บทที่ 1

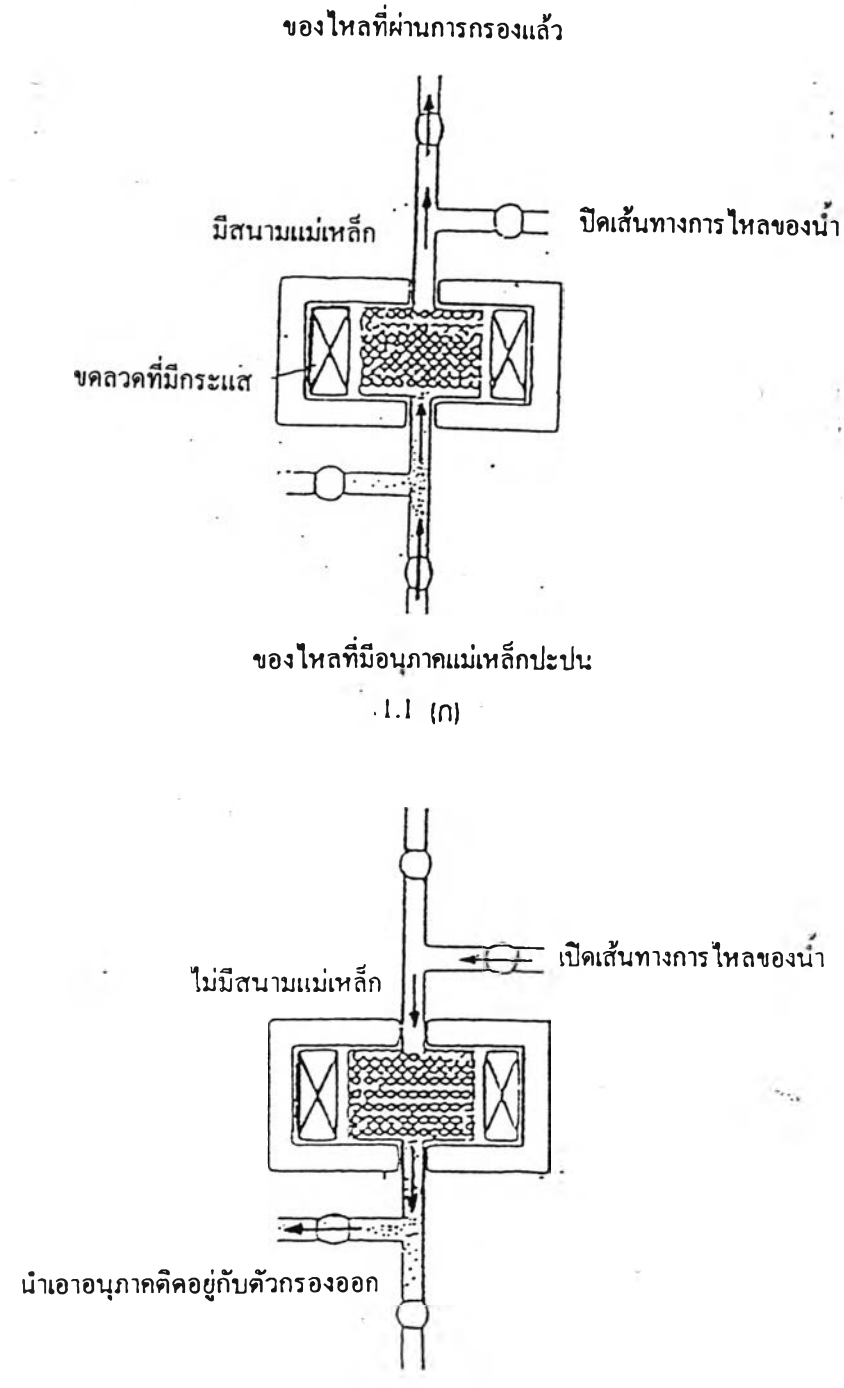
บทนำ

การกรองชนิดแม่เหล็ก (magnetic filtration) เป็นการกรองของไหลชนิดหนึ่งซึ่งสามารถแยกอนุภาคแม่เหล็ก (magnetic particles) ที่ปะปนอยู่ในระบบของไหลออกจากระบบของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้อนุภาคจะมีขนาดเล็กระดับไมครอน กระบวนการแยกอนุภาคแม่เหล็กออกจากระบบของไหลโดยวิธีการกรองชนิดแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ก และ 1.1 ข ส่วนประกอบหลักในการกรองชนิดแม่เหล็ก คือ ตัวจับอนุภาค (collector) ซึ่งเป็นสารพวกเฟร์โรแมกเนติกหรือพาราแมกเนติกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ไมครอนกระจายอย่างสุ่มในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ (uniform applied magnetic field ,$\vec{H}_o$) รูปที่ 1.2 แสดงภาคตัดขวางของทรงกระบอกซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจัดให้ตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก ทำให้ตัวจับเกิดแมกนิไตเซชัน (magnetization) ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก และเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวจับทรงกระบอกดูดเข้าหาด้านหน้าและโค้งออกจากตัวจับอีกด้านหนึ่ง ทำให้รอบตัวจับทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อระยะทางสูง (high gradient