



บทที่ 2

อิลเมไนต์และการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมไนต์

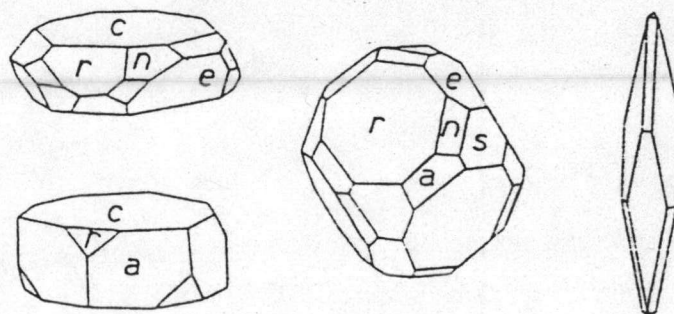
2.1 แร่อิลเมไนต์

Kostov (2) ได้จัดให้อิลเมไนต์อยู่ในพวกแร่ออกไซด์ (Oxide) กลุ่มอิลเมไนต์ (Ilmenite Group) ซึ่งกลุ่มนี้ประกอบด้วยแร่อิลเมไนต์ (Ilmenite, FeTiO_3) ไพโรฟานไนต์ (Pyrophanite, MnTiO_3) ไกคิไลต์ (Geikielite, MgTiO_3) ชูโดบรูคไคท์ (Pseudobrookite, Fe_2TiO_5 & FeTi_2O_5) และเคนเนดีไซต์ (Kennedyite, $\text{Fe}_2\text{MgTi}_3\text{O}_{10}$)

2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่อิลเมไนต์

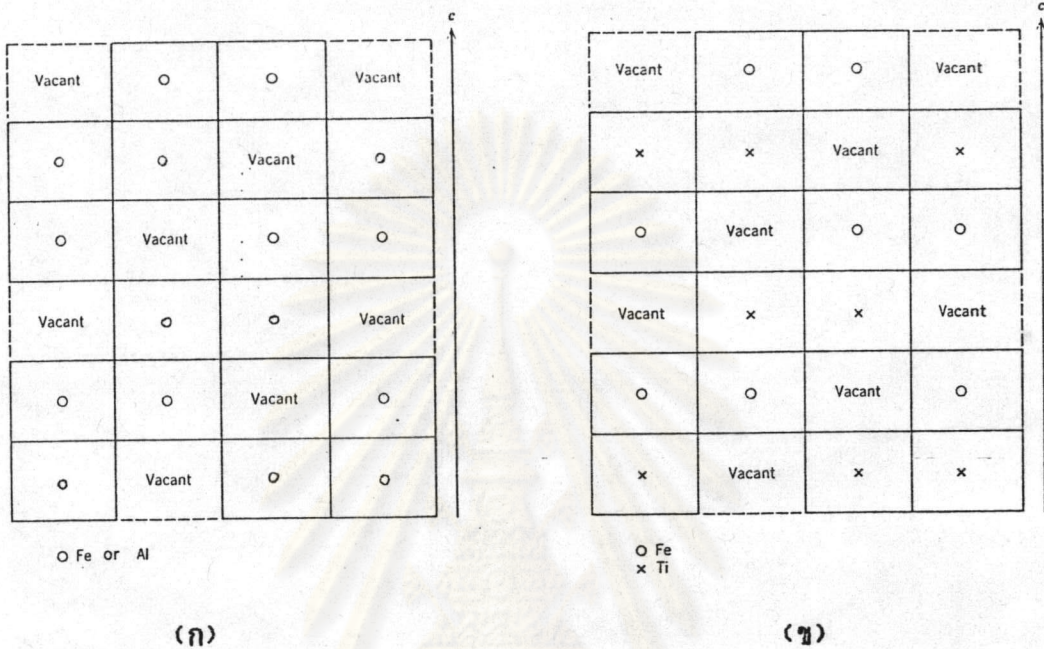
อิลเมไนต์ (2,3) ประกอบด้วย TiO_2 52.66 % และ FeO 47.34 % (หรือ Fe 36.8 % , Ti 31.6 % และ O 31.6 %) มีความแข็งตามสเกลของโมฮส์ (Mohs Scale) 5 - 6 ความถ่วงจำเพาะ 4.7 มีสีดำหรือน้ำตาลดำ สีผงละเอียด (Streak) ดำหรือน้ำตาลแดง ความวาวแบบโลหะหรือกึ่งโลหะ ไม่มีแนวแตก มีคุณสมบัติติดแม่เหล็กอย่างอ่อน นำไฟฟ้า ปกติจะมีเนื้อสमानแน่น (Massive) ทึบแสง (Opaque)

อิลเมไนต์มีรูปผลึกไตรโกนอล - รอมโบอีดรอล (Trigonal-Rhombohedral) ดังรูปที่ 2.1 ผลึกมักจะเป็นแผ่นหนา เป็นชั้น หรือแผ่นบาง ๆ ซ้อนกัน อิลเมไนต์มีโครงสร้าง



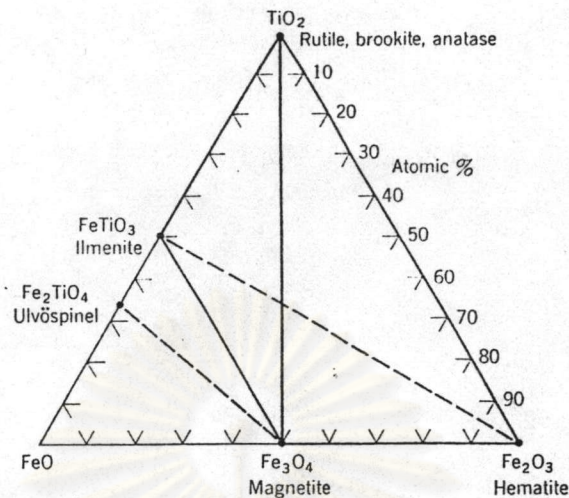
รูปที่ 2.1 รูปผลึกของแร่อิลเมไนต์ (2)

ผลึกคล้ายกับคอรันดัม (Corundum , Al_2O_3) หรือฮีมาไทต์ (Hematite , Fe_2O_3) แต่มีสมมาตรต่ำกว่าเพราะมีประจุบวกสองชนิดคือ Fe^{3+} และ Ti^{4+} เรียงตัวสลับกันตามแนวแกน C ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของคอรันดัมหรือฮีมาไทต์ แสดงเฉพาะประจุบวก (ข) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของอิลเมไนต์ แสดงเฉพาะประจุบวก (ง)

โดยปกติแร่อิลเมไนต์จะมีส่วนประกอบของไพโรฟานไนต์หรือโกดีไลต์อยู่ด้วย ซึ่งเรียกว่า แมงแกนอิลเมไนต์ (Manganilmenite) หรือพิโครอิลเมไนต์ (Picroilmenite) ถ้ารูปผลึกมีลักษณะแหลม (Acute Rhombohedral) จะเรียกว่า ชิชโทไนต์ (Crichtonite) ดังรูปด้านขวาของรูปที่ 2.1 ซึ่งมีธาตุไทเทเนียมมากขึ้น เพอริทไอออน (Fe^{3+}) เข้าไปแทนที่เพอรัสไอออน (Fe^{2+}) บางส่วน อุณหภูมิปกติส่วนใหญ่อิลเมไนต์มีปริมาณของ Fe_2O_3 ปนอยู่ด้วยน้อยกว่า 6% สารละลายของแข็ง (Solid Solution) ระหว่าง Fe_2O_3 และ $FeTiO_3$ จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 950 °ซ. ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงองค์ประกอบธรรมชาติของแร่ออกไซด์ในระบบ $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ เส้นที่แสดงสารประกอบที่เกี่ยวข้องกันโดยทั่วไปทางธรณีวิทยาที่อุณหภูมิต่ำ เส้นประแสดงสารละลายของแข็งที่สมบูรณ์ระหว่างสารประกอบสองชนิด เช่น ฮีมาไทต์-อิลเมไนต์ จะเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 950 °ซ. แมกนีไทต์-อัลโวสปีเนล (Magnetite-ulvospinel) ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 °ซ. ในธรรมชาติอาจพบแร่อิลเมไนต์ผสม (Intergrowth) อยู่กับไทเทโนฮีมาไทต์ (Titanohematite) ไทเทโนแมกนีไทต์ (Titanomagnetite) หรืออัลโวสปีเนล (4,5)



รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบธรรมชาติของแร่ออกไซด์ในระบบ $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ (3)

2.1.2 การกำเนิดของแร่อิลเมนไนต์ (3)

อิลเมนไนต์โดยทั่วไปเป็นแร่รอง (Accessory Mineral) ในหินอัคนี อาจพบเป็นมวลสารขนาดใหญ่ในหินแกรบิโอ (Gabbro) ไดออไรต์ (Diorite) และอะนอร์โทไซต์ (Anorthosite) ที่สัมพันธ์กับแมกนีไทต์ พบในหินแพกมาไทต์ (Pegmatite) หรือพบอยู่ในทรายร่วมกับแมกนีไทต์ รูไทล์ เซอร์คอน และโมนาไซต์ ที่พบเสมอในแหล่งแร่ดีบุก

2.1.3 แหล่งกำเนิดของแร่อิลเมนไนต์

ในประเทศไทย พบอิลเมนไนต์ในแหล่งแร่ดีบุกทั่ว ๆ ไปเช่น ที่จังหวัด กาญจนบุรี พังงา ระนอง ภูเก็ต มีขนาดเล็กเท่าเม็ดทราย และพบในแหล่งพลอยที่จังหวัด จันทบุรี ทรานด์ต่างประเทศ พบมากที่ Kragero และแหล่งอื่น ๆ ในประเทศนอร์เวย์ ฟินแลนด์ สหรัฐอเมริกา ในลักษณะผลึกพบที่ Miask ในภูเขาอิลมาน (Ilmen) ประเทศสหภาพโซเวียต และมีการทำเหมืองแร่อิลเมนไนต์จากทรายชายฝั่งเป็นปริมาณมากในประเทศ ออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ อินเดีย และบราซิล นอกจากนี้มีการทำเหมืองในแหล่งแร่อิลเมนไนต์-ธิมาไทต์ขนาดใหญ่ที่ Allard Lake , Quebec ประเทศแคนาดา

2.1.4 การใช้ประโยชน์แร่อิลเมนไนต์

สำหรับผลิตโลหะไทเทเนียม ซึ่งมีอัตราส่วนความแรงต่อน้ำหนักสูง สามารถ

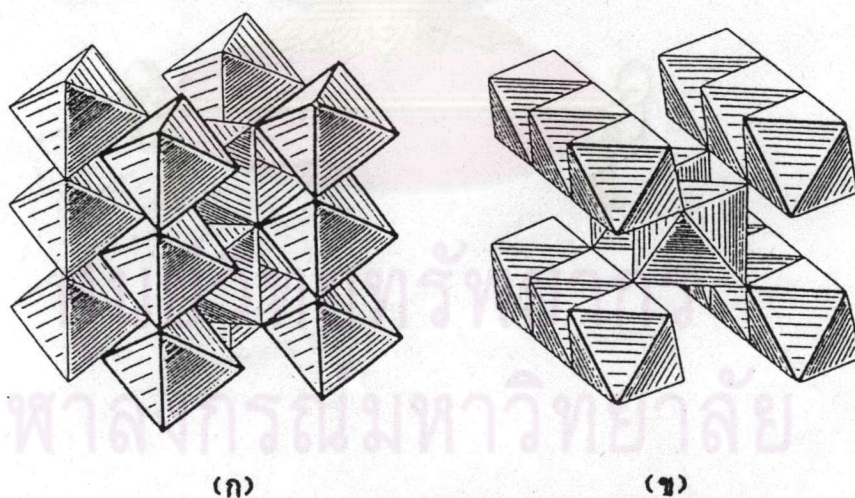
ใช้เป็นวัสดุในการสร้างเครื่องปั้นทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างและเครื่องยนต์ ผลิตภัณฑ์ประกอบ ไทเทเนียมออกไซด์ นำมาใช้เป็นแม่สี ใช้ในงานลวดเชื่อม อิลเมไนต์ไม่สามารถจะเป็นสินแร่ สำหรับผลิตเหล็กได้เพราะถลุงยาก แต่สารผสมอิลเมไนต์-แมกนีไทต์ และอิลเมไนต์-ฮีมาไทต์ สามารถนำมาแยกได้ทั้งไทเทเนียมและเหล็ก

2.2 แร่ไทเทเนียมออกไซด์

Kostov (2) จัดพวกแร่ไทเทเนียมออกไซด์อยู่ในพวกแร่ออกไซด์ กลุ่มรูไทล์ (Rutile Group) ซึ่งกลุ่มนี้ประกอบด้วยแร่ รูไทล์ (Rutile, TiO_2) อะนาทาส (Anatase, TiO_2) บรูคไทต์ (Brookite, TiO_2) แคสซิเทอไรต์ (Cassiterite, SnO_2) แคลเซอร์ไทต์ (Calzirtite, $CaTiZr_3O_{10}$) และแบดเดเลย์ไอต์ (Baddeleyite, ZrO_2)

2.2.1 แร่รูไทล์

2.2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่รูไทล์ ประกอบด้วย Ti 60 % และ O 40 % มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 โดยธรรมชาติอาจมีพวกธาตุ Fe Sn Nb และ Ta ปน

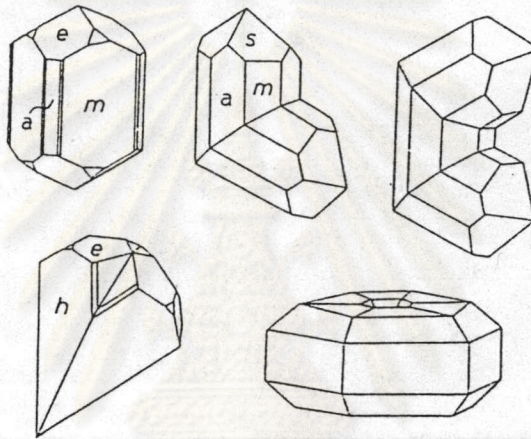


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของรูไทล์ (ก) แบบธรรมดา (ข) แบบคล้ายระบบเอกซะโกนาล (Pseudohexagonal) แกนแนวตั้ง (2)

อยู่ด้วย มีความแข็งตามสเกลของมอส์ 6-6.5 ความถ่วงจำเพาะ 4.23-4.4 (ถ้ามีธาตุเหล็กปนอยู่มาก) อาจมีค่าถึง 5.6 กรณีสีธาตุนิโอบียม (Niobium) แทนทาลัม (Tantalum) ปนอยู่ มีสีแดง น้ำตาลแดง ถึงสีดำ สีมงละเอียด น้ำตาลอ่อน ความวาวแบบเพชรหรือกึ่งโลหะ มีแนวแตก

