่รุนแรงและเด่นชัด แร่ที่ แสดงการเปลี่ยนสภาพหินคือ แร่ทัวมาลีน(จำพวกเครไวต์-dravite) ซึ่งพบในแถบผนังส่วนล่าง ส่วนตัวมวล แร่มีแร่ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนสภาพคือกลุ่มแร่ไพไรต์-โครไรต์-คาร์บอนเนต และบริเวณผนังส่วนบน การ เปลี่ยนสภาพแสดงด้วยกลุ่มแร่แอลไบต์-โครไรต์-ไพไรต์ (ดูรูป 9.3.55) ดัชนีได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง ตะกั่ว/สังกะสี (Pb/Zn) เปลี่ยนแปลงจาก 2 ในบริเวณส่วนกลางตัวสินแร่ (center of ore body) ไปเป็น 0.5 ใน บริเวณขอบผนังทั้งสองด้าน

ตัวอย่างแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี ตะกอนพันแหล่งอื่นๆ เช่นออสเตรเลียและเยอรมันหาได้จาก รูป 9.3.56 ถึง 9.3.58 และจากตาราง 9.3.8 B, C และ D ส่วนตาราง 9.3.8 A เป็นข้อมูลแหล่งแร่ตะกอนแผ่นได้ ทะเลที่ปรากฏในตะกอนอันดับหนึ่งและสอง ส่วนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแหล่งแร่ SEDEX ที่สำคัญๆได้แสดงใน ฐานข้อมูลที่ 9.9 สำหรับของตะกั่วในหินทรายได้แสดงในฐานข้อมูลที่ 9.8

9.3.8 แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับตะกอนเคมี (Mineral Deposits Hosted by Chemical Sediments)

แหล่งแร่มีค่าที่จัดอยู่ในหัวข้อนี้ ได้แก่ แหล่งแร่เหล็กและแมงกานีส ซึ่งโดยมากพบว่าแหล่ง ใหญ่ๆของโลกมักมีอายุในมหายุคพรีแคมเบรียน โดยเฉพาะพวกที่อยู่ระหว่างช่วง 2,600 ล้านปีจนถึง 1,800 ล้านปี และมักเป็นแหล่งที่เรียกกันว่า “สินแร่เหล็กแสดงชั้น” (banded iron formation หรือ BIF) หรือสินแร่ เหล็กแบบ “BIF” ซึ่งมีปริมาณของเหล็กตั้งแต่ 25 ถึง 40% (อาจกำหนดให้อยู่ในรูป Fe_2O_3 , FeO หรือ total Fe ก็ได้) และส่วนประกอบตัวอื่นได้แก่ SiO_2 และ CO_2 โดยอาจมีแมงกานีสปะปนอยู่ด้วยในบางแหล่ง ส่วนออก ไซด์ตัวอื่นไม่ว่าจะเป็น Al_2O_3 , MgO , CaO และออกไซด์ของแอลคาไลด์อื่นๆ ส่วนใหญ่อยู่ในระดับ 1-2%

ด้วยความที่แหล่งแร่ BIF มีความบริสุทธิ์ของแร่เหล็กมาก มีการแสดงชั้นถี่ๆ และความต่อเนื่อง ของชั้นที่เป็นระยะทางไกล (อาจถึงพันกิโลเมตร!) ทำให้หลายคนเชื่อว่าน่าจะเป็นผลมาจากการตกตะกอน ทางเคมีและชีวเคมีจากน้ำทะเลที่แผ่กว้าง และลึกพอที่จะกันไม่ให้เกิดคลื่นลมมารบกวนการตกตะกอนได้

แต่ความจริงแล้วการเกิดแหล่งแร่ดังกล่าวไม่ง่ายเหมือนอย่างที่เข้าใจกันในข้อความข้างบน หลายคนได้ตั้งข้อสงสัยไว้มาก เช่น Lepp & Goldich (1964) ได้เสนอว่าเหล็กและซิลิกาน่าจะมาจากการผุพัง

และกักร่อนจากทวีป ซึ่งตอนนั้นผิวโลกมีปริมาณออกซิเจนน้อยถึงเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงเกิดการผุพังที่ ให้ศิลาแลงซึ่งยังคงมีอะลูมินัม เหล็ก เฟอรัส และฟอสฟอรัส และอาจมี ซิลิกาด้วยบ้าง ขณะที่เหล็กเฟอรัสและซิลิกาที่มากมายถูกชะล้างและไหลซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดินสู่ทะเลและมหาสมุทร (ดังรูป 9.3.59)

ต่อมา เมื่อบรรยากาศสมัยนั้น(พรีแคมเบรียน) ค่อย ๆ เพิ่มปริมาณออกซิเจนมากขึ้น และ กระบวนการผุพังก่อให้เกิดธาตุตัวการสำคัญอื่นๆ เช่น Mg และ Ca (จากแร่ไพรอกซีนและแพล็กซิโกลิต) ผล ทำให้เหล็กและซิลิกาเกิดการตกตะกอนได้

ในตอนแรกอาจตกตะกอนลักษณะสารเจหรืออัญฐาน และมีน้ำในองค์ประกอบหรือบ้างก็ อยู่ในสภาพคอลลอยด์(colloids) ในตอนเกิดการอัดแข็งเป็นหินตะกอนช่วงต้นๆ จึงเริ่มมีแร่เป็นเม็ดๆ เช่น ควอร์ต และแร่เหล็กแดง ซึ่งแร่ดังกล่าวนี้แสดงเนื้อหินปฐมภูมิอยู่ ต่อมาจึงเกิดการแปรสภาพขั้นต่ำ เกิดการ เปลี่ยนแปลงแร่และส่วนประกอบไปเป็นแร่หินแปร ซึ่งแสดงลักษณะเนื้อหินทุติยภูมิ เช่น แร่สติปโนไมเลน (stilpnomelane) มินนิโซตาไต์ (minnesotaite)

อนึ่งสำหรับตารางข้างล่าง (ดูตาราง 9.3.9 และ 9.3.10) แสดงถึงลักษณะทางแร่ และการแปลง สภาพไปเป็นหินตะกอนและหินแปร ตลอดจนส่วนประกอบเดิมของแร่ในแหล่งแร่ BIF ตลอดจนข้อมูลด้าน สภาพแวดล้อมอย่างละเอียด ส่วนหัวข้อย่อย(ก และ ข) ถัดมาเป็นการอธิบายถึงแหล่งแร่เหล็กในหินตะกอน และแหล่งแร่แมงกานีสในหินตะกอน

ก. แหล่งแร่เหล็กในหินตะกอน

ความสมบูรณ์ของเหล็กโดยเฉลี่ยในเปลือกโลกประมาณ 4.7% ด้วยเหตุนี้ในหินเปลือกโลก (crustal rocks) แทบทุกชนิดจึงมักมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบด้วยไม่มากนักน้อย อย่างไรก็ตามการกระจาย ตัวของเหล็กในหินทุกชนิดไม่เท่ากัน ตามที่ปรากฏในตาราง 9.3.11

ตาราง 9.3.11 ปริมาณคิดเป็นร้อยละของเหล็กในหินชนิดต่าง ๆ

ชนิดหิน	ปริมาณเหล็ก	ชนิดหิน	ปริมาณเหล็ก
หินอัคนีสีเข้มจัด	9.85%	หินทราย	0.98-3.10%
หินอัคนีสีเข้ม	8.56%	หินคาร์บอเนต	0.38-1.30%
หินแกรนิต	5.85-2.70%	หินไซยไนต์	3.61%
หินดินดาน	3.33%		

ส่วนน้ำทะเลมีปริมาณของเหล็กโดยเฉลี่ยประมาณ 0.01% เหล็กที่มีมากในหินอาจปรากฏได้ใน 2 ลักษณะคือ หินเหล็ก (ironstone) และชั้นหินแร่เหล็ก (iron-formation)

- ก) หินเหล็ก หมายถึง หินตะกอนที่มีเหล็กมาก ซึ่งอาจเกิดการสะสมตัวโดยตรงจากตะกอนเหล็ก (ferruginous sediment) ที่มีกำเนิดมาแบบเม็ดและแบบเคมีหรืออาจกำเนิดโดยกระบวนการแทนที่ทางเคมี

(chemical replacement process) ปัจจุบันมักนิยมใช้กับหินตะกอนที่ไม่ใช่เชิร์ต แต่แข็งและไม่แสดงชั้นหรือเป็นชั้นหนา กำเนิดในมหาสมุทรแอนโธโซอิด โดยมากมักแสดงเนื้อหินแบบไข่ปลา (oolitic texture) แหล่งที่มีชื่อเสียงคือแหล่งสินแร่เหล็กไมเนต (Minette) แถบประเทศลักเซมเบิร์กและตะวันออกของฝรั่งเศส

