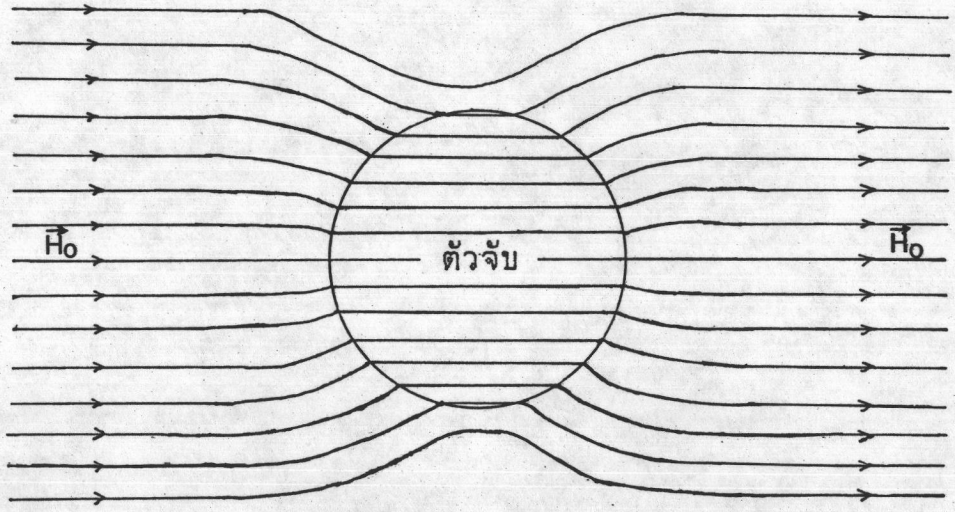
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

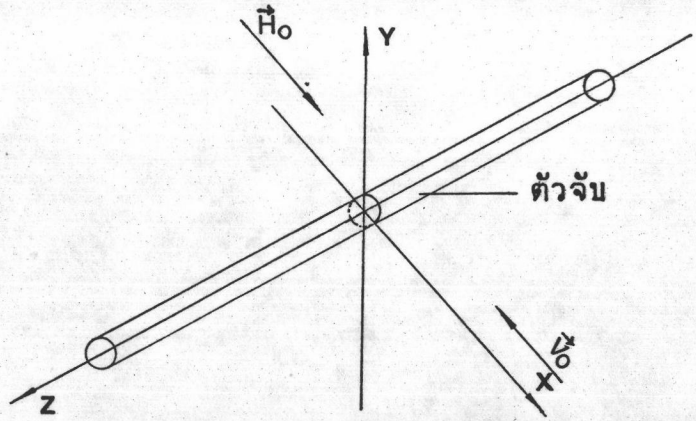
บทนำ

ตัวกรองแม่เหล็ก (magnetic filter) สามารถแยกอนุภาคแม่เหล็กที่ปะปนอยู่ในของไหลออกจากของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้อนุภาคจะมีขนาดเล็กระดับไมครอน ส่วนประกอบสำคัญของตัวกรองแม่เหล็กคือตัวจับ (collector) เป็นสารเฟร์โรแมกเนติกหรือพาราแมกเนติกมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 ไมครอน กระจายอย่างสุ่มในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ (uniform applied magnetic field, $\vec{H}_o$) ซึ่งทำให้ตัวจับเกิดแมกนิไตเซชั่น (magnetization) ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก และเส้นแรงแม่เหล็กจะลู่เข้าหาและโค้งออกจากตัวจับ (ดังรูปที่ 1.1) เป็นผลให้บริเวณรอบ ๆ ตัวจับมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อระยะทางสูง (high gradient magnetic field) โดยเฉพาะตามแนวรัศมีมีความหนาแน่นของแรงแม่เหล็ก (เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $\vec{\nabla} H^2$) ประมาณ 10^{11} นิวตันต่อเมตร^3(1) ดึงดูดอนุภาคแม่เหล็กในของไหลให้มาติดกับตัวจับ

