บทที่ 1

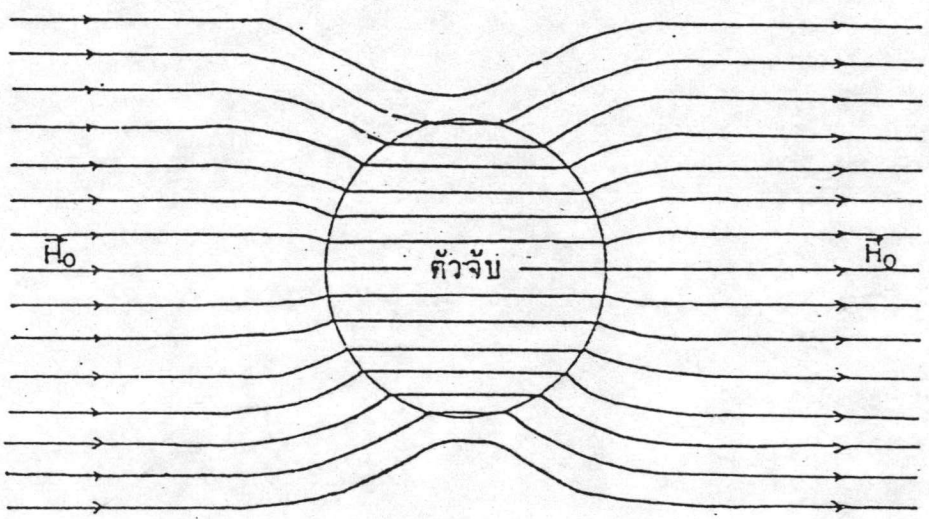
บทนำ

1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของการกรองชนิดแม่เหล็ก

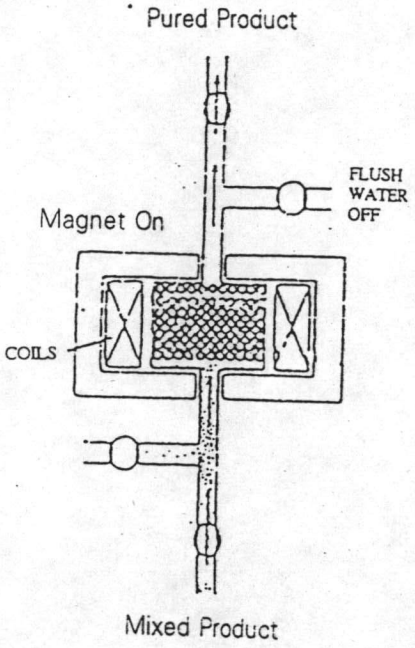
การกรองชนิดแม่เหล็ก (magnetic filtration) เป็นการกรองของไหลชนิดหนึ่งซึ่งสามารถแยกอนุภาคแม่เหล็ก (magnetic particles) ที่ปะปนอยู่ในระบบของไหลออกจากระบบของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้อนุภาคจะมีขนาดเล็กระดับไมครอน ส่วนประกอบหลักในการกรองชนิดแม่เหล็กนี้ คือ ตัวจับอนุภาค (collector) ซึ่งเป็นสารพวกเฟร์โรแมกเนติก หรือพาราแมกเนติกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม หรือทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ไมครอน กระจายอย่างสุ่มในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ (uniform applied magnetic field $\overrightarrow{H_o}$) ทำให้ตัวจับเกิดแมกนิไตเซชัน (magnetization) ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ขณะเดียวกัน เส้นแรงแม่เหล็กจะลู่เข้าหาและโค้งออกจากตัวจับ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เป็นผลให้บริเวณรอบๆ ตัวจับมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อระยะทางสูง (high gradient magnetic field) เกิดขึ้น (R. Gerber และ R.R. Briss , 1983) ทำให้แรงแม่เหล็กบริเวณรอบๆตัวจับมีค่าสูงมากตามไปด้วย (แรงแม่เหล็กเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $\vec{\nabla}\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right)$ เมื่อ $\vec{H}$ เป็นสนามแม่เหล็กบริเวณ รอบๆตัวจับ) ซึ่งจะดึงอนุภาคแม่เหล็กในระบบของไหลให้มาติดกับตัวจับ

