

เครื่องแยกแร่แม่เหล็ก

ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ
ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กที่ใช้ในการแยกหัวแร่และ แยกแร่ให้สะอาด แบบเปียก (Wet Magnetic Separator)

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบแห้งที่กล่าวมาตอนก่อนหน้านั้น นิยมใช้ในการแยกแร่ติดแม่เหล็กมากกว่า 80 ปีที่แล้วมา อย่างไรก็ตามการแยกแร่ติดแม่เหล็กแบบแห้งจะได้ผลดีก็ต่อเมื่อขนาดของเม็ดแร่ที่ทำการแยกมีขนาดโตกว่า 200 เมช (หรือ 74 ไมครอน) เนื่องจากประสิทธิภาพของการแยกแร่ติดแม่เหล็กแบบแห้งจะลดลงซึ่งเป็นผลการแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนเม็ดแร่ เช่น แรงต้านทานอากาศต่อเม็ดแร่เล็กๆ นั้น แรงระหว่างเม็ดแร่ด้วยกันเอง และแรงอื่นๆ ดังนั้น ถ้าหากต้องการแยกแร่ติดแม่เหล็กซึ่งมีขนาดเล็กแล้วก็สมควรแยกแบบเปียก ในแง่ของเศรษฐศาสตร์แล้ว การแยกแร่แบบเปียกจะดีกว่าในแง่ที่ว่าแร่ต่างๆ ที่เกิดตามธรรมชาติ หรือแร่ที่ผ่านขบวนการแยกแร่ด้วยวิธีอื่นมาก่อนแล้วมักจะเปียก ดังนั้นหากสามารถแยกแร่ในภาพเปียกได้ก็จะเป็นการประหยัด เพราะไม่ต้องทำการย่างแร่ให้แห้งก่อนการแยก

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกสามารถแบ่งออกได้ 3 พวก คือ พวกความเข้มต่ำ พวกความเข้มปานกลาง และพวกความเข้มสูง

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มต่ำ (Wet Low Intensity Magnetic Separator เขียนย่อว่า **WLIMS**) นิยมใช้กันมากในการแยกเอาแม่เหล็กติดแม่เหล็ก (Magnetic Media) เช่นเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ที่

ใช้ในขบวนการแยกแร่ด้วยแม่เหล็กหนัก (Heavy Media Separation) และใช้ในการแยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างแรง โดยที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิดคือ

1) ชนิดครอกเก็ต (Crockett Separator)^(8,10)

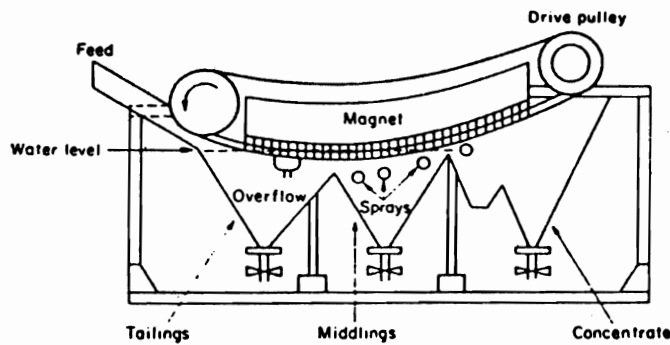
เป็นเครื่องแยกแร่แม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำซึ่งออกแบบมาในยุคต้นๆ (รูปที่ 12) เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบนี้มีหัวแม่เหล็กถาวรวางสลับขั้วกันมีสายพานหมุนอยู่ใต้หัวแม่เหล็ก และสายพานส่วนล่างจมอยู่ในระดับน้ำ เมื่อสายพานเคลื่อนที่ แร่จะถูกพาไปได้หัวแม่เหล็ก แร่ติดแม่เหล็กจะถูกดูดติดสายพานไปจนพ้นสนามแม่เหล็กแล้วจึงปล่อยลงในช่องรองรับแร่ติดแม่เหล็ก (ซึ่งอาจจะใช้น้ำฉีดล้างช่วย ส่วนแร่ไม่ติดแม่เหล็กจะแยกตัวออกมาในตอนแรก และตกลงไปในช่องรองรับแร่ไม่ติดแม่เหล็กอีกต่างหาก การที่มีแม่เหล็กถาวรสลับขั้วกัน ทำให้แร่แม่เหล็กติดแม่เหล็กที่ติดมาในส่วนที่ติดแม่เหล็ก มีโอกาสแยกหลุดออกมาในขณะที่มันเคลื่อนที่ไปตามสายพาน เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบนี้นิยมใช้แยกแร่ละเอียด และแร่ติดแม่เหล็กได้ดีในน้ำ เช่น แร่แมกนีไทต์ (Magnetite) แร่อิลเมนิต์ (Ilmenite) และใช้ทำความสะอาด เฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ที่ใช้เป็นแม่เหล็ก (Media) ในเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กหนัก (Heavy Media Separator) ปกติแร่ที่นำมาแยกไม่ควรให้เกาะติดกันเป็นก้อน การแยกแร่ติดแม่เหล็กในน้ำนั้น แรงดึงดูดแม่เหล็กที่กระทำกับแร่จะต้องแรงพอที่จะเอาชนะแรงต้านของน้ำด้วย

2) ชนิดกระบอกกลม (Drum Magnetic Separator) ใช้เป็นเครื่องแยกแร่แม่เหล็กและนิยมใช้ในการทำ

ความสะอาดมีขมิ้มเพื่อโรซิริลิกอน จากตัวกลางในเครื่องแยกแร่ด้วยขมิ้มหนักเช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้แยกแร่เหล็กขนาดละเอียด ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องแยกแร่ชนิดนี้สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิงหลายฉบับ (20,21,22,23,24,25) รูปร่างลักษณะของเครื่องมือดังกล่าวคร่าว ๆ มีดังนี้ เครื่องแยกประกอบด้วยกระบอกกลวงทำจากวัสดุไม่ติดแม่เหล็ก ภายในบรรจุแท่งแม่เหล็กอยู่กึ่งที่ 3-6 แท่ง วางสลับขั้วโดยสมมาตรในแนวกลาง (Centre Line) ของแมคเนติกโยค (Magnetic Yoke) ดังแสดงในแบบต่าง ๆ ตามรูปที่ 13 จุดประสงค์ของการสลับขั้วก็เพื่อป้องกันมิให้แร่ติดแม่เหล็กอุ้มเอาแร่ไม่ติดแม่เหล็กขึ้นมาด้วย มิใช่ทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวรแบบแม่เหล็กไฟฟ้าใช้เมื่อต้องการความเข้มข้นแม่เหล็กสูง และสามารถควบคุมความเข้มได้ แต่ในปัจจุบันมักนิยมใช้แม่เหล็กถาวรซึ่งเป็นพวกแม่เหล็กที่ทำมาจากเซรามิกส์ผสม (Ceramic Magnetic Alloy) เช่น อัลนิโค (Alnico) และเฟอร์ไรต์ซึ่งทำมาจากเซรามิกส์ประเภท แบเรียม-สตรอนเทียม (Ceramic Barium-Strontium Ferrite) ซึ่งจะรักษา

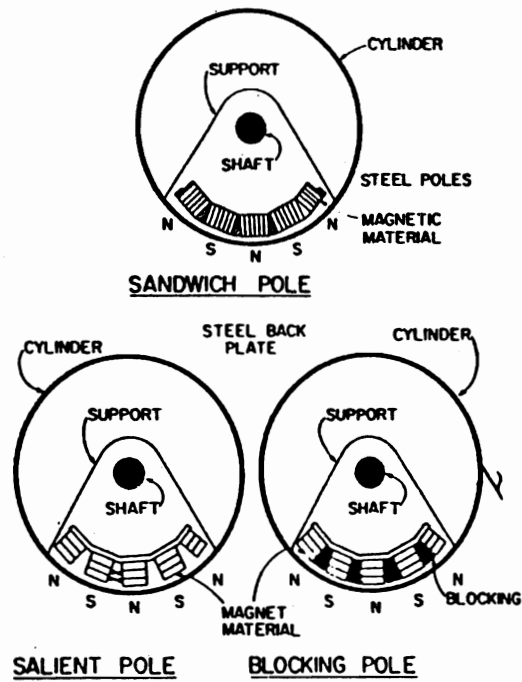
อำนาจแม่เหล็กไว้ได้เป็นเวลานานมาก เครื่องแยกแร่แม่เหล็กชนิดนี้ใช้หลักการดูดติด (Pick Up or Lifting) กล่าวคือจะมีการป้อนแร่เข้าไปในรูปของผสมกับน้ำ เพื่อให้แร่ไหลไปในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอย (Suspension) แร่ติดแม่เหล็กจะถูกดูดขึ้นมาติดกับกระบอกกลม และกลิ้งไปตามแม่เหล็กซึ่งวางสลับขั้วกันอยู่ และจะหมุนเอาแร่ออกไปจากสนามแม่เหล็ก ทำให้แยกแร่ติดแม่เหล็กออกจากแร่ไม่ติดแม่เหล็กได้ น้ำที่บรรจุอยู่ในเครื่องจะช่วยกระจายส่วนผสมได้ดี ความเข้มข้นแม่เหล็กที่ผิวขั้วแม่เหล็กอาจสูงถึง 7,000 เอสเต็ด (Oersted)★

เครื่องแยกแร่ชนิดนี้มีการออกแบบแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับแร่ป้อน เช่น ปริมาณแร่ในของผสมที่ป้อนขนาดแร่ป้อน ปริมาณของแร่ติดแม่เหล็ก อัตราแร่ป้อน ซึ่งมีการออกแบบรูปร่างของถังขนาดกระบอกกลม โครงร่างของขั้วแม่เหล็กต่าง ๆ แล้วแต่การนำไปใช้งาน เครื่องแยกจะมีอุปกรณ์ติดตั้งมาก แต่ค่าใช้จ่ายในการทำงาน และค่าบำรุงรักษาต่ำ แบ่งออกเป็น 3 แบบย่อย ดังนี้



รูปที่ 12 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มต่ำ ชนิดครอกเก็ต (8)

* เอสเต็ด เป็นหน่วยความเข้มข้นแม่เหล็กภายนอกขั้วแม่เหล็ก ส่วนเกาส์เป็นหน่วยความเข้มข้นแม่เหล็กภายในขั้วแม่เหล็ก ดังนั้น 1 เอสเต็ด = 1 เกาส์ แต่ใช้ในความหมายต่างกันดังกล่าว



รูปที่ 13 การวางแท่งแม่เหล็กถาวรแบบต่างๆ ในกระบอกกลม (9)

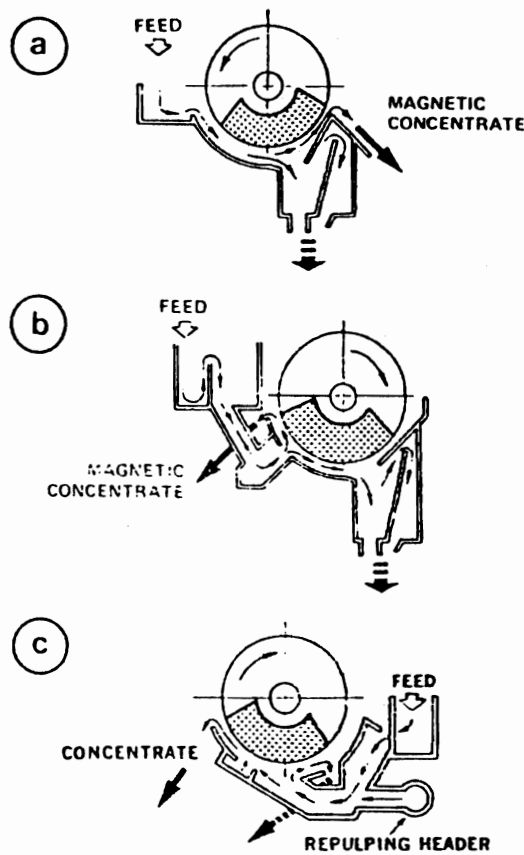
I) แบบ **Concurrent** เครื่องแยกแบบนี้มีกระบอกกลมซึ่งทำหน้าที่แยกแร่หมุนไปตามทิศทางการไหลของแร่ป้อน (ดูรูปที่ 14 (a)) แร่ติดแม่เหล็กถูกนำไปโดยกระบอกกลมผ่านช่องด้านล่างซึ่งจะถูกอัดและล้างด้วยน้ำก่อนออกไปจากเครื่อง ส่วนแร่ไม่ติดแม่เหล็กจะจมอยู่ส่วนล่าง โดยทั่วไปในระบบการแยกหนึ่งหน่วยมีการใช้กระบอกกลม 2 หรือ 3 กระบอกติดกัน อัตราการป้อนประมาณ 75 ถึง 125 แกลลอนต่อนาทีต่อฟุตความกว้างแม่เหล็กเหมาะสำหรับแยกแร่ชั้นต้น เช่น แร่ติดแม่เหล็กขนาดหยาบ (เรียกว่า **Magnetic Cobbing**) โดยแร่ป้อนมีขนาดเล็กกว่า 1/4 นิ้ว ใช้ในการแยกหินแทคโคไนต์ (Taconite) ที่ถูกบดด้วยเครื่องบดลวดมิล (Rod Mill) และใช้ในการแยกเฟอร์โรซิลิคอน (Ferrosilicon) ซึ่งเป็นมัชฌิม (Media) ในการแยกแร่ด้วยมัชฌิมหนัก (Heavy Medium Separation) ส่วนทางแร่จะนำไปแยกด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบ **Counter-Rotation**