(Cleavage) แนว 110 ซัด มีคุณสมบัติไม่ติดแม่เหล็ก นำไฟฟ้า กิ่งโปร่งแสงถึงโปร่งใส ถ้ามีพวกเหล็กมากมีชื่อเรียกว่า ไนกริน (Nigrin) มีธาตุไนโอเบียมปนมากเรียกว่า อิลเมโนรูไทล์ (Ilmenorutile) มีธาตุแทนทาลัมปนมากเรียกว่า สตรูเวอไรต์ (Struverite) หากมีลักษณะเป็นตาข่ายรูปเข็มเรียกว่า ซาจีไนต์ (Sagenite)

รูไทล์มีรูปผลึกโดเททระโกนาล-ไดพีระมิด (Ditetragonal - Dipyramidal) ดังรูปที่ 2.5 มักเกิดเป็นแท่งคล้ายรูปเข็ม มีริ้วลายขนาน (Striation) ไปตามแนวยาวของผลึก อาจเกิดเป็นผลึกแฝดโค้ง (Elbow Twins)



รูปที่ 2.5 รูปผลึกของรูไทล์ (2)

2.2.1.2 การกำเนิดของแร่รูไทล์ ในพวกภาวะพหุสัณฐาน (Polymorphism) ของ TiO_2 รูไทล์มีเสถียรมากที่สุด ซึ่งก่อรูปในอุณหภูมิสูง แหล่งแร่แบบน้ำร้อนของสายแร่ ควออร์ตซ์-รูไทล์ และหินแอมมาไทต์เป็นแหล่งแร่ที่สำคัญของรูไทล์ ยังพบในหินแอมฟิโบลิต (Amphibolite) หินแกรนิต (Granite) หินไนส์ (Gneiss) หินปูนแปรสภาพ (Metamorphic Limestone) และหินโดโลไมต์ (Dolomite) หรือปนอยู่ในทรายร่วมกับอิลเมไนต์ แมกนีไทต์ เซอร์คอน และโมนาไซต์ เป็นที่เชื่อกันว่ารูไทล์เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติจากอิลเมไนต์ (47) โดยระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิลเมไนต์จะถูกออกซิไดส์ เหล็กในอิลเมไนต์ถูกระบายออกไป เหลือแต่รูไทล์

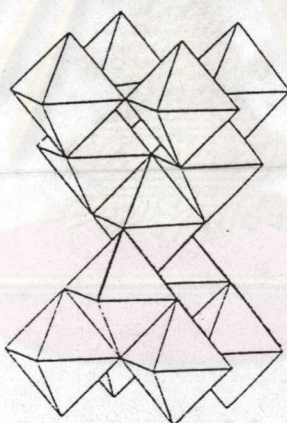
2.2.1.3 แหล่งกำเนิดของแร่รูไทล์ ในประเทศไทยพบปนอยู่ในแหล่งลานแร่ ดิบุกแต่มีปริมาณน้อย ต่างประเทศ พบในประเทศนอร์เวย์ สวีเดน ที่เชาอูร์ล (Ural) และอิลเมน (Ilmen) ประเทศสหภาพโซเวียต รัฐเวอร์จิเนีย (Virginia) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบขนาดเล็กเกิดขึ้นในเทือกเขาแอลป์ (Alpine) ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ส่วนประเทศ

ออสเตอเรียผลิตรูทีลจากทรายชายฝั่งมากที่สุด

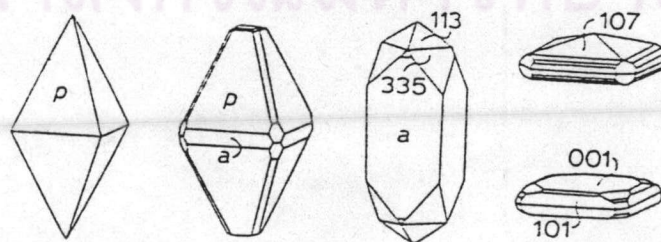
2.2.1.4 การใช้ประโยชน์แร่รูทีล เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ลวดเชื่อม (Welding Rod) ผลิตโลหะไทเทเนียม ใช้ในรูปโลหะผสมสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้า เป็นแม่สีเหลืองสำหรับปอร์ซเลน (Porcelain) ฟันปลอม และที่สำคัญคือใช้ในอุตสาหกรรมสี

2.2.2 แร่อะนาเทส (9)

2.2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่อะนาเทส มีความแข็งตาม สเกลของโมฮส์ 5.5-6 ความถ่วงจำเพาะ 3.82-3.97 สีน้ำตาล ความวาวแบบเพชร มีแนวแตก แนว 001 และ 011 ชัด มีริ้วลายขนานตามระนาบแนวอนอยู่บนหน้าผลึกทุกหน้า มีรูปผลึก ไดเททระโกนาล-ไดพีระมิด ดังรูปที่ 2.6



(ก)



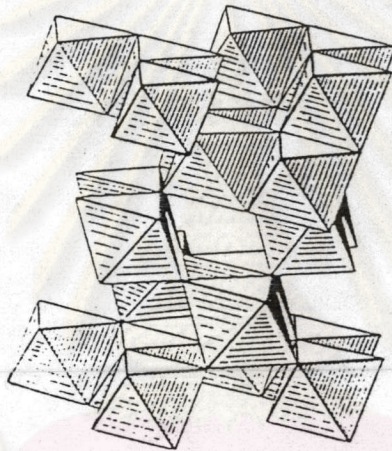
(ข)

รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของอะนาเทส (ข) รูปผลึกของอะนาเทส (2)

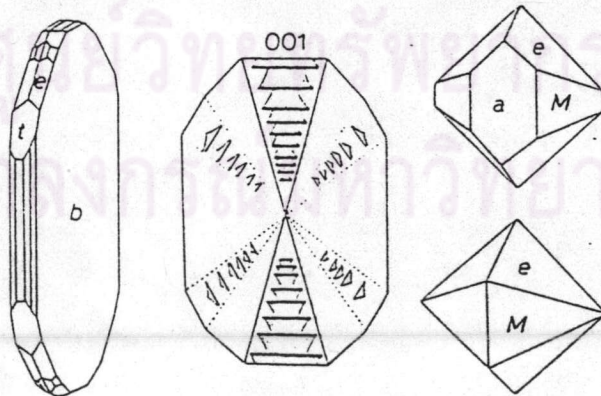
2.2.2.2 การกำเนิดและแหล่งกำเนิดของแร่อะนาเทส อะนาเทสโดยธรรมชาติเกิดในภาวะคล้ายกับรูไทล์ แต่พบได้น้อยเพราะมีเสถียรต่ำ ที่อุณหภูมิ 915 °ซ. อะนาเทสจะเปลี่ยนเป็นรูไทล์ แหล่งกำเนิดพบในเทือกเขาแอลป์ (Alps) ทวีปยุโรป

2.2.3 แร่บรูคไคต์ (2)

2.2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่บรูคไคต์ มีความแข็งตามสเกลของโมฮส์ 5.5-6 ความถ่วงจำเพาะ 4.14 สีน้ำตาลดำถึงน้ำตาลแดง มีรูปผลึกออร์โธโรมบิก-ไดพิระมิด (Orthorhombic-Dipyramidal) ดังรูปที่ 2.7



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างของบรูคไคต์ (ข) รูปผลึกของบรูคไคต์ (2)

2.2.3.2 การกำเนิดของแร่บรुकโกต์ การกำเนิดของแร่บรुकโกต์คล้ายกับการกำเนิดของแร่รูไทล์และอะนาเทส

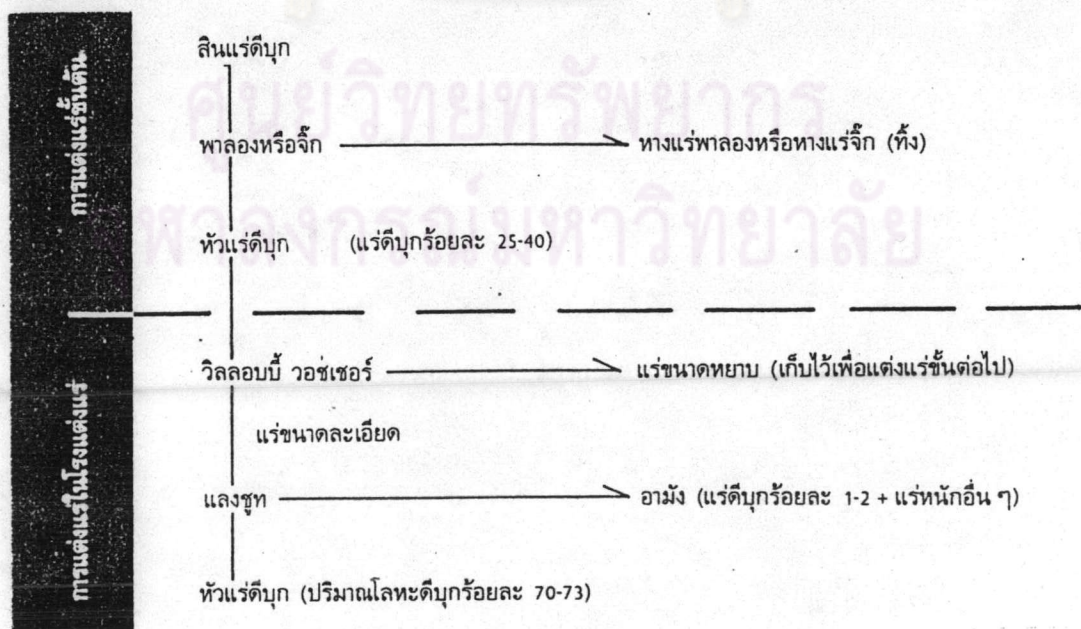
2.3 แร่โอลิเมนไต์ในประเทศไทย (1,7-9)

แหล่งแร่โอลิเมนไต์ที่พบในประเทศไทยมักจะมีลักษณะ คือ

2.3.1 แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับแร่ดีบุก (7,8)

แร่โอลิเมนไต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเกิดร่วมกับแหล่งแร่ดีบุก ซึ่งโดยมากเป็นแบบลานแร่ (Alluvial Deposit) มีแร่ดีบุกเกิดร่วมกับแร่อื่น ๆ มักพบเป็นเม็ดแร่อิสระ เนื่องมาจากการผุสลายของแหล่งปฐมภูมิ (Primary Deposit) การทำเหมืองดีบุกนั้นนิยมใช้วิธีเหมืองสูบ เหมืองฉีด และเหมืองเรือขุด ทำการขุดสินแร่ทั้งบนบกและนอกชายฝั่งทะเล

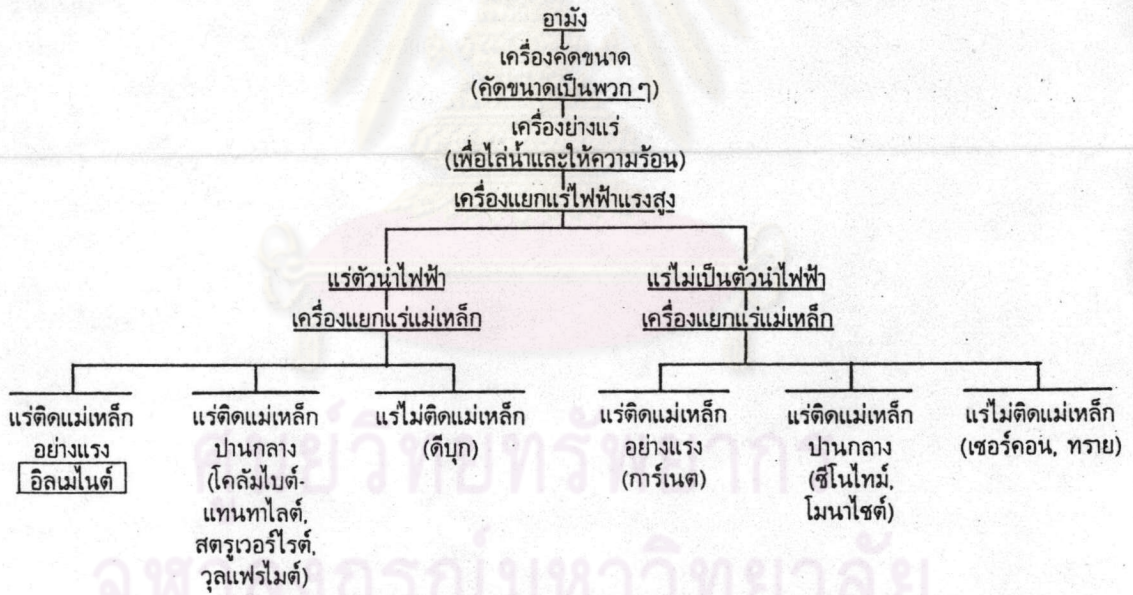
หลังจากที่ได้ทำการคัดขนาดเอาหินก้อนโตที่ไม่มีแร่ออกไปโดยใช้ตะแกรง จะมีการใช้รางกุ่มแร่ (Palong) หรือจิก (Jig) ทำการแต่งแร่ชั้นต้นก็จะได้หัวแร่ดีบุก ซึ่งจะถูกส่งไปโรงแต่งแร่เพื่อแต่งแร่ชั้นที่สอง กระบวนการแต่งแร่ดีบุกในโรงแต่งแร่จะประกอบด้วยขั้นตอนการคัดขนาดแร่โดยใช้น้ำด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า วิลลอบบี้วอชเชอร์ (Willoughby Washer) และการแยกแร่ในรางแยกแร่ขนาดเล็กที่เรียกว่า แลงชุต (Lanchute) โดยใช้แรงงานของคนงาน ดังแผนผังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังการแต่งแร่ดีบุกแบบทั่วไปในประเทศไทย (7)

แร่ดิบส่วนใหญ่จะเก็บได้โดยแรงชูท เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าแร่อื่น ๆ ที่ปนมา และเมื่อทำการล้างซ้ำหลายครั้งทำให้มีคุณภาพสูงพอที่จะขายได้ คือปริมาณโลหะดิบทุกในหัวแร่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 72 ส่วนหางแร่จากแรงชูทซึ่งเรียกว่า อามัง ที่ประกอบด้วยแร่หนัก (Heavy Minerals) หรือแร่พลอยได้ (By Product Minerals) ชนิดต่าง ๆ พบว่าแร่ดิบยังคงเหลืออยู่ในหางแร่อ้างกล่าวประมาณร้อยละ 1-2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของคนงานล้างแร่และขนาดของเม็ดแร่ที่มีอยู่ในหางแร่นั้น

แร่หนักหรือแร่พลอยได้ชนิดต่าง ๆ ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าแร่ดิบในอามังส่วนใหญ่เป็นแร่ซิลิเกต นอกจากนั้นประกอบด้วยแร่มีค่าชนิดอื่น เช่น โคลัมไบต์ แทนทาลิต์ สตรูเวอไรต์ เซอร์คอน โมนาไซต์ ซีโนไทม์ การ์เนต ฯลฯ การแยกแร่พลอยได้เหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้เครื่องแยกแม่เหล็ก (Magnetic Separator) และเครื่องแยกไฟฟ้าแรงสูง (High-Tension Separator) อิลเมไนต์ก็สามารถแยกออกมาได้โดยเครื่องมือดังกล่าว แผนผังการแต่งแร่ซิลิเกตแบบทั่วไปแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังการแต่งแร่ซิลิเกตออกจากอามังแบบทั่วไป (7)