- บ) **ชั้นสินแร่เหล็ก** - คำโดยทั่วไปที่ใช้กับหินตะกอนแสดงชั้น ชั้นถี่ๆ หรือแถบซึ่งมีเหล็กประมาณ 15% โดยน้ำหนัก โดยที่ชั้นที่มีเหล็กมากประกอบด้วยแร่เหล็กที่แทรกสลับกับชั้นที่เป็นหินเชิร์ต คาร์บอนเนตหรือควอร์ต และโครงสร้างที่เป็นแถบที่มักวางตัวต่อเนื่องทั้งรูปแบบและการวางตัวกับโครงสร้างที่เป็นแถบของหินเปลือกโลกเก่าแก่หรือหินแปร (ดู Gron, 1965) จึงเป็นที่เข้าใจกันว่าสินแร่เหล็กเหล่านี้เกิดขึ้นจากการตกตะกอนทางเคมีหรือทางเคมีอินทรีย์(ชีวเคมี) โดยมากมีอายุประมาณมหายุคพรีแคมเบรียน ซึ่งมักเกิดในเขตหินเการูปโล่ (shield areas) โดยใช้ชื่อตามท้องถิ่นนั้นๆ เช่น แหล่งอีตาบิไรต์ (itabirite)-บราซิล, แหล่งทาโคไนต์ (taconite)-สหรัฐ, แหล่งbanded hematite quartzite (หินควอร์ตไซต์เหล็กแดงแสดงแถบ)-อินเดีย, แหล่ง BIF-ออสเตรเลีย&แอฟริกา, แหล่งแจสไฟไลต์-(สหรัฐ), แหล่งแจสเบอร์บาร์ (Jasper bar)-ออสเตรเลีย เป็นต้น

แหล่งแร่เหล็กดังกล่าวนี้มักแสดงลักษณะเฉพาะทางเคมี กายภาพ และวิทยาแร่ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทั้งนี้ เป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมทางทะเลที่แตกต่างกันนั่นเอง หรืออาจเนื่องมาจากความสามารถของเหล็กในการเกิดเป็นแร่ต่างกันเพื่อตอบสนองต่อสภาพการสะสมตัวนั้น เหล็กอาจตกตะกอนได้ในรูปของแร่(ตามที่แสดงในตาราง 9.3.12)

ตาราง 9.3.12 สารประกอบจำพวกเหล็ก ชนิดแร่ และสูตรเคมี

สารประกอบ	ชื่อแร่	สูตร
- ไฮเดรต(hydrate)	goethite (GTT) lepidocrocite	FeO (OH) FeO (OH)
- เฟอริกออกไซด์ (ferric oxide)	hematite (HMT) maghemite	Fe ₂ O ₃ (ซึ่งมี Fe ~ 70%) Fe ₂ O ₃
- เฟอรัส&เฟอริกออกไซด์ (ferrous-ferric oxide)	magnetite (MGN)	Fe ₃ O ₄ = FeO.Fe ₂ O ₃ (มีเหล็ก ~ 72%)
- เฟอริก&เฟอรัส ซิลิเกต (ferric-ferrous silicate)	glauconite (GCN) แร่ไมก้าชนิดหนึ่ง มีสูตร	(K, Na, Ca) _{1.2-2} (Fe ⁺³ , Al, Fe ²⁺ , Mg) ₄ (Si _{7-7.4} , Al _{1-1.4} O ₂₀ (OH) _{4n} H ₂ O)
- เฟอรัส-เฟอริก ซิลิเกต (ferrous-ferric silicate)	greenalite (GRI) แร่เซอร์เพน หินชนิดหนึ่ง chamosite (CMS) แร่คลอไรต์ ชนิดหนึ่ง	(Fe ₆ ⁺² Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈) (Fe ₄ ⁺² Al ₂) (Si ₂ Al ₂) O ₁₀ (OH) ₈
- คาร์บอนเนต (carbonate)	siderite (sdr) ankerrite (ANK)	Fe Co ₃ (มีเหล็ก 48%) Ca (Mg Fe ⁺² Mn) (CO ₃) ₂
- ซัลไฟด์ (sulphide)	pyrite (PRT) marcasite (MRC) pyrrhotite (PTT)	Fe S ₂ (มีเหล็ก 47%) Fe S ₂ (มีเหล็ก 47%) Fe S

ในบางครั้งก็อาจมีแร่ประเภทวิบากกรรมและแปรสภาพที่มีเหล็กอยู่ด้วยก็ได้ เช่น

- thuringite (THG) และแร่คโลไรด์เหล็กสูง (อาจถึง 20%) ที่เรียก bavalite
- minesotaite (MNS) ซึ่งเป็นทัลก์ที่มีเหล็กมาก
- stiupnomelane (STP) ซึ่งเป็นแร่ไบโอไทต์(กลีบดำ)เหล็กมาก และ
- grunerite (GRU) ซึ่งเป็นแร่แอมฟีโบลเหล็กมาก

ความลึกสามารถใช้บ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมการตกตะกอนได้ โดยอาศัย O, Si และ CO₃ ตลอดจน pH (ค่าความเป็นกรด-ด่าง) โดยที่จากตื้นไปสู่ลึก อาจหาได้จากลักษณะปรากฏของตะกอนได้ดังนี้

ก) ลักษณะปรากฏชนิดออกไซด์ : GTT, LMN, HMT & MGN

ข) ลักษณะปรากฏชนิดซิลิเกต : GMS, GRI, GCN

ค) ลักษณะปรากฏชนิดคาร์บอเนต : SDR

และ ง) ลักษณะปรากฏชนิดซิลไฟต์ : PRT

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของKimberley (1978) เขาได้เสนอวิธีการจำแนกสภาพการตกตะกอนของชั้นสินแร่เหล็ก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดรูปแบบการสำรวจแร่ในเขตพื้นที่ต่างๆอย่างมาก (ดังแสดงในตาราง 9.3.12 รูป 9.3.59 และรูป 9.3.60)

รูป 9.3.61 เป็นแผนที่ประเทศออสเตรเลียที่แสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งที่สำคัญของชั้นสินแร่เหล็ก 6 แห่ง ที่สำคัญที่สุดคือแหล่งแฮมเมอร์สเลย์ (Hammersley) และแหล่งพิลบารา(Pilbara)(ดูรูป 9.3.61 ก.) ที่ออสเตรเลียตะวันตก และรายละเอียดของแหล่ง BIF ที่สำคัญได้แสดงไว้ในรูป 9.3.62

เนื่องจากแหล่งแร่เหล็กให้ปริมาณเหล็กมากมาจึงมากพอที่จะทำเหมืองได้เป็นระยะเวลายาวนาน แต่สำหรับยุโรปตะวันตกและสหรัฐอเมริกาการพัฒนาอุตสาหกรรมมีความสัมพันธ์กับแหล่งแร่ขนาดเล็กกว่ามากและมีอายุอ่อนกว่าด้วย ซึ่งโดยมากเป็นแหล่งแร่เหล็กชนิดเม็ดไข่ปลา (oolitic ferruginous deposits) เช่น แหล่งคลินตัน ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกา แหล่งไมเนต (Minette) ของแอลซัค-ลอเรน (Alsac-Lorraine) (ในลักแซมเบิร์ก-ฝรั่งเศส) นอกจากนั้นยังมีแหล่งแร่เหล็กที่ลุ่มน้ำขัง และแหล่งแร่เหล็กชั้นปูนที่เรียกสินแร่แสดงแถบสีดำ (black band ores) อีกด้วย

ในสมัยปัจจุบัน แนวคิดในเรื่องเศรษฐศาสตร์ของแหล่งขึ้นกับคำถามที่ว่าความสมบูรณ์ของสินแร่เป็นอย่างไรและแหล่งอยู่ไกลขนาดใด ในแหล่งอุตสาหกรรมของอเมริกา แร่ทาโคไนต์ ซึ่งให้เหล็ก 20% ก็สามารถเปิดเหมืองทำกำไรได้ สินแร่ของบราซิลและออสเตรเลีย ถ้าส่งไปขายยังประเทศอื่นได้ต่อเมื่อมีปริมาณความสมบูรณ์เหล็กถึง 50% จึงจะคุ้มทุน ซึ่งการที่จะให้แหล่งแร่สมบูรณ์ขนาดนี้มีอยู่ทางเดียวที่ทำได้คือทำให้เกิดความสมบูรณ์ยิ่งยวด (supergene enrichment) หลังจากมีสายแร่ปฐมภูมิเกิดขึ้น ดังนั้นการผูกพันจนได้ศิลาแลงในเขตร้อนนับว่าเป็นกระบวนการที่ทำให้แหล่งแร่ BIF ไม่ว่าจะเป็นของบราซิล ออสเตรเลีย หรือไซบีเรีย เพิ่มความสมบูรณ์จนสามารถทำเหมืองได้กำไรทั้งนั้น

ในช่วงศตวรรษหลังๆ นี้มีการค้นหาแหล่งแร่เหล็กขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบ BIF เช่น แหล่งอันเกฟ(Ungava) ในแคนาดา, แหล่งแฮมเมอร์สเลย์(Hammersley) ในออสเตรเลีย แหล่งคาราจี

(Carajas) ในบราซิล ล้วนแล้วเป็นเพราะการนำเอาข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์ทางอากาศมาใช้ในการสำรวจแร่ ซึ่งวิธีทางธรณีฟิสิกส์ที่ได้ผลแน่นอนที่สุดก็คือใช้วิธีความเข้มสนามแม่เหล็ก(magnetic) และแรงโน้มถ่วง(gravity) ตรวจสอบในภาคพื้นดินพร้อมกับธรณีวิทยาสนาม

ข. แหล่งแร่แมงกานีสในหินตะกอน

แหล่งแร่เหล็กและแมงกานีสมีหลายลักษณะที่คล้ายคลึงกัน บางแหล่งทั้งเหล็กและแมงกานีสก็อยู่ร่วมกันได้ เช่น แหล่งแร่เหล็กคยูนา (Cuyuna) ในรัฐเมนโซตา (อเมริกา) มีปริมาณความสมบูรณ์ของแมงกานีสถึง 7% แต่โดยทั่วไปมักมีแมงกานีสอยู่ประมาณ 0.5-1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผุพังในแต่ละพื้นที่ และชนิดหินสามารถเลือกสรรให้เกิดการสะสมตัวของแร่เหล็กหรือแมงกานีสได้เพียงแร่ใดแร่หนึ่งเท่านั้นในสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ ในยุโรปตะวันออก แหล่งแร่แมงกานีสใหญ่ๆ จัดแบ่งได้เป็น 2 พวก คือ