II) แบบ **Counter-Rotation** (รูปที่ 14(b)) เครื่องแยกแม่เหล็กแบบนี้จะป้อนของผสมที่มีปริมาณของแข็งสูง (% Solids สูง) ไปในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของกระบอกกลมปล่อยออกไปทางช่องหัวแร่ โดยทั่วไปเครื่องแยกหนึ่งหน่วยใช้กระบอกกลม 2 กระบอก อัตราการป้อนประมาณ 75 ถึง 100 แกลลอนต่อนาทีต่อฟุตความกว้างแม่เหล็ก ขนาดแร่ป้อนที่เหมาะสมในการแยก คือเล็กกว่า 10 เมช (Mesh) เหมาะสำหรับแยกแร่ในขั้นหยาบ (**Roughing Operation**) ซึ่งจะสูญเสียแร่เล็กน้อยแต่หัวแร่ไม่ค่อยสะอาด เครื่องจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราป้อน (Surge) ได้ดี ใช้แยกทางแร่ที่มาจากเครื่องแยกแบบ **Concurrent** และสามารถแยกมัชฌิมหนัก เพื่อต้องการเก็บแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) หรือ เฟอร์โรซิลิคอน (Ferrosilicon) ให้มาก และนิยมใช้แยกหินแทคโคไนต์ (Taconite) ที่ถูกบดด้วยเครื่องบดลวดมิล (Rod Mill)

III) แบบ **Counter Current** (รูปที่ 14 (C)) เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบนี้จะมีการป้อนแร่ไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของกระบอกกลม แร่ติดแม่เหล็กจะติดติดกับกระบอกกลม และถูกฉีดล้างด้วยน้ำก่อนที่จะออกไปจากเครื่อง เพื่อให้ได้หัวแร่ที่สะอาด ทางแร่จะเคลื่อนไปในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของกระบอกกลมแล้วลงไปในห้องหางแร่ อัตราการป้อนประมาณ 40 ถึง 60 แกลลอนต่อฟุตความกว้างแม่เหล็ก ในเครื่องแยกหนึ่งหน่วยอาจมีกระบอกกลม 2 หรือ 3 กระบอก เหมาะสำหรับการแยก

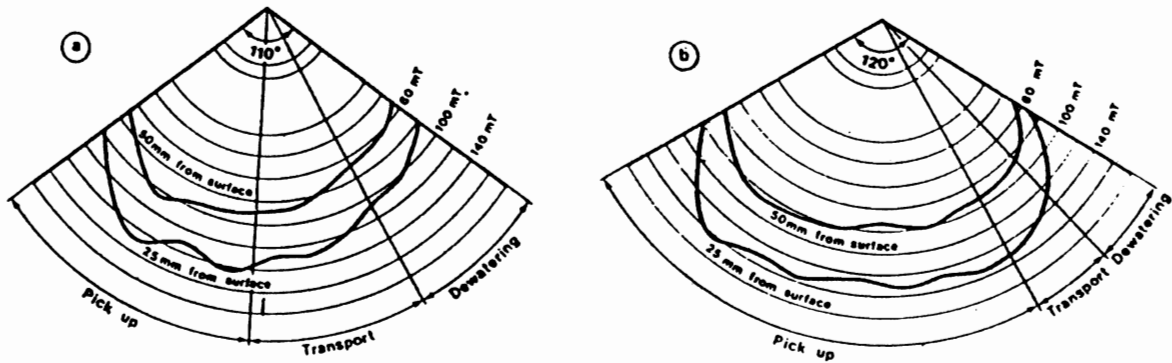
แร่ในขั้นสุดท้าย (Finishing Operation) โดยใช้แยกแร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 65 เมช เพื่อให้เก็บแร่ได้ดี และได้หัวแร่ที่สะอาด

โดยปกติแล้วรายละเอียดของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นต่ำ ชนิดกระบอกกลมไม่ว่าจะเป็นแบบไหน มักจะบ่งบอกค่ากำลังสนามแม่เหล็ก และความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ระยะ 5 เซนติเมตรจากผิวของกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 15 (21,22,26,27)



รูปที่ 14 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นต่ำ ชนิดกระบอกกลม⁽¹⁴⁾

- (a) แบบ Concurrent
- (b) แบบ Counter-Rotation
- (c) แบบ Counter-Current



รูปที่ 15 กำลังสนามแม่เหล็กของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียก ความเข้มต่ำชนิดกระบอกกลม⁽¹⁴⁾
 (a) แบบ Concurrent และ Counter-Current
 (b) แบบ Counter-Rotation

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสนามแม่เหล็กปานกลาง (Wet Moderate Intensity Magnetic Separator เขียนย่อว่า WMIMS) ซึ่งได้แก่ เครื่องกรองแม่เหล็ก (Magnetic Filter)⁽⁶⁾ โดยมีขั้วแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำจากไฟฟ้า หรือเป็นแม่เหล็กถาวร แร่ที่ต้องการแยกจะถูกส่งผ่านเข้าไปในแผ่นกรอง แร่ซึ่งติดแม่เหล็กจะถูกดูดติดไว้ แผ่นกรองจะถูกนำออกมาล้างเพื่อขจัดแร่ติดแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอ ความจุ (Capacity) ของเครื่องจึงต่ำ แผ่นกรองอาจจะเรียงกันหลายอัน เพื่อให้มีอัตราป้อนแร่สูงขึ้น เครื่องกรองแม่เหล็กขนาดใหญ่สามารถรับได้ 2,000 แกลลอนต่อฟุตที่ความหนืดของเหลวต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้แยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างแรงเม็ดละเอียดออกจากของเหลว หรือพวกสารแขวนลอย (Suspension)

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator เขียนย่อว่า WHIMS) เนื่องจากปัญหาในการแยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อน เม็ดละเอียดโดยเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน เมื่อใช้เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบแห้ง โดยในบางครั้งอาจต้องบดแร่ให้ละเอียด เพื่อให้เม็ดแร่หลุดออกจากกันเป็นอิสระ ซึ่งในการบดแบบแห้งอาจมีการสูญเสียแร่ที่เป็นฝุ่น จึงควรเปลี่ยนมาบดแบบเปียก หรือในบางแผนผังการแยกแร่ วิธีการทำให้แร่แห้งอาจเสียค่าใช้จ่ายมาก จึงมีการพัฒนาเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบแห้งมาเป็นแบบเปียก

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียก ความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ส่วนใหญ่ใช้ในการแยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อน (Paramagnetic Mineral) ออกจากแร่ไม่ติดแม่เหล็กในรูปของเหลวหรือสารแขวนลอย เครื่องแยกนี้ในแบบแรกที่มีการพัฒนานั้นมีรูปร่างคล้ายเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ชนิดลูกกลิ้งเหนี่ยวนำ (Induced Roll Magnetic Separator) โดยทำการดัดแปลงให้สามารถรับแร่ป้อนในสภาพเปียกได้ โดยมีผู้รายงานไว้ในสหภาพโซเวียต ได้มีการพัฒนาเครื่องแยกแร่แบบลูกกลิ้งเหนี่ยวนำ เพื่อทำการแยกเอาแร่เหล็ก^(28,29) ส่วนเครื่องแยกในรุ่นหลังๆ นี้ได้พัฒนาให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำสูงถึง 20,000 เกาส์ ซึ่งเป็นค่าความเข้มแม่เหล็กอิ่มตัวของเหล็กอ่อนที่ใช้ทำเป็นเมทริกซ์ (Matrix) ในเครื่องแยก โดยใช้เมทริกซ์ที่มีรูปร่างต่างๆ กัน เช่น เป็นลูกกลม แห้ง แผ่นที่เป็นร่อง (Grooved Plate) และแผ่นเหล็กรูปตาราง (Expanded Steel) และเป็นฝอย (Fibre) ในที่นี้จะได้อธิบายถึงเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ที่ได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้จากอดีตจนถึงปัจจุบัน

1) ชนิดกิลล์ (Gill Separator) ^(8,30,31) เครื่องมือนี้สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1964 เป็นแบบที่ได้พัฒนามาจากเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแรงสูงแบบลูกกลิ้งเหนี่ยวนำ (ดูรูปที่ 16) ประกอบด้วยถังหมุน (Rotor) ที่มีร่อง (Laminated

Groove) เรียงกันโดยรอบ และหมุนรอบแกนตั้ง แร่บ่อนผสมน้ำ (Slurry) จะถูกบ่อนไปตามร่องซึ่งอยู่ระหว่างซี่แม่เหล็กไฟฟ้า แร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กจะผ่านออกไปยังถังเก็บแร่ไม่ติดแม่เหล็ก ส่วนแร่ติดแม่เหล็กจะค้างอยู่บนร่องเหล่านั้น และถูกพาออกไปจากสนามแม่เหล็กและหล่นเข้าไปอยู่ในถังเก็บแร่ติดแม่เหล็ก การออกแบบเครื่องแยกในลักษณะนี้ ทำให้มีแร่ไม่ติดแม่เหล็กเข้าไปในส่วนแร่ติดแม่เหล็กได้น้อยที่สุด ถึงแม้ว่าเครื่องแยกแร่นี้ ไม่อาจจัดว่าเป็นเครื่องที่มีความเข้มข้นไฟฟ้าสูงมากนัก ซึ่งมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำต่ำกว่า 14,000 เกาส์ จึงใช้แยกแร่ที่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อนที่ติดแม่เหล็กได้ง่าย เช่น ใช้แยกแร่อีลเมนไนต์ (Ilmenite) จากเหมืองชายหาดเช่นในประเทศออสเตรเลียและมาเลเซีย แต่ไม่เหมาะที่จะแยกเอาแร่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อนที่ติดแม่เหล็กได้ยาก เช่น แร่ฮีมาไทต์ (Haematite) สำหรับเครื่องที่มีซี่แม่เหล็ก 10 ซี่ มีความจุ 0.8 ตันต่อชั่วโมงต่อซี่แม่เหล็ก

2) ชนิดถังกาโรเซล (Carousel Separator)^(32,33,34,35,36) เป็นเครื่องแยกแร่ซึ่งมาจากความคิดของ G.H.Jones ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาจากชนิดกิลล์ (Gill Separator) ซึ่งในชนิดกิลล์นั้น แร่ติดแม่เหล็กจะถูกดูดให้ติดกับผิวของตัวหมุน (Rotor) ซึ่งทำให้พื้นที่ในการเก็บแร่น้อย เครื่องแยกแร่ของโจนส์จึงออกแบบแผ่นที่เป็นร่อง (Grooved Plate) มาทำเป็นเมทริกซ์ (Matrix) โดยนำมาซ้อนกันเองเป็นชุดๆ แทน (ดูรูปที่ 17 และ 22 (b)) ทำให้มี