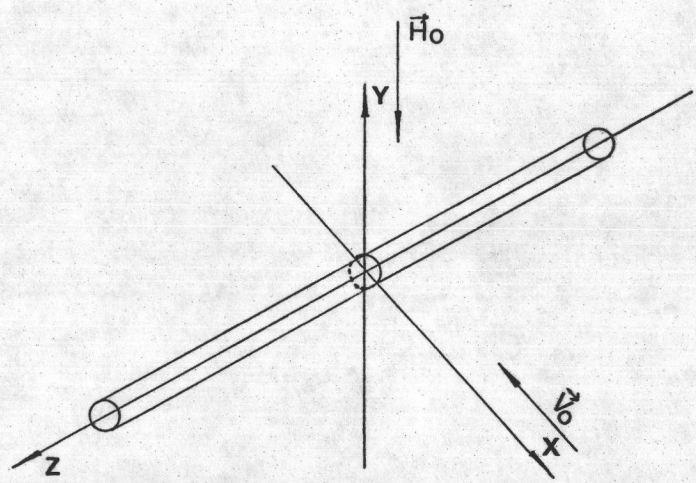
สำหรับตัวกรองแม่เหล็กชนิดตัวจับทรงกระบอก ตัวจับอยู่ในลักษณะที่แกนขนานกันมีระยะห่างระหว่างแกนของตัวจับต่าง ๆ เป็นระยะทางไม่แน่นอนต่าง ๆ กัน เนื่องจากตัวจับกระจายอยู่อย่างสุ่ม โดยทราบเพียงอัตราส่วนของปริมาตรรวมของตัวจับต่อปริมาตรรวมของระบบหรือสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (packing fraction, F) ตัวจับวางอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\vec{H}_o$) ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับแกนของตัวจับ (ดังรูปที่ 1.2) ตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกมี 3 แบบ คือ แบบตามยาว (longitudinal



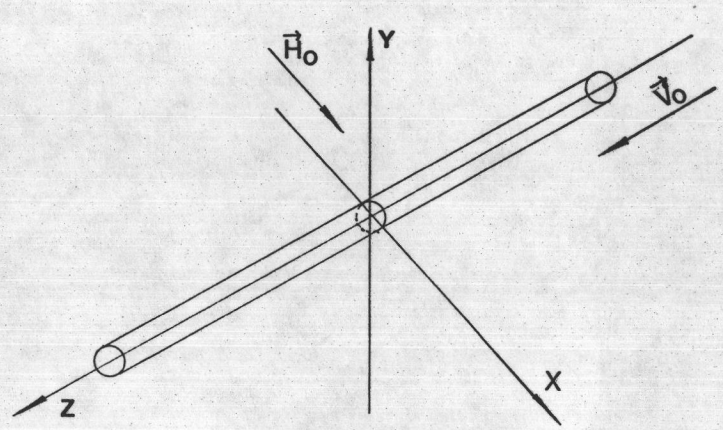
รูปที่ 1.1 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณรอบ ๆ ตัวจับเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\vec{H}_o$)



1.2.1 แบบตามยาว



1.2.2 แบบตามขวาง



1.2.3 แบบตามแนวแกน

รูปที่ 1.2 แสดงทิศสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ($\vec{H}_o$) และทิศทางการไหลเข้ามาของของไหล ($\vec{V}_o$)

cylindrical magnetic filter) ตามขวาง (transverse cylindrical magnetic filter) และตามแนวแกน (axial cylindrical magnetic filter) แยกตามลักษณะทิศทางการไหลเข้ามาของของไหล ($\vec{v}_o$) สำหรับแบบตามยาวและตามขวาง $\vec{v}_o$ มีทิศตั้งฉากกับแกนของตัวจับอยู่ในแนวเดียวกับ $\vec{H}_o$ และตั้งฉากกับ $\vec{H}_o$ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 1.2.1 และ 1.2.2) ส่วนแบบตามแนวแกน $\vec{v}_o$ มีทิศตามแนวแกนของตัวจับ (ดังรูปที่ 1.2.3)

