

ทฤษฎีการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง



นายสุชาติ ชันบุตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-684-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015267

THEORY OF PARTICLE CAPTURE IN HIGH GRADIENT MAGNETIC FIELD

Mr. Suchat Kuntabutr

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

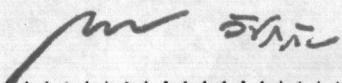
1989

ISBN 974-576-684-4

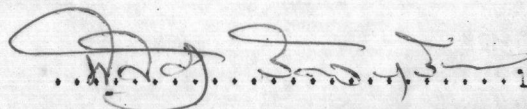
หัวข้อวิทยานิพนธ์      ทฤษฎีการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง  
โดย                              นาย สุชาติ ชันบุตร  
ภาควิชา                            ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส

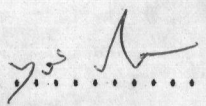
---

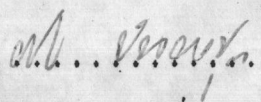
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

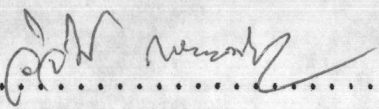
  
..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรากัญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตินธุ์ รัตนวราภักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิโย โย ปันยารชุน)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งหะพันธ์)



ชื่อ วิชา : ชันรูปตร : ทฤษฎีการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง (THEORY OF PARTICLE CAPTURE IN HIGH GRADIENT MAGNETIC FIELD) อ. ที่ปรึกษา :

ผศ.ดร. มยุรี เนตรนภัส , 82 หน้า.

ปัญหาในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กในระดับไมครอนที่ปะปนกับของไหลในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามแนวแกนและการคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวกรองให้ลุ่มบูรณ์และสอดคล้องกับผลการทดลองนั้น ขึ้นอยู่กับการประมาณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรอบตัวจับใด ๆ ซึ่งกระจายแบบลุ่มใน ตัวกรองแม่เหล็กให้ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ทฤษฎีการจับอนุภาคในตัวกรองแม่เหล็กทรงกระบอกแบบตามแนวแกน เริ่มจากทฤษฎีของ เกอร์เบอร์ ที่ได้ประมาณสนามแม่เหล็กรอบตัวจับตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว ซึ่งมีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะกรณีที่สุดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็กน้อย ๆ ประมาณไม่เกิน 5% และความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าไม่สูงเกินไป เนื่องจากผลการคำนวณได้พื้นที่ของการจับของตัวจับตัวแทนที่พิจารณาเกี่ยวกับพื้นที่ของการจับของตัวจับที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งให้ผลการคำนวณประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กมีการเพิ่มขึ้นทางเดียวกับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์หรือกับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก

ในการวิจัยนี้เราได้ปรับปรุงทฤษฎีของ เกอร์เบอร์ โดยใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กรอบตัวจับที่ประมาณโดยวิธีตัวกลางยังผล ซึ่งวิธีการนี้ได้ประยุกต์ใช้กับตัวกรองแม่เหล็กทรงกลมได้ผลดีมาแล้ว ในการวิจัยนี้ให้ผลการคำนวณประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กมีแนวโน้มของการเพิ่มแบบอิมตัวเมื่อ ความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ หรือสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้น เกินค่าหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของบริซซ์และทฤษฎีของ โกรเนอร์และฮอฟมานน์

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์

สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์

ปีการศึกษา ..... 2532

ลายมือชื่อนิสิต ..... สมพงษ์ วัฒนกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... [Signature]

SUCHAT KUNTABUTR : THEORY OF PARTICLE CAPTURE IN HIGH GRADIENT  
MAGNETIC FIELD : THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MAYUREE NATENAPIT,  
Ph.D. 82 pp.

In describing motion of magnetic particles of micron size in fluid carrier and prediction of capture efficiency of axial cylindrical magnetic filter with satisfactory agreement with experiment, depends on approximation of magnetic field around any collector which is randomly distributed in magnetic filter. Theory of particle capture in axial cylindrical magnetic filter was first developed by using the single collector model for approximation of magnetic field around a representative collector from Gerber's theory. This theory was limited by small collector packing fraction, approximately about 5 %, and the applied magnetic field intensity was not too high. Otherwise, capture area of the representative collector overlaps with capture area of neighbouring collector and magnetic-filter efficiency is obtained as monotonic increasing function with increasing of normalized capture length or packing fraction.

In this research, we develop Gerber's theory by using magnetic field intensity around a representative collector determined by effective medium approach, which is applied to spherical magnetic filter. In this research, the calculated result of magnetic-filter efficiency has the tendency of saturated type when the normalized capture length or packing fraction increases more than the specific value which corresponds to the experiment of Birss and the theory of Greiner and Hoffmann.