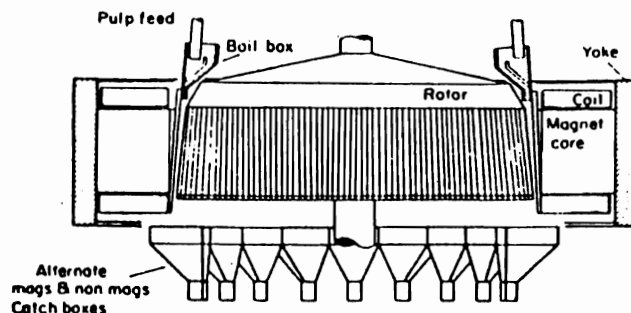
พื้นที่ในการเก็บแร่เพิ่มขึ้นหลายเท่าและความเข้มข้นแม่เหล็กก็สูงกว่าแบบกิลล์ เครื่องแยกแร่ของโจนส์ซึ่งทำงานเป็นจังหวะ 3 ขั้นตอน (Three-Stage Cyclic Jones Separator) ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 18 ซึ่งการทำงานทั้ง 3 ขั้นตอน มีดังนี้

ขั้นตอนแรก แร่บ่อน้ำจะถูกบ่อนเข้าไปยังเครื่องในขณะที่เครื่องทำงานอยู่โดยมีความเข้มข้นแม่เหล็ก แร่ติดแม่เหล็กจะดูดติดกับ เมทริกซ์รูปร่างเป็นแบบแผ่นที่เป็นร่อง ในขณะที่แร่ไม่ติดแม่เหล็กจะผ่านออกไปยังถังเก็บ

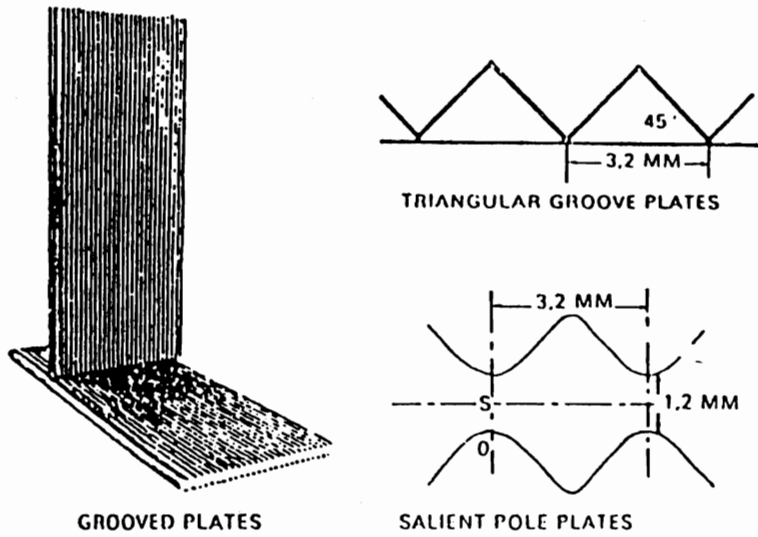
ขั้นตอนที่สอง จะหยุดบ่อนแร่โดยที่เครื่องยังคงมีสนามแม่เหล็กอยู่ และจะใช้ น้ำที่มีความดันประมาณ 30-60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ล้างเอาแร่ซึ่งไม่ติดแม่เหล็กซึ่งอาจถูกแร่ติดแม่เหล็กอุ้มอยู่ออกไป

ขั้นตอนที่สาม จะปิดเครื่องไม่ให้มีสนามแม่เหล็กอยู่เลย แล้วใช้น้ำล้างเอาแร่ที่ติดแม่เหล็กซึ่งติดอยู่บนแผ่นที่เป็นร่องออกไป

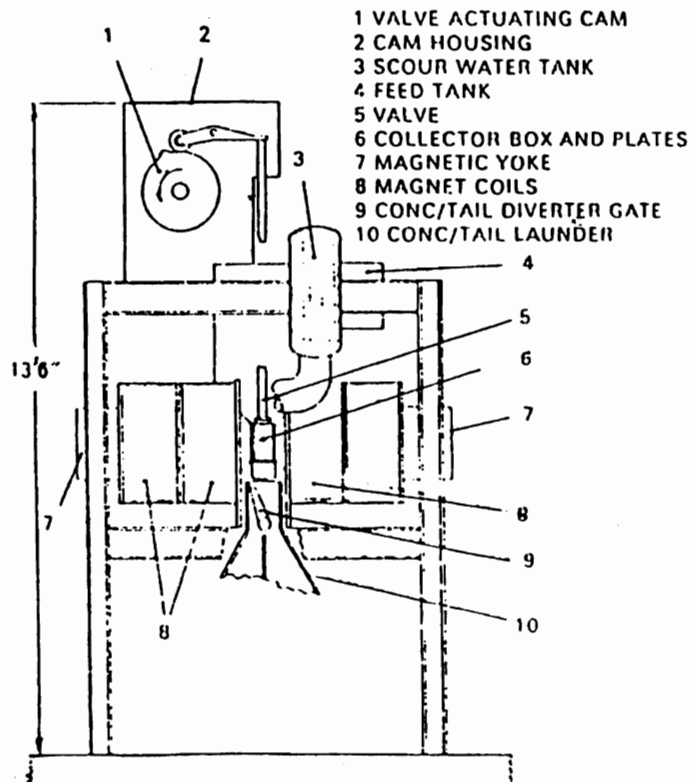
ขั้นตอนทั้ง 3 จะใช้เวลาในการทำงาน 6-15 วินาที และได้มีทดลองใช้เครื่องแยกแบบนี้หลายปีมาแล้ว⁽³⁷⁾ อย่างไรก็ตามการทำงานเป็นจังหวะ 3 ขั้นตอนดังกล่าวทำให้ต้องปิดและเปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ และข้อยุ่งยากทางกลของเครื่องมือนี้ทำให้มันไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกแร่จำนวนมากๆ ในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งในทางอุตสาหกรรมเครื่องแยกควรจะทำงานได้ต่อเนื่องแทนที่จะเป็นจังหวะดังกล่าว



รูปที่ 16 เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเบี่ยงความเข้มข้นสูง ชนิดกิลล์^(๑)



รูปที่ 17 เมทริกซ์ซึ่งมีรูปร่างแบบแผ่นที่เป็นร่อง ในเครื่องแยกแร่ของโจนส์⁽²⁸⁾



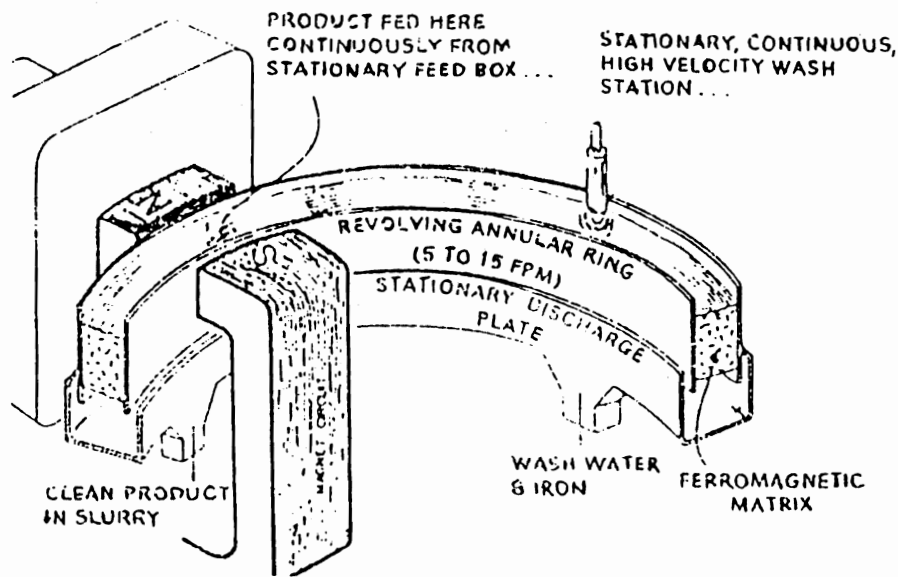
รูปที่ 18 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูงของโจนส์ ซึ่งทำงานเป็นจังหวะ 3 ขั้นตอน⁽²⁸⁾

ได้มีการพยายามที่จะสร้างเครื่องมือชนิดโจนส์ให้ทำงานแบบต่อเนื่อง เช่น ได้มีการสร้างเครื่องแยกฟอเรีย (Forrer Separator) ขึ้นมา แต่ก็ไม่ประสบผลสำเร็จในเชิงพาณิชย์^(19,38,39) รูปที่ 19 ได้แสดงให้เห็นรูปร่างสำคัญของเครื่องแยกแรงแบบเปียกความเข้มข้นแม่เหล็กสูง ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาในตอนหลัง⁽²⁸⁾ โดยการใส่เมทริกซ์ (Matrix) เข้าไปไว้ช่องวงแหวน (Annular Box) ที่อยู่บนขอบนอกของตัวหมุน (Rotor) เรียกว่า ถังคารูเซล (Carousel) ซึ่งจะติดอยู่กับแกนหมุน (Roller Shaft) เมทริกซ์อาจทำมาจากลูกเหล็กกลม (Steel Ball or Steel Sphere) แผ่นที่เป็นร่อง (Grooved Plate) แผ่นเหล็กรูปตาราง (Expanded Steel) ฝอยเหล็ก (Steel Wool or Steel Fibre) แร่ป้อนผสมน้ำจะป้อนเข้ามาในช่องวงแหวนซึ่งหมุนไปตามถังคารูเซลภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มข้นสูง ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดความเข้มข้นแม่เหล็กขึ้นบนเมทริกซ์ (Matrix) แร่ไม่ติดแม่เหล็กก็จะไหลผ่านออกไปช่องทางหนึ่ง ส่วนแร่ติดแม่เหล็กก็จะดึงดูดติดกับเมทริกซ์ และจะหมุนตามถังคารูเซลออกไปนอกสนามแม่เหล็กซึ่งจะถูกล้างด้วยน้ำให้ไหลไปยังอีกช่องทางหนึ่ง เครื่องแยกแรงแบบนี้บางครั้งอาจเรียกว่าเครื่องแยกแรงแถ้งคารูเซล (Carousel Separator) ซึ่งมีการออกแบบออกไปหลาย ๆ ลักษณะ ดังนี้

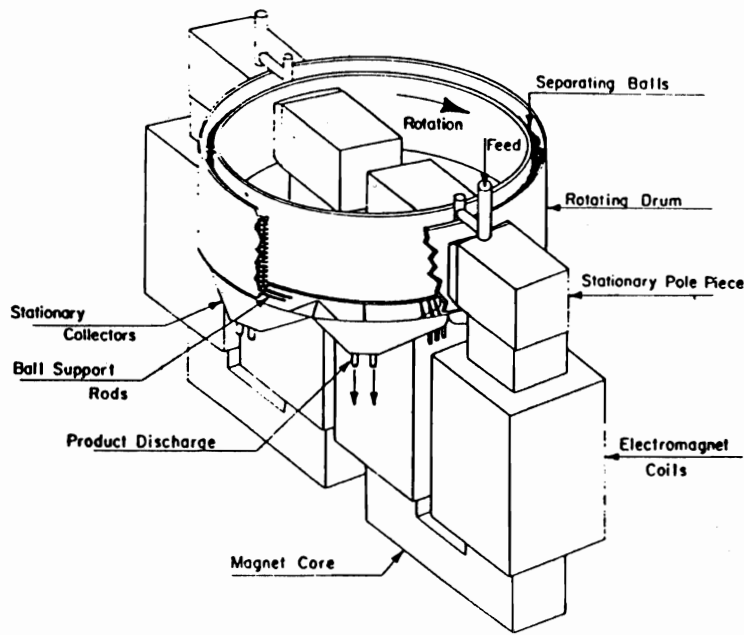
Garpco Separator Carpco-Amax Separator หรือเรียกสั้น ๆ ว่า Carpco Separator^(9,40,41) เป็นเครื่อง

แยกแรงแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง (WHIMS) เครื่องแรกที่สร้างขึ้นมาใช้ในเชิงพาณิชย์โดยมีลักษณะของถังคารูเซลที่ได้อธิบายมา โดยมีเมทริกซ์ที่บรรจุในช่องวงแหวนเป็นแบบลูกเหล็กกลม (Steel Ball) ทำจากเหล็กอ่อนทางแม่เหล็ก (Magnetically Soft Iron) ซึ่งสามารถทำให้มีความเข้มข้นแม่เหล็กสูง ความจุ (Capacity) ต่อชั่วโมงเหล็กของเครื่องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นแม่เหล็ก ความเข้มข้นแม่เหล็กเหนี่ยวนำสูงถึง 22,000 เกาส์ มีความจุ 1 ตันต่อชั่วโมงต่อชั่วโมงแม่เหล็ก ถ้าความเข้มข้นลดลงเป็น 12,000 เกาส์ ความจุจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 ตันต่อชั่วโมงต่อชั่วโมงแม่เหล็ก เครื่องต้องการกำลังไฟประมาณ 2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันแร่ป้อน น้ำหนักของเครื่องประมาณ 3 ตันต่อชั่วโมงแม่เหล็ก ในอาฟริกาใต้ใช้ในการลดปริมาณเหล็กจากแร่ฟอสเฟต⁽⁹⁾ รูปร่างของเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ 20