magnetic field, HGMS) จากการจัดให้ $\vec{H}_o$ ตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก ทำให้แรงแม่เหล็กบริเวณรอบๆตัวจับมีค่าสูงตามไปด้วย (แรงแม่เหล็กเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ ∇H^2 เมื่อ H เป็นสนามแม่เหล็กรอบตัวจับ) ซึ่งจะดึงอนุภาคแม่เหล็กในระบบของไหลให้มาติดกับตัวจับ

1.1 ประเภทของการกรองชนิดแม่เหล็ก

การกรองชนิดแม่เหล็ก เป็นการกรองที่เหมาะสำหรับการกรองระบบของไหลที่มีอนุภาคขนาดเล็กปะปนอยู่ เช่น การแยกสินแร่ การกรองน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (โดยเติมสารพวกเฟอร์รัสออกไซด์ในรูปคอลลอยด์ลงไปเพื่อให้อนุภาคที่ปะปนมากับระบบของไหลให้มีสมบัติเช่นเดียวกันกับสารพวกพาราแมกเนติกหรือไดอะแมกเนติก)รวมทั้งการกรองหรือแยกของปริมาณน้อยๆ เช่น การแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงในการวิจัยด้านชีวภาพ สำหรับประเภทของการกรองชนิดแม่เหล็กทรงกระบอกมี 3 แบบ คือ แบบตามยาว (longitudinal mode) การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวคือ การกรองที่ความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กที่เข้ามาในตัวกรอง ($\vec{v}_o$) จัดให้อยู่ในทิศที่ขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{H}_o$) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ก) แบบตาม

