

**BAB II**  
**TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1 Hubungan Frekuensi, Kecepatan Sudut, Kecepatan Linear dan Perubahan Sudut**

Frekuensi dapat digunakan untuk mendapatkan nilai dari kecepatan sudut dan dari nilai kecepatan sudut bisa digunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan linear dan percepatan linear. Frekuensi jika dilihat dari gerakan osilasi adalah jumlah gelombang yang bergerak osilasi dalam satu detik dan memiliki satuan hertz (Hz). Periode adalah waktu yang dibutuhkan gelombang untuk melakukan satu kali gerakan osilasi dan memiliki satuan detik (s). Dimana dari pengertian diatas dapat dibuat persamaan sebagai berikut.

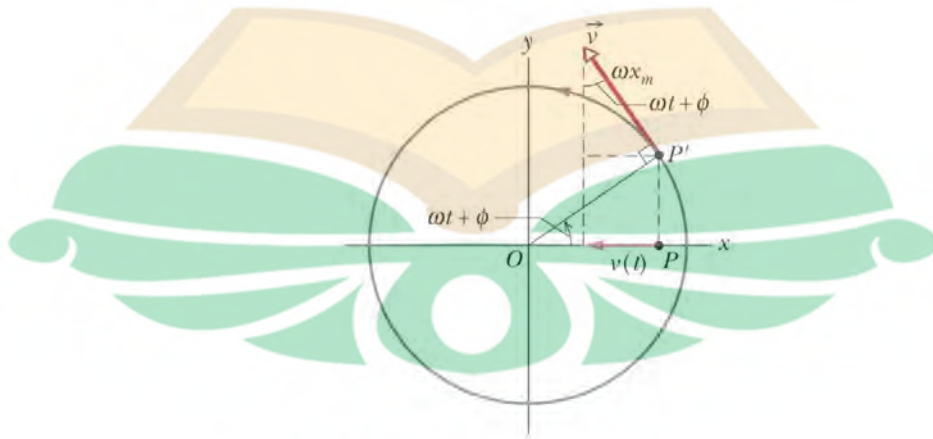
$$T = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

Keterangan persamaan 2.1:

$T$  = Periode (s)

$f$  = frekuensi (Hz)

Dapat dilihat dari gambar 2.1 adalah gerakan dari suatu partikel yang bergerak osilasi pada lintasan berbentuk lingkaran.



Gambar 2.1 Partikel yang bergerak osilasi dengan lintasan lingkaran  
(Halliday,2014)

Partikel yang bergerak osilasi tersebut dapat diketahui posisi perpindahannya ketika dia bergerak dalam satuan t waktu. Menentukan posisi partikel dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \theta) \quad (2.2)$$

Keterangan persamaan 2.2:

$x(t)$  = posisi partikel saat waktu t

$x_m$  = posisi partikel terjauh / maksimal

$\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

$\theta$  = sudut elevasi (degrees)

Ketika partikel bergerak osilasi dari kiri ke kanan dalam waktu t, maka partikel membutuhkan waktu t+T untuk menuju posisi awal. Sudut  $\theta$  diubah menjadi  $\theta = 0$  agar mudah melakukan perhitungan. Posisi awal dan posisi perpindahan ketika sudah satu periode adalah sama nilainya, oleh karena itu dapat dituliskan sebagai berikut.

$$x_m \cos \omega t = x_m \cos \omega(t + T). \quad (2.3)$$

Nilai dari fungsi kosinus akan bernilai sama ketika sudah ditambahkan dengan  $2\pi$  rad. Sehingga persamaan 2.3 dapat diturunkan menjadi.

$$\omega(t + T) = \omega t + 2\pi$$

$$\omega T = 2\pi,$$

Sehingga digabungkan dengan persamaan 2.1 didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.4)$$