Krupp Sol Separator บริษัท Sala Magnetics, Inc. ได้ออกแบบเครื่องแยกแรงแถ้งคารูเซลโดยใช้ลวดโซลินอยด์ (Solenoid) แทนวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไปทำให้มีน้ำหนักน้อยกว่า Carpco Separator และใช้ลูกเหล็กกลม (Steel Ball) เป็นเมทริกซ์คล้าย Carpco Separator (รูปที่ 21)



รูปที่ 19 ลักษณะที่สำคัญของเครื่องแยกแรงแบบเปียกความเข้มข้นสูงชนิดถ้งคารูเซล⁽²⁸⁾

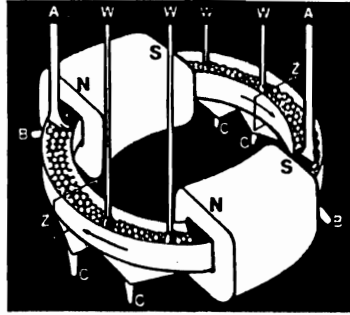


รูปที่ 20 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ชนิดถัง
คาร์กูเซล Carpco Separator⁽⁹⁾

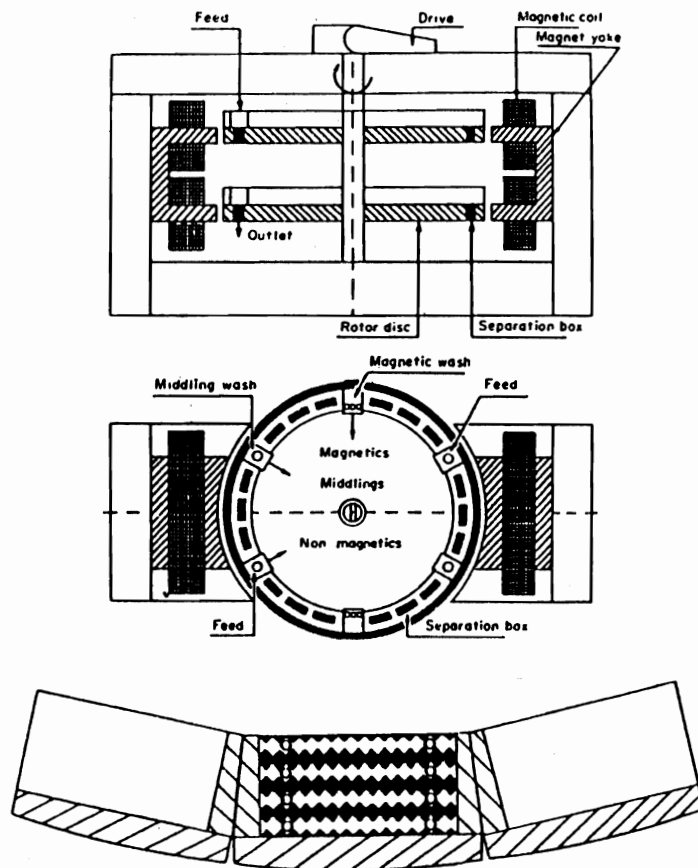
Jones Separator Humbolt Division of Klockner Humbolt-Deutz A.C. แห่งโคโลญน์ (Cologne) ประเทศสาธารณรัฐเยอรมันตะวันตก ได้พัฒนาเครื่องแยกแร่ของโจนส์ ซึ่งทำงานเป็นจังหวะ (ที่ได้อธิบายมาแล้ว) โดยออกแบบให้มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังคาร์กูเซล ซึ่งนำไปใช้แยกแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) ขนาดละเอียดในเชิงพาณิชย์ได้ดี^{42,43)}

เครื่องแยกแร่ Jones Separator ก็เช่นเดียวกับ Carpco Separator และ Krupp Sol Separator ที่ใช้หลักการของเครื่องแยกแร่ Forsgren Separator ซึ่งได้จดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1897⁽⁹⁾ มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังคาร์กูเซล รูปที่ 22 แสดงให้เห็นลักษณะของ Jones Separator ประกอบด้วยโครงเหล็กที่มีขั้วแม่เหล็กติดอยู่ โดยมีขดลวดแม่เหล็กพันอยู่รอบติดกับช่องระบายอากาศ (Air-Cooled Case) การแยกแร่เกิดขึ้นที่ช่องวงแหวน (Annular Box) ของถังคาร์กูเซล (Carousel) โดยใช้แผ่นที่เป็นร่อง (Grooved Plate) ทำด้วยเหล็กอ่อนเป็นแม่เหล็ก (ดูรูปที่ 22 (b)) ซึ่งนำมาวางซ้อนกันเป็นชุดๆ ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากขั้วแม่เหล็ก

โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะรวมเส้นแรงแม่เหล็กให้ลู่เข้าตรงส่วนปลายของแม่เหล็กซึ่งเป็นร่อง ซึ่งจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กและความชันสนามแม่เหล็กตรงส่วนนั้น ในเวลาเดียวกันนั้น แร่ป้อนผสมน้ำจะป้อนผ่านวงแหวนที่หมุนผ่านสนามแม่เหล็กความเข้มสูงอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จุดป้อนแร่จะอยู่ในตำแหน่งก่อนที่แร่จะถูกหมุนเข้าไปสนามแม่เหล็ก ซึ่งในแต่ละตัวหมุน (Rotor) จะมีจุดป้อนแร่ 2 ชุด (อยู่ในตำแหน่งสมมาตรกัน) (ดูรูปที่ 22) แร่ที่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อนจะเกาะติดกับแม่เหล็ก ส่วนแร่ไม่ติดแม่เหล็กจะไหลผ่านแม่เหล็กลงไปข้างล่างสู่ถังเก็บ ก่อนที่จะเคลื่อนออกจากสนามแม่เหล็กไปจะมีการฉีดน้ำความดันต่ำล้างแร่ไม่ติดแม่เหล็กสู่ช่องแร่คละ (Middlings) และเมื่อมันเคลื่อนมาถึงจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 ชุด ซึ่งตำแหน่งนี้ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ แร่ติดแม่เหล็กถูกฉีดล้างด้วยน้ำที่มีความดันสูงถึง 5 บาร์ (Bar) สู่ช่องเก็บแร่ไม่ติดแม่เหล็ก ปริมาณน้ำที่ในเครื่องแยกประมาณ 4 ตันต่อน้ำหนักแร่ 1 ตัน ปริมาณน้ำที่ใช้ร้อยละ 90 จะนำเอากลับมาใช้อีก เครื่องแยกสามารถปรับให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำได้สูงกว่า 20,000 เกาส์ (Gauss)



รูปที่ 21 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ชนิดตั้ง
 คาโรเซล Krupp Sol Separator⁽⁹⁾
 A คือแร่บ้อนผสมน้ำ B คือส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก C คือ
 ส่วนที่ติดแม่เหล็ก
 W คือน้ำ Z คือบริเวณกึ่งกลาง N,S คือขั้วเหนือ-ใต้ของ
 แม่เหล็ก



รูปที่ 22 (a) รูปร่างและการทำงานของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบ
 เปียกความเข้มสูงชนิดตั้งคาโรเซล Jones Separator
 (b) เมทริกซ์รูปร่างแบบแผ่นที่เป็นร่องใน Jones Sepa-
 rator⁽⁸⁾

หากใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กป้อน (Applied Magnetic Field Intensity) 15,000 เอสเท็ด (Orested) ต้องการกำลังไฟในขดลวดประมาณ 16 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงเหล็ก

เครื่องแยกแร่ที่นิยมใช้แยกแร่ดีบุกแม่เหล็กอย่างอ่อน เช่น แฮฮีมาไทต์ (Haematite) แร่เหล็กที่มีคุณภาพต่ำ (Low Grade Iron Ore) เป็นต้น โดยใช้แยกแร่เหล่านี้ที่ขนาดละเอียดกว่า 200 เมช แทนวิธีการลอยแร่ แม้ว่ายังไม่ใช้เครื่องแยกแร่ที่แพร่หลายนักในทวีปอเมริกาเหนือเพราะเงินลงทุนสูง โดยต้นทุนของเครื่องลอยแร่สำหรับแยกแร่ฮีมาไทต์นั้น ประมาณร้อยละ 20 ของเครื่องแยกแร่ แต่ค่าใช้จ่ายในการทำงานของการลอยแร่สูงกว่า 3 เท่าโดยได้คิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำ (Water Treatment) ในการลอยแร่ด้วย เมื่อคิดในระยะยาวเช่น 10 ปีขึ้นไป และมีการคิดค่าเสื่อมราคาด้วยแล้วพบว่าการใช้เครื่องแยกแร่แม่เหล็กความเข้มสูงแบบเปียกจะดีกว่าการลอยแร่^(42,44,45,46) สถานที่ที่ใช้เครื่องแยกแร่ Jones Separator ที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ Companhia Vale de Rio Doce ใน Itabira ประเทศบราซิล ซึ่งใช้แยกแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) ขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนขนาดความจุ (Capacity) 120 ตันต่อชั่วโมง

Boxmag-Rapid Separator ซึ่งออกแบบโดยบริษัท Boxmag-Rapid Ltd. แห่งเมืองเบอร์มิงแฮม (Birmingham) ประเทศอังกฤษ ให้มีชั่วโมงแม่เหล็ก 4 ชุด ดังรูปที่ 23 โดยที่ภายในช่องที่แยกแร่มีเมทริกซ์ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ซึ่งมีรูปร่างเป็น Wedge-Bar^(8,47) คล้ายกับที่ใช้ในตะแกรง篩สำหรับการคัดขนาดเม็ดเล็ก ๆ ดังแสดง ในรูปที่ 24

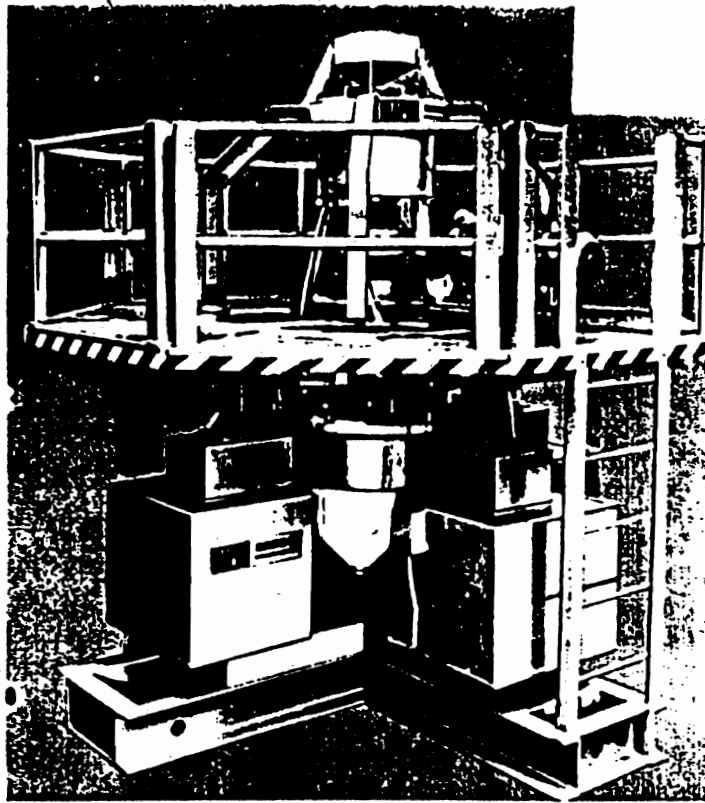
เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (WHIMS) ชนิดถังคาร์บูเซลนี้ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอีกหลายลักษณะมีชื่อเรียกต่างกันไป เช่น Eriez Separator⁽⁴⁸⁾ และเครื่องแยกแร่ถังคาร์บูเซล ซึ่งออกแบบโดย Fraas และพัฒนาโดย Cribla S.A. แห่งบรัสเซลส์ ประเทศเบลเยียม^(49,50)