จากผลการทดลอง ตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามยาวและแบบตามขวางมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบตามแนวแกน สองแบบแรกจึงเหมาะสำหรับการกรองของไหลซึ่งมีปริมาณมาก ๆ เช่น การแยกสินแร่ การกรองน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเติมสารเฟอร์รัสออกไซด์ในรูปคอลลอยด์ลงไปเพื่อให้อนุภาคที่ปะปนในของไหลมีคุณสมบัติเป็นพาราแมกเนติก ส่วนแบบตามแนวแกนเหมาะสำหรับการกรองหรือแยกของปริมาณน้อย ๆ เช่น การแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงในการวิจัยด้านชีวภาพ ซึ่งการจับอนุภาคตามแนวแกนนี้ไม่ทำให้คุณภาพของเม็ดเลือดเสีย

ในการวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะการจับอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามแนวแกน เนื่องจากยังมีผู้ที่ศึกษาไม่มากนัก

1.1 ทฤษฎีการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง

ทฤษฎีพื้นฐานซึ่งอธิบายการจับอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามแนวแกน คือ ทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (2) ได้ประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับใด ๆ โดยไม่คิดผลจากการมีตัวจับอื่น ๆ อยู่ข้างเคียง นั่นคือ สนามแม่เหล็กรอบตัวจับใด ๆ ในตัวกรองแม่เหล็ก สมมุติว่าเป็นสนามแม่เหล็กซึ่งคำนวณจากกรณีมีตัวจับเดียวในตัวกรองแม่เหล็ก เรียกสนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดียว (single collector model)

ทฤษฎีนี้มีข้อจำกัดใช้ได้กรณีสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (packing fraction, F) มีค่าน้อย ๆ ประมาณไม่เกิน 5 % (3) นอกจากนั้นผลการคำนวณได้พื้นที่ของการจับ (capture area, Aa) มีค่าสูงขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จนพื้นที่ของการจับของตัวจับที่พิจารณาคาบเกี่ยว (overlap) กับพื้นที่ของการจับของตัวจับข้างเคียง ต่อมาไกร์เนอร์และฮอฟมานน์ (4) ได้ประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับใด ๆ โดยสมมุติว่าตัวจับในตัวกรองแม่เหล็กเรียงแบบมีภาวะเป็นคาบ (periodicity) ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการคำนวณ นอกจากนั้นยังคิดผลจากตัวจับข้างเคียงเฉพาะที่อยู่ในแถวเดียวกัน ทฤษฎีนี้ใช้ได้เมื่ออัตราการไหลของของไหลต่ำและสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ตัวจับอยู่ในสถานะแมกนิไตเซชั่นที่อิ่มตัว (saturation magnetization, $\vec{M}_s$)

สำหรับงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กรูปแบบใหม่ซึ่งคำนวณโดยวิธีตัวกลางยังผล (effective medium treatment, EMT) (5) ซึ่งวิธีการนี้ได้ใช้กับกรณีกลุ่มตัวจับทรงกลมที่กระจายแบบสุ่ม สามารถนำไปอธิบายการจับอนุภาคและคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กทรงกลมได้ผลดี (6) นอกจากนั้นทฤษฎีการจับอนุภาคภายใต้สนามแม่เหล็กตัวกลางยังผลไม่มีข้อจำกัดดังเช่น ทฤษฎีของเกอร์เบอร์ และใช้ได้กับกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ตัวจับอยู่ในสถานะแมกนิไตเซชั่นไม่อิ่มตัว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ เรามุ่งศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการจับอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามแนวแกนตามแบบของเกอร์เบอร์ โดยทำการคำนวณเพื่อยืนยันผลทฤษฎีของเกอร์เบอร์ในรายละเอียดเกี่ยวกับทางเดินของอนุภาครอบตัวจับและคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็ก นอกจากนี้จะปรับปรุงทฤษฎีของเกอร์เบอร์โดยใช้สนามแม่เหล็กตัวกลางยังผลเพื่ออธิบาย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเคลื่อนที่ของอนุภาครอบตัวจับและคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กให้สมบูรณ์ขึ้น สุดท้ายเราจะสรุปผลการคำนวณและเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างทฤษฎีของเกอร์เบอร์และวิธีตัวกลางยังผล