Nilai dari kecepatan sudut bisa digunakan untuk mendapatkan nilai dari kecepatan linear (v) dan percepatan linear (a) dengan menurunkan persamaan posisi pada persamaan 2.2 seperti berikut.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \equiv \frac{d}{dt} [x_m \cos(\omega t + \theta)] \quad (2.5)$$

$$v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \theta)$$

Penurunan dari persamaan kecepatan ( $v$ ) bisa dilakukan untuk mendapatkan nilai dari percepatan linear ( $a$ ) sehingga.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt}[-\omega x_m \sin(\omega t + \theta)]$$
$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \theta) \quad (2.6)$$

Dapat dilihat hubungan antara jarak posisi dan percepatan pada persamaan diatas dengan memasukkan persamaan posisi persamaan 2.2 ke dalam persamaan 2.6 sehingga menjadi seperti berikut (Halliday, 2014).

$$a(t) = -\omega^2 x(t) \quad (2.7)$$

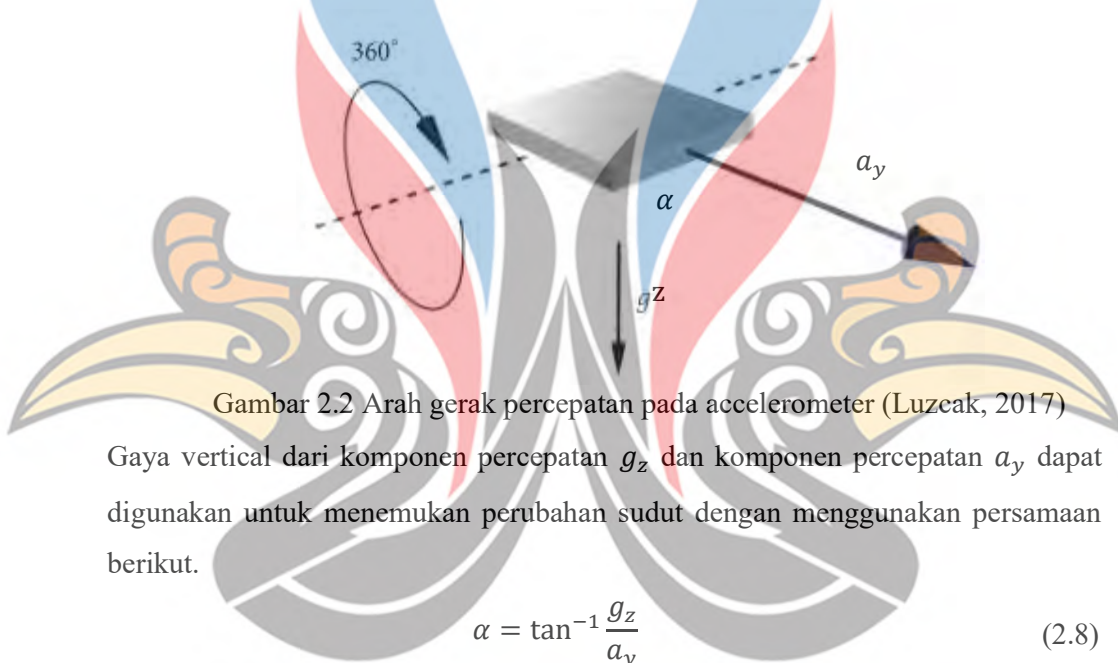
## 2.2 Accelerometer

*Accelerometer* berfungsi untuk mengukur percepatan, mendeteksi getaran, dan bisa juga untuk percepatan gravitasi. Pendeteksian percepatan berdasarkan pada 3 sumbu yaitu kanan-kiri, atas-bawah, dan depan-belakang. Pengaplikasian sensor ini biasanya untuk pengukuran kecepatan mesin, getaran mesin, getaran pada bangunan, dan kecepatan yang disertai dengan pengaruh gravitasi bumi. Contoh aplikatif *accelerometer* adalah sebagai *gadget* elektronik, *safety installation* pada kendaraan. Prinsip kerja *accelerometer* berdasarkan pada medan magnet yang digerakkan pada suatu konduktor ataupun konduktor yang digerakkan pada medan magnet maka akan timbul induksi elektromagnetik pada konduktor tersebut (Wahyudi, 2009).