3) ชนิดกระบอกกลม เป็นเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ซึ่งออกแบบโดย Ore Research Institute กรุงปราก ประเทศเชโกสโลวาเกีย ซึ่งเรียกว่า MRVK-1 Separator^(9,51) ประกอบด้วยหน่วยแยก 2 หน่วย อยู่คนละด้าน ตามรูปที่ 25 แร่ป้อนจะป้อนเข้ามายังตำแหน่ง 4 ผ่านมายังกระบอกกลมตำแหน่ง 2 ซึ่งหมุนรอบแกนนอน ภายในกระบอกกลมมีเมทริกซ์ (Matrix) ที่สานกันไว้เป็นรูปตาข่าย หัวแร่ แร่ละเอียด และหางแร่ จะมี

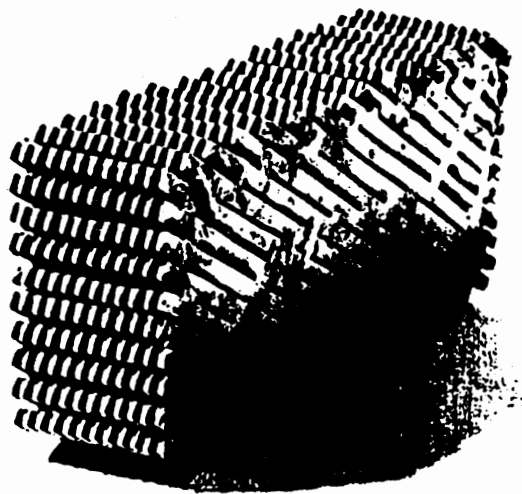
ถึงรองรับ กล่าวกันว่าเครื่องแยกนี้มีความจุ (Capacity) สูงกว่าเครื่องแยกแบบอื่น ๆ ที่มีขนาดเดียวกัน

4) ชนิดคานิสเตอร์ (Canister-type Separator)⁽⁸⁾ เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ซึ่งได้อธิบายมาข้างต้นเป็นชนิดซึ่งใช้ระบบการสร้างสนามแม่เหล็กแบบเดิม (Conventional Magnetic Circuit) ขดลวดไฟฟ้าจะสร้างสนามแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ผ่านเข้าไปยังเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งจะรวมฟลักซ์แม่เหล็กเหล่านั้น คล้ายกับการนำไฟฟ้าของทองแดง⁽⁵²⁾ การใช้วงจรของโลหะเหล็ก (Iron Circuit) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำความเข้มสูงขึ้นตรงบริเวณช่องว่าง (Air Gap) อาจสูงไปจนถึง 20,000 เกาส์ โดยใช้พลังงานไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็ก (Lines of Flux) จะถูกทำให้ลูเข้าหากันในวงจรเหล็กเหล่านั้น ซึ่งจะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กตรงบริเวณที่มีลักษณะปลายแหลมมีความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) สูงกว่าสนามแม่เหล็กซึ่งป้อนเข้ามา (Applied Magnetic Field Intensity) หลายเท่า ซึ่งเป็นเหตุให้ระบบนี้มีข้อเสียกล่าวคือต้องใช้ปริมาตรของแท่งเหล็ก (ที่ใช้ทำเมทริกซ์) มากกว่าปริมาตรของช่องว่างมากเครื่องแยกดังกล่าว จึงมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับความจุ⁽²⁸⁾ เครื่องแยกขนาดใหญ่ต้องใช้โลหะเหล็กมากกว่า 200 ตัน เพื่อทำหน้าที่รวมเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นเงินลงทุนขั้นต้นและค่าติดตั้งจึงสูงมาก

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ซึ่งออกแบบโดยใช้ระบบ Iron-Clad Solenoid⁽⁵³⁾ (รูปที่ 26) ซึ่งใช้หลักการของขดลวด Solenoid ซึ่งสามารถแยกแร่ดีบุกแม่เหล็กอย่างอ่อน ๆ ออกจากของไหลเมื่อผ่านเครื่องแยกนี้ได้⁽⁵⁴⁾ เครื่องประกอบด้วยเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งเป็นฝอยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Wool) บรรจุอยู่ในทรงกระบอกซึ่งมีปริมาตรประมาณร้อยละ ๕-๑๐ ของช่องว่างทรงกระบอกทั้งหมด ทรงกระบอกนี้มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูง และสม่ำเสมอ ป้อนอยู่ ซึ่งทำให้ความชันของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงถึง 1 กิโลเกาส์ต่อไมโครเมตร ($1K Gmm^{-1}$)⁽⁵⁵⁾ แร่ป้อนผสมน้ำจะถูกป้อนทางด้านล่าง และแร่ดีบุกแม่เหล็กอย่างอ่อน ๆ จะดูดติดกับเมทริกซ์ แร่ไม่ติดแม่เหล็กจะผ่านออกไป ซึ่งการทำงานของเครื่องแยกนี้จะทำงานเป็นจังหวะ กล่าวคือเมื่อมีแร่ดีบุกแม่เหล็กเกาะอยู่บนฝอยเหล็กกล้าไร้สนิมปริมาณพอควรก็จะหยุดป้อนสนามแม่เหล็กให้แก่เครื่องแยก แล้ว



รูปที่ 23 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ชนิดตั้งถาวร
เซลล์ Boxmag-Rapid Separator^(®)



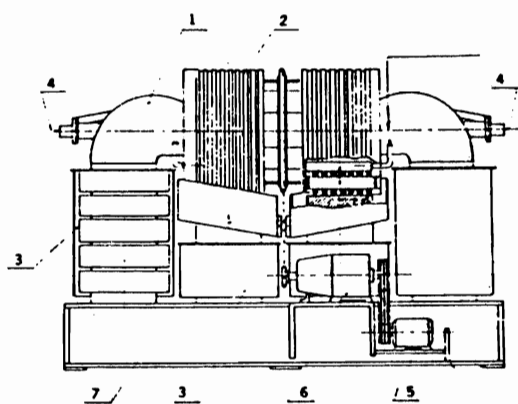
รูปที่ 24 แม่เหล็กชนิดรูป Wedg-Bar ที่รูปทรงแข็งแรง ซึ่งใช้ใน
Boxmag-Rapid Separator^(®)

จึงนำมาพิจารณาความสะอาด เพื่อล้างเอาแร่ที่ติดแม่เหล็ก ออกไปจากฝอยเหล็กเหล่านั้น (ถ้าไม่ทำการล้างด้วยน้ำแล้ว ความสามารถในการรับแร่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ ของ ฝอยเหล็กกล้าจะลดลง เนื่องจากมีแร่ติดแม่เหล็กมาเกาะ อยู่มากเกินไป) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องแยกแร่แม่เหล็กที่การ ออกแบบในระบบนี้จะมีอัตราส่วนของโลหะเหล็ก ที่ใช้ทำ เมทริกซ์ต่อช่องว่างที่ใช้ในการแยก น้อยกว่าระบบที่ใช้วงจร โลหะเหล็ก (Iron Circuit) ซึ่งได้อธิบายมาแล้ว จึงทำให้ เครื่องแยกแร่ชนิดนี้มีน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับความจุ แต่ มีข้อเสียคือเครื่องแยกต้องใช้ขดลวดทองแดง หรืออลูมิ- เนียมมาก และใช้พลังงานมาก เครื่องขนาดใหญ่จะมีเมทริกซ์ บรรจุอยู่ในช่องที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 เมตร มีความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ 20,000 เกาส์ ใช้กำลัง งาน 20 กิโลวัตต์ มีความจุแร่ป้อนระหว่าง 10-80 ตัน ต่อชั่วโมงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพแร่ในขั้นสุดท้ายที่ต้องการ

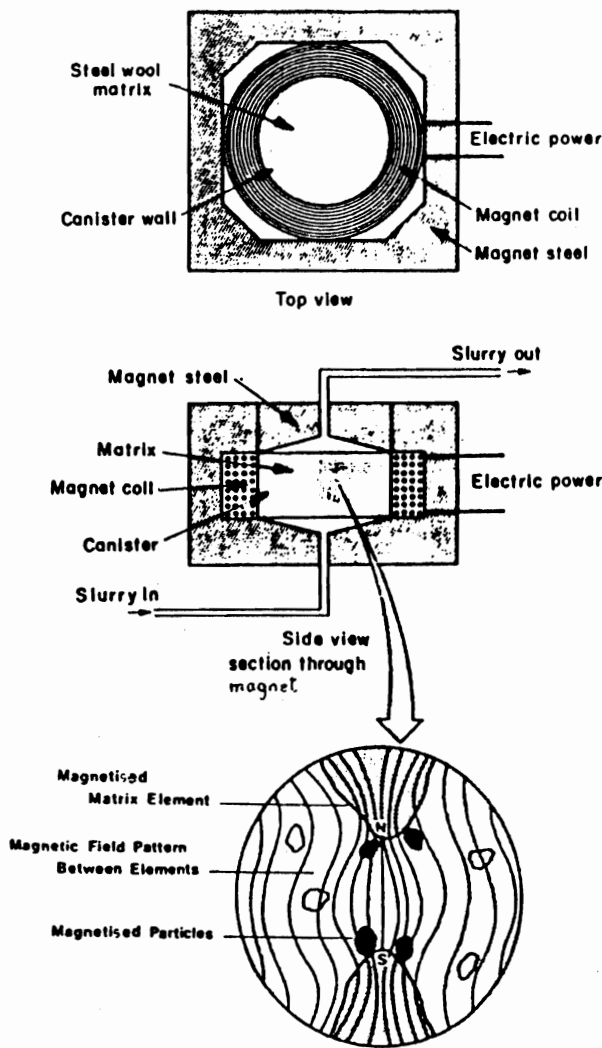
เครื่องแยกแร่แม่เหล็กชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ดินขาวทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา⁽⁵⁶⁾ และที่คอร์นวอลล์ (Cornwall) ประเทศอังกฤษ⁽⁵⁷⁾ โดยใช้แยกแร่ที่มีส่วน ประกอบของธาตุเหล็กและธาตุไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งมี ขนาดเล็ก ซึ่งเจือปนอยู่ออกไป

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กซึ่งใช้หลักการของขดลวด So- lenoid นี้ กำลังมีการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งในขณะนี้ ซึ่ง จะสามารถศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติมเรื่องดังกล่าวได้จาก เอกสารอ้างอิงอื่น ๆ^(58,59,60,61,62)

5) ชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Separator)^(8,14) ได้มีผู้นำเอาเทคนิคของการเป็นตัวนำยิ่งยวด ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Superconductor) ของโลหะ ผสมบางชนิดมาประยุกต์ใช้กับเครื่องแยกแม่เหล็ก^(63,64) ยกตัวอย่างเช่น โลหะผสมไนโอเบียม-แทนทาลัม (Niobium-Tantalum) ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน (Kelvin) ซึ่งเป็น อุณหภูมิภายใต้ของเหลวฮีเลียม (Liquid Helium) และ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำพิเศษดังกล่าว แล้วก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ต่อเนื่อง โดยไม่ต้องต่อกับ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและจะทำให้ขดลวดกลายเป็นตัวแม่เหล็ก ถาวร ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ และมีความ เข้มสูงมากมายมหาศาล ซึ่งสูงถึง 150,000 เกาส์ อย่างสม่ำเสมอ ความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่า 7,000 เกาส์ต่อ เซนติเมตร ได้มีการทดลองเครื่องแยกต้นแบบและเชื่อว่า หากสามารถพัฒนาเครื่องแยกให้มีความจุ (Capacity) ของ แร่ป้อนให้ถึง 100 ตันต่อชั่วโมงแล้ว ก็จะช่วยค่าในเชิง พาณิชยกรรม⁽⁶⁵⁾ ทั้งนี้ได้คำนึงถึงต้นทุนเครื่องมือ ค่าใช้จ่ายใน การนำเอาฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) ไฮโดรเจนเหลว (Liquid Hydrogen) หรือไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitro- gen) วนกลับมาใช้เพื่อทำเป็นตัวหล่อเย็น (Coolant) ทำให้ อุณหภูมิต่ำลง⁽²⁸⁾ อย่างไรก็ดีตาม จากการที่ได้พบสารตัว นำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงขึ้น (High Temperature Su- perconductor) เมื่อเร็ว ๆ นี้ นั้นคาดว่า จะพัฒนาเทคนิคนี้ ในการแยกแร่ในอนาคตได้ในราคาถูก