พวกแรก - พวกที่เกิดในตะกอนเนื้อประสม ซึ่งได้แก่หินทรายสลับกับหินดินดาน โดยมีแร่ ควอร์ตและกลูโคไนต์เป็นหลัก เช่นที่พบที่แอ่งตะกอนยุคโอลิโกซีนในประเทศยูเครน จอร์เจีย และมัลกาเรีย โดยมีความสมบูรณ์ของแมงกานีสถึง 35% รูป 9.3.63 และ 9.3.64 แสดง แผนที่ธรณีวิทยาและภาพตัดขวางของแหล่งแร่แมงกานีสและบริเวณข้างเคียงของยูเครน ซึ่งสินแร่แมงกานีสมีทั้งพวกที่เป็นออกไซด์และพวกที่เป็นคาร์บอเนต

พวกที่สอง - พวกนี้เกิดในตะกอนคาร์บอเนต เช่นที่เกิดในหินปูนแมงกานีส(manganiferous limestone) และโดโลไมต์ โดยที่มีความสมบูรณ์ของแมงกานีสประมาณ 5-30% Mn เช่นแหล่งที่พบในรัสเซียและมอร็อกโก

รูป 9.3.65 เป็นภาพรูปตัดขวางธรณีวิทยาแสดงถึงลักษณะการเกิดแหล่งแมงกานีสที่นิโคโพล-ทะเลดำ-ในรัสเซีย และแหล่งครูทอีแลนท์(Groote Eylandt) ในออสเตรเลีย

สินแร่แมงกานีสมักใช้ในอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่และสี เป็นตัวเติม(additive) ในอุตสาหกรรมเหล็ก

9.3.9 แหล่งแร่ที่เกิดในหินคาร์บอเนต

หินคาร์บอเนตส่วนใหญ่ ทั้งที่เป็นหินปูนและหินที่เปลี่ยนสภาพเป็นหินโดโลไมต์มักมีกำเนิดมาจากตะกอนอินทรีย์ ซึ่งทำให้เรามักพบเห็นซากดึกดำบรรพ์อยู่เสมอ แต่ก็มีตะกอนคาร์บอเนตบางชนิดที่เกิดมาจากการสะสมตัวทางเคมีที่อาจมีผลเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการเปิดของ ภูเขาไฟหรือการทำงานของน้ำใต้ดิน เช่น ตะกอนกรับปูนหรือแคลคริต(calcretes) ซึ่งก่อให้เกิดแหล่งยูเรเนียมในออสเตรเลีย หรือตะกอนซิลิกาซึ่งมีซากไดอะตอมอยู่ด้วย แม้จะมีสภาพเหมาะสมที่ก่อให้เกิดแหล่งทรัพยากรธรณีได้ แต่ตะกอนลักษณะนี้ก็ไม่ให้กำเนิดแหล่งแร่ขนาดใหญ่ๆ ได้

สำหรับนักสำรวจ(ธรณีวิทยา) นอกจากแอ่งตะกอน(รูป 9.3.66)หินคาร์บอนเนตอาจจัดว่าได้รับความสนใจมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการสำรวจหาแหล่งไฮโดรคาร์บอนและแหล่งแร่โลหะพื้นฐาน(รูป 9.3.67) หรือโลหะหนักบางตัว เช่น ตะกั่ว-สังกะสี เป็นต้น แต่ทำไมคาร์บอนเนตจึงเป็นหินที่เหมาะสมมากในการเป็นต้นกำเนิดทรัพยากรธรณี คำตอบง่ายๆแบบกำปั้นทุบดิน ก็คือ เพราะหินคาร์บอนเนตมักมีรูพรุนสูง มีการซึมผ่านของสารละลายได้ดี ประกอบกับสภาพการเกิดของมันมักเกิดตรงขอบ(margins) ของแอ่งตะกอนที่จมตัวลง (subsiding basins) ทำให้ความรู้ความเข้าใจสภาพแวดล้อมการสะสมตัวของคาร์บอนเนตเป็นเรื่องสำคัญสำหรับนักสำรวจ

ลักษณะสภาพแวดล้อมของการสะสมตัวของตะกอน ทำให้เราได้ทราบถึงชนิดหินที่เกิดโหนดหินปูน(reef) มักประกอบด้วยซากอินทรีย์ที่มีเปลือกที่แข็งแรงทนต่อการคลื่นลมทะเลได้ดี เปลือกเหล่านี้มีรูพรุนจึงเป็นตัวทำให้เกิดช่องว่างปฐมภูมิ(primary voids)อันเนื่องมาจากเปลือกเหล่านี้กองสุมเป็นเนินลาดชันของโหนดหินปูน ในสถานะที่คลื่นลมสงบ จึงเกิดการสะสมตัวของอินทรีย์วัตถุขนาดเล็กจนกลายเป็นตะกอนปูนเนื้อละเอียดบริเวณทะเลสาบส่วนหลังของโหนดหินปูนหรือท้องทะเลตอนช่วงระดับน้ำทะเลขึ้นสูงได้ ดังนั้นในบริเวณทะเลสาบหลังโหนดหิน(โบราณ)ดังกล่าวนี้ นักสำรวจจึงมักพบว่าตะกอนปูนละเอียดมักเกิดร่วมกับเกลือระเหยได้ โดยที่อาจมีหินเกลือจืด/แอนไฮไดรต์เกิดร่วมอยู่ด้วย แร่ตระกูลซัลเฟตทั้งสองดังนี้มีมักเกิด ณ ภาวะที่ขาดออกซิเจน (reducing condition) ทำให้สามารถไหลเวียนโลหะไอออน(หรือไอออน)ในรูปซัลไฟด์ได้ดี

อินทรีย์วัตถุที่ก่อให้เกิดการสะสมตัวของแคลเซียมคาร์บอนเนต(CaCO_3) จากน้ำทะเลรวมทั้งสิ่งมีชีวิตที่ไม่นิยสร้างเปลือก สามารถทำให้เกิดสารคาร์บอนได้ เมื่อตายและเน่าเปื่อยและก่อให้เกิดภาวะที่ขาดออกซิเจนได้เหมือนกัน ยังผลให้เราได้สารจำพวกเคโรเจน(kerogens) ไบโธเมน(bitumens) และอินทรีย์สารตัวอื่นได้ การปรากฏร่วมและรวมตัวของโลหะซัลไฟด์และหิน ดินดานสีดำจึงก่อให้เกิดแหล่งแร่ซัลไฟด์ที่สำคัญ และบางครั้งก็เกิดอยู่ด้วยได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นคาร์บอนเนต

ในที่นี้เราได้แยกอธิบายเฉพาะเรื่องของหินคาร์บอนเนต ในปัจจุบันเราเชื่อว่าสภาพการสะสมตัวของตะกอนคาร์บอนเนตในทะเลและทะเลสาบสามารถเกิดร่วมกับสภาพการสะสมตัวของตะกอนเนื้อประสมได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอีกสภาพแวดล้อมหนึ่งอาจมีทั้งที่เป็นแบบฉับพลัน(abrupt) หรือเป็นแบบต่อเนื่องค่อยเป็นค่อยไป(gradational)ก็ได้ ในการเกิดแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีในหินคาร์บอนเนตมักพบเห็นการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมไปเป็นตะกอนเนื้อประสมได้(ดูรูป 9.3.68 ก) โดยที่ในบางครั้งชั้นตะกอนเนื้อประสมนี้อาจมีแก๊สไฮโดรคาร์บอน(emanation) เกิดร่วมอยู่ด้วยได้ การเกิดเป็นแหล่งแร่ที่ปะปนกันทั้งในตะกอนคาร์บอนเนตและตะกอนเนื้อประสมแบบนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการจัดจำแนกชนิดหรือประเภทแหล่งแร่ได้มากพอควร

ความพรุนและการซึมผ่านของคาร์บอนเนต ความพรุนแสดงถึงปริมาณช่องว่างที่อยู่ในตะกอนหรือหิน เมื่อช่องว่างนี้เชื่อมต่อกันได้ก็จะกลายเป็นการซึมผ่าน ทั้งความพรุนและการซึมผ่านจะมีทั้งที่เกิดอยู่

แล้วพร้อมหินหรือตะกอนที่เรียกปฐุมภูมิ หรืออาจเกิดขึ้นมาภายหลังที่เกิดเป็นตะกอนหรือหินนั้นที่เรียกทุติยภูมิ ซึ่งแบบทุติยภูมิมีหลายชนิดด้วยกันคือ

- (1) เปลือกของสิ่งมีชีวิต(skeleton)หลายชนิดประกอบด้วยแร่อะราโกไนต์ ซึ่งไม่เสถียรและเปลี่ยนเป็นแร่แคลไซต์เมื่อเกิดการสะสมตัว และการจับแข็งในภาชนะน้ำจืด(fresh-water diagenesis) ขึ้น
- (2) กระบวนการโดโลมิไตเซชันหรือกระบวนการเกิดแร่โดโลไมต์(dolomitization) ซึ่งมีทั้งพวกที่เกิดในทะเลตื้น (หลายสิบเมตรจากระดับน้ำทะเล) ซึ่งเป็นการผสมกับระหว่างน้ำจืดกับน้ำทะเล หรือพวกที่เกิดร่วมกับกระบวนการเกิดแร่เกลือระเหยในทะเลสาบ และพวกที่เกิดในทะเลลึกโดยน้ำเค็มจัดถูก擠 (squeezed) เนื่องจากหินดินดานถูกอัดแน่น(compacted) ในบริเวณใจกลางแอ่งสะสมตะกอน
- (3) กระบวนการเกิดคาสต์(Karstification) ตอนที่ตะกอนคาร์บอเนตถูกยกตัวให้โผล่พ้นระดับน้ำทะเลสัมผัสกับบรรยากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ด้วย และได้ลักษณะ โครงสร้างที่เรียกโดไลนด์(dolines) และโครงสร้างยุบตัวแบบละลายออก (solution-collapse structure) และ
- (4) การเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงแปรสัณฐาน(tectonic fracturing) จนเกิดหินกรวดเหลี่ยมในหินปูน(brecciation)ได้

แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีที่สำคัญหลายแหล่งมักเกิดอยู่กับหินคาร์บอเนต ในอเมริกา เช่น แอพบเทือกเขาแอปปาเลเซียน, หุบเขามิชิซิปปีตอนบน, ตะวันออกเฉียงใต้ รัฐมิสซูรี, รัฐเทนเนสซี และแอพบไทรสเขต ในแคนาดา เช่น นานิซวิก(Nanisivik) และไพนพอนด์(Pine Point, ดูรูป 9.2.69) หรือในยุโรป เช่น เทือกเขาแอลไพน์(Alpines), ที่ราบไอร์ชตอนกลาง, เมืองเพนไนน์(Pennines district)ของอังกฤษและแถบซิลีเซีย(Silesia)ในโปแลนด์ (ดูรูป 9.3.68 ข) ฐานข้อมูล 9.10 แสดงถึงข้อมูลด้านแหล่งแร่ที่เกิดในหินคาร์บอเนตเหล่านี้

ส่วนใหญ่แหล่งแร่ดังกล่าวมักเป็นแหล่งแร่สายล้อมชั้น(stratabound) และอยู่ห่างไกลจากบริเวณหินอัคนี ทั้งในแง่อายุและระยะทาง(spatial and temporal aspects) ดังนั้นจึงมักไม่เกิดร่วมหรือแสดงลักษณะแหล่งแร่แบบสัมผัส(contact metamorphic) สกานด์(skarn) หรือแบบแทนที่โดยน้ำร้อน(hydrothermal replacement) แม้แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกันในหลายเรื่อง แต่ก็มักเกิดร่วมกับชั้นตะกอนคาร์บอเนตหนาๆที่มีชั้นโดโลไมต์อยู่ด้วย โดยที่แหล่งแร่มักเกิดกับแนวโซดหินปูน หลังโซดปูน(back reefs) ของแอ่ง การเปลี่ยนลักษณะปรากฏ(facies changes) หรือความสูงต่ำของหินฐาน(basement topography) การขึ้นลงของน้ำทะเล แหล่งแร่มีตั้งแต่เล็ก(ขนาดหมื่นๆตัน) จนถึงใหญ่(ขนาดสิบล้านตัน)

ในที่นี้ได้จัดแบ่งแหล่งแร่ที่เกิดในหินคาร์บอเนตนี้ออกเป็น 3 ชนิดคือ

- แหล่งแร่แบบ MVT (หรือ Mississippi Valley Type) : ซึ่งเป็นแหล่งแร่สายล้อมชั้น, แร่เกิดหลังการสะสมตัวเป็นหินแข็ง แต่ถูกควบคุมด้วยโครงสร้างที่เกิดก่อนการสะสมสินแร่(pre-ore structures) เช่น โครงสร้างตะกอน โครงสร้างลำดับชั้น และโครงสร้างแปรสัณฐาน
- แหล่งแร่แบบแอลไพน์ (Alpine Type) มักเป็นแหล่งแร่สายตามชั้น(stratiform) เกิดตอนแข็งตัว หรือแบบวิบากรรมกับตะกอนคาร์บอเนต คล้ายแบบแซบคา(sabkha environment) จึงมักมีเกลือระเหยด้วย

- แหล่งแร่แบบไอริช (Irish type) จัดเป็นแหล่งแร่สายตามชั้น ครอบคลุมเดียวกับSEDEXที่ได้อธิบายไปแล้ว (ดูหัวข้อ 9.3.7) และแสดงลักษณะซ้อนทับ(overprint)ทางวิภาคกรรมน้อยมาก

ก. แหล่งแร่แบบ MVT

คำว่า MV หรือ Mississippi Valley จัดว่าเป็นคำร่วมสมัยซึ่งเดิมใช้กับพื้นที่ในหุบเขามิสซิสซิปปีทางตอนเหนือ แต่แท้จริงแล้วแหล่งแร่ที่พบหลายแหล่งในพื้นที่นี้มีความแตกต่างกันมาก จนมีผู้เสนอทฤษฎีการเกิดแหล่งแร่ดังกล่าวมากมาย ทั้งนี้แล้วแต่เหมืองหรือแหล่งที่พวกเขาสำรวจ ซึ่งอาศัยหลักฐาน เช่น การควบคุมด้วยโครงสร้างหรืออายุระหว่างแหล่งแร่กับโครงสร้างนั้น จนพอประมวลได้ดังต่อไปนี้

1) หินที่เกิดรวมมักแผ่เป็นบริเวณกว้าง ส่วนใหญ่เป็นหินคาร์บอเนตแบบลานราบ(platform) ซึ่งเป็นพวกที่ไม่ใช่โขดหิน(non-reef platform) มีความหนาและชันประกอบที่คงที่ หลายบริเวณแสดงส่วนประกอบจำพวกโคโลไมต์ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะหรือลักษณะปรากฏแบบกระแทก เช่น หุบเขามิสซิสซิปปีตอนเหนือ เทนเนสซีด้านตะวันออกซีเลเชีย และไทรสเขต

2) แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีเกิดในช่องเปิดที่มีอยู่เดิม และเกิดในหินคาร์บอเนตที่มีสภาพแวดล้อมได้หลายรูปแบบ

3) โขดหินปูนจัดว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดเป็นตัวแหล่งแร่หนึ่ง เช่น ที่มีสัณฐานทางตะวันออกเฉียงใต้ และที่ไพน์พอยต์ เป็นต้น

4) การแตกหักเป็นชั้นเหลี่ยมของหินปูน เกิดบริเวณกว้าง โดยมีการกำเนิดหลายแบบ และมักจะตามด้วยการสะสมตัวของสังกะสีและตะกั่วซัลไฟต์ในช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการแตกหักนั้น ทำให้เชื่อว่าหลายแห่งเป็นลักษณะการเกิดแบบปฏิกิริยา

5) การแตกหักเป็นชั้นเหลี่ยม(brecciation) อาจเป็นผลมาจากแรงเค้นแปรสัณฐานอย่างอ่อนหรือเกี่ยวข้องกับการยกตัวน้อยๆ ยังผลให้เกิดการกัดกร่อนตามมา และเกิดเป็นภูมิประเทศแบบคาสต์(karst) ในหินเนื่องจากอิทธิพลของการชะล้างโดยน้ำฝน

6) ตะกอนคาร์บอเนตน้ำตื้น ความไม่ต่อเนื่องของชั้นหินทางเวลาทั้งที่มาก (unconformity) และที่น้อย(disconformity) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลไปมา และแหล่งแร่ที่พบซึ่งเกี่ยวข้องกับ ความไม่ต่อเนื่องของชั้นหินเหล่านี้ ทำให้เกิดจากช่องว่างชนิดทุติยภูมิจึงช่วยให้เกิดการสะสมตัวของแร่ได้ดีในหินกรวดเหลี่ยมชนิดชะละลายยุบตัว (solution-collapse breccia) และถ้ำคาสต์(karstic caves)

7) ความพรุนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิในหินคาร์บอเนตนี้เป็นผลมาจากการสะสมตัวในสภาพปกติ และต่อมากกระบวนการวิภาคกรรม(diagenetic process) อาจช่วยสร้างเสริมช่องว่างมากขึ้นยังผลให้เกิดเป็นแหล่งแร่ได้

8) แหล่งแร่มักเกิดในแอ่งตะกอนแทบทั้งหมดทั่วโลก และชั้นหินคาร์บอเนตมีอายุตั้งแต่มหายุคพรีแคมเบรียนจนถึงครีเตเชียส แต่จากสถิติพบว่าพวกที่มีอายุประมาณแคมโบ-ออร์โดวิเซียนและคาร์บอนิเฟอรัสมีมาก

