รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

1. วาระยา ชำนาญภูมิ. 2535. การจับอนุภาคในของไหลแบบโพเทนเชี่ยลโดยตัวจับทรงกลมเดี่ยว. รายงานโครงงานนิสิตชั้นปีที่ 4 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

ภาษาอังกฤษ

2. Berden, R.L., Faires, J.D., and Reynolds, A.C. 1978. Numerical Analysis: Runge-Kutta Methods. Boston: Prindle, Weber & Schmidt.
3. Birss, R.R., Gerber, R., and Howard, M.B. 1980. Magnetic Interaction between A Strongly Magnetized Sphere and Weakly Magnetized Particles Carried by Fluid Flow. J. Magn. Mat. 15-18: 1565-1566.
4. Chapra, C.C., and Canale, R.P. 1989. Numerical Methods for Engineering: Adaptive Runge-Kutta Methods. 2nd ed. New York: Mc Graw-Hill.
5. Friedlaender, F.J., Gerber, R., Kurz, W., and Birss, R.R. 1981. Particle Motion Near and Capture on Sphere in HGMS. IEEE Trans. Magn. Mag-17(6):2801-2803.
6. Gerber, R., and Birss, R.R. 1983. High Gradient Magnetic Separation. New York: RSP John Wiley & Sons.
7. Jiles, D. 1991. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London: Chapman & Hall.
8. Moyer, C., Natenapit, M., and Arajs, S. 1984. Magnetic Filtration of Particles in Laminar Flow Through A Bed of Spheres. J. Magn. Mat. 44: 99-104.
9. Natenapit, M. 1993. Effective Medium Treatment of Laminar Flow in Magnetic Filtration. J. Sci. Res. Chula Univ. 18(1): 47-62.
10. Ohanian, H.C. 1988. Classical Electrodynamics: Magnetic Dipoles and Magnetic Materials. Boston: Allyn and Bacon.
11. Tritton, D.J. 1979. Physical Fluid Dynamics. London: Van Nostrand Reinhold.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แรงแม่เหล็ก

พิจารณาสารแม่เหล็ก ขณะอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{H}$) สารแม่เหล็กเหล่านี้จะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยแต่ละอะตอมมีทิศของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment , $\vec{m}$) อยู่ในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเรียกว่าการเกิดแมกนิไตเซชัน (magnetization) และจะเรียกว่าสารนี้ ถูกแมกนิไตซ์

แมกนิไตเซชั่น ($\vec{M}$) ของสารใดๆ คือ โมเมนต์แม่เหล็กของสารนั้นที่ถูกแมกนิไตซ์ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (V) ดังนั้น จะได้

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \qquad (\text{ก}.1)$$

จาก

$$\vec{M} = \chi\vec{H} \qquad (\text{ก}.2)$$

เมื่อ χ คือ สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของสาร (magnetic susceptibility) และความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ($\vec{B}$) สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก ($\vec{H}$) คือ

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \qquad (\text{ก}.3)$$

เมื่อ μ คือ สภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็กของสาร (magnetic permeability) โดยที่ค่า μ จะขึ้นอยู่กับ χ ดังนี้ คือ

$$\mu = \mu_o(1+\chi) \qquad (\text{ก}.4)$$

เมื่อ μ_o คือ สภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ

พลังงานศักย์ของสารแม่เหล็ก (U) ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็ก ($\vec{m}$) ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{H}$) คือ

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B} \qquad (ก.5)$$

แต่จากนิยามของแรงกระทำ จะได้

$$\vec{F} = -\vec{\nabla} U \qquad (ก.6)$$

จะได้แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็ก ($\vec{F}_m$) เป็น

$$\vec{F}_m = \vec{\nabla}\left(\vec{m} \cdot \vec{B}\right) \qquad (ก.7)$$

พิจารณา $\vec{\nabla}\left(\vec{m} \cdot \vec{B}\right)$ จะพบว่า

$$\vec{\nabla}\left(\vec{m} \cdot \vec{B}\right) = \left(\vec{B} \cdot \vec{\nabla}\right)\vec{m} + \left(\vec{m} \cdot \vec{\nabla}\right)\vec{B} + \vec{B} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{m}\right)$$

$$+\vec{m} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{B}\right) \qquad (ก.8)$$

จาก

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \qquad (ก.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0, \qquad (ก.10)$$

และ $\vec{m}$ คงที่ ดังนั้น สามารถเขียนแรงแม่เหล็กได้ใหม่เป็น

$$\vec{F}_m = \left(\vec{m} \cdot \vec{\nabla}\right)\vec{B} \qquad (ก.11)$$

เมื่อแทนสมการที่ (ก.1) , (ก.2) , (ก.3) และ (ก.4) ลงในสมการที่ (ก.11) จะพบว่า

$$\vec{F}_m = \mu_o(1+\chi)\chi V\left(\vec{H}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{H} \qquad (\text{ก.12})$$

จาก

$$\vec{\nabla}\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right) = \left(\vec{H}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{H}+\left(\vec{H}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{H}+\vec{H}\times\left(\vec{\nabla}\times\vec{H}\right)$$

$$+\vec{H}\times\left(\vec{\nabla}\times\vec{H}\right)$$

$$= 2\left(\vec{H}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{H}+2\vec{H}\times\left(\vec{\nabla}\times\vec{H}\right) \qquad (\text{ก.13})$$

แต่

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = 0 \qquad (\text{ก.14})$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\overrightarrow{F_m} = \frac{1}{2}\mu_o(1+\chi)\chi V\vec{\nabla}\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right) \qquad (\text{ก.15})$$

เนื่องจาก χ ของสารพาราแมกเนติก (หรือไดอะแมกเนติก) มีค่าน้อยมาก (ประมาณ 10^{-5} ทำให้ประมาณได้ว่า ($1+\chi$) ≈ 1 ดังนั้น เราจะได้แรงแม่เหล็กเป็น

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2}\mu_o\chi V\vec{\nabla}\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right) \qquad (\text{ก.16})$$

และในกรณีของอนุภาคแม่เหล็กแบบทรงกลม จะได้แรงแม่เหล็กเป็น

$$\overrightarrow{F_m} = \frac{2\pi}{3}\mu_o\chi\, r_p^3\,\vec{\nabla}\left(\vec{H}\cdot\vec{H}\right) \qquad (\text{ก.17})$$

ภาคผนวก ข

ประสิทธิภาพของการกรอง

พิจารณาตัวกรองชนิดแม่เหล็กที่หนาเท่ากับ dx พื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ A วางตัวตั้งฉากกับทิศของความเร็วเริ่มต้นของระบบของไหล ซึ่งจำนวนของตัวจับทรงกลมในแผ่นตัวกรองอันนี้มีค่าเท่ากับ $\dfrac{\gamma^3 A dx}{\frac{4}{3}\pi a^3}$ เมื่อ γ^3 และ a เป็นสัดส่วนการบรรจุตัวจับอนุภาคแม่เหล็ก และรัศมีของตัวจับทรงกลม ตามลำดับ กำหนดให้ A_c เป็นพื้นที่การจับเนื่องจากมีอนุภาค n ตัวสะสมอยู่ที่ตัวกรองซึ่งมีความหนาเท่ากับ x ใดๆ ดังนั้น จะพบว่า

$$-\frac{dn}{n} = \frac{A_c \gamma^3 A dx / \left(4\pi a^3/3\right)}{A} \qquad (\text{ข}.1)$$

อินทิเกรตสมการข้างต้นนี้จาก $x = 0$ ถึง $x = L$ เมื่อ L เป็นความหนาของระบบตัวกรองจะได้

$$n_L = n_o \exp\left(-\frac{3A_c\gamma^3 L}{4\pi a^3}\right) \qquad (\text{ข}.2)$$

และประสิทธิภาพของการกรอง ($\in$) กำหนดโดย

$$\in = \frac{n_o - n_L}{n_o} \qquad (\text{ข}.3)$$

เมื่อแทนสมการที่ (ข.2) ลงในสมการที่ (ข.3) จะได้ประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็กเป็น

$$\in = 1 - \exp\left(-\frac{3A_c\gamma^3 L}{4\pi a^3}\right) \qquad (\text{ข}.4)$$

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณหาตำแหน่งของอนุภาคแม่เหล็กขณะใดๆโดยวิธีรังกัตตาอันดับที่ 4

กำหนดให้ สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กในระบบพิกัดเชิงขั้วทรงกลม เขียนได้เป็น

$$\frac{dr}{dt} = V_r(t, r, \theta, \phi) , \qquad (\text{ค}.1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = V_\theta(t, r, \theta, \phi) , \qquad (\text{ค}.2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = V_\phi(t, r, \theta, \phi) \qquad (\text{ค}.3)$$

เมื่อ V_r , V_θ และ V_ϕ เป็นฟังก์ชันใดๆที่มี t, r, θ และ ϕ เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) คือ

$$V_r(t_o, r_o, \theta_o, \phi_o) = V_{ro} , \qquad (\text{ค}.4)$$

$$V_\theta(t_o, r_o, \theta_o, \phi_o) = V_{\theta o} , \qquad (\text{ค}.5)$$

และ

$$V_\phi(t_o, r_o, \theta_o, \phi_o) = V_{\phi o} \qquad (\text{ค}.6)$$

เมื่อ t_o, r_o, θ_o และ ϕ_o เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้น และ $V_{ro}, V_{\theta o}$ และ $V_{\phi o}$ เป็นค่าคงที่

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า r, θ และ ϕ ในพิกัดเชิงขั้วทรงกลม กับค่า X, Y และ Z ในพิกัดคาร์ทีเซียน สามารถเขียนได้เป็น

$$X = r \sin\theta \cos\phi , \qquad (\text{ค}.7)$$

$$Y = r\sin\theta\sin\phi \,, \tag{ค.8}$$

และ
$$Z = r\cos\theta \tag{ค.9}$$

เมื่อ $t_o \le t \le t_f$ โดยที่ t_f เป็นเวลาสุดท้ายที่พิจารณา

การคำนวณหาค่า r, θ และ ϕ ใดๆ โดยวิธีรังกัตตาอันดับที่ 4 สามารถคำนวณได้โดยแบ่งช่วงการคำนวณออกเป็น M ช่วง ซึ่งความกว้างของแต่ละช่วง (h) มีค่าเท่ากับ $(t_f - t_i)/M$ โดยสูตรที่ใช้คำนวณ คือ

$$r_{i+1} = r_i + \frac{h}{2}(k_{11} + 2k_{12} + 2k_{13} + k_{14}) \,, \tag{ค.10}$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{h}{2}(k_{21} + 2k_{22} + 2k_{23} + k_{24}) \,, \tag{ค.11}$$

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{h}{2}(k_{31} + 2k_{32} + 2k_{33} + k_{34}) \,, \tag{ค.12}$$

และ
$$t_{i+1} = t_i + h \tag{ค.13}$$

เมื่อ
$$k_{11} = V_r(t_i, r_i, \theta_i, \phi_i) \,,$$
$$k_{21} = V_\theta(t_i, r_i, \theta_i, \phi_i) \,,$$
$$k_{31} = V_\phi(t_i, r_i, \theta_i, \phi_i) \,,$$

$$k_{12} = V_r(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{11}, \theta_i + 0.5hk_{21}, \phi_i + 0.5hk_{31}) \,,$$
$$k_{22} = V_\theta(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{11}, \theta_i + 0.5hk_{21}, \phi_i + 0.5hk_{31}) \,,$$
$$k_{32} = V_\phi(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{11}, \theta_i + 0.5hk_{21}, \phi_i + 0.5hk_{31}) \,,$$

$$k_{13} = V_r(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{12}, \theta_i + 0.5hk_{22}, \phi_i + 0.5hk_{32}) \,,$$
$$k_{23} = V_\theta(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{12}, \theta_i + 0.5hk_{22}, \phi_i + 0.5hk_{32}) \,,$$

$$k_{33} = V_{\phi}(t_i + 0.5h, r_i + 0.5hk_{12}, \theta_i + 0.5hk_{22}, \phi_i + 0.5hk_{32}),$$

$$k_{14} = V_r(t_i + h, r_i + hk_{13}, \theta_i + hk_{23}, \phi_i + hk_{33}),$$

$$k_{24} = V_{\theta}(t_i + h, r_i + h, \theta_i + h, \phi_i + h),$$

$$k_{34} = V_{\phi}(t_i + h, r_i + h, \theta_i + h, \phi_i + h)$$

โดยที่ $i = 0$ ถึง $M - 1$

ภาคผนวก ง

โปรแกรมคำนวณพื้นที่การจับอนุภาคแม่เหล็ก

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<ctype.h>
double Dxi,Yi,Area,temx,temy,x,y,dx;

main()
{
  int i,key;
  double run,gm;
  FILE *fin,*fout;
  char name[13];

  gm=0.5;
/** fprintf(stdprn,"Diamagnetic Of Tranverse Mode\n");
  fprintf(stdprn,"Gamma = %.2lf\n\n",gm);**/
  clrscr();
  fout=fopen("dg05r150.dat","rt");
  run=1.5;
  Area=0.0;
  temx=0.0;
  temy=0.0;
  for(i=1;i<=25;i++){
    fscanf(fout,"%lf %lf\n",&x,&y);
    Dxi=fabs(y-temy);
    Yi=(temx+x)/2.0;
     temx=x;
     temy=y;
    Area+=Yi*Dxi;
  }
  fclose(fout);
  printf("Area out = %.2lf point = %d \n",Area,i-1);
  fprintf(stdprn,"Run = %.2lf    Area = %.2lf    Point = %d \n",run,Area,i-1);
  getch();
  return 0;
}
```

ภาคผนวก จ

โปรแกรมคำนวณประสิทธิภาพของการกรองชนิดแม่เหล็ก

```
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
main()
{
 double eff,A1,Ac,gm,xp,La,run;
 int ck,i;

   clrscr();
   gm=0.5;
/**    fprintf(stdprn,"Diamagnetic Of Transverse Mode\ngamma=%.2lf\n\n",gm);**/

   i=1;
   do{
    gotoxy(1,i);
    printf("Run = ");
    scanf("%lf",&run);
    flushall();
    gotoxy(25,i);
    printf("A1 = ");scanf("%lf",&A1);
    Ac=4.0*A1;
    La=20;
    xp=-3.0*Ac*La*pow(gm,3)/(4.0*M_PI);
    eff=1.0-exp(xp);
    fprintf(stdprn,"Run = %.2lf   La=%.0lf      eff=%0.2lf  \n",run,La,eff*100.0);
    i++;
   }while(!kbhit());
  return 0;
}
```

ประวัติผู้เขียน

นายจิตกร ผลโยญ เกิดวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2513 ที่อำเภอเรณูนคร จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2535 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2536