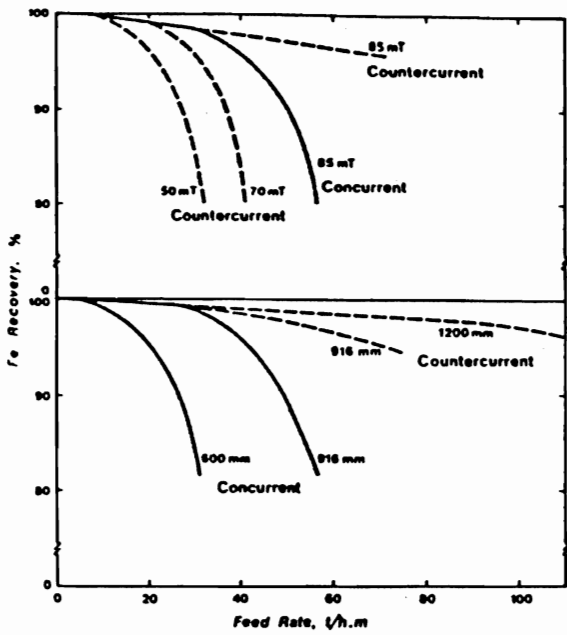
รูปที่ 25 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเป็ยกความเข้มสูง ชนิดกรวยอกกลม MRVK-1 Separator⁽³⁾



รูปที่ 26 เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ชนิดคานิสเตอร์ (8.14)

สมรรถนะการทำงานของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียก (Performance of Wet Magnetic Separator) สามารถแสดงออกมาได้ในรูปของตาราง กราฟ ฯลฯ ในกรณีของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มต่ำและความเข้มปานกลางนั้นรายละเอียดสมรรถนะการทำงานของมันค่อนข้างจะมีจำกัด Lantto⁽⁶⁶⁾ ได้วิจารณ์ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกแร่ด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มต่ำ ส่วนรายละเอียดต่างๆ ไปนั้นผู้ผลิตมักจะจัดหาไว้ให้ผู้ใช้⁽²⁷⁾ ตัวอย่างของสมรรถนะการทำงานของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกกระบอกกลม ดังแสดงตามรูปที่ 27 และรูปที่ 28 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเข้ม

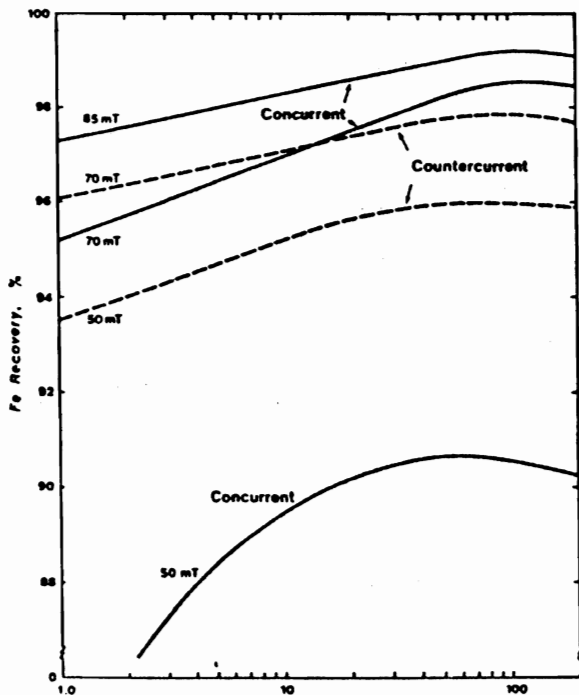
สนามแม่เหล็ก อัตราการป้อนแร่ ขนาดของเม็ดแร่ป้อนและลักษณะของถังแยกแร่ที่ใช้ในแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกสินแร่ ส่วนรูปที่ 29 แสดงให้เห็นถึงอัตราการป้อนแร่และปริมาณของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำ ที่มีผลต่อคุณภาพของแร่แม่เหล็กที่แยกได้ สมรรถนะการทำงานของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูงขึ้น มีปัจจัยที่มีผลต่อการแยกหลายประการ เช่น ขนาดของแร่ป้อนขนาดของแม่เหล็กที่ติดแม่เหล็ก ความเร็วของแร่ป้อนที่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix) เวลาที่ใช้ในการแยกค่าความเข้มสนามแม่เหล็กปริมาณของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำ (ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 25-30% Solids) ขนาดของเมทริกซ์ ความหนาแน่นของ



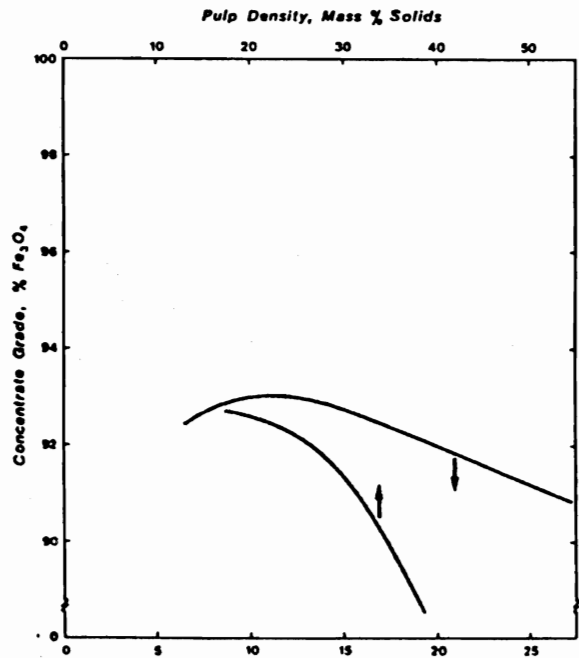
รูปที่ 27 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเข้มข้นแม่เหล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกกลม และถึงแยกแรงแบบต่างๆ ที่ใช้ ที่มีผลต่อการเก็บแร่เหล็กด้วยเครื่องแยกแรงแม่เหล็กแบบเบี่ยงความเข้มต่ำ ชนิดกระบอกกลม (ใช้แยกแรมกนัโทต์ที่มีขนาด -44 ไมครอนอยู่ร้อยละ 75 มีของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำอยู่ร้อยละ 30

รูปบน : กระบอกกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 916 มิลลิเมตร

รูปล่าง : ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 85 มิลลิเทสลา (14)



รูปที่ 28 แสดงผลของขนาดเม็ดแร่ที่มีต่อการเลือกแบบของเครื่องแยกแรมแม่เหล็กแบบเบี่ยง ความเข้มต่ำ ชนิดกระบอกกลม (14)



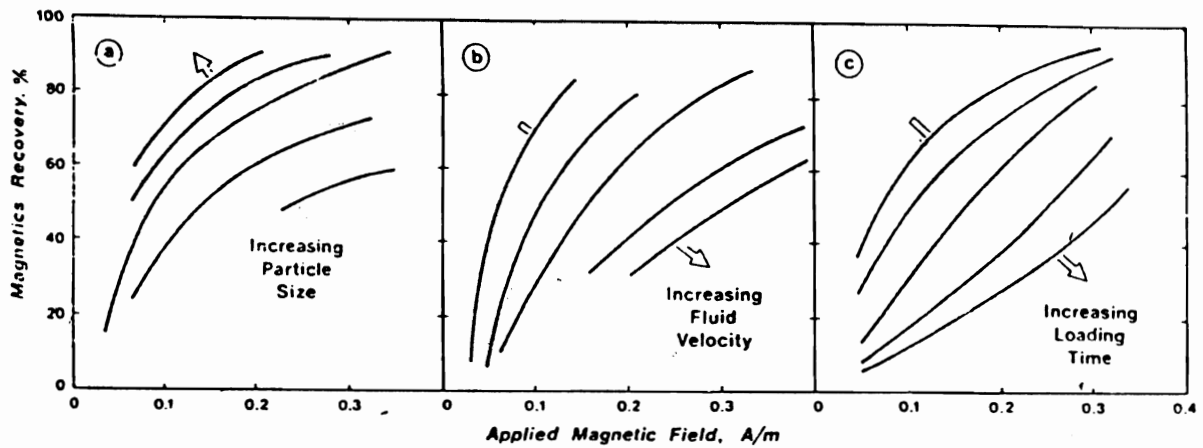
รูปที่ 29 แสดงผลของอัตราการป้อนแร่และปริมาณของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำที่มีต่อคุณภาพของแร่ คุณภาพของแร่เหล็กที่แยกได้ (14)

เมทริกซ์ คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ป้อนผสมน้ำ ฯลฯ รูปที่ 30 เป็นกราฟแสดงผลของเม็ดแร่ป้อน ความเร็วของผสมน้ำที่ป้อนเข้ามา และเวลาที่ใช้ในการแยก ที่มีผลต่อการเก็บแร่ติดแม่เหล็ก (Magnetics Recovery) ⁽⁶⁷⁾ ด้วยเครื่องแยกแร่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงชนิดคานิสเตอร์ (Canister-type Separator) ซึ่งในเอกสารอ้างอิงอื่น ๆ ก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ^(6,68,69) กล่าวคือ ตามรูปที่ 30 (a) แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการแยกแร่ที่มีขนาดเล็กลงให้ได้ปริมาณมากขึ้น จะต้องให้ความเข้มข้นแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น เพื่อที่จะเอาชนะแรงอุทกจลน์ (Drag Force) รูปที่ 30 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อต้องการเพิ่มความจุ (Capacity) ของเครื่องแยกจะมีผลทำให้ความเร็วของแร่ป้อนผสมน้ำที่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix) สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อต้องการแยกแร่ติดแม่เหล็กให้ได้ปริมาณมากแล้ว จะต้องเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กให้สูงขึ้น ซึ่งมีผลคล้ายกับกราฟในรูปที่ 31 ซึ่งแสดงผลการแยกมลทินออกจากแร่ดินขาวด้วยเครื่องแยกชนิดคานิสเตอร์ ⁽⁶⁸⁾ ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วของแร่ป้อนปนน้ำจะเป็นผลทำให้แร่มีเวลาอยู่ในเครื่องแยกน้อยลง (Low Residence Time) ก็จะทำให้แยกมลทินออกจากดินขาวได้น้อยลง ส่วนรูปที่ 30 (c) นั้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เครื่องแยกชนิดคานิสเตอร์ ผลของเวลาที่ใช้ในการแยกแร่ในแต่ละวัฏจักร (คือ Loading Time เป็นเวลาซึ่งเมื่อป้อนแร่เข้าไปในเครื่องแล้ว เมทริกซ์ทำการดึงดูดเอาแร่มลทินออกมาจนกระทั่งหยุดป้อนแร่ และทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าศูนย์ เพื่อให้น้ำล้างมลทินออกมา) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการแยกแต่ละวัฏจักร (Loading Time) นานจนเกินไปแล้ว ความสามารถในการดึงดูดเอามลทินของเมทริกซ์จะลดลง ซึ่งหากต้องการให้เครื่องแยกสามารถแยกเอามลทินเพิ่มขึ้นมากยิ่งขึ้นจะต้องเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็ก ดังนั้นเครื่องแยกแร่ชนิดคานิสเตอร์จึงทำงานเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง (จะต้องมีการหยุดเครื่องเป็นพัก ๆ) เพื่อทำการล้างเอามลทินซึ่งติดอยู่กับเมทริกซ์ออกไป นอกจากนี้แล้วกราฟแสดงสมรรถนะของเครื่องแยกยังสามารถแสดงออกมาได้ในรูปคณิตศาสตร์อีกด้วย ⁽⁷⁰⁾