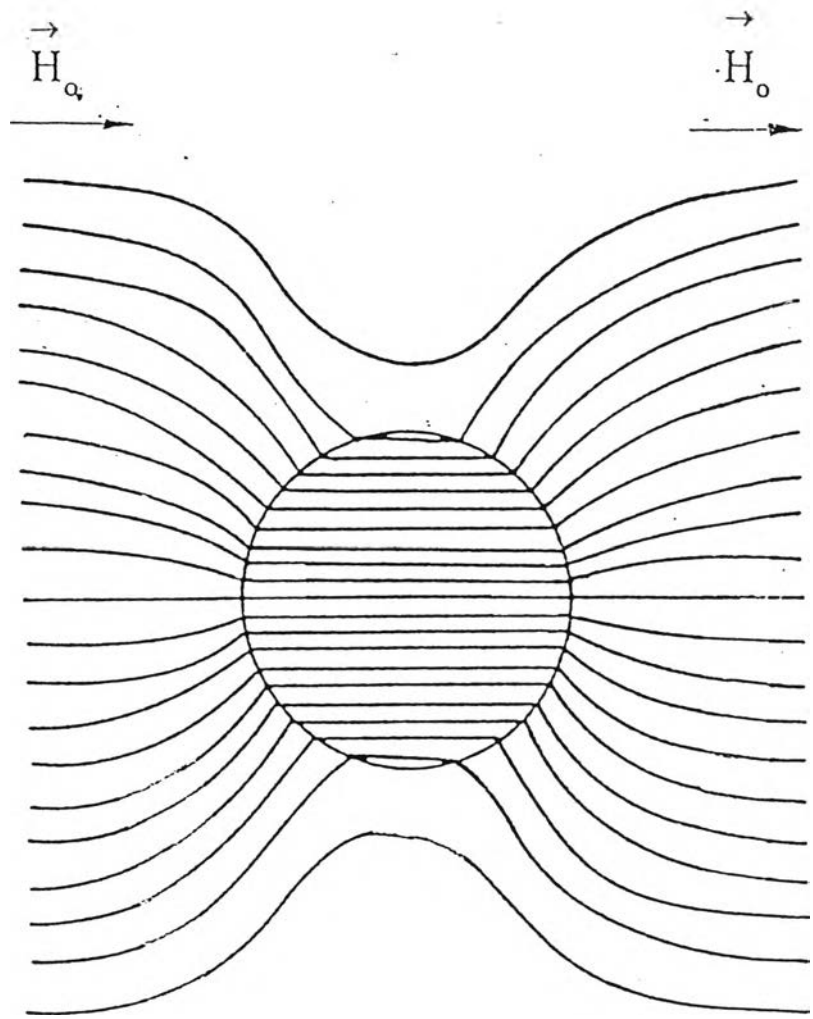
ขวาง (transverse mode) สำหรับการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวางคือ การกรองที่ความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กที่เข้ามาในตัวกรอง $(\vec{v}_o)$ จัดให้อยู่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอก $(\vec{H}_o)$ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ข) และแบบตามแนวแกน (axial mode) สำหรับแบบตามแนวแกน ความเร็วเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กที่เข้ามาในตัวกรอง $(\vec{v}_o)$ ขนานกับทิศของตัวจับ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ค) อย่างไรก็ตามการใช้งานในลักษณะต่างๆที่กล่าวถึงจะต้องพิจารณาเลือกใช้ประเภทของการกรองให้เหมาะสมด้วย เช่น การแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงในการวิจัยด้านชีวภาพควรใช้การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามแนวแกน การกรองน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมควรใช้การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบตามยาว



รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการแยกด้วยสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง (R. Gerber,. 1983)

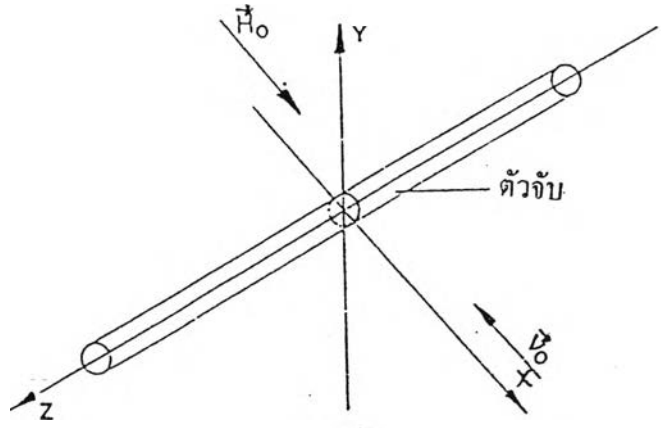
(ก) กระบวนการแยกอนุภาคแม่เหล็กออกจากระบบของไหล