- 9) แหล่งแร่มักพบเห็นในขอบแอ่งและโดยเฉพาะโค้งระหว่างแอ่งต่อแอ่ง
 - 10) ในพื้นที่เดียวกับที่กินอาณาบริเวณกว้างขวาง อาจมีหลายแหล่งที่แสดงลักษณะแหล่งแร่ที่เหมือนกันได้ (บางครั้งมากกว่าร้อย ตรกม)
 - 11) ส่วนใหญ่หินคาร์บอนเตเหล่านี้ไม่แสดงการแปรสภาพ เนื่องจากการแปรสัมผัสกับหินอัคนีแทบไม่ปรากฏ
 - 12) วิทยาแร่ของแหล่งแร่เป็นแบบง่ายๆ โดยมากคือ แร่กาลีนา(ที่มีปริมาณเงิน-Ag ต่ำ) เค้นหรือแร่สาลีไรต์(ที่มีปริมาณเหล็กน้อยๆเค้นหรืออาจมีทั้งสองตัวในแหล่งในปริมาณพอๆกัน นอกจากนั้นยังอาจพบแร่ไพไรต์และหรือแร่มาร์กาไซต์(marcasite) แร่แบไรต์และแร่ฟลูออไรต์ส่วนแร่แคลโคไพไรต์มักพบอยู่บ้างไม่ทุกแหล่ง
 - 13) อุณหภูมิการเกิดของสินแร่ในช่วงประมาณ 80° ถึง 200 °ซ น้ำร้อนมักเป็นน้ำเค็มจัด (brine) ของคลอไรด์ชนิดโซเดียมและ/หรือแคลเซียม (โดยทั่วไปมีความเข้มข้นมากกว่าน้ำทะเลประมาณ 5 ถึง 10 เท่า
 - 14) หินเกิดร่วมมักมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ เช่น เคอร์โรเจน บิทูเมน และมลทินของไหลจำพวกปิโตรเลียมอยู่มาก
 - 15) ซัลเฟอร์มักเป็นพวกที่เป็นไอโซโทปหนัก แต่มีค่าไอโซโทปที่เป็นช่องกว้าง ดังนั้นจึงเชื่อกันว่าการเกิดแร่จึงอยู่ในชั้นเปลือกโลกหรือมาจากน้ำทะเล
 - 16) ต้องมีภาวะลดซัลเฟอร์(sulphur reduction) ที่เกิดขึ้น ณ อุภูมิน้อยกว่า 100 °ซ ซึ่งหลายคนคิดว่าเป็นผลจากการกระทำโดยแบคทีเรีย โดยเกิดขึ้นห่างจากจุดที่ซัลไฟด์สะสมตัวอยู่บ้าง
 - 17) ค่าไอโซโทปของตะกั่วแสดงถึงค่าที่กว้างพอควรเช่นกัน
- ในเชิงกว้างๆ สำหรับนักสำรวจ รูปแบบการเกิดของแหล่งตะกั่ว-สังกะสีนั้นเริ่มจากการสะสมตัวของตะกอนในแอ่งตะกอนขนาดใหญ่ โดยมีการไหลเวียนของของไหลในชั้นตะกอน-อันเป็นผลเนื่องมาจากการอัดแน่น-จากใจกลางแอ่งมายังขอบแอ่ง เนื่องจากในแอ่งมีตะกอนชั้นหนามากจึงทำให้ของไหลเหล่านี้ร้อนกว่าตะกอนที่ห่อหุ้มล้อมรอบๆ นั้น ในส่วนที่อยู่ระดับสูงขึ้นไป ซึ่งของไหลเหล่านี้มักประกอบด้วยปริมาณตะกั่วและสังกะสีที่สูง เช่น ตะกั่วอาจสูงถึง 100 นตล(ppm) และสังกะสีอาจมีถึง 500 นตลppm) ส่วนการเกิดซัลเฟอร์หรือกำมะถันนั้นอาจเป็นได้ 2 กรณี กล่าวคือ อาจพบได้ตรงจุดที่เกิดการสะสมตัว โดยการปลดออกซิเจนจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในน้ำเค็มจัด(brines) หรืออาจเกิดจากการเติมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์(H_2S) ในน้ำเค็มจัดนั้น หรืออาจถูกนำมาที่บริเวณสะสมตัวโดยตัวน้ำเค็มจัดนั่นเอง ควบคู่กับตัวโลหะตะกั่ว-สังกะสีนั้น ดังนั้นการสะสมตัวของโลหะซัลไฟด์จึงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) การเย็นตัวหรือการเจือจาง(dilution) ของน้ำเค็มจัดนั้น

แม้ในปัจจุบันหลายคนก็ยังเสนอทฤษฎีการเกิดของแหล่งแร่ MVT อยู่และหลายคนได้พยายามเสนอแนวคิดเรื่องการเกิด เพื่อให้เกิดความง่ายต่อการสำรวจหาแหล่งแรดังกล่าว ดังแสดงให้เห็นในรูป

ข. แหล่งโพไฟนอยด์

แหล่งแร่โพไฟนอยด์(รูป 9.3.69 ก ถึง ง)เป็นแหล่งขนาดใหญ่ประมาณ 50 x 10 กม และมีตัวสินแร่ (แหล่งย่อย) ถึง 40 แหล่ง ในช่วงปี คศ 1964-1988 มีการผลิตถึง 80 ล้านตัน โดยมีความสมบูรณ์ของโลหะตะกั่วถึง 2.4% และสังกะสีถึง 6% ตัวสินแร่เกิดในโชดหินปูนในส่วนปลายของแอ่งขอบเกลือระเหย แอบไฮโดรต์และยิปซัมในทางตอนใต้ และมีหินปูน และหินดินดานไหลจากไปทางเหนือ (รูป 9.3.69) ตัวแหล่งแร่ประกอบด้วยสินแร่ตะกั่ว กาลีนา, แร่สฟาเจอไรต์ ทั้งที่เป็นผลึกแร่และคอโรฟอร์, แร่ไพไรต์, แร่มาร์กาไซต์, บางแห่งก็มีแร่ฟิโรไทต์ปะปนกับแร่โคโลไมต์และแคลไซต์ ตัวแหล่งแร่มีลักษณะแบนราบในแนวระดับในส่วนฐานของโชดหินปูน ส่วนบนๆ มักเป็นมวลสินแร่(massive ore) และมีลักษณะเป็นแท่งๆ ในส่วนบนสุด และแทรกเข้าไปในชั้นตะกอนที่ปิดทับโชดหินปูนอยู่ข้างบน มวลสินแร่มักเกิดร่วมกับหินกรวดเหลี่ยมจากการยุบตัว ซึ่งมักมีเศษหินจากหินที่วางตัวอยู่ข้างบนร่วมอยู่ด้วย(แสดงถึงหลักฐานการยุบตัวได้ดี) และปรากฏแร่ซัลไฟด์ระหว่างชั้นเหลี่ยมและเศษหินเหล่านั้น(แสดงว่าแร่ซัลไฟด์คงเกิดในช่วงหลังจากเกิดการยุบตัว-เป็นภาวะเสริมเติมแต่งจนเป็นสายแร่-กระบวนการปฏิกิริยาหรือ epigenetic แหล่งแร่จึงเกิดขึ้นมาได้)

ชั้นตะกอนที่อาจปิดทับโชดหินปูนนั้นอาจวางตัวปิดทับบนผิวโชดหินที่ถูกกัดกร่อนจนเกิดเป็นภูมิประเทศแบบคาร์สต์ได้ ซึ่งมีผลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างหินกรวดเหลี่ยมจากการยุบตัวได้ ส่วนใหญ่แล้วหินคาร์บอนตมมีอายุประมาณยุคดีโวเนียน (+365 ล้านปี)จากการหาอายุโดยใช้ไอโซโทปของตะกั่วในแร่ซัลไฟด์พบว่ามีอายุในช่วงประมาณ 250 ถึง 275 ล้านปี ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าน้ำเค็มเคลื่อนตัวหรือไหลเคลื่อนในตอนที่เกิดการแปรสัณฐานเปลือกโลกช่วงสมัยเนวาดาน(Nevadan) เมื่อ 80 ถึง 180 ล้านปี หรือสมัยลารามิด(Laramide) เมื่อ 100 ถึง 55 ล้านปีที่แล้วมา ซึ่งก็ยังคงมีความไม่ชัดเจนในเรื่องดังกล่าวอยู่

ประมาณ 20% ของการผลิตตะกั่ว-สังกะสีจากทั้งโลกมาจากแถบมิสซิสซิปปี นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1939 ซึ่งมาจากหลายแหล่งย่อย(รูป 9.3.70) ที่สำคัญได้แก่

- + แหล่งไตรสเตท(Tristate) ซึ่งกระจายตัวอยู่ใน 3 รัฐสำคัญ คือ Missouri-Kansas-Oklahoma ซึ่งผลิตแร่ได้มาก่อน ค.ศ.1940
- + แหล่งกิสคอนชิน-อิลลินอยด์ ผลิตแร่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1940
- + แหล่งอิลลินอยด์ตอนใต้-เคนตักกี ส่วนใหญ่ผลิตแร่ฟลูออไรต์ และมีเหมืองสังกะสี (+ตะกั่ว) อยู่ด้วย
- + แหล่งมิสซูรีตะวันออกเฉียงใต้ ผลิตตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ตั้งแต่ ค.ศ.1947 โดยบริษัท St. Joseph Lead

อนึ่ง ภาพแสดงลำดับชั้นตะกอนที่ให้แหล่งแร่ MVT ในช่วงปลายยุคแคมเบรียนโดยเฉพาะในแถบรัฐมิสซูรีตะวันออกเฉียงใต้ ได้แสดงในรูป 9.3.71

กลุ่มเหมืองในแถบรัฐมิสซูรีตะวันออกเฉียงใต้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า "แนวไวเบอร์นัม" (หรือ Viburnum Trend) (ดูรูป 9.3.72 A และB) สำหรับการลำดับชั้นหินโดยรวม (composite stratigraphy) ที่มีมวล

แร่ซัลไฟต์ในหินคาร์บอนเตอาลูมิเนียมที่หนารวมกันถึง 400 เมตร ที่วางตัวแบบไม่ต่อเนื่องตามกาลเวลา ได้แสดงไว้ในรูป 9.3.72 C