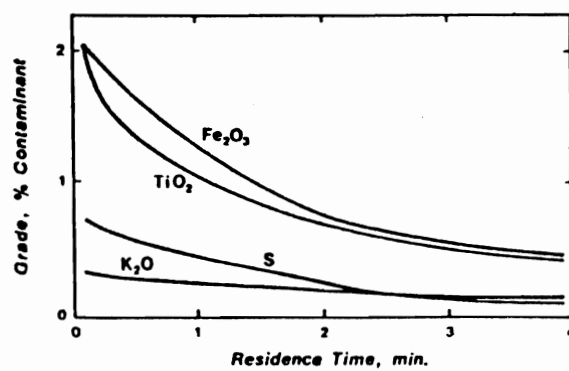
การประยุกต์ใช้เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกในอุตสาหกรรมแยกแร่ เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นต่ำ และความเข้มข้นปานกลางมีการนำเอาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแร่ ดังได้อธิบายมาแล้วตามลำดับ ส่วนการประยุกต์ใช้เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นนั้น พึงจะมีมาไม่นานนี้และที่นำเอาไปใช้ในอุตสาหกรรม

แร่ที่ใหญ่ที่สุด คือการนำเอาเครื่องแยกชนิดโจนส์ (Jones Separator) ไปแยกแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) ขนาดละเอียดที่ Campanhia Vale de Rio Doce ใน Itabira ประเทศบราซิล ซึ่งได้ผลดี ^(42,44,45) ซึ่งยังมีผู้ได้ศึกษาถึงการนำเอาเครื่องแยกไปใช้แยกแร่ฮีมาไทต์เพิ่มเติมอีกหลายคน ^(71,72,73,74,75) และอุตสาหกรรมแร่ที่นำไปใช้ขนาดใหญ่เป็นอันดับสอง ก็คือการนำเอาเครื่องแยกชนิดคานิสเตอร์ (Canister-type Separator) ไปใช้แยกมลทินออกจากดินขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ (Coating Quality Kaolin) โดยประเทศสหรัฐอเมริกา และสหราชอาณาจักรเป็นสองประเทศผู้นำด้านนี้ ^(56,57) นอกจากนั้นแล้วได้มีการนำเอาไปใช้ และคาดว่าจะมีการนำเอาไปใช้ในการแยกแร่ชนิดอื่น ๆ อีก ⁽²⁸⁾ ดังต่อไปนี้

1. ใช้แยกแร่เหล็กฮีมาไทต์ (Haematite) คุณภาพสูงเพื่อใช้ทำเฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือใช้ถลุงโดยตรงให้เป็นผงเหล็ก (Direct Reduction to Iron Powder)
2. ใช้แยกแร่มลทินที่ติดแม่เหล็กออกจากหัวแร่ดีบุกแคสซิเทอไรต์ (Cassiterite)
3. ใช้แยกแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) ออกจากแร่ใยหิน (Asbestos)
4. ใช้แยกแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) ออกจากแร่ฟอสเฟตอะพาไทต์ (Apatite)
5. ใช้แยกแร่มลทินที่ติดแม่เหล็กออกจากแร่ซีไลต์ (Scheelite)
6. ใช้แยกแร่มลทินที่ติดแม่เหล็กออกจากแร่ทัลค (Talc)
7. ใช้แยกแร่มลทินที่ติดแม่เหล็กออกจากทราย (Silica Sand) หรือแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar)
8. ใช้แยกแร่วุลแฟรมไมต์ (Wolframite) และแร่โมลิบดีนัมที่มิใช่แร่สารประกอบซัลไฟด์ (Non-Sulphide Molybdenum-Bearing Mineral) ออกจากทางแร่ที่เกิดจากการลอยแร่
9. ใช้แยกแร่ยูเรเนียม (Uranium Ore)
10. ใช้แยกแก้วที่มีสี (Coloured Glass) ออกจากแก้วที่ไม่มีสี (Colourless Glass) ในขบวนการนำเอากลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง (Recycling Operation)
11. ใช้แยกแร่หนัก (Heavy Mineral) จากแร่ชายหาด (Mineral Beach Sand)
12. ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแร่อุตสาหกรรมบางชนิด ^(68,76,77)



รูปที่ 30 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกแร่ ด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเบี่ยงความเข้มสูง ชนิดคานิสเตอร์⁽¹⁴⁾ อันได้แก่
 (a) ขนาดของเม็ดแร่
 (b) ความเร็วของแร่ป้อนผสมน้ำ
 (c) เวลาที่ใช้ในการแยก



รูปที่ 31 แสดงผลการแยกมลทินออกจากแร่ดินขาวด้วยเครื่องแยกคานิสเตอร์⁽¹⁴⁾

13. คาดว่าจะสามารถใช้เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียก ความเข้มข้นสูงมาใช้ในการแยกซัลเฟอร์ (Sulphur) ออกจากถ่านหิน (76,78,79,80) อย่างไรก็ตามซัลเฟอร์ ซึ่งแยกออกมานั้นสามารถแยกออกมาได้จำนวนหนึ่งเท่านั้น เพราะซัลเฟอร์ที่พบอยู่ในถ่านหินประมาณครึ่งหนึ่งอยู่ในสารประกอบแร่ไพไรต์ (Pyrite-FeS₂) ซึ่งติดแม่เหล็กอย่างอ่อนมาก (Feebly Magnetic) ส่วนซัลเฟอร์ที่เหลือนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Sulphur)

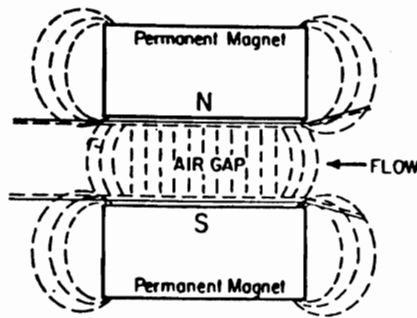
14. คาดว่าจะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคของเครื่องแยกแร่แม่เหล็กความเข้มข้นสูง ในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ขึ้นโดยใช้การกรองด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Filtration) (81,82) และอาจนำไปใช้ในขบวนการ การตกตะกอนด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Flocculation) (83,84)

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นแร่ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจแยกได้ด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่าง ๆ

การประยุกต์ใช้เครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกในด้านต่าง ๆ หลักการของการแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม การแยกแร่ และนอกอุตสาหกรรมการแยกแร่ได้อีกหลายทาง ยกตัวอย่างเช่น ในงานที่ทำให้เม็ดของวัสดุที่ติดแม่เหล็กอย่างแรง (Ferromagnetic Material) ตกตะกอน (Magnetic Flocculation) และใช้ในการกรองแม่เหล็ก (Magnetic Filtration) โดยเมื่อทำการป้อนเม็ดวัสดุติดแม่เหล็กอย่างแรงผสมน้ำเข้าไปใน "Magnetic Blocks" ซึ่งมักทำ

ตารางที่ 2 แร่ชนิดต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกได้ด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กแบบเปียกที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่าง ๆ กัน (8)

Mineral	Magnetic intensity (kG)	Mineral	Magnetic intensity (kG)
Alabandite	15-19	Maghemite	3-5
Ankerite	13-16	Magnetite	>1
Apatite	14-18	Martite	2-6
Bastnasite	13-17	Monazite	14-20
Biotite	10-18	Muscovite	15-24
Braunite	14-18	Olivine	11-15
Chromite	10-16	Pyrochlore	12-16
Chrysocolla	20-24	Pyrolusite	15-19
Columbite	12-16	Pyrrhotite	1-4
Davidite	12-16	Renierite	14-18
Epidote	14-20	Rhodochrosite	15-20
Euxenite	16-20	Rhodonite	15-20
Ferberite	1-4	Samarskite	16-20
Franklinite	3-5	Siderite	10-18
Garnet	12-19	Staurolite	12-19
Goethite	15-18	Serpentine	3.5-18
Hematite	13-18	Tantalite	12-16
Hornblende	16-20	Titaniferous-magnetite	0.5-3
Ilmenite	8-16	Tourmaline	16-20
Ilmeno-rutile	15-18	Uraninite	18-24
Itabirite	8-14	Wolframite	12-16
Limonite	16-20	Xenotime	11-16



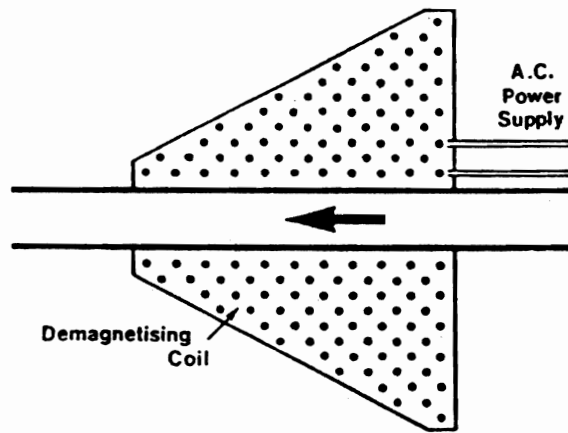
รูปที่ 32 Magnetic Blocks

จากแม่เหล็กถาวร ดังแสดงตามรูปที่ 32 ก็จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของเม็ดวัสดุติดแม่เหล็กอย่างแรงเหล่านั้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกแร่แมกนีไทต์ให้สะอาด หรือใช้ในการทำความสะอาดน้ำเสียจากโรงงานเหล็กกล้า ด้วยหลักการของเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียก โดยจะไปเพิ่มอัตราการตกตัว (Settling Rate) ได้ด้วยซึ่งได้อธิบายเป็นเบื้องต้นมาแล้ว (81,82,83,84)

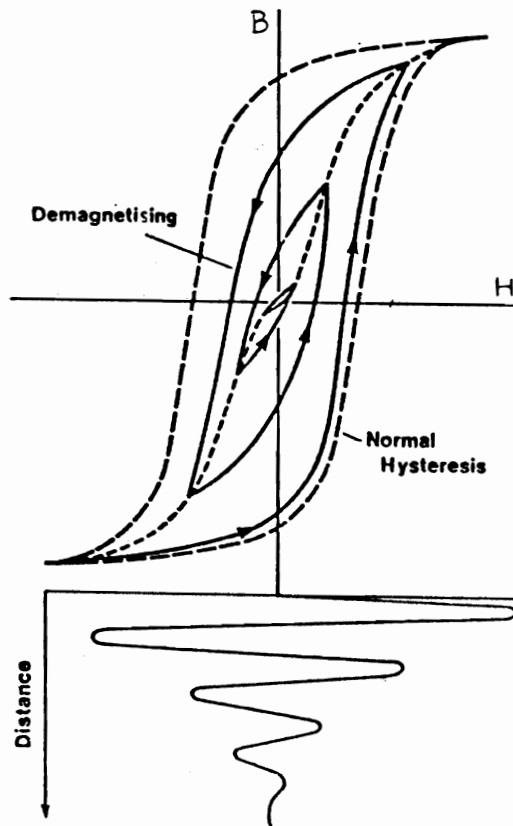
อย่างไรก็ตาม เมื่อวัสดุติดแม่เหล็กอย่างแรงได้ผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กไปแล้ว ก็อาจจะก่อให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มของเม็ดวัสดุเหล่านั้น เนื่องจากมีอำนาจแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ (Magnetic Remanence) ซึ่งอาจก่อปัญหาเมื่อทำการแยกเม็ดวัสดุเหล่านั้นในขั้นตอนของการแยกแร่ต่อไป ดังนั้นจึงมักป้อนเม็ดวัสดุผสมน้ำเหล่านั้นเข้าไปยังขดลวดสลายอำนาจแม่เหล็ก (Demagnetising Coil) (รูปที่ 33) โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับไปมา (Oscillating Magnetic Field) และจะทำให้อำนาจการเป็นแม่เหล็กของสารเหล่านั้นลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะทางที่มันผ่านขดลวดไฟฟ้า นั้น ดังแสดงตามรูปที่ 34 และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการสลาย

อำนาจแม่เหล็กของแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) หรือเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ที่ใช้เป็นมัชฉิม (Media) ในกระบวนการแยกแร่ด้วย มัชฉิมหนัก (Heavy Media Separation) ด้วย โดยเมื่อผ่านการเก็บด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มต่ำแล้ว มันจะเกาะกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) เนื่องจากยังมีอำนาจแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ จึงต้องผ่านเข้าไปยังขดลวดสลายอำนาจแม่เหล็ก เพื่อให้เม็ดวัสดุดังกล่าวหมดอำนาจเกาะตัวกัน และกระจายออกจากกัน ทำให้สะดวกต่อการนำกลับไปใช้อีก (Recycling)