(ข) กระบวนการชะล้างเอาอนุภาคแม่เหล็กที่ติดอยู่กับตัวกรองออก

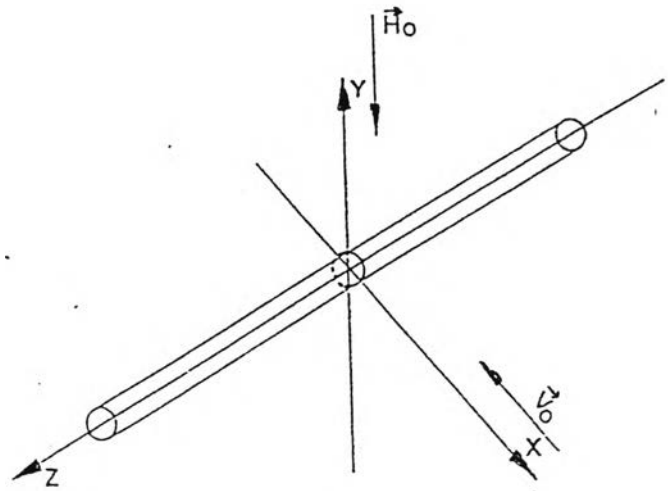


รูปที่ 1.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณรอบๆตัวจับขณะที่ตัวกรองอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\vec{H}_o$)

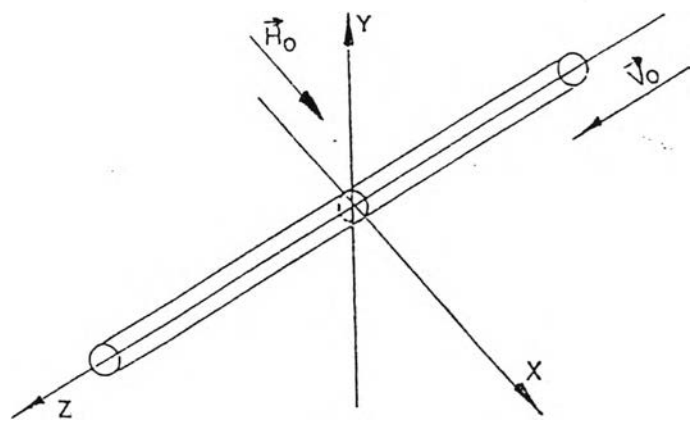
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1.3 (ก)



1.3 (ข)



1.3 (ค)

รูปที่ 1.3 แสดงประเภทของการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตัวจับทรงกระบอก

(ก) การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว ($\vec{V}_o // \vec{H}_o$)

(ข) การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง ($\vec{V}_o \perp \vec{H}_o$)

การกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามแนวแกน ($\vec{V}_o //$ กับแกนทรงกระบอกและ $\perp \vec{H}_o$)

ในปี ค.ศ. 1973 J.H.P. Watson ศึกษาการจับอนุภาคแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติกในตัวกรองแม่เหล็กแบบทรงกระบอกชนิดตามยาว สนามแม่เหล็กที่ใช้คำนวณหาสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กคิดจากตัวจับเพียงอันเดียวไม่รวมผลจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากตัวจับข้างเคียง เรียกสนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว (single collector model) ดังได้แสดงรายละเอียดในบทที่ 2 ซึ่งระบบของไหลที่ศึกษาเป็นแบบโพเทนเชียล (potential flow) ระบบของไหลแบบโพเทนเชียล หมายถึงของไหลที่มีความเร็วสูง ความหนืดต่ำ โดยที่ค่าเลขเรโนล (Renolds number , Re) มีค่าสูง ซึ่ง $Re = \rho v_o a / \eta$ เมื่อ ρ , v_o , η และ a คือ ความหนาแน่นของของไหล (fluid density). ความเร็วเริ่มต้นขณะเคลื่อนที่เข้ามาของของไหล (fluid entrance velocity). ความหนืด (viscosity) และรัศมีของตัวจับ ตามลำดับ ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วเนื่องจากแรงแม่เหล็ก (v_m) ต่อความเร็วเริ่มต้นขณะเคลื่อนที่เข้ามาของอนุภาคในระบบของไหล (v_o) กับ รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็ก (r_c) นิยามรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กกำหนดจากเส้นทางเดินของอนุภาคเส้นสุดท้ายที่อนุภาคถูกจับ (นับจากแนวแกนของตัวจับ อนุภาคที่ตั้งต้นจากตำแหน่งใดๆนอกรัศมีการจับจะผ่านตัวจับไปโดยไม่ถูกจับ สำหรับอนุภาคที่ตั้งต้นจากตำแหน่งใดๆภายในรัศมีการจับจะถูกจับเสมอ) แสดงดังรูปที่ 1.4 พบว่าเมื่อ v_m/v_o มีค่ามากขึ้น r_c จะมีค่ามากขึ้นด้วยและ r_c จะมีค่ามากขึ้นตลอดทางเดียวซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 1.5 สำหรับบทความของ J.H.P. Watson บทความนี้ได้รับการอ้างอิงมากนับถึงปัจจุบันนี้ และเป็นทฤษฎีพื้นฐานแบบฉบับที่เรียกได้ว่าเป็นต้นแบบงานวิจัยการแยกโดยสนามแม่เหล็ก เกรเดียนต์สูง (HGMS)