2.3.2 แหล่งแร่หายาก

แร่หายากส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแร่ที่พบในแร่พลอยได้จากการผลิตแร่ดิบ เช่น อิลเมไนต์ โมนาไซต์ เซอร์คอน ลูโคซีน รูไทล์ ฯลฯ ในประเทศไทยจะพบแร่หายากตามบริเวณชายภาคจังหวัด ระยอง ประจวบคีรีขันธ์ และชุมพร

ในขั้นตอนสุดท้ายแร่หายากขึ้นมาคัดขนาดให้เศษหินก้อนโตออกไป แร่เม็ด

เล็กจะลวดตะแกรงเข้าเครื่องแยกแร่ขึ้นต้นเช่น สไปรอล (Spiral Concentrator) หรือ โต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table) เพื่อแยกทรายที่มีน้ำหนักเบาออกไป จะได้หัวแร่ขึ้นต้นซึ่งจะถูกส่งไปยังโรงแยกแร่ที่มีกรรมวิธีในการแยกคล้ายคลึงกับการแยกอำมหรือแร่พลอยได้จากแหล่งแร่ดิบๆ

จากตารางที่ 2.1 (9) แสดงส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างแร่อิลเมไนต์จากจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย จะเห็นว่ามี TiO_2 ในช่วง 49.75-58.85 % , FeO 34.73-45.78 % , MnO 2.41-12.31 % และมี Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , WO_3 และ SnO_2 เป็นส่วนน้อย

2.4 คุณลักษณะเฉพาะ (Specifications) ของแร่อิลเมไนต์ในการซื้อขาย (1,7,10)

ในการซื้อขายแร่อิลเมไนต์ส่วนใหญ่จะดูที่ส่วนประกอบหลักคือ TiO_2 , FeO และ Fe_2O_3 โดยทั่วไปจะต้องมี TiO_2 มากกว่าร้อยละ 52 FeO อยู่ระหว่างร้อยละ 20-28 ในวารสารแร่อุตสาหกรรม (Industrial Minerals Journal) ที่บอกราคาซื้อขายแร่ประจำเดือน สำหรับแร่อิลเมไนต์จะกำหนดเฉพาะเปอร์เซ็นต์ของ TiO_2 เช่น แร่อิลเมไนต์จากออสเตรเลียต้องมี TiO_2 มากกว่าร้อยละ 54 จากอินเดีย TiO_2 อยู่ในช่วง 58-60 % (10) อย่างไรก็ตามถ้าแร่อิลเมไนต์มีคุณลักษณะเฉพาะแตกต่างไปจากที่ระบุไว้เล็กน้อย ก็อาจมีการซื้อขายได้เพราะสามารถนำไปผสมกับแร่ที่มีเกรดสูงแต่ราคาอาจลดลงไปบ้าง มลทินหลักที่เจือปนอยู่ส่วนใหญ่ได้แก่ MnO , P_2O_5 , Nb_2O_5 , As_2O_3 และมีมลทินอื่นบางชนิด ซึ่งแล้วแต่จะกำหนดจากผู้ซื้อ ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะเฉพาะของแร่อิลเมไนต์จากผู้ซื้อเฉพาะราย (1)

2.5 ผลผลิตแร่อิลเมไนต์และรูไทล์ในประเทศไทย

การผลิตแร่อิลเมไนต์ในประเทศไทยจากสถิติตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527-2532 ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 พร้อมกับมูลค่าของแร่ การส่งออก การบริโภคภายในประเทศ และการนำเข้า จะเห็นว่าปี พ.ศ. 2530 และ 2532 ประเทศไทยได้ผลิตแร่อิลเมไนต์ส่งออกขายต่างประเทศมากกว่าสามหมื่นตันต่อปี ซึ่งก่อนนี้มีการผลิตเพื่อส่งออกน้อยมากทั้งนี้เนื่องมาจากมีความต้องการแร่อิลเมไนต์ในตลาดโลกเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับแหล่งแร่อิลเมไนต์ที่สำคัญของโลกเริ่มลดน้อยลง จะเห็นว่ามีการใช้ประโยชน์จากแร่อิลเมไนต์ในประเทศน้อยมาก ผลผลิตที่ได้โดยส่วนใหญ่ส่งออกไปต่างประเทศ ในขณะที่นำเข้าไทเทเนียมออกไซด์หรือรูไทล์มาบ่อนให้อุตสาหกรรมภายในประเทศปีละ 20-50 ล้านบาทในช่วงปี พ.ศ. 2530-2532 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแร่โอลิเมนใต้จากจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย (9)

	เชียงใหม่	อุทัยธานี	ราชบุรี	ประจวบคีรีขันธ์	ระนอง	ระนอง	พังงา	ภูเก็ต	ภูเก็ต	ตรัง	ยะลา
TiO ₂	49.75	50.90	51.71	51.76	54.99	50.78	49.85	50.95	53.68	54.82	50.38
FeO	45.78	43.68	34.73	34.73	39.87	38.51	44.72	43.53	39.35	38.30	43.97
MnO	2.41	4.16	12.31	12.31	4.46	9.46	4.40	3.73	5.71	3.76	3.76
Nb ₂ O ₅	0.24	0.02	0.28	0.28	0.32	0.57	-	0.32	0.66	0.79	0.25
Ta ₂ O ₅	0.21	0.36	0.24	0.24	0.10	0.14	-	0.31	-	0.20	0.61
WO ₃	0.25	0.54	0.30	0.30	0.07	0.35	0.11	1.06	-	1.51	0.74
SnO ₂	0.63	0.86	0.53	0.53	0.01	-	0.55	0.06	0.25	0.18	0.25
MgO	0.45	-	0.08	0.08	0.05	-	-	-	-	0.03	-
Cr ₂ O ₃	0.31	-	0.16	0.16	0.08	0.04	0.21	0.06	0.09	0.21	0.09
SiO ₂	<u>0.06</u>	<u>0.28</u>	<u>0.06</u>	<u>0.06</u>	<u>0.08</u>	<u>0.14</u>	<u>0.23</u>	-	<u>0.28</u>	<u>0.23</u>	-
รวม	100.09	100.80	100.40	100.40	100.03	99.99	100.07	100.02	100.02	100.03	100.05

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเฉพาะของแร่ทิตานียมไดออกไซด์จากผู้ซื้อเฉพาะราย (1)

(ก) Ref : Happy World Inc.

No.	Item	Standard	Remark
1	TiO ₂ (all)	over 53.5%	
2	TiO ₂ (be affective)	over 51.0%	
3	FeO	20-23.0%	from Australia
		25.0-28.0%	from Malaysia
4	Fe ₂ O ₃	19.0-21.0%	from Australia
		12.0-15.0%	from Malaysia
5	Cr ₂ O ₃	under 0.04%	
6	P ₂ O ₅	under 0.2%	
7	MnO	under 3.0%	
8	V ₂ O ₅	under 0.15%	
Not to contain the ingredient like Ni which colour Titanium Dioxide.			

(ข) Ref : THL , Mining SDN BHD

Composition	Typical (%)	Range Acceptable (%)
TiO ₂	54.0	52.0-62.0
FeO	29.0	11.0-32.0
Fe ₂ O ₃	10.50	10.0-20.0 Max
MnO	3.40	5.5 Max for Thai
Nb ₂ O ₅	0.25	Lower better
P ₂ O ₅	0.18	- " -
SiO ₂	1.50	- " -
Mud	1380 ppm.	- " -
As	30 ppm.	- " -
Cr ₂ O ₃	0.02	- " -
Pb	250 ppm.	- " -
Total Fe	29.5	- " -
Al ₂ O ₃	0.80	- " -
V ₂ O ₅	0.06	- " -
MgO	0.20	- " -
SnO ₂	0.03	- " -
Moisture	3.00	- " -

ตารางที่ 2.3 ผลผลิต การส่งออก การบริโภคภายในประเทศ การนำเข้า แร่โอลิเมนไนต์ของประเทศไทย และมูลค่าระหว่างปี พ.ศ. 2527-2532

พ.ศ.	ปริมาณ : ตัน					
	2527	2528	2529	2530	2531	2532
<u>การผลิต (จังหวัด)</u>						
กรุงเทพฯ*	-	-	-	-	-	50
ประจวบคีรีขันธ์	148	-	56	450	-	1,584
พังงา	-	1,078	68	2,723	3,880	8,571
ภูเก็ต	-	-	2,050	21,950	6,000	6,750
ระนอง	-	-	11,315	1,155	6,575	-
รวม	148	1,078	13,489	26,278	16,455	16,955
มูลค่า (ล้านบาท)	0.4	2.7	15.2	27.2	19.5	23.1
<u>การส่งออก (ประเทศ)</u>						
ญี่ปุ่น	-	-	-	-	-	1,508
เกาหลีใต้	-	-	-	4,600	-	33,000
มาเลเซีย	-	-	1,503	27,058	4,768	5,966
รวม	-	-	1,503	31,658	4,768	40,474
มูลค่า (ล้านบาท)	-	-	1.5	19.1	3.2	31.3
<u>การบริโภคภายในประเทศ</u>						
ปริมาณ	-	-	38	29	82	-
มูลค่า (ล้านบาท)	-	-	0.06	0.03	0.2	-
<u>การนำเข้า (ประเทศ)</u>						
ออสเตรเลีย	-	19.6	-	-	10.0	-
จีน	-	-	-	-	-	0.2
เวียดนาม	-	-	-	-	-	15
รวม	-	19.6	-	-	10.0	15.2
มูลค่า (ล้านบาท)	-	0.09	-	-	0.035	0.017

* : จากโรงแต่งแร่ในกรุงเทพฯ

ที่มา : ฝ่ายสถิติ กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม

: ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศของไทย กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง

ตารางที่ 2.4 ผลผลิต การส่งออก การบริโภคภายในประเทศ การนำเข้า แร่รู้ไถล่ของ
ประเทศไทย และมูลค่าระหว่างปี พ.ศ. 2527-2532

ปริมาณ : ตัน

พ.ศ.	2527	2528	2529	2530	2531	2532
<u>การผลิต (จังหวัด)</u>						
ประจวบคีรีขันธ์	-	-	48	-	-	-
พังงา	-	44	-	92	128	-
ภูเก็ต	-	66	-	-	-	-
รวม	-	110	48	92	128	-
มูลค่า (ล้านบาท)	-	0.5	0.2	0.4	1.0	-
<u>การส่งออก (ประเทศ)</u>						
มาเลเซีย	-	-	-	18	-	-
สิงคโปร์	-	-	-	12	-	-
รวม	-	-	-	30	-	-
มูลค่า (ล้านบาท)	-	-	-	0.2	-	-
<u>การบริโภคภายในประเทศ</u>						
ปริมาณ	-	-	14	30	44	-
มูลค่า (ล้านบาท)	-	-	0.06	0.1	0.5	-
<u>การนำเข้า (ประเทศ)</u>						
ออสเตรเลีย	774.7	1863.5	477.0	1,303.9	1936.0	3,223.0
ญี่ปุ่น	4.5	3.0	6.0	5.0	7.0	6.5
ไต้หวัน	-	-	-	90.8	90.0	-
อิตาลี	1.5	0.6	2.0	-	-	-
เนเธอร์แลนด์	-	-	-	-	-	0.5
รวม	780.7	1,867.1	485.0	1,399.7	2,033.0	3,230.0
มูลค่า (ล้านบาท)	8.2	23.8	6.2	20.5	30.5	53.8

ที่มา : ฝ่ายสถิติ กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม
: ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศของไทย กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง

2.6 ตัวอย่างแร่ซิลิเกตที่นำมาวิจัย (1,11)

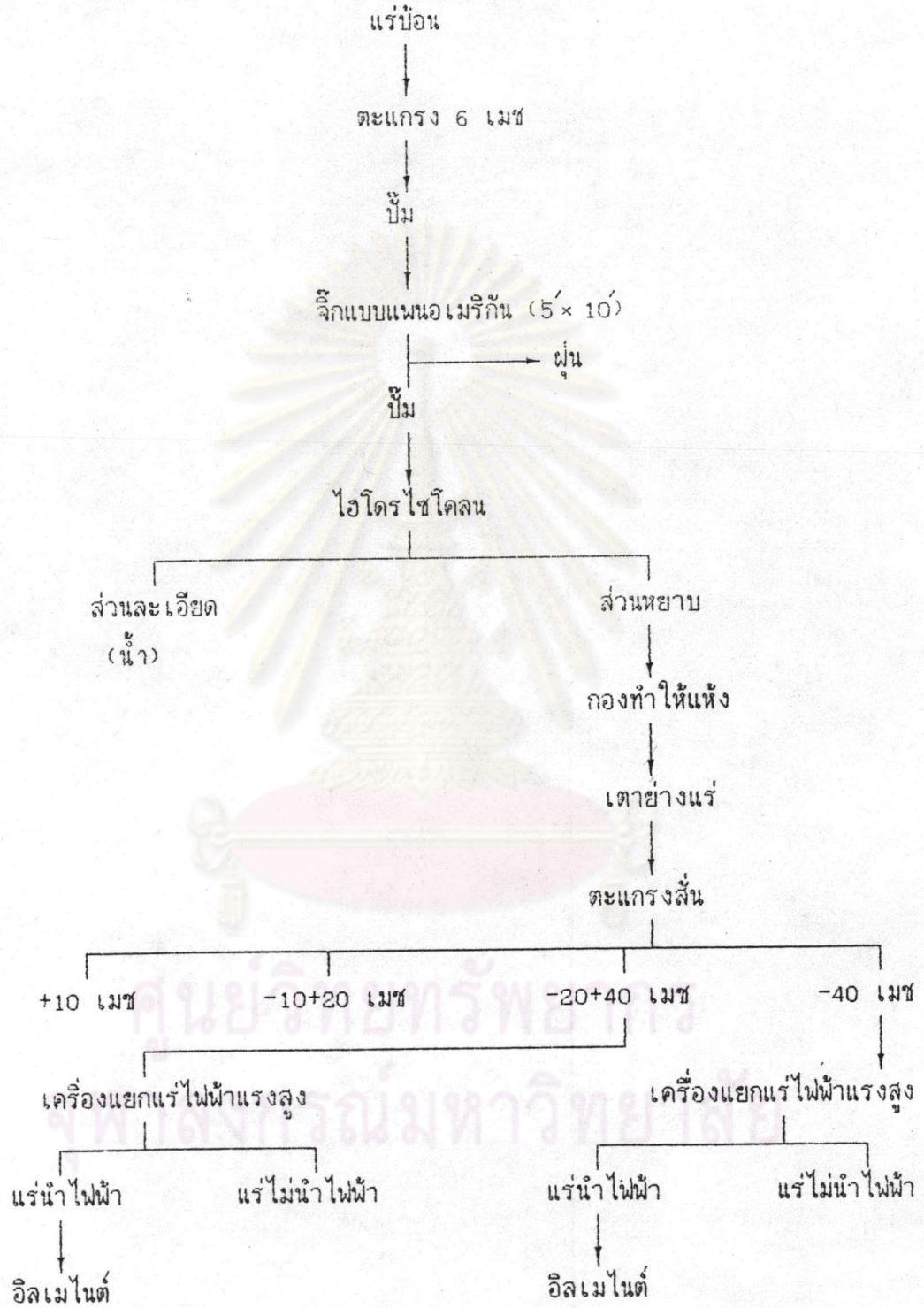
แร่ซิลิเกตที่วิจัยนำมาจากโรงแต่งแร่ทางห้วยส่วนจำกัด รุ่งอรุณตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา โรงแต่งที่นี้ส่วนมากแยกแร่ดีบุกและอำมั่งเช่น เซอร์คอน โมนาไซต์ รูไทล์ สตรูเวอไรต์ ซีโนไทม์ และซิลิเกต ส่วนใหญ่ที่มาจากเหมืองในบริเวณจังหวัดพังงาและระนอง ปัจจุบันทำการแต่งแร่ซิลิเกตเก็บไว้ไม่ต่ำกว่า 9,000 ตัน แผนผังการแต่งแร่ซิลิเกตของโรงแต่งนี้แสดงในรูปที่ 2.10 แร่บ่อนเป็นมูลแร่ที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กหรือเครื่องแยกแร่ไฟฟ้าแรงสูงมาแล้ว ด้วยวิธีนี้แร่ซิลิเกตจะอยู่ในส่วนที่ติดแม่เหล็กค่อนข้างแรง (Strongly Magnetic) หรือเป็นแร่ตัวนำไฟฟ้า (Conductors) มูลแร่ประเภทนี้เป็นแร่ซิลิเกตที่ค่อนข้างสะอาดหรือยังปนอยู่กับแร่พลอยได้ชนิดอื่น ๆ เล็กน้อย แร่ซิลิเกตเหล่านี้จะถูกคัดขนาดด้วยตะแกรง จากนั้นจะถูกสูบไปเข้าจิกแบบแพนอเมริกัน (Pan American Jig) หัวแร่จากจิกจะถูกบ่มไปเข้าไฮโดรไซโคลน พวกส่วนหยาบ (Underflow) จะถูกนำไปอย่างให้แห้งในเตาอย่างแร่ จากนั้นนำหัวแร่แห้งที่ได้ไปคัดขนาดด้วยตะแกรงสี่แบบหมุน (Circular Vibrating Screen) จะได้หัวแร่แห้งสี่ขนาดคือ +10 , -10+20 , -20+40 และ -40 เมช จะนำขนาด -20+40 และ -40 เมช ไปทำการแยกเอาแร่ซิลิเกตด้วยเครื่องแยกแร่ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป สำหรับผลการแยกแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตัวอย่างที่เก็บมาวิจัยเป็นแร่ซิลิเกตประเภทขนาด -40 เมช นำมาวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรง ดังตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าส่วนมากอยู่ในช่วงขนาด -35+100 เมช การตรวจสอบเฟสของแร่ซิลิเกตที่นำมาวิจัยโดยเครื่องรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (ดูภาคผนวก ก) ดังรูปที่ 2.12 สำหรับรังสี $\text{CuK}_{\alpha 1}$ และรูปที่ 2.13 สำหรับรังสี CoK_{α}