พิจารณาตัวอย่างอันหนึ่งในการออกแบบตัวกรองชนิดแม่เหล็ก คือ มีตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสารพาราแมกเนติกวางกระจายอย่างสุ่มอยู่ในกล่องโลหะสเตนเลสซึ่งไม่ใช่สารแม่เหล็ก (nonmagnetic stainless steel)และมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอจากขดลวดโซลินอยด์ผ่านซึ่งแสดงเป็นวัฏจักรได้ดังรูปที่ 1.2 (ก) และ 1.2 (ข) เรียกวิธีนี้ว่า วิธีการแยกด้วยสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สูง (high gradient magnetic separation , HGMS)

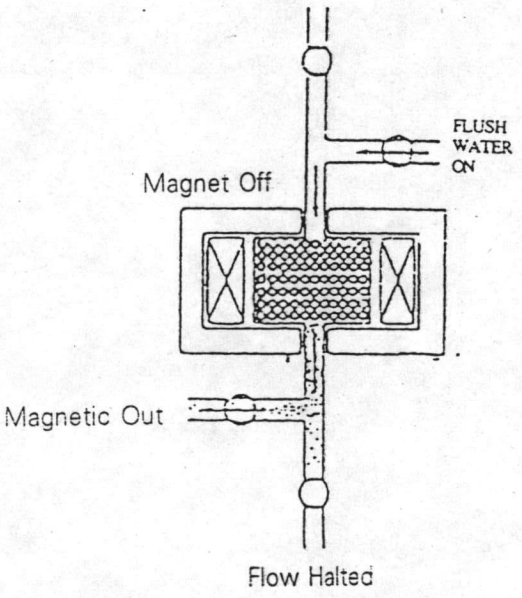
ในรูปที่ 1.2 (ก) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคแม่เหล็กออกจากระบบของไหล ซึ่งในกระบวนการนี้ได้ใส่สนามแม่เหล็กให้แก่ตัวกรอง โดยเปิดสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์



รูปที่ 1.1 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณรอบๆตัวจับทรงกลมขณะที่ตัวกรองอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\overrightarrow{H_o}$)



1.2 (ก)

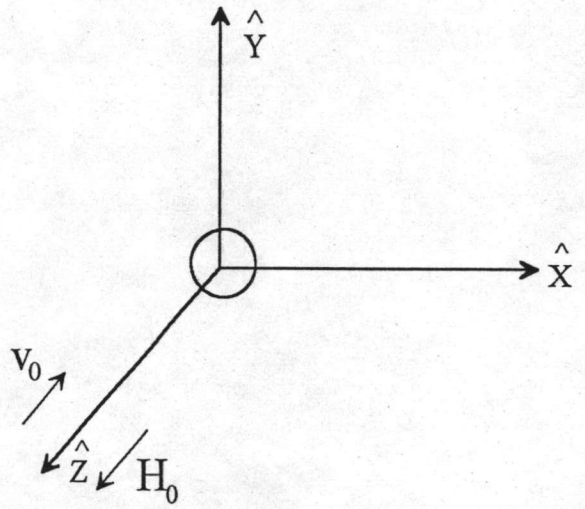


1.2 (ข)