ตัวอย่างของแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีที่ดีอันหนึ่งคือที่เหมืองบูอิก (Buick Mine) ซึ่งมีตัวสินแร่เป็นแนวยาวถึง 8 กม (รูป 9.3.73 และ 9.3.74) ซึ่งค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1960 แต่กว่าจะเริ่มทำเหมืองได้ในราวปี ค.ศ.1969 จวบจน ค.ศ.1986 เหมืองนี้ผลิตแร่มาแล้วกว่า 20 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ตะกั่ว 9.5% และสังกะสี 3.5% มีปริมาณสำรองคิดแล้วประมาณ 50 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ตะกั่ว 8% และสังกะสี 2% (ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากเดิมที่เมื่อก่อนคิดไว้ คือ 27 ล้านตัน ณ ที่ความสมบูรณ์ 4.5% ตะกั่ว 1% และสังกะสี อันเนื่องมาจาก ความยุ่งยากในการเก็บตัวอย่าง และความซับซ้อนทางธรณีวิทยาของตัวสินแร่เอง) สินแร่ประกอบด้วยซัลไฟต์ของตะกั่ว-สังกะสี-ทองแดง ในหินกรวดเหลี่ยมละลายยุบ ที่มาจากหินคาร์บอนเต (ชนิด calcarenite) ป่าทวีปที่ถูกโคลโลไมต์เข้ามาแทรก โดยเฉพาะหมวดหินบอนเนตเตร์ (Bonnetterre) รูป 9.3.73 แสดงตัวแหล่งแร่ในแนวระนาบ ซึ่งมีรูปร่างคดเคี้ยวไปมา (sinuous) และเกือบวางตัวขนานกับแนวราบ ซึ่งมีบางแห่งที่รวมสาย (confluences) กันและบางแห่งก็แยกสาย (divergences) กันดัง สายแร่สำคัญ 3 สายแร่ที่ประกอบด้วยเศษหินแตกหัก (brecciation ore body) เกิดอยู่ในร่องน้ำที่อยู่ภายในระดับน้ำขึ้น-ลง (intratidal drainage channel) แต่ละสายสินแร่มีความกว้างถึง 90 เมตร และหนาเฉลี่ยประมาณ 26 เมตร ฐานของสายสินแร่โค้งแอ่น (trough) ผนังของสินแร่มีการเอียงเทออกไปจากตัวสินแร่และมีหลายด้านที่ขนานกับแนวรอยแตก ชั้นหินกรวดเหลี่ยมเลื่อนไถลที่ทำให้แร่เอียงเทเข้าหาตัวสินแร่ แต่บางชั้นหินกรวดเหลี่ยมก็ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะโดยการเลื่อนไถล (slump structure) และไม่มีสินแร่ (unmineralized) ด้วย

สายสินแร่แต่ละสายดังกล่าวทั้งสามนี้ มีลักษณะเฉพาะของวิทยาแร่ที่ไม่เหมือนกัน และสามารถตรวจหาสายทั้งสามได้เป็นระยะทางยาวถึง 3.2 กม ส่วนบนของหินกรวดเหลี่ยมมักมีช่องว่าง (open-spaces) และรูพรุนปรากฏมากมาย ซึ่งทำให้เกิดแหล่งแร่แบบบรรจุในช่อง (cavity-filling mineralization) ได้ดี ในขณะที่ส่วนฐานของหินกรวดเหลี่ยม แสดงการเกิดแหล่งแร่แบบแทนที่ (replacement mineralization) การเกิดสินแร่จึงมีหลายรูปแบบ บ้างก็แสดงการงอกเด่นชัด (overgrowth) ของแร่ซัลไฟต์ชนิดต่างๆ ในช่องเปิดเหล่านั้น บ้างก็แสดงการชะละลายของสินแร่ บ้างก็เป็นสินแร่ที่ไม่แตกหัก (pre-breccia ore) ปรากฏในเนื้อของสินแร่ที่แสดงการแตกหัก (post-breccia ores) และบางครั้งก็แสดงลักษณะวงที่ซับซ้อนของแร่ซัลไฟต์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้แสดงถึงการเกิดแหล่งแร่เป็นช่วง ๆ (poly-phase mineralization)

แหล่งแร่สังกะสี-ตะกั่วแอปปาเลเซียน (Appalachian Zn-Pb deposits) แหล่งแร่ซัลไฟต์ชนิดที่เกิดเป็นแนวยาวตามแนวเทือกเขาแอปปาเลเซียนตั้งแต่รัฐเทนเนสซีจนถึงฝั่งมหาสมุทรด้านตะวันออกของแคนาดา คือ เกาเนวฟินแลนด์ และมีความแตกต่างจากแหล่งแร่ MVT ตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะชัดเจนอันเนื่องมาจากอิทธิพลบรรพตรังสรรค์ (ซึ่งในตอนแรกคิดว่าการก่อเกิดภูเขาเป็นตัวการควบคุมการเกิดแหล่งแร่) แหล่งแร่แอปปาเลเซียนแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 พวก คือ

ก) พวกที่ไม่มีตะกั่ว โดยเฉพาะแถบรัฐเทนเนสซีตอนกลางและด้านตะวันออก รัฐเวอร์จิเนีย เพนซิลวาเนีย และนิวฟันแลนด์ และสามารถเทียบได้กับหินโคลโลไมต์ยูคอรโดวิเชียนตอนต้น

ข) พวกที่มีสังกะสีเค้น และมีตะกั่วบ้าง เช่น ที่รัฐเวอร์จิเนีย ซึ่งแสดงลักษณะการเปลี่ยนลักษณะปรากฏในโชดหินปูน และหินกรวดเหลี่ยม

ค) พวกที่มีทั้งตะกั่วและสังกะสี เช่น แหล่งเกสรีเวอร์ (Gays River) ในรัฐโนวาสโกเชีย (แคนาดา) ซึ่งสินแร่เกิดในโชดหินปูน ซึ่งพัฒนาบนแนวความไม่ต่อเนื่อง และบริเวณขอบของแอ่งเกลือระเหย (evaporites)

รูป 9.3.75 แสดงแท่งลำดับชั้นหินของมวลสินแร่ที่ปรากฏในยูเคมเบรียนตอนล่าง และยูคอรโดเวียนตอนล่าง ส่วนในรูป 9.3.76 แสดงแหล่งที่สำคัญในอเมริกาฝั่งตะวันออก ในรูป 9.3.76 (บน) พวกที่จัดว่าเป็นอันดับหนึ่ง (Class 1) เกิดในชั้นยูคอรโดเวียน มีหินต้นกำเนิด (host rocks) ที่เป็นเนื้อเอกพันธ์ และลักษณะเฉพาะ 7 อย่าง ก็พบเห็นทั่วไป ส่วนลักษณะเฉพาะอีก 5 อย่างถัดมาก็เกิดในเพราะพวกที่จัดอยู่ในอันดับหนึ่ง (อันดับหนึ่งในรูปหมายถึงพวกที่มีปริมาณโลหะมากกว่า 3.5 ล้านตัน, อันดับที่ 2 คือ มีโลหะปริมาณ 7.5 ถึง 3.5 ล้านตัน อันดับที่ 3 ระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 ล้านตัน และอันดับที่ 4 น้อยกว่า 0.5 ล้านตัน) ส่วน NF หมายถึงแหล่งพบใหม่อย่างน้อยอันดับ 3 ขึ้นไป

อนึ่ง สำหรับการเกิดแหล่งแร่ดังกล่าวนี้ Hoagland (1976) ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแหล่งแร่แบบปลาเขียน (และแหล่ง MVT อื่น ๆ) ทั้งหมด 7 ข้อด้วยกัน คือ

- (1) หินต้นกำเนิดที่เป็นคาร์บอเนต มีช่องเปิดต่อเนื่องมากพอที่จะทำให้เกิดแหล่งแร่ ชัลไฟต์ได้
- (2) ของไหลที่พาสินแร่มาตามช่องเปิดเหล่านั้นมาสะสมตัวในบริเวณท้องทะเล ซึ่งอาจตื้น(ถึงบนบก)ได้
- (3) แหล่งกำเนิดสินแร่ซึ่งเป็นหินตะกอนที่มีของไหลเค็มจัด(brines) ซึ่งมีปริมาณสังกะสีและ อีออนของโลหะอื่นด้วยมากพอที่จะผลักดันเข้ามาจนถึงบริเวณแอ่งตะกอนที่เป็นหินดินดานขนาดใหญ่ได้ (เช่น ที่เทเนสซีปริมาณ 150,000 ลบกกม) ซึ่งอาจอยู่ห่างจากบริเวณที่สินแร่สะสมตัวเป็นระยะสิบๆ หรือร้อยๆ กิโลเมตรได้
- (4) สภาพแสดงลักษณะแรงดันไฮดรอลิกที่ขับเคลื่อนของไหลเค็มจัดจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดสะสมตัว (โดยมีผลมาจากการกดทับของตะกอน, ภาวะการเกิดแอ่งตะกอน, กระบวนการอัดแข็ง, การตกผลึกของแร่, และแรงจัดจากบรรพตรังสรรค์)
- (5) ความสัมพันธ์ทางเคมีกายภาพระหว่างระบบจัดส่งกับตัวของไหลเค็มจัด ซึ่งทำให้ยังคงมีช่องเปิดได้ตลอดเวลา เช่น ความสมดุลระหว่างการละลายของของไหล (ซึ่งมีในหินปูนมากกว่าในหินโดโลไมต์) กับการตกตะกอน
- (6) ตัวเร่งของการสะสมตัวของสินแร่ เช่น ก๊าซไข่เน่า (H_2S) มีความจำเป็นในระบบของไหลภาวะที่สอง ซึ่งจะผสมกับของไหลเค็มจัดช่วงแรก (จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ซึ่งอยู่ในหินปูนและการปลดออกซิเจนโดยสิ่งมีชีวิตในกัมมะถัน และ
- (7) ระยะเวลาและระยะทางคงยาวนานมากกว่าที่สินแร่โลหะชัลไฟต์ดังกล่าวจะเกิดการสะสมตัว ด้วยปริมาณที่มากมายมหาศาลขนาดนั้น