รูปที่ 2.14 แสดงเม็ดแร่ซิลิเกตที่นำมาวิจัยด้วยกล้องสองตา (Binocular) รูปที่ 2.15 แสดงภาพแร่ขัดมัน (Polished Section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Ore Microscope) รูปที่ 2.16 แสดงเม็ดแร่ซิลิเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) (ดูภาคผนวก ข) รูปที่ 2.17 แสดงภาพแร่ขัดมันของแร่ซิลิเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม เหล็ก แมงกานีส

ส่วนประกอบของแร่ซิลิเกตที่นำมาวิจัย โดยการวิเคราะห์ทางเคมี ดังนี้

TiO_2	51.86 %	(ดูภาคผนวก ค)
Fe total	31.98 %	(ดูภาคผนวก ง)
FeO	22.74 %	(ดูภาคผนวก จ)
Fe_2O_3	20.44 %	(ได้จากการนำค่า Fe^{3+} ลบค่า Fe total)
MnO	4.10 %	(ดูภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 2.10 แผนผังการแต่งแร่อิลเมไนต์ของโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า (1)

ตารางที่ 2.5 ผลการแยกแวลูเมไนต์ด้วยเครื่องแยกแวลูไฟฟ้าแรงสูงของโรงแต่งแร่ ห.จ.ก.
รุ่งอรุณตะกั่วป่า (1)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

ชนิดแร่	แร่บ่อน	แร่ไฟฟ้า (หัวแร่)	แร่ไม่ไฟฟ้า (หางแร่)
ดิบุก	Tr	Tr	Tr
รูไทล์	0.07	0.07	Tr
เซอร์คอน	0.20	0.15	1.16
ลูโคซีน	Tr	-	Tr
ควออตซ์	2.70	0.56	22.56
แมกนีไทต์	0.89	1.19	-
อิลเมไนต์ ไฮโดรอิลเมไนต์	94.83	97.03	16.55
ซีโนไทม์	Tr	Tr	2.67
โมนาไซต์	Tr	Tr	0.46
สตรูเวไรต์	Tr	Tr	-
การ์เนต	1.31	1.00	55.38
ทิวร์มาลีน	Tr	-	1.07
ซีเดอไรต์	Tr	-	0.15
รวม	100.00	100.00	100.00

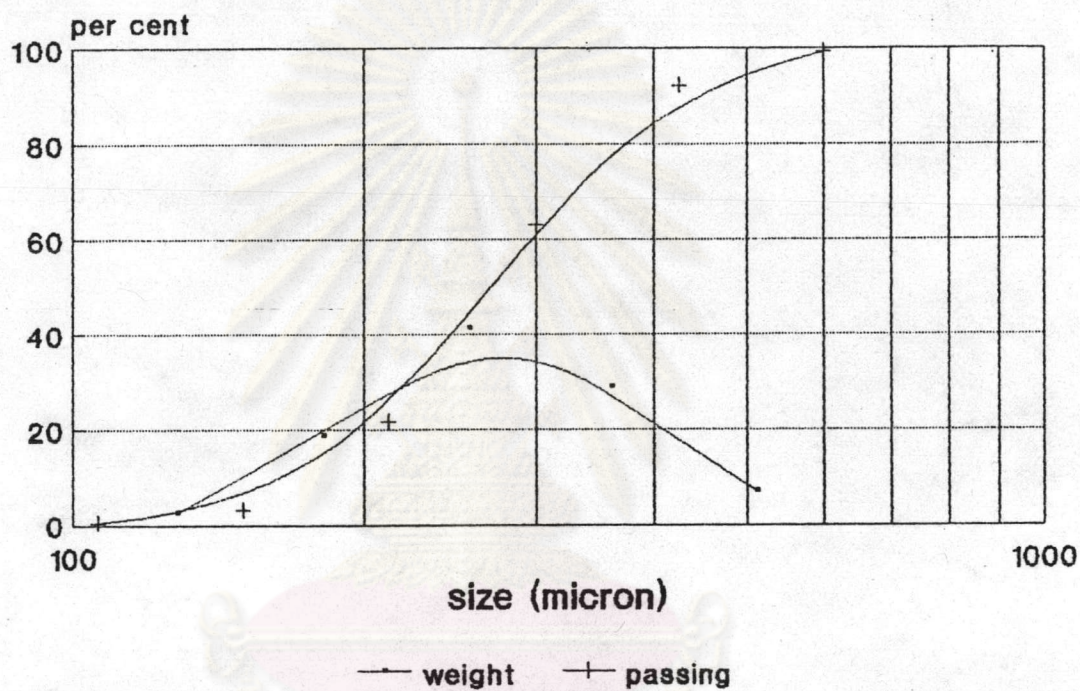
หมายเหตุ : น้ำหนักของแร่ไฟฟ้าร้อยละ 85-90

น้ำหนักของแร่ไม่ไฟฟ้าร้อยละ 10-15

ผลการวิเคราะห์จากการเก็บตัวอย่างอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างเนื่องจากการ
สุ่มเก็บตัวอย่างจากปริมาณมาก

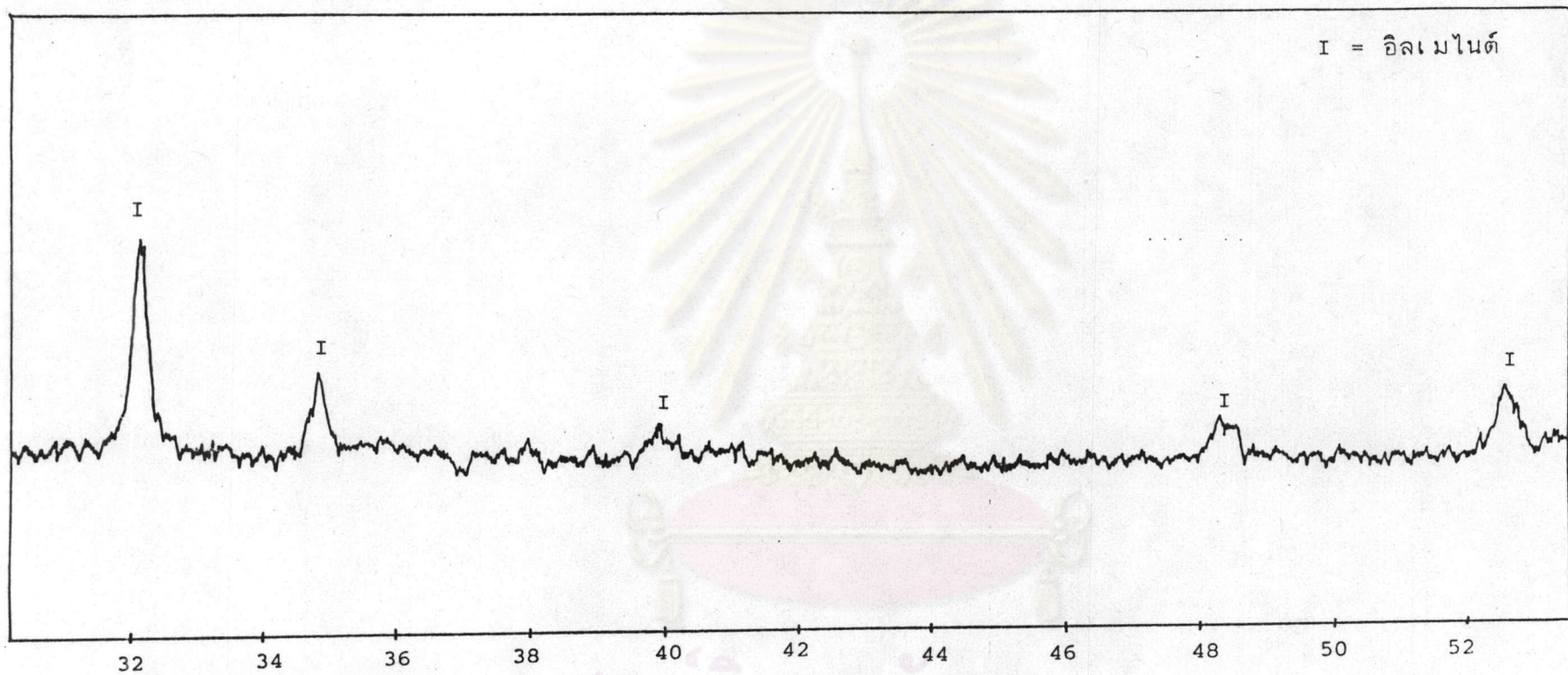
ตารางที่ 2.6 การกระจายขนาดของแร่ซิลิเกตที่นำมาวิจัยจากโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า

ขนาด		ขนาดเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (ไมครอน)	น้ำหนัก (กรัม)	% น้ำหนัก	% น้ำหนักสะสม บนตะแกรง	% น้ำหนักผ่าน ตะแกรง
เมช	ไมครอน					
+28	+600		3	0.7	0.7	
-28+35	-600+425	512	29	7.0	7.7	99.3
-35+48	-425+300	362	121	29.1	36.8	92.3
-48+65	-300+212	256	172	41.4	78.2	63.2
-65+100	-212+150	181	78	18.7	96.9	21.8
-100+150	-150+106	128	11	2.6	99.5	3.1
-150	-106		2	0.5		0.5
รวม			416	100.00		



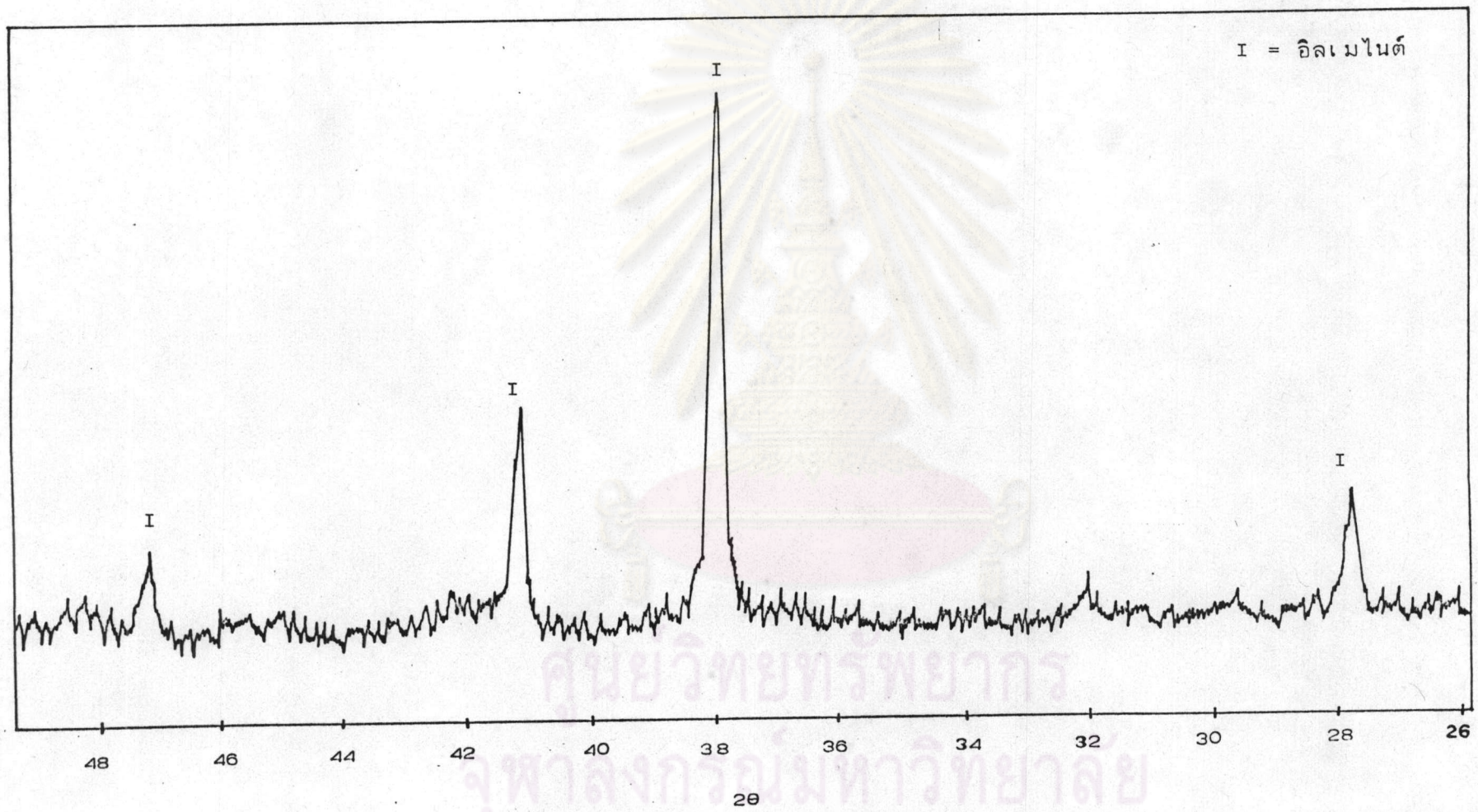
รูปที่ 2.11 การกระจายขนาดของแร่โอลิเมไนต์ที่นำมาวิจัยจากโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