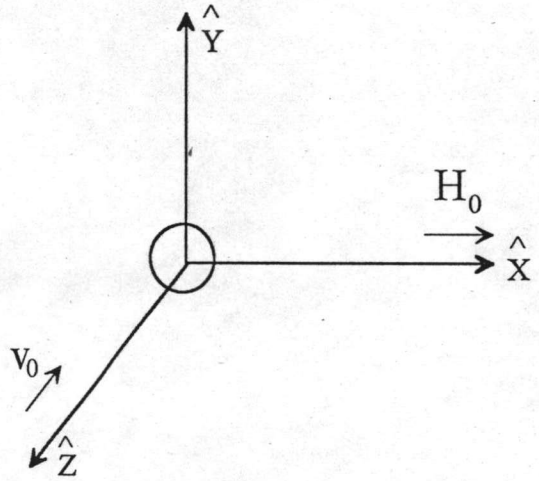
รูปที่ 1.2 แสดงวัฏจักรการแยกด้วยสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สูง (R. Gerber , 1983)

(ก) กระบวนการแยกอนุภาคแม่เหล็กออกจากระบบของไหล

(ข) กระบวนการชะล้างเอาอนุภาคแม่เหล็กที่ติดอยู่กับตัวกรองออก



1.3 (ก)



1.3 (ข)

รูปที่ 1.3 แสดงประเภทของการกรองชนิดแม่เหล็ก

(ก) การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว ($\overrightarrow{v_o} // \overrightarrow{H_o}$)

(ข) การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง ($\overrightarrow{v_o} \perp \overrightarrow{H_o}$)

ทำให้อนุภาคแม่เหล็กที่อยู่ในบริเวณพื้นที่การจับของตัวกรอง ถูกจับด้วยตัวจับในตัวกรอง ในส่วนของกระบวนการ เริ่มต้นจากการให้ของไหลผ่านเข้ามาทางด้านล่างของตัวกรองและผ่านตัวกรองออกไป ได้ของไหลที่มีสิ่งเจือปนน้อยมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กแต่ละแบบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ของไหลเหล่านี้จะถูกปล่อยออกทางด้านบนของตัวกรอง เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการนี้

ในรูปที่ 1.2 (ข) เป็นกระบวนการชะล้างเอาอนุภาคแม่เหล็กที่ติดอยู่กับตัวกรองออกจากตัวกรอง ซึ่งในกระบวนการนี้จะปิดท่อที่ปล่อยของไหลเข้าสู่ระบบตัวกรองและท่อที่ปล่อยของไหลออกจากระบบตัวกรองไว้ พร้อมทั้งตัดสนามแม่เหล็กออกจากตัวกรอง และปล่อยให้น้ำจากท่อด้านบนขวา ออกมาชะล้างอนุภาคแม่เหล็กที่ติดอยู่กับตัวจับในตัวกรองนี้ ออกไปทางท่อด้านล่างซ้าย เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ แล้วกลับมาเริ่มต้นที่กระบวนการในรูปที่ 1.2 (ก) อีก ทำซ้ำไปเรื่อยๆเป็นวัฏจักร เรียกวัฏจักรนี้ว่า วัฏจักรการแยกด้วยสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สูง(high gradient magnetic separation cycle)

1.2 ประเภทของการกรองชนิดแม่เหล็ก

จากความสัมพันธ์ระหว่างทิศของความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กขณะที่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรอง ($\vec{v_o}$) กับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\vec{H_o}$)ได้แบ่งการกรองชนิดแม่เหล็กออกเป็น 2 แบบ คือ การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวและการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง โดยแยกพิจารณาออกเป็นข้อๆได้ ดังนี้

ก. การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว

การกรองชนิดแม่เหล็กแบบนี้ ทิศของความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กขณะที่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรอง จัดให้อยู่ในทิศที่ขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก และ เรียกตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบนี้ว่า ตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ก)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