ข. แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี แบบแอลไพน์ (Alpine-type Pb-Zn Deposits)

แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีแบบนี้ได้ชื่อมาจากเทือกเขาแอลป์ (Alps) ซึ่งมีแหล่งแร่หลายแหล่ง นับตั้งแต่มีปลาเดน (Mibladen) ในมอโรคโค, ไบลเบิร์ก (Bleiberg) เมซิกา (Mezica) เบตติค คอร์ดิลเลอราส (Betic Cordilleras) ในสเปน ซึ่งการสะสมตัวของสินแร่เกิดขึ้นพร้อมกับการสะสมตัวของดินตะกอน โดยเฉพาะตอนช่องอัดแข็ง แต่ในบางแหล่งโดยเฉพาะส่วนที่มีสินแร่มาก มักแสดงลักษณะการเกิดแร่แบบปฏิมากรรม (epigenetic) เช่น เห็นเป็นสายแร่ตัดเข้ามา สินแร่ทำหน้าที่ตัวเชื่อมประสานหินกรวดเหลี่ยม หรือเกิดเป็นแหล่งแร่แบบแทนที่เป็นมวล (massive replacement bodies) แหล่งแร่ส่วนใหญ่มักพบเห็นในหินคาร์บอนเนตชั้นหนา แต่ตัวสินแร่มักพบอยู่ในแนวชั้นหินบางๆ เล็กๆ ซึ่งแสดงถึงการตกตะกอนในสภาพน้ำตื้น (ดูรูป 9.3.77) หินคาร์บอนเนตเหล่านี้มักเป็นหินปูนเป็นส่วนใหญ่ และรูปแบบการกำเนิดส่วนใหญ่เป็นลักษณะการเคลื่อนตัวหลังการสะสมตัวของตะกอนที่มีสินแร่เดิมในปริมาณน้อยๆ เพื่อให้แหล่งแร่ซัลไฟต์ของตะกั่วและสังกะสีได้ โดยอาจมีแร่จำพวกฟลูโอไรต์และแบไรต์อยู่ด้วย

การที่มีหินภูเขาไฟเกิดร่วมอยู่ด้วยในบริเวณเทือกเขาแอลป์นี้ (รูป 9.3.71) ทำให้คิดว่าแหล่งแร่ อาจเกิดสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดภูเขาไฟด้วยการสังเกตพบว่าแหล่งตะกั่ว-สังกะสีดังกล่าวแสดงลักษณะเฉพาะที่สำคัญ 8 อย่างได้แก่

- ก) แร่ซัลไฟต์เกิดได้กว้างขวางมาก ซึ่งบางส่วนแสดงลักษณะการเกิดแร่แบบวิบากกรรม คือ เกิดพร้อมตะกอนแข็งตัว (syndiagenetic) แต่มีความสมบูรณ์ของสินแร่ต่ำ (ดูรูป 9.3.78) แต่ส่วนที่แสดงลักษณะการเกิดแร่ในสภาพต่อมาเป็นพวกที่มีความสมบูรณ์ของสินแร่สูงกว่า เช่น เป็นสายแร่ตัดเข้ามาหรือเกิดจากการแทนที่แบบเป็นมวล
- ข) การเกิดแร่ซัลไฟต์จำกัดเฉพาะชั้นตะกอนเพียงสามถึงสี่ชั้นเท่านั้น เช่น อาจรวมความหนาได้เพียง 300 เมตร จากความหนาของตะกอนยุคไทรแอสซิกทั้งหมด 2000 เมตร
- ค) ลำดับการเกิดก่อนหลังของสินแร่ซัลไฟต์ มักไม่ยุ่งยากซับซ้อน คือ แร่สฟาเลไรต์กับแร่กาลีนามักเป็นแร่เด่น (อัตราส่วนระหว่างสังกะสีคือตะกั่วอยู่ในช่วง 2 ถึง 10) แร่กาลีนามักเกิดในลักษณะการเข้าแทนที่ส่วนแร่สฟาเลไรต์เกิดแบบวิบากกรรมในชั้นตะกอน ส่วนไพไรต์ และมาร์กาไซต์ พบแพร่กระจายกว้างขวาง แต่ในความสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ และน่าจะมาจาก จุลินทรีย์ ส่วนแร่ไรต์ (gangu minerals) ได้แก่ แคลไซต์-โดโลไมต์ ฟลูออไรต์ ควอร์ตซ์ แบไรต์ ซีเลสเตด (celestite) และแร่แอนไฮไดรต์ ซึ่งเป็นไปตามลำดับปริมาณความมากน้อย
- ง) ในแง่ตัวควบคุมซึ่งเป็นหินก็คือ บริเวณที่เป็นจุดเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากการสะสมตะกอนคาร์บอนเนตเพียงอย่างเดียวในน้ำตื้นไปเป็นสภาพของตะกอนที่เกิดในน้ำตื้น (ดูรูป 9.3.78)
- จ) มักเกิดการปะทุของภูเขาไฟทั่วทั้งพื้นที่ในสมัยกลางยุคไทรแอสซิก แต่ก็ไม่มีชั้นไหนที่สัมพันธ์โดยตรงกับหินภูเขาไฟ
- ฉ) ตัวควบคุมที่เป็นสภาพภูมิประเทศเดิมมักปรากฏให้เห็นเสมอ เช่น ไขคหินปูนโดยเฉพาะช่องที่น้ำนิ่งพบกับน้ำไหลปั่น (turbulent)

- ข) ตัวควบคุมที่เป็นการแปรสัณฐานมักไม่พบในชั้นแร่ซัลไฟต์ความสมบูรณ์ แต่ส่วนที่เป็นสินแร่แบบเป็นสายและแบบแท่งที่มักถูกการแปรสัณฐาน เช่น รอยเลื่อนควบคุม
- ช) ลักษณะภาวะแวดล้อมของการสะสมตัวของตะกอนและของสินแร่เป็นไปในแบบเดียวกัน

กล่าวโดยสรุปแหล่งแร่สังกะสี-ตะกั่วแอลไพน์มีการเกิดที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวและสภาพแวดล้อมของตะกอน สินแร่ซัลไฟต์จึงมีการพัฒนามาร่วมกับหินคาร์บอเนต ซึ่งรวมถึงการเกิดแบบวิปากกรรม และแบบสมบูรณ์ยิ่งยวด

ในทางใต้ของสเปน แหล่งแร่ฟลูออไรต์แบบลุ่มชื้น ที่มีแร่แบไรต์-ตะกั่ว-สังกะสีเกิดร่วมอยู่นั้น พบอยู่ในชั้นหินปูนหมวดหินอัลพูจาไรน์ (Alpujarride) ในแถบบริเวณปีติกส์ คอติลเลอราส (Betic Cordilleras) มักสัมพันธ์กับชุดหินหลัก 2 ชุด (ดูรูป 9.3.78) คือ

- 1) จุดเปลี่ยนระหว่างชั้นเกลือระเหย(ล่าง) ไปเป็นตะกอนทะเล(บน)
- 2) จุดเปลี่ยนระหว่างชั้นตะกอนทะเล(ล่าง) ไปเป็นเกลือระเหย(บน)

ดังนั้นหลายท่านจึงเชื่อว่า (ดู Aleva & Westerhof, 1989) การเกิดแหล่งแร่ถูกควบคุมด้วยการปรากฏร่วมของลักษณะปรากฏหินตะกอนในทะเลสาบ ซึ่งยังผลให้เกิดการสะสมแร่ฟลูออไรต์และสินแร่เศรษฐกิจอื่นในตอนช่วงต้นของวิปากกรรมการเกิดแร่ตนเอง

ก. แหล่งตะกั่ว-สังกะสีแบบไอริช (Irish-type Pb-Zn deposits)

แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี-แบไรต์ (ทองแดง-เงิน) ที่สำคัญ(รูป 9.3.79)ของไอร์แลนด์เกิดอยู่ในหินปูนยุคคาร์บอนิเฟอรัสตอนต้น ซึ่งได้แก่เหมืองทีน่า (Tynah, รูป 9.3.80), ซิลเวอร์ไมน์ (Silver-mines รูป 9.3.81) และนาวานครั้งหนึ่งถูก (Navan) ซึ่งเหมืองนาวานจัดว่าเป็นเหมืองสังกะสีซึ่งใหญ่ที่สุดของยุโรป บางท่านจัดว่าแหล่งแร่แบบไอริชนี้ เหมือนกับแหล่งแร่ SEDEX โดยมิเห็นเกิดร่วมเป็นพวกตะกอนเนื้อประสม

แหล่งแร่แบบไอริชมักถูกควบคุมด้วยรอยเลื่อนในสภาพการแปรสัณฐานแบบแยกตัวจนยุบตัว (rift-related subsidence) ตัวบ่งชี้หรือหลักฐานที่แสดงถึงการแปรสัณฐานขณะตกตะกอนที่สำคัญคือ โครงสร้างเลื่อนไถล ตะกอนพลัดที่ (allochthonous sediments) เช่น หินโคลนมีกรวดปูน รอยเลื่อนงอก (growth faults) โดยมีความสัมพันธ์ลึกซึ้งกับการเกิดหินปูนเนื้อละเอียดที่เรียก “Waulsortion carbonate mudbanks”

ที่เหมืองทีน่า(Tynah mines) การเกิดเป็นแหล่งแร่มีวิวัฒนาการ 4 ขั้นตอนด้วยกัน

- ก) เกิดแร่ไฟไรต์แบบคอลโลฟอร์ม(colloform) และแบบเป็นเม็ด(granular) กระจายตัวทั่วชั้นตะกอนในช่วงวิปากกรรม

- ข) เกิดการตกตะกอนของแร่สังกะสีเนื้อละเอียดมาก(microcrystalline)ของแร่สฟาเลอไรต์ กาลีน่า แบไรต์ และโคโลไมต์ ในรอยแตกที่ถูกดึงเถื่อน(dilatant fracture) ภายในหินปูน (ชนิด mud-banks) ดังกล่าว
- ค) เกิดการสะสมตัวของสินแร่ เช่น เทนนาไทต์ แคลโคไพไรต์ โพไนต์ อาร์ซีโนไพไรต์ ทั้งแบบเป็นสาย และเข้าแทนที่ สำหรับแร่กาลีน่าและแบไรต์มักเกิดเป็นผลึกหยาบ และ
- ง) เกิดการตกตะกอนของแร่แคลไซต์ และเกิดการแปลงสภาพเป็นแร่โคโลไมต์ในชุดหินปูนนั้น

จากข้อมูลไอโซโทป พบว่าในชั้นที่ 1 และ 2 แร่ซัลไฟด์มาจากการลดปริมาณออกซิเจนในน้ำทะเลโดยแบคทีเรีย(หรือจุลินทรีย์) ส่วนชั้น 3 ซัลเฟอร์จากที่ลึกลับสมกับซัลเฟอร์ในน้ำทะเลที่เกิดจากจุลินทรีย์

อนึ่งฐานข้อมูลที่ 9.10 แสดงถึงแหล่งแร่ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในหินคาร์บอนेटในรูปแบบที่สำคัญ ๆ ส่วนสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาสำหรับการเกิดแหล่งแร่ ตลอดจนสาเหตุการสะสมตัวของแหล่งแร่แบบ MVT ได้แสดงไว้ในรูป 9.3.82 และ ตาราง 9.3.12 และในรูป 9.3.83 แสดงถึงปริมาณไอโซโทปของกำมะถันของแร่โลหะพื้นฐานในหินปูนกับในแหล่งอื่น ๆ ทั่วไป

ตาราง 9.3.9 แร่ต่างๆ เมื่อผ่านกระบวนการจับแฉะและการแปรสภาพ (French, 1973)

ตาราง 9.3.10 การจำแนกสภาพแวดล้อมอย่างละเอียด ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับนักสำรวจแร่

รูป 9.3.62 ข. หินแจสเปอร์ไรต์ (Jasperite) พบอยู่ตอนบนของชุดชั้นแร่เหล็ก Negaunee ของเมือง Marquette มิชิแกน ประกอบด้วยชั้นสลับของแจสเปอร์แดงและสีน้ำตาล (James, 1973)

รูป 9.3.76 แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีที่สำคัญของอเมริกาตะวันออก ซึ่งเป็นแบบ Appalachian-type (ล่าง) ช่องสี่เหลี่ยมสีดำ (บน) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งแร่กับลักษณะเฉพาะหนึ่งๆ (1 = Friedensville, Pa. : Zinc in Lower Ordovician Beekmantown Formation; 2 = Timberville, Va. : Zinc in Lower Ordovician Beekmantown Formation; 3 = Austinville-Ivanhoe, Va. : Zinc-Lead in Lower Cambrian Shady Formation; 4 = Embreeville, Tenn. : Zinc-Lead in Lower Cambrian Shady Formation; 5,6 = east Tennessee districts, Copper Ridge and Mascot-Jefferson City ตามลำดับ 7 = Central Tennessee) ในรัฐเทนเนสซี สิ้นแร่เกิดใน Lower Ordovician Mascot & Kingsport Formations

รูป 9.3.77 การเกิดเป็นแหล่งแร่ Pb-Zn การระเบิดของภูเขาไฟ และช่วงเวลาการเกิดในยุคไทรแอสซิก ในแถบเทือกเขาแอลป์ ด้านตะวันออก A: typical deposits of the different areas: 1= Bleiberg-Ramoz (Grisons, Switzerland); 2= Silberberg-Davos (Grisons, Switzerland); 3= Sauling-Fussen (Bavarian Alps, Northern border ranges); 4= Lafatsch-Karwendel (N.

Tyrolean Alps, Austria) ; 5=Mursee-Mieminger (N. Tyrolean Alps, Austria)/ 6= St. Veit-Heiterwand (N. Tyrolean Alps, Austria); 7= Bleiberg-Kreuth (E. Gailtal Alps, Austria); 8= Cave del Predil, Raibl (Julian Alps, N. Italy); 9=Mezica. Mies (Karawanken Alps, NW Yugoslavia) / 10=Auronzo (E. Dolomites, N. Italy) / 11=Gorno-Dossena (Bergamasc Alps, N. Italy). B; ore-bearing units. C:weak evaporitic facies (deposition of dolomite and anhydrite, gypsiferous beds). D: indications of volcanism (tuffaceous marls, agglomeratic breccias etc.). E: tuff layers, porphyritic and basaltic eruptions. (Maucher & schneider, 1967)

ตาราง 9.3.12 สาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่พวก MVT (Anderson, 1978)

ภาพตัดขวาง

รูป 9.3.82 (รูปกลาง)

อย่างง่ายแสดงสภาวะทาง
ธรณีวิทยาแบบต่างๆที่ทำให้
เกิดแหล่งแร่โลหะพื้นฐานใน
หินปูน

รูป 9.3.83 (รูปล่าง) ช่วงของ
ไอโซโทปซัลเฟอร์ ($\delta^{34}\text{S}$)

ของแหล่งแร่โลหะพื้นฐานใน
ในปูน โดยเทียบกับช่วงของ
แหล่งเซลล์ที่สำคัญทั่วไป

รูป 9.3.7 ก. แผนภาพแสดงการชะล้างและการสะสมตัวเพิ่มพูนของสายแร่ที่มีทองแดงซัลไฟด์

รูป 9.3.7 ข. สภาพที่เสถียรของแร่ทองแดงต่างๆ ในแหล่งแร่สมบูรณ์ยิ่งยวดในระบบ $\text{Cu-H}_2\text{O-O}_2\text{-S-CO}_2\text{-N}$.

อุณหภูมิ 25°C และ 1 บรรยากาศ (Garrel & Christ, 1965)

ตาราง 9.3.6 ก สมบัติทางกายภาพและสภาพแวดล้อมที่สำคัญของแร่หลายชนิดในลานแร่

ตาราง 9.3.6 ข การจำแนกชนิดลานแร่ (ดัดแปลงจาก Macdonald, 1983)

แวดล้อม

รูป 9.3.8 ก.คำที่ใช้เรียกชื่อสภาวะ

ในแอ่งตะกอนน้ำท่วมถึง
(Aleva &
Westerhof, 1989)

รูป 9.3.8 ข. ลำดับชั้นตะกอนในแอ่งตะกอนที่มีทองในโอตาโก นิวซีแลนด์ ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากอิทธิพลจากการแปร
สัณฐาน (Hanley & Adams, 1979)

รูป 9.3.10 ข. ชั้นกรวดหรือแนวกรวด (stone-layer หรือ stone-line) ที่มักสัมผัสกับสายแร่ควอร์ต มีหินปูน
ในอินโดนีเซีย
(ที่เกาะบิลิงตัน) และบราซิล(ที่รอนโดเนีย) ซึ่งชั้นดินปิดทับและชั้นดินไร้โครงสร้าง อาจหนา
ประมาณเป็น
10 ซม จนถึง 1 เมตรหรือมากกว่า (Aleva, 1983)

ของแนว

รูป 9.3.11 (บน) การแตกแขนง

แร่ซัลไฟด์โลหะพื้นฐาน
ใน
หินดินดานสีดำในแหล่ง
Rammelsberg
(เยอรมัน)

(Anger, และคณะ,
1966)

รูป 9.3.11 ตำแหน่งของแนว
ทองแดง
(copperbelt) มี
เทียบกับแนว
การแปรสัณฐานหลักใน
อาฟ
ริกาตอนกลาง(รูปบน)
แผนที่
แนวทองแดงในแซมเบีย
แสดง
ลักษณะธรณีวิทยาบริเวณ
กว้าง
และตำแหน่งเมืองสำคัญ
ๆ
(รูปล่าง)

รูป 9.3.12 กาลเวลาทางธรณีวิทยาและวิวัฒนาการของบรรยากาศ (Walker, 1977)

รูป 9.3.13 ลักษณะเฉพาะของยูเรเนียมตามช่วงกาลเวลาทางธรณีวิทยา

รูป 9.3.14 แบบจำลองการสำรวจหาแหล่งแร่ที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดแหล่งแร่

รูป 9.3.15 แบบจำลองการกำเนิดแหล่งแร่ยูเรเนียมที่อยู่กับตะกอนฟอสไฟต์ที่มีอินทรีย์วัตถุ

รูป 9.3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของอุณหภูมิของแหล่งแร่กับการละลายของยูเรเนียม

รูป 9.3.17 ลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับเวลาของแหล่งแร่ยูเรเนียม (Robertson และคณะ 1978)

รูป 9.3.18 แผนที่แสดงที่ตั้งของแหล่งแร่ยูเรเนียมในรัฐซัสคาตเชวัน (saskatchewan) (ดัดแปลงจาก Hoeve และคณะ, 1980)