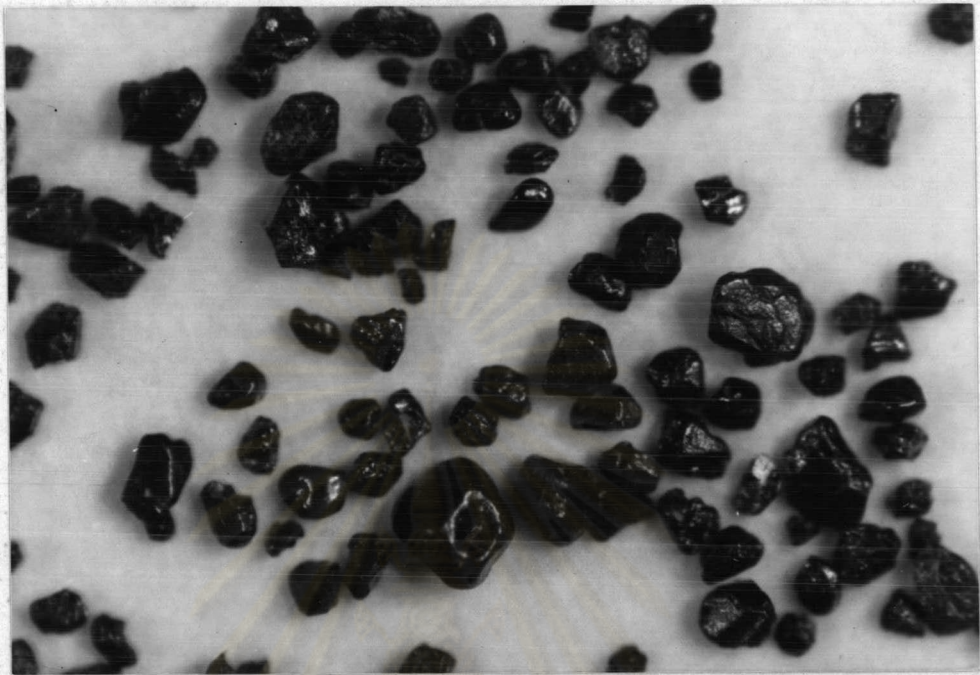


28

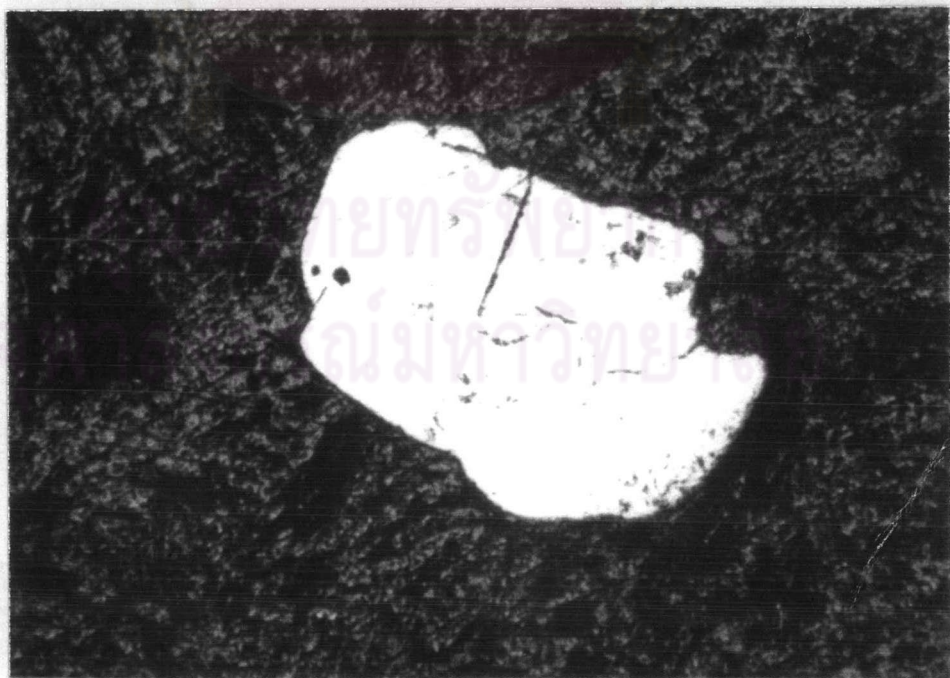
รูปที่ 2.12 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (XRD Pattern) ของแร่อิลเมไนต์
 การแผ่รังสี (Radiation) $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ตัวกรอง (Filter) Ni



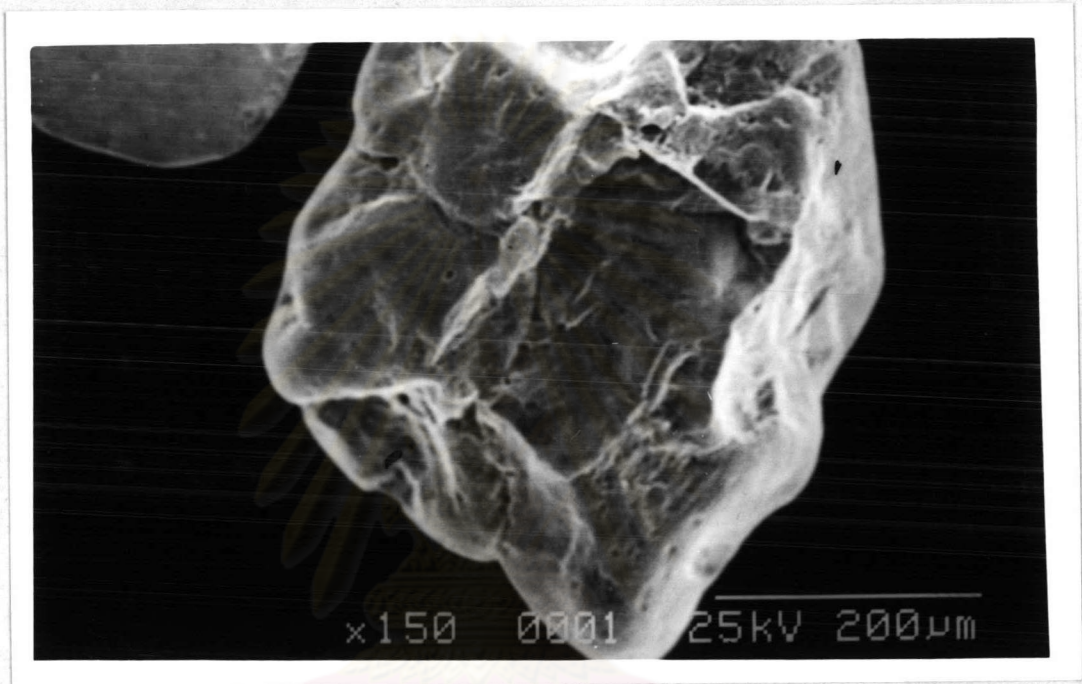
รูปที่ 2.13 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อิลเมไนต์
 การแผ่รังสี CoK_{α} ตัวกรอง Fe



รูปที่ 2.14 เม็ดแร่ฮิลเมไนต์ที่นำมาวิจัยถ่ายด้วยกล้องสองตา $\times 20$ (จะสังเกตเห็นว่ามีสีดำ)

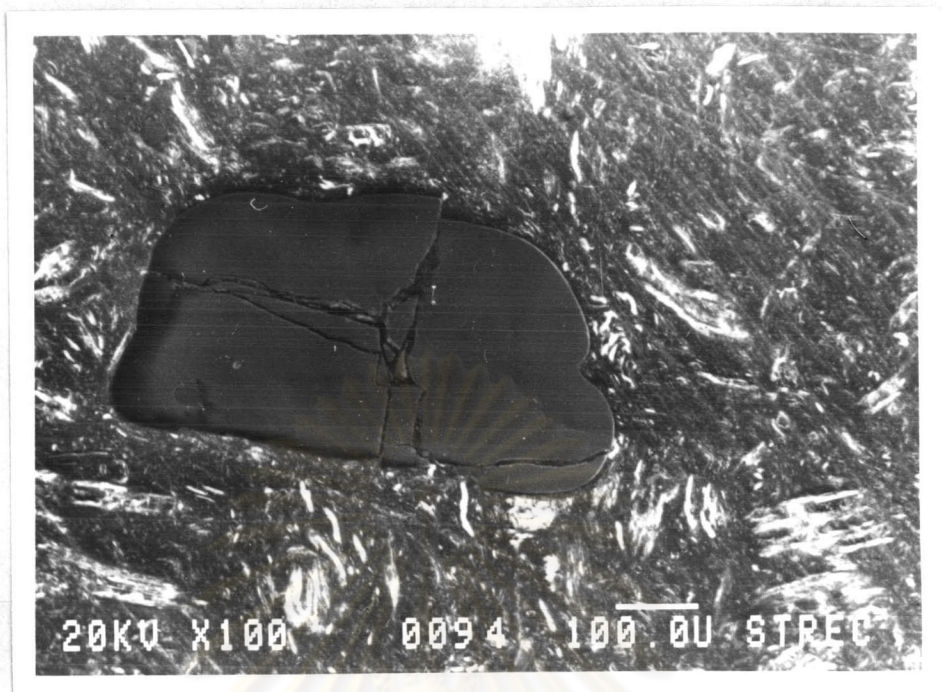


รูปที่ 2.15 ภาพแร่ซัดมันของแร่ฮิลเมไนต์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ $\times 100$

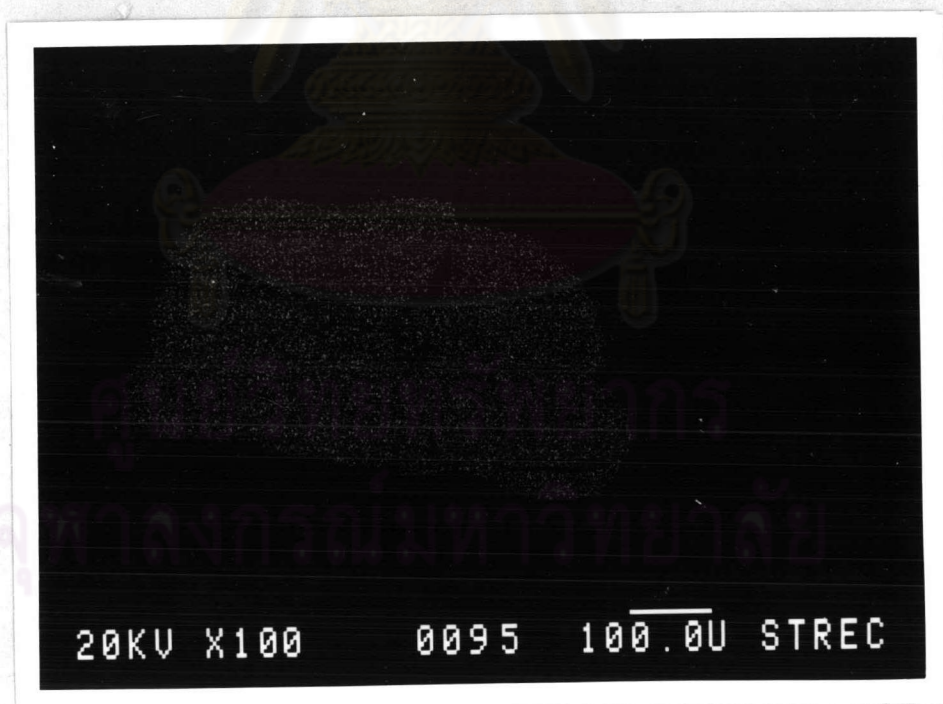


รูปที่ 2.16 เม็ดแร่ซิลิเกตถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน x 150

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

- รูปที่ 2.17 (ก) ภาพแร่ซีเมนต์ของเรซินเมทาคิลเลตถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน $\times 100$
 (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก
 (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส



(ก)



(ข)

ส่วนประกอบอื่น ๆ โดยเครื่องรังสีเอกซ์เรือง (ดูภาคผนวก ข) ดังนี้

SiO_2	0.71 %
Nb_2O_5	0.67 %
Ta_2O_5	0.13 %
Cr_2O_3	0.04 %
Al_2O_3	<0.10 %
ZrO_2	0.09 %
CuO	0.07 %
Y_2O_3	0.04 %

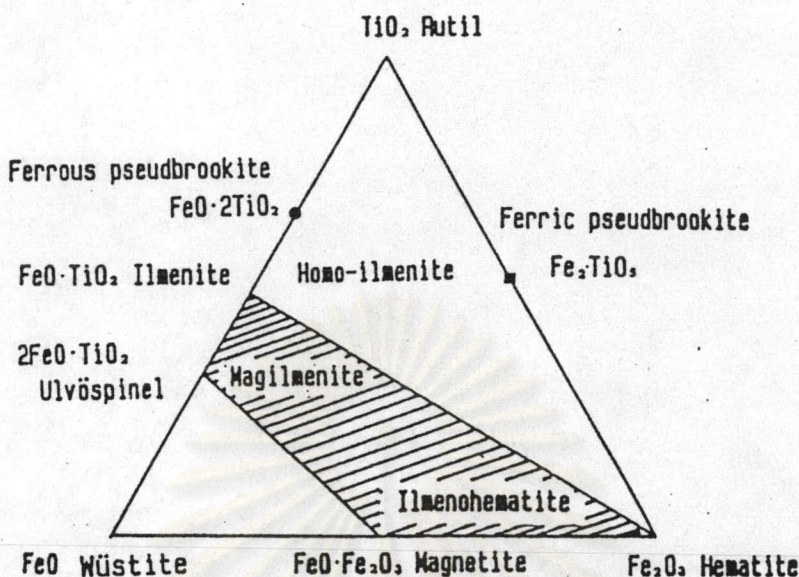
2.7 การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมไนต์ (12)

ปัจจุบันมีความต้องการไทเทเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ลวดเชื่อม อุตสาหกรรมสี และถลุงเป็นโลหะไทเทเนียม ในขณะที่ปริมาณสำรองของแร่ไทล์น้อยลง จึงมีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มคุณภาพแร่อิลเมไนต์ซึ่งเป็นแร่ที่มีธาตุไทเทเนียมประกอบอยู่ประมาณหนึ่งในสาม และมีราคาต่ำประมาณตันละ 1,200 บาท ให้เป็นไทเทเนียมออกไซด์สังเคราะห์ ซึ่งมีมลทินหลักคือเหล็กที่ต้องกำจัดออกให้เหลือน้อยที่สุด