*Accelerometer* modern terdiri dari sensor kecil yang mendeteksi percepatan dengan melihat dari 3 sumbu. Lokasi umum biasanya sensor ini di pasang yaitu pada pinggul, pergelangan tangan dan paha. Data mentah dari sensor ini adalah arah dan nilai percepatan dari setiap sumbu dalam satuan g, dimana 1 g sebanding dengan gravitasi bumi. Kebanyakan *accelerometer* yang digunakan untuk aktivitas fisik diatur *sampling rate* diantara 30-100 Hz. Hasil pengukuran percepatan dalam aktivitas fisik yang intens mungkin bisa mencapai resolusi 6 g jika penempatan sensor diletakkan pada pergelangan tangan. Apabila *accelerometer* terpasang pada posisi dekat dengan tanah maka hasil pengukuran bisa mencapai resolusi yang lebih dari pada 6 g (Arvidsson et al, 2019).

### 2.3 Pengukuran Perubahan Sudut

Pengukuran perubahan sudut dapat diukur dengan menggunakan sensor accelerometer dan gyroscope. Masing-masing dari sensor ini memiliki kelemahan terkait pengukuran perubahan sudut. Penggunaan accelerometer untuk pengukuran perubahan sudut cocok untuk penggunaan waktu yang lama. Dapat diketahui bahwa accelerometer dapat mengukur percepatan sudut termasuk juga percepatan gravitasi bumi ( $g$ ). Besar nilai dan arah dari  $g$  seperti yang terlihat pada gambar 2.2 dapat digunakan untuk menemukan perubahan sudut yang terjadi pada sensor ataupun benda yang melekat dengan sensor.



Gambar 2.2 Arah gerak percepatan pada accelerometer (Luzcak, 2017)

Gaya vertical dari komponen percepatan  $g_z$  dan komponen percepatan  $a_y$  dapat digunakan untuk menemukan perubahan sudut dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{g_z}{a_y} \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 hanya digunakan untuk mengukur pada satu sumbu saja (Luzcak, 2017).

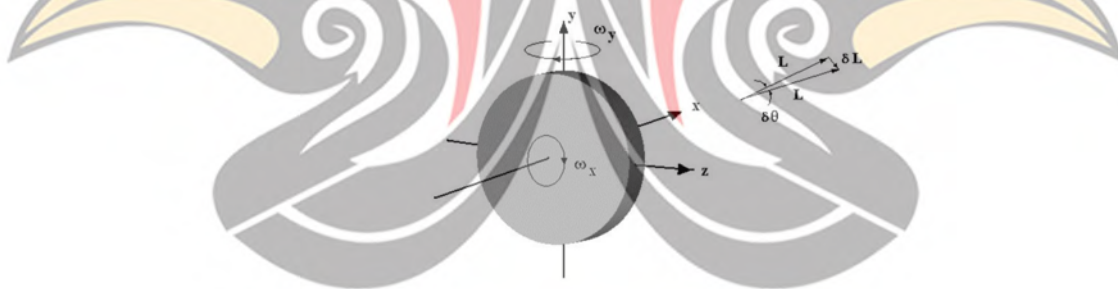
### 2.4 Gyroscope

*Gyroscope* berfungsi untuk mengukur atau menentukan orientasi suatu benda berdasarkan pada ketetapan momentum sudut. Dari pengertian lain *gyroscope* berfungsi untuk menentukan gerakan sesuai dengan gravitasi yang dilakukan oleh pengguna. *Gyroscope* ini memiliki peranan yang sangat penting dalam hal mempertahankan keseimbangan suatu benda seperti penggunaannya pada pesawat terbang yang dapat menentukan kemiringan pada sumbu x,y, dan z.

Output yang dihasilkan oleh *gyroscope* berupa kecepatan sudut yang pada sumbu x akan menjadi phi ( $\Phi$ ), sumbu y menjadi theta ( $\theta$ ), dan sumbu z menjadi psi ( $\Psi$ ). Sebelum digunakan biasanya *gyroscope* di kalibrasi terlebih dahulu dengan menggunakan bandul yang fungsinya untuk menentukan nilai faktor ataupun dapat juga melihat pada datasheet sensor yang digunakan.

Prinsip kerja dari *gyroscope* ini adalah pada saat *gyroscope* berotasi maka *gyroscope* akan memiliki nilai keluaran. Apabila *gyroscope* berotasi searah dengan jarum jam pada sumbu Z maka tegangan output yang dihasilkan akan mengecil sedangkan jika *gyroscope* berotasi berlawanan arah dengan jarum jam pada sumbu Z maka tegangan output yang dihasilkan akan membesar. Pada saat *gyroscope* tidak sedang berotasi atau berada pada keadaan diam maka tegangan outputnya akan sesuai dengan nilai offset *gyrosensor* tersebut (Rif'an, 2012).

*Gyroscope* adalah benda yang berputar di dalam kerangkanya sehingga itu mempermudah *gyroscope* bergerak pada porosnya. Mempertimbangkan jika ada sebuah roda yang berputar pada sumbu x dengan kecepatan sudut  $\omega$  yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Roda yang berputar (Tak, 2017).

Momentum sudut dari roda adalah

$$L = I\omega \quad (2.9)$$

Keterangan persamaan 2.8:

$L$  = Momentum sudut ( $\text{Kgm}^2\text{s}^{-1}$ )

$I$  = Momen Inersia ( $\text{Kgm}^2$ )

$\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

Perhatikan gambar, dengan berputarnya roda pada sumbu x secara bersamaan roda diberikan sedikit putaran pada arah sumbu y. Nilai dari L akan sama tetapi arah dari vector L akan berubah (Tak, 2017).

## 2.5 Kombinasi *Accelerometer* dan *Gyroscope*

Dengan menggunakan kombinasi *accelerometer* dan *gyroscope* pada suatu sistem maka *accelerometer* dapat memberikan pengukuran sudut saat sistem berada pada kondisi diam. Sedangkan pada saat sistem berotasi *accelerometer* tidak bisa bekerja secara maksimal karena memiliki respon yang lambat. Kelemahan inilah yang dapat diatasi oleh *gyroscope* karena *gyroscope* dapat membaca kecepatan sudut yang dinamis. Namun *gyroscope* juga memiliki kelemahan yaitu proses perpindahan kecepatan sudut dalam jangka waktu yang panjang menjadi tidak akurat karena ada efek bias yang dihasilkan oleh *gyroscope*.

Contoh aplikatif kombinasi *accelerometer* dan *gyroscope* yaitu pada perangkat *iPhone* yang mengkombinasikan 2 sensor tersebut. Hal tersebut sangat membuat nyaman para pengguna dalam hal pendeteksian sensitivitas gerakan. Dari kombinasi *accelerometer* dan *gyroscope* didapatkan 6 sumbu pendeteksian yaitu 3 sumbu rotasi (x,y,z) dan 3 sumbu linier (atas-bawah, kanan-kiri, depan-belakang). Output dari kombinasi sensor ini berupa gambar yang sangat detail dan halus gerakannya dibandingkan dengan *smartphone* yang hanya menggunakan *accelerometer* saja.

Salah satu IC kombinasi *accelerometer* dan *gyroscope* adalah IC MPU 6050 seperti pada gambar 2.3. MPU 6050 merupakan kombinasi sensor antara *accelerometer* dan *gyroscope* meskipun pada dasarnya ada sensor temperaturnya. Akses sensor ini menggunakan fitur *I2C microcontroller*.