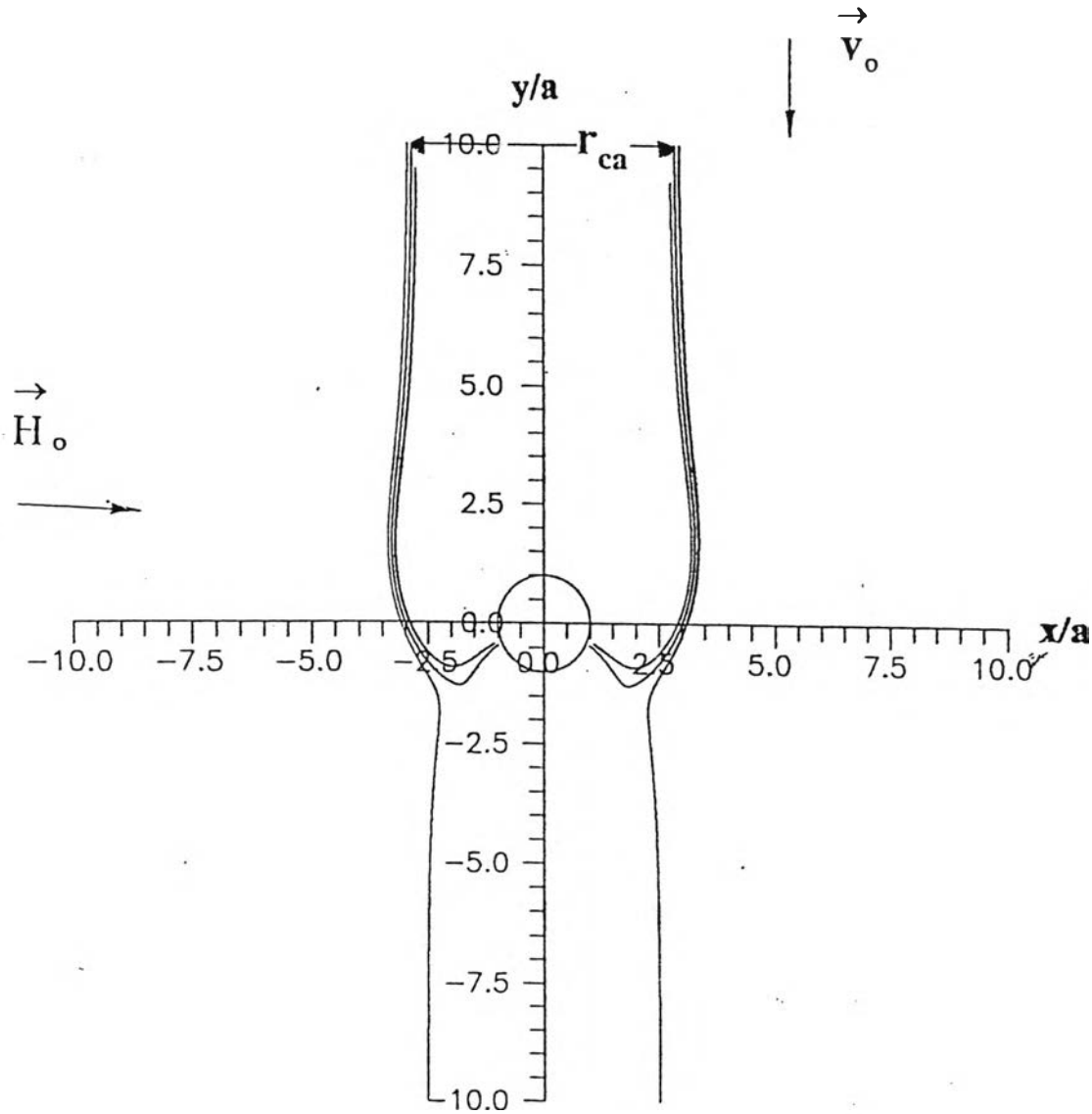
ต่อมาในปี ค.ศ. 1975 J.H.P. Watson ได้ศึกษาการจับอนุภาคแม่เหล็กสำหรับตัวจับชนิดแม่เหล็กแบบทรงกระบอกและ กรณีความเร็วของของไหลซึ่งเริ่มต้นเข้ามาในระบบตัวกรองทำมุม α ใดๆกับสนามแม่เหล็กภายนอก (แสดงดังในรูปที่ 1.6) โดยสนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง v_m/v_o กับ r_c โดยพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบการจับอนุภาคแม่เหล็กคือค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K_s) สำหรับค่า K_s เป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งจะได้กล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 3 และบทที่ 4 ต่อไป สำหรับ v_m/v_o มีค่าน้อยพบว่าถ้า K_s มาก รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กทั้งกรณีการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวและแบบตามขวางจะมากกว่าเมื่อ K_s มีค่าน้อยๆ และเมื่อ $v_m/v_o \geq 10$ พบว่า K_s มีค่ามากและ K_s มีค่าน้อยรัศมีการจับอนุภาคจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ต่อมาในปี คศ. 1988 M. Natenapit ได้เสนอทฤษฎีตัวกลางยังผล (effective medium treatment, EMT) วิธีตัวกลางยังผล เป็นวิธีใช้ประมาณสนามแม่เหล็กในระบบแม่เหล็กที่กระจายอย่างสุ่ม สำหรับกลุ่มทรงกระบอกแม่เหล็กที่มีแกนขนานกันกระจายอย่างสุ่มในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ งานอื่นๆที่ประยุกต์สนามแม่เหล็กยังผล เช่น ในปี คศ. 1993 ,