ในการเพิ่มคุณภาพแร่อิลเมไนต์มีความยุ่งยากเนื่องจากอิลเมไนต์มีองค์ประกอบเชิงซ้อน (Complex Composition) และมีโครงสร้างแข็งแรง (Dense Structure) (12) องค์ประกอบทางเคมีของอิลเมไนต์อยู่ในบริเวณแผนภาพเฟส (Phase Diagram) ของอิลเมไนต์ (FeTiO_3) , อัสไวสปีเนล ($2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) , แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ดังรูปที่ 2.18 การชะละลายเหล็กออกไซด์ด้วยกรดในอิลเมไนต์ยากมากถ้าไม่มีการเผาให้ความร้อนเสียก่อน จึงต้องมีการออกซิเดชันหรือรีดักชันของเหล็กออกไซด์เพื่อทำลายโครงสร้างที่แข็งแรงของอิลเมไนต์

ระเบียบวิธีที่สำคัญในการเพิ่มคุณภาพแร่อิลเมไนต์มี 4 วิธี คือ (12)

2.7.1 การกำจัดเหล็กโดยการชะละลายด้วยกรด (Acid Leaching) หลังจากรีดักชันเหล็กออกไซด์ในอิลเมไนต์เป็นโลหะเหล็ก วิธีนี้แร่อิลเมไนต์จะถูกรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ในชั้นของไหล (Fluidized Bed) หรือด้วยคาร์บอน (Carbon) ในเตาหมุน (Rotary Kiln) ในกรรมวิธีรีดักชันขั้นตอนแรกฮีมาไทต์จะถูกรีดิวซ์เป็นวัสไทต์ (Wustite, FeO) อยู่ในรูปของ FeOTiO_2 แล้วจะเปลี่ยนเป็นโลหะเหล็ก ซึ่งจะแยกออกจาก TiO_2 โดยการชะละลายด้วยกรด สลักไทเทเนียม (Titanium Slag) และเหล็กถลุง (Pig Iron) สามารถผลิตได้



รูปที่ 2.18 แผนภาพเฟสสำหรับระบบวูล์ไทต์-รูไทล์-ฮีมาไทต์ (12)

จากการรีดักชันอิลเมไนด์ที่ผสมกับถ่านหินและฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 1,100 °ซ. แล้วนำมาหลอมในเตาเผาไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) ที่อุณหภูมิ 1,650 °ซ. จะได้ไทเทเนียมออกไซด์สแลกที่มี TiO_2 70-85 % แม้วิธีนี้จะไม่มีการชะละลายด้วยกรดแต่ขั้นตอนรีดักชันมีผลต่อการผลิตเชิงประหยัด

2.7.2 การชะละลายเหล็กด้วยกรดหลังจากการทำให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ (Sulfurization) ของเหล็กออกไซด์ในอิลเมไนด์ โดยที่อิลเมไนด์ช่วงขนาด 50-100 ไมครอน ถูกทำให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ในชั้นของไหลที่มีกำมะถันและออกซิเจน กำมะถันบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนออกมาซึ่งเป็นการรักษาระดับอุณหภูมิในชั้นของไหลไปด้วย จากนั้นอิลเมไนด์ซัลไฟด์จะถูกชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกได้ง่าย

มีการพัฒนาวิธีทำให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ด้วยวิธีอื่นเช่น การทำให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ที่ไม่มีบรรยากาศออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 650-750 °ซ. ดังปฏิกิริยา



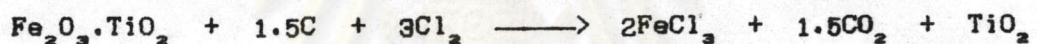
หรือเปลี่ยนอิลเมไนด์ให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ด้วย H_2S ที่อุณหภูมิ 1,000 °ซ. แล้วนำไปชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก

2.7.3 การคลอรีเนชัน (Chlorination) เหล็กในแร่อิลเมไนด์ที่ผ่านการออกซิเดชัน

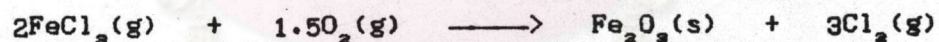
อิลเมไนต์ที่นำมาทำคลอริเนชันควรผ่านการออกซิเดชันหรือรีดักชัน แต่การทำรีดักชันจะไม่สมบูรณ์ซึ่งจะมีผลทำให้วัสดุไทด์หรืออิลมาไทด์ยังคงอยู่ใน TiO_2 ส่วนการออกซิเดชันจะเปลี่ยนวัสดุไทด์เป็นอิลมาไทด์ที่อุณหภูมิ 900-950 °ซ. เฟลซอมาไทด์จะทำให้การคลอริเนชันมีผลดีขึ้น

การคลอริเนชันอิลเมไนต์มี 2 กระบวนการ กระบวนการแรกคลอริเนชันทั้ง Fe_2O_3 และ TiO_2 ซึ่งเป็นการยากที่จะแยก $TiCl_4$ ออกจากมลทินจึงไม่นิยมเป็นวิธีปฏิบัติ กระบวนการที่สองเป็นการคลอริเนชันเฉพาะเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย 6 ขั้นตอนคือ การออกซิเดชันอิลเมไนต์ , การคลอริเนชันแร่ที่ผ่านการออกซิเดชัน , การแยกแร่ที่ไม่ทำปฏิกิริยา , การเก็บคลอริเนชันโดยการออกซิไดส์เฟอริกคลอไรด์ , การทำแก๊สที่ใช้ในการออกซิเดชันให้บริสุทธิ์ และการทำคลอริเนชันให้เหลว

การออกซิเดชันแร่อิลเมไนต์เสียก่อนเพื่อทำให้ $FeO \cdot TiO_2$ เหลือต่ำกว่า 5 % (คือทำให้เกิด $Fe_2O_3 \cdot TiO_2$ ปริมาณมาก) เพราะการคลอริเนชันอิลเมไนต์ดิบ (ที่มีปริมาณ $FeO \cdot TiO_2$ มาก) จะเกิด $FeCl_2$ มากซึ่งมีผลให้ขึ้นของไหลสำหรับการคลอริเนชันหนักขึ้น การคลอริเนชันเหล็กในอิลเมไนต์ซึ่งถูกออกซิไดส์มาแล้วเป็นไปตามปฏิกิริยา



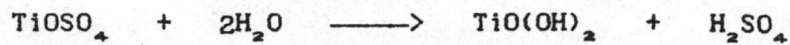
การเก็บคลอริเนชันจาก $FeCl_3$ ก็เป็นปัญหาหนึ่ง ทำได้โดยการออกซิเดชัน $FeCl_3$ สองระยะโดยใช้เตาเผา 2 เตา ดังปฏิกิริยา



2.7.4 การชะละลายเหล็กโดยตรงด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นและอุณหภูมิสูง แร่อิลเมไนต์หรือไทเทเนียมออกไซด์สแลกถูกบดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 200 เมช นำมาชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูง ที่อุณหภูมิสูง จะได้ไทเทโนซัลเฟต (Titanosulfate , $TiOSO_4$) ดังปฏิกิริยา



เฟอรัสซัลเฟตถูกทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูป $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ โดยการเติมตัวตกตะกอน (Coagulant) เช่น กาว (Glue) หรือเจลาติน (Gelatine) เอาไปกรองออก นำสารละลายไทเทโนซัลเฟตมาทำให้ร้อนและเข้มข้นขึ้น แล้วมาแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) จะได้ไทเทโนไฮเดรต (Titanohydrate) ดังปฏิกิริยา



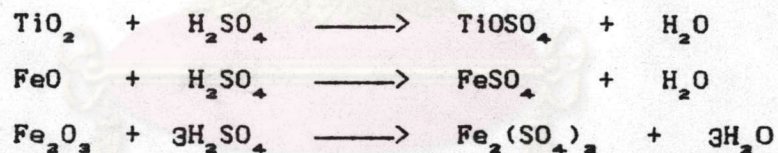
นำไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ไปเผาจะได้ผงไทเทเนียมออกไซด์ แต่ปัจจุบันในทางอุตสาหกรรมการละลายอลูมิเนียมไนต์ด้วยกรดซัลฟิวริกจะกระทำหลังจากมีการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์จากสถานะเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+})

2.8 กระบวนการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ซิลิเกตในอุตสาหกรรม (13)

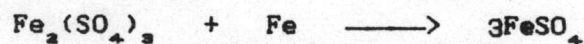
กรรมวิธีการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ซิลิเกตในทางอุตสาหกรรมมีอยู่หลายกรรมวิธีดังนี้

2.8.1 การผลิตสารสีไทเทเนียมออกไซด์

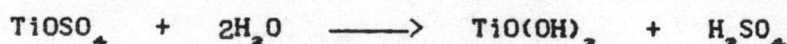
ดังแผนผังรูปที่ 2.19 นำแร่ซิลิเกตที่มี TiO_2 ประมาณ 52 % มาบดและผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ให้ความร้อน TiO_2 และเหล็กจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารละลายซิลเฟต ดังปฏิกิริยา



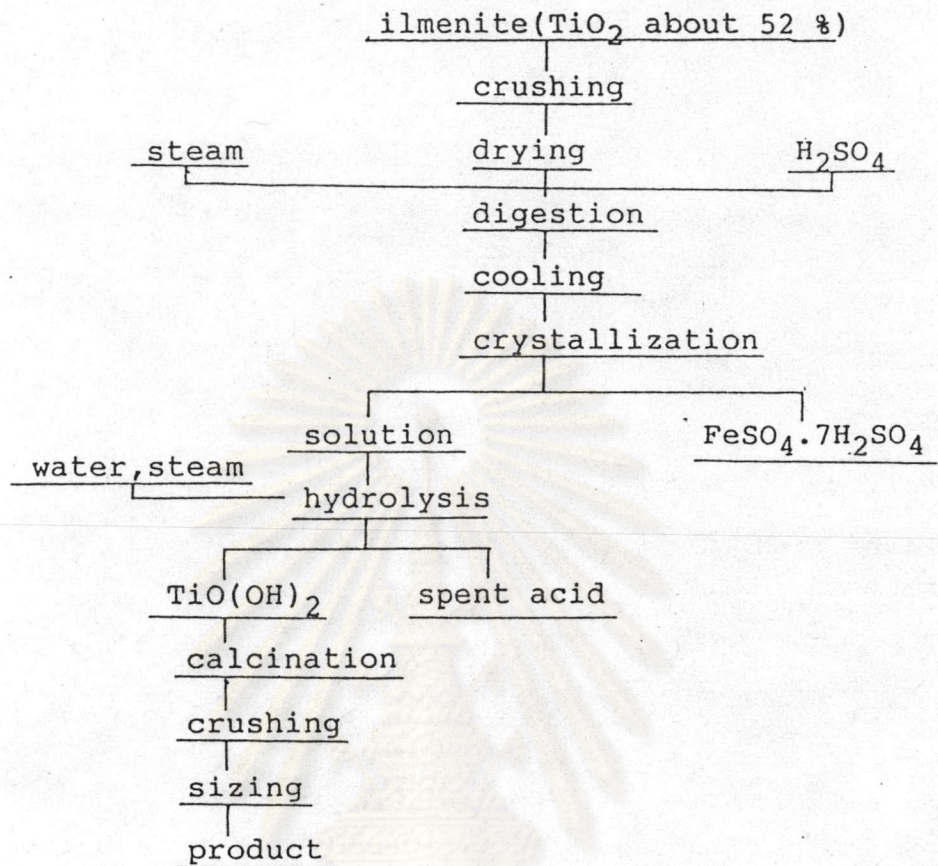
ส่วนที่ไม่ละลายจะถูกกรองออก เติมน้ำและเหล็กในสารละลายเพื่อรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งอยู่ในรูปของเฟอร์รัสซิลเฟต และจะตกผลึกเมื่อสารละลายเย็นตัวลง ดังปฏิกิริยา



หลังจากการกรองให้ของแข็งออกไป เติมน้ำ และให้ความร้อนแก่สารละลายไทเทเนียมจะตกตะกอนเป็นไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยา



ตะกอนถูกล้างเพื่อแยกเหล็กซิลเฟตออกอย่างสมบูรณ์ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ



รูปที่ 2.19 แผนผังการผลิตสารสีไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมไนต์ (13)

800-900 °ซ. จะได้ไทเทเนียมออกไซด์ในรูปอะนาเทส

โดยกรรมวิธีนี้ผลผลิต 1 ตันของ TiO_2 ที่ได้ ต้องใช้อิลเมไนต์ 3 ตัน กรดซัลฟูริก (98 %) 4.5 ตัน ถ่านหินสำหรับเป็นพลังงานความร้อน 3.5 ตัน (ถ่านหินที่มีค่าความร้อน 5,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) น้ำมัน 800 ลิตร และกำลังไฟฟ้า 1,200 กิโลวัตต์-ชั่วโมง การที่ต้องใช้กรดซัลฟูริกเป็นปริมาณมากเป็นปัญหาหนึ่งของกรรมวิธีนี้ และกรดซัลฟูริกที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นตอนสุดท้ายต้องนำมาเก็บไว้เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมหรือเวียนไว้ใช้ต่อไปในแง่ของการค้า กรรมวิธีนี้อาจเรียกว่าเป็นกระบวนการซัลเฟต (Sulphate Route) ประเภทหนึ่ง

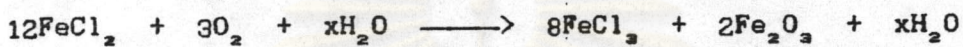
2.8.2 กระบวนการไทรอน (Tiron Process)

แร่อิลเมไนต์จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,050 °ซ. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นการออกซิไดซ์ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนทำ

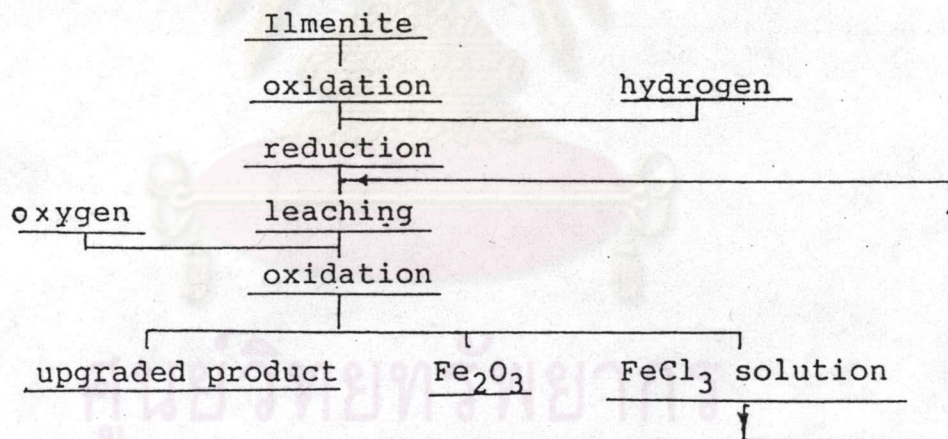
ให้เหล็กออกไซด์เปลี่ยนเฟสเป็นโลหะเหล็ก แล้วนำมาชะละลายตัวอย่างด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride , FeCl₃) ดังปฏิกิริยา