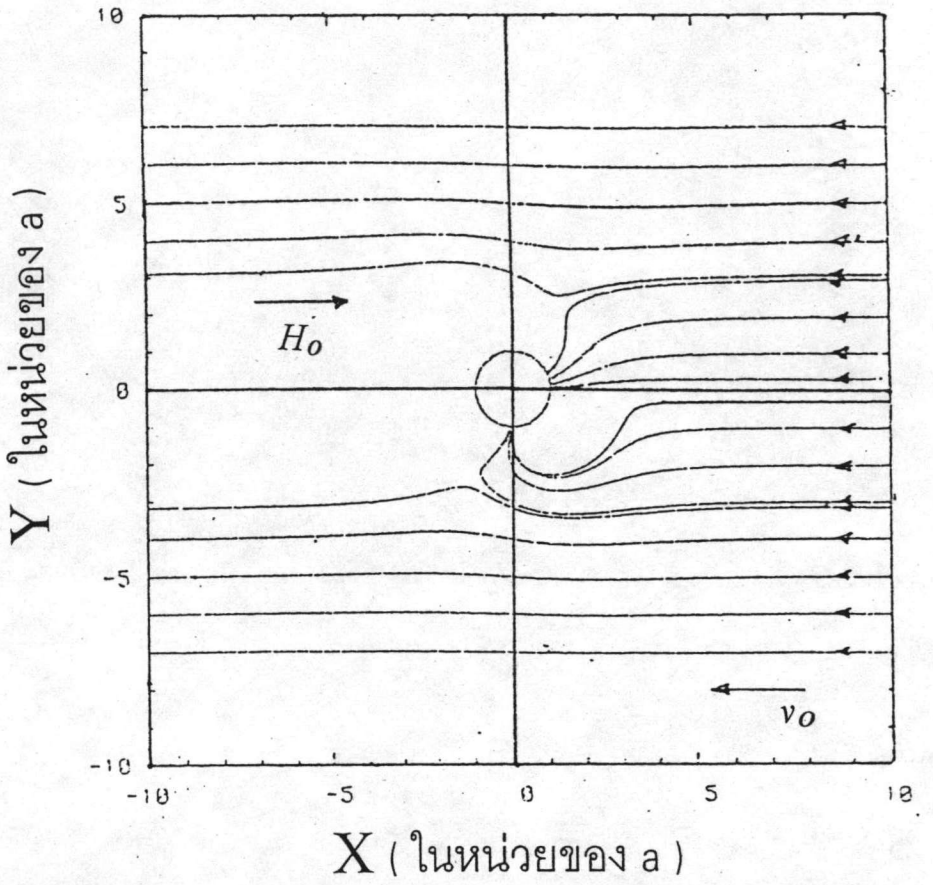
ข. การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง

การกรองชนิดแม่เหล็กแบบนี้ ทิศของความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กขณะที่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรอง จัดให้อยู่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอก และ เรียกตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบนี้ว่า ตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ข)

1.3 ความสำคัญของการกรองชนิดแม่เหล็ก

การกรองชนิดแม่เหล็ก เป็นการกรองที่เหมาะสำหรับการกรองระบบของไหลที่มีอนุภาคขนาดเล็กปลอมปนอยู่ เช่น การแยกสินแร่ การกรองน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเติมสารพวกเฟอร์รัสออกไซด์ในรูปคอลลอยด์ลงไป เพื่อให้อนุภาคที่ปะปนมากับระบบของไหลให้มีสมบัติเช่นเดียวกันกับสารพวกพาราแมกเนติก รวมทั้งการกรองหรือแยกของปริมาณน้อยๆ เช่น การแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงในการวิจัยด้านชีวภาพ อย่างไรก็ตามการใช้งานในลักษณะต่างๆที่กล่าวถึงยังต้องพิจารณาเลือกใช้ประเภทของการกรองให้เหมาะสมด้วย เช่น การแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงควรใช้การกรองชนิดแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามยาว เนื่องจากไม่ทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงเสีย

เพื่อที่จะเลือกใช้ตัวกรองชนิดแม่เหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละอย่างให้ได้ประสิทธิภาพตามต้องการมากที่สุด จึงได้มีการศึกษาและวิจัยสมบัติของตัวกรองชนิดแม่เหล็กแต่ละประเภทที่ใช้กรองอนุภาคแม่เหล็กที่เป็นทั้งแบบพาราแมกเนติกและไดอะแมกเนติกในระบบของไหล ถ้าพิจารณาจากค่าเลขเรโนลด์ (Renolds number , Re) ซึ่ง $Re = \rho v_o a / \eta$ (D.J. Tritton , 1979) เมื่อ ρ , v_o , η และ a คือ ความหนาแน่นของระบบของไหล (fluid density) , ความเร็วเริ่มต้นขณะเคลื่อนที่เข้ามาของอนุภาคในระบบของไหล (entrance velocity) , ความหนืด (viscosity) และรัศมีของตัวจับทรงกลม ตามลำดับ สามารถแบ่งการไหลของระบบของไหลออกเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบโพเทนเชียล(potential flow) ซึ่งในกรณีนี้ Re มีค่าสูง และการไหลแบบแลมินาร์ (laminar flow) ในกรณีนี้ Re มีค่าน้อยมาก ($Re < 1$) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1.4 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กของตัวจับทรงกลมเดี่ยวในระบบของไหลที่ไหลแบบโพเทนเชียล (potential flow) เข้ามาในตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งบนตัวจับทรงกลมที่อนุภาคเหล่านี้ถูกจับไว้ สำหรับอนุภาคแม่แหล็กแบบพาราแมกเนติก (ส่วนบน) และไดอะแมกเนติก (ส่วนล่าง) กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ คือ $v_{oa} = -20\ s^{-1}$, $K_s = 0.8$ และ $v_{ma} = \pm 828\ s^{-1}$

1.4 ผลงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกรองชนิดแม่เหล็ก

การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรองชนิดแม่เหล็ก มีทั้งแบบการคำนวณทางทฤษฎีอย่างเดียว และแบบการคำนวณทางทฤษฎีควบคู่ไปกับการทดลองด้วยแล้วแต่จุดมุ่งหมายในการวิจัยของแต่ละคนหรือคณะ

