

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Berdasarkan tinjauan aspek geologis, jenis tanah yang sering dijumpai di Indonesia adalah hasil letusan gunung api. Tanah ini memiliki komposisi sebagian besar lempung dengan sedikit pasir dan bersifat subur. Tanah pelapukan yang berada di atas batuan kedap air pada perbukitan / punggung dengan kemiringan sedang hingga terjal berpotensi mengakibatkan tanah longsor pada musim hujan dengan curah hujan berkuantitas tinggi. Jika perbukitan tersebut tidak ada tanaman keras berakar kuat dan dalam, maka kawasan tersebut rawan bencana tanah longsor.

Tercatat selama tahun 2011 terjadi 210 kejadian tanah longsor dengan yang mengakibatkan 177 korban meninggal, 837 orang menderita dan mengungsi dan kerusakan bangunan mencapai 2992 rumah dan bangunan (BNPB, 2012^a). Angka kejadian bencana ini terbilang sangat tinggi sehingga diperlukan penanganan khusus terhadap upaya penanggulangan dan mitigasi bencana terhadap tanah longsor.

Salah satu parameter dari tanah longsor adalah kecepatan pergerakan tanah (BNPB, 2011). Yang mana kecepatan merupakan besaran turunan dari jarak perpindahan. Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk mendeteksi adanya perpindahan material tanah adalah dengan cara melakukan pengukuran perpindahan posisi tanah secara berkala.

Pada saat ini didalam sistem instrumentasi elektronik telah dikembangkan sensor percepatan yang mana percepatan merupakan turunan dari kecepatan pergerakan sehingga dengan menggunakan teknik integrasi hasil pembacaan sensor percepatan dapat diperoleh nilai dari kecepatan. Sebagai contoh modul *accelerometer* H48C buatan Parallax mampu membaca percepatan pada 3 sumbu axial. Sehingga besar kemungkinan sensor percepatan H48C dapat diaplikasikan untuk pengukuran perpindahan material tanah secara berkala.

Dalam areal material longsor, jarak perpindahan material dari suatu daerah dengan daerah yang lain beraneka ragam dan umumnya daerah yang rawan bencana longsor merupakan daerah perbukitan sehingga perlu adanya suatu perangkat yang mampu melakukan pengukuran terhadap jarak perpindahan material tersebut pada titik yang berbeda secara bersamaan. Titik – titik yang dianggap perlu dilakukan pengukuran umumnya berjarak relatif jauh antara yang satu dengan lainnya, sehingga penggunaan kabel untuk pertukaran data antar perangkat mempunyai beberapa keterbatasan.

Robert Faludi (2010) dari New York University, USA, mengaplikasikan jaringan Zigbee¹ sebagai jaringan sensor nirkabel dengan memanfaatkan modul Xbee sebagai modul komunikasinya. Yang mana dalam jaringan sensor nirkabel ini komunikasi data tiap – tiap *mote*² dilakukan dengan menggunakan frekuensi radio sehingga memungkinkan dilakukan pertukaran data antar *mote* pada jarak yang relatif jauh tanpa menggunakan kabel. Sehingga

¹ Standar protokol jaringan *wireless* yang ditujukan untuk otomasi dan kontrol jarak jauh dengan konsumsi daya dan *transfer rate* yang relatif rendah.

² Unit dari jaringan sensor nirkabel yang tersusun dari modul komunikasi, kontroler, memori, sensor – sensor, dan catu daya.

jaringan Zigbee memungkinkan untuk digunakan sebagai jaringan sensor nirkabel untuk pembacaan kecepatan pergerakan tanah.

Robert Faludi juga menegaskan bahwa, modul wireless Xbee yang digunakan mampu menangani input dan output secara langsung karena modul telah terintegrasi dengan mikrokontroler. Akan tetapi penggunaan modul xbee secara *standalone* dalam sebuah *mote* memiliki beberapa keterbatasan diantaranya adalah kurangnya fleksibilitas dalam pemrograman, keterbatasan fungsi input – output modul, proses kalkulasi pada mikrokontroler internal dapat mengganggu stabilitas frekuensi pengiriman maupun penerimaan data sehingga untuk menanggulangnya dibutuhkan mikrokontroler eksternal. Beberapa modul mikrokontroler yang cukup terkenal dan banyak digunakan dalam aplikasi sistem embeded adalah Arduino, PIC Chip, BASICstamp, Beagle Board.

I.2 Perumusan Masalah

Dari uraian di atas maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Bagaimana memanfaatkan sensor percepatan untuk akuisisi data kecepatan pergerakan tanah?
2. Bagaimana melakukan kalibrasi dan menentukan tingkat akurasi sensor percepatan dalam melakukan pengukuran pergerakan tanah?
3. Bagaimana memanfaatkan jaringan sensor nirkabel menggunakan protokol Zigbee untuk komunikasi data percepatan pergerakan tanah antar *mote*?

4. Bagaimana sinkronisasi data antara akselerometer, mikrokontroler eksternal, dan modul wireless?

I.3 Batasan Masalah

Dalam pembuatan skripsi ini penulis hanya akan membahas sebagai berikut:

1. Perangkat yang digunakan adalah sebagai berikut.
 - a. Sensor percepatan menggunakan modul *accelerometer* H48C.
 - b. Mikrokontroler eksternal menggunakan Arduino type Arduino Deumilanove.
 - c. Modul wireless menggunakan Xbee Pro *Series 1*.
2. Bagaimana merancang sebuah sistem akusisi data yang mampu melakukan pengambilan data dari lingkungan sekaligus berkomunikasi dengan perangkat lain.
3. Topologi jaringan ZigBee yang digunakan adalah topologi *star* dan tidak membahas detil tentang topologi jaringan.
4. Perancangan system tidak membahas masalah keamanan jaringan.

I.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu :

1. Melakukan pengukuran terhadap pergerakan material longsor menggunakan sensor percepatan.

2. Melakukan kalibrasi dan menentukan tingkat akurasi terhadap modul sensor akselerometer H48C.
3. Merancang dan membuat sistem *telemetry* berbasis *Zigbee wireless RF*.

I.5 Manfaat

Manfaat dari melakukan penelitian ini yaitu :

1. Mengaplikasikan jaringan sensor secara nirkabel terhadap sistem peringatan dini bencana tanah longsor.
2. Untuk menyelesaikan permasalahan dari sistem peringatan dini bencana tanah longsor yang ada sebelumnya yang masih terkendala masalah fleksibilitas dan portabilitas.
3. Dapat melakukan alih teknologi tentang jaringan sensor nirkabel yang masih terkategori baru untuk Indonesia.
4. Sebagai bahan kajian untuk aplikasi jaringan sensor nirkabel dibidang lain.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Longsor

Tanah longsor adalah perpindahan material pembentuk lereng berupa batuan, bahan rombakan, tanah, atau material campuran tersebut, bergerak ke bawah atau keluar lereng. Proses terjadinya tanah longsor dapat diterangkan sebagai berikut: air yang meresap ke dalam tanah akan menambah bobot tanah. Jika air tersebut menembus sampai tanah kedap air yang berperan sebagai bidang gelincir, maka tanah menjadi licin dan tanah pelapukan di atasnya akan bergerak mengikuti lereng dan keluar lereng.

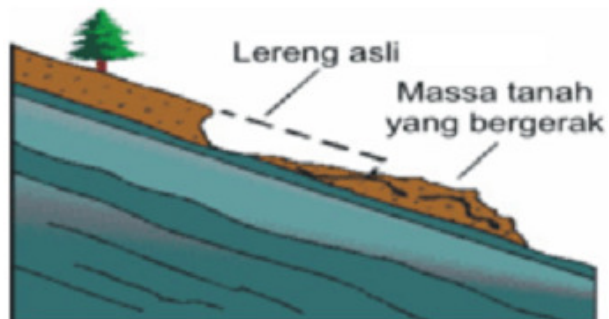
II.1.1 Jenis - jenis longsor

Ada 6 jenis tanah longsor (BNPB, 2011), yakni: longsoran translasi, longsoran rotasi, pergerakan blok, runtuh batu, rayapan tanah, dan aliran bahan rombakan. Jenis longsoran translasi dan rotasi paling banyak terjadi di Indonesia. Sedangkan longsoran yang paling banyak memakan korban jiwa manusia adalah aliran bahan rombakan.

1. Longsoran Translasi.

Longsoran translasi adalah bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk rata atau menggelombang landai.

Ilustrasi dari longsor translasi dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Longsor translasi

2. Longsoran Rotasi.



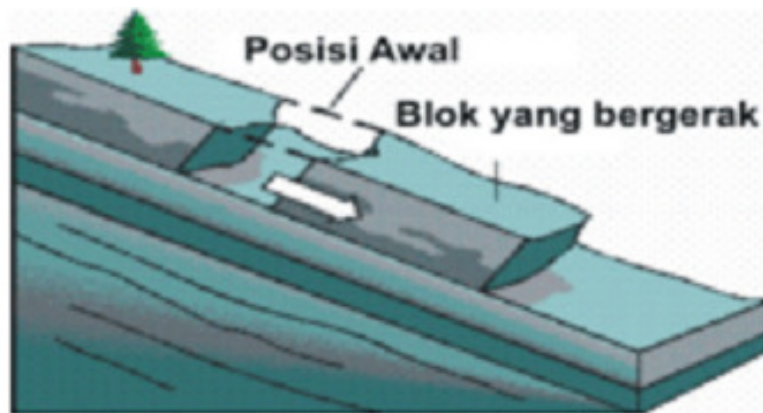
Gambar 2.2 Longsor rotasi

Longsoran rotasi adalah bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk cekung. Ilustrasi dari longsor rotasi dapat dilihat pada gambar 2.2.

3. Pergerakan Blok

Pergerakan blok adalah perpindahan batuan yang bergerak pada bidang gelincir berbentuk rata. Longsoran ini disebut juga longsor translasi blok batu.

Ilustrasi dari pergerakan blok dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pergerakan blok

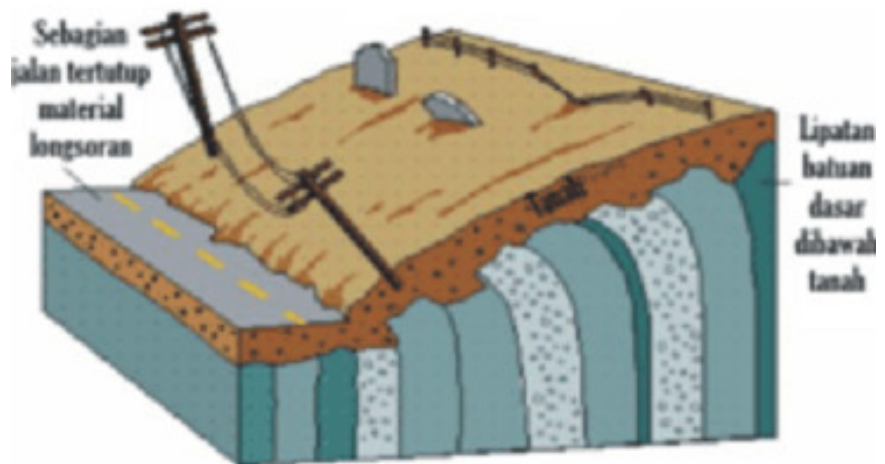
4. Runtuhan Batu



Gambar 2.4 Pergerakan batu

Runtuhan batu terjadi ketika sejumlah besar batuan atau material lain bergerak ke bawah dengan cara jatuh bebas. Umumnya terjadi pada lereng yang terjal hingga menggantung terutama di daerah pantai. Batu-batu besar yang jatuh dapat menyebabkan kerusakan yang parah. Ilustrasi dari pergerakan batu dapat dilihat pada gambar 2.4.

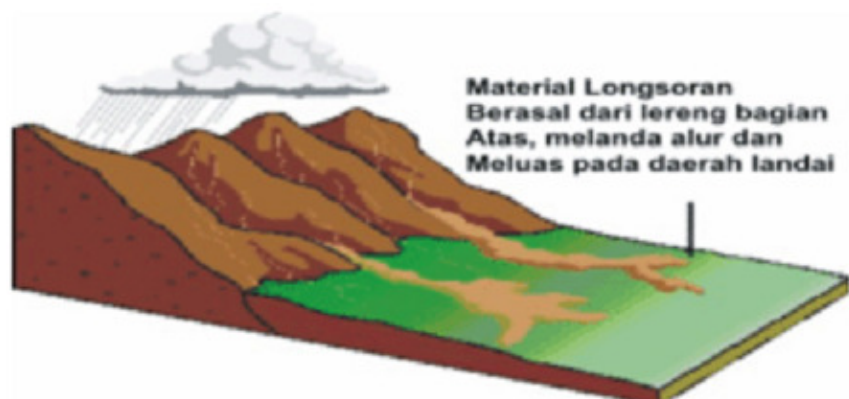
5. Rayapan Tanah



Gambar 2.5 Rayapan tanah

Rayapan Tanah adalah jenis tanah longsor yang bergerak lambat. Jenis tanahnya berupa butiran kasar dan halus. Jenis tanah longsor ini hampir tidak dapat dikenali. Setelah waktu yang cukup lama longsor jenis rayapan ini bisa menyebabkan tiang-tiang telepon, pohon, atau rumah miring ke bawah. Ilustrasi dari rayapan tanah dapat dilihat pada gambar 2.5.

6. Aliran Bahan Rombakan



Gambar 2.6 Aliran bahan rombakan

Jenis tanah longsor ini terjadi ketika massa tanah bergerak didorong oleh air. Kecepatan aliran tergantung pada kemiringan lereng, volume dan tekanan air, dan jenis materialnya. Gerakannya terjadi di sepanjang lembah dan mampu mencapai ratusan meter jauhnya. Di beberapa tempat bisa sampai ribuan meter seperti di daerah aliran sungai di sekitar gunungapi. Aliran tanah ini dapat menelan korban cukup banyak. Ilustrasi dari aliran bahan rombakan dapat dilihat pada gambar 2.6.

II.1.2 Faktor Penyebab Tanah Longsor

Pada prinsipnya tanah longsor terjadi bila gaya pendorong pada lereng lebih besar daripada gaya penahan. Gaya penahan umumnya dipengaruhi oleh kekuatan batuan dan kepadatan tanah. Sedangkan gaya pendorong dipengaruhi oleh besarnya sudut lereng, air, beban serta berat jenis tanah batuan.

Faktor-faktor Penyebab Tanah Longsor :

1. Hujan

Ancaman tanah longsor biasanya dimulai pada bulan November karena meningkatnya intensitas curah hujan. Musim kering yang panjang akan menyebabkan terjadinya penguapan air di permukaan tanah dalam jumlah besar. Hal itu

mengakibatkan munculnya pori-pori atau rongga tanah hingga terjadi retakan dan merekahnya tanah permukaan.

Ketika hujan, air akan menyusup ke bagian yang retak sehingga tanah dengan cepat mengembang kembali. Pada awal musim hujan, intensitas hujan yang tinggi biasanya sering terjadi, sehingga kandungan air pada tanah menjadi jenuh dalam waktu singkat.

Hujan lebat pada awal musim dapat menimbulkan longsor, karena melalui tanah yang merekah air akan masuk dan terakumulasi di bagian dasar lereng, sehingga menimbulkan gerakan lateral. Bila ada pepohonan di permukaannya, tanah longsor dapat dicegah karena air akan diserap oleh tumbuhan. Akar tumbuhan juga akan berfungsi mengikat tanah.

2. Lereng terjal

Lereng atau tebing yang terjal akan memperbesar gaya pendorong. Lereng yang terjal terbentuk karena pengikisan air sungai, mata air, air laut, dan angin. Kebanyakan sudut lereng yang menyebabkan longsor adalah 180° apabila ujung lerengnya terjal dan bidang longsorannya mendatar.

3. Tanah yang kurang padat dan tebal

Jenis tanah yang kurang padat adalah tanah lempung atau tanah liat dengan ketebalan lebih dari 2,5 m dan sudut lereng lebih dari 220° . Tanah jenis ini memiliki potensi untuk

terjadinya tanah longsor terutama bila terjadi hujan. Selain itu tanah ini sangat rentan terhadap pergerakan tanah karena menjadi lembek terkena air dan pecah ketika hawa terlalu panas.

4. Batuan yang kurang kuat

Batuan endapan gunung api dan batuan sedimen berukuran pasir dan campuran antara kerikil, pasir, dan lempung umumnya kurang kuat. Batuan tersebut akan mudah menjadi tanah bila mengalami proses pelapukan dan umumnya rentan terhadap tanah longsor bila terdapat pada lereng yang terjal.

5. Jenis tata lahan

Tanah longsor banyak terjadi di daerah tata lahan persawahan, perladangan, dan adanya genangan air di lereng yang terjal. Pada lahan persawahan akarnya kurang kuat untuk mengikat butir tanah dan membuat tanah menjadi lembek dan jenuh dengan air sehingga mudah terjadi longsor. Sedangkan untuk daerah perladangan penyebabnya adalah karena akar pohonnya tidak dapat menembus bidang longsoran yang dalam dan umumnya terjadi di daerah longsoran lama.

6. Getaran

Getaran yang terjadi biasanya diakibatkan oleh gempa bumi, ledakan, getaran mesin, dan getaran lalu lintas kendaraan.

Akibat yang ditimbulkannya adalah tanah, badan jalan, lantai, dan dinding rumah menjadi retak.

7. Susut muka air danau atau bendungan

Akibat susutnya muka air yang cepat di danau maka gaya penahan lereng menjadi hilang, dengan sudut kemiringan waduk 220 mudah terjadi longsoran dan penurunan tanah yang biasanya diikuti oleh retakan.

8. Adanya beban tambahan

Adanya beban tambahan seperti beban bangunan pada lereng, dan kendaraan akan memperbesar gaya pendorong terjadinya longsor, terutama di sekitar tikungan jalan pada daerah lembah. Akibatnya adalah sering terjadinya penurunan tanah dan retakan yang arahnya ke arah lembah.

9. Pengikisan/erosi

Pengikisan banyak dilakukan oleh air sungai ke arah tebing. Selain itu akibat penggundulan hutan di sekitar tikungan sungai, tebing akan menjadi terjal.

10. Adanya material timbunan pada tebing

Untuk mengembangkan dan memperluas lahan pemukiman umumnya dilakukan pemotongan tebing dan penimbunan lembah. Tanah timbunan pada lembah tersebut belum terpadatkan sempurna seperti tanah asli yang berada di bawahnya.

Sehingga apabila hujan akan terjadi penurunan tanah yang kemudian diikuti dengan retakan tanah.

11. Bekas longsoran lama

Longsoran lama umumnya terjadi selama dan setelah terjadi pengendapan material gunung api pada lereng yang relatif terjal atau pada saat atau sesudah terjadi patahan kulit bumi.

Bekas longsoran

lama memiliki ciri:

- a. Adanya tebing terjal yang panjang melengkung membentuk tapal kuda. Umumnya dijumpai mata air, pepohonan yang relatif tebal karena tanahnya gembur dan subur.
- b. Daerah badan longsor bagian atas umumnya relatif landai.
- c. Dijumpai longsoran kecil terutama pada tebing lembah.
- d. Dijumpai tebing-tebing relatif terjal yang merupakan bekas longsoran kecil pada longsoran lama.
- e. Dijumpai alur lembah dan pada tebingnya dijumpai retakan dan longsoran kecil.

Longsoran lama ini cukup luas.

12. Adanya bidang diskontinuitas (bidang tidak sinambung)

Bidang tidak sinambung ini memiliki ciri:

- a. Bidang perlapisan batuan

- b. Bidang kontak antara tanah penutup dengan batuan dasar
- c. Bidang kontak antara batuan yang retak-retak dengan batuan yang kuat.
- d. Bidang kontak antara batuan yang dapat melewati air dengan batuan yang tidak melewati air (kedap air).
- e. Bidang kontak antara tanah yang lembek dengan tanah yang padat.
- f. Bidang-bidang tersebut merupakan bidang lemah dan dapat berfungsi sebagai bidang luncuran tanah longsor.

13. Penggundulan hutan

Tanah longsor umumnya banyak terjadi di daerah yang relatif gundul dimana pengikatan air tanah sangat kurang.

14. Daerah pembuangan sampah

Penggunaan lapisan tanah yang rendah untuk pembuangan sampah dalam jumlah banyak dapat mengakibatkan tanah longsor apalagi ditambah dengan guyuran hujan, seperti yang terjadi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Leuwigajah di Cimahi. Bencana ini menyebabkan sekitar 120 orang lebih meninggal.

II.2 Integrasi Numerik

Integrasi numerik umumnya dilakukan apabila :

- 1 Fungsi yang akan diintegrasikan sedemikian hingga tidak ada metode analitik untuk menyelesaikannya.
- 2 Fungsi yang akan diintegrasikan, bentuk eksplisitnya tak diketahui, tetapi diberikan nilai-nilai variabel bebasnya dan nilai-nilai fungsi yang berkorespondensi di dalam suatu interval $[a...b]$.

Masalah umum dari integrasi numerik dapat dinyatakan sebagai berikut:

Diberikan sekumpulan titik $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ dari fungsi $y=f(x)$, dimana bentuk eksplisit dari $f(x)$ tidak diketahui, dan dari data (keterangan) tersebut akan dihitung nilai integral tentu berikut:

$$I = \int_a^b y \, dx \dots\dots\dots(2.1)$$

seperti didalam diferensiasi numerik, $f(x)$ akan diaproksimasi oleh interpolasi polinom $\theta(x)$, dan hasilnya pada integrasi tersebut adalah nilai aproksimasi integral tentu. Jadi, perbedaan formula integrasi bergantung pada bentuk dari *selisih maju dari Newton*.

Misalkan interval $[a...b]$ dibagi menjadi n interval bagian, sedemikian hingga $a = x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n = b$. Oleh karena itu $x_n = x_0 + nh$. Dengan demikian diperoleh.

$$I = \int_{x_0}^{x_n} y \, dx \dots\dots\dots(2.2)$$

Aproksimasi y oleh formula selisih maju Newton, kita peroleh:

$$I = \int_{x_0}^{x_n} \left[y_0 + \Delta P y_0 + \frac{p(p-1)}{2} \Delta^2 y_0 + \frac{p(p-1)(p-2)}{6} \Delta^3 y_0 + \dots \right] dx \dots (2.2)$$

Karena $x = x.ph$ maka $dx = h dp$ jika disubstitusikan ke persamaan 2.2 maka akan menghasilkan persamaan 2.3 berikut.

$$\int_{x_0}^{x_n} y dx = \left[y_0 + \Delta P y_0 + \frac{n}{2} \Delta^2 y_0 + \frac{n(2n-3)}{12} \Delta^3 y_0 + \frac{n(n-2)^2}{24} \Delta^3 y_0 + \dots \right] \dots (2.3)$$

II.1.1 Integrasi data diskret

Data diskret adalah sekumpulan data yang diambil dengan interval pengambilan sampel tertentu. Pada proses integrasi diskrit, perhitungan jauh lebih sederhana karena proses integrasi hanyalah proses penjumlahan. Jika $y_{(n)}$ adalah sekumpulan data diskrit dengan n [a...b], sedangkan selang waktu kejadian antara data ke- n dengan data ke- $(n-1)$ adalah Δt , maka integral dari $y_{(n)}$ adalah $x_{(n)}$ sesuai dengan persamaan 2.4.

$$x_n = x_{n-1} + (y_n \cdot \Delta t) \dots (2.4)$$

II.3 Jaringan Sensor Nirkabel (*Wireless Sensor Network*)

Jaringan Sensor Nirkabel (*Wireless Sensor Network*) merupakan suatu jaringan nirkabel yang terdiri dari beberapa sensor (*node sensor*) yang diletakan diberbagai lokasi yang berbeda untuk memonitoring suatu plan.

Konsep dasar perancangan Jaringan Sensor Nirkabel yaitu memadukan fungsi sensing dari suatu piranti dengan CPU (*Central Processing Unit*) sebagai

unit pengolahan dan perhitungan data kemudian dipadukan dengan RF (*Radio Frequency*) untuk komunikasi data.

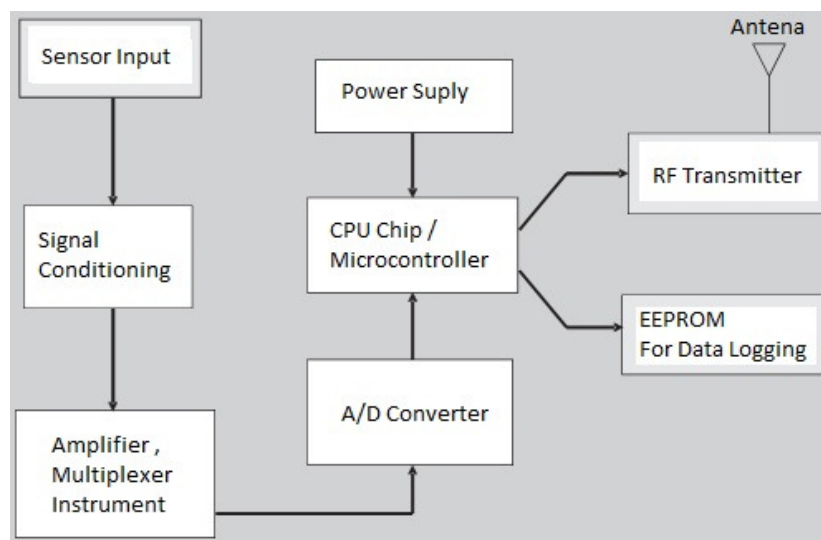
Sensor yang digunakan beraneka ragam sesuai dengan kebutuhan. Sensor-sensor tersebut akan melakukan akusisi data objek dan mengirimnya ke *gateway* kemudian ke server.

II.2.1 Arsitektur Jaringan Sensor Nirkabel

Komponen utama jaringan sensor nirkabel yaitu :

1. *Node / Mote*

Node merupakan komponen yang berfungsi untuk pembacaan data lingkungan, penyimpanan data , serta pengiriman data. Sehingga sebuah *node* minimal harus didukung oleh fungsi *sensing*, *data logging* dan *data transmit*. Arsitektur sebuah *node* dapat dilihat dari gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Arsitekture individual node

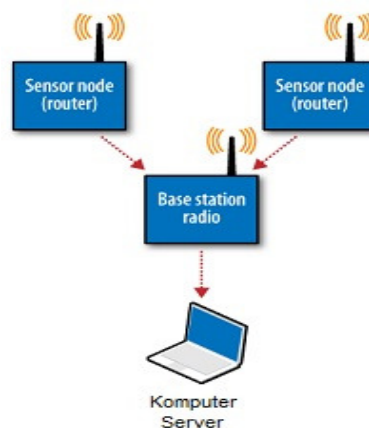
2. Gateway / Base Station

Base station memiliki fungsi utama sebagai pengumpul data dari *node – node* yang tersebar di lapangan kemudian mengirimkannya ke komputer server.

3. Komputer Server

Merupakan piranti yang berfungsi sebagai pusat basis data, sistem jaringan dan penyedia aplikasi. Dengan adanya komputer server memungkinkan data yang dikirimkan oleh *gateway* terhubung dengan internet, dilakukan pengolahan data untuk keperluan prediksi dan analisis, serta monitoring *node* yang tersebar dilapangan.

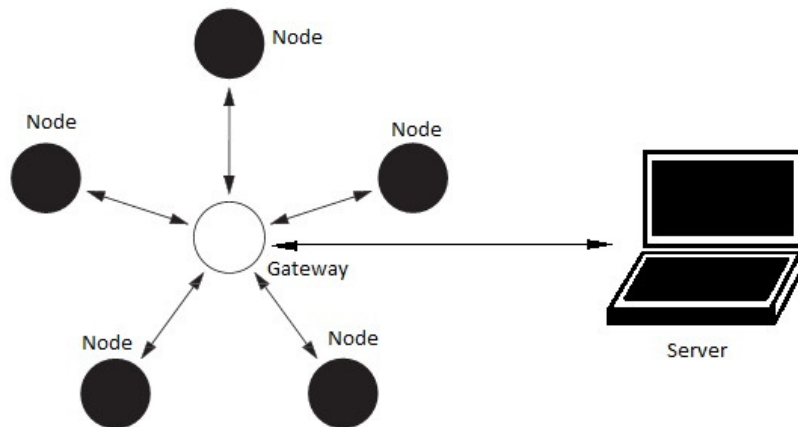
Desain minimum dari sebuah jaringan sensor nirkabel dapat dilihat dari gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.8 Konfigurasi Sebuah Jaringan Sensor Nirkabel Sederhana

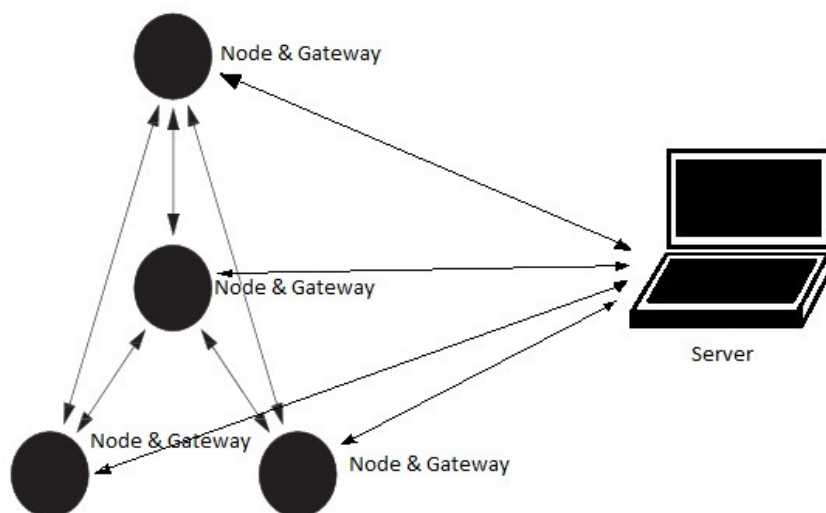
Konfigurasi ketiga komponen tersebut (*node*, *gateway*, dan *server*) dapat beraneka ragam sesuai dengan kebutuhan. Diantaranya adalah sebagai berikut .

1. Topologi *Star* / Bintang (Gambar 2.9)



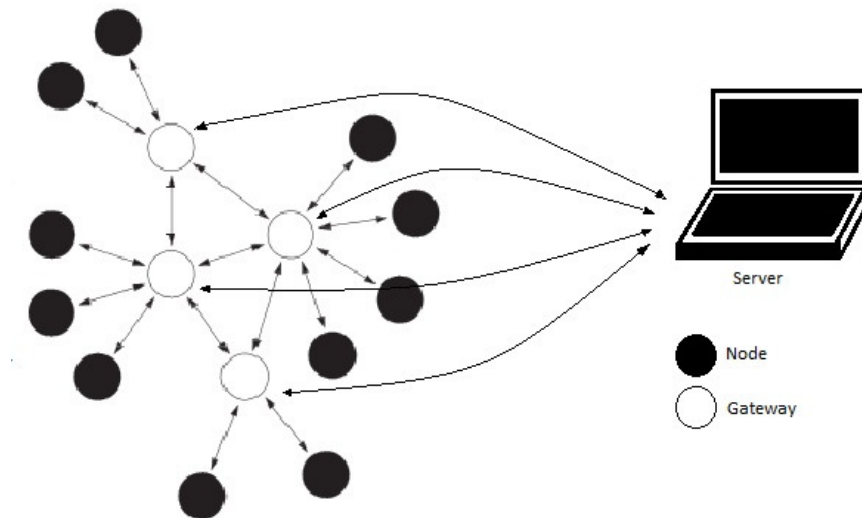
Gambar 2.9 Topologi Mesh pada Jaringan Sensor Nirkabel

2. Topologi Mesh (Gambar 2.10)



Gambar 2.10 Topologi Mesh pada Jaringan Sensor Nirkabel

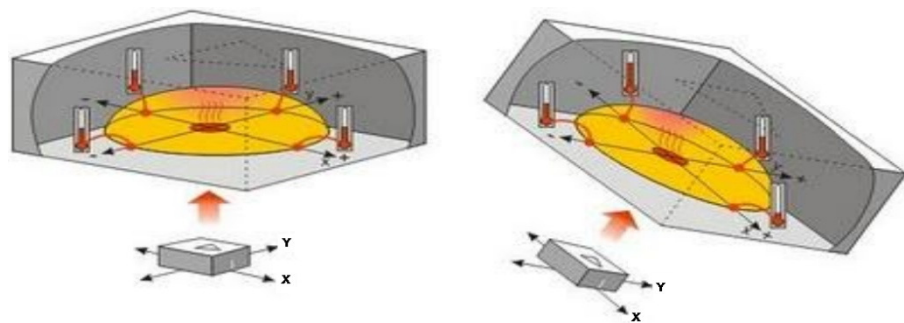
3. *Hybrid Star - Mesh* (Gambar 2.11)



Gambar 2.11 Topologi Hybrid Star – Mesh

II.2.2 Sensor Percepatan 3 Sumbu

a. Prinsip Kerja Akselerometer

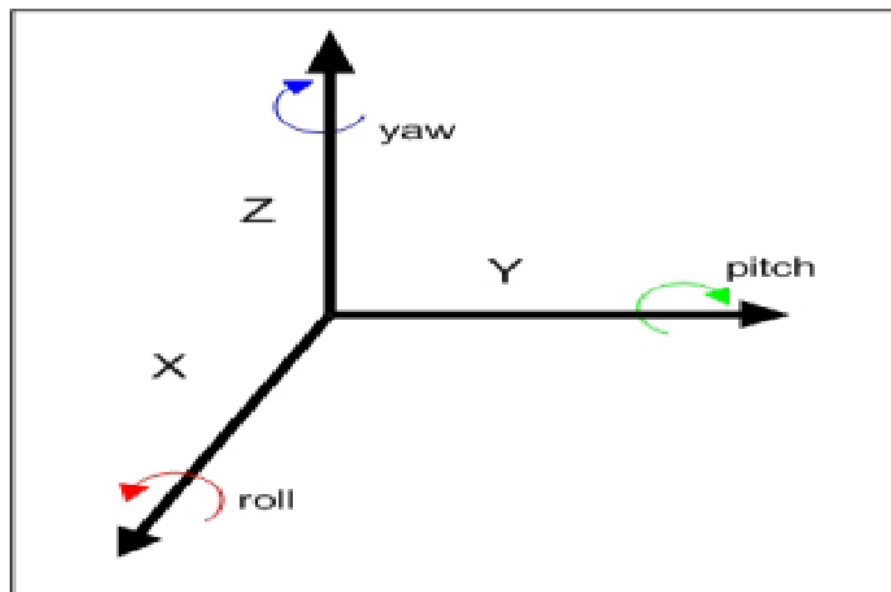


Gambar 2.12 Perinsipkerja akselerometer

Prinsip kerja sensor ini adalah seperti di tunjukkan oleh gambar 2.12. Sensor menghasilkan panas yang mana jika dimiringkan maka panas tersebut akan memanasi bagian pinggir sensor yang merupakan bahan seperti thermocoupler. sehingga jika dipanaskan akan menghasilkan perubahan dan perbedaan panas yang mengakibatkan

terjadinya perubahan tegangan yang nantinya dimasukkan kedalam ADC.

Sensor akselerometer 3 sumbu ini memiliki sifat pergerakan *roll*, *pitch* dan *yaw*. Sifat ini merupakan sifat pergerakan terhadap sumbu X, Y dan Z yang telah disesuaikan dengan titik gravitasi bumi. Sumbu X merepresentasikan gerakan perputaran. Sumbu Y merepresentasikan gerakan terhadap kemiringan pada sumbu Y. Sumbu Z merepresentasikan gerakan menoleh atau perbelokan terhadap bidang. Gambar 2.13 menunjukkan analogi pergerakan pada sensor akselerometer 3 sumbu.



Gambar 2.13. Analogi pergerakan sensor akselerometer 3 sumbu

b. Accelerometer H48C

H48C merupakan sensor percepatan yang mampu mendeteksi pergerakan dari 3 sumbu yaitu x, y, dan z. Sensor ini memberikan

keluaran berupa data digital hasil konversi tegangan dengan resolusi ADC 12 bit. Percepatan tiap sumbu(G)³ dapat dihitung dengan persamaan berikut :

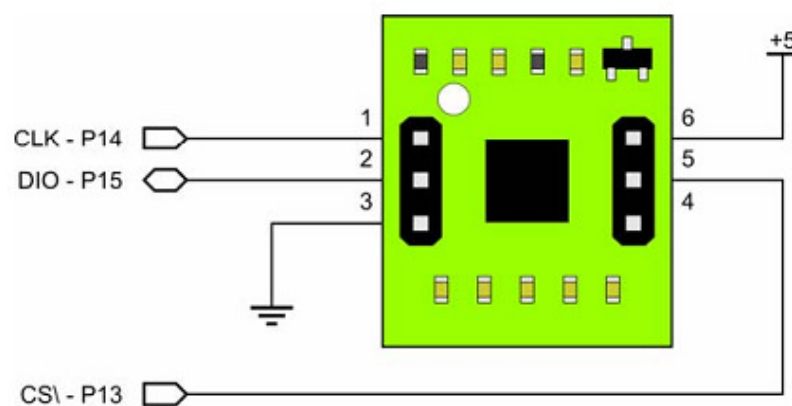
$$G = (Axis - vRef) \times 0,0022$$

Dimana : G = Percepatan

$Axis$ = Tegangan keluaran tiap sumbu

$vRef$ = Tegangan referensi ADC

Skematik konfigurasi sederhana dari H48C dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Skematik konfigurasi sederhana dari H48C

Pada gambar 2.14, fungsi pin CLK adalah sebagai *synchronous clock input* karena penggunaan bersama jalur data (DIO)⁴. Sedangkan CS merupakan pin *chip select* yang digunakan untuk memilih modul yang digunakan apabila modul yang dipakai lebih dari satu.

³ Simbol G diambil dari *g-force*

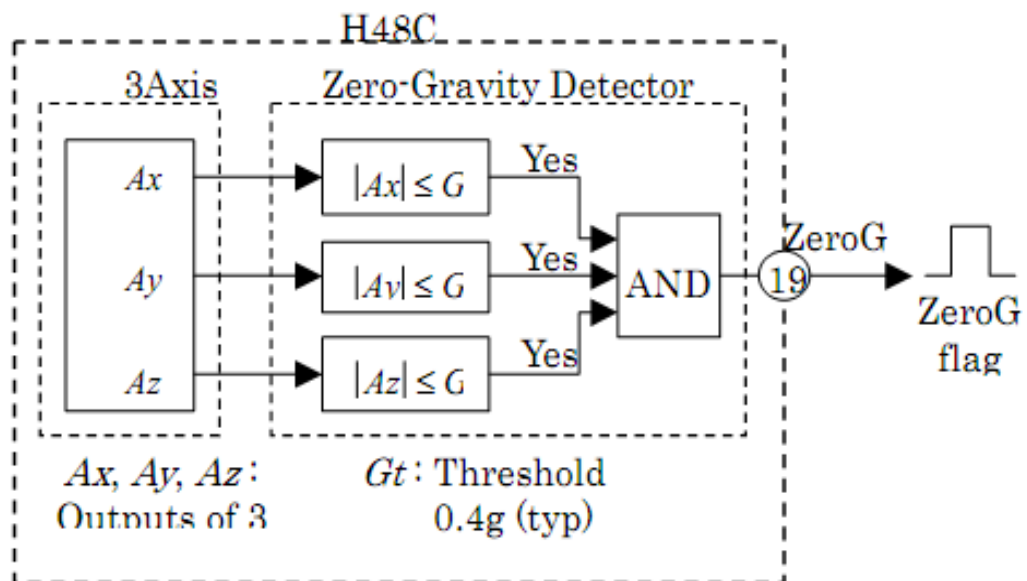
⁴ DIO = bi-directional digital input/output dimana modul akan mengirimkan data dan meminta data referensi dari jalur ini.

Dalam penelitian ini modul sensor H48C yang digunakan adalah modul *3 axis accelerometer H48C* buatan Parallax yang mana sensor percepatan H48C telah terintegrasi dengan *analog signal conditioning* MCP3204.

Prinsip pengiriman dan penerimaan data dari H48C adalah dengan menggunakan teknik geser keluar (*shift out*) untuk mengirim data, dan teknik geser kadalam (*shift in*) untuk menerima data dari kontroler (*host*).

Pada H48C terdapat *zeroG* detector untuk kalibrasi perhitungan. Pada kondisi jatuh bebas, output *zeroG* bernilai 3.3V.

Gambar 2.15 menunjukkan diagram blok dari *zeroG detector*.



Gambar 2.15. Diagram Blok ZeroG detector

c. Pengukuran Perpindahan Posisi

Dalam domain waktu (t), jarak perpindahan sesaat (s_t) dapat diperoleh dengan melakukan integrasi data kelajuan sesaat (v_t) dan kelajuan sesaat (v_t) dapat diperoleh dengan melakukan integrasi percepatan sesaat (a_t). Persamaan untuk menghitung jarak perpindahan sesaat (s_t) dari kelajuan sesaat (v_t) adalah sebagai berikut (persamaan 2.5).

$$s(t) = \int_{t_a}^{t_b} v(t)dt \dots\dots\dots(2.5)$$

Sedangkan untuk menghitung kelajuan sesaat (v_t) dari percepatan sesaat (a_t) adalah sesuai persamaan 2.6 berikut.

$$v(t) = \int_{t_a}^{t_b} a(t)dt \dots\dots\dots(2.6)$$

Berdasarkan persamaan 2.6 dan persamaan 2.7 untuk memperoleh jarak perpindahan sesaat (s_t) dari percepatan sesaat (a_t) dapat dilakukan substitusi persamaan 2.7 ke persamaan 2.6 sehingga menjadi persamaan 2.7.

$$s(t) = \int_{t_a}^{t_b} a(t)dt \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana : t = waktu

$s(t)$ = Jarak perpindahan setelah t

$a(t)$ = percepatan sesaat pada waktu t

t_a = Waktu awal

t_b = Waktu akhir

II.4 Sistem Komunikasi Nirkabel (*wireless*) RF (*Radio Frekuensi*)

Sistem komunikasi nirkabel merupakan suatu sistem komunikasi yang menggunakan media transmisi non fisik (kabel tembaga, kabel fiber). Umumnya, sistem komunikasi ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik sebagai media penyalurnya. Dengan kata lain, sebuah data / informasi dikirimkan dengan cara dimodulasi ke dalam gelombang elektromagnetik. Pada sistem komunikasi nirkabel menggunakan RF berarti media transmisi yang digunakan yakni gelombang elektromagnetik dalam *bandwidth* gelombang radio yakni pada rentang frekuensi 300 Hz sampai dengan 300 GHz.

Karena pengiriman informasi menggunakan frekuensi radio, maka komunikasi ini diatur oleh jenis hukum yang sama dan digunakan untuk mengatur hal-hal seperti AM/FM radio. Federal Communications Commission (FCC) mengatur penggunaan alat dari wireless LAN. Dalam pemasaran wireless sekarang, menerima beberapa standard operasional dan syarat dalam Amerika Serikat yang diciptakan dan dirawat oleh *Institute of Electrical Electronic Engineers (IEEE)*. Beberapa Standar wireless LAN :

IEEE 802.11 – Standar asli wireless LAN menetapkan tingkat perpindahan data yang paling lambat dalam teknologi transmisi light-based dan RF.

IEEE 802.11b – Menggambarkan tentang beberapa transfer data yang lebih cepat dan lebih bersifat terbatas dalam lingkup teknologi transmisi.

IEEE 802.11a – Gambaran tentang pengiriman data lebih cepat

dibandingkan (tetapi kurang sesuai dengan) IEEE 802.11b, dan menggunakan 5 GHZ frekuensi band UNII.

IEEE 802.11g – Syarat yang paling terbaru berdasar pada 802.11 standard yang menguraikan transfer data sama dengan cepatnya seperti IEEE 802.11a, dan sesuai dengan 802.11b yang memungkinkan untuk lebih murah.

II.4.1 Protokol

Protokol adalah sebuah standar yang mengatur atau mengijinkan terjadinya hubungan komunikasi, dan perpindahan data antara dua atau lebih pernakat. Protokol dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi dari keduanya. Pada tingkatan yang terendah, protokol mendefinisikan koneksi perangkat keras.

Hal – Hal yang perlu diperhatikan mengenai protokol adalah :

1. Melakukan deteksi ada atau tidak adanya koneksi fisik antar perangkat keras.
2. Melakukan metode jabat tangan (*Handshaking*).
3. Negosiasi berbagai macam karakteristik hubungan.
4. Bagaimana mengawali dan mengahiri suatu pesan.
5. Bagaimana format pesan yang digunakan.
6. Yang harus dilakukan saat terjadi kerusakan pesan atau pesan tidak sempurna.

7. Mendeteksi rugi – rugi pada hubungan jaringan dan langkah – langkah yang dilakukan selanjutnya.
8. Mengakhiri suatu koneksi

Dalam membuat protokol ada tiga hal yang harus dipertimbangkan yaitu efektifitas, kehandalan, dan fleksibilitas.

II.4.2 Modul X-BeePro

Pada masa sekarang ini telah banyak dikembangkan modul *wireless RF*. Salah satu modul *wireless RF* yang sering dipakai adalah *X-Bee Pro* yang dibuat oleh *Maxstream*. *X-Bee pro* dirancang agar dapat memenuhi teknologi *Zigbee/IEEE 802.15.4*.

Zigbee/IEEE 802.15.4 merupakan teknologi yang memfokuskan transfer data (*data rate*) rendah, konsumsi daya rendah, biaya murah dan target protokol untuk jaringan *wireless* aplikasi otomasi dan kendali *remote*. Modul *X-Bee pro* yang digunakan memiliki spesifikasi XBP-24/1083 yang beroperasi pada daerah 2,4 GHz. Fitur yang dimiliki oleh modul ini adalah :

1. Jarak komunikasi *indoor* sampai 300 m dan *outdoor* hingga 1500 m LOS (*Line Of Sight*)
2. Sensitivitas penerimaan -100 dBm.
3. RF data rate 250.000 bps.
4. Setiap *channel* menyediakan alamat jaringan lebih dari 65.000 alamat.
5. Mendukung topologi *peer to peer*, *point to multiple point* dan

point to point.

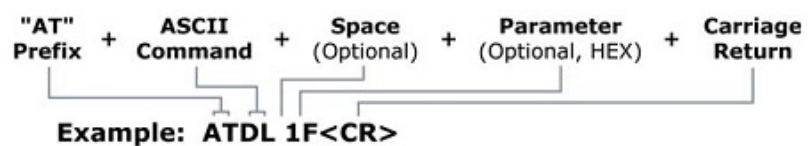
6. Bentuk paket modul relatif kecil.
7. Kompatible dengan perangkat lain yang mendukung teknologi Zigbee/IEEE 802.15.4.

Xbee *pro* menyediakan beberapa mode pengalaman untuk proses komunikasi. Salah satu mode pengalaman yang disediakan adalah *short 16 bit addressing*. Mode pengalaman ini memiliki beberapa parameter yaitu :

1. MY, merupakan alamat diri dari setiap modul.
2. DL, merupakan alamat tujuan komunikasi.
3. CH, merupakan channel dimana komunikasi RF terjalin
4. ID, merupakan alamat PAN (Personal Area Networking) ID dari tiap modul RF.

Pengaturan parameter pada modul wireless RF dilakukan dengan menggunakan AT Command. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan AT Command adalah :

1. Untuk membuka AT Command mode kirim 3 character plus ("+++") dalam waktu kurang dari 1 detik.
2. Untuk mengirim AT Command gunakan aturan sebagai berikut (gambar 2.16).

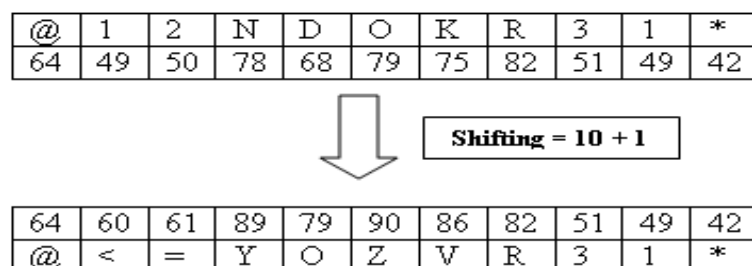


Gambar 2.16 Aturan penulisan AT Command

3. Untuk pembacaan parameter biarkan parameter kosong
4. Jika AT Command sukses dikirimkan dan dieksekusi maka akan ada respon OK (untuk pengaturan) atau nilai parameter (untuk pembacaan)
5. Untuk menyimpan parameter konfigurasi kirim ATWR
6. Untuk menutup AT Command mode kirim ATCN.

II.4.3 Enkripsi / Deskripsi Data

Enkripsi / deskripsi data dimaksudkan untuk menjaga keamanan data selama proses transmisi data. Metode yang dipakai pada enkripsi / deskripsi data adalah metode Caesar. Prinsip utama dari metode Caesar adalah adanya suatu pergeseran dari elemen data yang akan dienkripsi / dideskripsi. Pada sistem enkripsi yang dibuat nilai pergeseran ditentukan oleh suatu konstanta ditambah nilai BCD dari elemen FCS yang kedua. Elemen dari protokol yang dienkripsi / dideskripsi adalah setelah delimiter ”@” sampai data yang dikirimkan, untuk code data, FCS dan terminator tidak dienkripsi. Secara umum proses enkripsi dapat diilustrasikan sebagai berikut (gambar 2.17).



Gambar 2.17 Ilustrasi metode Caesar Chipper

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa ketika sebuah frame protokol dikirimkan, FCS ditempatkan setelah kode data untuk mengecek apakah ada data yang hilang atau tidak sesuai. Secara umum FCS merupakan hasil dari XOR kode ASCII karakter – karakter sebelumnya yang diimplementasikan ke dalam 2 byte BCD dari nilai XOR dari kode ASCII karakter tersebut. Jadi secara umum FCS juga digunakan untuk pengecekan data yang diterima selain adanya pengecekan delimiter ”@” dan terminator ”*” sebelumnya.

Secara umum ilustrasi dari perhitungan FCS adalah sebagai berikut.

@	1	2	N	D	O	K	R	3	1	*
FCS Range Calculation									FCS	T

Selanjutnya setiap karakter pada frame dikonversi menjadi kode ASCII dan di-XOR-kan dengan kode ASCII karakter sesudahnya sehingga diperoleh suatu nilai ASCII terakhir dan FCS merupakan 2 byte nilai BCD dari kode ASCII tersebut.

II.5 Mikrokontroller

Mikrokontroler merupakan komponen utama yang berfungsi untuk mengolah informasi yang diperoleh oleh, kemudian diproses untuk mengambil kesimpulan respon apa yang akan dilakukan oleh sistem. Mikrokontroler memiliki sifat yang dapat diprogram oleh pemakai sehingga sangat fleksibel jika dimanfaatkan sebagai piranti kontrol.

Sebuah mikrokontroler memiliki minimal tiga blok penting yakni :

1. CPU (*Cental Processing Unit*)

Yakni unit dimana terjadinya operasi aritmatika ataupun logika serta register-register geser. Semua perhitungan sistem kontrol dan operasi input/output terjadi di bagian ini.

2. *Memori*

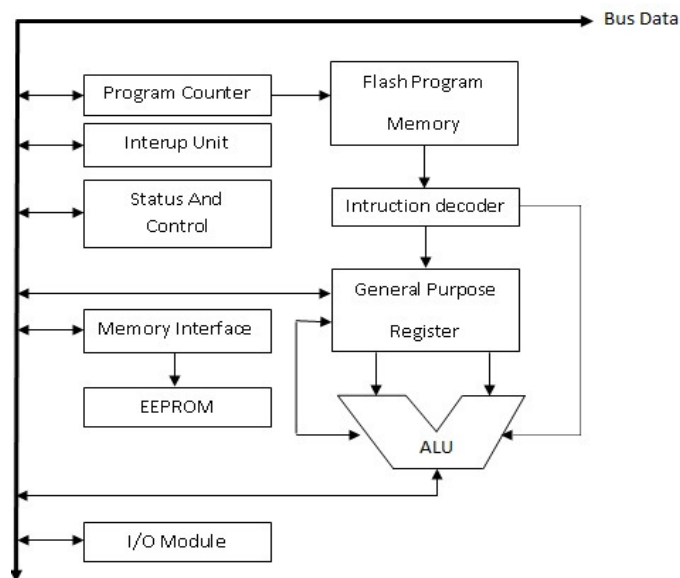
Merupakan unit penyimpanan data. Instruksi-instruksi yang paling dasar di set pada *high level* program, yang terinstal dalam *Read Only Memory (ROM)*. Sedangkan program-program *logic* disimpan pada *Electrically Eraseble Permanent Read Only Memory (EEPROM)*. Selama program tersimpan dalam EEPROM, maka program logika tersebut masih dapat dilakukan perubahan sesuai dengan kebutuhan.

3. I/O Unit (Unit *Input / Output*)

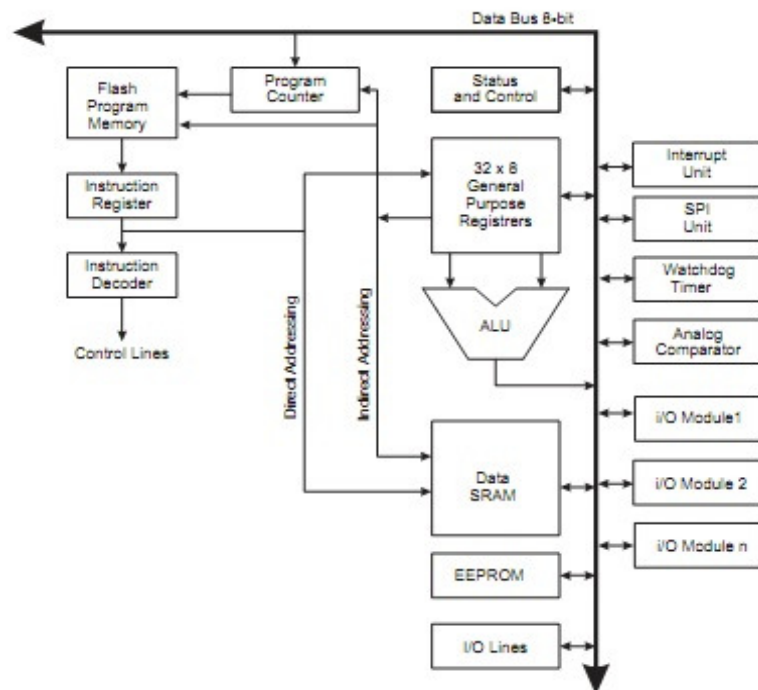
Merupakan bagian yang bertugas melakukan komunikasi dengan dunia luar. Unit input bertugas dalam memproses masukan dari dunia luar untuk diproses lebih lanjut oleh CPU. Sedangkan unit output merupakan bagian yang bertugas sebagai perantara CPU melakukan operasi terhadap piranti luar yang merupakan unit aktuator dari sebuah sistem ataupun unit HMI (*Human and Machine Interfaces*) seperti LCD *display*.

Gambar 2.18 merupakan blok diagram dari arsitektur mikrokontroler sederhana. Akan tetapi secara garis besar, blok diagram tersebut dapat mewakili sebagian besar jenis mikrokontroler karena pengembangan mikrokontroler

didasarkan dari blok diagram tersebut. Sebagai contoh ATmega8 (ditunjukan oleh gambar 2.19) yang merupakan mikrokontroler jenis AVR buatan dari ATMEL Corp Inc.



Gambar 2.18 Blok diagram arsitektur dasar mikrokontroler



Gambar 2.19 Arsitektur mikrokontroler ATmega8

BAB III

METODE PENELITIAN

III.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini akan dilaksanakan selama 5 bulan yang akan dilaksanakan mulai dari bulan Februari 2012 sampai dengan Mei 2012. Sedangkan penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto.

III.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Seperangkat komputer dengan sistem operasi Windows 7, RAM 1Gb
2. *Arduino Board* dan *Software Arduino IDE 0022*.
3. Paket *mote (Xbee Pro Series 1)*.
4. Unit RTC (IC DS1307, *Crystal 32.768KHz*, Baterai 3V).
5. Model fisik pergerakan tanah.

III.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Studi Pustaka

Pada metode ini dilakukan dengan cara mencari dan membaca buku-buku referensi ataupun juga dari sumber-sumber internet yang menunjang untuk penelitian ini.

2. Identifikasi Permasalahan

Tahap ini mencakup identifikasi permasalahan di lapangan sehingga dapat menentukan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Pada tahap ini, dilakukan juga pencatatan daftar kebutuhan sebagai persiapan dari perancangan.

3. Perancangan Sistem

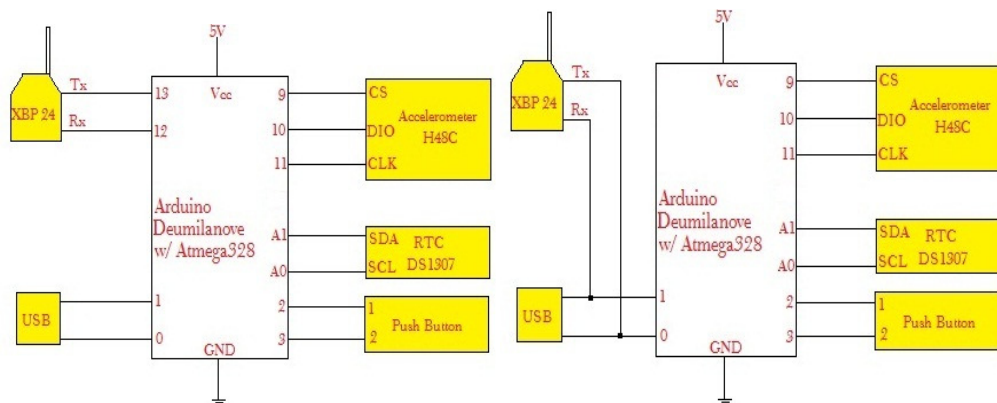
Tahap perancangan ini mengacu terhadap tahap sebelumnya yakni identifikasi permasalahan sehingga tahap ini merupakan tahap merancang suatu alat yang sesuai dengan kebutuhan.

Dalam tahap ini dilakukan proses – proses berikut :

a. Desain peralatan

Mencakup desain sensor dan pengkondisian sinyal, kontroler, unit komunikasi serta unit catu daya.

Secara umum, unit elektronis ditunjukkan oleh diagram blok pada gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1. Diagram Blok unit elektronik(kiri:gateway,
kanan:router)

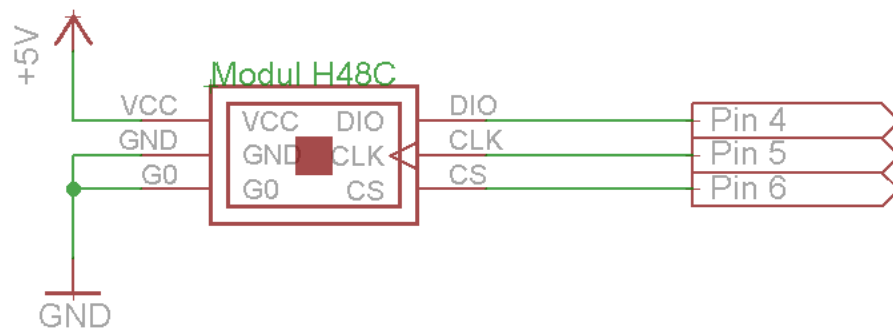
Terdapat perbedaan konfigurasi antara *gateway* dan *router* dikarenakan kebutuhan jalur komunikasi yang berbeda.

1. Desain sensor dan Pengkondisian sinyal

Sensor yang digunakan berupa *accelerometer* H48C untuk mendeteksi pergerakan tanah.

Dalam perancangan rangkaian , sensor *accelerometer* H48C telah terintegrasi dengan IC MCP324 sehingga keluaran modul berupa data serial sehingga tidak diperlukan lagi rangkaian pengkondisian sinyal yang lain.

Skematik pengkondisian sinyal modul *accelerometer* H48C sesuai gambar 3.2 berikut:



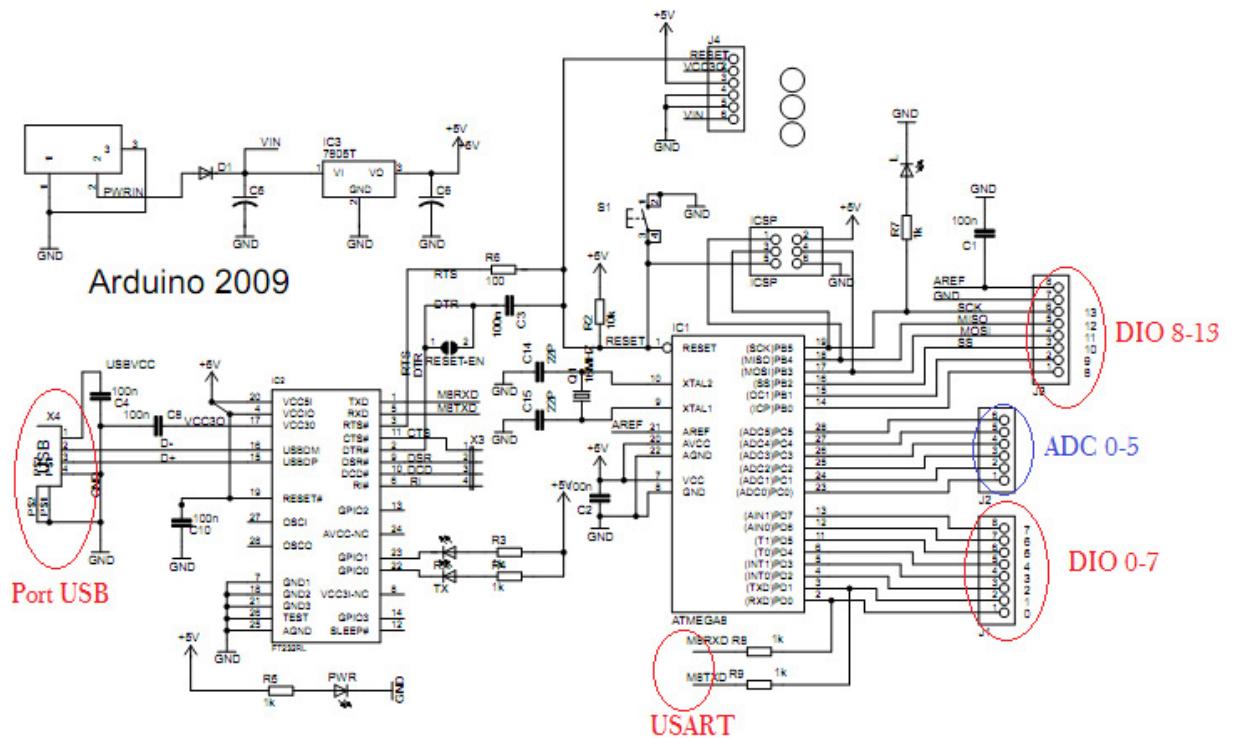
Gambar 3.2. Pengondisian Sinyal pada accelerometer H48C

2. Kontroler

Kontroler yang digunakan merupakan kit mikrokontroler *Arduino board* tipe *Deumilanove* dengan mikrokontroler Atmega328.

Pemilihan penggunaan *Arduino Board* dikarenakan kemudahan dalam penggunaan terutama fasilitas *plug and play* pada komunikasi serial dengan komputer.

Gambar 3.3 menunjukkan skematik *arduino board* tipe *Deumilanove*. Dapat dilihat bahwa *Arduino board* memiliki 13 jalur input/output digital, 5 jalur input analog dan port USB untuk komunikasi serial dengan komputer via USB. Untuk komunikasi dengan perangkat lain dapat menggunakan jalur Tx dan Rx komunikasi USART.



Gambar 3.3. Skematik Arduino Deumilanove

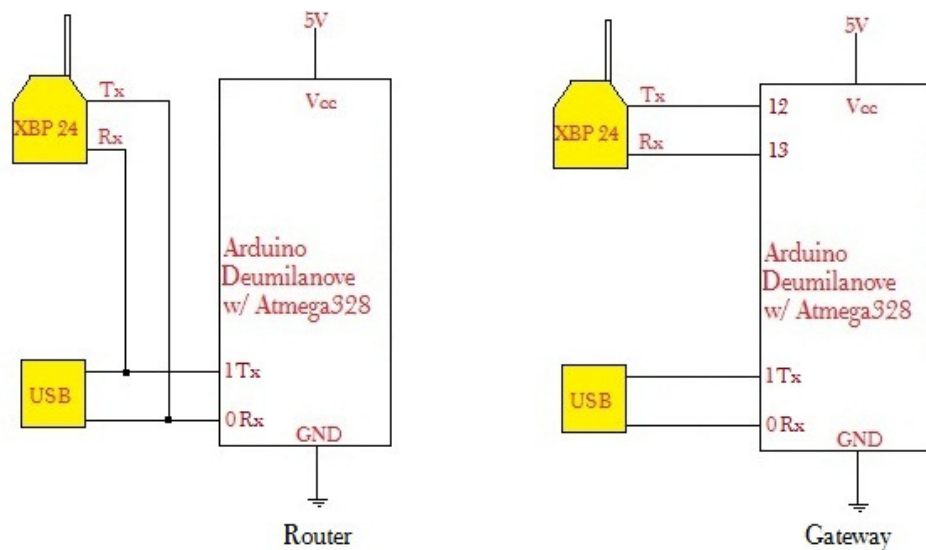
3. Unit Komunikasi

Unit komunikasi antar *node* menggunakan modul *wireless* Xbee Pro 24 Series 1. Pada perancangan, topologi yang digunakan adalah topologi *star* dengan konfigurasi 2 buah *node* sebagai *router* dan 1 buah *node* sebagai *gateway* / *base station*. Jalur komunikasi *gateway* dengan komputer server menggunakan USB, sehingga terdapat perbedaan konfigurasi pin pada mikrokontroler antara *router* dan *gateway*.

Pada *router*, pin Tx dari modul Xbee dihubungkan dengan pin Rx dari *arduino board* dan pin Rx dari modul Xbee dihubungkan dengan pin Tx dari *arduino board*. Sedangkan

pada *gateway*, pin Tx modul Xbee dihubungkan dengan pin 12 dari *arduino board* dan pin Rx modul Xbee dihubungkan dengan pin 13 dari *arduino board*. Hal ini dikarenakan pin Tx dan Rx pada *arduino board* yang dikonfigurasi sebagai *gateway* digunakan untuk komunikasi dengan komputer server via USB.

Gambar 3.4 menunjukkan konfigurasi pin modul Xbee dengan *arduino board*.



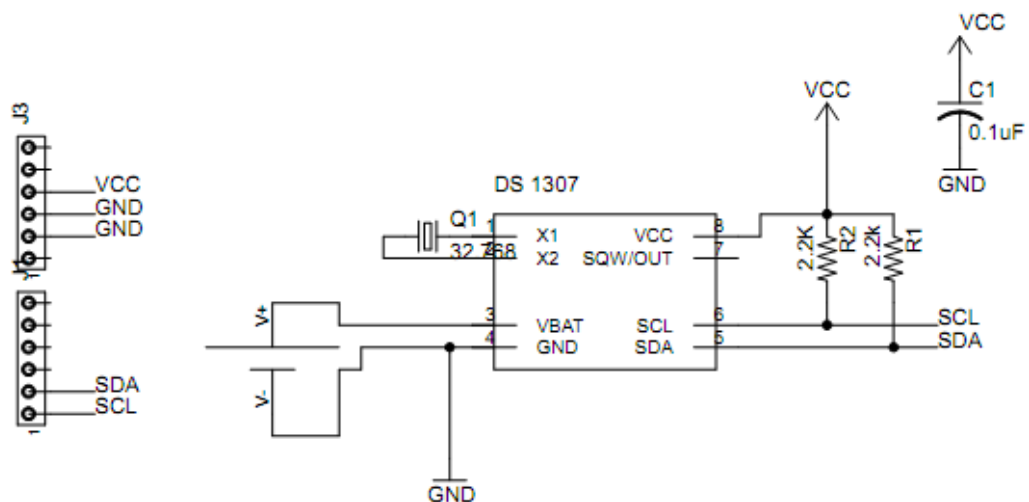
Gambar 3.4. Konfigurasi Pin pada modul Xbee dengan
Arduino board

4. Unit RTC (Real Time Condition)

Unit RTC digunakan sebagai unit *sinkronisasi* waktu dari tiap - tiap node. Unit RTC terhubung dengan *arduino board* pada pin SCL/A0 dan Pin SDA/A1 karena menggunakan konfigurasi 2 *wire*.

Piranti yang digunakan adalah IC DS1307. Tegangan kerja unit RTC diberikan oleh *arduino board* dan menggunakan baterai *lithium 3V* sebagai *back up voltage* jika terjadi kegagalan tegangan suplai dari *arduino board*.

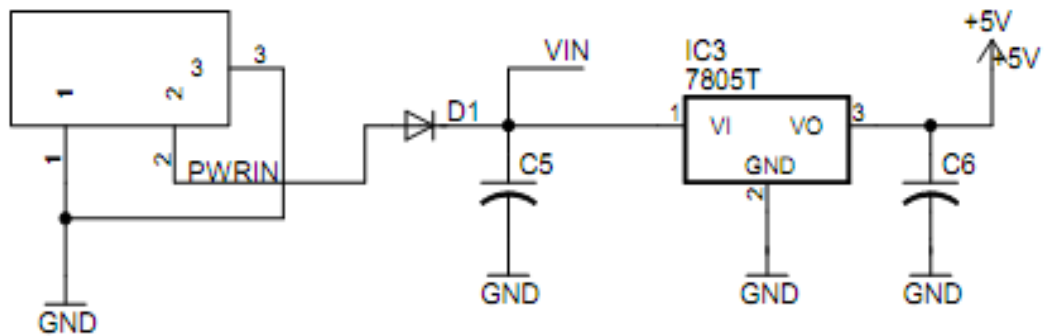
Skematik unit RTC ditunjukkan oleh gambar 3.5.



Gambar 3.5. Skematik rangkaian RTC menggunakan DS1307

5. Unit Catu Daya

Setiap node disuplai oleh baterai karena setiap *node* diletakan diberbagai tempat dengan jarak yang relatif jauh sehingga penggunaan baterai pada tiap *node* akan lebih efektif. Penyesuaian level tegangan baterai dengan tegangan kerja *node* menggunakan rangkaian regulator dengan memanfaatkan IC regulator 7805. Skematik rangkaian regulator 7805 adalah sebagai berikut (gambar 3.6) :

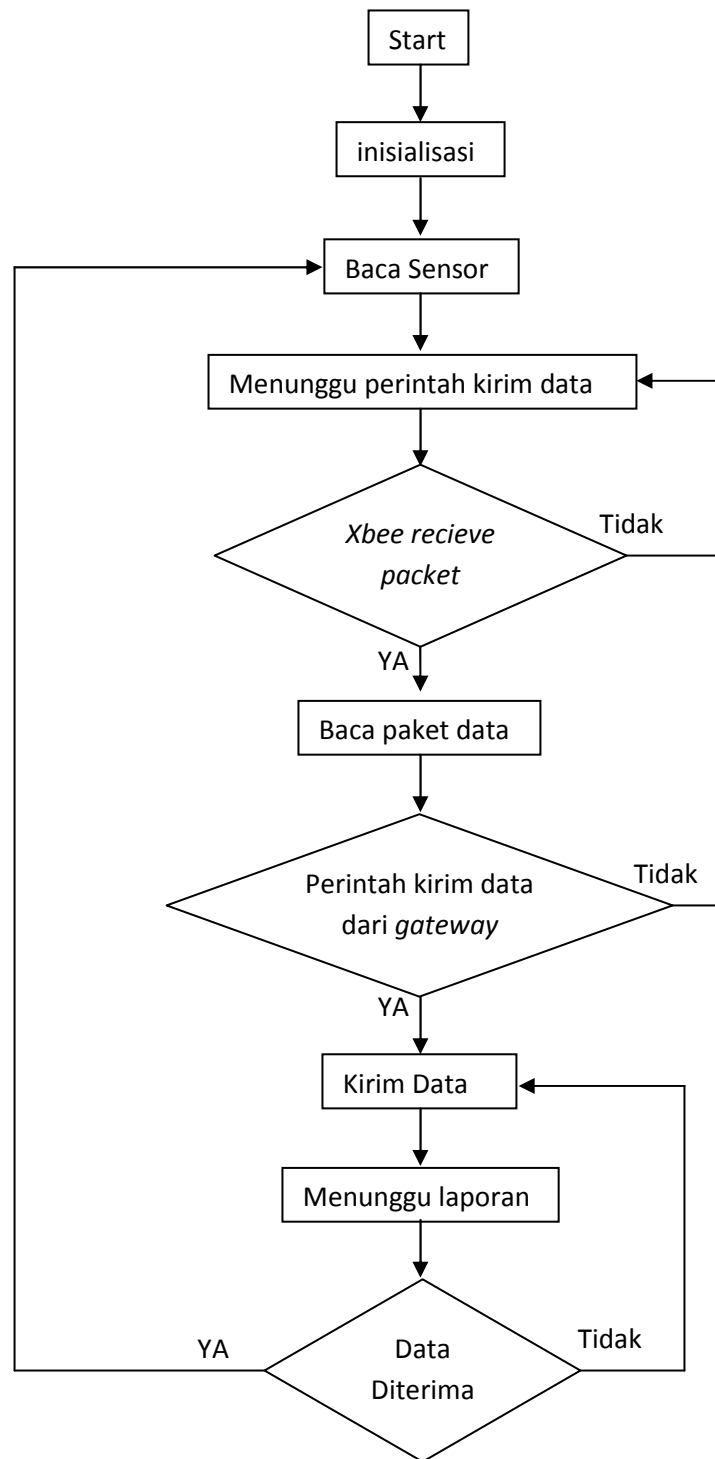


Gambar 3.6. Skematik regulator tegangan menggunakan
IC 7805

b. Perancangan perangkat lunak (*software*)

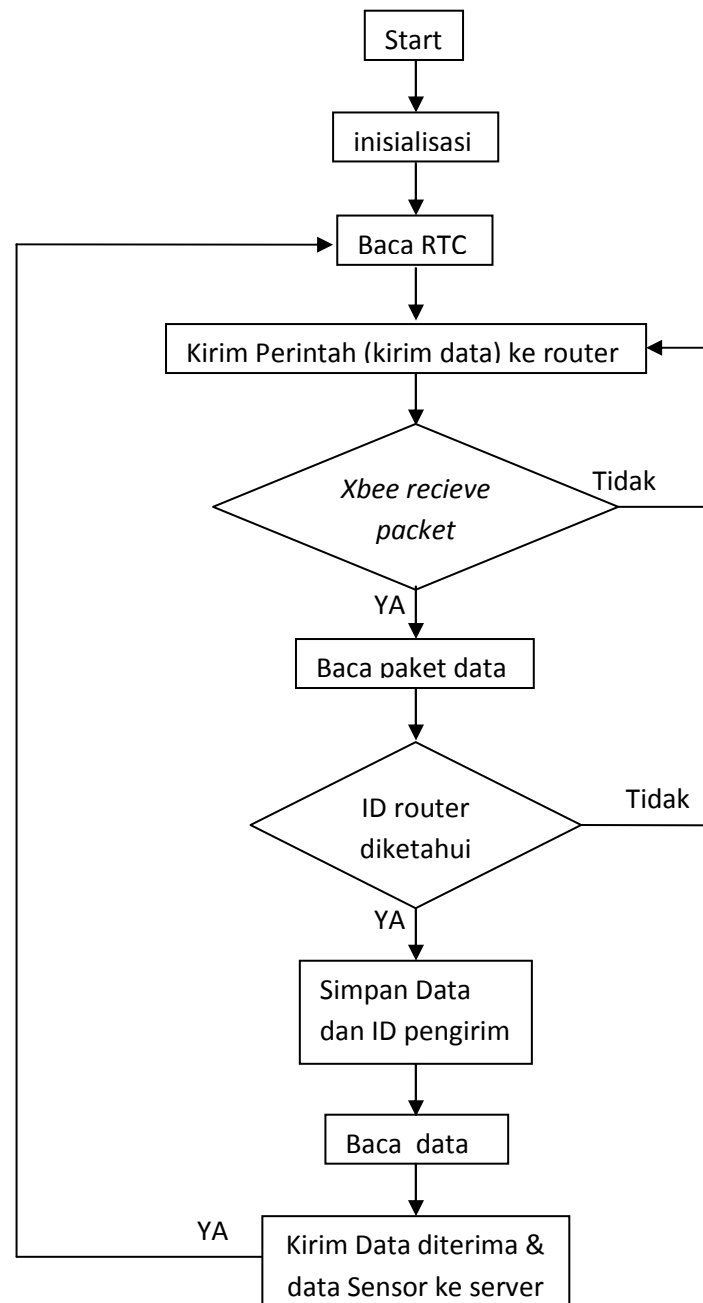
Perangkat lunak terdiri dari program untuk *node* dan program untuk server. Program untuk *node* sendiri terdiri dari 2 jenis yaitu program untuk *router* dan program untuk *gateway*.

Flowchart program pada router sesuai gambar 3.7 berikut:



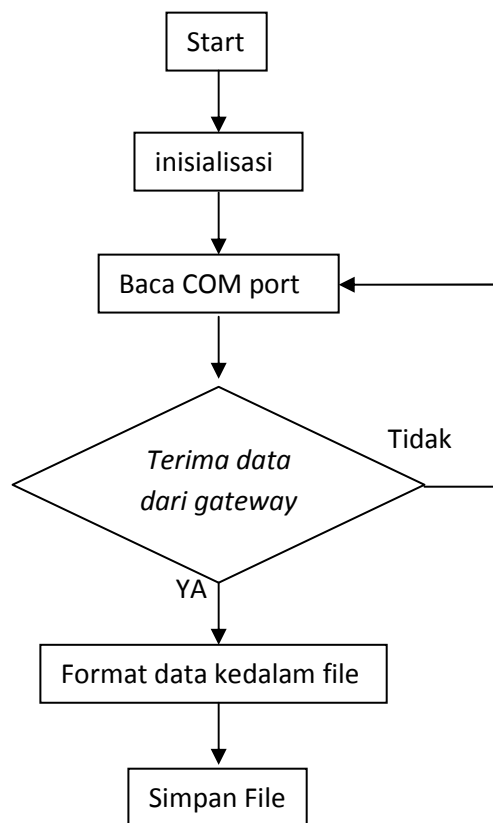
Gambar 3.7. Flowchart program pada router

Flowchart untuk program pada gateway adalah sebagai berikut (gambar 3.8).



Gambar 3.8. Flowchart program gateway

Sedangkan *flowchart* program pada server merupakan program *data logger* yang berfungsi untuk mengumpulkan informasi yang dikirimkan oleh *gateway* yang kemudian disimpan ke memori dengan format data *comma separated vector*(.csv) untuk mempermudah proses pengolahan data selanjutnya. *Flowchart* program pada server ditunjukkan oleh gambar 3.9.



Gambar 3.9. Flowchart program pada komputer server

4. Pembuatan Alat

Berpedoman dari hasil perancangan pada tahap sebelumnya, maka tahap ini mencakup beberapa proses yakni :

a. Pembuatan sistem elektronis dan mekanis

Mencakup pembuatan sistem minimum mikrokontroler, pembuatan sensor – sensor, pembuatan unit pengkondisian sinyal, unit komunikasi (*wireless*) serta unit catu daya.

b. Pembuatan perangkat lunak (*software*)

Merupakan pengaplikasian dari diagram alir program yang dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman.

c. Pembuatan perangkat keras (*hardware*)

Merupakan pembuatan perangkat keras dengan berpedoman dari desain perangkat keras yang didapat dari proses sebelumnya.

5. Pengujian Sistem

Proses pengujian sistem dilakukan di laboratorium. Pengujian ini dilakukan untuk dapat memantau kinerja sistem, kesesuaian kinerja sistem dengan apa yang diharapkan (hasil identifikasi permasalahan), serta kehandalan sistem.

Proses yang dilakukan dalam pengujian sistem diantaranya:

a. Kalibrasi *accelerometer* H48C dalam melakukan pengukuran percepatan pergerakan tanah.

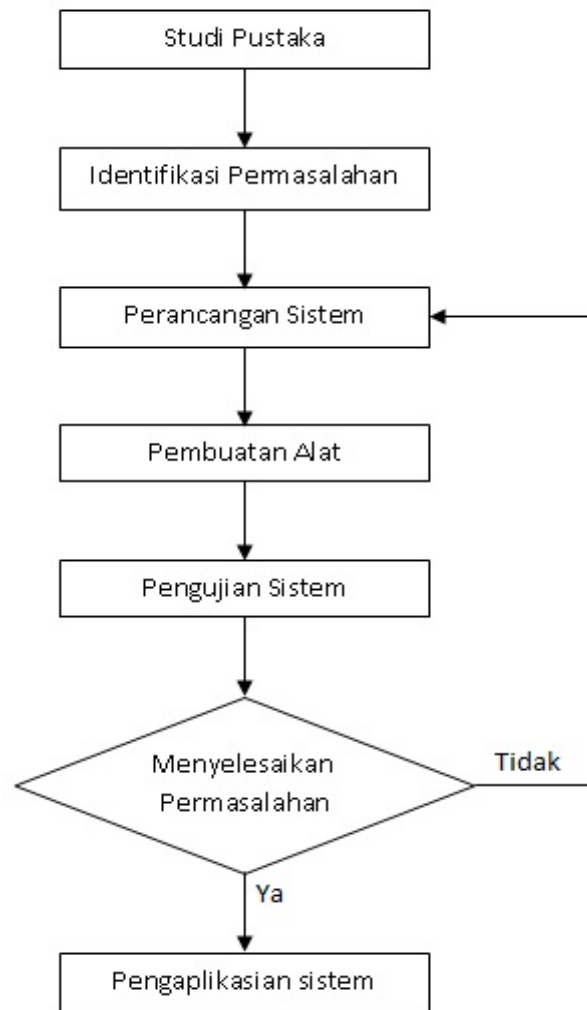
- b. Menentukan frekuensi optimal pembacaan data percepatan menggunakan *accelerometer* H48C dan pengiriman data menggunakan Xbee Pro Series 1.
- c. Membandingkan kuat sinyal komunikasi dalam berbagai medan.
- d. Menghitung konsumsi daya tiap *mote*.

Jika pada tahap pengujian ini ditemui hal – hal yang tidak sesuai dengan apa yang diharapkan maka dapat dilakukan pengkajian ulang terhadap proses perancangan sistem.

6. Pengaplikasian Sistem

Proses ini dilakukan jika pengujian sistem telah berhasil sehingga dianggap sistem yang dibuat telah siap diaplikasikan dilapangan.

Secara keseluruhan metode penelitian yang digunakan dapat dilihat dari *flowchart* (diagram alir) gambar 3.10 berikut :



Gambar 3.10. Diagram alir metode penelitian

III.4 Jadwal Penelitian

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan															
		Febuari 2012				Maret 2012				April 2012				Mei 2012			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Studi pustaka																
2	Pembuatan proposal																
3	Perancangan sistem																
4	Persiapan alat dan bahan																
5	Pembuatan sistem																
6	Pengujian sistem																
7	Pengaplikasian sistem																
8	Pembuatan laporan																

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Modul RTC (Real Time Clock)

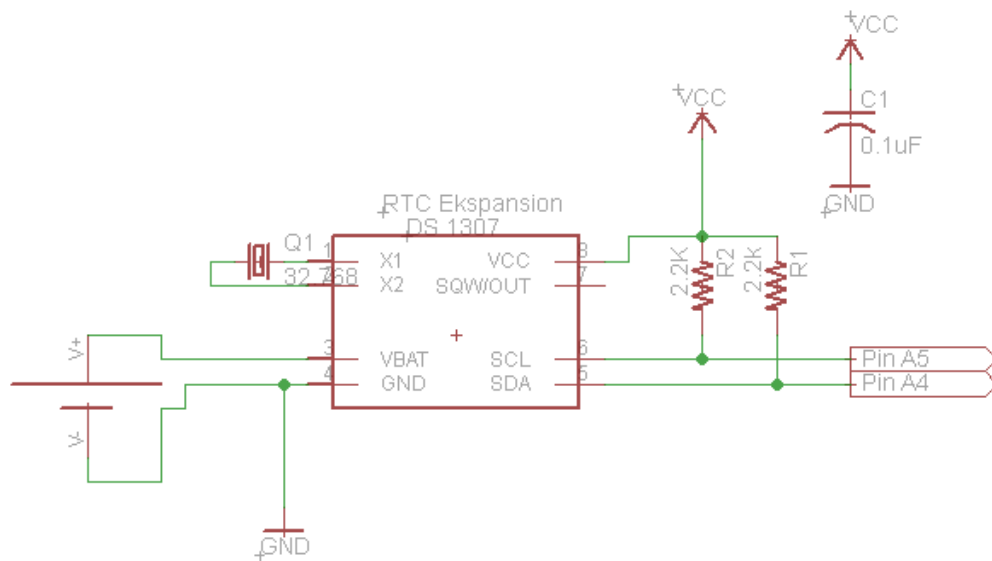
Modul RTC digunakan untuk mengirimkan data waktu pembacaan sensor. Hal ini diperlukan untuk mengetahui waktu pembacaan data sensor, dan koreksi terhadap adanya paket data yang hilang.

IV.1.1 Skematik Rangkaian RTC

DS1307 merupakan IC RTC yang menggunakan protokol I²C (*Inter IC Bus*) yang sesuai dengan protokol TWI (*2 wire serial interfaces*) pada mikrokontroler AVR. Dalam komunikasi menggunakan protokol I²C hanya diperlukan 2 jalur data yakni SCL (*Serial Clock*) dan SDA (*Serial Data*).

Arduino board yang digunakan adalah deumilanove dengan mikrokontrolernya adalah Atmega328 yang mana pin SCL terletak pada kaki no 28 pada Atmega328 dan dalam *arduino board* disebut sebagai pin A5, sedangkan pin SDA terletak pada kaki no 27 pada Atmega328 dan dalam *arduino board* disebut sebagai pin A4.

Skematik rangkaian percobaan untuk modul RTC ditunjukkan oleh gambar 4.1.



Gambar 4.1 Skematik rangkaian modul RTC dengan IC DS1307

IV.1.2 Algoritma Penggunaan RTC (*Real Time Clock*) dengan IC DS1307

Pada penggunaan IC DS1307 dilakukan 2 proses yakni menulis data ke IC DS1307 (dalam hal ini adalah seting waktu) dan yang kedua adalah membaca data waktu dari IC DS1307. Prosedur kedua proses ini mengacu pada protokol I²C agar komunikasi berjalan sebagai mana mestinya.

Sesuai dengan protokol I2C, prosedur penulisan data dilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut.

1. *Master* mengirim *start sequence*
2. *Master* mengirim alamat *slave* yang akan ditulis data dengan bit R/W low (alamat genap)
3. *Master* mengirim alamat dari internal register yang ingin ditulis

4. *Master* mengirim byte data
5. Jika data belum tertulis semua, setelah *slave* mengirim ACK=0 maka byte data berikutnya dikirim
6. *Master* mengirim *stop sequence*.

Sedangkan prosedur pembacaan data dilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut.

1. *Master* mengirim *start sequence*
2. *Master* mengirim alamat *slave* yang akan ditulis data dengan bit R/W low (alamat genap)
3. *Master* mengirim alamat dari internal register yang ingin dibaca
4. *Master* mengirim *start sequence*
5. *Master* mengirim alamat *slave* yang akan ditulis data dengan bit R/W high (alamat ganjil)
6. *Master* membaca byte data dari *slave*
7. *Master* mengirim *stop sequence*.

Dengan konfigurasi *Arduino board* sebagai *master* dan modul RTC sebagai *slave* maka prosedur penulisan data dan pembacaan data sesuai protokol I2C diatas dapat disusun dengan notasi algoritmik berikut.

```
*****
{-procedure menulis data ke DS 1307 untuk set waktu-}
```

Procedure setDS1307 (input=

second,minute,hour,dayOfWeek,dayOfMonth,Year)

Set second as BCD *{--ubah ke BCD format--}*

Set minute as BCD

Set hour as BCD

Set dayOfWeek as BCD

Set dayOfMonth as BCD

Set Year as BCD

Set I2C address 0x68 *{--alamat DS1307--}*

Send (0) *{--Start Sequence--}*

Send (0x68) *{-kirim alamat slave-}*

Write (0x00=second) *{--tulis second @00h--}*

Write (0x01=minute) *{--tulis minute @01h--}*

Write (0x02=hour) *{--tulis hour @ 02h--}*

Write (0x03=dayOfWeek) *{tulis dayOfWeek
@03h}*

Write (0x04=dayOfMonth)*{--tulis dayOfMonth @
04h--}*

Write (0x05=Year) *{--tulis Year @ 05h--}*

Send (0) *{--Stop sequence--}*

{--end procedure--}

{--procedure membaca data dari DS 1307 --}

Procedure getDS1307(output=

second,minute,hour,dayOfWeek,dayOfMonth,Year)

```
Send (0)          {--Start Sequence--}
Send (0x68)        {-- kirim alamat slave--}
Send (0)          {--Start Sequence--}
Send (0x68 + 0x01) {--Read data--}
Second=read(0x00)   {--baca alamat 00h--}
Minute=read(0x01)   {--baca alamat 01h--}
Hour=read(0x02)     {--baca alamat 02h--}
dayOfWeek=read(0x03) {--baca alamat 03h--}
dayOfMonth=read(0x04) {--baca alamat 04h--}
year=read(0x05)     {--baca alamat 05h--}
Second=set second as Dec {-----convert
BCD ke Desimal-----}
Minute=set minute as Dec
Hour=set hour as Dec
dayOfWeek=set dayOfWeek as Dec
dayOfMonth=set dayOfMonth as Dec
year=set year as Dec
send(0)           {--stop sequence--}
{--end procedure--}
```

Didalam software arduino IDE versi 0022 telah tersedia *library* “wire.h” yang berfungsi mempermudah pengguna yang akan melakukan komunikasi *master – slave* menggunakan sistem I²C. *Library* ini mengacu pada aturan komunikasi I²C dengan kata kunci untuk memanggil prosedur dan fungsi dari *library* “wire.h” sebagai berikut.

```
Wire.begin();  
Wire.beginTransmission(alamat yang dituju);  
Wire.endTransmission();  
Wire.requestFrom(alamat + bit read);  
Wire.send(data bit dalam BCD);  
Wire.receive();  
Wire.onReceive();  
Wire.onRequest() ;
```

Untuk masing – masing prosedur penulisan dan pembacaan data ditunjukkan oleh source code dibawah dengan terlebih dahulu memanggil *library* “wire.h” dan mendeklarasikan alamat DS1307 pada 0x68 di bagian inisialisasi.

```

#include "Wire.h"

#define DS1307_I2C_ADDRESS 0x68

//*****menulis data set waktu ke DS1307*****//

void    setDateDs1307(byte    second,byte    minute,byte
        hour,byte dayOfWeek,byte dayOfMonth,byte month, byte
        year){

    Wire.beginTransmission(DS1307_I2C_ADDRESS);

    Wire.send(0); // start clock dengan mengisi bit 7 = 0

    Wire.send(decToBcd(second));

    Wire.send(decToBcd(minute));

    Wire.send(decToBcd(hour));

    Wire.send(decToBcd(dayOfWeek));

    Wire.send(decToBcd(dayOfMonth));

    Wire.send(decToBcd(month));

    Wire.send(decToBcd(year));

    Wire.endTransmission(); }

//*****mengambil data dari DS1307*****//

void    getDateDs1307(byte    *second,byte    *minute,byte
        *hour,byte    *dayOfWeek,byte    *dayOfMonth,byte
        *month,byte *year){

    Wire.beginTransmission(DS1307_I2C_ADDRESS);

    Wire.send(0);

    Wire.endTransmission();

```

```
Wire.requestFrom(DS1307_I2C_ADDRESS, 7);

*second = bcdToDec(Wire.receive() & 0x7f);

*minute = bcdToDec(Wire.receive());

*hour = bcdToDec(Wire.receive() & 0x3f);

*dayOfWeek = bcdToDec(Wire.receive());

*dayOfMonth = bcdToDec(Wire.receive());

*month = bcdToDec(Wire.receive());

*year = bcdToDec(Wire.receive());

}
```

Penulisan data ke DS1307 dilakukan dengan memanggil prosedur setDateDS1307(second, minute, hour, dayOfWeek, dayOfMonth, month, year) dan ini dilakukan pada saat pertama menggunakan IC DS1307, setelah itu data tersimpan dan perhitungan waktu akan terus berjalan.

Selama suplai tegangan pada DS1307 aktif dan tidak ada kerusakan pada rangkaian, maka data waktu pada DS1307 dapat diambil kapan saja. Apabila suplai tegangan pada DS1307 hilang, maka perlu dilakukan penulisan ulang waktu dan tanggal karena data yang tersimpan diregister internal DS1307 merupakan data terakhir IC ini bekerja secara normal (mendapat suplai tegangan).

Contoh pemanggilan prosedur untuk menulis data ke DS1307 adalah sebagai berikut.


```
void loop(){  
    second = 30;  
    minute = 7;  
    hour = 3;  
    dayOfWeek = 4;  
    dayOfMonth = 18;  
    month = 8;  
    year = 11;  
    setDateDs1307(second, minute, hour, dayOfWeek,  
dayOfMonth, month, year);  
}
```

Setelah, data tertulis ke DS1307, langkah selanjutnya adalah pengambilan data kalender pada DS1307. Contoh pemanggilan prosedur untuk membaca data pada DS1307 adalah sebagai berikut.

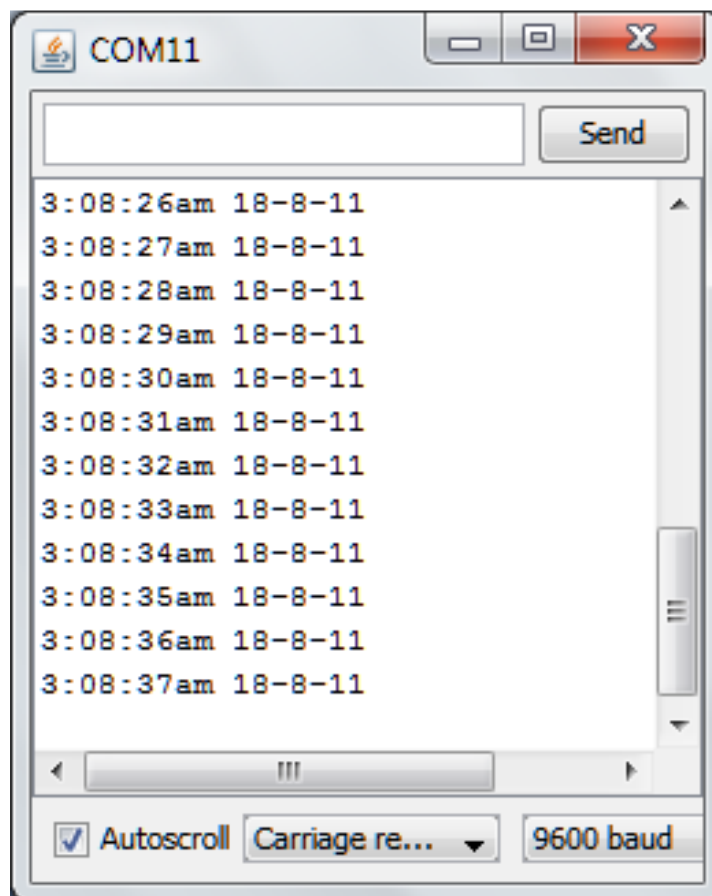
```

void loop() {
byte second, minute, hour, dayOfWeek, dayOfMonth, month, year;
getDateDs1307(&second,    &minute,    &hour,    &dayOfWeek,
              &dayOfMonth, &month, &year);
if(hour>0){
    if(hour<=12){
        Serial.print(hour, DEC);}
    else {
        Serial.print(hour-12, DEC);} }
    else{
        Serial.print("12");}
    Serial.print(":");
    if (minute < 10) {
        Serial.print("0");}
    Serial.print(minute, DEC);
    Serial.print(":");
        if (second < 10) {
            Serial.print("0");}
        Serial.print(second, DEC);
            if(hour<12){
                Serial.print("am");}
            else{
                Serial.print("pm");}
        Serial.print(dayOfMonth,DEC);
        delay(1000); }

```

```
Serial.print("-");  
  
Serial.print(month,DEC);  
  
Serial.print("-");  
  
Serial.print(year,DEC);  
  
Serial.println();  
  
delay(1000);  
  
}
```

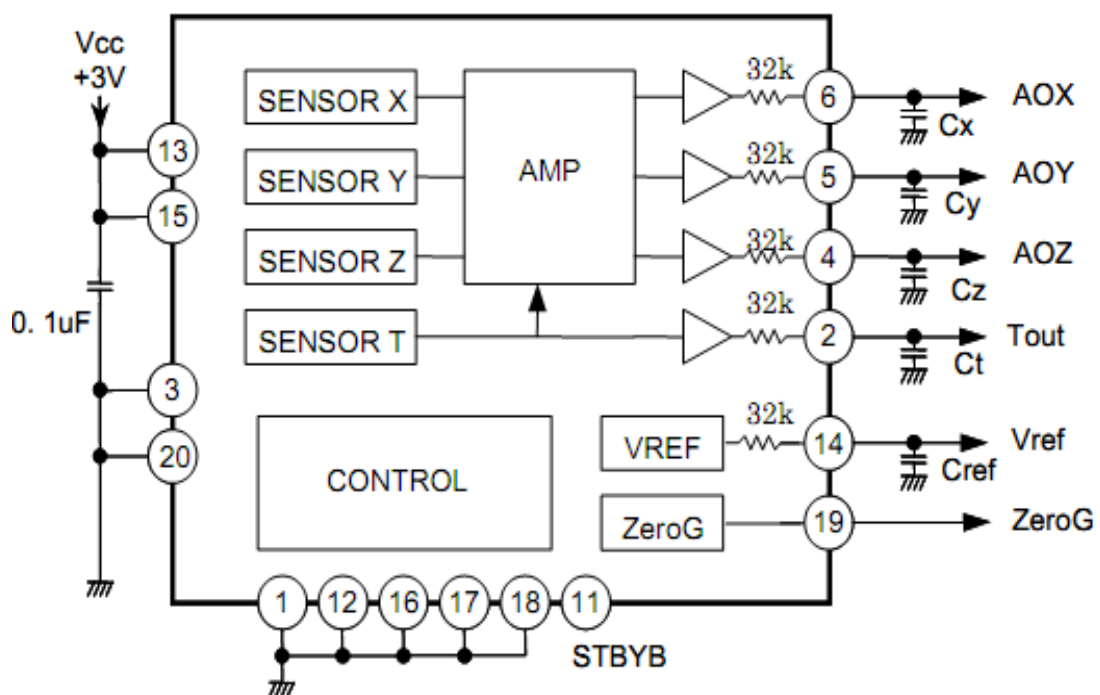
Hasil eksekusi program pembacaan data DS1307 diatas diamati menggunakan serial monitor dengan seting *baud rate* 9600 bps. Hasil pengujian ditunjukkan oleh gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pembacaan data DS1307

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

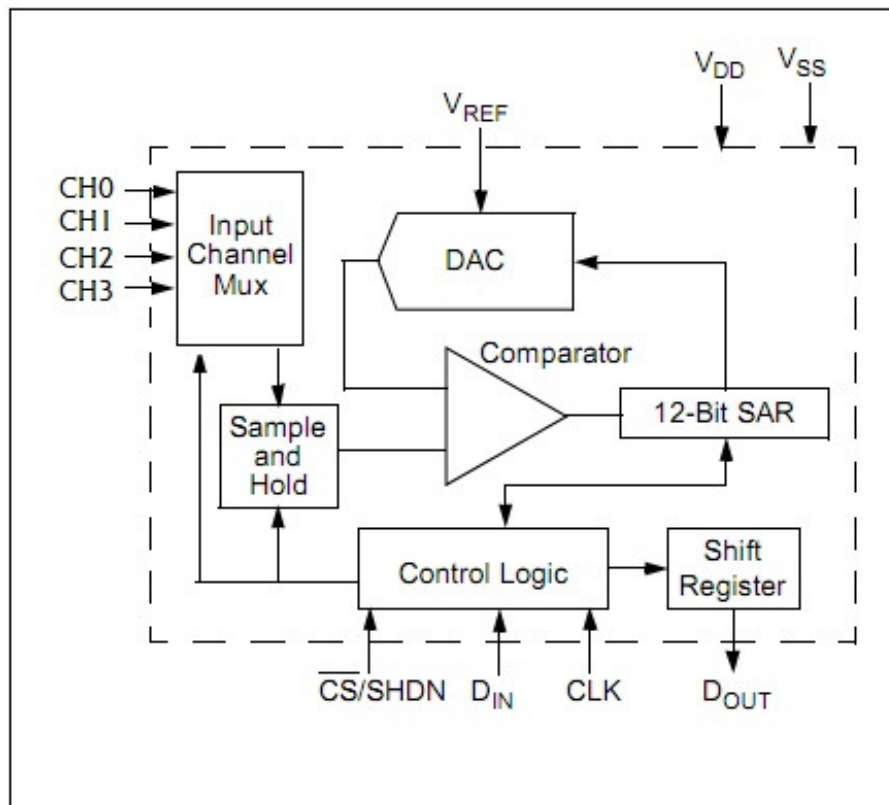
Blok diagram dari H48C ditunjukkan oleh gambar 4.3. Dengan AOX sebagai analog output sumbu x, AOY sebagai analog output sumbu y, AOZ sebagai analog output sumbu y, dan Vref sebagai tegangan referensi. Maka, untuk mengetahui besarnya percepatan yang dinyatakan dalam level tegangan analog untuk tiap sumbu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

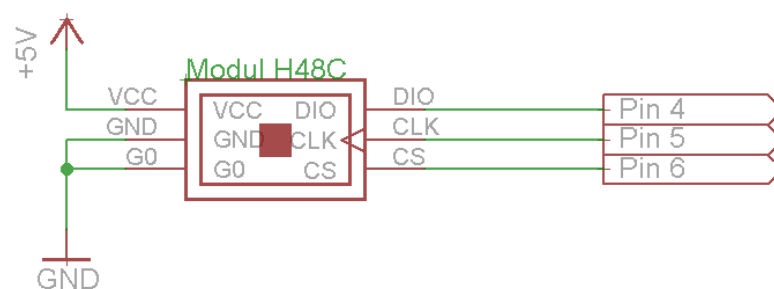


Gambar 4.4 Diagram Blok MCP3204

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 aktivasi modul, terhubung dengan Pin 6 *Arduino board*.

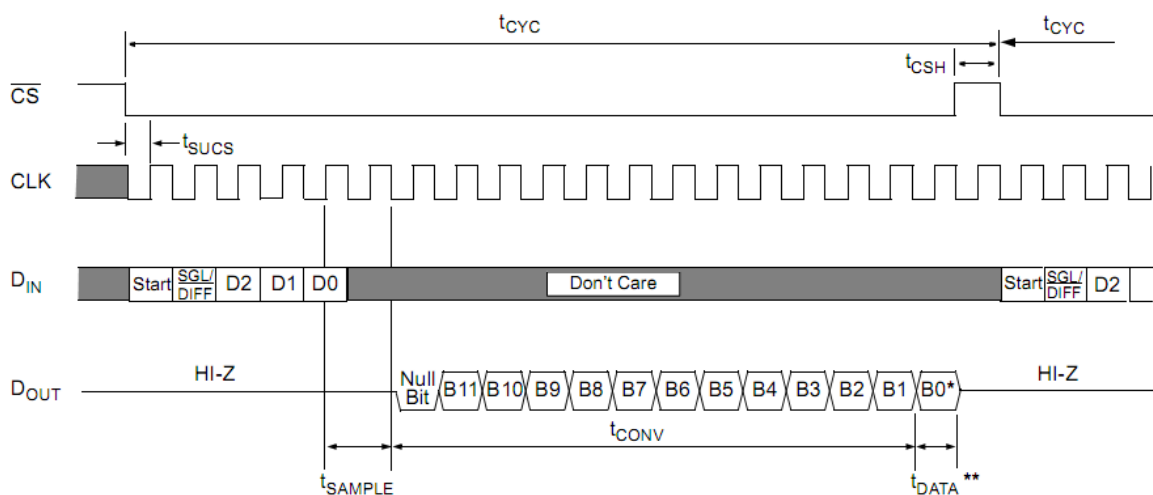
IV.2.2 Algoritma Pembacaan Percepatan Tiap Sumbu

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 μs 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 μs .

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.

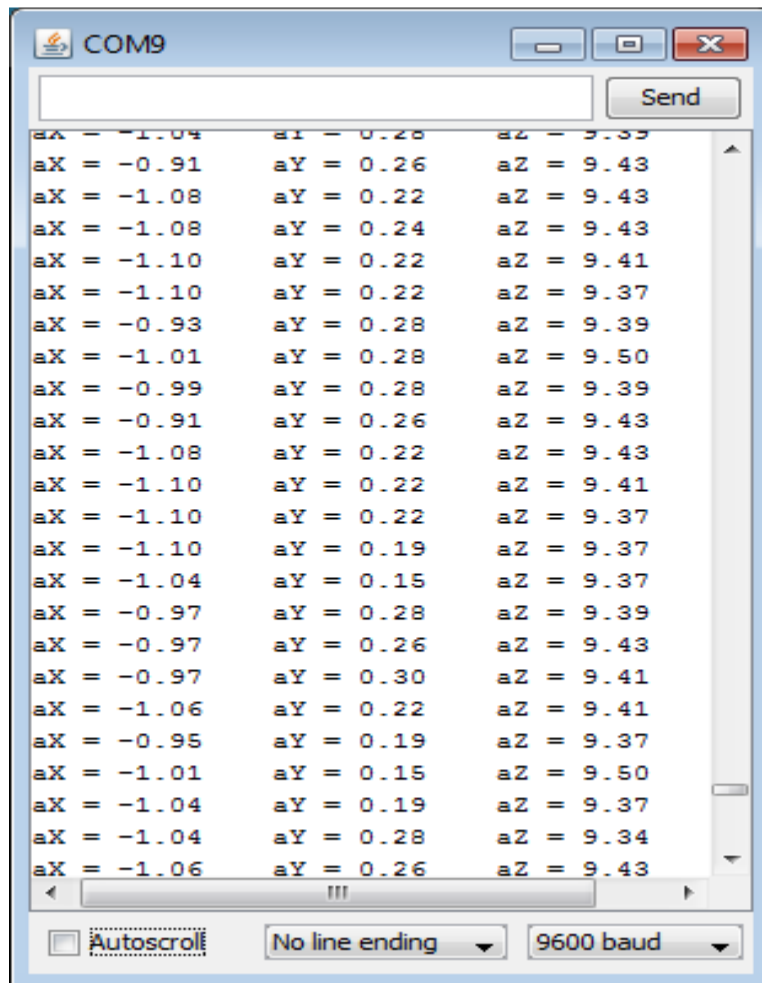
```
float aX, aY, aZ = 0.00;
```

```
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.



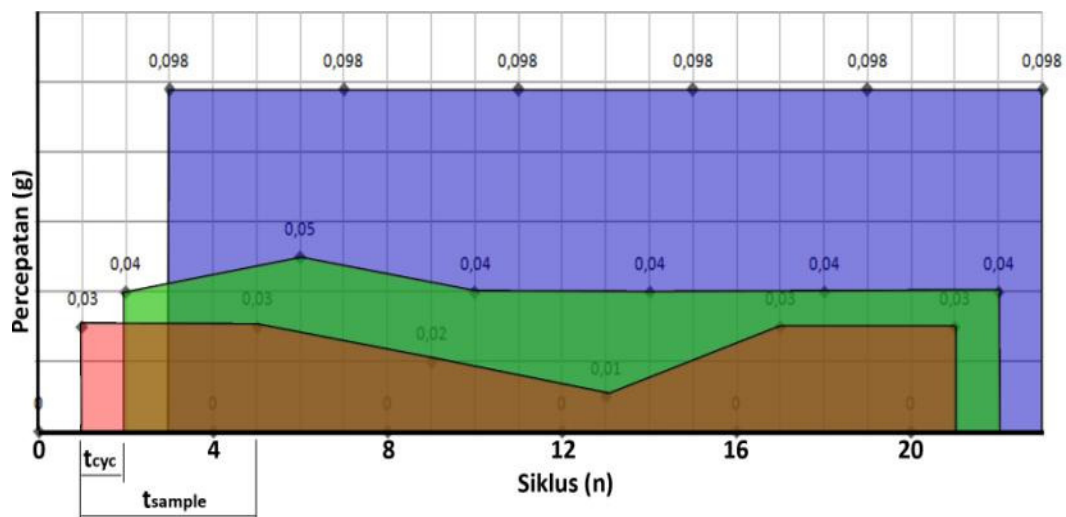
Gambar 4.7 Hasil pembacaan modul accelerometer

Pembacaan diatas memberikan hasil berupa percepatan sesaat tiap sampel. Dengan mengetahui t_{clock} dan jumlah *clock* dalam satu siklus pengambilan data, maka dapat dihitung periode sampel dengan cara berikut.

- $t_{clock} = 100 \mu s$ dalam satu siklus pengambilan data terdapat 20 *clock* sehingga periode 1 siklus (t_{cycle}) sebesar 20 kali $100 \mu s$ sehingga $t_{cycle} = 2000 \mu s$ atau 2 ms

- 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.

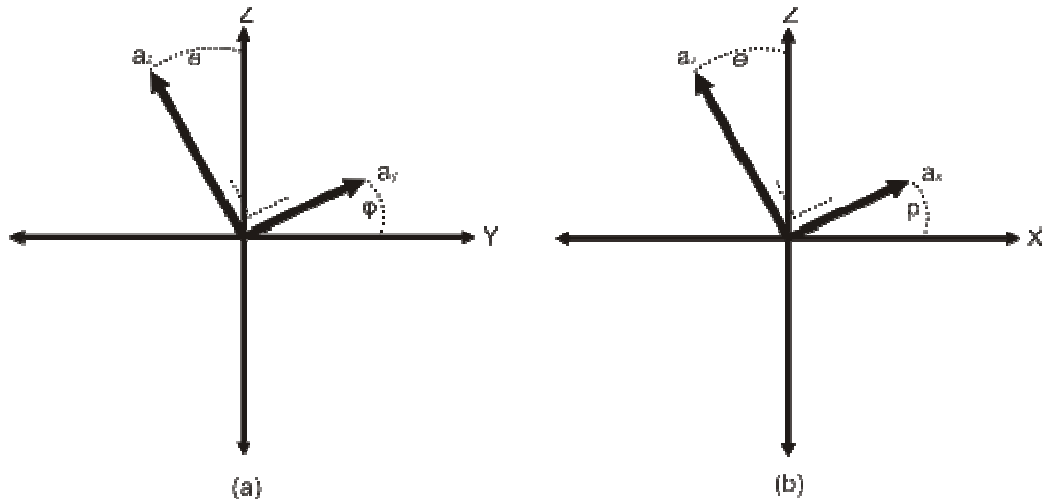
a. Percepatan Statik

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* (ρ), *roll* (φ) dan *theta* (θ).

Pitch (ρ) merupakan sudut antara sumbu X relatif terhadap bumi. *Roll* (φ) merupakan sudut antara sumbu Y relatif terhadap bumi. Sedangkan *theta* (θ) merupakan sudut antara sumbu Y relatif terhadap

gravitasi. Sudut ρ , φ , dan θ masing – masing ditunjukkan oleh gambar 4.9 dalam representasi 2 dimensi.



Gambar 4.9. Sudut roll (φ) dalam plot dua dimensi antara sumbu Y dan Z (gambar a), Sudut pitch (ρ) 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 ρ , φ , dan θ 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 ρ dan θ 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 ϕ dan θ 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	0.87	-0.05	-0.51	1.01	0.75	-0.06	-0.71	1.03	0.53	-0.08	-0.86	1.01
1.01	-0.05	-0.20	1.03	0.85	-0.09	-0.53	1.01	0.74	-0.07	-0.71	1.03	0.55	-0.08	-0.86	1.02
0.98	-0.10	-0.20	1.01	0.84	-0.07	-0.53	1.00	0.75	-0.04	-0.73	1.05	0.54	-0.02	-0.87	1.02
0.98	-0.10	-0.22	1.01	0.84	-0.04	-0.54	1.00	0.73	-0.04	-0.70	1.01	0.53	-0.06	-0.86	1.01
0.99	-0.08	-0.22	1.02	0.85	-0.04	-0.54	1.01	0.70	-0.06	-0.71	1.00	0.50	-0.07	-0.84	0.98
1.01	-0.08	-0.20	1.03	0.87	-0.08	-0.55	1.03	0.72	-0.07	-0.74	1.03	0.53	-0.11	-0.86	1.02
0.96	-0.09	-0.23	0.99	0.84	-0.06	-0.57	1.02	0.71	-0.05	-0.72	1.01	0.53	-0.07	-0.86	1.01
0.98	-0.07	-0.24	1.01	0.83	-0.04	-0.57	1.01	0.69	-0.04	-0.73	1.01	0.53	-0.07	-0.87	1.02
0.98	-0.11	-0.26	1.02	0.83	-0.02	-0.57	1.01	0.70	-0.05	-0.75	1.03	0.50	-0.04	-0.86	1.00
0.98	-0.13	-0.25	1.02	0.86	-0.07	-0.58	1.04	0.71	-0.05	-0.75	1.03	0.50	-0.06	-0.88	1.01
0.98	-0.11	-0.28	1.03	0.82	-0.06	-0.59	1.01	0.68	-0.05	-0.75	1.01	0.52	-0.08	-0.89	1.03
1.01	-0.07	-0.28	1.05	0.81	-0.05	-0.59	1.00	0.66	-0.04	-0.75	1.00	0.52	-0.07	-0.88	1.02
0.96	-0.03	-0.30	1.01	0.82	-0.03	-0.59	1.01	0.67	-0.06	-0.76	1.01	0.50	-0.06	-0.85	0.99
0.97	-0.12	-0.30	1.02	0.83	-0.06	-0.62	1.04	0.67	-0.02	-0.76	1.01	0.48	-0.06	-0.87	1.00
0.96	-0.11	-0.30	1.01	0.79	-0.04	-0.59	0.99	0.64	-0.06	-0.75	0.99	0.49	-0.06	-0.88	1.01
0.97	-0.09	-0.33	1.03	0.81	-0.05	-0.62	1.02	0.64	-0.06	-0.76	1.00	0.48	-0.08	-0.87	1.00
0.97	-0.04	-0.35	1.03	0.82	-0.04	-0.63	1.03	0.63	-0.03	-0.77	1.00	0.49	-0.08	-0.88	1.01
0.95	-0.06	-0.33	1.01	0.82	-0.04	-0.62	1.03	0.64	-0.03	-0.78	1.01	0.48	-0.04	-0.88	1.00
0.96	-0.08	-0.35	1.02	0.81	-0.06	-0.62	1.02	0.64	-0.10	-0.78	1.01	0.47	-0.06	-0.88	1.00
0.95	-0.11	-0.36	1.02	0.79	-0.05	-0.64	1.02	0.62	-0.05	-0.78	1.00	0.45	-0.05	-0.89	1.00
0.94	-0.06	-0.38	1.02	0.79	-0.04	-0.64	1.02	0.65	-0.03	-0.80	1.03	0.45	-0.05	-0.89	1.00
0.94	-0.07	-0.38	1.02	0.82	-0.05	-0.66	1.05	0.66	-0.04	-0.81	1.05	0.46	-0.06	-0.90	1.01
0.93	-0.07	-0.39	1.01	0.81	-0.06	-0.66	1.05	0.63	-0.07	-0.80	1.02	0.46	-0.07	-0.88	1.00
0.93	-0.09	-0.40	1.02	0.75	-0.04	-0.65	0.99	0.62	-0.05	-0.81	1.02	0.44	-0.06	-0.90	1.00
0.94	-0.08	-0.42	1.03	0.77	-0.03	-0.65	1.01	0.62	-0.01	-0.81	1.02	0.46	-0.03	-0.91	1.02
0.95	-0.05	-0.43	1.04	0.79	-0.05	-0.65	1.02	0.61	-0.05	-0.82	1.02	0.43	-0.04	-0.92	1.02
0.92	-0.07	-0.42	1.01	0.77	-0.07	-0.65	1.01	0.59	-0.10	-0.79	0.99	0.43	-0.06	-0.91	1.01
0.95	-0.11	-0.43	1.05	0.76	-0.06	-0.65	1.00	0.60	-0.06	-0.79	0.99	0.42	-0.06	-0.90	0.99
0.90	-0.05	-0.44	1.00	0.75	-0.05	-0.66	1.00	0.59	-0.06	-0.80	1.00	0.43	-0.04	-0.90	1.00
0.88	-0.05	-0.45	0.99	0.75	-0.06	-0.66	1.00	0.58	-0.06	-0.81	1.00	0.42	-0.04	-0.92	1.01
0.91	-0.05	-0.45	1.02	0.76	-0.06	-0.68	1.02	0.58	-0.07	-0.80	0.99	0.39	-0.05	-0.92	1.00
0.92	-0.08	-0.45	1.03	0.78	-0.08	-0.68	1.04	0.58	-0.06	-0.83	1.01	0.40	-0.05	-0.93	1.01
0.89	-0.08	-0.47	1.01	0.75	-0.07	-0.68	1.01	0.58	-0.05	-0.86	1.04	0.39	-0.02	-0.94	1.02
0.87	-0.05	-0.48	0.99	0.74	-0.05	-0.68	1.01	0.59	-0.08	-0.82	1.01	0.39	-0.04	-0.93	1.01
0.90	-0.04	-0.49	1.03	0.73	-0.03	-0.70	1.01	0.55	-0.06	-0.81	0.98	0.38	-0.05	-0.93	1.01
0.90	-0.07	-0.48	1.02	0.75	-0.08	-0.68	1.02	0.58	-0.09	-0.83	1.02	0.36	-0.04	-0.94	1.01
0.92	-0.09	-0.51	1.06	0.73	-0.07	-0.70	1.01	0.56	-0.08	-0.86	1.03	0.37	-0.05	-0.93	1.00
0.88	-0.02	-0.50	1.01	0.72	-0.05	-0.68	0.99	0.55	-0.04	-0.85	1.01	0.37	-0.05	-0.93	1.00
0.86	-0.01	-0.52	1.01	0.73	-0.04	-0.70	1.01	0.54	-0.07	-0.84	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
-1.03	-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	-0.92	-0.02	0.53	1.06	-0.70	-0.04	0.75	1.03	-0.50	-0.08	0.85	0.99
-0.99	-0.02	0.30	1.03	-0.89	-0.04	0.54	1.04	-0.67	-0.04	0.73	0.99	-0.49	-0.07	0.86	0.99
-1.00	-0.02	0.29	1.04	-0.88	-0.04	0.55	1.04	-0.66	-0.06	0.74	0.99	-0.49	-0.08	0.87	1.00
-0.99	-0.04	0.31	1.04	-0.86	-0.02	0.56	1.03	-0.67	-0.06	0.74	1.00	-0.48	-0.07	0.86	0.99
-0.99	-0.04	0.31	1.04	-0.83	-0.04	0.59	1.02	-0.67	-0.05	0.75	1.01	-0.47	-0.08	0.86	0.98
-0.99	-0.03	0.31	1.04	-0.85	-0.02	0.57	1.02	-0.67	-0.07	0.76	1.02	-0.46	-0.11	0.89	1.01
-0.96	-0.05	0.33	1.02	-0.84	-0.04	0.56	1.01	-0.66	-0.06	0.75	1.00	-0.45	-0.09	0.88	0.99
-0.96	-0.04	0.35	1.02	-0.81	-0.06	0.57	0.99	-0.66	-0.06	0.75	1.00	-0.44	-0.08	0.88	0.99
-0.95	-0.03	0.36	1.02	-0.83	-0.04	0.57	1.01	-0.66	-0.06	0.76	1.01	-0.44	-0.07	0.88	0.99
-0.97	-0.02	0.36	1.03	-0.86	-0.04	0.56	1.03	-0.66	-0.06	0.75	1.00	-0.43	-0.07	0.89	0.99
-0.98	-0.02	0.37	1.05	-0.85	-0.05	0.57	1.02	-0.66	-0.05	0.77	1.02	-0.43	-0.08	0.89	0.99
-0.95	-0.03	0.38	1.02	-0.78	-0.05	0.60	0.99	-0.64	-0.06	0.76	1.00	-0.43	-0.09	0.89	0.99
-0.95	-0.03	0.40	1.03	-0.82	-0.05	0.60	1.02	-0.64	-0.05	0.76	0.99	-0.43	-0.08	0.88	0.98
-0.92	-0.03	0.41	1.01	-0.83	-0.05	0.60	1.03	-0.65	-0.05	0.76	1.00	-0.42	-0.09	0.90	1.00
-0.92	-0.03	0.42	1.01	-0.81	-0.06	0.61	1.02	-0.64	-0.06	0.77	1.00	-0.41	-0.08	0.91	1.00
-0.93	-0.03	0.42	1.02	-0.78	-0.04	0.62	1.00	-0.64	-0.05	0.77	1.00	-0.39	-0.09	0.90	0.98
-0.94	-0.03	0.42	1.03	-0.80	-0.05	0.63	1.02	-0.62	-0.07	0.77	0.99	-0.40	-0.08	0.90	0.99
-0.92	-0.03	0.44	1.02	-0.80	-0.05	0.61	1.01	-0.61	-0.06	0.78	0.99	-0.40	-0.08	0.90	0.99
-0.91	-0.03	0.43	1.01	-0.80	-0.05	0.61	1.01	-0.62	-0.07	0.78	1.00	-0.38	-0.09	0.90	0.98
-0.91	-0.05	0.44	1.01	-0.78	-0.06	0.64	1.01	-0.61	-0.06	0.80	1.01	-0.38	-0.09	0.92	1.00
-0.92	-0.04	0.45	1.02	-0.78	-0.06	0.63	1.00	-0.60	-0.05	0.80	1.00	-0.38	-0.09	0.91	0.99
-0.90	-0.05	0.46	1.01	-0.79	-0.05	0.63	1.01	-0.60	-0.06	0.79	0.99	-0.37	-0.09	0.91	0.99
-0.92	-0.04	0.45	1.02	-0.79	-0.06	0.63	1.01	-0.58	-0.07	0.80	0.99	-0.36	-0.09	0.91	0.98
-0.91	-0.03	0.47	1.02	-0.79	-0.04	0.65	1.02	-0.57	-0.09	0.81	0.99	-0.35	-0.09	0.91	0.98
-0.92	-0.03	0.47	1.03	-0.77	-0.05	0.66	1.02	-0.57	-0.08	0.82	1.00	-0.34	-0.10	0.91	0.98
-0.89	-0.04	0.48	1.01	-0.76	-0.05	0.66	1.01	-0.57	-0.08	0.83	1.01	-0.34	-0.11	0.91	0.98
-0.92	-0.03	0.48	1.04	-0.75	-0.06	0.68	1.01	-0.56	-0.07	0.82	1.00	-0.35	-0.09	0.91	0.98
-0.91	-0.03	0.49	1.03	-0.75	-0.06	0.68	1.01	-0.56	-0.07	0.82	1.00	-0.35	-0.08	0.93	1.00
-0.88	-0.04	0.49	1.01	-0.75	-0.04	0.69	1.02	-0.55	-0.07	0.83	1.00	-0.34	-0.09	0.94	1.00
-0.86	-0.04	0.51	1.00	-0.75	-0.04	0.68	1.01	-0.54	-0.08	0.84	1.00	-0.33	-0.10	0.93	0.99
-0.86	-0.04	0.51	1.00	-0.76	-0.03	0.68	1.02	-0.55	-0.08	0.83	1.00	-0.33	-0.10	0.92	0.98
-0.91	-0.02	0.50	1.04	-0.74	-0.04	0.69	1.01	-0.54	-0.08	0.83	0.99	-0.33	-0.09	0.91	0.97
-0.95	-0.04	0.51	1.08	-0.71	-0.07	0.69	0.99	-0.53	-0.07	0.83	0.99	-0.32	-0.09	0.93	0.99
-0.92	-0.04	0.52	1.06	-0.71	-0.07	0.69	0.99	-0.53	-0.09	0.83	0.99	-0.32	-0.09	0.93	0.99
-0.83	-0.03	0.55	1.00	-0.73	-0.05	0.70	1.01	-0.52	-0.09	0.84	0.99	-0.34	-0.09	0.93	0.99
-0.85	-0.04	0.55	1.01	-0.72	-0.05	0.71	1.01	-0.53	-0.08	0.84	1.00	-0.32	-0.08	0.92	0.98
-0.80	-0.04	0.56	0.98	-0.67	-0.05	0.73	0.99	-0.52	-0.07	0.84	0.99	-0.28	-0.10	0.93	0.98
-0.83	-0.04	0.53	0.99	-0.69	-0.05	0.72	1.00	-0.51	-0.07	0.84	0.99	-0.29	-0.09	0.92	0.97
-0.87	-0.04	0.54	1.02	-0.70	-0.05	0.74	1.02	-0.49	-0.09	0.86	0.99	-0.28	-0.10	0.92	0.97

-0.30	-0.09	0.93	0.98	-0.08	-0.10	0.97	0.98	-0.02	-0.10	0.97	0.98	-0.03	-0.06	0.96	0.96
-0.27	-0.09	0.93	0.97	-0.07	-0.10	0.95	0.96	-0.01	-0.10	0.97	0.98	-0.02	-0.06	0.97	0.97
-0.27	-0.09	0.94	0.98	-0.05	-0.10	0.96	0.97	-0.03	-0.09	0.98	0.98	-0.01	-0.08	0.97	0.97
-0.27	-0.09	0.95	0.99	-0.02	-0.09	0.97	0.97	-0.02	-0.09	0.97	0.97	-0.01	-0.07	0.95	0.95
-0.27	-0.08	0.95	0.99	-0.02	-0.10	0.97	0.98	-0.01	-0.10	0.97	0.98	0.00	-0.08	0.97	0.97
-0.27	-0.10	0.94	0.98	-0.04	-0.09	0.97	0.97	-0.02	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.10	0.98	0.99
-0.27	-0.09	0.95	0.99	-0.06	-0.09	0.97	0.98	-0.02	-0.08	0.97	0.97	0.02	-0.10	0.97	0.98
-0.23	-0.08	0.95	0.98	-0.02	-0.10	0.96	0.97	0.04	-0.09	0.96	0.97	0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.22	-0.11	0.95	0.98	0.00	-0.11	0.97	0.98	0.01	-0.10	0.98	0.99	0.01	-0.08	0.96	0.96
-0.23	-0.10	0.94	0.97	-0.01	-0.11	0.97	0.98	0.00	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.09	0.97	0.97
-0.21	-0.09	0.95	0.98	-0.02	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.98	0.98	0.02	-0.08	0.96	0.96
-0.23	-0.09	0.95	0.98	0.00	-0.09	0.98	0.98	0.02	-0.09	0.98	0.98	0.03	-0.09	0.98	0.98
-0.20	-0.10	0.94	0.97	0.00	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.09	0.98	0.98	0.03	-0.09	0.97	0.97
-0.19	-0.11	0.96	0.98	-0.01	-0.09	0.98	0.98	0.02	-0.07	0.96	0.96	0.02	-0.06	0.95	0.95
-0.20	-0.10	0.95	0.98	-0.02	-0.08	0.97	0.97	0.01	-0.10	0.98	0.99	0.02	-0.06	0.99	0.99
-0.19	-0.09	0.95	0.97	-0.05	-0.11	0.97	0.98	0.02	-0.08	0.96	0.96	0.04	-0.08	0.99	0.99
-0.17	-0.10	0.96	0.98	-0.10	-0.09	0.97	0.98	0.04	-0.07	0.98	0.98	0.03	-0.09	0.98	0.98
-0.18	-0.09	0.96	0.98	-0.05	-0.09	0.97	0.98	0.02	-0.08	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.96	0.96
-0.16	-0.10	0.97	0.99	-0.07	-0.09	0.96	0.97	-0.02	-0.10	0.97	0.98	0.01	-0.07	0.97	0.97
-0.16	-0.10	0.95	0.97	-0.06	-0.10	0.95	0.96	-0.01	-0.07	0.96	0.96	0.02	-0.07	0.96	0.96
-0.16	-0.09	0.97	0.99	-0.05	-0.09	0.96	0.97	0.00	-0.10	0.97	0.98	0.01	-0.07	0.95	0.95
-0.17	-0.10	0.96	0.98	-0.02	-0.09	0.96	0.96	0.01	-0.09	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.96	0.96
-0.16	-0.09	0.96	0.98	-0.04	-0.09	0.97	0.97	0.01	-0.09	0.98	0.98	0.03	-0.09	0.96	0.96
-0.15	-0.09	0.96	0.98	-0.02	-0.09	0.98	0.98	0.00	-0.09	0.98	0.98	0.02	-0.08	0.97	0.97
-0.15	-0.11	0.95	0.97	-0.04	-0.10	0.95	0.96	-0.01	-0.06	0.98	0.98	0.02	-0.09	0.98	0.98
-0.15	-0.11	0.95	0.97	0.05	-0.09	0.96	0.97	0.00	-0.12	0.96	0.97	0.03	-0.07	0.99	0.99
-0.17	-0.10	0.96	0.98	-0.06	-0.07	0.98	0.98	-0.01	-0.09	0.96	0.96	0.04	-0.08	0.98	0.98
-0.15	-0.08	0.95	0.97	-0.02	-0.10	0.98	0.99	0.00	-0.09	0.97	0.97	0.03	-0.07	0.96	0.96
-0.14	-0.10	0.96	0.98	-0.01	-0.09	0.97	0.97	0.01	-0.09	0.99	0.99	0.02	-0.06	0.98	0.98
-0.13	-0.09	0.97	0.98	0.00	-0.10	0.97	0.98	0.02	-0.07	0.96	0.96	0.03	-0.08	0.97	0.97
-0.12	-0.10	0.95	0.96	-0.01	-0.10	0.97	0.98	-0.04	-0.05	0.92	0.92	0.00	-0.08	0.93	0.93
-0.11	-0.09	0.96	0.97	0.02	-0.08	0.97	0.97	-0.03	-0.08	0.94	0.94	-0.02	-0.05	0.93	0.93
-0.08	-0.10	0.97	0.98	0.00	-0.09	0.97	0.97	0.00	-0.13	0.97	0.98	0.01	-0.06	0.96	0.96
-0.10	-0.11	0.96	0.97	0.02	-0.10	0.97	0.98	0.02	-0.12	0.99	1.00	0.02	-0.08	0.97	0.97
-0.05	-0.09	0.97	0.98	0.01	-0.09	0.96	0.96	0.02	-0.09	0.97	0.97	0.01	-0.08	0.97	0.97
-0.09	-0.10	0.97	0.98	-0.01	-0.10	0.97	0.98	-0.01	-0.07	0.95	0.95	0.00	-0.07	0.97	0.97
-0.09	-0.09	0.98	0.99	-0.02	-0.09	0.97	0.97	0.00	-0.08	0.97	0.97	0.02	-0.07	0.98	0.98
-0.08	-0.09	0.97	0.98	-0.03	-0.09	0.97	0.97	0.00	-0.08	0.97	0.97	0.03	-0.07	0.99	0.99
-0.06	-0.10	0.97	0.98	-0.04	-0.09	0.97	0.97	-0.01	-0.08	0.96	0.96	0.04	-0.05	0.99	0.99

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

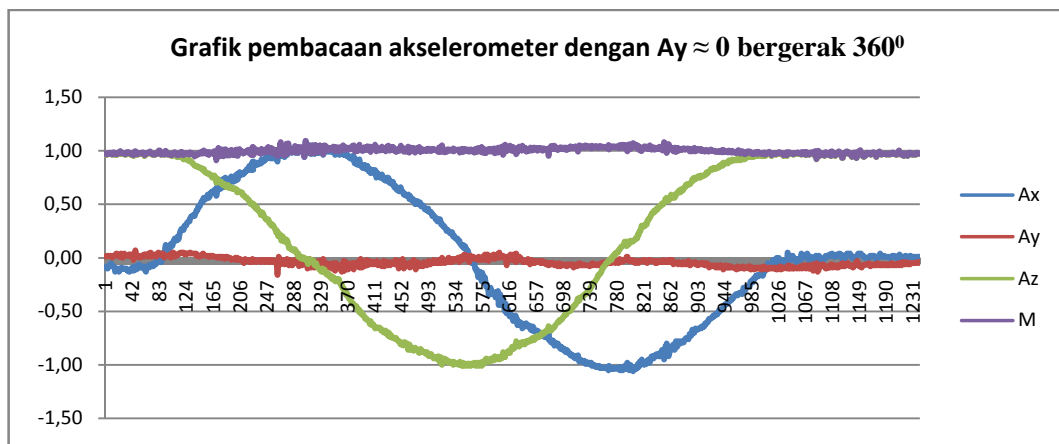
tampak bahwa $M \approx 1g$. Nilai resultan vektor percepatan pada kondisi

statik tidak melebihi dari nilai percepatan gravitasi sedangkan adanya

nilai yang lebih besar dari 1 dari percobaan pertama diatas dikarenakan

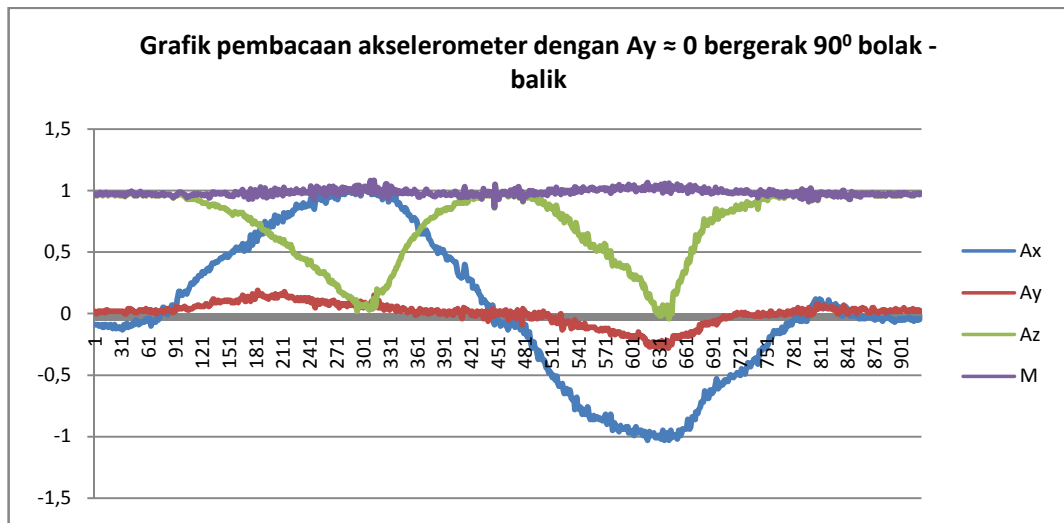
sensor melakukan pembacaan pada saat sensor diputar yang artinya sensor menerima gaya dari luar yang nilainya kecil.

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*.



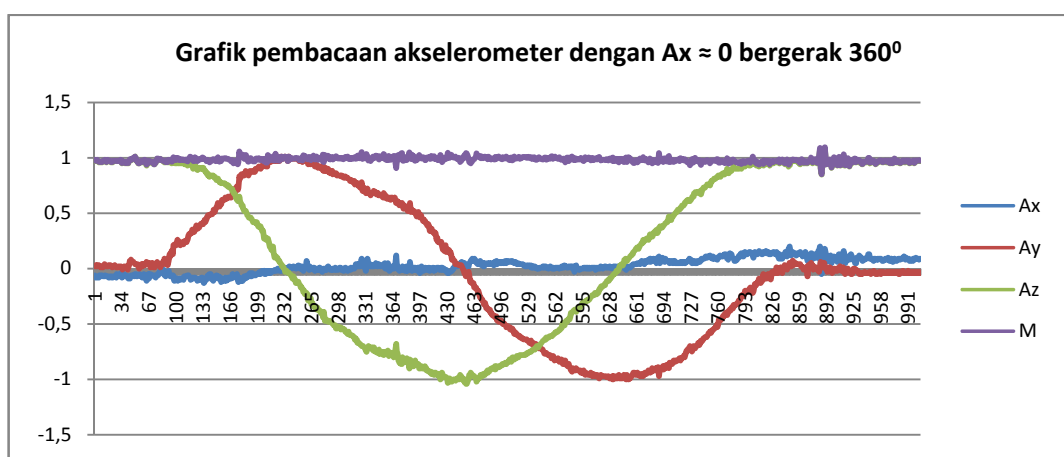
Gambar 4.10 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik
dengan $A_y \approx 0$ bergerak 360°

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

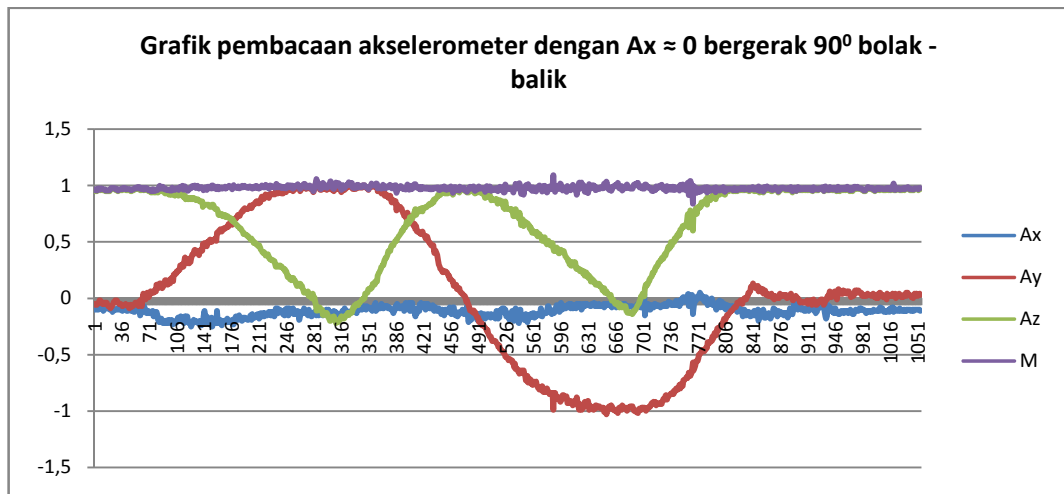


Gambar 4.11 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik dengan $A_y \approx 0$ bergerak 90° bolak-balik.

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



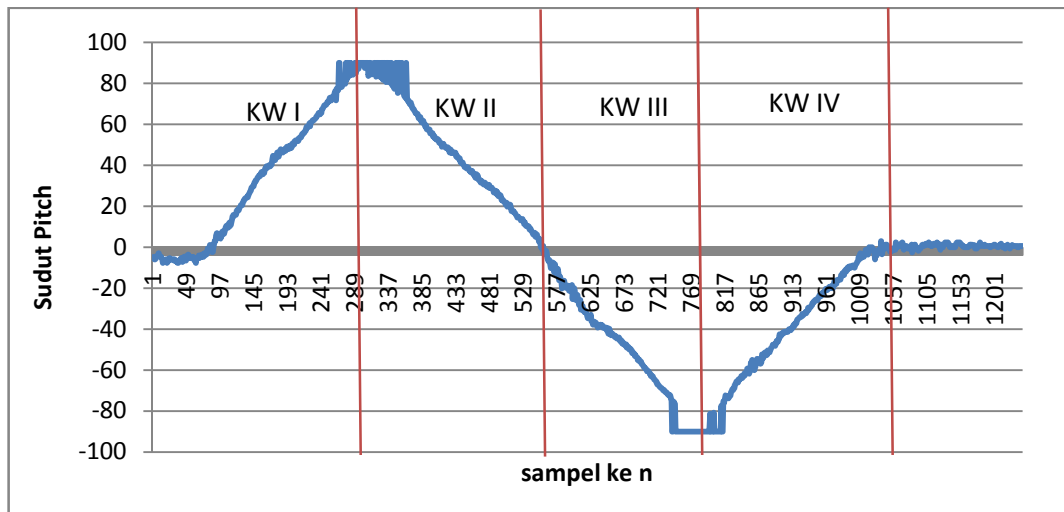
Gambar 4.12 Grafik percepatan pada akselerometer bergerak statik dengan $A_x \approx 0$ bergerak 360° .



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

Baik vektor A_x maupun vektor A_y keduanya merupakan fungsi *sinus* sedangkan vektor A_z merupakan fungsi *cosinus* sehingga sudut ρ, ϕ dan θ dapat dicari dengan menggunakan persamaan 4.8, 4.9 dan 4.10.

Akan tetapi fungsi *arctan* akan memberikan nilai pada jangkauan -90° hingga 90° sehingga persamaan 4.8, apabila diterapkan untuk menghitung sudut ρ dari hasil pembacaan akselerometer pada tabel 4.2 akan memberikan nilai dari -90° hingga 90° seperti pada gambar 4.14. Padahal pergerakan sesungguhnya adalah dari 0° hingga 360° . Fungsi *arctan* juga akan memberikan hasil yang sama untuk nilai sudut pada kuadran I dan kuadran III sebagai contoh untuk sudut 225° , 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 p 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

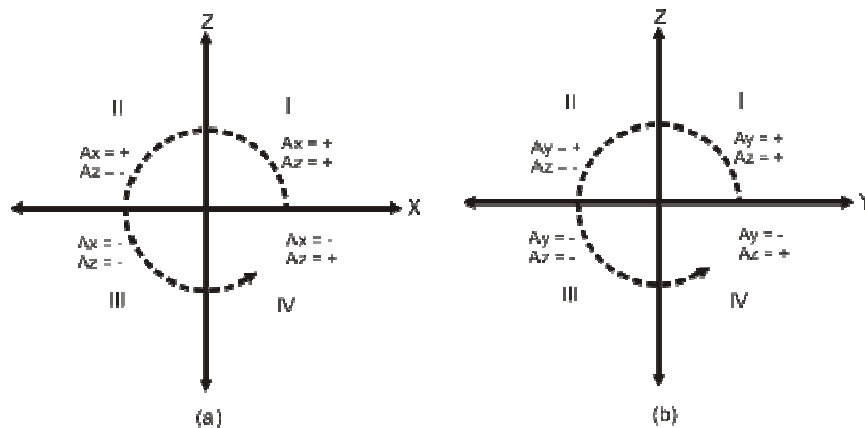
$$\rho = 360^0 + \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

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

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

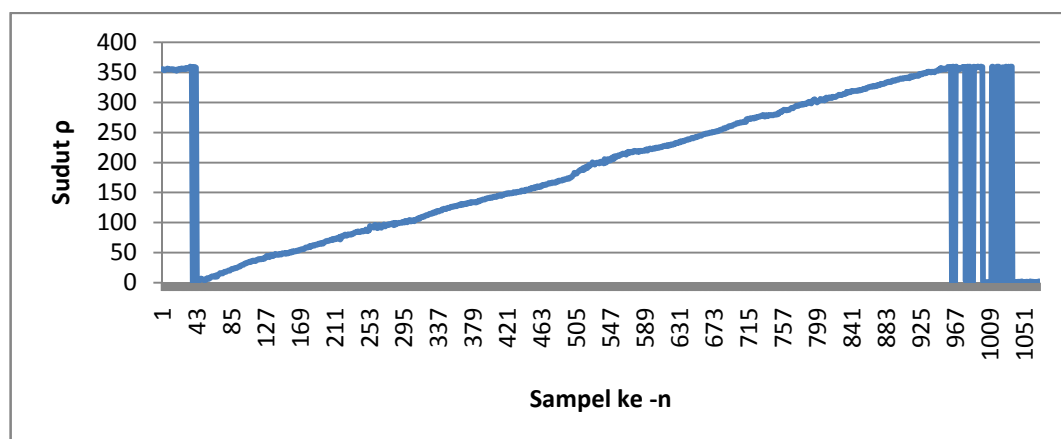
Untuk mengetahui dikuadran mana modul bergerak dapat dilakukan dengan membaca tanda bilangan positif (+) atau negatif (-) pada masing – masing data vektor percepatan.

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 ρ 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);

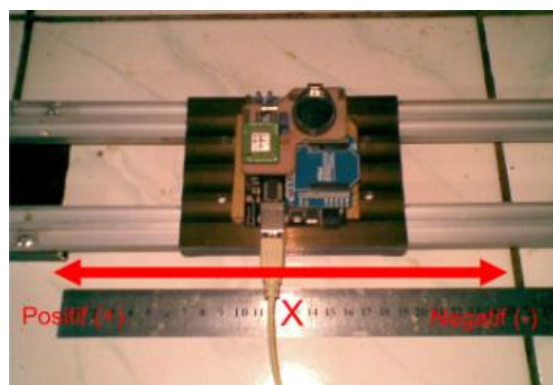
Serial.print(9,BYTE);

Serial.println(M);

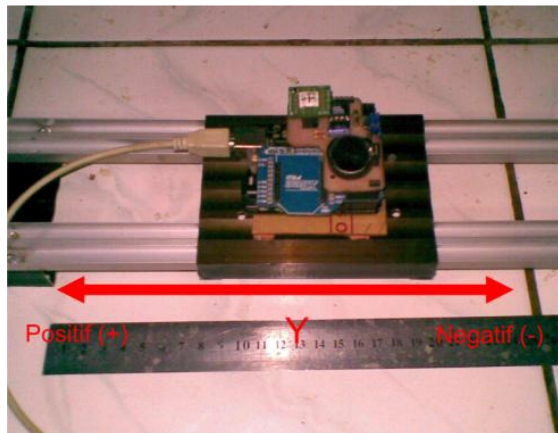
```

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.

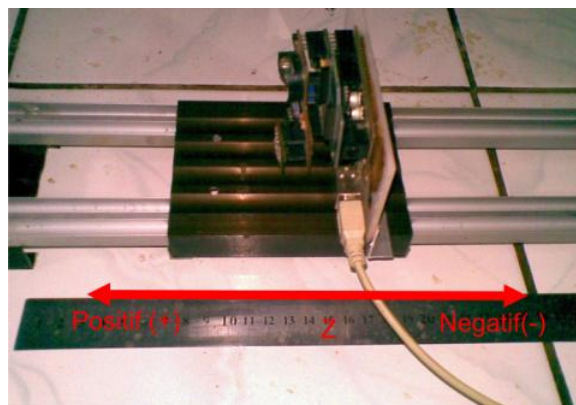
Pengujian untuk tiap sumbu di ilustrasikan oleh gambar 4.17 berikut.



(a)



(b)



(c)

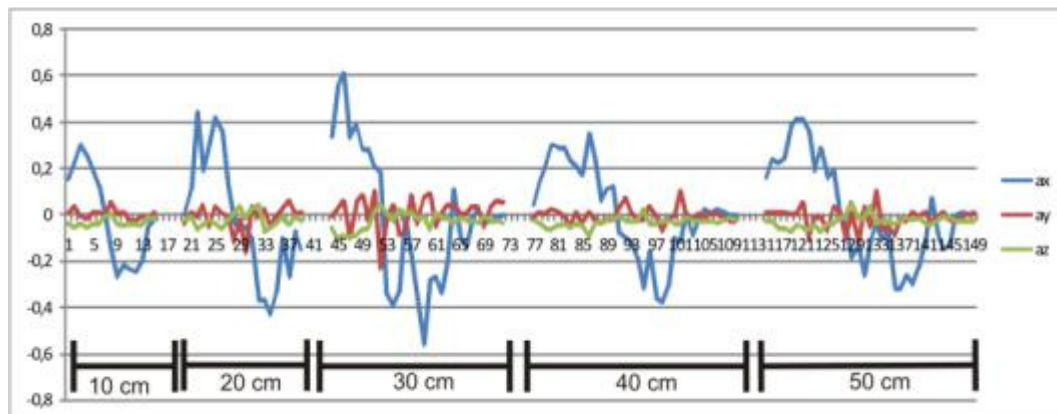
Gambar 4.17 Posisi modul pada saat pengujian pergerakan tiap sumbu. (a) sumbu x, (b) sumbu y dan (c) sumbu z

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



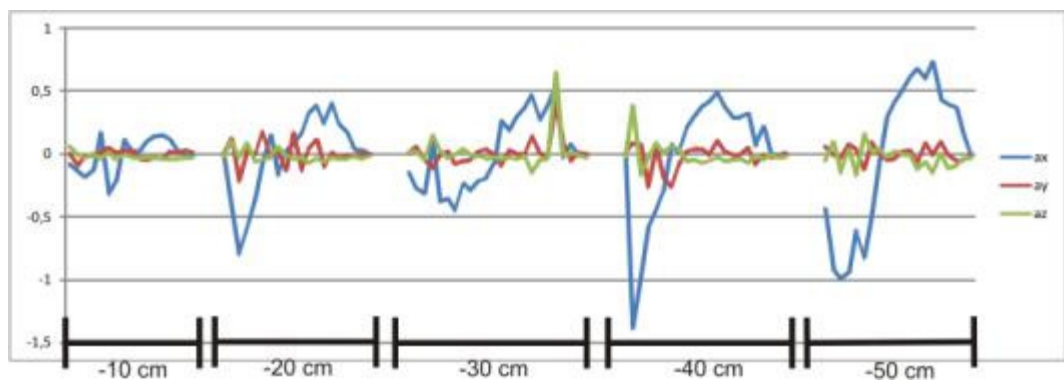
Gambar 4.18 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu x positif

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						



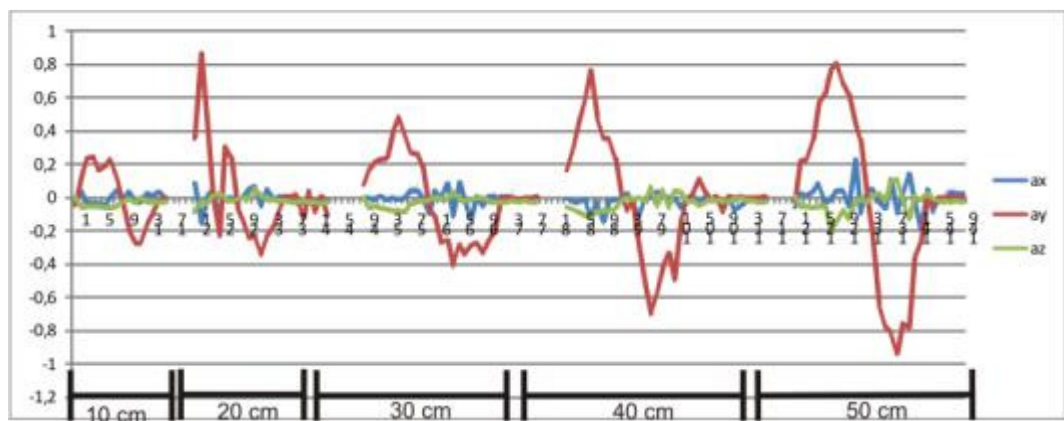
Gambar 4.19 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu x negatif

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			

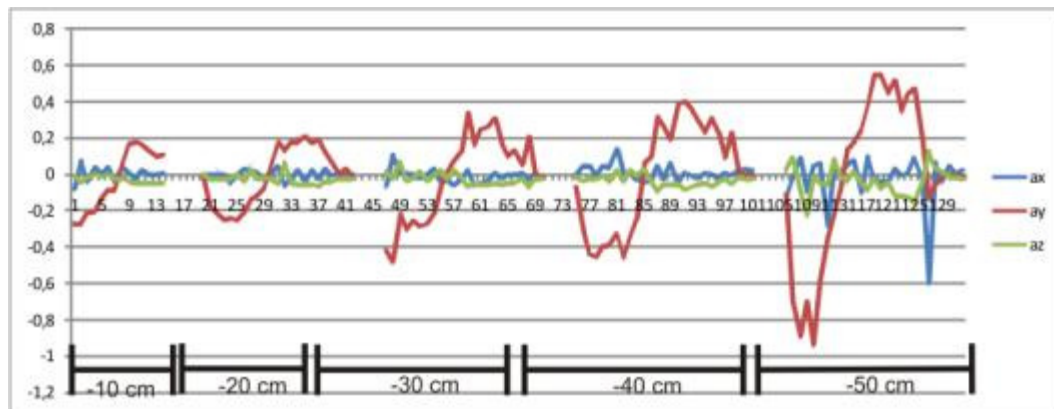


Gambar 4.20 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu y positif

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



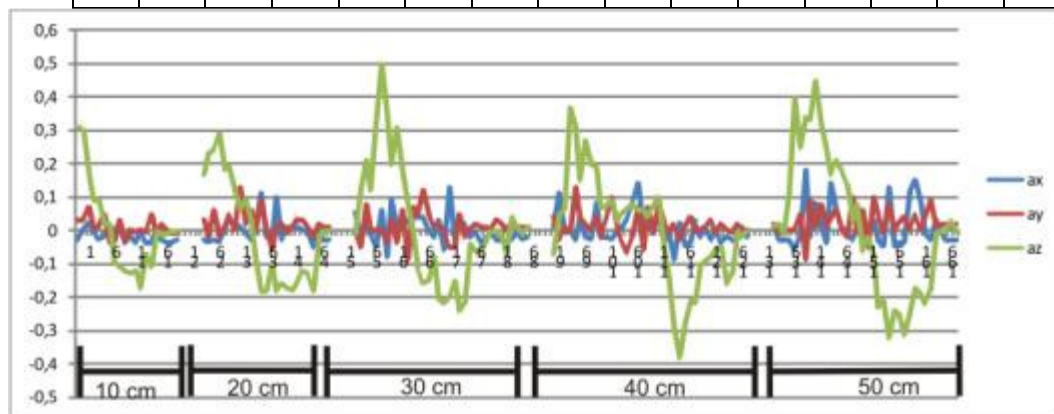
Gambar 4.21 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu y negatif

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			



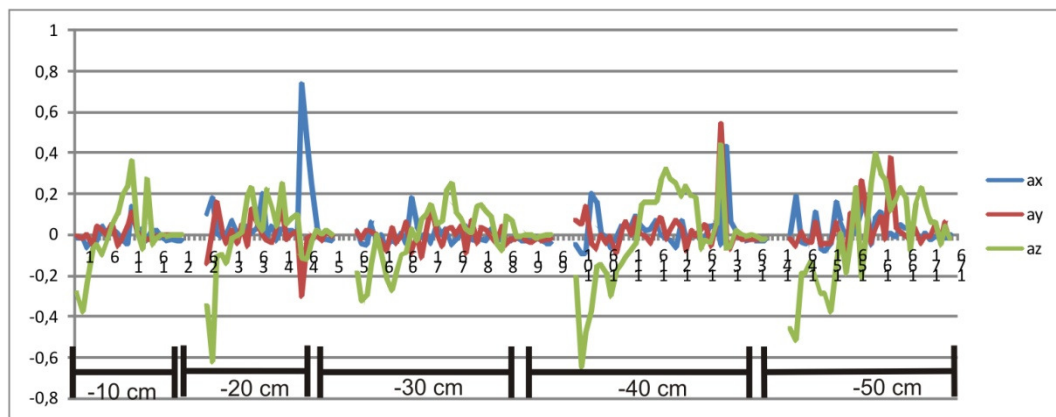
Gambar 4.22 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu z positif

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						

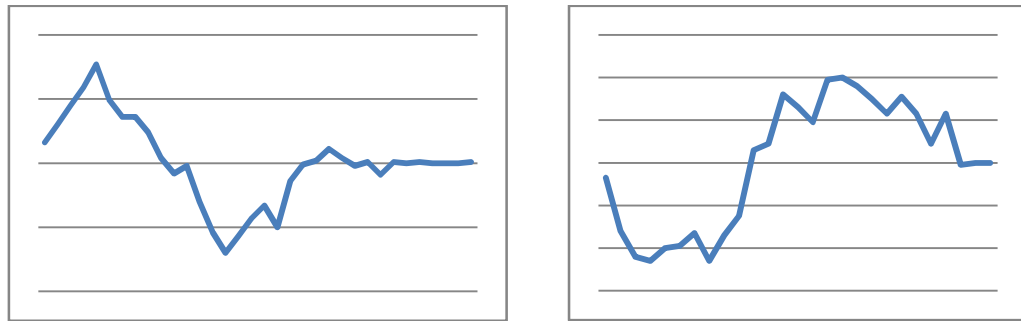


Gambar 4.23 Grafik pengujian pergerakan modul pada sumbu z negatif

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 .

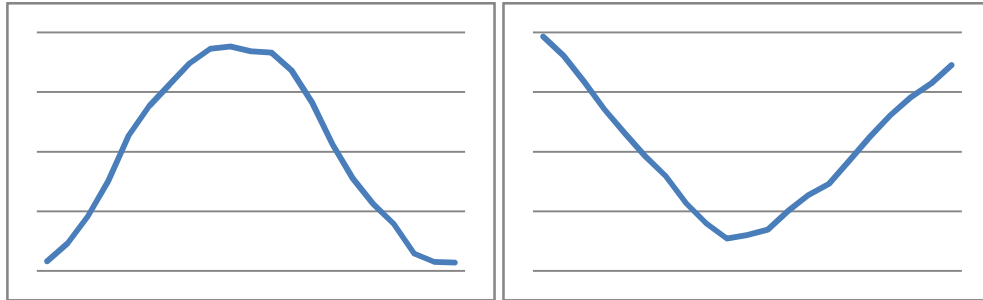
Dari grafik tersebut apabila di integrasikan akan didapat nilai kecepatan yang berbeda, yakni untuk pergerakan positif nilai kecepatan yang didapat bernilai positif sedangkan untuk pergerakan kearah negatif kecepatan yang didapat bernilai negatif. Integrasi data percepatan menjadi data kecepatan digunakan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

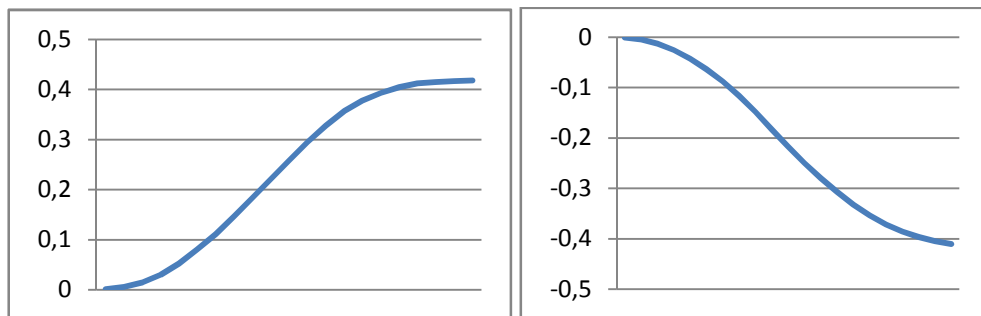


Gambar 4.25 Hasil integrasi data percepatan pada pergerakan benda pada arah positif (kiri) dan arah negatif (kanan)

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 Δt 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

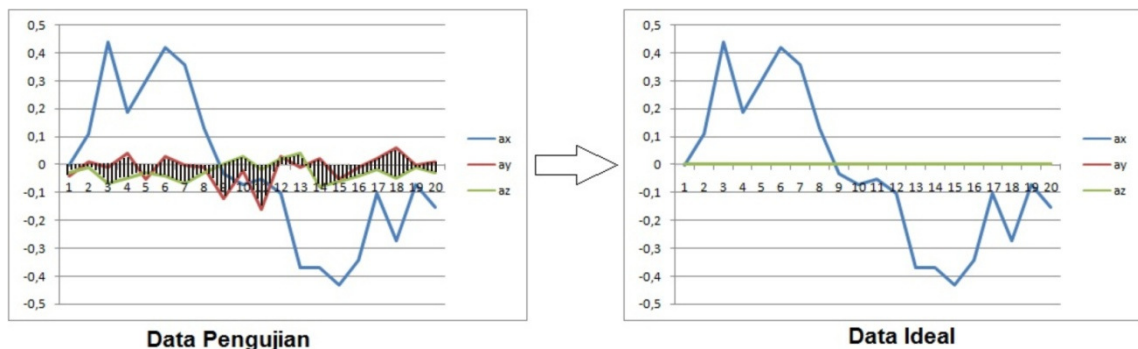
Idealnya, jika akselerometer digerakan hanya pada satu sumbu secara linear maka nilai percepatan pada sumbu yang lain bernilai tetap karena tidak mengalami perubahan posisi. Misalnya jika sensor digerakan pada sumbu x kearah positif, maka nilai percepatan yang berubah seharusnya hanya percepatan pada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

- a. Efek vibrasi pada saat modul bergerak.
- b. Gaya gesek media yang digunakan pada pengujian.
- c. Efek dari *Micro Electro-Mechanical System* (MEMS) yang diadopsi oleh akselerometer H48C.
- d. 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.



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.