ภาควิชา ..... ฟิลิกส์ .....

สาขาวิชา ..... ฟิลิกส์ .....

ปีการศึกษา ..... 2532 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... สมาน วัฒนชาติ .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ฐ. น. ....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากท่านผู้ช่วย  
ศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการวิจัยครั้งนี้  
ได้ให้คำแนะนำในการวิจัยอย่างใกล้ชิด ตลอดทั้งแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการวิจัย  
และทางด้านวิชาการ รวมทั้งช่วยตรวจแก้ไขข้อเขียนในวิทยานิพนธ์ ผู้เขียน  
ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ไว้เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้กำลังใจ  
แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๗
กิตติกรรมประกาศ.....	๘
สารบัญตาราง.....	๘
สารบัญรูป.....	๙

### บทที่

1.	บทนำ.....	1
	1.1 ทฤษฎีการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง	4
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
	1.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
2.	ทฤษฎีพื้นฐานของการจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กเกรเดียนต์สูง	9
	2.1 สนามแม่เหล็กตามแบบจำลองตัวจับเดี่ยว.....	9
	2.2 สมการการเคลื่อนที่.....	15
	2.3 ทางเดินของอนุภาค.....	19
	2.4 เส้นโค้งไอโซเทสิกและพื้นที่ของการจับ.....	21
	2.5 ประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็ก.....	34
3.	การจับอนุภาคในสนามแม่เหล็กแบบตัวกลางยังผล.....	39
	3.1 สนามแม่เหล็กตัวกลางยังผล.....	39
	3.2 สมการการเคลื่อนที่.....	46
	3.3 ทางเดินของอนุภาค.....	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4	เส้นขอบเขตพื้นที่ของการจับและพื้นที่ของการจับ.....53
3.5	ประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็ก.....59
4.	สรุปและวิจารณ์ .....63
เอกสารอ้างอิง.....71	
ภาคผนวก ก	.....75
ภาคผนวก ข	.....78
ภาคผนวก ค	..... 81
ประวัติผู้เขียน.....	82



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณทางเดินอนุภาค วิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงตัวเลขรังก กัดต้า.....	20