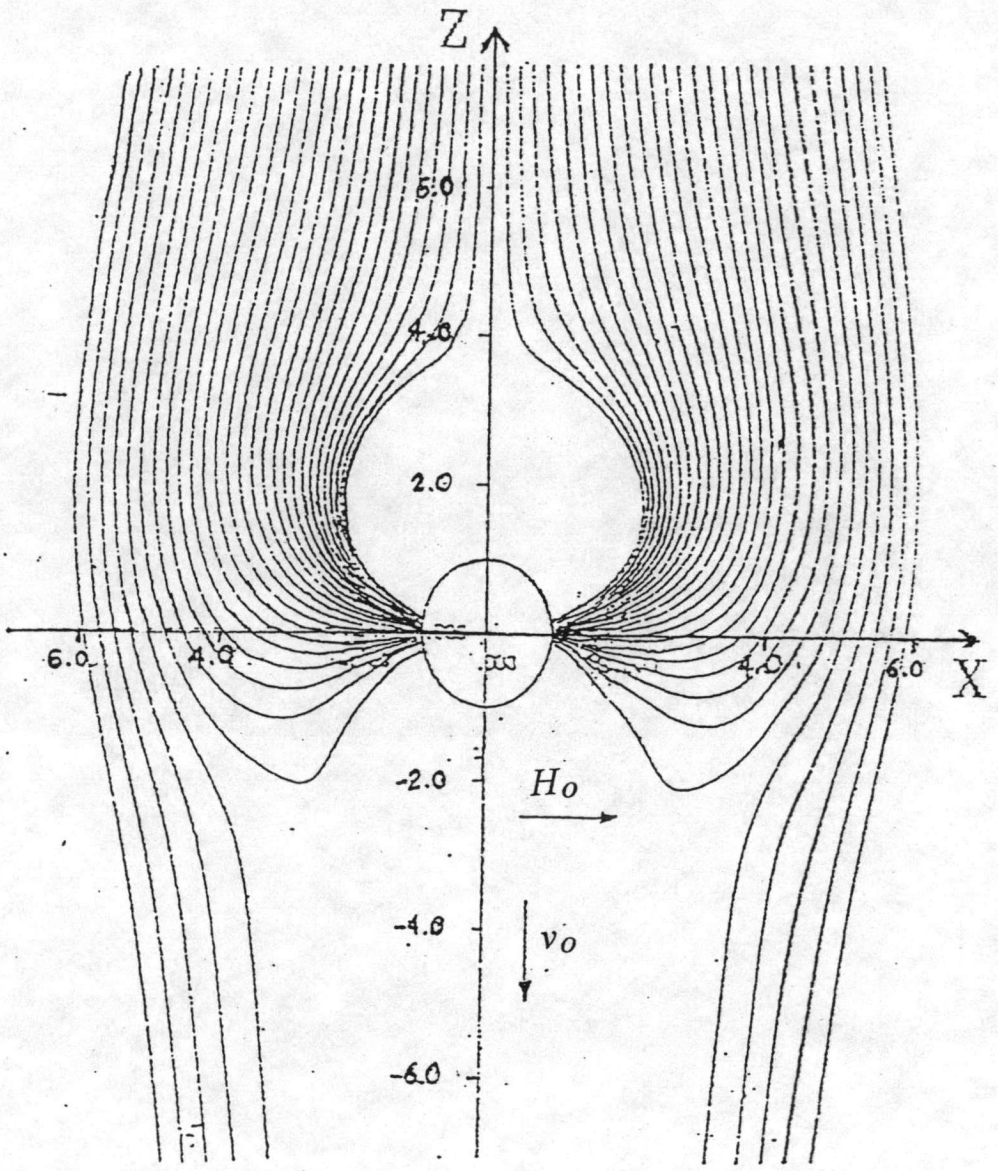
ในปี ค.ศ. 1980 R. Briss, R. Gerber และ Maria B. Howard ได้ศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก และไดอะแมกเนติก ขณะที่เคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว พื้นที่การจับอนุภาคแม่เหล็ก (capture area) ตลอดจนตำแหน่งส่วนใหญ่บนผิวตัวจับทรงกลมที่อนุภาคแม่เหล็กเหล่านี้ถูกจับไว้ ซึ่งพบว่า สำหรับอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก ตำแหน่งส่วนใหญ่บนผิวตัวจับทรงกลมที่อนุภาคเหล่านี้ถูกจับไว้จะอยู่บริเวณผิวด้านหน้าของตัวจับทรงกลม แต่สำหรับอนุภาคแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติก ตำแหน่งส่วนใหญ่บนผิวตัวจับทรงกลมที่อนุภาคเหล่านี้ถูกจับไว้ จะอยู่บริเวณผิวด้านข้างของตัวจับทรงกลม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.4

ต่อมา F. J. Friedlaender, R. Gerber, W. Kurz และ R. R. Birss (1981) ได้ศึกษาการจับอนุภาคแม่เหล็กโดยทรงกลมเดี่ยวในสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สูง ซึ่งได้นำไปประยุกต์แยกอนุภาคขนาดเล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนออกจากระบบของไหล โดยศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กในระบบของไหลที่ไหลแบบโพเทนเชียล และแบบแลมินาร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวกรองคิดจากทรงกลมเดี่ยวเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงผลของสนามแม่เหล็กจากทรงกลมข้างเคียง ในงานวิจัยของ F. J.Friedlaender และคณะ นี้ ได้ทำการทดลองพร้อมกับการคำนวณเพื่อเปรียบผลทางทฤษฎีกับผลการทดลอง ในกรณีที่อนุภาคแม่เหล็กเป็นแบบพาราแมกเนติกและไดอะแมกเนติก ในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวและแบบตามขวาง ซึ่งพบว่า การไหลแบบแลมินาร์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการไหลแบบโพเทนเชียล

ในปี ค.ศ. 1984 C. Moyer, M. Natenapit และ Sigurds Srajs ได้ศึกษาการกรองชนิดแม่เหล็กของอนุภาคในระบบของไหลที่ไหลแบบแลมินาร์ผ่านกลุ่มทรงกลมที่เป็นส่วนประกอบของตัวกรองทฤษฎีการจับอนุภาคแม่เหล็กของกลุ่มทรงกลมในลักษณะนี้ ใช้เงื่อนไขการคำนวณความเร็วของของไหลตามแบบจำลองของฮัปเปิล (Happel 's model) และพิจารณาว่า แต่ละทรงกลมที่ใช้ในตัวกรองนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ได้คำนึงถึงผลของสนามแม่เหล็กจากทรงกลมข้างเคียงด้วย กล่าวคือ กำหนดให้กลุ่มทรงกลมแทนด้วยทรงกลมประกอบที่มีรัศมี a ซึ่งล้อมรอบไปด้วยเซลล์ของไหล (fluid shell) ที่มีรัศมี b บนตัวกลางยังผล (effective medium) โดย

ความหนาแน่นของกลุ่มทรงกลมหาได้จากสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาค (packing fraction , γ^3 เมื่อ $\gamma = \frac{a}{b}$) ในการหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกลุ่มทรงกลมในตัวกรองนั้น C. Moyer และคณะ หาได้จากวิธีตัวกลางยังผล (effective medium treatment) ซึ่งได้ศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกกับไดอะแมกเนติก ในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวและตามขวาง และยังได้ศึกษาประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว (efficiency of longitudinal mode magnetic filtration) สำหรับกรณีการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง ได้ศึกษาเฉพาะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีระนาบของความเร็วเริ่มต้นขณะเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรอง (incident plane) อยู่ในระนาบเดียวกับระนาบสมมาตรหลัก (ระนาบของสนามแม่เหล็กภายนอก คือ XZ ที่แสดงในรูปที่ 1.5) ซึ่งในกรณีนี้ อนุภาคจะเคลื่อนที่อยู่ในระนาบการเคลื่อนที่เดิม (XZ) ดังแสดงในรูปที่ 1.5

ต่อมา M. Natenapit (1993) ได้ศึกษาการกรองชนิดแม่เหล็กของอนุภาคในระบบของไหลที่ไหลแบบแลมินาร์โดยวิธีตัวกลางยังผล (effective medium treatment, EMT)ในกรณีนี้ความเร็วของระบบของไหลคำนวณจากทฤษฎีตัวกลางยังผล ซึ่งให้ผลการคำนวณรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็ก (capture radius) ที่สอดคล้องและสนับสนุนผลการคำนวณตามแบบจำลองของฮัปเปิลในงานวิจัยของ C. Moyer และคณะ สำหรับกรณีที่สัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็กมีค่าน้อยๆ ($\gamma \leq 0.4$ โดยประมาณ) และสำหรับกรณีที่ $\gamma > 0.4$ โดยประมาณ รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กโดยทฤษฎี EMT มีค่าน้อยกว่า รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กโดยทฤษฎีของฮัปเปิล และที่ค่า $\gamma \approx 0.2$ รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กสำหรับอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวางและรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กสำหรับอนุภาคแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติกในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว จะมีค่ามากสุด และยังได้ศึกษาประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว โดยมีสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก (γ^3) และสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\overrightarrow{H_o}$) เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งพบว่าเมื่อสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วเข้าสู่ค่าคงที่อิ่มตัว (saturation) ค่าคงที่อิ่มตัวจะมีค่าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความหนาของระบบตัวกรอง



รูปที่ 1.5 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก เมื่ออนุภาคขณะเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรองมีระนาบของความเร็วเริ่มต้น (ระนาบ $\vec{v_o}$) อยู่ในระนาบสมมาตรหลัก (ระนาบ XZ ในรูปที่แสดง) กำหนดให้ พารามิเตอร์ที่ใช้ คือ $\nu_{oa} = -6.65\ s^{-1}$, $K_s = 0.58$ และ $\nu_{ma} = 571.52\ s^{-1}$

1.5 งานวิจัยในส่วนที่เป็นวิทยานิพนธ์

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ทำต่อเนื่องทางทฤษฎีกับงานวิจัยของ C. Moyer และคณะ(1984) แต่จะเน้นไปที่การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรอง ซึ่งต้องศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กขณะเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรองในสามมิติ โดยพิจารณาอนุภาคที่เริ่มเข้ามาในระบบตัวกรองทีละระนาบ (กำหนดให้ขนานกับทิศของความเร็วเริ่มต้นของอนุภาค) เรียกระนาบนี้ว่า ระนาบของความเร็วเริ่มต้น ซึ่งมุมระหว่างระนาบของความเร็วเริ่มต้นกับระนาบสมมาตรหลัก (φ_o) แปรค่าจาก 0 ถึง π สำหรับอนุภาคที่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในระบบตัวกรองมีมุม $\varphi_o \neq 0$ อนุภาคจะเคลื่อนที่ในสามมิติ และสำหรับอนุภาคที่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในระบบตัวกรองมีมุม $\varphi_o = 0$ อนุภาคยังคงเคลื่อนที่ในระนาบเดิมซึ่งพิจารณาให้เป็นการเคลื่อนที่แบบสองมิติ ตำแหน่งของอนุภาคแม่เหล็กเหล่านี้ขณะใดๆ คำนวณจากวิธีรังกัตตาอันดับที่ 4 (the fourth-order Runge-Kutta method) ซึ่งแสดงในพิกัดเชิงขั้วทรงกลม(spherical polar coordinate) ทำให้ทราบเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กเหล่านี้ จากข้อมูลที่ได้ สามารถคำนวณหารัศมีการจับอนุภาค (capture radius, r_c) ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก (γ^3) สนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\overrightarrow{H_o}$) และมุมระหว่างระนาบของความเร็วเริ่มต้นกับระนาบสมมาตรหลัก (φ_o) จากรัศมีการจับอนุภาคที่ได้ นำมาคำนวณหาพื้นที่การจับอนุภาคแม่เหล็ก (capture area , A_c) โดยวิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข ซึ่งแตกต่างกับการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว กล่าวคือ ระบบตัวกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว มีแรงแม่เหล็กสมมาตร ไม่ขึ้นอยู่กับมุม φ_o ดังนั้น รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กจะเท่ากันหมดทุกค่ามุม พื้นที่การจับที่ได้จึงมีรูปร่างเป็นแบบวงกลม ทำให้การหาพื้นที่การจับสามารถคำนวณจากสูตรพื้นที่ของวงกลม ($A_c = \pi r_c^2$) ได้โดยตรง ทำให้สะดวกต่อการคำนวณหาพื้นที่การจับนี้

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวางซึ่งเป็นงานวิจัยในครั้งนี้ จะศึกษาถึงผลของสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคซึ่งจะบอกถึงความหนาแน่นของกลุ่มตัวจับทรงกลมในตัวกรอง และผลของสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอที่มีต่อประสิทธิภาพในการกรองชนิดแม่เหล็กนี้ ในกรณีที่อนุภาคที่เข้ามากับของไหล เป็นแบบพาราแมกเนติก และไดอะแมกเนติก ในระบบของไหลที่ไหลแบบแลมินาร์ ผ่านกลุ่มทรงกลมที่กระจายอย่างสุ่มในตัวกรอง การคำนวณทางทฤษฎีที่ได้จากงานวิจัยเรื่องนี้ ทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบตัวกรองชนิดแม่เหล็กให้มีสมบัติตามต้องการ