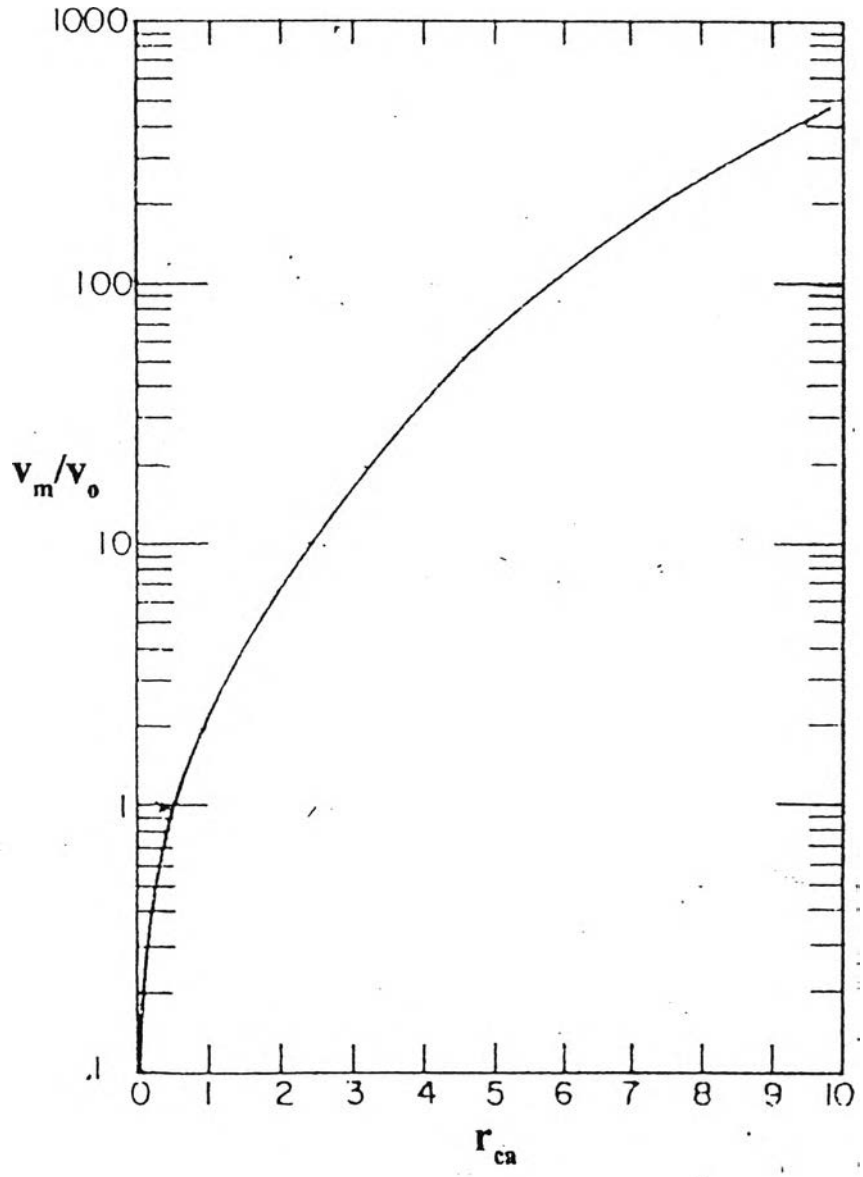
M. Natenapit ได้ศึกษาการกรองชนิดแม่เหล็กของอนุภาคในระบบของไหลที่ไหลแบบแลมินาร์ (laminar flow) การไหลแบบแลมินาร์ หมายถึงการไหลในกรณีที่มีค่าเลขเรโนล Re < 1 วิธีตัวกลางยังผลให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องและสนับสนุนผลการคำนวณตามแบบจำลองของฮัพเพิล (Happel's model) ในงานวิจัยของ C. Moyer และคณะ (ปี ค.ศ. 1984) สำหรับกรณีสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็กมีค่าน้อย ($F \leq 0.4$ โดยประมาณ) และสำหรับกรณีที่ $F > 0.4$ โดยประมาณ รัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กโดยทฤษฎี EMT มีค่าน้อยกว่า รัศมีการจับอนุภาคเหล็กโดยทฤษฎีของฮัปเปิล สำหรับกรณีรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กกรณีอนุภาคแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวางและรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็กกรณีอนุภาคแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติกในการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว จะมีค่ารัศมีการจับอนุภาคมากที่สุดอยู่ที่ค่า $F \approx 0.2$ และยังได้ศึกษาประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาวโดยมีสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก (F) และสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ (H_o) เป็นพารามิเตอร์ พบว่าเมื่อสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วเข้าสู่ค่าคงที่ สำหรับค่าคงที่จะมีค่าใกล้ 100 เปอร์เซนต์เมื่อเพิ่มความหนาระบบตัวกรองให้มากพอ