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณรอบ ๆ ตัวจับเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ( $\vec{H}_0$ ).....	2
1.2	แสดงทิศสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ( $\vec{H}_0$ ) และทิศทางการไหลเข้ามาของของไหล ( $\vec{v}_0$ ).....	4
2.1	แสดงภาคตัดขวางของตัวจับที่ถูกล้อมรอบด้วยของไหลและสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสม่ำเสมอ ( $\vec{H}_0$ )...	11
2.2	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $K = 0.8, F = 7\%$ , $P_0/P_m = 1, r_{ai} = 4$ เมื่อ $\theta_i = 20^\circ, 40^\circ$ , และ $60^\circ$ .....	22
2.3	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $K = 0.8, F = 7\%$ , $P_0/P_m = 1, \theta_i = 60^\circ$ เมื่อ $r_{ai} = 3$ และ $5$ ..	23
2.4	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $r_{ai} = 4, \theta_i = 60^\circ$ $P_0/P_m = 1, F = 7\%$ เมื่อ $K = 0.5$ และ $0.9$ .....	24
2.5	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $r_{ai} = 4, \theta_i = 60^\circ$ , $P_0/P_m = 1, K = 0.8$ เมื่อ $F = 5\%$ และ $10\%$ .....	25
2.6	แสดงเส้นโค้งไอโซเทสิก (-----) และทางเดินของอนุภาค (————) สำหรับ $La = 16286, F = 7\%$ และ $K = 0.8$ .....	26
2.7	แสดงเส้นโค้งไอโซเทสิกสำหรับ $K = 0.8, F = 7\%$ เมื่อ $La = 569.9, 4837$ และ $12200$ .....	28
2.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $A_e$ ) กับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เมื่อ $F = 7\%$ และ $10\%$ สำหรับ $K = 0.8$ .....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.9	แสดงเส้นโค้งไอโซเทลิกสำหรับ $La = 4837$ , $K = 0.8$ , เมื่อ $F = 5\%$ และ $7\%$ .....	31
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $Aa$ ) กับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก ( $F$ ) เมื่อ $La = 4837$ และ $2000$ สำหรับ $K = 0.8$ .....	32
2.11	แสดงเส้นโค้งไอโซเทลิกสำหรับ $La = 4837$ , $F = 7\%$ เมื่อ $K = 0.8$ และ $1$ .....	33
2.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรอง แม่เหล็กกับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เมื่อ $F = 7\%$ และ $10\%$ สำหรับ $K = 0.8$ .....	36
2.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรอง แม่เหล็กกับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก ( $F$ ) เมื่อ $La = 4837$ และ $2000$ สำหรับ $K = 0.8$ .....	37
3.1	แสดงภาคตัดขวางของเซลล์ตัวแทนซึ่งประกอบด้วยตัวจับ และของไหลรอบตัวจับ ตัวกลางยังผล และสนามแม่เหล็ก ภายนอกความเข้มข้นสม่ำเสมอ ( $H_0$ ) .....	40
3.2	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $K = 0.8$ , $F = 5\%$ , ( $r_{ca} = 4.472$ ), $P_o/P_m = 1$ , $r_{ai} = 4$ เมื่อ $\theta_i = 20^\circ$ , $40^\circ$ และ $60^\circ$ .....	49
3.3	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $K = 0.8$ , $F = 5\%$ ( $r_{ca} = 4.472$ ), $P_o/P_m = 1$ , $\theta_i = 60^\circ$ เมื่อ $r_{ai} = 3, 4$ และ $5$ .....	50
3.4	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $r_{ai} = 4$ , $\theta_i = 60^\circ$ , $P_o/P_m = 1$ , $F = 5\%$ ( $r_{ca} = 4.472$ ) เมื่อ	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	K = 0.5 และ 0.8..... 51
3.5	แสดงทางเดินของอนุภาคสำหรับ $r_{ai} = 4, \theta_i = 60^\circ,$ $P_o/P_m = 1, K = 0.8$ เมื่อ $F = 4 \%$ ( $r_{ca} = 5.00$ ), $5 \%$ ( $r_{ca} = 4.472$ ) และ $7 \%$ ( $r_{ca} = 3.779$ )..... 52
3.6	แสดงเส้นขอบเขตพื้นที่ของการจับสำหรับ $K = 0.8,$ $F = 7 \%$ ( $r_{ca} = 3.779$ ) เมื่อ $La = 569.9$ และ $12200$ ..... 54
3.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $Aa$ ) กับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เมื่อ $F = 7 \%$ (พื้นที่ของเซลล์ = $44.88$ ) และ $F = 10 \%$ (พื้นที่ของเซลล์ = $31.41$ ) สำหรับ $K = 0.8$ ..... 56
3.8	แสดงเส้นขอบเขตพื้นที่ของการจับสำหรับ $La = 4837,$ $K = 0.8$ เมื่อ $F = 5 \%$ ( $r_{ca} = 4.472$ ) และ $F = 7 \%$ ( $r_{ca} = 3.779$ )..... 57
3.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $Aa$ ) กับ สัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก ( $F$ ) เมื่อ $La = 4837,$ $7000$ และ $12200$ สำหรับ $K = 0.8$ ..... 58
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรอง แม่เหล็กกับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เมื่อ $F = 7 \%$ และ $10 \%$ สำหรับ $K = 0.8$ ..... 60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กกับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) เมื่อ $La = 4837, 7000$ และ $12200$ สำหรับ $K = 0.8$ และแสดงผลการทดลอง.....	61
4.1	เปรียบเทียบทางเดินของอนุภาคระหว่างทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (-----) และทฤษฎีตัวกลางยังผล (—————) เมื่อพิจารณาตำแหน่งตั้งต้นอยู่ในเซลล์และนอกเซลล์ สำหรับ $F = 5\%$ ( $r_{ca} = 4.472$ ), $K = 0.8$ และ $P_o/P_m = 1$ .....	64
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $Aa$ ) กับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) เปรียบเทียบผลการคำนวณตามทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (-----) และทฤษฎีตัวกลางยังผล (—————) สำหรับ $La = 4837$ และ $K = 0.8$ .....	66
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการจับ ( $Aa$ ) กับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เปรียบเทียบผลการคำนวณตามทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (-----) และทฤษฎีตัวกลางยังผล (—————) สำหรับ $F = 7\%$ และ $K = 0.8$ .....	67
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรองแม่เหล็กกับสัดส่วนของตัวจับในตัวกรองแม่เหล็ก (F) เปรียบเทียบผลการคำนวณตามทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (-----) และทฤษฎีตัวกลางยังผล (—————)	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
	สำหรับ $La = 4837$ และ $K = 0.8$ .....	69
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวกรอง แม่เหล็กกับความยาวในการจับแบบนอร์แมลไลซ์ ( $La$ ) เปรียบเทียบผลการคำนวณตามทฤษฎีของเกอร์เบอร์ (-----) และทฤษฎีตัวกลางยังผล (—————)	
	สำหรับ $F = 7\%$ และ $K = 0.8$ .....	70