หลังการชะละลายบางส่วนของเฟอร์ริสไอออนถูกทำให้ตกตะกอนโดยการแยกสลายด้วยน้ำที่มีออกซิเจน ดังปฏิกิริยา



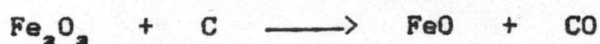
เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้รักษาอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาไว้ได้ การที่เกิด FeCl₃ กลับมาอีกสามารถนำเอากลับไปชะละลายได้ ดังแผนผังรูปที่ 2.20

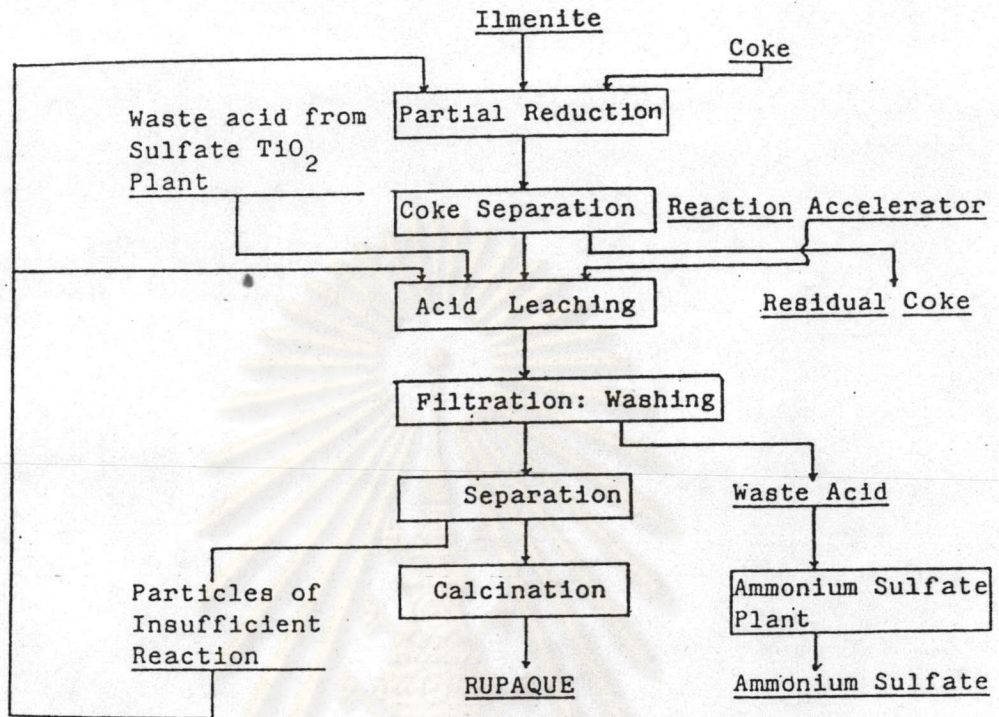


รูปที่ 2.20 แผนผังกระบวนการไทรอน (13)

2.8.3 กระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)

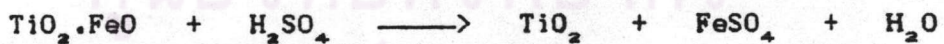
แผนผังกระบวนการดังรูปที่ 2.21 แร่อิลเมไนต์ถูกรีดิวซ์ด้วยถ่านโค้กที่อุณหภูมิ 800-950 °C. ในเตาหมุ่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เฟอร์ริกไอออนจะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริสไอออน ดังปฏิกิริยา





รูปที่ 2.21 แผนผังกระบวนการอิชิวาร่า (13)

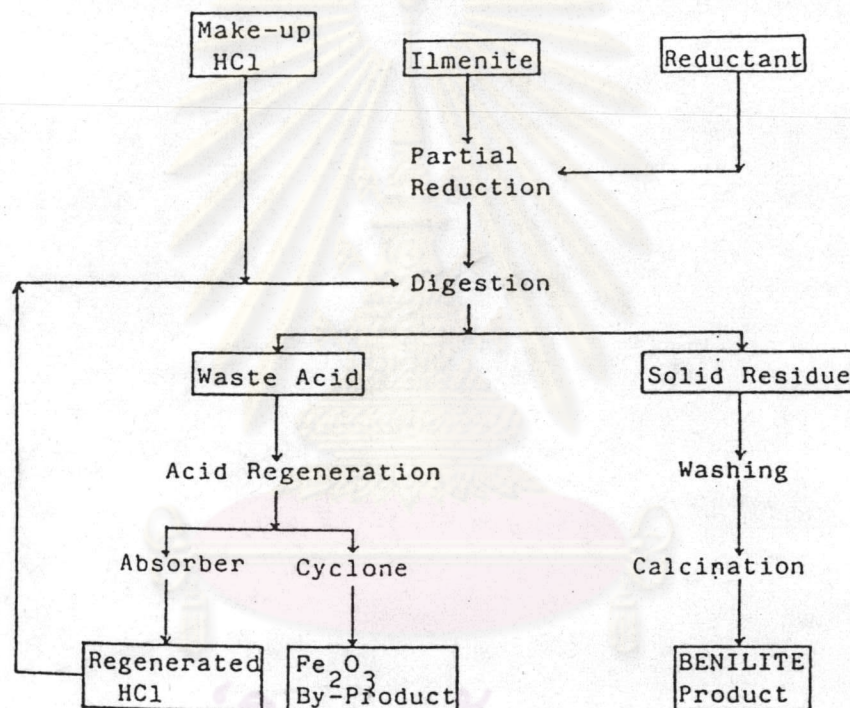
แล้วปล่อยให้เย็นช้า ๆ โดยป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชัน แยกคาร์บอนออกไป นำตัวอย่างมาชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกที่เป็นผลผลิตจากโรงงานผลิตไทเทเนียมออกไซด์ (เช่นจากกระบวนการรูปที่ 2.19) ดังปฏิกิริยา



หลังจากการชะละลายนำส่วนผสมใส่ในถังเกรอะ (Thickener) เพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลาย สารละลายจะถูกนำไปกรอง ของแข็งที่ได้จากการกรองถูกล้างแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °ซ. ส่วนของแข็งจากถังเกรอะนำไปคัดขนาด ขนาดใหญ่จะถูกส่งกลับไปชะละลายซ้ำอีก กรดที่เสียจากการชะละลายถูกนำไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมเพื่อให้เหล็กตกตะกอนเป็นเหล็กออกไซด์ ซึ่งเป็นฝุ่นเหล็กที่สามารถใช้สำหรับทำวัสดุแม่เหล็กได้ และขั้นสุดท้ายจะได้แอมโมเนียมซัลเฟต สำหรับกระบวนการนี้ควรเชื่อมโยงกับโรงงานไทเทเนียมออกไซด์และโรงงานแอมโมเนียมซัลเฟตสำหรับทำปุ๋ย (Fertilizer) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการซัลเฟตประเภทหนึ่ง

2.8.4 กระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)

อิลเมไนต์จะถูกรีดิวซ์ด้วยถ่านหิน (Coal) ในเตาหมุ่เพื่อรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน จากนั้นนำไปชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 18-20 % เหล็กเกือบทั้งหมดจะถูกชะละลายออกไป น้ำของแข็งส่วนที่เหลือไปเผาจะได้ผลผลิต กรดที่ผ่านการชะละลายซึ่งมีเหล็กปนอยู่จะถูกนำไปโรงงานก่อกำเนิดกรดใหม่ และจะได้ Fe_2O_3 เป็นส่วนที่พลอยได้ ดังแผนผังรูปที่ 2.22

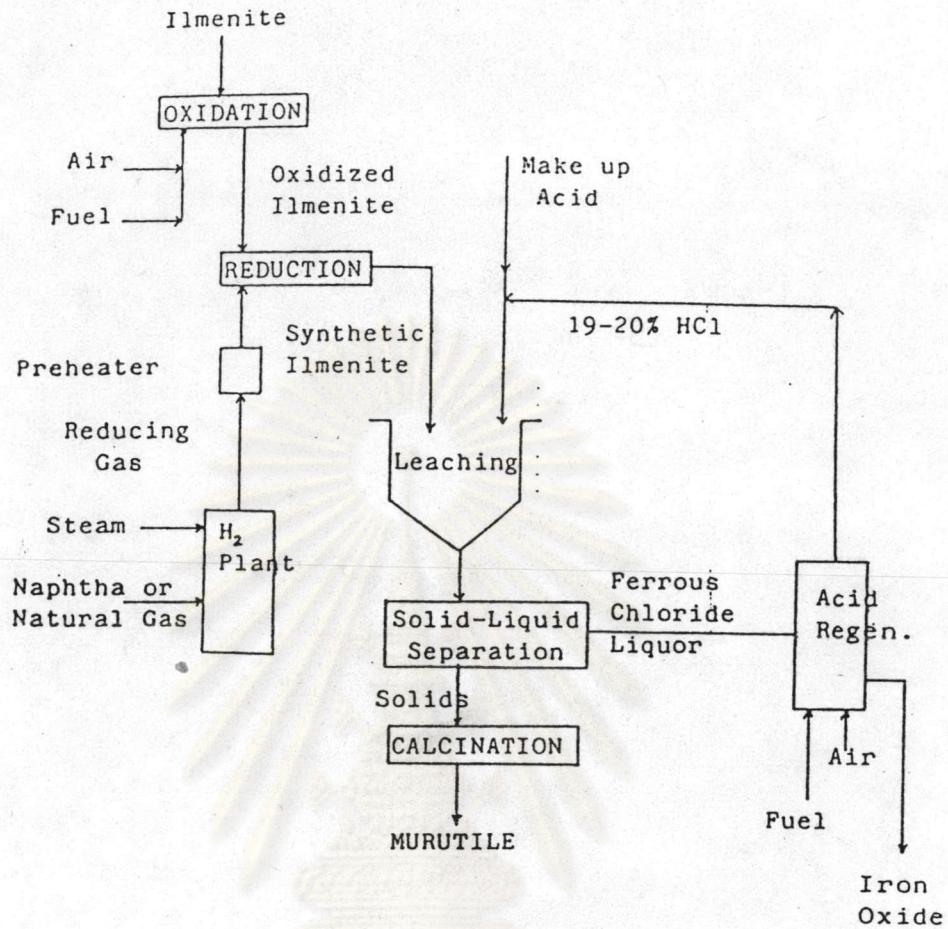


รูปที่ 2.22 แผนผังกระบวนการเบนนิไลต์ (13)

2.8.5 กระบวนการไซโร (CSRIO Process)

ดังแผนผังรูปที่ 2.23 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การออกซิเดชัน มีการเผาแร่อิลเมไนต์ในสภาวะออกซิเดชันด้วยอากาศในชั้นของไหลที่อุณหภูมิ 900 °ซ. เวลา 1 ชั่วโมง
2. การรีดักชัน มีการเผาเม็ดที่ผ่านการออกซิเดชันในชั้นของไหลด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 900 °ซ.

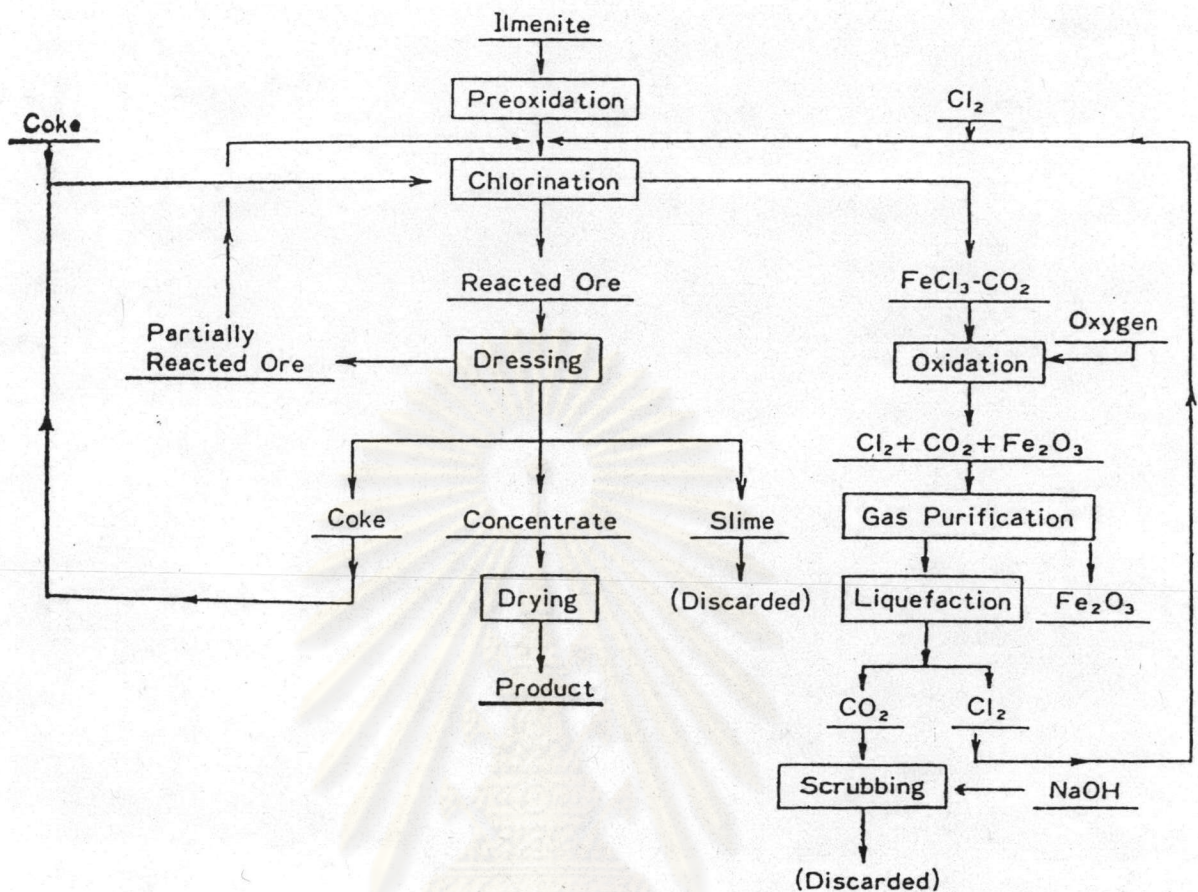


รูปที่ 2.23 แผนผังกระบวนการไซโร (13)