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

เราเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการจับอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกตามแนวแกนตามแบบของเกอร์เบอร์ถึงวิธีการประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับใด ๆ ตามแบบจำลองตัวจับเดียว เพราะการประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับเป็นสิ่งสำคัญที่จะอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาครอบตัวจับและคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กให้ได้ผลถูกต้องสอดคล้องกับผลการทดลองมากน้อยแค่ไหน เราได้คำนวณทางเดินของอนุภาครอบตัวจับภายใต้สนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดียวโดยอินทิเกรตเชิงตัวเลข (numerical integration) สมการการเคลื่อนที่ด้วยวิธีของรังก์ กัตต้า (Runge-Gutta's method) โดยศึกษาทางเดินของอนุภาคในกรณีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรณีที่ 1 เมื่ออนุภาคตั้งต้นบนระนาบ xy ที่มีมุมตั้งต้น (θ_i) ต่างกัน แต่มีรัศมีตั้งต้น (r_{ai}) เท่ากัน กรณีที่ 2 เมื่ออนุภาคตั้งต้นบนระนาบ xy ที่มีมุมตั้งต้น (θ_i) เดียวกัน แต่มีรัศมีตั้งต้น (r_{ai}) ต่างกัน กรณีที่ 3 เมื่อตำแหน่งตั้งต้นของอนุภาคบนระนาบ xy อยู่ที่เดียวกัน แต่มีค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K) ต่างกัน และกรณีที่ 4 เมื่อตำแหน่งตั้งต้นของอนุภาคบนระนาบ xy อยู่ที่เดียวกัน แต่สัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) ต่างกัน ในทางกลับกันกับการศึกษาทางเดินของอนุภาคซึ่งทราบตำแหน่งตั้งต้นของอนุภาคแล้วทำนายทางเดินของอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็ก เราจะคำนวณตำแหน่งตั้งต้นของอนุภาคว่าควรจะตั้งต้น ณ ตำแหน่งใด ซึ่งเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกรองแม่เหล็กแล้วจะถูกจับที่ปลายตัวจับ เส้นที่ลากเชื่อมโยงทุกตำแหน่งตั้งต้นของอนุภาคคือ เส้นโค้งไอโซเทลิก (isotelic curve) จุดตั้งต้นของอนุภาคดังกล่าวคำนวณโดยวิธี

เชิงตัวเลขของนิวตัน (Newton's method) จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytic solution) ของสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค และพื้นที่ภายในเส้นโค้งไอโซเทลิกนี้คือพื้นที่ของการจับซึ่งคำนวณโดยการอินทิเกรตเชิงตัวเลขจากพื้นที่ภายในเส้นโค้งนี้ และเป็นปริมาณสำคัญที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็ก เราได้คำนวณเส้นโค้งไอโซเทลิกและพื้นที่ของการจับในกรณีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรณีที่ 1 เมื่อสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) และค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K) คงที่ มีความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ (La) เป็นพารามิเตอร์ กรณีที่ 2 เมื่อความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ (La) และค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K) คงที่ มีสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) เป็นพารามิเตอร์ และกรณีที่ 3 เมื่อความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ (La) และสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) คงที่ มีค่าคงที่ทางแม่เหล็ก (K) เป็นพารามิเตอร์ และคำนวณประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กในกรณีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรณีที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กกับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ (La) สำหรับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) คงที่ กรณีที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กกับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) สำหรับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ (La) คงที่ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

สำหรับบทที่ 3 เราได้ศึกษาถึงการประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับโดยวิธีตัวกลางยังผล และคำนวณทางเดินของอนุภาครอบตัวจับ พื้นที่ของการจับและประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็ก โดยศึกษาทำนองเดียวกับบทที่ 2

และในบทที่ 4 จะเป็นการสรุปและเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ระหว่างทฤษฎีของเกอร์เบอร์กับวิธีตัวกลางยังผล ในรายละเอียดเกี่ยวกับทางเดินของอนุภาค กราฟพื้นที่ของการจับและประสิทธิภาพของตัวกรอง

แม่เหล็ก และวิจารณ์ข้อดีและข้อเสียของการประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับตามแบบจำลองตัวจับเดียวและวิธีตัวกลางยังผล