มีการคาดหมายว่าจะมีการพัฒนาการแยกแร่โดยใช้แม่เหล็กที่มีความเข้มสูง เช่นตัวนำยิ่งยวดชนิด Cryogenic โดยอาจจะนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการแยกแร่ในอนาคต (63,64) นอกจากนั้นแล้วก็ยังมีรายงานถึงวิธีการ Magnetohydrodynamic และ Magnetohydrostatic ซึ่งอาจนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกแร่ โดยวิธีดังกล่าวจะรวมเอาหลักการของความแตกต่างทางด้านความถ่วงจำเพาะ ความไวต่ออำนาจแม่เหล็ก และการนำไฟฟ้าของแร่เข้ามาด้วย (85)



รูปที่ 33 ขดลวดสลายอำนาจแม่เหล็ก⁽¹⁴⁾



รูปที่ 34 การสลายอำนาจแม่เหล็กของวัสดุตีแม่เหล็กอย่างแรง⁽¹⁴⁾

เอกสารอ้างอิง

20. Suelski, J.- "New Magnets and Tank Designs for Wet Magnetic Drum Separators," World Min., Vol. 24, April, 1972, pp. 46-61.
21. Broadhurst, A.- "New Magnetics Assist Wet Drum Separation," Aust. Min., Vol. 60, July 1968, pp. 26-27.
22. Twichell, E.S. and Bartnik, J.A.- "Eriez Unveils Permanent Wet Drum Separator," Eng. Min., Vol. 168, Oct. 1967, pp. 94-96.
23. Maki, T. and Furness, E.F.- "Type of Commercial Wet Magnetic Separators and Their Applications in Mineral Dressing," Presented at AIME Meeting, 1985.
24. Forciea, J.E., Hendrixson, L.G. and Palasvirta, O.E.- "Magnetic Separation of Masabi Magnetite Taconite," Trans SME/AIME, Vol. 211, 1958, pp. 1296-1276.
25. Forciea, J.E., and Salmi, R.W.- "Preliminary Magnetic Separator Specifications," Trans SME/AIME Preprint 70-B-98, 1970.
26. Barrette, W.T., Lawver, J.E. and Wright, J.L.- "A Rapid Method of Evaluating Magnetic Separation Force Patterns," SME/AIME Preprint 70-B-98, 1970.
27. Sala International Catalogue 23, 30-01-7742 GB- "Magnetic Wet Separator," 1977.
28. Lawver, J.E. and Hopstock, D.M.- "Wet Magnetic Separation of Weakly Magnetic Minerals," Miner. Sci. Engng., Vol. 6, 1974, pp. 154-17.
29. Derkac, V. and Galevkaja, T.N., Report of Institute Mechanonbra No. 159 a, Len
30. Hudson, S.B.- "The Gill High-Intensity Wet Magnetic Separator," Proc. 8th Int. Miner. Process. Congr., Leningrad, 1968, Paper B-6.
31. Readings of Lismore, PTY, Ltd., Bull. MW2/0469, Lismore, New South Wales, Australia.
32. Jones, G.H., British Patent 768 451, 1955.
33. Vanderbilt University- "Magnetic Separation of Non Ferrous Metals," Annual Report, Department of Physics and Astronomy, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, Apr. 1971.
34. Jones, G.H.- "Wet Magnetic Separator for Feebly Magnetic Minerals I-Description and Theory," Proc. 5th Int. Miner. Process Congr., London, 1960.
35. Stone, W.J.D.- "Wet Magnetic Separator for Feebly Magnetic Minerals-II," Proc. 5th Int. Miner. Process. Congr., London, 1960.
36. Jones, G.H.- "The Separation of Strongly Magnetic Particles Particularly Those of Small Dimensions," Proc. 7th Int. Miner. Process. Congr., New York, 1964, p. 405.
37. Wyman, R.A., Stone, W.J.D. and Hartman, F.H.- "Illustrative Applications of the Jones Wet Magnetic Mineral Separator," Technical Bulletin TB 36, Department of Mines and Tech. Survey, Ottawa, Jun. 1972.
38. Forrer, R.C.- "Magnetic Separator Operating in an Aqueous Medium," U.S. Patent 2 976 995, 1961.
39. De Robert, J. and Casnabet, L.- "The Forrer Separator : A New Apparatus for Wet Magnetic Separation of Weakly Paramagnetic Minerals," Proc. 5th Int. Miner. Process. Congr., London, 1960.
40. Carpenter, J.H.- "Carpco-Amax High Intensity Wet Magnetic Separator," Proc. 7th Int. Miner. Proc. Congr., New York, 1964 pp. 399-404.
41. Carpenter, J.H.- "Magnetic Separator" U.S. Patent 3 375 925, 1968.
42. Bartnik, J.A. and Stone, W.D.J.- "Capital and Operating Costs of the Jones High Intensity Wet Magnetic Separator," Proc. 33rd Annual Mining Symposium, Duluth, Minn., 1972, p.26.
43. Wenz, L. and Zabel, W.H.- "Dressing of Feebly Magnetic Iron Ores with the Aid of High Intensity Wet Magnetic Separator," Aufberit-Tech. Vol. 13, May 1973, p. 142.
44. Skillings, Jr., D.N.- "Cia Vale do Rio Doce, "Skillings" Mining Review, Vol. 61, Oct. 1972. p. 12.
45. Bartnik, J.A., Stone, W.J.D. and Zabel, W.H.- "Superconcentrate Production by Jones Separator : Capital and Operating Costs," Int. Symposium of Iron and Steel Industry, Brazilia, Brazil, 1973.
46. White, L.- "Swedish Symposium offer Iron Ore Industry : An Overview of Ore Dressing Developments," Eng.Min. J., Vol. 179, April, 1978, p. 71.
47. Rapid Magnetic Ltd., "Type H.W. High Intensity Wet Magnetic Separators," Birmingham, Rapid Magnetic Ltd., Pub. No. 042.

48. Bartnik, J.A. and Twichell, E.S.- "Exploring the New Area of Wet Magnetics," Engng. Min.J., Vol. 167, No. 9, Sept, 1966, pp. 138-141.
49. Pouillon, E., Cribla S.A., Brussels, Belgium, 1974.
50. Fraas, F.- "The Matrix-Type Magnetic Separator," U.S. Bureau of Mines, RI 6722, Washington, 1966, pp. 11.
51. Hencl, V., Voracek, M. and Kolar, O.- "New High Intensity Wet Magnetic Separator for Treatment of Fine Fraction of Weakly Magnetic Materials," Proc. 9th Int. Miner. Process. Congr., Prague, 1970, pp. 60-67.
52. Rotors, H.C.- *Electromagnetic Devices*, Wiley, 1941.
53. Marston, P.G., Nolan, J.J. and Lontai, L.M.- "Magnetic Separator and Magnetic Separation Method," U.S. Patent 3 627 678, 1971.
54. Kolm, H.H. and Montgomery, D.B.- "Proc. Conf. on High Magnetic Fields and Their Applications," Nottingham, 1969.
55. Watson, J.H.P.- "Applications of and Improvements in High Gradient Magnetic Separation," Conf. on Filtration, Productivity and Profits, Filtech/77, London, 1977.
56. Iannicelli, J. and Millman, N.- "Process for Improving the Brightness of Clays," U.S. Patent 3 471 011, 1969.
57. Malden, P.J. and Windle, W.- "Method of Improving the Whiteness of Clays," U.S. Patent 3 482 685, 1969.
58. Oberteuffer, J.A. and Kelland, D.R., Eds.- "Processings of the High Gradient Magnetic Separation Symposium," M.I.T. Francis Bitter National Magnet Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 1973.
59. Kelland, D.R., Maxwell, E. and Oberteuffer, J.A.- "High Gradient Magnetic Separation: An Industrial Application of Magnetism," Proceedings of NATO Institute on Superconducting Machines and Devices: Large System Applications, Francis Bitter National Magnet Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 1974.
60. Gaudin, A.M.- "Progress in Magnetic Separation Using High-Intensity High-Gradient Separators," Min. Congr. J., Vol. 60, No. 1, 1974 pp. (2-21).
61. Kelland, D.R.- "Magnetic Separation of Non-Magnetic," Proceedings, 35th Annual Mining Symposium, Duluth, Minn., 1974.
62. Anon.- "Trade Notes" Skillings Min. Rex., 14th Apr. 1973. p.32.
63. Watson, J.H.P., Clark, N.O., and Windle, H.- "A Superconducting Magnetic Separator and Its Application in Improving Ceramic Raw Materials," Proc. 11th Int. Miner. Process. Congr., University di Cagliari, Cagliari, 1975, pp. 785-812.
64. Cohen, H.E. and Good, J.A.- "Principles, Design and Performance of a Superconducting Magnet System for Mineral Separation in Magnetic Fields of High Intensity," Proc. 11th Int. Miner. Process. Congr., University di Cagliari, 1975, pp. 777-793.
65. Israelson, A.F.- "Magnetic Separation of Minerals," Mines Mag., Vol. 211, Sept. 1978.
66. Lantto H.- "Factor Affecting Low Intensity Magnetic Separation," Acta Polytech, Scand., Chem. Incl. Met. Ser., No. 135, 1977.
67. Dobby, G. and Finch, J.A.- "Capture of Mineral Particles in a High Gradient Magnetic Field," Powder Technol., Vol. 17, 1977, pp. 73-82.
68. Murray, H.H.- "High Intensity Magnetic Beneficiation of Industrial Minerals-A Survey," SME/AIME Preprint 76-4-93, 1976.
69. Arellano, M.E. and Zambrana, G.Z. "High Gradient Magnetic Separation Applied to Tin Minerals," IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-14, 1978, pp. 488-490.
70. Aktao, I.Y.- "Mathematical Modelling of High-Gradient Magnetic Separation Devices," IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-13, 1977, pp. 1486-1489.
71. Bartnik, J.A., Zabel, W.H. and Hopstock, D.M.- "On the Production of Iron Ore Superconcentrates by High Intensity Wet Magnetic Separation," Int. J. Miner. Process., Vol. 2, 1975, pp. 117-126.
72. Jacob, W., Brenecke, K. and Wasmuth, H.D.- "Comparative Test for Using Wet High Intensity Magnetic Separation," Proc. 11th Int. Miner. Process. Congr., University di Cagliari, 1975, pp. 337-362.
73. Lawver, J.E., Beebe, R.R. and Hays, R.M.- "New Methods for Beneficiating Semitaconites," Min. Congr. J., Vol. 5, No. 4, Apr. 1965, pp. 69-74.
74. Lawver, J.E. and Hays, R.W.- "A Technical and Economic Appraisal Methods of Beneficiating Mesabi Range Iron Ore." Proc. 11th Int. Miner. Process. Congr., Leningrad, Paper B-3.
75. Hopstock, D.M.- "Wet High Intensity Magnetic Beneficiation of Oxidised Taconites," US Bureau of Mines, RI 8363, 1979.

76. Murray, H.H.- "Beneficiation of Selected Industrial Minerals and Coal by High Intensity Magnetic Separation," IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-12, 1976, pp. 498-502.
77. Ianniceli, J.- "High Intensity High Gradient Magnetic Separation as a New Process Tool," Aquafine Corp., 1978.
78. Trinade, S.G. and Kom, H.H.- "Magnetic Desulfurisation of Coal," IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-9, 1973, pp. 310-313.
79. Freyberger, W.L., Keck, J.W. and Spottiswood, D.J.- "Cleaning of Eastern Bituminous Coals by Fine Grinding Flotation and High Gradient Magnetic Separation," Proc. Symp. on Coal Cleaning," Department of Energy/Environment Protection Agency, 1978.
80. Liu, Y.A. -*Physical Cleaning of Coal : Present and Developing Methods*, Marcel Dekkor, 1982.
81. Tyrell, A.J.- "Magnetic Filtration and Separation," Filer. of Sepn., Vol. 10, No.,2, 1973, pp. 206-210.
82. Delatour, C.- "Magnetic Separation in Water Pollution Control," IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-9, 1973, pp. 314-316.
83. Benson, W.H., Bartnik, J.A. and Rose, G.D.- "Demagnetising Coils and Magnetic Flocculators Used in the Magnetite Beneficiation Industry," Proc. 24th Mining Symp., Minn., 1968, pp. 139-144.
84. Lantto, H.- "The Effect of Magnetic Flocculation on the Beneficiation of Magnetic Materials," Acta Polytechn. Scand. Incl. Met. Ser. No. 133, 1977.
85. Andres, V.- *Magnetohydrodynamic and Magnetohydrostatic Methods of Mineral Separation*, Keter Publishing House, 1976.