3. การชะละลาย มีการชะละลายตัวอย่างแรกี่ผ่านการรีดักชันด้วย 20 % HCl ที่อุณหภูมิ 105 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง เพื่อชะละลายเหล็ก แมงกานีส แมกนีเซียม และแคลเซียมออก
4. การแยกของแข็งจากของเหลว หลังจากแยกของเหลวออกไป ของแข็งจะผ่านเครื่องแยกแร่แม่เหล็กเพื่อแยกโครเมียมและเหล็กออกไป
5. การก่อกำเนิดกรดไฮโดรคลอริกใหม่ ของเหลวจากขั้นตอนการแยกของแข็ง-ของเหลวที่มีเหล็กคลอไรด์และ HCl ถูกทำให้ร้อนด้วยอากาศ เหล็กจะตกตะกอนเป็นเพอริกไฮดรอกไซด์และ HCl จะเวียนกลับมาใช้ใหม่จากไอที่เกิดขึ้น

2.8.6 กระบวนการมิทซึบิชิ (Mitsubishi Process)

กระบวนการนี้อาจเรียกว่าเป็นกระบวนการคลอไรด์ (Chloride Route) ซึ่งใช้แก๊สคลอรีนที่อุณหภูมิสูงในการแยกเหล็กออกจากแร่อิลเมไนต์ ดังรูปที่ 2.24 กระบวนการ



รูปที่ 2.24 แผนผังกระบวนการผลิตทิตานียม (13)

มี 6 ขั้นตอนสำคัญดังนี้

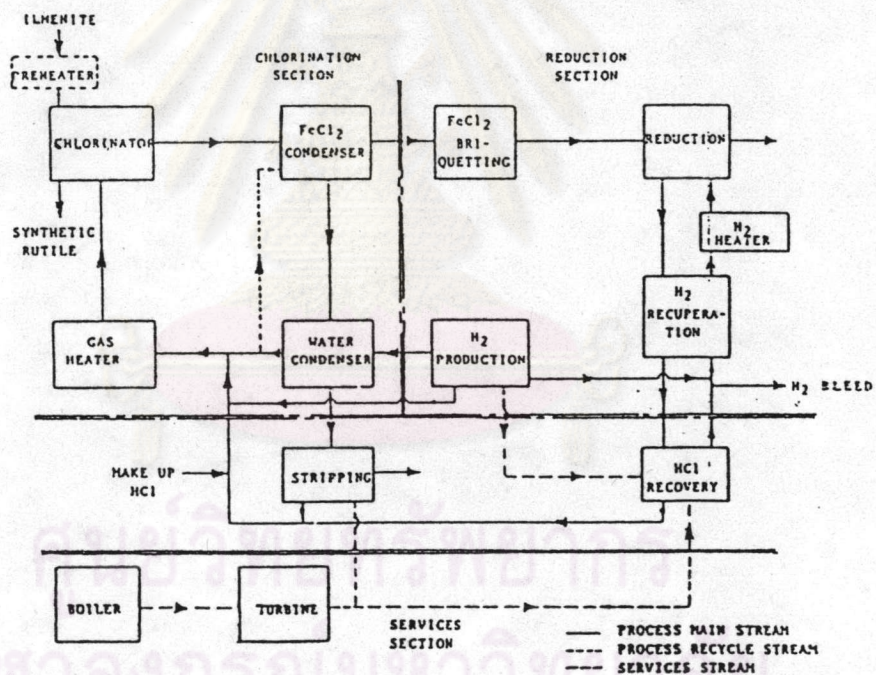
1. การออกซิเดชัน แร่อิลเมนไนต์ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศในเตาหมุนหรือขึ้นของไหลที่อุณหภูมิ 900-950 °ซ. เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง อิลเมนไนต์ (FeTiO_3) จะสลายตัวเป็นซูโดบรูคไทต์ (Fe_2TiO_5) รูไทล์ (TiO_2) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)
2. การคลอรีเนชันแบบเจาะจง (Selective Chlorination) แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกทำปฏิกิริยากับคลอรีนและโคิกที่อุณหภูมิ 940-960 °ซ. ในเครื่องขึ้นของไหล เหล็กจะถูกคลอรีเนชันเป็นสารประกอบคลอไรด์ และจะหยุดการทำปฏิกิริยาเมื่อเหล็กที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาอยู่น้อยกว่า 4 % ทั้งนี้เพื่อป้องกัน TiO_2 ทำปฏิกิริยาคลอรีเนชัน
3. การแยกด้วยแม่เหล็ก ส่วนที่ติดแม่เหล็กเช่น เหล็กจากการคลอรีเนชัน จะถูกแยกออกจากส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กเช่น ไทเทเนียมออกไซด์เกรดสูงและโคิก ด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กมากกว่า 20,000 เกาส์ ส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กจะผ่านขั้นตอนการลอยแร่ ทำให้โคิกและไทเทเนียมออกไซด์แยกออกจากกัน จะได้ผลผลิตที่มี TiO_2 มากกว่า 95 %
4. การสกัดแก๊สที่ออกจากการคลอรีเนชัน แก๊สจากการคลอรีเนชันที่มี

เฟอร์ริกคลอไรด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิ 900 °ซ. เหล็กคลอไรด์จะเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์และแก๊สคลอรีน อนุภาคขนาดเล็กเฉียดของเหล็กออกไซด์จะถูกแยกออกมาโดยใช้ถุงกรอง (Bag Filter)

5. การทำแก๊สจากการกรองให้บริสุทธิ์ หลังจากแยกเหล็กออกไซด์ออกไปแก๊สส่วนใหญ่ประกอบด้วยคลอรีนและ CO₂ แก๊สถูกทำให้แห้งด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น ที่ความดัน 7 บรรยากาศ คลอรีนถูกควบแน่นที่ถังของเหลว (Liquation Tower) มีอุณหภูมิด้านล่าง 10 °ซ. ด้านบน -50 °ซ. แก๊สคลอรีนที่ได้จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ในขั้นตอนคลอรีเนชั่น

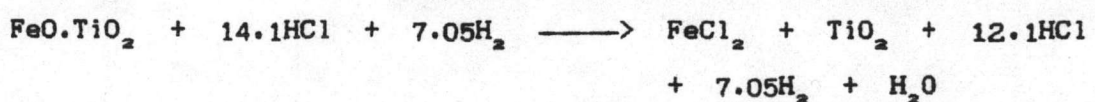
2.8.7 กระบวนการไฮโดรคลอรีเนชั่น (Hydrochlorination Process)

แผนผังกระบวนการดังรูปที่ 2.25 มีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.25 แผนผังกระบวนการไฮโดรคลอรีเนชั่น (13)

1. การไฮโดรคลอรีเนชั่น แร่โอลิเมนไนด์ถูกคลอรีเนชั่นด้วย HCl และแก๊สไฮโดรเจนในอัตราส่วน HCl : H₂ เท่ากับ 2 : 1 ที่อุณหภูมิ 800-900 °ซ. ในขั้นของไหลดังปฏิกิริยา



เหล็กปริมาณมากกว่า 98 % ในอิลเมนิต์จะออกมาอยู่ในรูปของ FeCl_2 ในผลผลิตสารประกอบคลอไรด์มีส่วน Fe^{2+} ต่อ Fe^{3+} มากกว่า 8 : 1 เมื่อใช้ $\text{HCl} : \text{H}_2$ เท่ากับ 2 : 1 หรือ 1 : 1 การเกิด FeCl_2 มากมีผลไม่ดีเพราะเป็นตัวดูดความชื้นได้ง่ายซึ่งยากต่อการอัดเป็นเม็ด (Pelletizing) ในขั้นตอนการรีดักชัน รูไทล์สังเคราะห์ที่ได้มี TiO_2 มากกว่าร้อยละ 95

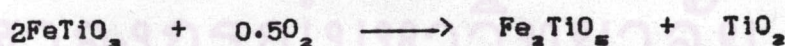
2. การรีดักชัน FeCl_2 ถูกความแน่นและอัดเป็นเม็ดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 650 °ซ. จะได้เป็นไฮโดรเจนคลอไรด์ ส่วน MnCl_2 ที่มีอยู่ร้อยละ 2.5 ในเฟอรัสคลอไรด์จะไม่ถูกรีดิวซ์ที่อุณหภูมินี้ถ้าจะแยก MnCl_2 ออกต้องใช้อุณหภูมิ 700 °ซ.

3. การผลิตกรดไฮโดรคลอริกใหม่ แก๊สจากขั้นตอนคลอริเนชันถูกทำให้เย็นตัวลงเพื่อแยกน้ำออกแล้วนำไปผสมกับไฮโดรเจนคลอไรด์จากขั้นตอนรีดักชัน (แก๊สจากการรีดักชันมีไฮโดรเจนคลอไรด์และไฮโดรเจนที่เหลือ) ทำให้เย็นตัวลง ไฮโดรเจนคลอไรด์จะถูกดูดกลืนโดยการสัมผัสกับกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง จะได้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นซึ่งนำไปผลิตไฮโดรเจนคลอไรด์ใหม่สำหรับขั้นตอนคลอริเนชัน

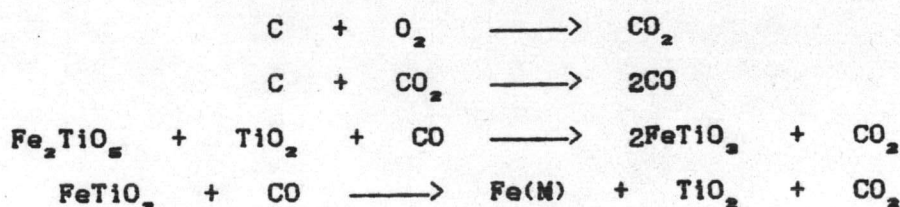
2.8.8 Western Titanium Process

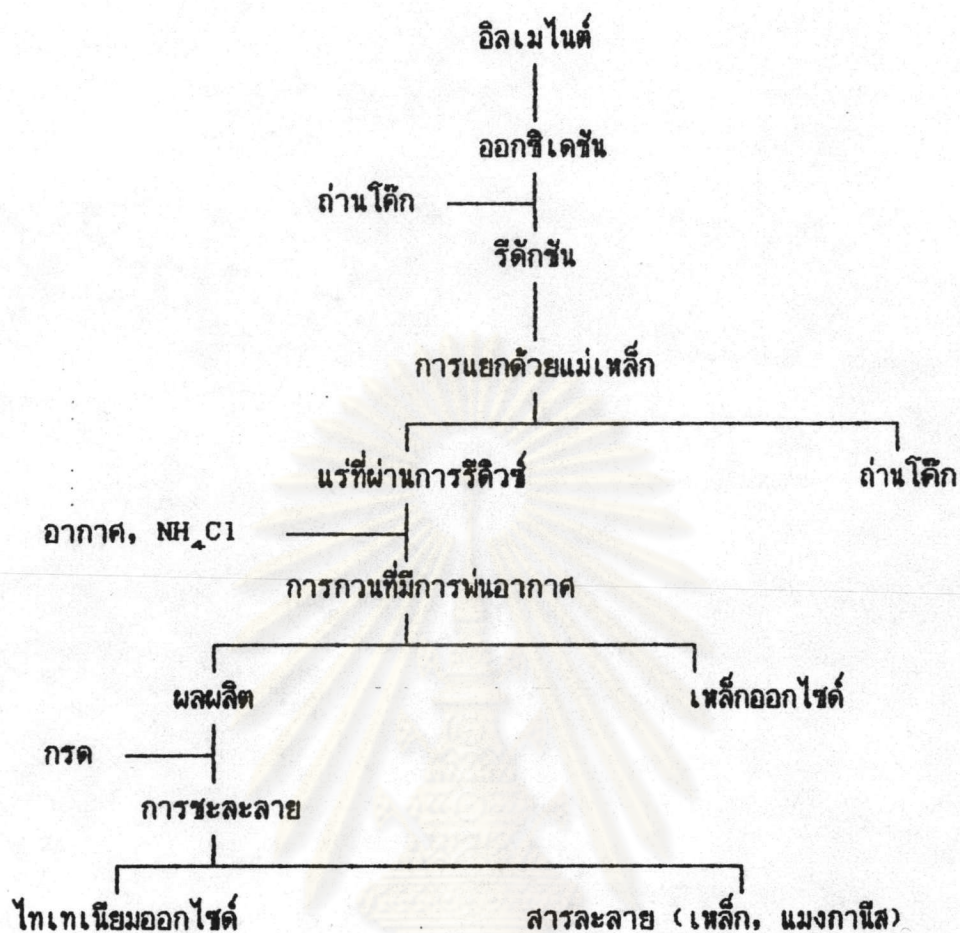
Western Titanium Process มีอยู่ 4 ขั้นตอน ดังแผนผังรูปที่ 2.26 คือ

1. การออกซิเดชัน ในการออกซิเดชันแร่อิลเมนิต์จะถูกเผา (Roast) ในอากาศที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้สภาพของแร่มีสถานะเหมาะสมที่จะทำการรีดักชัน ในขั้นต่อไป อิลเมนิต์จะเปลี่ยนเป็นรูโคบุรคไทด์และรูไทล์ ดังปฏิกิริยา



2. การรีดักชัน แร่อิลเมนิต์ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกเผาอีกครั้งในสภาวะรีดักชัน เพื่อเป็นการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์ให้อยู่ในรูปของโลหะเหล็ก (Metallic Iron) โดยใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งได้จากถ่านโค้กที่ปนเข้าไป ดังปฏิกิริยา

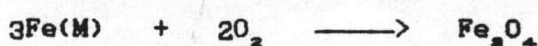




รูปที่ 2.26 Western Titanium Process

ทั้งตัวอย่างให้เขียนตัวลง โดยป้องกันการออกซิเดชันกลับ จากนั้นนำผลผลิตที่ได้ไปผ่านแท่งแม่เหล็กเพื่อแยกแร่ออกจากโค้ก

3. การกวนที่มีการพ่นอากาศ นำแร่ที่ผ่านการรีดักชันมากวนในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ และพ่นอากาศเข้าไป ออกซิเจนจากอากาศจะออกซิไดส์โลหะเหล็กที่ได้จากการรีดักชันเป็นเหล็กออกไซด์แยกตัวออกจากไทเทเนียมออกไซด์ในลักษณะผงละเอียด ดังปฏิกิริยา




นำผลผลิตที่ได้มาล้างเอาผงเหล็กออกไซด์ออก

4. การชะละลายด้วยกรด นำตัวอย่างที่ผ่านการกวนที่มีการพ่นอากาศไปชะละลายด้วยกรด เพื่อชะละลายเหล็กที่เหลืออยู่ และมลทินอื่น ๆ เช่น แมงกานีส จะทำให้ได้ไทเทเนียมออกไซด์ที่ไม่ละลายเหลืออยู่

2.9 กระบวนการที่ใช้ในการวิจัย

Western Titanium Process เป็นกระบวนการที่น่าจะเหมาะสมสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแร่ทิตานีอัมไนต์ของประเทศไทย ทั้งนี้เนื่องจากได้พิจารณาแล้วเห็นว่าเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยากจนเกินไป และได้นำไปใช้ประสบผลสำเร็จในประเทศออสเตรเลียมาแล้ว ดังนั้นในการวิจัยนี้จะดำเนินการวิจัยตาม Western Titanium Process โดยนำแร่ทิตานีอัมไนต์จากทางภาคใต้ของประเทศไทยมาทดลองเปลี่ยนให้เป็นไทเทเนียมออกไซด์คุณภาพสูง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย