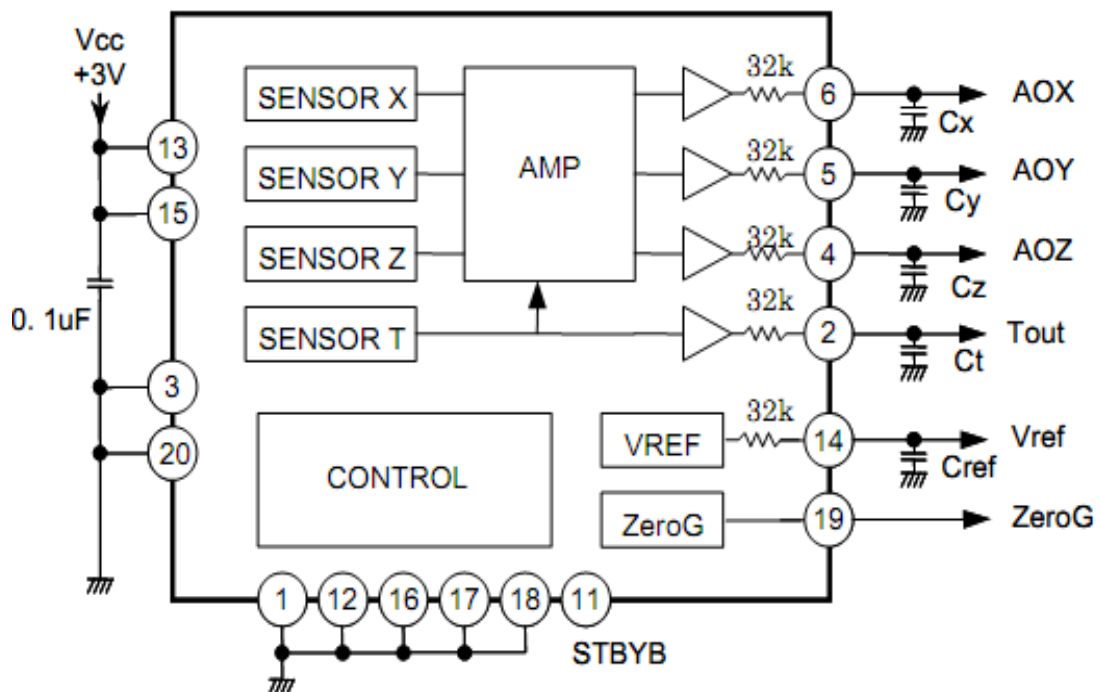


## IV.2 Metode Akusisi Data Percepatan

Dalam penelitian ini, pembacaan percepatan pergerakan tanah menggunakan modul *acelerometer* buatan Parallax.Inc dimana dalam modul ini sensor yang digunakan adalah H48C dan telah terintegrasi dengan 4 *chanel 12-bit A/D converter with serial interface MCP3204*.



Gambar 4.3 Blok diagram H48C

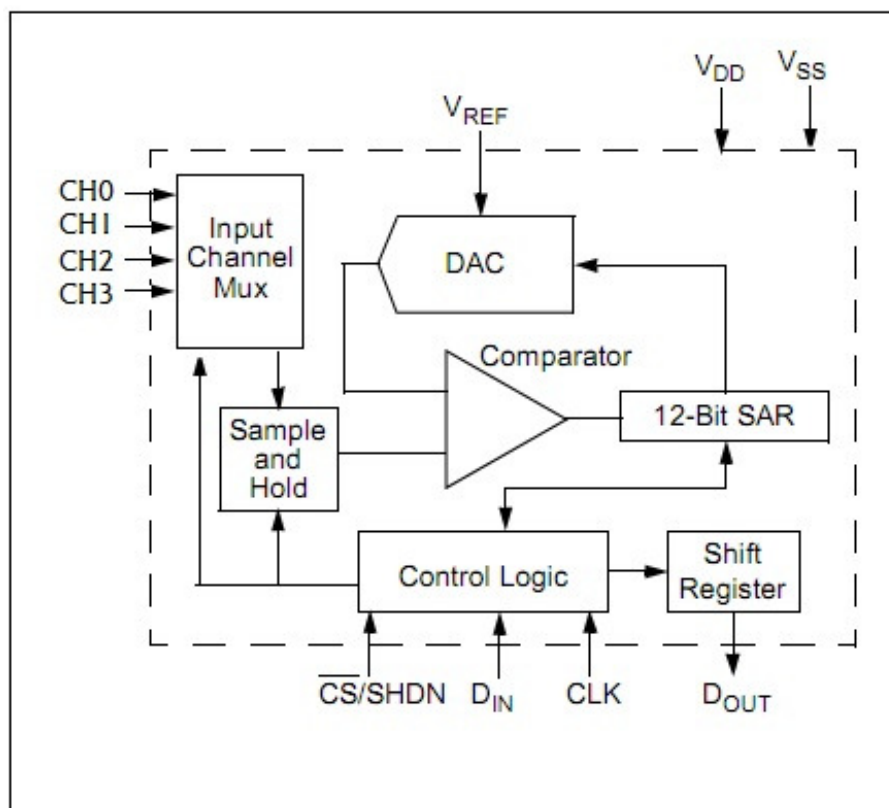
Blok diagram dari H48C ditunjukkan oleh gambar 4.3. Dengan AOX sebagai analog output sumbu x, AOY sebagai analog output sumbu y, AOZ sebagai analog output sumbu y, dan Vref sebagai tegangan referensi. Maka, untuk mengetahui besarnya percepatan yang dinyatakan dalam level tegangan analog untuk tiap sumbu adalah sebagai berikut.

$$gX = AOX - V_{ref} \text{ (mV)} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$gY = AOY - V_{ref} \text{ (mV)} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$gZ = AOZ - V_{ref} \text{ (mV)} \dots\dots\dots(4.3)$$

Pada modul 3 *axis accelerometer* buatan Parallax.Inc output tegangan analog tiap sumbu dan output Vref dihubungkan dengan MCP3204 untuk mengkonversi data analog menjadi digital dan mengirimkannya ke kontroler secara serial.

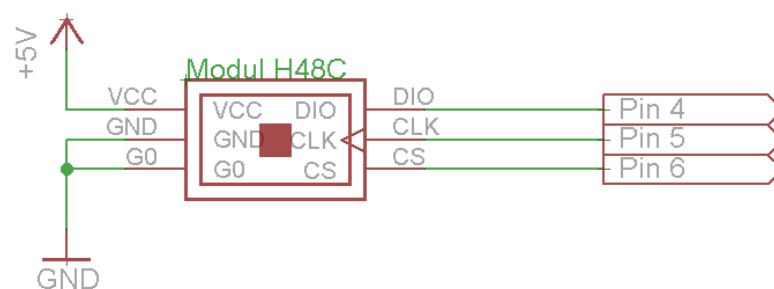


Gambar 4.4 Diagram Blok MCP3204

Diagram blok MCP3204 ditunjukkan oleh gambar 4.4. Pada modul accelerometer, pin AOX pada H48C dihubungkan ke CH0 dari MCP3204, AOY pada H48C terhubung dengan CH1 dari MCP3204, AOZ pada H48C terhubung dengan CH2 dari MCP3204 dan Vref pada H48C terhubung dengan CH3 dari MCP3204.

#### IV.2.1 Skematik Rangkaian Accelerometer

Rangkaian pengujian menggunakan modul *3 axis accelerometer H48C* dan kontrolernya menggunakan *Arduino board* tipe Deumilanove. Skematik rangkaian pengujian ditunjukkan oleh gambar 4.5.



Gambar 4.5 Skematik rangkaian pengujian modul accelerometer

Dari modul accelerometer hanya dibutuhkan 3 pin untuk melakukan pembacaan, yakni :

1. Pin DIO sebagai jalur digital input / output, terhubung dengan pin 4 *Arduino board*.
2. Pin CLK untuk pemberian *clock trigger* sensor dan terhubung dengan Pin 5 *Arduino board*.
3. Pin CS (*Chip Select*) untuk aktifasi modul, terhubung dengan Pin 6 *Arduino board*.

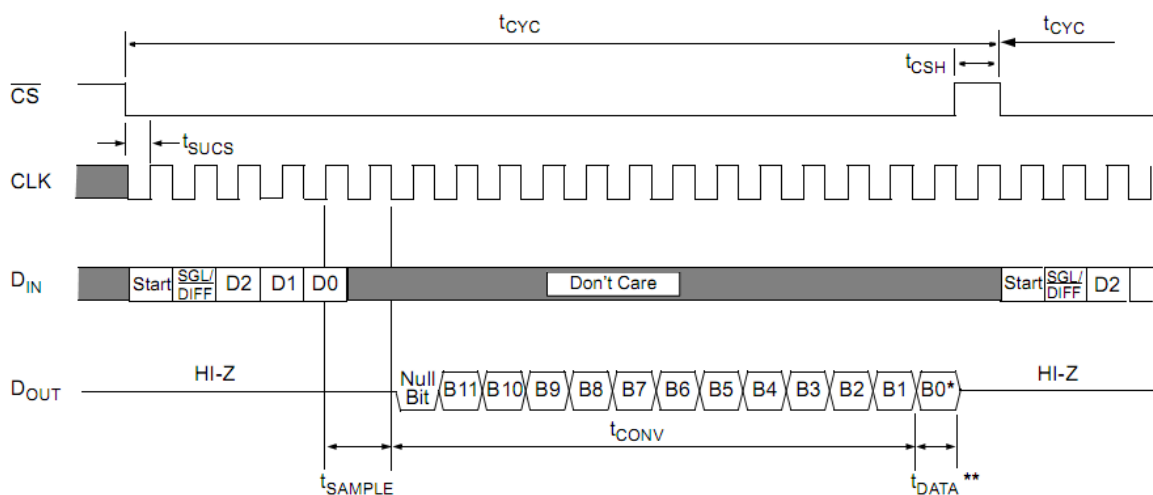
#### IV.2.2 Algoritma Pembacaan Percepatan Tiap Sumbu

Pembuatan algoritma pembacaan tiap sumbu didasarkan pada timing diagram dari MCP3204 (gambar 4.6). Frekuensi *clock* optimal dari MCP3204 adalah sebesar 10 KHz sehingga periode 1 *clock* yang paling optimal dapat dihitung dengan persamaan dibawah(persamaan 4.4).

$$t_{clock} = \frac{1}{f} s \dots\dots\dots(4.4)$$

Sehingga periode *clock* ( $t_{clock}$ ) optimal adalah 0,0001 s atau sebesar 100  $\mu s$  dan dalam satu pulsa *clock* terdapat 1 periode pulsa bernilai rendah ( $t_{low}$ ) dan 1 periode pulsa bernilai tinggi ( $t_{high}$ ) sehingga masing – masing  $t_{low}$  dan  $t_{high}$  memiliki selang waktu  $t_{low/high} = \frac{t_{clock}}{2}$  yakni sebesar 50  $\mu s$ .

Dalam modul *accelerometer* yang digunakan, jalur  $D_{IN}$  dan  $D_{OUT}$  digabungkan menjadi 1 dan disebut pin DIO.



Gambar 4.6 Timing Diagram MCP3204

Karena pin  $D_{IN}$  dan  $D_{OUT}$  digabungkan menjadi 1 pin, maka untuk memungkinkan pembacaan data sensor diperlukan kontroler untuk mengatur kondisi pin DIO sebagai output pada saat pengiriman *control bit* dan sebagai input pada saat pembacaan data hasil konversi MCP3204.

Konfigurasi kontrol bit untuk pembacaan tiap *channel* sesuai dengan tabel 4.1.

Tabel 4.1. Konfigurasi Bit Kontrol MCP3204

Control Bit Selections				Input Configuration	Channel Selection
Single/ Diff	D2*	D1	D0		
1	X	0	0	single-ended	CH0
1	X	0	1	single-ended	CH1
1	X	1	0	single-ended	CH2
1	X	1	1	single-ended	CH3
0	X	0	0	differential	CH0 = IN+ CH1 = IN-
0	X	0	1	differential	CH0 = IN- CH1 = IN+
0	X	1	0	differential	CH2 = IN+ CH3 = IN-
0	X	1	1	differential	CH2 = IN- CH3 = IN+

Mengingat bahwa  $CH0 = AOX$ ,  $CH1 = AOY$ ,  $CH2 = AOZ$ ,  $CH3 = V_{ref}$  maka alternatif konfigurasi input yang paling mudah adalah dengan input *single – ended* yakni dengan men-set bit Single/Diff bernilai 1.

Notasi algoritmik untuk pembacaan modul *accelerometer* adalah sebagai berikut .

Procedure getH48C ( input=D1,D0)

Set DIO sebagai Output

Set CLK sebagai output

Set /CS sebagai output

{--Kirim start bit--}

CLK ke 1 (*Falling edge*),CS=0,DIO=1

{--Kirim kontrol bit--}

CLK ke 2, DIO=1 {--*single ended*--}

CLK ke 3, DIO=0 {--*D2 (don't care)*--}

CLK ke 4, DIO=D1

CLK ke 5, DIO=D0

{--*D1.D0 = 00 → sb x*

*D1.D0 = 01 → sb y*

*D1.D0 = 10 → sb z*

*D1.D0 = 11 → sb Vref--}*

CLK ke 6 {--*sample time*--}

CLK ke 7 {--*nul bit*--}

Set DIO sebagai Input

{--*ambil data dan simpan di array*--}

CLK ke 8, dValue[11] = DIO

CLK ke 9, dValue[10] = DIO

```

        CLK ke 10, dValue[9] = DIO
        CLK ke 11, dValue[8] = DIO
        CLK ke 12, dValue[7] = DIO
        CLK ke 13, dValue[5] = DIO
        CLK ke 14, dValue[6] = DIO
        CLK ke 15, dValue[4] = DIO
        CLK ke 16, dValue[3] = DIO
        CLK ke 17, dValue[2] = DIO
        CLK ke 18, dValue[1] = DIO
        CLK ke 19, dValue[0] = DIO

        For i=11 to i=0 begin
            Data += dValue[i]*2^i
        End.

        CS=1

    Return data

{--end procedure--}

```

Dari notasi algoritmik diatas, kemudian dikonversi kedalam bahasa C versi arduino karena kontroler yang digunakan adalah *arduino board*. Listing program procedure `gatH48C(D1,D0)` pada arduino IDE adalah sebagai berikut.

```
int getH48C(int D1,int D0){  
    digitalWrite(Cs, LOW);  
    pinMode(Dio, OUTPUT);  
    /***1  
    digitalWrite(Clk, LOW);  
    digitalWrite(Dio, HIGH);// start bit  
    delayMicroseconds(50);  
    digitalWrite(Clk, HIGH);  
    delayMicroseconds(50);  
    /***2  
    digitalWrite(Clk, LOW);  
    digitalWrite(Clk, HIGH);  
    delayMicroseconds(50);  
    /***3  
    digitalWrite(Clk, LOW);  
    digitalWrite(Dio, LOW);// D2 = 0  
    delayMicroseconds(1);  
    digitalWrite(Clk, HIGH);  
    delayMicroseconds(50);  
    /***4  
    digitalWrite(Clk, LOW);  
    if (D1==0){ digitalWrite(Dio, LOW);}  
    else{ digitalWrite(Dio, HIGH);}  
    delayMicroseconds(50);  
    digitalWrite(Clk, HIGH);  
}
```



```
    delayMicroseconds(50);

    /***5

    digitalWrite(Clk, LOW);
    if (D0==0){ digitalWrite(Dio, LOW);}
    else{ digitalWrite(Dio, HIGH);}

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***6

    digitalWrite(Clk, LOW);

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***7

    pinMode(Dio, INPUT);

    digitalWrite(Clk, LOW);

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***8

    digitalWrite(Clk, LOW);

    if (digitalRead(Dio)==HIGH){

        dValue[11]= 1 ;}

    else {
```

```
        dValue[11]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

/**9

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[10]= 1 ;}

    else {

        dValue[10]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

/**10

digitalWrite(Clk, LOW);

    if (digitalRead(Dio)==HIGH){

        dValue[9]= 1 ;}

    else {

        dValue[9]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

/**11

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){
```

```
        dValue[8]= 1 ;}

    else {

        dValue[8]= 0 ;}

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***12

    digitalWrite(Clk, LOW);

    if (digitalRead(Dio)==HIGH){

        dValue[7]= 1 ;}

    else {

        dValue[7]= 0 ;}

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***13

    digitalWrite(Clk, LOW);

    if (digitalRead(Dio)==HIGH){

        dValue[6]= 1 ;}

    else {

        dValue[6]= 0 ;}

    delayMicroseconds(50);

    digitalWrite(Clk, HIGH);

    delayMicroseconds(50);

    /***14
```

```
digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[5]= 1 ;}

else {

    dValue[5]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

/**15

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[4]= 1 ;}

else {

    dValue[4]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

/**16

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[3]= 1 ;}

else {

    dValue[3]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);
```

```
delayMicroseconds(50);

    /***17

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[2]= 1 ;}

    else {

        dValue[2]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

    /***18

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[1]= 1 ;}

    else {

        dValue[1]= 0 ;}

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

    /***19

digitalWrite(Clk, LOW);

if (digitalRead(Dio)==HIGH){

    dValue[0]= 1 ;}

    else {

        dValue[0]= 0 ;}
```

```

delayMicroseconds(50);

digitalWrite(Clk, HIGH);

delayMicroseconds(50);

data=(dValue[11]*2048)+(dValue[10]*1024)+(dValue[9]*512)+(
    dValue[8]*256)+(dValue[7]*128)+(dValue[6]*64)+(dValue[5]*32)+(dValue[4]*16)+(dValue[3]*8)+(dValue[2]*4)+
    (dValue[1]*2)+(dValue[0]*1);

digitalWrite(Cs,HIGH);

    return data;

}

```

Untuk pembacaan nilai tegangan dilakukan dengan memanggil prosedur getH48C(D1,D0) dengan D1 = 1 dan D0 = 0 untuk membaca Vref, D1 = 0, D0 = 0 untuk membaca nilai sumbu X, D1 = 0, D0 = 1 untuk membaca nilai sumbu Y, dan D1 = 1 dan D0 = 0 untuk membaca nilai pada sumbu Z. Contoh pemanggilan prosedur untuk pembacaan nilai Vref, sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z adalah sebagai berikut.

```

int dX, dY, dZ = 0;

ref = getH48C(1,1);

dX = getH48C(0,0);

dY = getH48C(0,1);

dZ = getH48C(1,0);

```

Sesuai dengan persamaan 4.1, 4.2, dan 4.3 maka level tegangan untuk tiap sumbu dinyatakan dengan mengeksekusi perintah berikut.

```

float aX, aY, aZ = 0.00;

```

```
aX = (((float)dX) - ((float)ref));
```

```
aY = (((float)dY) - ((float)ref));
```

```
aZ = (((float)dZ) - ((float)ref));
```

Nilai gX, gY, dan gZ masih dalam level tegangan yang dinyatakan dengan nilai ADC 12 bit (0 hingga 4095). Untuk menyatakan kedalam nilai g sesuai dengan jangkauan pembacaan sensor (-3 g hingga +3g) maka digunakan persamaan berikut.

$$g = \left( \frac{\text{data Axis} - V_{ref}}{4095} \right) \times \left( \frac{3.3}{0.3663} \right) \dots\dots\dots(4.5)$$

Berdasarkan persamaan 4.5, nilai 4095 adalah nilai maksimum ADC 12 bit, 3.3 adalah tegangan suplai H48C dan 0.3663 adalah nilai tegangan keluaran 1g. Persamaan diatas disederhanakan menjadi persamaan 4.6 berikut.

$$g = (\text{data Axis} - V_{ref}) \times 0.0022 \dots\dots\dots(4.6)$$

Sehingga, *source code* untuk pembacaan nilai g untuk tiap sumbu dengan satuan g adalah sebagai berikut.

```
float aX, aY, aZ = 0.00;
```

```
aX = (((float)dX) - ((float)ref)) *0.0022;
```

```
aY = (((float)dY) - ((float)ref)) *0.0022;
```

```
aZ = (((float)dZ) - ((float)ref)) *0.0022;
```

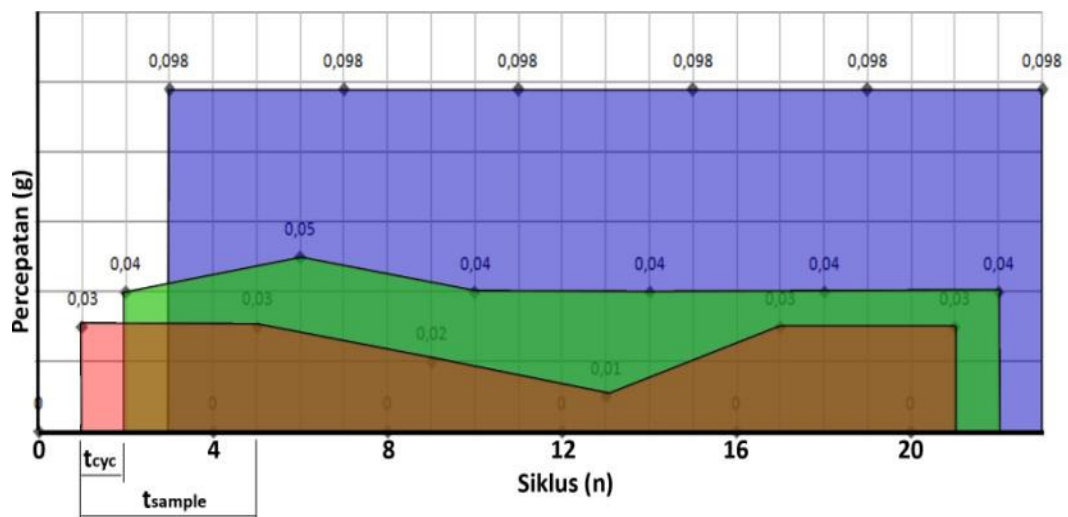
Hasil pengujian program untuk pembacaan nilai g menggunakan *source code* diatas dilihat menggunakan serial monitor dengan *baud rate* 9600 bps sesuai dengan gambar 4.7.





- Algoritma pengambilan data dilakukan secara bergantian dari  $V_{ref}$ ,  $dX$ ,  $dY$ , dan  $dZ$  dan masing – masing proses pengambilan data merupakan 1 siklus pengambilan data sehingga periode sampel ( $t_{sample}$ ) tiap sumbu sebesar 4 kali  $t_{cycle}$  sehingga  $t_{sample} = 8$  ms.

Sebagai ilustrasi ditunjukkan oleh grafik dibawah (gambar 4.8) dimana untuk mengambil data sebanyak 6 sampel dari tiap sumbu diperlukan sebanyak 24 siklus pengambilan data. Siklus pertama ( $n = 0$ ) diawali dengan pengambilan data  $V_{ref}$ , kemudian pada  $n = 1$  diambil data percepatan sumbu x (daerah berwarna merah) kemudian  $n = 2$  diambil data percepatan sumbu y ( daerah berwarna hijau) kemudian dilanjutkan untuk  $n = 3$  diambil data sumbu z (daerah berwarna biru) dan pada  $n = 4$  diulangi lagi untuk pengambilan data  $V_{ref}$  dan seterusnya.



Gambatr 4.8 Ilustrasi penga mbilan data sebanyak 6 sampel untuk  
tiap – tiap sumbu

Setelah mengetahui periode sampel tiap sumbu adalah 8 ms maka jumlah sampel dalam 1 detik sebanyak 125 sampel.

#### **IV.2.3 Karakteristik Akselerometer H48C**

Akselerometer H48C dapat mengukur percepatan pada sumbu X, Y dan Z baik percepatan statik maupun percepatan dinamik.

Percepatan statik merupakan percepatan yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Sedangkan percepatan dinamik dipengaruhi oleh gaya dari luar selain gaya gravitasi.

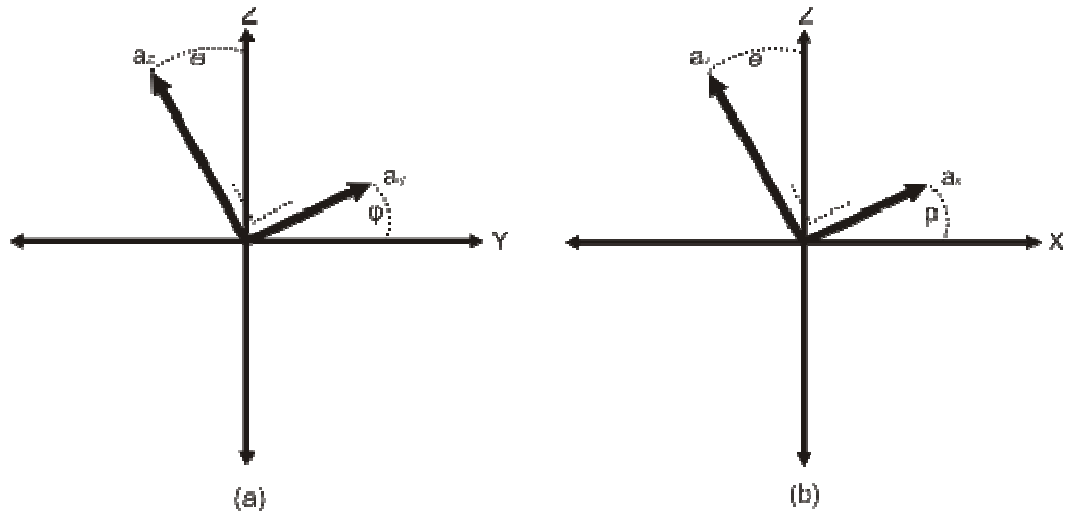
##### **a. Percepatan Statik**

Pada kondisi pembacaan percepatan statik, nilai percepatan tiap sumbu dipengaruhi oleh kemiringan sensor terhadap bidang referensi dalam hal ini adalah gaya gravitasi. Sehingga kondisi statik ideal untuk aplikasi pembacaan kemiringan suatu objek.

Nilai percepatan yang diberikan merupakan representasi posisi dari sensor terhadap pusat gravitasi dan magnitude vektor percepatan dari 3 sumbu yang diberikan sama dengan 1g. Kemiringan sensor memiliki sudut *pitch* ( $\rho$ ), *roll* ( $\varphi$ ) dan *theta* ( $\theta$ ).

*Pitch* ( $\rho$ ) merupakan sudut antara sumbu X relatif terhadap bumi. *Roll* ( $\varphi$ ) merupakan sudut antara sumbu Y relatif terhadap bumi. Sedangkan *theta* ( $\theta$ ) merupakan sudut antara sumbu Y relatif terhadap

gravitasi. Sudut  $\rho$ ,  $\varphi$ , dan  $\theta$  masing – masing ditunjukkan oleh gambar 4.9 dalam representasi 2 dimensi.



*Gambar 4.9. Sudut roll ( $\varphi$ ) dalam plot dua dimensi antara sumbu Y dan Z (gambar a), Sudut pitch ( $\rho$ ) dalam dua dimensi antara sumbu X dan Z.*

Akselerometer mengukur percepatan statis pada tiap sumbu dan memberikan data berupa vektor percepatan sehingga kita dapat menghitung besar sudut yang terbentuk pada masing – masing sudut  $\rho$ ,  $\varphi$ , dan  $\theta$  dengan persamaan 4.8, 4.9 dan 4.10 berikut.

$$\rho = \arctan \left( \frac{Ax}{\sqrt{Ay^2 + Az^2}} \right) \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{Ay}{\sqrt{Ax^2 + Az^2}} \right) \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{\sqrt{Ax^2 + Ay^2}}{Az} \right) \dots\dots\dots (4.10)$$

## b. Pengujian Percepatan Statik

Pengujian pengukuran statik dilakukan untuk mengetahui karakteristik akselerometer H48C pada saat bergerak statis.

Dalam pengujian ini dilakukan dua skema yaitu :

1. Pengambilan sudut  $\rho$  dan  $\theta$  dengan cara memutar sensor pada sumbu X ( sebesar satu putaran penuh ( $360^0$  ) dan kemudian memutar sensor sebesar  $\frac{1}{4}$  putaran pada arah positif kemudian kembali lagi ketitik awal (  $\frac{1}{4}$  putaran arah negatif).
2. Pengambilan sudut  $\phi$  dan  $\theta$  dengan cara memutar sensor pada sumbu Y sebesar satu putaran penuh ( $360^0$  ) dan kemudian memutar sensor sebesar  $\frac{1}{4}$  putaran pada arah positif kemudian kembali lagi ketitik awal (  $\frac{1}{4}$  putaran arah negatif)

Pada skema pengujian pertama, didapat kumpulan data berikut.

Tabel 4.2 Data akselerometer bergerak statis berputar  $360^0$  pada sumbu Y ( X = 0 ).

Ax	Ay	Az	M	-0.05	0.01	0.97	0.97	-0.10	0.03	0.97	0.98	-0.10	0.04	0.97	0.98
-0.09	0.01	0.97	0.97	-0.07	0.00	0.96	0.96	-0.10	0.02	0.97	0.98	-0.10	0.02	0.96	0.97
-0.09	0.01	0.96	0.96	-0.08	0.01	0.97	0.97	-0.13	0.01	0.97	0.98	-0.11	0.02	0.96	0.97
-0.08	0.01	0.96	0.96	-0.08	0.02	0.98	0.98	-0.12	0.01	0.98	0.99	-0.10	0.02	0.97	0.98
-0.10	0.02	0.96	0.97	-0.08	0.02	0.98	0.98	-0.10	0.02	0.99	1.00	-0.11	0.02	0.98	0.99
-0.10	0.02	0.97	0.98	-0.10	0.02	0.97	0.98	-0.11	0.04	0.97	0.98	-0.12	0.02	0.98	0.99
-0.09	0.02	0.97	0.97	-0.13	0.02	0.96	0.97	-0.09	0.02	0.97	0.97	-0.12	0.02	0.98	0.99
-0.08	0.02	0.97	0.97	-0.11	0.03	0.97	0.98	-0.10	0.00	0.97	0.98	-0.13	0.03	0.97	0.98
-0.07	0.02	0.97	0.97	-0.11	0.04	0.96	0.97	-0.10	0.00	0.97	0.98	-0.13	0.02	0.97	0.98
-0.06	0.02	0.98	0.98	-0.11	0.03	0.96	0.97	-0.10	0.03	0.97	0.98	-0.11	0.03	0.97	0.98

-0.11	0.02	0.96	0.97
-0.11	0.01	0.96	0.97
-0.09	0.03	0.97	0.97
-0.11	0.02	0.96	0.97
-0.12	-0.02	0.95	0.96
-0.11	-0.01	0.97	0.98
-0.08	0.04	0.99	0.99
-0.08	0.07	0.99	1.00
-0.11	0.04	0.97	0.98
-0.11	0.02	0.96	0.97
-0.10	0.01	0.96	0.97
-0.08	0.01	0.97	0.97
-0.06	0.01	0.97	0.97
-0.08	0.01	0.97	0.97
-0.09	0.00	0.97	0.97
-0.08	0.02	0.97	0.97
-0.08	0.02	0.97	0.97
-0.09	0.01	0.97	0.97
-0.09	0.02	0.98	0.98
-0.08	0.02	0.97	0.97
-0.10	0.03	0.97	0.98
-0.11	0.01	0.95	0.96
-0.10	0.03	0.96	0.97
-0.13	0.03	0.96	0.97
-0.09	0.02	0.97	0.97
-0.09	0.03	0.97	0.97
-0.09	0.02	0.97	0.97
-0.07	0.01	0.98	0.98
-0.09	0.04	0.98	0.98
-0.07	0.03	0.99	0.99
-0.07	0.05	0.98	0.98
-0.08	0.04	0.97	0.97
-0.06	0.01	0.97	0.97
-0.08	0.02	0.96	0.96
-0.08	0.02	0.96	0.96
-0.05	0.02	0.97	0.97
-0.05	0.03	0.97	0.97
-0.06	0.02	0.96	0.96
-0.06	0.01	0.97	0.97

-0.05	0.01	0.97	0.97
-0.01	0.02	0.97	0.97
-0.03	0.04	0.98	0.98
-0.02	0.05	0.99	0.99
0.02	0.04	1.00	1.00
0.02	0.03	1.00	1.00
-0.02	0.04	0.98	0.98
-0.04	0.04	0.96	0.96
-0.04	0.03	0.96	0.96
0.00	0.02	0.97	0.97
0.03	0.04	0.98	0.98
0.05	0.03	0.98	0.98
0.05	0.00	0.96	0.96
0.09	0.02	0.97	0.97
0.12	0.02	0.99	1.00
0.10	0.02	0.98	0.99
0.08	0.02	0.97	0.97
0.09	0.02	0.96	0.96
0.08	0.02	0.96	0.96
0.07	0.02	0.96	0.96
0.08	0.03	0.96	0.96
0.11	0.01	0.96	0.97
0.13	0.00	0.96	0.97
0.11	0.03	0.95	0.96
0.11	0.04	0.95	0.96
0.13	0.05	0.96	0.97
0.15	0.05	0.96	0.97
0.17	0.02	0.96	0.98
0.18	0.01	0.97	0.99
0.18	0.02	0.96	0.98
0.16	0.02	0.95	0.96
0.17	0.02	0.94	0.96
0.20	0.03	0.94	0.96
0.17	0.03	0.94	0.96
0.18	0.04	0.94	0.96
0.22	0.04	0.95	0.98
0.24	0.04	0.95	0.98
0.26	0.05	0.95	0.99
0.27	0.05	0.95	0.99

0.26	0.05	0.95	0.99
0.26	0.05	0.93	0.97
0.26	0.05	0.92	0.96
0.28	0.04	0.92	0.96
0.30	0.03	0.92	0.97
0.30	0.04	0.92	0.97
0.30	0.03	0.92	0.97
0.32	0.04	0.92	0.97
0.33	0.04	0.92	0.98
0.34	0.04	0.91	0.97
0.34	0.04	0.91	0.97
0.34	0.04	0.90	0.96
0.37	0.05	0.91	0.98
0.38	0.04	0.90	0.98
0.38	0.04	0.90	0.98
0.39	0.04	0.89	0.97
0.39	0.04	0.88	0.96
0.40	0.04	0.88	0.97
0.40	0.04	0.87	0.96
0.39	0.04	0.86	0.95
0.41	0.04	0.86	0.95
0.42	0.04	0.86	0.96
0.44	0.02	0.86	0.97
0.44	0.03	0.85	0.96
0.46	0.02	0.85	0.97
0.48	0.02	0.85	0.98
0.48	0.01	0.84	0.97
0.48	0.01	0.84	0.97
0.50	0.02	0.84	0.98
0.52	0.02	0.84	0.99
0.53	0.03	0.83	0.99
0.52	0.03	0.82	0.97
0.54	0.04	0.82	0.98
0.56	0.03	0.83	1.00
0.55	0.02	0.81	0.98
0.56	0.02	0.80	0.98
0.55	0.02	0.80	0.97
0.56	0.02	0.79	0.97
0.58	0.02	0.79	0.98

0.59	0.02	0.79	0.99
0.59	0.01	0.79	0.99
0.56	0.01	0.78	0.96
0.57	0.02	0.78	0.97
0.60	0.01	0.78	0.98
0.61	0.02	0.77	0.98
0.61	0.02	0.77	0.98
0.62	0.02	0.75	0.97
0.61	0.02	0.76	0.97
0.61	0.01	0.75	0.97
0.63	0.01	0.77	0.99
0.64	0.01	0.76	0.99
0.62	0.01	0.73	0.96
0.58	0.01	0.70	0.91
0.61	0.00	0.72	0.94
0.69	0.00	0.74	1.01
0.72	0.00	0.73	1.03
0.70	0.01	0.72	1.00
0.68	0.01	0.70	0.98
0.64	0.00	0.70	0.95
0.66	0.01	0.70	0.96
0.72	0.00	0.71	1.01
0.73	0.00	0.70	1.01
0.67	0.01	0.68	0.95
0.66	0.00	0.68	0.95
0.71	0.00	0.68	0.98
0.74	-0.01	0.69	1.01
0.75	0.00	0.68	1.01
0.71	0.01	0.66	0.97
0.69	0.01	0.66	0.95
0.70	0.00	0.67	0.97
0.73	0.00	0.68	1.00
0.74	0.00	0.67	1.00
0.70	0.00	0.65	0.96
0.71	0.00	0.66	0.97
0.75	-0.01	0.66	1.00
0.76	-0.02	0.66	1.01
0.75	-0.01	0.65	0.99
0.74	-0.01	0.64	0.98

0.71	-0.01	0.64	0.96
0.75	-0.01	0.64	0.99
0.76	-0.01	0.65	1.00
0.72	0.00	0.64	0.96
0.75	-0.02	0.64	0.99
0.78	-0.01	0.64	1.01
0.73	0.00	0.61	0.95
0.73	-0.02	0.61	0.95
0.79	-0.01	0.62	1.00
0.80	-0.01	0.62	1.01
0.77	-0.01	0.61	0.98
0.78	-0.02	0.61	0.99
0.79	-0.02	0.61	1.00
0.78	-0.03	0.61	0.99
0.79	-0.02	0.59	0.99
0.78	-0.03	0.58	0.97
0.79	-0.05	0.58	0.98
0.79	-0.03	0.58	0.98
0.81	-0.01	0.57	0.99
0.81	-0.02	0.56	0.98
0.81	-0.03	0.56	0.99
0.83	-0.02	0.56	1.00
0.82	-0.03	0.55	0.99
0.82	-0.02	0.54	0.98
0.85	-0.03	0.54	1.01
0.86	-0.04	0.52	1.01
0.83	-0.03	0.51	0.97
0.82	-0.02	0.50	0.96
0.85	-0.04	0.51	0.99
0.90	-0.01	0.51	1.03
0.82	-0.02	0.49	0.96
0.90	-0.02	0.50	1.03
0.88	-0.02	0.48	1.00
0.87	-0.02	0.47	0.99
0.87	-0.03	0.46	0.98
0.88	-0.04	0.47	1.00
0.89	-0.03	0.47	1.01
0.87	-0.03	0.45	0.98
0.88	-0.03	0.44	0.98

0.88	-0.03	0.44	0.98
0.89	-0.02	0.43	0.99
0.89	-0.02	0.42	0.98
0.88	-0.04	0.40	0.97
0.92	-0.03	0.43	1.02
0.90	-0.03	0.41	0.99
0.91	-0.02	0.42	1.00
0.90	-0.02	0.41	0.99
0.91	-0.02	0.38	0.99
0.91	-0.04	0.37	0.98
0.94	-0.03	0.37	1.01
0.95	-0.02	0.36	1.02
0.93	-0.02	0.35	0.99
0.94	-0.02	0.35	1.00
0.97	-0.02	0.36	1.03
0.95	-0.04	0.34	1.01
0.94	-0.02	0.32	0.99
0.93	-0.02	0.32	0.98
0.96	-0.02	0.32	1.01
0.98	-0.02	0.30	1.03
0.93	-0.04	0.30	0.98
0.94	-0.02	0.31	0.99
0.97	-0.03	0.29	1.01
0.96	-0.03	0.29	1.00
0.93	-0.03	0.28	0.97
0.97	-0.03	0.27	1.01
0.96	-0.03	0.25	0.99
0.95	-0.04	0.23	0.98
0.90	-0.16	0.25	0.95
0.98	-0.09	0.20	1.00
0.96	0.01	0.22	0.98
0.95	-0.04	0.22	0.98
1.04	-0.05	0.22	1.06
1.06	-0.06	0.19	1.08
0.95	-0.05	0.16	0.96
0.99	-0.05	0.19	1.01
0.97	-0.03	0.20	0.99
0.95	-0.02	0.17	0.97
0.98	-0.04	0.16	0.99

0.94	-0.06	0.15	0.95
0.97	-0.04	0.16	0.98
0.96	-0.02	0.17	0.98
1.05	-0.04	0.17	1.06
0.96	-0.01	0.14	0.97
1.04	-0.03	0.15	1.05
1.06	-0.06	0.12	1.07
1.00	-0.07	0.09	1.01
1.01	-0.02	0.10	1.02
1.00	-0.05	0.09	1.01
1.01	-0.04	0.08	1.01
0.98	-0.03	0.08	0.98
0.99	-0.07	0.07	0.99
1.00	-0.06	0.08	1.00
0.99	-0.03	0.08	0.99
0.99	-0.02	0.06	0.99
1.04	-0.04	0.08	1.04
0.98	-0.05	0.07	0.98
1.01	-0.05	0.05	1.01
1.02	-0.05	0.04	1.02
1.01	-0.02	0.02	1.01
0.98	-0.03	0.04	0.98
1.03	-0.08	0.01	1.03
1.03	-0.06	0.00	1.03
1.03	-0.03	0.00	1.03
1.03	-0.03	0.01	1.03
1.01	-0.05	0.01	1.01
1.01	-0.07	-0.01	1.01
1.03	-0.04	0.00	1.03
1.01	-0.05	-0.01	1.01
0.94	-0.04	0.00	0.94
1.01	-0.04	-0.01	1.01
1.09	-0.04	-0.02	1.09
1.01	-0.04	-0.02	1.01
1.03	-0.03	-0.01	1.03
0.99	-0.10	-0.05	1.00
0.98	-0.07	-0.06	0.98
1.02	-0.01	-0.03	1.02
1.05	-0.01	-0.01	1.05

0.98	-0.06	-0.02	0.98
0.97	-0.09	-0.03	0.97
0.97	-0.04	-0.03	0.97
0.98	-0.02	-0.03	0.98
1.05	-0.02	-0.02	1.05
1.03	-0.03	-0.04	1.03
0.98	-0.09	-0.05	0.99
0.97	-0.09	-0.07	0.98
1.05	-0.05	-0.05	1.05
1.04	-0.05	-0.05	1.04
1.02	-0.07	-0.08	1.03
0.98	-0.07	-0.09	0.99
1.03	-0.09	-0.09	1.04
0.98	-0.03	-0.10	0.99
1.00	-0.06	-0.11	1.01
1.04	-0.08	-0.11	1.05
1.02	-0.07	-0.12	1.03
0.99	-0.06	-0.13	1.00
1.03	-0.10	-0.13	1.04
1.02	-0.03	-0.10	1.03
0.96	-0.01	-0.11	0.97
1.00	-0.10	-0.13	1.01
1.04	-0.08	-0.11	1.05
1.01	-0.05	-0.13	1.02
1.03	-0.07	-0.15	1.04
1.00	-0.05	-0.15	1.01
1.00	-0.05	-0.16	1.01
0.99	-0.08	-0.15	1.00
1.01	-0.09	-0.15	1.03
1.01	-0.06	-0.16	1.02
0.99	-0.07	-0.18	1.01
0.99	-0.07	-0.18	1.01
1.00	-0.06	-0.17	1.02
0.99	-0.10	-0.20	1.01
1.00	-0.09	-0.19	1.02
1.02	-0.05	-0.18	1.04
0.99	-0.05	-0.19	1.01
1.01	-0.09	-0.19	1.03
0.96	-0.12	-0.22	0.99

1.01	-0.09	-0.21	1.04
1.01	-0.05	-0.20	1.03
0.98	-0.10	-0.20	1.01
0.98	-0.10	-0.22	1.01
0.99	-0.08	-0.22	1.02
1.01	-0.08	-0.20	1.03
0.96	-0.09	-0.23	0.99
0.98	-0.07	-0.24	1.01
0.98	-0.11	-0.26	1.02
0.98	-0.13	-0.25	1.02
0.98	-0.11	-0.28	1.03
1.01	-0.07	-0.28	1.05
0.96	-0.03	-0.30	1.01
0.97	-0.12	-0.30	1.02
0.96	-0.11	-0.30	1.01
0.97	-0.09	-0.33	1.03
0.97	-0.04	-0.35	1.03
0.95	-0.06	-0.33	1.01
0.96	-0.08	-0.35	1.02
0.95	-0.11	-0.36	1.02
0.94	-0.06	-0.38	1.02
0.94	-0.07	-0.38	1.02
0.93	-0.07	-0.39	1.01
0.93	-0.09	-0.40	1.02
0.94	-0.08	-0.42	1.03
0.95	-0.05	-0.43	1.04
0.92	-0.07	-0.42	1.01
0.95	-0.11	-0.43	1.05
0.90	-0.05	-0.44	1.00
0.88	-0.05	-0.45	0.99
0.91	-0.05	-0.45	1.02
0.92	-0.08	-0.45	1.03
0.89	-0.08	-0.47	1.01
0.87	-0.05	-0.48	0.99
0.90	-0.04	-0.49	1.03
0.90	-0.07	-0.48	1.02
0.92	-0.09	-0.51	1.06
0.88	-0.02	-0.50	1.01
0.86	-0.01	-0.52	1.01

0.87	-0.05	-0.51	1.01
0.85	-0.09	-0.53	1.01
0.84	-0.07	-0.53	1.00
0.84	-0.04	-0.54	1.00
0.85	-0.04	-0.54	1.01
0.87	-0.08	-0.55	1.03
0.84	-0.06	-0.57	1.02
0.83	-0.04	-0.57	1.01
0.83	-0.02	-0.57	1.01
0.86	-0.07	-0.58	1.04
0.82	-0.06	-0.59	1.01
0.81	-0.05	-0.59	1.00
0.82	-0.03	-0.59	1.01
0.83	-0.06	-0.62	1.04
0.79	-0.04	-0.59	0.99
0.81	-0.05	-0.62	1.02
0.82	-0.04	-0.63	1.03
0.82	-0.04	-0.62	1.03
0.81	-0.06	-0.62	1.02
0.79	-0.05	-0.64	1.02
0.79	-0.04	-0.64	1.02
0.82	-0.05	-0.66	1.05
0.81	-0.06	-0.66	1.05
0.75	-0.04	-0.65	0.99
0.77	-0.03	-0.65	1.01
0.79	-0.05	-0.65	1.02
0.77	-0.07	-0.65	1.01
0.76	-0.06	-0.65	1.00
0.75	-0.05	-0.66	1.00
0.75	-0.06	-0.66	1.00
0.76	-0.06	-0.68	1.02
0.78	-0.08	-0.68	1.04
0.75	-0.07	-0.68	1.01
0.74	-0.05	-0.68	1.01
0.73	-0.03	-0.70	1.01
0.75	-0.08	-0.68	1.02
0.73	-0.07	-0.70	1.01
0.72	-0.05	-0.68	0.99
0.73	-0.04	-0.70	1.01

0.75	-0.06	-0.71	1.03
0.74	-0.07	-0.71	1.03
0.75	-0.04	-0.73	1.05
0.73	-0.04	-0.70	1.01
0.70	-0.06	-0.71	1.00
0.72	-0.07	-0.74	1.03
0.71	-0.05	-0.72	1.01
0.69	-0.04	-0.73	1.01
0.70	-0.05	-0.75	1.03
0.71	-0.05	-0.75	1.03
0.68	-0.05	-0.75	1.01
0.66	-0.04	-0.75	1.00
0.67	-0.06	-0.76	1.01
0.67	-0.02	-0.76	1.01
0.64	-0.06	-0.75	0.99
0.64	-0.06	-0.76	1.00
0.63	-0.03	-0.77	1.00
0.64	-0.03	-0.78	1.01
0.64	-0.10	-0.78	1.01
0.62	-0.05	-0.78	1.00
0.65	-0.03	-0.80	1.03
0.66	-0.04	-0.81	1.05
0.63	-0.07	-0.80	1.02
0.62	-0.05	-0.81	1.02
0.62	-0.01	-0.81	1.02
0.61	-0.05	-0.82	1.02
0.59	-0.10	-0.79	0.99
0.60	-0.06	-0.79	0.99
0.59	-0.06	-0.80	1.00
0.58	-0.06	-0.81	1.00
0.58	-0.07	-0.80	0.99
0.58	-0.06	-0.83	1.01
0.58	-0.05	-0.86	1.04
0.59	-0.08	-0.82	1.01
0.55	-0.06	-0.81	0.98
0.58	-0.09	-0.83	1.02
0.56	-0.08	-0.86	1.03
0.55	-0.04	-0.85	1.01
0.54	-0.07	-0.84	1.00

0.53	-0.08	-0.86	1.01
0.55	-0.08	-0.86	1.02
0.54	-0.02	-0.87	1.02
0.53	-0.06	-0.86	1.01
0.50	-0.07	-0.84	0.98
0.53	-0.11	-0.86	1.02
0.53	-0.07	-0.86	1.01
0.53	-0.07	-0.87	1.02
0.50	-0.04	-0.86	1.00
0.50	-0.06	-0.88	1.01
0.52	-0.08	-0.89	1.03
0.52	-0.07	-0.88	1.02
0.50	-0.06	-0.85	0.99
0.48	-0.06	-0.87	1.00
0.49	-0.06	-0.88	1.01
0.48	-0.08	-0.87	1.00
0.49	-0.08	-0.88	1.01
0.48	-0.04	-0.88	1.00
0.47	-0.06	-0.88	1.00
0.45	-0.05	-0.89	1.00
0.45	-0.05	-0.89	1.00
0.46	-0.06	-0.90	1.01
0.46	-0.07	-0.88	1.00
0.44	-0.06	-0.90	1.00
0.46	-0.03	-0.91	1.02
0.43	-0.04	-0.92	1.02
0.43	-0.06	-0.91	1.01
0.42	-0.06	-0.90	0.99
0.43	-0.04	-0.90	1.00
0.42	-0.04	-0.92	1.01
0.39	-0.05	-0.92	1.00
0.40	-0.05	-0.93	1.01
0.39	-0.02	-0.94	1.02
0.39	-0.04	-0.93	1.01
0.38	-0.05	-0.93	1.01
0.36	-0.04	-0.94	1.01
0.37	-0.05	-0.93	1.00
0.37	-0.05	-0.93	1.00
0.34	-0.04	-0.94	1.00

0.35	-0.05	-0.92	0.99
0.35	-0.02	-0.96	1.02
0.35	-0.04	-0.97	1.03
0.36	-0.04	-0.95	1.02
0.33	-0.04	-0.93	0.99
0.31	-0.05	-0.97	1.02
0.32	0.00	-1.00	1.05
0.31	-0.04	-0.96	1.01
0.29	-0.04	-0.95	0.99
0.29	-0.04	-0.94	0.98
0.29	-0.05	-0.96	1.00
0.28	-0.03	-0.96	1.00
0.26	-0.03	-0.95	0.99
0.25	-0.04	-0.96	0.99
0.25	-0.04	-0.96	0.99
0.26	-0.02	-0.98	1.01
0.25	0.00	-0.98	1.01
0.24	-0.04	-0.97	1.00
0.23	-0.03	-0.98	1.01
0.23	-0.03	-0.98	1.01
0.23	-0.04	-0.97	1.00
0.24	-0.04	-0.98	1.01
0.22	-0.01	-0.99	1.01
0.20	-0.02	-1.00	1.02
0.21	-0.03	-0.97	0.99
0.20	-0.03	-0.99	1.01
0.18	-0.01	-0.99	1.01
0.18	-0.02	-0.99	1.01
0.18	-0.01	-0.99	1.01
0.18	-0.02	-0.99	1.01
0.16	0.00	-0.99	1.00
0.15	0.00	-1.00	1.01
0.16	-0.04	-0.99	1.00
0.14	-0.01	-0.97	0.98
0.13	0.00	-0.98	0.99
0.12	0.01	-1.00	1.01
0.11	0.01	-1.01	1.02
0.11	0.00	-1.00	1.01
0.12	-0.02	-0.98	0.99

0.09	0.01	-1.01	1.01
0.11	0.03	-1.01	1.02
0.11	0.01	-1.00	1.01
0.09	0.00	-1.00	1.00
0.08	0.01	-1.00	1.00
0.05	0.02	-1.01	1.01
0.07	0.02	-0.99	0.99
0.04	-0.02	-1.00	1.00
0.00	-0.04	-0.99	0.99
0.00	0.01	-1.01	1.01
-0.02	0.02	-1.01	1.01
0.01	0.01	-1.01	1.01
-0.05	-0.01	-0.99	0.99
-0.04	0.00	-1.00	1.00
-0.04	0.01	-1.00	1.00
-0.03	0.00	-1.00	1.00
-0.05	0.00	-0.98	0.98
-0.09	-0.01	-0.99	0.99
-0.11	-0.01	-1.01	1.02
-0.12	0.00	-1.00	1.01
-0.11	-0.01	-0.98	0.99
-0.14	-0.02	-0.99	1.00
-0.18	-0.01	-1.01	1.03
-0.15	0.01	-1.01	1.02
-0.15	-0.01	-0.98	0.99
-0.13	-0.02	-0.98	0.99
-0.19	0.00	-0.99	1.01
-0.22	0.00	-1.01	1.03
-0.14	0.00	-0.97	0.98
-0.18	-0.02	-0.97	0.99
-0.22	0.01	-0.97	0.99
-0.22	0.02	-0.99	1.01
-0.18	0.03	-0.96	0.98
-0.22	0.00	-0.97	0.99
-0.27	-0.02	-0.94	0.98
-0.25	-0.01	-0.97	1.00
-0.27	0.03	-0.97	1.01
-0.29	0.02	-0.97	1.01
-0.35	-0.03	-0.95	1.01

-0.33	0.01	-0.96	1.02
-0.30	0.02	-0.97	1.02
-0.28	0.01	-0.95	0.99
-0.32	0.00	-0.94	0.99
-0.32	0.00	-0.95	1.00
-0.34	0.01	-0.94	1.00
-0.34	0.03	-0.96	1.02
-0.32	0.01	-0.94	0.99
-0.32	-0.01	-0.92	0.97
-0.37	0.01	-0.95	1.02
-0.37	0.02	-0.95	1.02
-0.34	0.03	-0.93	0.99
-0.33	0.00	-0.93	0.99
-0.31	0.00	-0.93	0.98
-0.44	0.03	-0.93	1.03
-0.38	0.05	-0.95	1.02
-0.34	0.02	-0.94	1.00
-0.36	0.00	-0.92	0.99
-0.44	0.01	-0.92	1.02
-0.44	0.02	-0.94	1.04
-0.41	0.02	-0.93	1.02
-0.38	0.02	-0.88	0.96
-0.44	0.00	-0.90	1.00
-0.48	0.00	-0.90	1.02
-0.50	0.00	-0.93	1.06
-0.43	0.00	-0.89	0.99
-0.52	-0.07	-0.88	1.02
-0.49	0.01	-0.89	1.02
-0.48	0.00	-0.88	1.00
-0.51	0.00	-0.87	1.01
-0.53	-0.02	-0.88	1.03
-0.55	0.00	-0.89	1.05
-0.52	0.03	-0.87	1.01
-0.53	-0.02	-0.85	1.00
-0.54	-0.02	-0.84	1.00
-0.55	-0.02	-0.83	1.00
-0.59	-0.01	-0.85	1.03
-0.58	0.03	-0.85	1.03
-0.56	0.00	-0.83	1.00

-0.56	-0.01	-0.82	0.99
-0.54	-0.04	-0.83	0.99
-0.57	0.04	-0.78	0.97
-0.57	0.00	-0.79	0.97
-0.63	-0.03	-0.81	1.03
-0.59	-0.01	-0.80	0.99
-0.62	0.01	-0.83	1.04
-0.60	-0.01	-0.81	1.01
-0.63	0.00	-0.81	1.03
-0.61	-0.02	-0.81	1.01
-0.61	-0.03	-0.79	1.00
-0.66	-0.02	-0.81	1.05
-0.64	-0.02	-0.81	1.03
-0.63	-0.04	-0.79	1.01
-0.64	-0.03	-0.80	1.02
-0.63	-0.04	-0.81	1.03
-0.62	-0.04	-0.79	1.01
-0.61	-0.03	-0.78	0.99
-0.64	-0.04	-0.79	1.02
-0.64	-0.04	-0.78	1.01
-0.64	-0.01	-0.79	1.02
-0.63	-0.03	-0.77	1.00
-0.64	-0.02	-0.78	1.01
-0.64	-0.06	-0.78	1.01
-0.67	-0.03	-0.78	1.03
-0.64	-0.02	-0.77	1.00
-0.68	-0.04	-0.75	1.01
-0.64	-0.05	-0.77	1.00
-0.66	-0.03	-0.77	1.01
-0.68	-0.03	-0.77	1.03
-0.69	-0.05	-0.74	1.01
-0.69	-0.03	-0.75	1.02
-0.68	-0.04	-0.75	1.01
-0.69	-0.04	-0.75	1.02
-0.68	-0.04	-0.73	1.00
-0.71	-0.04	-0.74	1.03
-0.69	-0.04	-0.73	1.01
-0.71	-0.03	-0.74	1.03
-0.72	-0.04	-0.73	1.03



-0.71	-0.05	-0.72	1.01
-0.71	-0.04	-0.73	1.02
-0.70	-0.05	-0.72	1.01
-0.71	-0.03	-0.70	1.00
-0.73	-0.04	-0.71	1.02
-0.72	-0.05	-0.71	1.01
-0.74	-0.04	-0.70	1.02
-0.73	-0.05	-0.70	1.01
-0.74	-0.06	-0.68	1.01
-0.74	-0.05	-0.68	1.01
-0.75	-0.06	-0.68	1.01
-0.75	-0.05	-0.68	1.01
-0.70	-0.07	-0.64	0.95
-0.77	-0.06	-0.67	1.02
-0.76	-0.05	-0.68	1.02
-0.77	-0.06	-0.68	1.03
-0.79	-0.05	-0.68	1.04
-0.79	-0.06	-0.66	1.03
-0.77	-0.05	-0.66	1.02
-0.78	-0.06	-0.66	1.02
-0.78	-0.05	-0.65	1.02
-0.82	-0.05	-0.65	1.05
-0.80	-0.07	-0.64	1.03
-0.81	-0.06	-0.63	1.03
-0.80	-0.06	-0.62	1.01
-0.82	-0.07	-0.61	1.02
-0.80	-0.08	-0.60	1.00
-0.81	-0.06	-0.60	1.01
-0.82	-0.05	-0.60	1.02
-0.84	-0.07	-0.58	1.02
-0.85	-0.08	-0.58	1.03
-0.83	-0.07	-0.58	1.01
-0.84	-0.07	-0.58	1.02
-0.84	-0.06	-0.57	1.02
-0.86	-0.06	-0.56	1.03
-0.85	-0.07	-0.55	1.01
-0.85	-0.07	-0.54	1.01
-0.87	-0.07	-0.54	1.03
-0.88	-0.06	-0.53	1.03

-0.88	-0.07	-0.53	1.03
-0.86	-0.08	-0.51	1.00
-0.88	-0.06	-0.51	1.02
-0.89	-0.06	-0.50	1.02
-0.88	-0.07	-0.50	1.01
-0.89	-0.07	-0.50	1.02
-0.91	-0.06	-0.50	1.04
-0.90	-0.06	-0.48	1.02
-0.91	-0.07	-0.48	1.03
-0.92	-0.06	-0.47	1.03
-0.91	-0.07	-0.46	1.02
-0.92	-0.09	-0.46	1.03
-0.93	-0.07	-0.45	1.04
-0.92	-0.07	-0.44	1.02
-0.94	-0.07	-0.44	1.04
-0.93	-0.06	-0.43	1.03
-0.93	-0.08	-0.42	1.02
-0.93	-0.07	-0.40	1.01
-0.91	-0.07	-0.38	0.99
-0.95	-0.07	-0.40	1.03
-0.97	-0.05	-0.40	1.05
-0.96	-0.07	-0.38	1.03
-0.95	-0.07	-0.37	1.02
-0.96	-0.06	-0.37	1.03
-0.97	-0.07	-0.37	1.04
-0.97	-0.07	-0.36	1.04
-0.97	-0.06	-0.35	1.03
-0.96	-0.07	-0.35	1.02
-0.97	-0.07	-0.35	1.03
-0.99	-0.07	-0.34	1.05
-0.97	-0.07	-0.33	1.03
-0.98	-0.07	-0.33	1.04
-0.98	-0.07	-0.32	1.03
-0.99	-0.07	-0.32	1.04
-0.99	-0.07	-0.31	1.04
-0.98	-0.07	-0.31	1.03
-0.98	-0.08	-0.30	1.03
-0.99	-0.07	-0.28	1.03
-0.98	-0.06	-0.27	1.02

-1.01	-0.06	-0.27	1.05
-1.01	-0.05	-0.26	1.04
-1.00	-0.07	-0.25	1.03
-1.00	-0.06	-0.23	1.03
-1.00	-0.06	-0.23	1.03
-1.01	-0.06	-0.22	1.04
-1.02	-0.06	-0.21	1.04
-1.01	-0.07	-0.20	1.03
-1.01	-0.06	-0.19	1.03
-1.01	-0.06	-0.17	1.03
-1.02	-0.07	-0.16	1.03
-1.01	-0.07	-0.16	1.02
-1.03	-0.07	-0.15	1.04
-1.03	-0.06	-0.15	1.04
-1.02	-0.05	-0.14	1.03
-1.02	-0.06	-0.12	1.03
-1.02	-0.05	-0.11	1.03
-1.03	-0.07	-0.09	1.04
-1.03	-0.05	-0.09	1.04
-1.03	-0.04	-0.08	1.03
-1.03	-0.05	-0.07	1.03
-1.03	-0.05	-0.06	1.03
-1.02	-0.06	-0.05	1.02
-1.03	-0.05	-0.05	1.03
-1.04	-0.04	-0.04	1.04
-1.05	-0.04	-0.04	1.05
-1.01	-0.05	-0.02	1.01
-1.03	-0.04	-0.02	1.03
-1.04	-0.04	-0.02	1.04
-1.04	-0.05	-0.02	1.04
-1.03	-0.04	0.01	1.03
-1.03	-0.04	0.01	1.03
-1.03	-0.04	0.02	1.03
-1.04	-0.03	0.03	1.04
-1.03	-0.03	0.02	1.03
-1.03	-0.05	0.04	1.03
-1.03	-0.04	0.05	1.03
-1.03	-0.03	0.05	1.03

-1.04	-0.03	0.05	1.04
-1.03	-0.02	0.05	1.03
-1.02	-0.05	0.07	1.02
-1.03	-0.02	0.08	1.03
-1.05	-0.01	0.08	1.05
-1.02	-0.02	0.10	1.03
-1.02	-0.04	0.10	1.03
-1.03	-0.03	0.11	1.04
-1.05	-0.03	0.11	1.06
-1.04	-0.02	0.12	1.05
-1.03	-0.03	0.13	1.04
-1.01	-0.02	0.15	1.02
-1.03	-0.02	0.14	1.04
-1.04	-0.02	0.15	1.05
-1.01	0.01	0.11	1.02
-0.98	0.01	0.15	0.99
-1.01	-0.01	0.12	1.02
-1.04	-0.03	0.15	1.05
-1.05	-0.02	0.13	1.06
-1.02	-0.02	0.14	1.03
-1.00	-0.03	0.16	1.01
-1.01	-0.03	0.16	1.02
-1.04	-0.02	0.15	1.05
-1.04	-0.02	0.15	1.05
-1.06	-0.04	0.15	1.07
-1.03	-0.04	0.16	1.04
-1.02	-0.04	0.17	1.03
-1.04	-0.05	0.17	1.05
-1.04	-0.03	0.18	1.06
-1.02	-0.04	0.19	1.04
-1.03	-0.03	0.18	1.05
-0.99	-0.03	0.22	1.01
-1.02	-0.05	0.21	1.04
-1.01	-0.04	0.23	1.04
-0.97	-0.04	0.25	1.00
-1.00	-0.03	0.25	1.03
-0.99	-0.03	0.28	1.03
-0.95	-0.03	0.30	1.00
-0.96	-0.03	0.29	1.00

-0.98	-0.03	0.30	1.03
-0.99	-0.02	0.30	1.03
-1.00	-0.02	0.29	1.04
-0.99	-0.04	0.31	1.04
-0.99	-0.04	0.31	1.04
-0.99	-0.03	0.31	1.04
-0.96	-0.05	0.33	1.02
-0.96	-0.04	0.35	1.02
-0.95	-0.03	0.36	1.02
-0.97	-0.02	0.36	1.03
-0.98	-0.02	0.37	1.05
-0.95	-0.03	0.38	1.02
-0.95	-0.03	0.40	1.03
-0.92	-0.03	0.41	1.01
-0.92	-0.03	0.42	1.01
-0.93	-0.03	0.42	1.02
-0.94	-0.03	0.42	1.03
-0.92	-0.03	0.44	1.02
-0.91	-0.03	0.43	1.01
-0.91	-0.05	0.44	1.01
-0.92	-0.04	0.45	1.02
-0.90	-0.05	0.46	1.01
-0.92	-0.04	0.45	1.02
-0.91	-0.03	0.47	1.02
-0.92	-0.03	0.47	1.03
-0.89	-0.04	0.48	1.01
-0.92	-0.03	0.48	1.04
-0.91	-0.03	0.49	1.03
-0.88	-0.04	0.49	1.01
-0.86	-0.04	0.51	1.00
-0.86	-0.04	0.51	1.00
-0.91	-0.02	0.50	1.04
-0.95	-0.04	0.51	1.08
-0.92	-0.04	0.52	1.06
-0.83	-0.03	0.55	1.00
-0.85	-0.04	0.55	1.01
-0.80	-0.04	0.56	0.98
-0.83	-0.04	0.53	0.99
-0.87	-0.04	0.54	1.02

-0.92	-0.02	0.53	1.06
-0.89	-0.04	0.54	1.04
-0.88	-0.04	0.55	1.04
-0.86	-0.02	0.56	1.03
-0.83	-0.04	0.59	1.02
-0.85	-0.02	0.57	1.02
-0.84	-0.04	0.56	1.01
-0.81	-0.06	0.57	0.99
-0.83	-0.04	0.57	1.01
-0.86	-0.04	0.56	1.03
-0.85	-0.05	0.57	1.02
-0.78	-0.05	0.60	0.99
-0.82	-0.05	0.60	1.02
-0.83	-0.05	0.60	1.03
-0.81	-0.06	0.61	1.02
-0.78	-0.04	0.62	1.00
-0.80	-0.05	0.63	1.02
-0.80	-0.05	0.61	1.01
-0.80	-0.05	0.61	1.01
-0.78	-0.06	0.64	1.01
-0.78	-0.06	0.63	1.00
-0.79	-0.05	0.63	1.01
-0.79	-0.06	0.63	1.01
-0.79	-0.04	0.65	1.02
-0.77	-0.05	0.66	1.02
-0.76	-0.05	0.66	1.01
-0.75	-0.06	0.68	1.01
-0.75	-0.06	0.68	1.01
-0.75	-0.04	0.69	1.02
-0.75	-0.04	0.68	1.01
-0.76	-0.03	0.68	1.02
-0.74	-0.04	0.69	1.01
-0.71	-0.07	0.69	0.99
-0.71	-0.07	0.69	0.99
-0.73	-0.05	0.70	1.01
-0.72	-0.05	0.71	1.01
-0.67	-0.05	0.73	0.99
-0.69	-0.05	0.72	1.00
-0.70	-0.05	0.74	1.02

-0.70	-0.04	0.75	1.03
-0.67	-0.04	0.73	0.99
-0.66	-0.06	0.74	0.99
-0.67	-0.06	0.74	1.00
-0.67	-0.05	0.75	1.01
-0.67	-0.07	0.76	1.02
-0.66	-0.06	0.75	1.00
-0.66	-0.06	0.75	1.00
-0.66	-0.06	0.76	1.01
-0.66	-0.06	0.75	1.00
-0.66	-0.05	0.77	1.02
-0.64	-0.06	0.76	1.00
-0.64	-0.05	0.76	0.99
-0.65	-0.05	0.76	1.00
-0.64	-0.06	0.77	1.00
-0.64	-0.05	0.77	1.00
-0.62	-0.07	0.77	0.99
-0.61	-0.06	0.78	0.99
-0.62	-0.07	0.78	1.00
-0.61	-0.06	0.80	1.01
-0.60	-0.05	0.80	1.00
-0.60	-0.06	0.79	0.99
-0.58	-0.07	0.80	0.99
-0.57	-0.09	0.81	0.99
-0.57	-0.08	0.82	1.00
-0.57	-0.08	0.83	1.01
-0.56	-0.07	0.82	1.00
-0.56	-0.07	0.82	1.00
-0.55	-0.07	0.83	1.00
-0.54	-0.08	0.84	1.00
-0.55	-0.08	0.83	1.00
-0.54	-0.08	0.83	0.99
-0.53	-0.07	0.83	0.99
-0.53	-0.09	0.83	0.99
-0.52	-0.09	0.84	0.99
-0.53	-0.08	0.84	1.00
-0.52	-0.07	0.84	0.99
-0.51	-0.07	0.84	0.99
-0.49	-0.09	0.86	0.99

-0.50	-0.08	0.85	0.99
-0.49	-0.07	0.86	0.99
-0.49	-0.08	0.87	1.00
-0.48	-0.07	0.86	0.99
-0.47	-0.08	0.86	0.98
-0.46	-0.11	0.89	1.01
-0.45	-0.09	0.88	0.99
-0.44	-0.08	0.88	0.99
-0.44	-0.07	0.88	0.99
-0.43	-0.07	0.89	0.99
-0.43	-0.08	0.89	0.99
-0.43	-0.09	0.89	0.99
-0.43	-0.08	0.88	0.98
-0.42	-0.09	0.90	1.00
-0.41	-0.08	0.91	1.00
-0.39	-0.09	0.90	0.98
-0.40	-0.08	0.90	0.99
-0.40	-0.08	0.90	0.99
-0.38	-0.09	0.90	0.98
-0.38	-0.09	0.92	1.00
-0.38	-0.09	0.91	0.99
-0.37	-0.09	0.91	0.99
-0.36	-0.09	0.91	0.98
-0.35	-0.09	0.91	0.98
-0.34	-0.10	0.91	0.98
-0.34	-0.11	0.91	0.98
-0.35	-0.09	0.91	0.98
-0.35	-0.08	0.93	1.00
-0.34	-0.09	0.94	1.00
-0.33	-0.10	0.93	0.99
-0.33	-0.10	0.92	0.98
-0.33	-0.09	0.91	0.97
-0.32	-0.09	0.93	0.99
-0.32	-0.09	0.93	0.99
-0.34	-0.09	0.93	0.99
-0.32	-0.08	0.92	0.98
-0.28	-0.10	0.93	0.98
-0.29	-0.09	0.92	0.97
-0.28	-0.10	0.92	0.97

-0.30	-0.09	0.93	0.98
-0.27	-0.09	0.93	0.97
-0.27	-0.09	0.94	0.98
-0.27	-0.09	0.95	0.99
-0.27	-0.08	0.95	0.99
-0.27	-0.10	0.94	0.98
-0.27	-0.09	0.95	0.99
-0.23	-0.08	0.95	0.98
-0.22	-0.11	0.95	0.98
-0.23	-0.10	0.94	0.97
-0.21	-0.09	0.95	0.98
-0.23	-0.09	0.95	0.98
-0.20	-0.10	0.94	0.97
-0.19	-0.11	0.96	0.98
-0.20	-0.10	0.95	0.98
-0.19	-0.09	0.95	0.97
-0.17	-0.10	0.96	0.98
-0.18	-0.09	0.96	0.98
-0.16	-0.10	0.97	0.99
-0.16	-0.10	0.95	0.97
-0.16	-0.09	0.97	0.99
-0.17	-0.10	0.96	0.98
-0.16	-0.09	0.96	0.98
-0.15	-0.09	0.96	0.98
-0.15	-0.11	0.95	0.97
-0.15	-0.11	0.95	0.97
-0.17	-0.10	0.96	0.98
-0.15	-0.08	0.95	0.97
-0.14	-0.10	0.96	0.98
-0.13	-0.09	0.97	0.98
-0.12	-0.10	0.95	0.96
-0.11	-0.09	0.96	0.97
-0.08	-0.10	0.97	0.98
-0.10	-0.11	0.96	0.97
-0.05	-0.09	0.97	0.98
-0.09	-0.10	0.97	0.98
-0.09	-0.09	0.98	0.99
-0.08	-0.09	0.97	0.98
-0.06	-0.10	0.97	0.98

-0.08	-0.10	0.97	0.98
-0.07	-0.10	0.95	0.96
-0.05	-0.10	0.96	0.97
-0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.02	-0.10	0.97	0.98
-0.04	-0.09	0.97	0.97
-0.06	-0.09	0.97	0.98
-0.02	-0.10	0.96	0.97
0.00	-0.11	0.97	0.98
-0.01	-0.11	0.97	0.98
-0.02	-0.09	0.97	0.97
0.00	-0.09	0.98	0.98
0.00	-0.09	0.97	0.97
-0.01	-0.09	0.98	0.98
-0.02	-0.08	0.97	0.97
-0.05	-0.11	0.97	0.98
-0.10	-0.09	0.97	0.98
-0.05	-0.09	0.97	0.98
-0.07	-0.09	0.96	0.97
-0.06	-0.10	0.95	0.96
-0.05	-0.09	0.96	0.97
-0.02	-0.09	0.96	0.96
-0.04	-0.09	0.97	0.97
-0.02	-0.09	0.98	0.98
-0.04	-0.10	0.95	0.96
0.05	-0.09	0.96	0.97
-0.06	-0.07	0.98	0.98
-0.02	-0.10	0.98	0.99
-0.01	-0.09	0.97	0.97
0.00	-0.10	0.97	0.98
-0.01	-0.10	0.97	0.98
0.02	-0.08	0.97	0.97
0.00	-0.09	0.97	0.97
0.02	-0.10	0.97	0.98
0.01	-0.09	0.96	0.96
-0.01	-0.10	0.97	0.98
-0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.03	-0.09	0.97	0.97
-0.04	-0.09	0.97	0.97

-0.02	-0.10	0.97	0.98
-0.01	-0.10	0.97	0.98
-0.03	-0.09	0.98	0.98
-0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.01	-0.10	0.97	0.98
-0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.02	-0.08	0.97	0.97
0.04	-0.09	0.96	0.97
0.01	-0.10	0.98	0.99
0.00	-0.09	0.97	0.97
0.02	-0.07	0.98	0.98
0.02	-0.09	0.98	0.98
0.02	-0.09	0.98	0.98
0.02	-0.07	0.96	0.96
0.01	-0.10	0.98	0.99
0.02	-0.08	0.96	0.96
0.04	-0.07	0.98	0.98
0.02	-0.08	0.97	0.97
-0.02	-0.10	0.97	0.98
-0.01	-0.07	0.96	0.96
0.00	-0.10	0.97	0.98
0.01	-0.09	0.97	0.97
0.01	-0.09	0.98	0.98
0.00	-0.09	0.98	0.98
-0.01	-0.06	0.98	0.98
0.00	-0.12	0.96	0.97
-0.01	-0.09	0.96	0.96
0.00	-0.09	0.97	0.97
0.01	-0.09	0.99	0.99
0.02	-0.07	0.96	0.96
-0.04	-0.05	0.92	0.92
-0.03	-0.08	0.94	0.94
0.00	-0.13	0.97	0.98
0.02	-0.12	0.99	1.00
0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.01	-0.07	0.95	0.95
0.00	-0.08	0.97	0.97
0.00	-0.08	0.97	0.97
-0.01	-0.08	0.96	0.96

-0.03	-0.06	0.96	0.96
-0.02	-0.06	0.97	0.97
-0.01	-0.08	0.97	0.97
-0.01	-0.07	0.95	0.95
0.00	-0.08	0.97	0.97
0.02	-0.10	0.98	0.99
0.02	-0.10	0.97	0.98
0.02	-0.09	0.97	0.97
0.01	-0.08	0.96	0.96
0.02	-0.09	0.97	0.97
0.02	-0.08	0.96	0.96
0.03	-0.09	0.98	0.98
0.03	-0.09	0.97	0.97
0.02	-0.06	0.95	0.95
0.02	-0.06	0.99	0.99
0.04	-0.08	0.99	0.99
0.03	-0.09	0.98	0.98
0.02	-0.07	0.96	0.96
0.01	-0.07	0.97	0.97
0.02	-0.07	0.96	0.96
0.01	-0.07	0.95	0.95
0.02	-0.07	0.96	0.96
0.03	-0.09	0.96	0.96
0.02	-0.08	0.97	0.97
0.02	-0.09	0.98	0.98
0.03	-0.07	0.99	0.99
0.04	-0.08	0.98	0.98
0.03	-0.07	0.96	0.96
0.02	-0.06	0.98	0.98
0.03	-0.08	0.97	0.97
0.00	-0.08	0.93	0.93
-0.02	-0.05	0.93	0.93
0.01	-0.06	0.96	0.96
0.02	-0.08	0.97	0.97
0.01	-0.08	0.97	0.97
0.00	-0.07	0.97	0.97
0.02	-0.07	0.98	0.98
0.03	-0.07	0.99	0.99
0.04	-0.05	0.99	0.99

0.03	-0.05	0.98	0.98	0.00	-0.06	0.95	0.95	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.02	-0.07	1.00	1.00
0.03	-0.07	0.97	0.97	0.00	-0.06	0.96	0.96	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.03	-0.06	0.98	0.98
0.04	-0.07	0.98	0.98	0.00	-0.06	0.96	0.96	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.02	-0.06	0.97	0.97
0.04	-0.08	0.97	0.97	0.00	-0.06	0.98	0.98	0.02	-0.06	0.97	0.97	0.00	-0.07	0.96	0.96
0.03	-0.08	0.97	0.97	0.00	-0.06	0.98	0.98	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.00	-0.05	0.97	0.97
0.02	-0.08	0.95	0.95	0.00	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.00	-0.04	0.97	0.97
0.00	-0.07	0.94	0.94	0.00	-0.05	0.97	0.97	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.01	-0.04	0.97	0.97
0.00	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.01	-0.06	0.96	0.96	-0.01	-0.06	0.95	0.95
0.01	-0.09	0.96	0.96	0.02	-0.08	0.97	0.97	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.01	-0.05	0.97	0.97
0.01	-0.08	0.97	0.97	0.01	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.07	0.97	0.97	0.01	-0.06	0.97	0.97
0.00	-0.07	0.98	0.98	0.02	-0.07	0.97	0.97	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.02	-0.05	0.97	0.97
0.00	-0.07	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.97	0.97	0.00	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.04	0.96	0.96
0.00	-0.05	0.95	0.95	0.02	-0.07	0.98	0.98	0.00	-0.07	0.97	0.97	0.00	-0.05	0.96	0.96
0.00	-0.04	0.93	0.93	0.02	-0.06	0.98	0.98	0.01	-0.06	0.97	0.97	-0.01	-0.06	0.95	0.95
0.02	-0.03	0.95	0.95	0.02	-0.07	0.98	0.98	0.01	-0.05	0.97	0.97	0.00	-0.05	0.96	0.96
0.03	-0.04	0.98	0.98	0.01	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.05	0.98	0.98
0.04	-0.06	0.99	0.99	-0.01	-0.07	0.95	0.95	0.02	-0.07	0.98	0.98	0.01	-0.06	0.97	0.97
0.04	-0.08	0.99	0.99	-0.01	-0.07	0.94	0.94	0.02	-0.07	0.97	0.97	0.02	-0.06	0.98	0.98
0.04	-0.08	0.99	0.99	-0.01	-0.06	0.95	0.95	0.02	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.05	0.97	0.97
0.04	-0.08	1.00	1.00	0.00	-0.05	0.96	0.96	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.05	0.97	0.97
0.04	-0.08	0.99	0.99	0.01	-0.06	0.98	0.98	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.05	0.96	0.96
0.03	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.98	0.98	0.01	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.05	0.96	0.96
0.02	-0.07	0.95	0.95	0.02	-0.07	0.99	0.99	0.00	-0.07	0.96	0.96	0.01	-0.05	0.97	0.97
0.02	-0.07	0.95	0.95	0.04	-0.07	0.98	0.98	0.00	-0.06	0.96	0.96	0.01	-0.05	0.97	0.97
0.01	-0.07	0.94	0.94	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.01	-0.06	0.97	0.97	0.00	-0.05	0.96	0.96
0.01	-0.07	0.95	0.95	0.01	-0.07	0.96	0.96	0.02	-0.05	0.98	0.98	0.00	-0.05	0.96	0.96

Pada tabel diatas, nilai M (resultan) diisi dengan menggunakan

persamaan  $M = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$  . Nilai M diperlukan untuk menguji

apakah sensor bekerja statis atau tidak. Dapat dilihat bahwa dari data

percepatan yang diberikan akselerometer pada pengujian pertama,

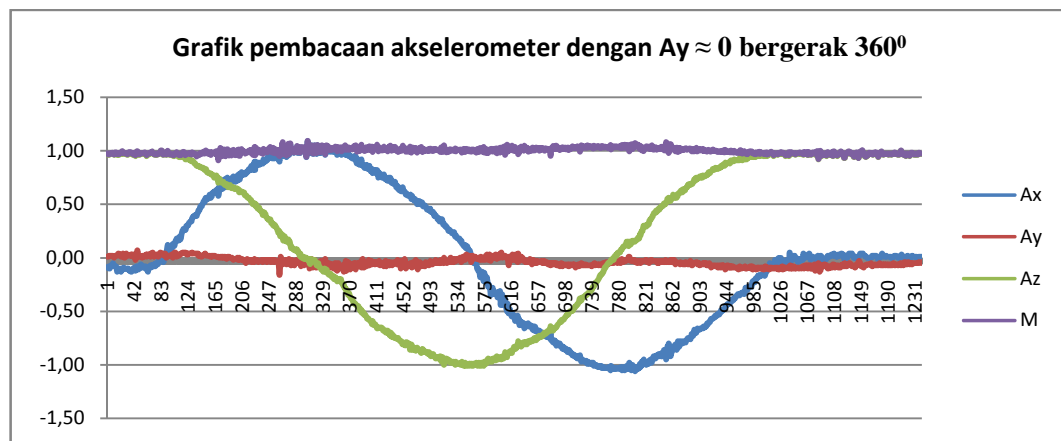
tampak bahwa  $M \approx 1g$ . Nilai resultan vektor percepatan pada kondisi

statik tidak melebihi dari nilai percepatan gravitasi sedangkan adanya

nilai yang lebih besar dari 1 dari percobaan pertama diatas dikarenakan

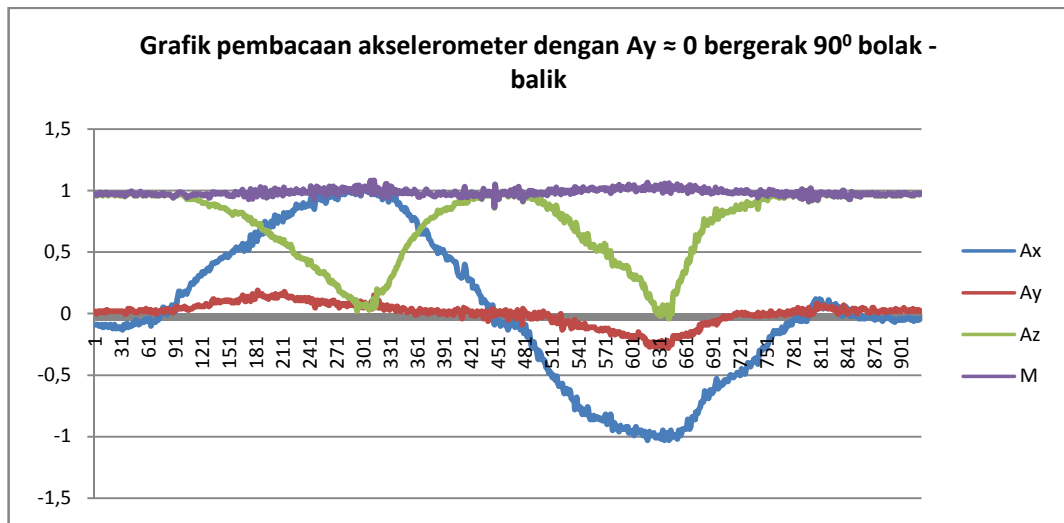
sensor melakukan pembacaan pada saat sensor diputar yang artinya sensor menerima gaya dari luar yang nilainya kecil.

Apabila dari tabel diatas dibuat grafik maka vektor percepatan sumbu X ( $A_x$ ) merupakan fungsi *sinus* dan vektor percepatan pada sumbu Z ( $A_z$ ) merupakan fungsi *cosinus*.



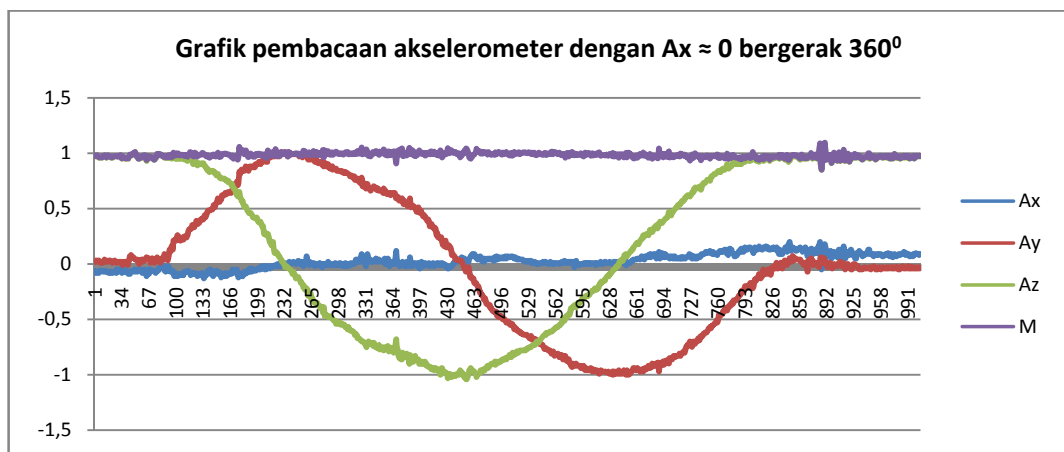
Gambar 4.10 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik  
dengan  $A_y \approx 0$  bergerak  $360^\circ$

Pengujian kedua adalah menggerakan modul pada sumbu X (Sumbu Y = 0) sebesar  $90^\circ$  kearah positif kemudian kembali lagi sebesar  $90^\circ$  kearah negatif. Hasil pembacaan ditunjukkan pada gambar 4.11 dibawah.

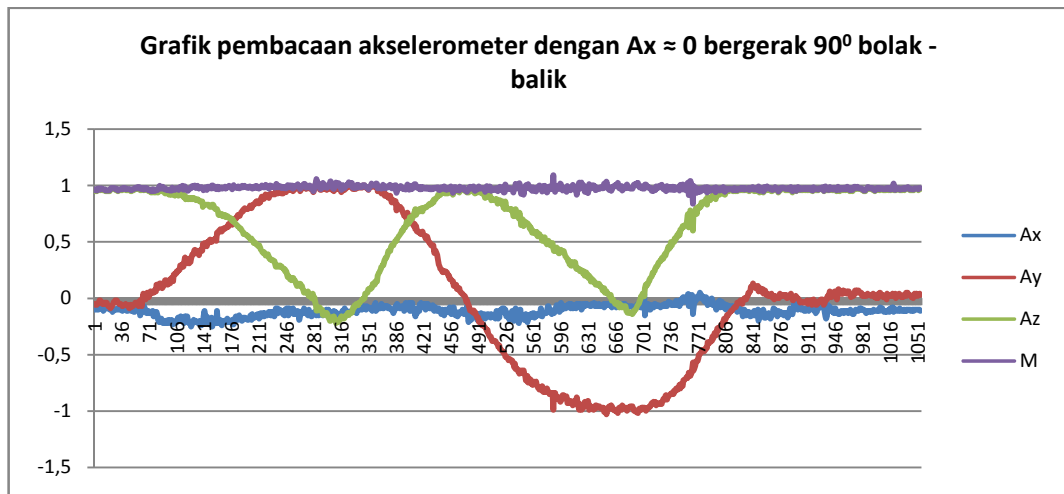


*Gambar 4.11 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik dengan  $A_y \approx 0$  bergerak  $90^\circ$  bolak-balik.*

Skema pengujian kondisi statik yang kedua adalah dengan memutar sensor pada sumbu Y ( $X=0$ ) sebesar  $360^\circ$  dan dilanjutkan dengan memutar sensor pada sumbu Y sebesar  $90^\circ$  bolak-balik. Didapat hasil sesuai gambar 4.12 dan 4.13.



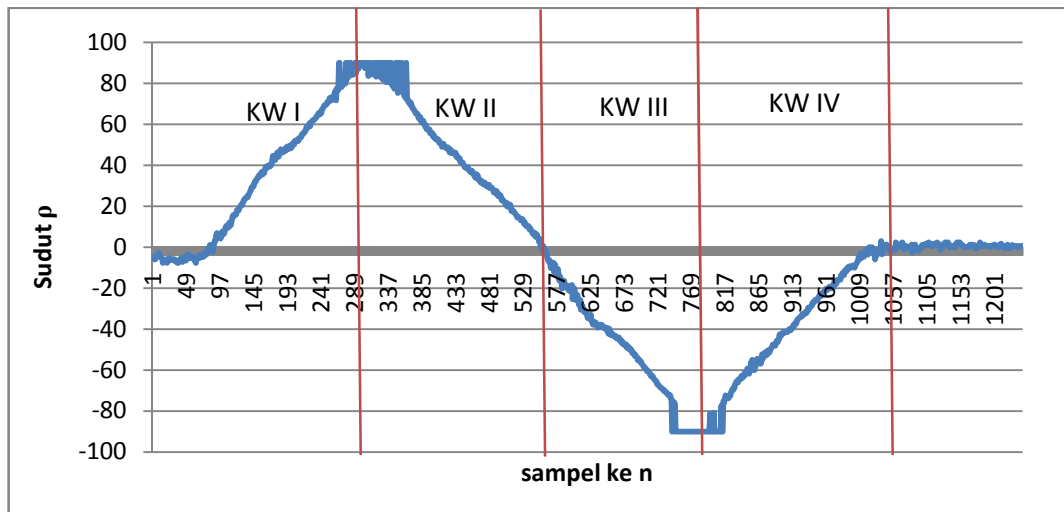
*Gambar 4.12 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik dengan  $A_x \approx 0$  bergerak  $360^\circ$ .*



Gambar 4.13 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik dengan  $A_x \approx 0$  bergerak  $90^\circ$  bolak – balik.

Baik vektor  $A_x$  maupun vektor  $A_y$  keduanya merupakan fungsi *sinus* sedangkan vektor  $A_z$  merupakan fungsi *cosinus* sehingga sudut  $\rho, \phi$  dan  $\theta$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan 4.8, 4.9 dan 4.10.

Akan tetapi fungsi *arctan* akan memberikan nilai pada jangkauan  $-90^\circ$  hingga  $90^\circ$  sehingga persamaan 4.8, apabila diterapkan untuk menghitung sudut  $\rho$  dari hasil pembacaan akselerometer pada tabel 4.2 akan memberikan nilai dari  $-90^\circ$  hingga  $90^\circ$  seperti pada gambar 4.14. Padahal pergerakan sesungguhnya adalah dari  $0^\circ$  hingga  $360^\circ$ . Fungsi *arctan* juga akan memberikan hasil yang sama untuk nilai sudut pada kuadran I dan kuadran III sebagai contoh untuk sudut  $225^\circ$ , nilai  $\tan(225^\circ)=1$  sedangkan hasil dari fungsi *arctan*  $1 = 45^\circ$ . Persamaan 4.8, 4.9 dan 4.10 juga akan memberikan nilai yang salah apabila modul berputar pada kuadran II dan IV.



*Gambar 4.14 Nilai yang didapat apabila menggunakan persamaan 4.8 untuk menghitung sudut  $\rho$  dari data akselerometer pada tabel 4.2.*

Sudut – sudut pada kuadran II hingga kuadran IV dapat diperoleh dengan memodifikasi persamaan 4.8, 4.9, dan 4.10 sebagai berikut.

- Kuadran I

$$\rho = \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{Az}\right)$$

- Kuadran II

$$\rho = 180^\circ - \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\varphi = 180^\circ - \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$



$$\theta = 180^0 - \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right)$$

- Kuadran III

$$\rho = 180^0 - \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\varphi = 180^0 - \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\theta = 180^0 - \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right)$$

- Kuadran IV

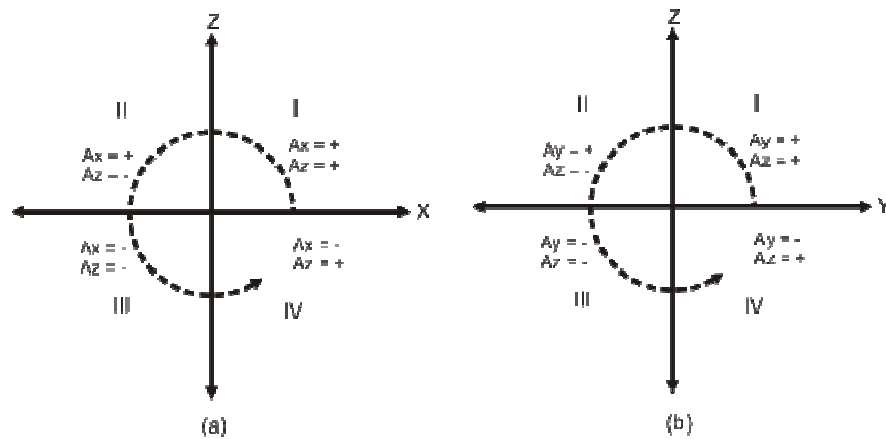
$$\rho = 360^0 + \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\varphi = 360^0 + \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\theta = 360^0 + \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right)$$

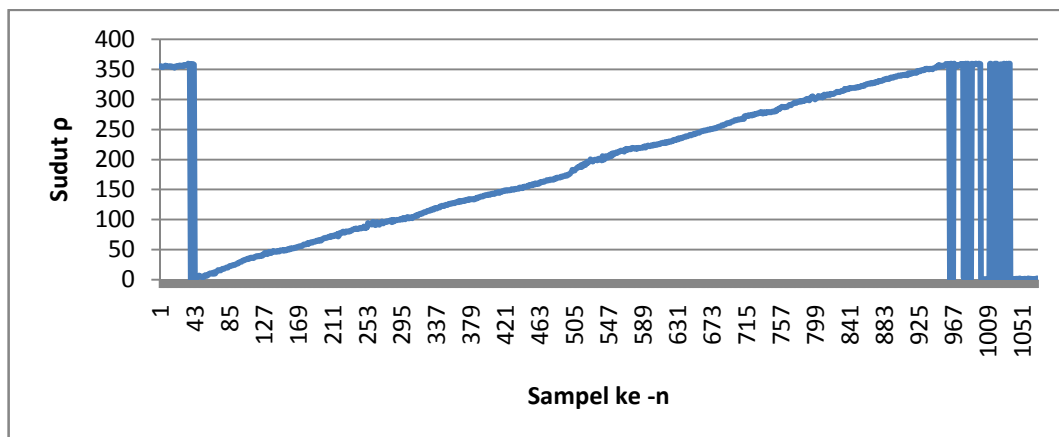
Untuk mengetahui dikuadran mana modul bergerak dapat dilakukan dengan membaca tanda bilangan positif (+) atau negatif (-) pada masing – masing data vektor percepatan.

Penentuan daerah kuadran dapat dilakukan dengan analisis vektor percepatan pada tiap dua sumbu yaitu X-Z dan Y-Z. Berdasarkan analisa pada gerak melingkar  $360^0$  pad grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.10 dan 4.12 maka daerah kiadran I – IV dapat diketahui jika tanda bilangan vektor percepatan Ax, Ay dan Az sesuai gambar 4.15.



Gambar 4.15 Penentuan daerah kuadran dengan menganalisa data vektor percepatan sumbu X dan Y terhadap sumbu Z.

Setelah mengetahui karakteristik perubahan nilai percepatan pada perpitaran dalam masing – masing kuadran langkah selanjutnya adalah mengaplikasikan persamaan yang didapat kedalam data percepatan hasil pengujian. Hasil perhitungan menggunakan persamaan yang telah dimodifikasi untuk data pada tabel 4.2 ditunjukan grafik pada gambar 4.16 dibawah. Sedangkan data selengkapnya mengenai pengujian percepatan statis dapat dilihat di lampiran 1.



Gambar 4.16 Nilai sudut  $p$  yang dihasilkan apabila pososisi kuadran diketahui

### c. Percepatan Dinamik

Akselerometer H48C selain dapat mengukur keadaan percepatan statik juga dapat mengukur percepatan dinamik. Pada pengukuran percepatan dinamik, nilai percepatan yang didapat dipengaruhi oleh gaya gravitasi berikut gaya dari luar yang menyebabkan modul akselerometer bergerak.

Sehingga pada kondisi modul bergerak nilai resultan gaya dari akselerometer yang dibaca lebih besar dari 1g. Untuk mengetahui besar gaya yang bekerja pada modul yang menyebabkan modul bergerak dapat menggunakan persamaan berikut.

$$F_{total} = F_g + F_{eks} \dots\dots\dots(4.11)$$

Dengan  $F_{total}$  merupakan jumlah keseluruhan gaya yang bekerja pada modul,  $F_g$  merupakan gaya gravitasi dan  $F_{eks}$  merupakan gaya eksternal yang bekerja pada modul. Dengan mengingat bahwa  $F = m.a$  maka persamaan 4.11 dapat dirubah menjadi.

$$\begin{aligned} m.a_{total} &= m.a_g + m.a_{eks} \\ a_{total} &= \frac{m.a_g + m.a_{eks}}{m} \\ a_{total} &= a_g + a_{eks} \dots\dots\dots(4.12) \end{aligned}$$

Dimana,  $a_{total}$  adalah percepatan total yang bekerja pada benda,  $a_g$  adalah percepatan benda akibat pengaruh gaya gravitasi dan  $a_{eks}$  merupakan percepatan benda akibat gaya eksternal seperti dorongan atau tarikan.

Karena daerah kerja dari sensor merupakan bidang tiga dimensi maka persamaan 4.12 berlaku untuk masing – masing sumbu x, y dan z.

Sehingga:

$$a_x = a_g + a_{eks}$$

$$a_y = a_g + a_{eks}$$

$$a_z = a_g + a_{eks}$$

Ketika dalam kondisi diam vektor percepatan yang bekerja pada benda hanya karena pengaruh gaya gravitasi sedangkan ketika benda bergerak, vektor percepatan benda merupakan jumlah dari vektor percepatan akibat gaya gravitasi dan vektor percepatan akibat gaya eksternal. Sehingga percepatan akibat gaya eksternal dapat dicari dengan mengurangi nilai percepatan pada saat benda bergerak dengan percepatan pada saat benda diam. Yang mana percepatan pada saat benda diam adalah  $a_g$ . Akan tetapi nilai percepatan eksternal tidaklah murni percepatan yang mengakibatkan benda bergerak, didalamnya terdapat vektor percepatan yang disebabkan oleh gaya gesekan benda, vibrasi, derau internal sensor dan lain sebagainya. Nilai percepatan ini dapat dikatakan sebagai faktor kesalahan (*error*). Sehingga percepatan benda bergerak sesungguhnya adalah sesuai persamaan 4.13 berikut.

$$a_{bergerak} = a_{eks} + a_{error} .....(4.13)$$

#### d. Pengujian Percepatan Dinamik

Untuk pengujian percepatan dinamik dilakukan dengan mengambil data yang resultan vektor percepatannya lebih besar dari pada resultan vektor percepatan pada saat modul diam. Sehingga pada pengujian ini diperlukan data nilai percepatan pada saat modul tidak bergerak sebagai nilai acuan.

Data nilai percepatan awal pada saat modul diam diambil dari rata – rata nilai percepatan pada 20 sampel. Untuk proses inisialisasi ini diperlukan penambahan prosedur pada mikrokontroler dan menyimpan nilai resultan percepatan percepatan sebagai nilai acuan pengiriman data ke komputer.

Data yang dikirim ke komputer adalah data percepatan benda bergerak yang didalamnya terdapat faktor kesalahan atau *error* akan tetapi untuk proses pengujian ini nilai *error* masih diikut sertakan untuk analisa lebih lanjut.

Prosedur inisialisasi data menggunakan *source code* sebagai berikut.

```
float x0 = 0;
float y0 = 0;
float z0 = 0;
float m0 = 0;
void inisialisasi(){
    for(int i=0;i<=20;i++){
        tX = getH48C(50,0,0);
```

```

Xinit[i] = (((float)(tX-2048)))*0.0022;

tY = getH48C(50,0,1) ;

Yinit[i] = (((float)(tY-2048)))*0.0022;

tZ = getH48C(50,1,0) ;

Zinit[i] = (((float)(tZ-2048)))*0.0022;

res[i] = sqrt(sq(Xinit[i])+sq(Yinit[i])+sq(Zinit[i]));

m0 = max(m0 , res[i]);

x0 = x0 + Xinit[i];

y0 = y0 + Yinit[i];

z0 = z0 + Zinit[i];

}

x0 = x0 * 0.05;

y0 = y0 * 0.05;

z0 = z0 * 0.05;

}

```

Prosedure inisialisasi ini akan memberikan nilai pada variabel global x0,y0,z0 dan m0. Sedangkan data yang dikirim ke komputer merupakan data nilai percepatan yang resultan vektor percepatanya lebih besar dari m0 yakni dengan memanfaatkan percabangan *if(....)* sebagai berikut.

```

M=sqrt(sq(aX)+sq(aY)+sq(aZ));

if (M > m0){

    aX = aX - x0; //nilai percepatan dikurangi

    aY = aY - y0; // percepatan awal

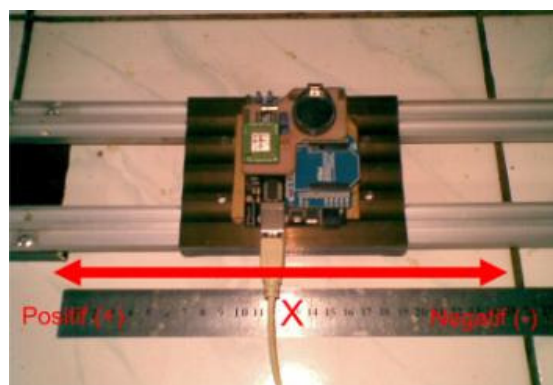
    aZ = aZ - z0;

```

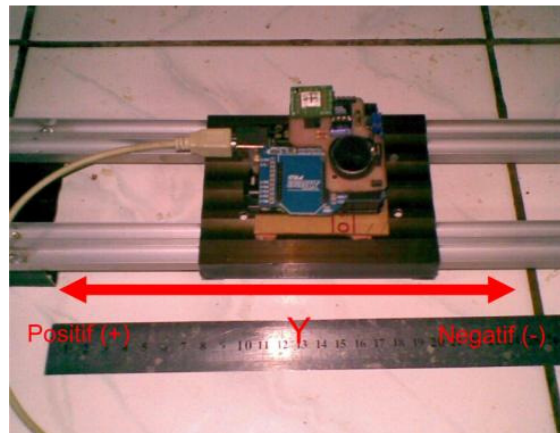
```
Serial.print(aX);  
Serial.print(9,BYTE); //karakter Tab  
Serial.print(aY);  
Serial.print(9,BYTE);  
Serial.print(aZ);  
Serial.print(9,BYTE);  
Serial.println(M);
```

Kemudian setelah meng-*upload source code* ke mikrokontroler dilakukan percobaan menggrekan modul pada tiap sumbu sejauh jarak tertentu untuk mendapatkan karakteristik pergerakan modul. Tiap sumbu memiliki arah positif dan negatif sehingga pada uji coba dilakukan pengambilan data tiap sumbu sebanyak dua buah data yakni pada pergerakan positif dengan jarak tertentu dan pada pergerakan negatif pada jarak tertentu.

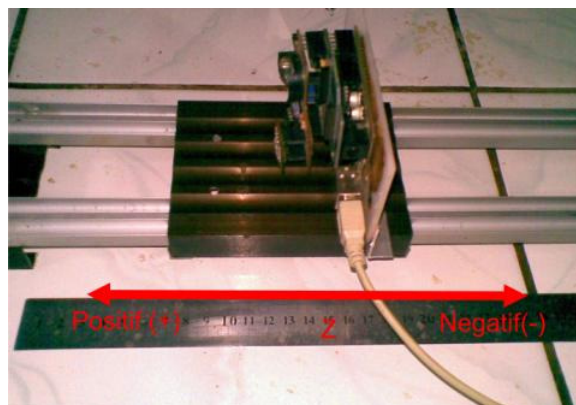
Pengujian untuk tiap sumbu di ilustrasikan oleh gambar 4.17 berikut.



(a)



(b)



(c)

*Gambar 4.17 Posisi modul pada saat pengujian pergerakan tiap sumbu. (a) sumbu x, (b) sumbu y dan (c) sumbu z*

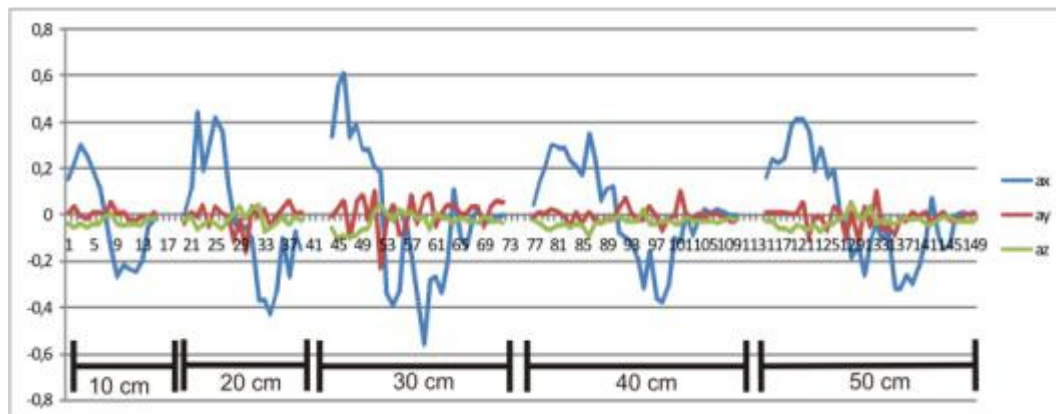
Untuk pengujian pergerakan tiap sumbu diambil data masing – masing sumbu untuk masing – masing arah pada perpindahan sejauh 10 cm, 20 cm, 30cm, 40cm serta 50 cm kemudian dibuat grafik untuk mempermudah analisa.

Data pengujian pergerakan pada sumbu x dengan arah positif ditunjukkan pada tabel 4.3 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.18.

Tabel. 4.3 Data pengujian pergerakan pada sumbu x arah positif



10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
0.15	0	-0	0	-0	-0	0.34	-0	-0.1	0.04	-0	-0	0.16	0.01	-0
0.22	0.03	-0.1	0.11	0.01	-0	0.55	0.02	-0.1	0.14	0.01	-0	0.24	0.01	-0
0.3	-0	-0	0.44	-0	-0.1	0.61	0.06	-0.1	0.21	0	-0.1	0.22	0.01	-0.1
0.25	-0	-0.1	0.19	0.04	-0.1	0.33	-0.1	-0.1	0.3	0.02	-0.1	0.24	0.01	-0.1
0.19	0.01	-0	0.3	-0.1	-0	0.39	0.05	-0.1	0.29	0.01	-0.1	0.38	0	-0.1
0.12	0.01	-0	0.42	0.03	-0	0.28	0.08	-0.1	0.29	-0	-0	0.41	0	-0.1
-0	-0	-0	0.36	0	-0.1	0.28	-0	-0.1	0.23	-0.1	-0.1	0.41	0.05	-0.1
-0.2	0.05	0	0.13	-0	-0	0.21	0.1	0.01	0.21	0.01	-0	0.36	-0.1	-0.1
-0.3	0	-0	-0	-0.1	0	0.18	-0.2	0.04	0.17	-0	-0.1	0.19	-0	-0.1
-0.2	0.01	-0.1	-0.1	-0	0.03	-0.3	-0	0.01	0.35	0.01	-0.1	0.29	-0	-0.1
-0.2	-0	-0	-0.1	-0.2	-0	-0.4	0.04	-0	0.23	-0	-0	0.16	-0.1	-0
-0.3	-0	-0	-0.1	0.03	0.02	-0.3	-0.1	0.02	0.06	-0	-0	0.19	0.03	-0
-0.2	-0	-0.1	-0.4	-0	0.04	-0	-0.1	0	0.11	-0	-0	0.01	0.01	-0
-0.1	-0	-0	-0.4	0.02	-0.1	-0.2	0.08	0.01	0.12	-0	-0	-0	-0.1	-0
-0	0.01	-0	-0.4	-0.1	-0.1	-0.4	-0	-0	-0.1	0.02	-0	-0.2	0.01	0.05
			-0.3	-0	-0	-0.6	0.07	-0	-0.1	0.07	-0	-0.1	-0.1	-0
			-0.1	0.02	-0	-0.3	0.09	-0.1	-0.1	0	-0	-0.3	0.03	-0
			-0.3	0.06	-0.1	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0	-0	-0.1	-0.1	0.03
			-0.1	0	-0	-0.3	0	-0	-0.3	-0	0.02	-0	0.1	-0
			-0.2	0.01	-0	-0.2	0.04	-0	-0.2	0.03	-0	-0.1	-0.1	-0
						0.11	0.04	-0	-0.4	-0	-0	-0.1	-0.1	-0
						-0.1	0	-0	-0.4	-0.1	-0	-0.3	-0.1	-0.1
						-0.1	0	-0	-0.3	-0	-0	-0.3	-0	-0
						-0	0.03	-0	-0.1	-0	-0	-0.3	-0	-0
						0.02	0.03	-0	-0.1	0.1	-0	-0.3	0.01	-0
						-0	-0.1	-0	0.01	-0	-0	-0.2	-0	-0
						-0	0.03	-0	-0.1	-0	-0	-0.1	0.01	-0
						-0	0.06	-0	-0	0	-0	0.07	-0	-0
						0	0.05	-0	0.02	-0	-0	-0.1	-0	-0
									0	0.01	-0	-0.2	0.01	-0
									0.02	0	-0	-0.1	-0	-0
									0.01	-0	-0	0	-0	-0
									0	-0	-0	0.01	-0	-0
									0	-0	-0	0	0	-0
												0.01	0	-0



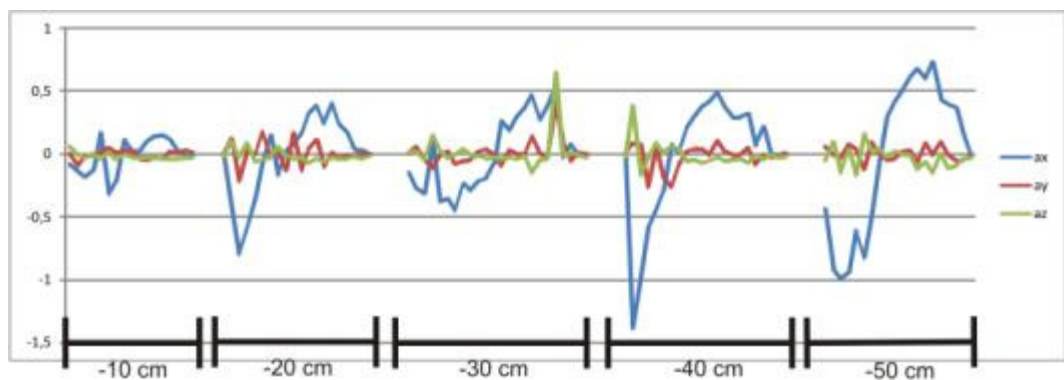
Gambar 4.18 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu x positif

Data pengujian pergerakan pada sumbu x dengan arah negatif ditunjukkan pada tabel 4.4 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.19.

Tabel 4.4 Data pengujian pergerakan sumbu x pada arah negatif

- 10 cm			- 20 cm			- 30 cm			- 40 cm			- 50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
-0.1	0	0.06	0	-0	-0	-0.2	0	0.02	0	0	-0	-0.4	0.06	-0.1
-0.1	-0.1	-0	-0.4	0.12	0.1	-0.3	0.06	0.02	-1.4	0.08	0.39	-0.9	-0	0.09
-0.2	-0	-0	-0.8	-0.2	-0	-0.3	-0.1	-0.1	-1	0.07	-0.2	-1	-0	-0.2
-0.1	-0	0	-0.6	0.03	0.08	0.09	-0.1	0.15	-0.6	-0.3	-0.1	-1	0.07	0.04
0.17	0.01	-0.1	-0.4	-0	-0.1	-0.4	-0	0.03	-0.5	0.06	0.08	-0.6	0.04	-0.2
-0.3	0.05	0.01	-0.1	0.18	-0.1	-0.4	0.02	-0	-0.3	-0.2	0.01	-0.8	-0.1	0.16
-0.2	0.01	-0.1	0.15	-0	-0	-0.5	-0.1	-0	0.07	-0.3	0.06	-0.5	0.09	0.03
0.11	0.03	-0	-0.2	0.02	0.06	-0.2	-0.1	0.04	0.01	-0.1	0.04	-0.1	0	0.04
0.03	0.03	-0	0.02	-0.1	-0	-0.3	-0.1	-0	0.2	0.02	-0.1	0.28	-0.1	-0
0.02	-0	-0	0.07	0.17	-0	-0.2	0.02	-0	0.29	0.04	-0.1	0.41	-0	0.02
0.09	-0.1	-0	0.16	-0.1	-0	-0.2	0.04	-0	0.37	0.04	-0.1	0.5	0.02	0
0.14	-0	-0	0.32	0.04	-0.1	-0.1	-0	-0	0.41	-0	-0.1	0.61	0.03	-0
0.15	-0.1	-0	0.38	0.11	-0	0.26	-0.1	-0	0.49	0.1	-0	0.67	-0.1	-0.1
0.11	0.02	-0	0.24	-0.1	-0.1	0.19	0.03	-0	0.37	0.02	-0.1	0.6	0.08	-0.1
0.03	0	-0	0.4	0.01	-0	0.29	0	-0.1	0.29	-0	-0.1	0.73	-0	-0.2
-0	0.03	-0	0.23	-0	-0	0.36	0	-0	0.29	-0	-0	0.43	0.09	0

-0	0.01	-0	0.17	-0	-0	0.47	0.14	-0.2	0.32	0.05	-0.1	0.39	-0	-0.1
			0.04	-0	-0	0.27	0	-0.1	0.06	-0.1	-0	0.36	-0.1	-0.1
			0.03	0	-0	0.37	-0	-0	0.21	-0	-0.1	0.15	-0.1	-0
			-0	0	-0	0.53	0.39	0.65	0	-0	-0	-0	-0	-0
						-0	0.11	-0	-0	-0	-0			
						0.07	-0.1	0.01	0	0.01	-0			
						-0	0.01	-0						
						-0	0	-0						



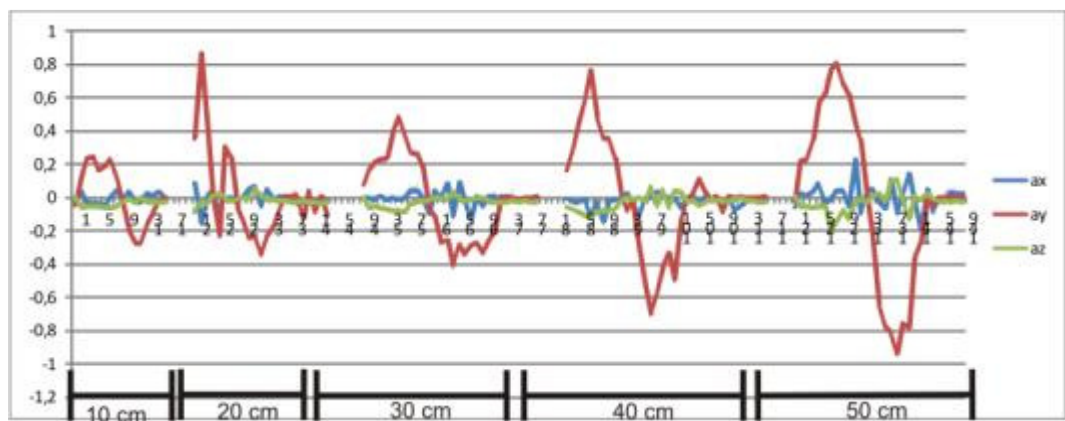
*Gambar 4.19 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu x negatif*

Data pengujian pergerakan pada sumbu y dengan arah positif ditunjukkan pada tabel 4.5 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.20.

Tabel 4.5 Data pengujian pergerakan sumbu y pada arah positif

10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
-0	-0	0	0.08	0.36	-0.1	0	0.08	0	-0	0.16	-0.1	-0.1	-0	0.01
0.03	0.14	-0.1	-0.2	0.87	-0	0	0.16	-0.1	-0	0.3	-0.1	0.02	0.22	-0.1
-0	0.24	-0.1	0.01	0.41	-0	-0	0.21	-0.1	-0	0.45	-0.1	0.01	0.23	-0.1
-0	0.25	-0.1	0.04	0.01	0.01	0.01	0.23	-0.1	-0	0.59	-0.1	0.03	0.35	-0.1
-0	0.16	-0.1	-0.1	-0.2	0.02	-0	0.24	-0.1	-0.1	0.77	-0.1	0.08	0.56	-0.1
-0.1	0.19	-0.1	0	0.31	0	0	0.38	-0.1	-0	0.49	-0.1	-0	0.62	-0.1

0	0.23	-0.1	0	0.24	-0	-0	0.49	-0.1	-0.2	0.36	-0.1	-0	0.76	-0.2
0.04	0.12	-0.1	-0	-0.1	-0	0	0.37	-0.1	-0	0.36	-0.1	0.04	0.81	-0.2
-0	-0.1	-0	0	-0.1	0	0.04	0.27	-0	-0	0.24	-0.1	0.04	0.68	-0.1
0.03	-0.2	-0	0.05	-0.3	0	0.04	0.26	-0	-0	0.04	-0	-0.1	0.62	-0.1
-0	-0.3	-0	0.07	-0.2	0.05	0	0.19	-0	0.02	-0.1	0	0.23	0.44	-0
-0	-0.3	0	-0.1	-0.3	0.01	-0.1	-0.1	-0	-0	-0	-0	-0.1	0.35	-0
0.02	-0.2	-0	0.05	-0.2	-0	0.04	-0.1	0	-0.1	-0.3	0	0.03	0.01	-0
0.01	-0.1	-0	-0	-0.2	-0	-0	-0.3	0	0	-0.5	-0	0.05	-0.2	0.01
0.03	-0	-0	0.01	-0.1	-0	0.08	-0.3	-0	0	-0.7	0.07	-0	-0.6	0.02
-0	0	-0	-0	0.01	-0	-0.1	-0.4	0.03	0.03	-0.6	-0.1	-0.1	-0.8	-0
			-0	0.01	-0	0.09	-0.3	-0	0.01	-0.4	0.05	0.11	-0.8	0.1
			-0	0.02	-0	-0	-0.3	-0	0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.9	0.11
			-0	-0.1	-0	-0.1	-0.3	-0	0	-0.5	0.04	0.01	-0.8	0
			-0	0.04	-0	0.01	-0.3	0	-0.1	-0.1	0.03	0.14	-0.8	-0.1
			-0	-0.1	-0	-0.1	-0.3	0	-0	-0	-0	-0	-0.4	0.01
			0	0.01	-0	0.01	-0.3	-0	0.01	0.02	-0	-0.2	-0.3	-0
			-0	-0.1	-0	0.01	-0.2	-0	-0	0.11	-0.1	0.05	0.01	0.02
						-0	0.01	-0	0	0.04	-0	-0.1	-0.1	-0
						0.01	0	-0	-0	-0	-0	0	0	-0
						0	0	-0	-0	0.01	-0	-0	0	-0
						-0	-0	-0	-0	-0.1	-0	0.03	0	-0
						-0	0	-0	0	0.01	-0	0.02	0	-0
						0	0	-0	-0.1	0	-0	0.02	0.01	-0
						0.01	0	-0	-0.1	0.01	0			
									-0	0	-0			
									-0	0	-0			
									0	0	-0			
									-0	0.01	-0			

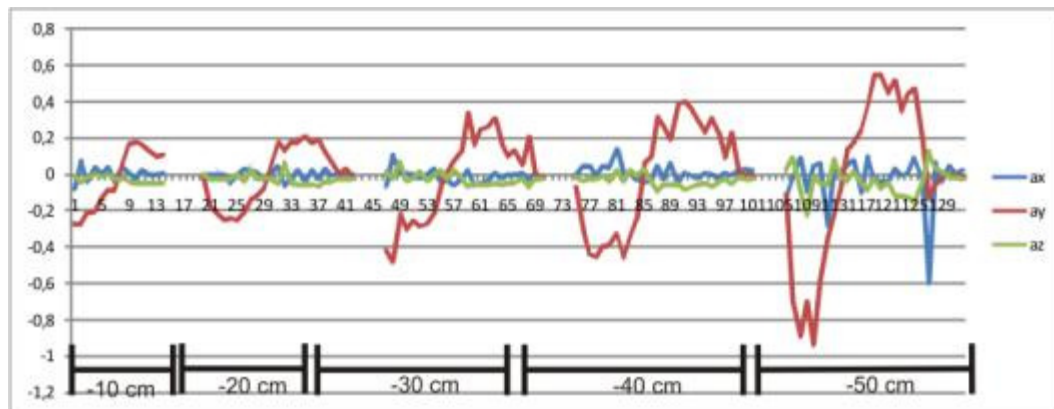


*Gambar 4.20 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu y positif*

Data pengujian pergerakan pada sumbu y dengan arah negatif ditunjukkan pada tabel 4.6 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.21.

Tabel 4.6 Data pengujian pergerakan sumbu y pada arah negatif

-10 cm			-20 cm			-30 cm			-40 cm			-50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
-0.1	-0.3	-0	0	-0	0	-0.1	-0.4	0.01	-0	-0.1	-0	-0.1	-0.1	0.02
0.08	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0	0.11	-0.5	-0	0.05	-0.3	-0	-0	-0.7	0.09
-0	-0.2	-0	0	-0.2	-0	0.01	-0.2	0.07	0.05	-0.4	-0	0.09	-0.9	-0.1
0.04	-0.2	0	0	-0.3	-0	0.01	-0.3	-0	-0	-0.5	-0	-0.1	-0.7	-0.2
0	-0.1	-0	-0.1	-0.2	-0	0	-0.3	-0	0.05	-0.4	-0	0.05	-0.9	-0
0.04	-0.1	0	-0	-0.3	0	-0	-0.3	0.01	0.04	-0.4	-0	0.06	-0.6	-0.1
-0	-0.1	-0	0.03	-0.2	-0	0	-0.3	-0	0.14	-0.3	0.02	-0.3	-0.4	-0.1
0.04	0.06	-0	0.02	-0.1	0.02	0.03	-0.2	-0	0	-0.5	-0	0.05	-0.2	0.08
0.01	0.17	-0	0.01	-0.1	-0	-0	-0.1	0.02	0.01	-0.3	0.02	0.01	-0.1	-0
-0	0.18	-0.1	-0	-0.1	-0	-0	0.01	-0	-0	-0.3	-0	0.05	0.13	-0
0.02	0.16	-0.1	0	0.04	-0	-0.1	0.07	0.02	-0.1	0.06	0.03	0.08	0.17	0.01
0	0.13	-0.1	0.05	0.18	-0.1	-0	0.12	-0	-0	0.09	-0	-0.1	0.24	-0.1
0	0.1	-0.1	-0.1	0.13	0.07	0.02	0.34	-0.1	0.05	0.32	-0.1	0.1	0.37	-0.1
0.01	0.11	-0.1	-0	0.18	-0.1	-0.1	0.16	-0.1	-0	0.26	-0.1	-0	0.55	-0
			0.02	0.18	-0.1	-0.1	0.25	-0.1	0.06	0.19	-0.1	-0	0.55	-0.1
			-0	0.21	-0.1	-0	0.26	-0.1	-0.1	0.39	-0.1	-0	0.45	-0.1
			0.02	0.17	-0.1	0.01	0.31	-0.1	0.01	0.4	-0.1	0.03	0.52	-0.1
			-0	0.19	-0.1	-0	0.17	-0.1	-0	0.36	-0.1	-0	0.35	-0.1
			0.03	0.12	-0	0	0.1	-0.1	-0	0.3	-0.1	0.01	0.44	-0.1
			-0	0.07	-0	0	0.13	-0.1	0.01	0.23	-0.1	0.09	0.47	-0.2
			0.01	0	-0	0.01	0.05	-0	0	0.31	-0.1	-0	0.19	-0.1
			-0	0.03	-0	-0	0.21	-0.1	-0	0.23	-0.1	-0.6	-0.1	0.13
			0	-0	-0	0.01	-0	-0	0.01	0.09	-0	0.07	-0.1	0.03
						-0	-0	-0	-0	0.23	-0.1	-0	-0	0.01
									0.02	-0	-0	0.05	0	-0
									0.03	0	-0	0	-0	-0
									0.02	0	-0	0.02	-0	-0



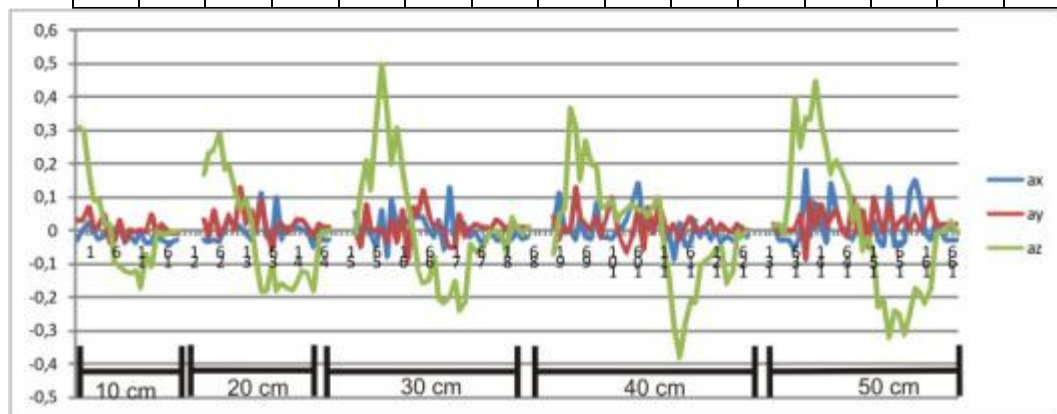
Gambar 4.21 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu y negatif

Data pengujian pergerakan pada sumbu z dengan arah positif ditunjukkan pada tabel 4.7 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.22.

Tabel 4.7 Data pengujian pergerakan sumbu z pada arah negatif

10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
-0	0.03	0.31	-0	0.03	0.17	0.05	0	-0	0.01	0.04	-0.1	0.01	0.02	0.01
0	0.03	0.3	-0	-0	0.23	-0	-0.1	0.12	0.11	-0	0.04	-0	-0	0.02
0.02	0.07	0.17	-0	0.06	0.24	0.03	0.08	0.21	-0	0.01	0.06	-0	0	-0
0	0.01	0.09	-0	-0	0.29	-0	0	0.12	0	-0	0.37	-0	0	0.11
-0	0.01	0.09	0	0.01	0.18	-0.1	0	0.32	-0	0.13	0.31	-0.1	0	0.4
-0	0.05	0.02	0.03	0.05	0.19	0.06	0	0.5	0.04	0.04	0.15	-0	0.05	0.25
0.01	-0	0.02	0.02	0	0.12	-0.1	-0	0.35	-0	0.02	0.27	0.18	-0.1	0.34
0	-0	-0.1	0.01	0.13	0.06	0.09	0.03	0.2	-0	0	0.2	-0	0.09	0.33
0.01	0.03	-0.1	-0	0.02	0.09	0.01	-0	0.31	0.08	0.04	0.19	0.08	0.01	0.45
-0	-0	-0.1	-0	0.06	0.03	0.01	0.06	0.18	-0	-0	0.07	0.01	0.08	0.32
-0	0	-0.1	0	-0	-0.1	0.02	-0.1	0.08	-0	0.03	0.07	-0	0.01	0.24
-0	-0	-0.1	0.11	0.09	-0.2	0.06	0.07	-0	-0	0.1	0.09	0.14	0.03	0.17
-0	0	-0.2	-0	0	-0.2	0.04	0.05	-0.1	-0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.21
-0	-0	-0.1	-0	-0.1	-0.1	0.04	0.12	-0.2	0	-0	0.05	0.01	0	0.18
-0	0.05	-0.1	0.1	0.01	-0.2	0	0.05	-0.2	0.03	-0.1	0.06	-0	-0	0.14

0	-0	0	-0	0.02	-0.2	-0	0.01	-0.1	0.08	-0	0.08	-0	0.1	0.03
-0	0.02	-0	0.01	-0	-0.2	0.03	0.02	-0.2	0.14	0.07	0.06	0	-0	0.08
-0	0	-0	0	0.01	-0.2	-0.1	0	-0.2	0	-0.1	0.06	0.05	0.06	-0.1
-0	-0	0	0.01	0.03	-0.2	0.13	-0.1	-0.2	0.03	0.07	0.04	-0	-0.1	-0
-0	-0	0	0	0.03	-0.1	-0	-0.1	-0.2	-0	-0	0.07	0.03	0.1	-0.1
			-0	0.01	-0.1	0.02	0.05	-0.2	0.05	0.08	0.1	-0	0.05	-0.2
			-0.1	-0	-0.2	0.02	-0	-0.2	-0	0.02	-0.1	-0.1	-0	-0.2
			0.01	0.02	-0	-0	0	-0	-0	-0	-0.1	0.13	0.08	-0.3
			-0	0.01	0	-0	0.02	-0.1	-0.1	0.02	-0.3	-0.1	0	-0.2
			-0	0.01	0	-0	0.01	-0.1	0.02	-0	-0.4	-0	0.02	-0.3
						-0	0.01	-0	-0.1	0.01	-0.3	-0	0.04	-0.3
						-0	0	0	-0	0.04	-0.2	0.11	0	-0.3
						-0	0.03	0	0.03	-0	-0.2	0.15	0.05	-0.2
						-0	0.02	-0	-0	0	-0.1	0.08	0	-0.2
						-0	0	-0.1	0	0.01	-0.1	-0	0.03	-0.2
						-0	0.02	0.04	-0	0.03	-0.1	-0	0.09	-0.2
						-0	0.01	0.01	0	-0	-0.1	0.03	0.01	-0
						-0	0.01	-0	-0	0.02	-0.1	-0	0.02	0
						-0	0.01	0.01	-0	0	-0.2	-0	0.02	0
									-0	-0	-0.1	-0	0.01	0.03
									-0	0.02	0	-0	0.02	0
									0.01	-0	-0			
									-0	0	0			



Gambar 4.22 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu z positif

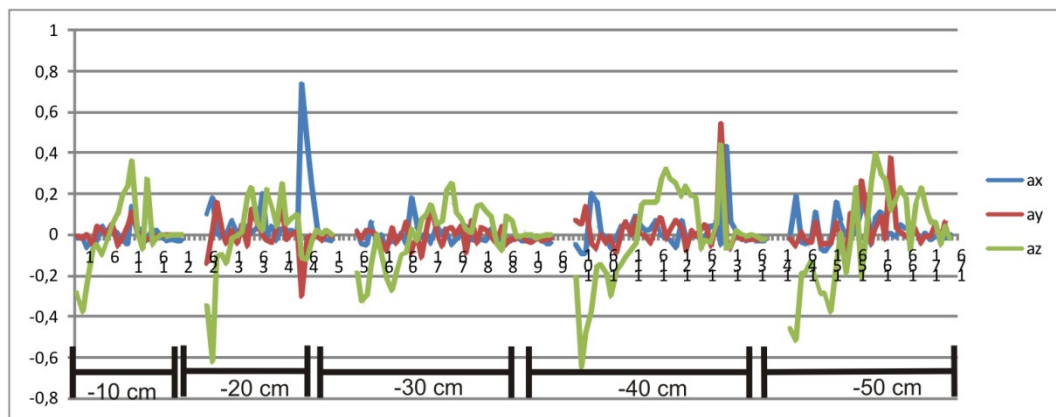
Data pengujian pergerakan pada sumbu z dengan arah negatif ditunjukkan pada tabel 4.8 , sedangkan grafik yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 4.23.

Tabel 4.8 Data pengujian pergerakan sumbu y pada arah negatif

-10 cm			-20 cm			-30 cm			-40 cm			-50 cm		
ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az	ax	ay	az
-0	-0	-0.3	0.1	-0.1	-0.4	0.02	0.01	-0.2	-0.1	0.07	-0.2	0.01	-0	-0.5
-0	-0	-0.4	0.18	0.02	-0.6	-0	-0	-0.3	-0.1	0.05	-0.7	0.19	-0.1	-0.5
-0.1	0	-0.2	0.01	0.16	-0.1	-0.1	0.02	-0.3	-0.1	0.14	-0.5	-0	0.01	-0.2
-0	-0.1	-0.1	-0	0.01	-0.1	0.06	0.01	-0.2	0.2	-0	-0.4	-0.1	-0	-0.2
-0	0.04	-0.1	0	-0	-0.1	-0	0	0	0.16	-0.1	-0.2	-0	-0	-0.1
0.04	0.02	-0.1	0.07	0.02	-0	0	-0	-0.1	0.01	0	-0.2	0.11	0.06	-0.2
0.01	0	-0	0.01	-0	-0	-0.1	-0.1	-0.2	-0	-0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3
0.03	0.05	0.04	0	0.05	0.01	-0	0.03	-0.3	-0.1	-0	-0.3	-0.1	-0	-0.3
0.01	-0.1	0.1	0.04	-0.1	0.18	-0	-0	-0.2	-0	-0.1	-0.2	-0.1	-0	-0.4
-0	-0	0.18	0.01	0.12	0.23	0.01	-0	-0.1	0.04	0.02	-0.2	0.16	0.06	-0.2
-0.1	0.03	0.23	0.03	0.06	0.06	-0	0.06	-0.1	0.04	0.06	-0.1	0.07	0	0.01
0.14	0.11	0.36	0.2	0	0.02	0.18	-0.1	0.03	0.04	0	-0.1	0	-0.1	-0.2
0.01	0.01	0.02	-0	-0	0.22	0.04	-0	-0	0.09	0.08	-0.1	-0	0.1	-0
0.03	-0	-0.1	0.04	-0	0.14	-0	-0.1	0.07	0.04	0	0.14	0.02	0.05	0.23
-0	-0	0.27	-0	0.02	0.04	0.01	0.03	0.1	0.02	-0	0.16	0.12	0.26	-0.2
0.02	-0	-0.1	0.03	0.13	0.25	-0	0.14	0.15	0.03	-0	0.16	0.18	0.14	-0
0.02	-0	-0	0.02	-0	0.05	0.05	0.01	0.05	0.07	0.04	0.16	-0.1	-0	0.25
-0	0	0	0.02	0	0.08	0	-0.1	0.06	0	0.08	0.26	0.08	0.02	0.4
-0	0	-0	0	0.01	0.1	0.03	0.02	0.21	-0	-0	0.32	0.11	0.09	0.3
-0	0	0	0.74	-0.3	-0.1	-0.1	0.03	0.25	-0	0.02	0.27	-0	-0	0.27
-0	0	0	0.45	-0	-0.1	-0	0	0.11	-0.1	0.07	0.25	0.01	0.37	0.12
-0	0	0	0.25	-0	-0	0	0.04	0.08	0.07	0.03	0.19	-0	0.03	0.17
			0.04	-0	0.02	0.04	-0.1	0.03	-0	-0.1	0.24	0.05	0.01	0.23
			-0	-0	0	-0	0.07	0.01	0	0.02	0.19	0.03	-0	0.18
			-0	0.01	0.02	-0	-0	0.14	0.01	-0	0.18	0.02	-0	-0.1
			-0	-0	0	-0	0.03	0.15	-0	0.02	-0.1	0.02	0.03	0.15
						-0	0.02	0.11	-0	0.05	-0	-0	-0	0.23
						0.03	-0	0.09	0.04	-0.1	-0	0.01	-0	0.14
						-0	-0	-0	0.05	0.06	0.05	-0	-0	0.06
						-0	0.04	-0.1	-0.1	0.54	0.44	-0	0.04	0.06



						-0	-0.1	0.09	0.43	0	-0.1	0	-0	-0.1
						-0	-0	0.07	0.07	-0.1	-0.1	-0	0.06	0.04
						-0	-0	-0	0.02	0	0.02	0	-0	-0
						-0	-0	-0	-0	-0	0			
						-0	-0	0	-0	-0	-0			
						-0	-0	0	-0	-0	0			
						-0	-0	-0	-0	-0	-0			
						-0	-0	-0	-0	-0	-0			
						-0	-0	0	-0	-0	-0			
						-0	-0	0						

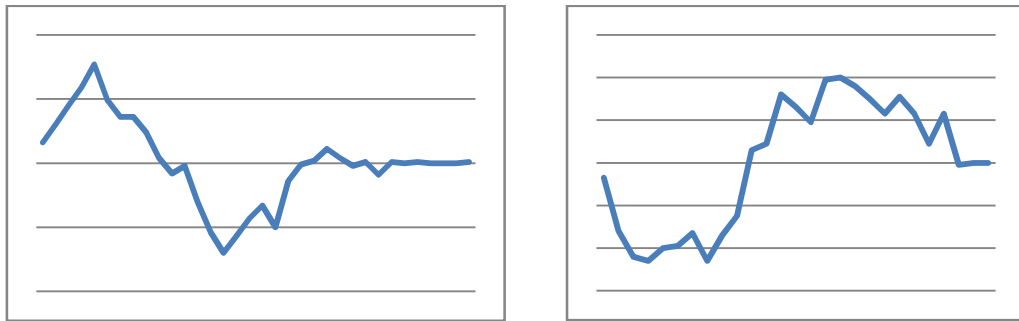


Gambar 4.23 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu z negatif

## e. Analisa Hasil Pengujian Percepatan Dinamik

### 1. Pergeseran ke arah negatif dan arah positif

Dapat diamati berdasarkan grafik yang diperoleh dari pengujian percepatan dinamik pada tiga sumbu diperoleh perbedaan bentuk grafik pada pergeseran pada arah positif dan arah negatif adalah sebagai berikut (gambar 4.24).



*Gambar 4.24 Perbedaan arah pergerakan benda pada arah positif (kiri) dan arah negatif (kanan)*

Gambar 4.24 merupakan contoh grafik yang terbentuk dari data percepatan pada perpindahan data sumbu y sejauh 40 cm pada arah positif dan 40 cm arah negatif. Pada pergerakan kearah positif, grafik percepatan yang terbentuk sepertihalnya gelombang sinus sedangkan pada arah pergerakan negatif grafik yang terbentuk sepertihalnya gelombang sinus yang mengalami pergeseran fasa  $180^0$ .

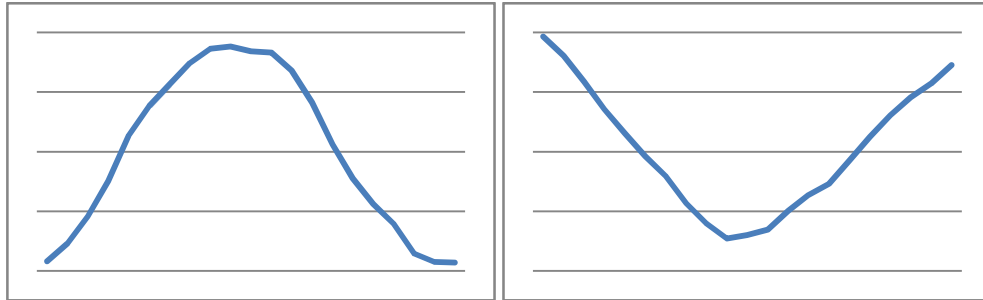
Dari grafik tersebut apabila di integrasikan akan didapat nilai kecepatan yang berbeda, yakni untuk pergerakan positif nilai kecepatan yang didapat bernilai positif sedangkan untuk pergerakan kearah negatif kecepatan yang didapat bernilai negatif. Integrasi data percepatan menjadi data kecepatan digunakan persamaan 2.4 yaitu

$$x_n = x_{n-1} + (y_n \cdot \Delta t)$$

Dengan percepatan ke-n adalah  $a_n$  dan kecepatan ke-n adalah  $v_n$  sehingga persamaan 2.4 diatas menjadi.

$$v_n = v_{n-1} + (a_n \cdot \Delta t)$$

Sedangkan nilai  $\Delta t$  adalah 8 ms sesuai dengan interval pengambilan data tiap sumbu sedangkan nilai  $v_0$  adalah 0. Grafik pada gambar 4.24 diatas jika diintegrasikan menjadi seperti ditunjukkan oleh gambar 4.25.

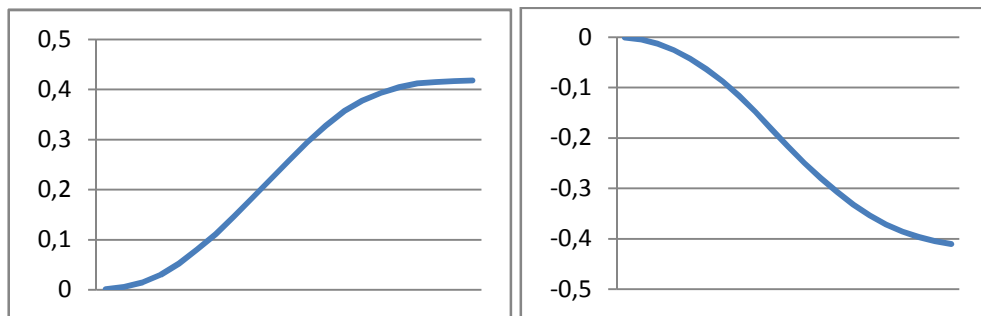


*Gambar 4.25 Hasil integrasi data percepatan pada pergerakan benda pada arah positif (kiri) dan arah negatif (kanan)*

Integrasi kedua akan menghasilkan data jarak perpindahan, parameter yang di integrasi adalah data percepatan sehingga persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$s_n = s_{n-1} + (v_n \cdot \Delta t)$$

Untuk perhitungan ini nilai  $\Delta t$  masih sama dengan yang sebelumnya yaitu 8 ms sedangkan inisialisasi jarak perpindahan pada sample ke-0 adalah sejauh 0 m sehingga  $s_0=0$ . Hasil integrasi ditunjukkan oleh gambar 4.26 dengan total jarak perpindahan yang terjadi pada benda adalah pada sampel terakhir.



*Gambar 4.26 Hasil integrasi data kecepatan pada pergerakan benda pada arah positif (kiri) dan arah negatif (kanan)*

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa perpindahan benda hasil perhitungan mendekati perpindahan benda sesungguhnya serta dapat disimpulkan bahwa sensor mampu mendeteksi pergerakan linear pada arah positif maupun negatif dengan melihat nilai jarak perpindahan yang didapat yakni pada pergerakan kearah positif jarak perpindahan yang didapat bernilai positif sedangkan pada pergerakan kearah negatif jarak perpindahan yang didapat bernilai negatif.

## **2. Pengaruh Pergerakan Satu Sumbu Terhadap Sumbu Yang Lain**

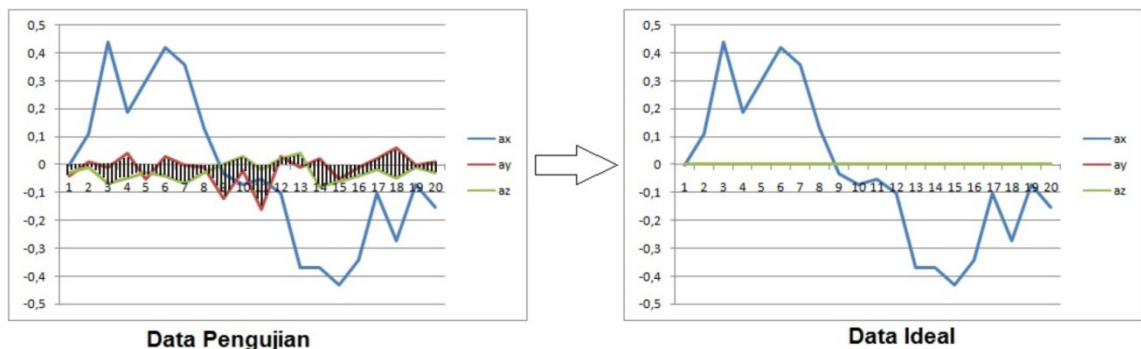
Idealnya, jika akselerometer digerakan hanya pada satu sumbu secara linear maka nilai percepatan pada sumbu yang lain bernilai tetap karena tidak mengalami perubahan posisi. Misalnya jika sensor digerakan pada sumbu x kearah positif, maka nilai percepatan yang berubah seharusnya hanya percepatan pada sumbu x saja sedangkan nilai percepatan pada sumbu y dan z harusnya tetap.

Akan tetapi pada pengujian ini ternyata memberikan hasil yang berbeda karena meskipun digerakan pada satu sumbu tetapi nilai

percepatan sumbu yang lain ternyata ikut berubah. Hal ini terjadi karena beberapa faktor diantaranya:

- Efek vibrasi pada saat modul bergerak.
- Gaya gesek media yang digunakan pada pengujian.
- Efek dari *Micro Electro-Mechanical System* (MEMS) yang diadopsi oleh akselerometer H48C.
- Pengaruh *noise* internal akselerometer.

Gambar 4.27 menunjukkan data percepatan yang didapat pada pengujian dan perbandingannya dengan data ideal yang seharusnya didapat. Daerah yang diarsir adalah nilai percepatan pada sumbu y dan z yang ikut berubah ketika modul digerakan pada sumbu x saja.



*Gambar 4.27 Perbandingan hasil pengujian dengan data ideal, meskipun digerakan hanya pada sumbu x akan tetapi nilai percepatan pada sumbu y dan sumbu z juga ikut berubah.*

Efek vibrasi dan pengaruh gaya gesek media pengujian merupakan kesalahan yang terjadi pada saat proses pengujian. Kesalahan ini merupakan faktor eksternal termasuk didalamnya adalah *human error*. Untuk meminimalisasi kesalahan ini diperlukan media

pengujian yang benar – benar bagus diantaranya adalah media bersifat licin sehingga meminimalisasi gaya gesek antara media yang diam dengan media yang bergerak. Selain itu pada proses menggerakkan benda juga diusahakan benda benar – benar terbebas dari dorongan maupun tekanan pada sumbu yang lain.

Efek dari *Micro Electro-Mechanical System* (MEMS) dapat dianalogikan dengan sistem pegas pada gambar 4.28. Sebuah kubus dengan masa  $M$  terhubung melalui dua buah pegas pada kedua sumbunya terhadap dinding sebuah balok. Pada kondisi diam, panjang regangan pegas pada masing – masing sumbu adalah  $x$  dan  $y$ . Sedangkan apabila balok diberi gaya dorong kesalah satu sumbu, misalnya sumbu  $x$  maka pada kubus  $M$  berlaku hukum *Newton I* yaitu ‘*setiap benda memiliki sifat kelembaman*’ yang mengakibatkan terjadinya perubahan regangan pada pegas  $x$  sejauh  $dx$ , akan tetapi pada pegas  $y$  juga mengalami perubahan panjang sejauh  $dy$  karena terjadi simpangan pada kubus  $M$ . Fenomena ini sama halnya jika sistem dalam representasi 3 dimensi. Sedangkan dalam teknik pengukuran inersial, fenomena ini disebut *cross axis effect*.



Gambar 4.28 Analogi *Micro Electro-Mechanical System* yang diadopsi oleh akselerometer H48C

### 3. Tingkat Akurasi Pembacaan Akselerometer

Tabel 4.8 menunjukkan data hasil pengujian akselerometer yang digerakan pada sumbu x, y, dan z berikut selisih pembacaan dengan data sebenarnya.

Tabel 4.8 Data hasil pengujian pergerakan akselerometer pada sumbu x, y, dan z

Jarak (cm)	X		Y		Z	
	Terukur	Error	Terukur	Error	Terukur	Error
10	7.7	2.3	9.2	0.8	9.4	0.6
20	21.4	1.4	21.2	1.2	19.5	0.5
30	28.5	1.5	30.7	0.7	29.8	0.2
40	41.8	1.8	39.7	0.3	40.6	0.6
50	51.5	1.5	51.7	1.7	52.9	2.9
-10	-8	2	-10.7	0.7	-9.5	0.5
-20	-19.6	0.4	-20.1	0.1	-22.3	2.3
-30	-30.2	0.2	-32.3	2.3	-31.8	1.8
-40	-39.4	0.6	-40.4	0.4	-38.1	1.9
-50	-51.1	1.1	-53.9	3.9	-53.4	3.4
Error rata - rata		1.28		1.21		1.47

Dari hasil yang ditunjukkan pada tabel 4.8 menunjukkan bahwa tingkat akurasi pembacaan akselerometer H48C tergolong cukup tinggi karena untuk keseluruhan pengujian rata – rata error dibawah 1.5 cm. Akan tetapi data satu sumbu diatas sebenarnya didalamnya masih terdapat noise yang disebutkan pada poin 2 diatas yang seharusnya tidak diikut sertakan dalam perhitungan. Hal ini dapat dibuktikan dengan melakukan perhitungan yang sama untuk sumbu yang lain yang seharusnya nilainya mendekati 0. Hasil perhitungan ditunjukkan oleh tabel 4.9 dibawah.

Tabel 4.9 Hasil *double* integrasi data percepatan pada sumbu yang tidak bergerak.

Jarak (cm)	Pergeseran sumbu x		Pergeseran sumbu y		Pergeseran sumbu z	
	y	z	x	z	x	y
10	0.3	4.6	-1.6	-5.2	-2.6	2.3
20	2.7	6.4	-1.9	-4.1	5.7	5.8
30	0.4	12.1	0	2.3	3.8	1.7
40	4.4	12.3	-2.5	-15.5	6	11.7
50	-4.5	-14.7	9	-9	0	1.9
-10	-1	-2	0	-2.5	-1.6	-0.2
-20	4.8	-4.1	2.4	0.4	-4.7	2.5
-30	-1.9	1.7	-1.8	-5.2	-0.9	-2.4
-40	-7.3	1.1	0.4	-7.3	-1.4	-2.8
-50	1	-4.1	1.4	-11	13	8.7

Bentuk grafik dari data percepatan, kecepatan dan jarak perpindahan dari hasil pengujian pergerakan satu sumbu pada akselerometer H48C dapat dilihat pada lampiran 2.

#### 4. Reduksi Error Pada Pengukuran Dan Perhitungan

Jika hanya menggunakan metode pengukuran dan perhitungan diatas, dapat diamati bahwa tingkat kesalahan dari pengukuran dan perhitungan cukup tinggi jika dibandingkan dengan nilai sesungguhnya.

Untuk meminimalisir tingkat kesalahan dilakukan perbaikan proses pengolahan sinyal lebih lanjut. Dimulai dari sinyal yang didapat dari sensor akselerometer.

Sinyal dari akselerometer terdapat banyak derau untuk itu diperlukan filter. Terdapat banyak macam filter digital yang dapat



diaplikasikan untuk sinyal dari akselerometer ini. Pemilihan filter didasarkan pada sinyal yang didapat.

Data percepatan dari akselerometer merupakan sinyal yang informasinya direpresentasikan dalam runtun waktu diskret. Sehingga dipilih filter IIR (*Infinite Impulse Response*) dan *prototype* filter analog yang dipilih adalah LPF *Bessel Filter*.

Langkah selanjutnya adalah menentukan parameter – parameter filter yaitu frekuensi sampling, frekuensi *cutt off*, dan orde filter.

Pengambilan data akselerometer dalam 1 detik sebanyak 125 data sehingga frekuensi sampling adalah 125 Hz, sedangkan frekuensi *cutt off* dibuat 5 Hz dan orde filter 10.

Respon frekuensi dari filter digital adalah pada  $[0,1]$  sedangkan 1 merepresentasikan  $\pi$  yang merupakan frekuensi *Nyquist* sehingga  $\pi = 62.5$  Hz. Frekuensi *cutt off* dari filter digital adalah  $\omega_c = f_c / f_s = 0.04$  rad/s.

Untuk mencari koefisien rekursi dari fungsi alih filter yang akan dibuat pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan program *Filter helper* yang tersedia pada website <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter> dengan memasukan parameter frekuensi sampling, frekuensi *cut off* (*corner frequency*) dan orde filter.

Hasil yang didapat adalah sebagai berikut.

## Filter Design Results

Generated by: <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter>

### Summary

You specified the following parameters:

filtertype = Bessel  
passtype = Lowpass  
ripple =  
order = 10  
samplerate = 125  
corner1 = 5  
corner2 =  
adzero =  
logmin =

### Results

Command line: /www/usr/fisher/helpers/mkfilter -Be -Lp -o 10 -a  
4.0000000000e-02 0.0000000000e+00  
raw alpha1 = 0.0400000000  
raw alpha2 = 0.0400000000  
warped alpha1 = 0.0402118901  
warped alpha2 = 0.0402118901  
gain at dc : mag = 3.457215320e+06 phase = 0.0000000000 pi  
gain at centre: mag = 2.444620397e+06 phase = 0.8569553843 pi  
gain at hf : mag = 0.000000000e+00

S-plane zeros:

S-plane poles:

-0.4870299950 + j 0.0610482858  
-0.4870299950 + j -0.0610482858  
-0.4654470131 + j 0.1837480006  
-0.4654470131 + j -0.1837480006  
-0.4198709098 + j 0.3085216633  
-0.4198709098 + j -0.3085216633  
-0.3437908196 + j 0.4379854060  
-0.3437908196 + j -0.4379854060  
-0.2187410626 + j 0.5792466866  
-0.2187410626 + j -0.5792466866

Z-plane zeros:

-1.0000000000 + j 0.0000000000 10 times

Z-plane poles:

0.6073755865 + j 0.0394557060  
0.6073755865 + j -0.0394557060  
0.6134616787 + j 0.1202501436  
0.6134616787 + j -0.1202501436  
0.6265413107 + j 0.2073760334  
0.6265413107 + j -0.2073760334  
0.6490511046 + j 0.3081590352  
0.6490511046 + j -0.3081590352

```

0.6877886497 + j    0.4406309504
0.6877886497 + j   -0.4406309504

Recurrence relation:
y[n] = (  1 * x[n-10])
      + ( 10 * x[n- 9])
      + ( 45 * x[n- 8])
      + (120 * x[n- 7])
      + (210 * x[n- 6])
      + (252 * x[n- 5])
      + (210 * x[n- 4])
      + (120 * x[n- 3])
      + ( 45 * x[n- 2])
      + ( 10 * x[n- 1])
      + (  1 * x[n- 0])

      + ( -0.0217192171 * y[n-10])
      + (  0.3012846437 * y[n- 9])
      + ( -1.8998620952 * y[n- 8])
      + (  7.1765621146 * y[n- 7])
      + (-17.9969646061 * y[n- 6])
      + ( 31.3334899657 * y[n- 5])
      + (-38.3927239217 * y[n- 4])
      + ( 32.7257173947 * y[n- 3])
      + (-18.5945171308 * y[n- 2])
      + (  6.3684366602 * y[n- 1])

```

Pada bagian *Recurent relation* menunjukkan persamaan relasi dari fungsi alih filter yang dihasilkan dengan  $x[n]$  adalah sebagai dan  $y[n]$  sebagai output. Langkah selanjutnya adalah menerapkannya kedalam program arduino.

Berikut fungsi filter IIR pada arduino yang diigunakan.

```

// LPF Bessel, fc = 5 Hz Fs = 125 Hz Orde=10
#define GAIN    3.457215320e+06

float IIR(float value, float xv[], float yv[]) {
    xv[0] = xv[1];
    xv[1] = xv[2];
    xv[2] = xv[3];
    xv[3] = xv[4];
    xv[4] = xv[5];
    xv[5] = xv[6];
    xv[6] = xv[7];
    xv[7] = xv[8];
    xv[8] = xv[9];
    xv[9] = xv[10];
    xv[10] = value / GAIN;

    yv[0] = yv[1];

```

```

yv[1] = yv[2];
yv[2] = yv[3];
yv[3] = yv[4];
yv[4] = yv[5];
yv[5] = yv[6];
yv[6] = yv[7];
yv[7] = yv[8];
yv[8] = yv[9];
yv[9] = yv[10];
yv[10] = (xv[0]+xv[10]) + 10*(xv[1]+xv[9]) + 45*(xv[2]+xv[8]) +
120*(xv[3]+xv[7]) + 210*(xv[4]+xv[6]) + 252*xv[5] + (-
0.0217192171*yv[0]) + (0.3012846437*yv[1]) + (-
1.8998620952*yv[2]) + (7.1765621146*yv[3]) + (-
17.9969646061*yv[4]) + (31.3334899657*yv[5]) + (-
38.3927239217*yv[6]) + (32.7257173947*yv[7]) + (-
18.5945171308*yv[8]) + (6.3684366602*yv[9]);
return yv[10];
}

```

Untuk memanggil fungsi IIR diatas dilakukan dengan cara sebagai berikut.

```

//===== Filtering data akselerometer=====//
float accelXIn[11], accelXIn[11], accelXIn[11];
float accelXOut[11], accelXOut[11], accelXOut[11];

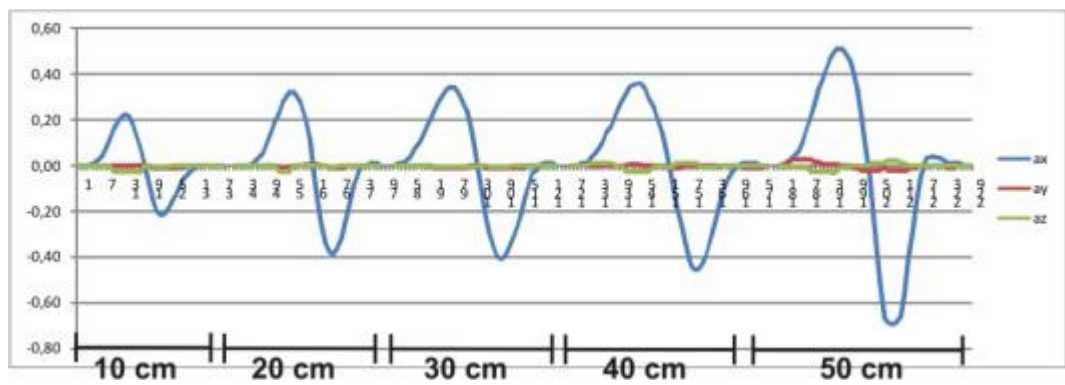
float accelX = IIR(Ax, accelXIn, accelXOut);
float accelY = IIR(Ay, accelYIn, accelYOut);
float accelZ = IIR(Az, accelZIn, accelZOut);

```

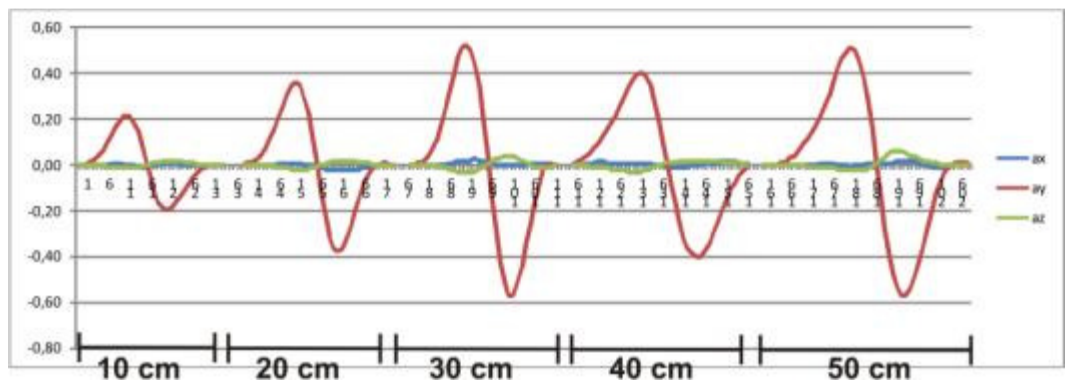
## 5. Hasil Pengukuran Setelah Menggunakan Filter

Pengukuran kembali dilakukan dengan metode mengukur percepatan pada masing-masing sumbu dengan arah pergerakan positif dan negatif untuk mengetahui efek penggunaan filter pada modul.

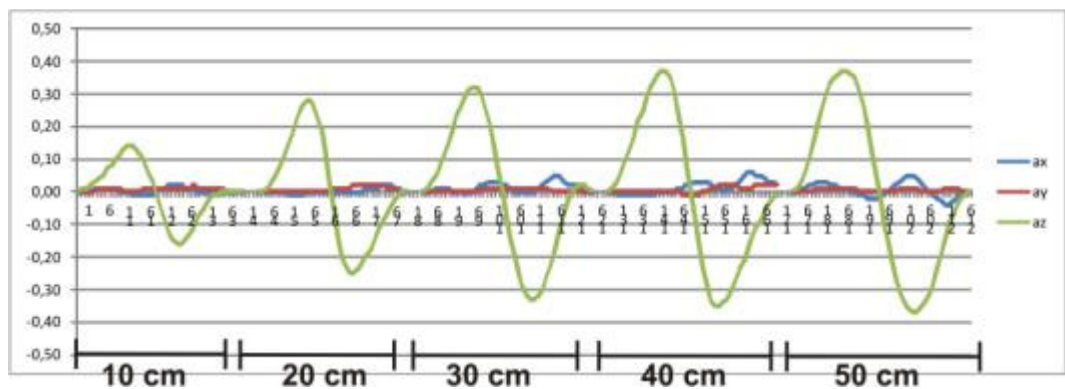
Hasil yang didapat pada pengukuran sumbu X, Y, dan Z pada arah positif maupun negatif ditunjukkan oleh gambar 4.29 berikut.



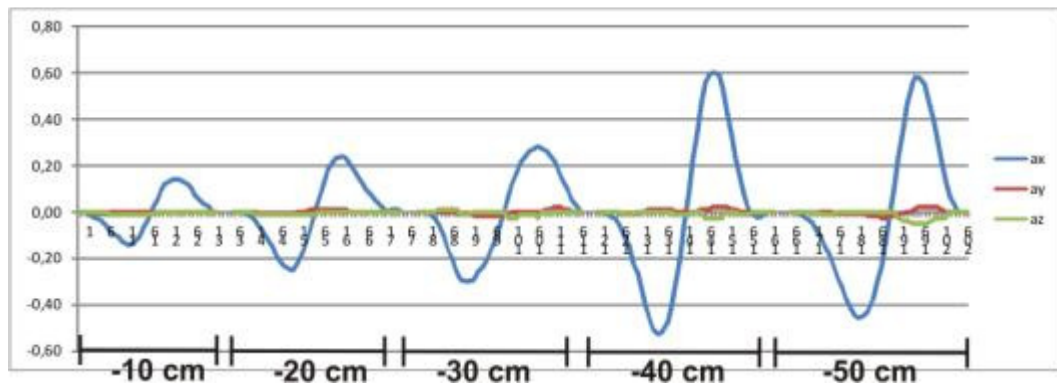
(a)



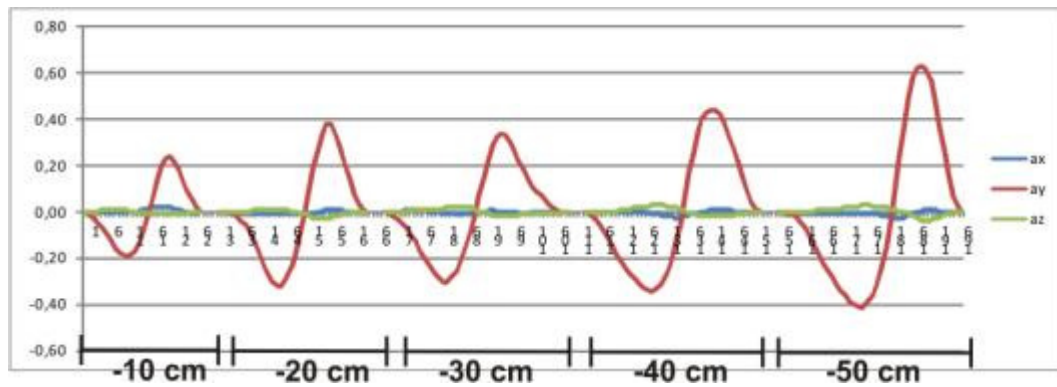
(b)



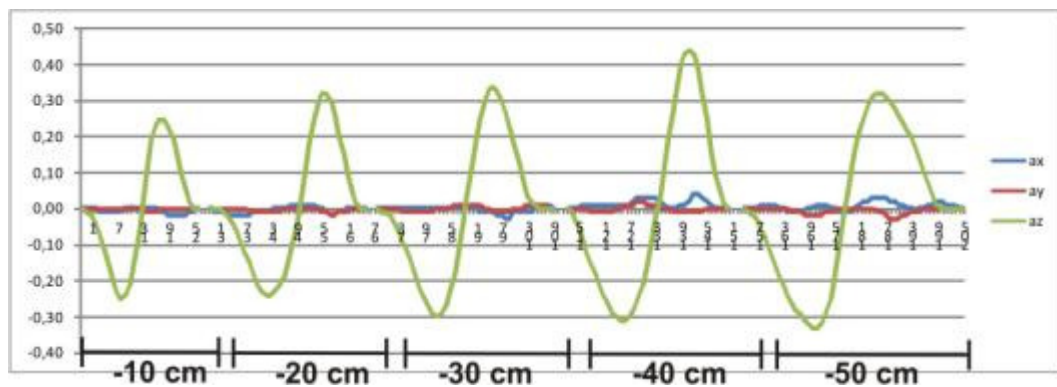
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4.29 Hasil pengujian akselerometer setelah difilter (a) Sumbu x arah positif, (b) Sumbu x arah positif, (c) Sumbu z arah positif, (d) Sumbu x arah negatif, (e) Sumbu y arah negatif, (f) Sumbu z arah negatif

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.29 diatas tampak bahwa hasil yang didapatkan setelah menerapkan filter pada akusisi data akselerometer menunjukkan kurva pergerakan lebih halus dan lebih baik. Tampak bahwa noise pada tiap – tiap sumbu dapat dikurangi. Hal ini menunjukkan bahwa filter bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Langkah selanjutnya adalah melakukan double integral untuk mendapatkan data jarak perpindahan. Untuk hasil masing – masing pergerakan sumbu, hasil double integral ditunjukkan oleh tabel 4.10 dibawah.

Tabel 4.10 Data hasil pengujian pergerakan akselerometer pada sumbu x, y, dan z setelah difilter

Jarak (cm)	X		Y		Z	
	Terukur	Error	Terukur	Error	Terukur	Error
10	11.02	1.02	11.24	1.24	11.75	1.75
20	20.03	0.03	20.94	0.94	20.79	0.79
30	33.75	3.75	31.99	1.99	32.29	2.29
40	45.08	5.08	43.09	3.09	42.71	2.71
50	54.10	4.10	51.95	1.95	53.18	3.18
-10	-9.61	0.39	-10.43	0.43	-11.45	1.45
-20	-19.70	0.30	-21.81	1.81	-21.80	1.80
-30	-31.79	1.79	-30.41	0.41	-29.56	0.44
-40	-43.04	3.04	-42.74	2.74	-39.92	0.08
-50	-50.10	0.10	-54.22	4.22	-53.10	3.10
Error rata - rata		1.96		1.88		1.76

Sedangkan pengaruh pergerakan terhadap sumbu yang tidak digerakan ditunjukkan oleh tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Hasil *double* integrasi data percepatan pada sumbu yang tidak bergerak setelah difilter

Jarak (cm)	Pergeseran Sumbu X		Pergeseran Sumbu Y		Pergeseran Sumbu Z	
	Y	Z	X	Z	X	Y
10	-0.01	-0.05	0.00	0.00	0.02	0.04
20	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.02
30	-0.05	-0.05	0.03	-0.02	0.06	0.02
40	0.00	-0.03	0.04	-0.03	0.04	0.01
50	0.03	-0.07	0.03	0.01	0.05	0.03
-10	-0.01	-0.01	0.01	0.00	-0.01	0.00
-20	-0.01	-0.03	-0.03	-0.01	-0.04	-0.02
-30	-0.03	-0.01	0.00	0.02	-0.02	-0.01
-40	0.01	-0.03	-0.02	0.03	0.06	0.00
-50	-0.03	-0.05	-0.06	0.03	0.03	-0.06

Jika dibandingkan dengan data perhitungan yang belum menggunakan filter, data hasil perhitungan yang menggunakan filter jauh lebih baik walaupun pengaruh gravitasi dan *cross axis efect* belum bisa dihilangkan.