1.3 งานวิจัยในส่วนที่เป็นวิทยานิพนธ์

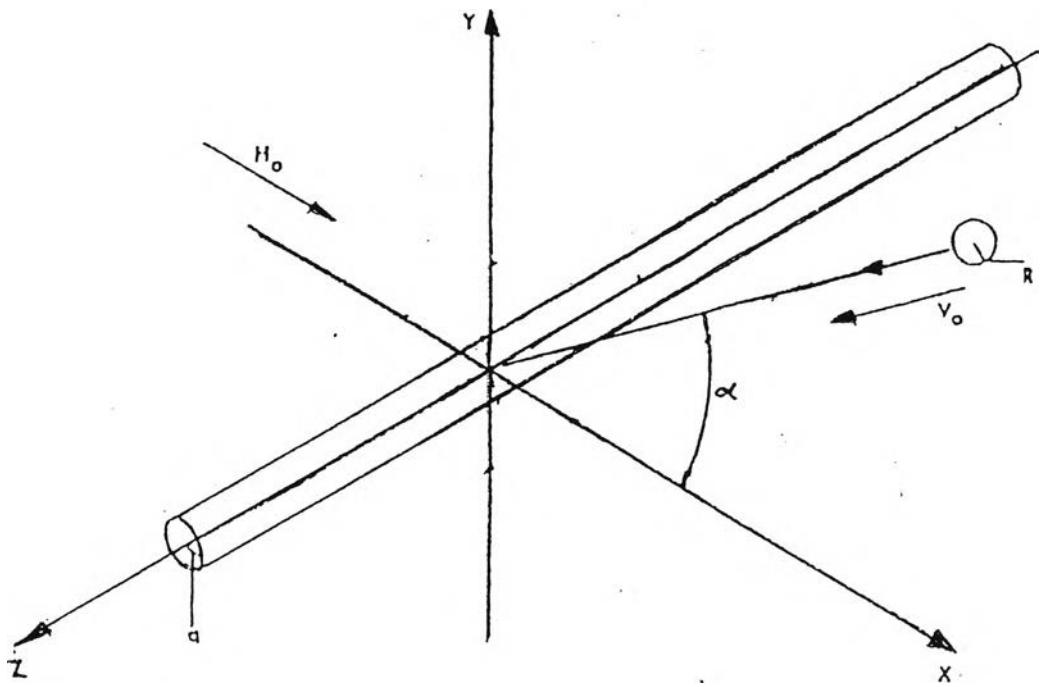
การวิจัยนี้เพื่อศึกษารัศมีจับอนุภาคแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติกที่คำนวณโดยใช้สนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว กับที่คำนวณโดยสนามแม่เหล็กยังผลว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนระหว่างความเร็วเนื่องจากแรงแม่เหล็ก (v_m) ต่อความเร็วของอนุภาคขณะเริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในระบบตัวกรอง (v_o) สัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก (F) ค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K_c) พื้นที่การจับอนุภาคแม่เหล็ก (capture area , A_c) พื้นที่การจับอนุภาคแม่เหล็กคือพื้นที่ที่อนุภาคแม่เหล็กเริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในระบบตัวกรองและอยู่ภายในรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็ก รวมถึงการหาประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็ก ($\in$) ทั้งกรณีการกรองชนิดแม่เหล็กแบบทรงกระบอกตามยาวและแบบทรงกระบอกตามขวาง ซึ่งมีลำดับการวิจัยดังนี้ บทที่ 2 อธิบายและคำนวณหาสนามแม่เหล็กแบบตัวจับเดี่ยวสำหรับทรงกระบอกเฟร์โรแมกเนติกและ ตามทฤษฎีตัวกลางยังผลสำหรับตัวจับพาราแมกเนติกทรงกระบอกกระจายอย่างสุ่ม บทที่ 3 อธิบายและคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่ตามทฤษฎีการจับอนุภาคแม่เหล็กแบบทรงกระบอกเดี่ยว บทที่ 4 แสดงการคำนวณหาสมการเคลื่อนที่โดยสนามแม่เหล็กยังผล บทที่ 5 แสดงการคำนวณ วิเคาะห์ บทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



รูปที่ 1.4 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่และรัศมีการจับอนุภาคแม่เหล็ก ที่คำนวณโดยใช้สนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว กรณีการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามขวาง โดยมีค่าคงที่คือ $v_m/v_o = 10$, และ $K_c = 2$ ได้ค่า $r_{ca} = 2.5$



รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง v_m/v_o กับ r_{ca} ($r_{ca} = r_c/a$) โดยสนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยวสำหรับการกรองชนิดแม่เหล็กแบบตามยาว ($\vec{v}_o // \vec{H}_o$)



รูปที่ 1.6 แสดงทิศทางความเร็วเริ่มต้นของของไหล $(\vec{v_o})$ ที่ทำมุม α สนามแม่เหล็กภายนอก$(\vec{H_o})$