Adapun fitur-fitur MPU 6050 ini antara lain:

1. Skala pengukuran *Accelerometer* yang dapat dipilih mulai 2/4/8 sampai 16g.
2. Skala pengukuran *Gyroscope* yang dapat dipilih mulai 250/500/1000 sampai 2000 degrees/s.
3. *Range* 16 bit untuk kedua sensor
4. Sensitivitas percepatan linier dari *Gyroscope* 0,1 derajat/s

Data rate output hingga 1000Hz, dilengkapi *digital low pass filter* dan memiliki frekuensi sudut maksimum 256Hz (Firman, 2016).



Gambar 2.3 Modul sensor MPU 6050 (Irawan, 2015).

## 2.6 Zigbee

Protokol komunikasi ZigBee terdiri atas beberapa dua sub stack dan satu application layer yang mendefinisikan bagian perangkat lunak modul. Stack pertama, didefinisikan berdasar pada karakteristik standarisasi perangkat keras oleh IEEE 802.15.4 termasuk lapisan fisik dan MAC (*Physical and Media Access Control layer*). Pada stack kedua dikembangkan oleh ZigBee Alliance dan termasuk dalam lapisan jaringan yang mendukung topologi penjaluran pilihan keamanan yang diadopsi oleh customer dalam bingkai yang disebut API (Arkan, 2014).

ZigBee/IEEE 802.15.4 adalah protokol jaringan nirkabel yang memiliki karakteristik yaitu daya dan data rate rendah, tingkat keamanan tinggi, selain bebas lisensi juga pengoperasiannya sangat mudah. Salah satu implementasi dari teknologi ZigBee adalah untuk sistem monitoring pada perumahan. Salah satu komponen yang menerapkan protokol ZigBee adalah Xbee seperti gambar 2.4 (Piyare, 2016).



Gambar 2.4 Modul Xbee komponen yang dikembangkan untuk menggunakan protokol Zigbee (Piyare, 2016)

## 2.7 Arduino Uno

Arduino UNO adalah sebuah board mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin digital input/output (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah power jack, sebuah ICSP header, dan sebuah

tombol reset. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya (Adriansyah, 2013).



Gambar 2.5 Arduino uno (Adriansyah, 2013)

## 2.8 *Fast Fourier Transform* (FFT)

*Fast Fourier Transform* (FFT) yang ditemukan tahun 1965 merupakan pengembangan dari *Fourier Transform* (FT). Penemu FT adalah Jean Baptiste Joseph Fourier pada tahun 1822. FT membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial kompleks dan trigonometri. Definisi FFT adalah metode yang sangat efisien untuk menghitung koefisien dari Fourier diskrit ke suatu urutan terbatas dari data yang kompleks. Karena substansi waktu yang tersimpan lebih dari pada metode konvensional, FFT merupakan aplikasi temuan yang penting didalam sejumlah bidang yang berbeda seperti analisis spektrum, *speech and optical signal processing*, serta desain filter digital.

Algoritma FFT berdasarkan atas prinsip pokok dekomposisi perhitungan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dari suatu sekuen sepanjang N kedalam transformasi diskrit Fourier secara berturut-turut lebih kecil. Cara prinsip ini diterapkan ke arah suatu variasi dari algoritma yang berbeda, di mana semuanya memperbandingkan peningkatan kecepatan perhitungan. FFT adalah suatu algoritma untuk menghitung transformasi fourier diskrit dengan cepat dan efisien. Karena banyak sinyal-sinyal dalam sistem komunikasi yang bersifat kontinu, sehingga untuk kasus sinyal kontinu kita gunakan transformasi fourier. FFT merupakan salah satu metode untuk transformasi sinyal suara dalam domain waktu menjadi sinyal dalam domain frekuensi, artinya proses perekaman suara disimpan dalam bentuk digital berupa gelombang spektrum suara yang berbasis frekuensi



sehingga lebih mudah dalam menganalisa spectrum frekuensi suara yang telah direkam (Sipasulta,2014).

FFT adalah sebuah algoritma untuk mengkomputasi sebuah DFT secara lebih cepat. Ketika ada sebuah sinyal diskrit yang periodik maka tidak dibutuhkan *Continues Fourier Transform* (CFT), yang kita gunakan adalah DFT. Dasar dari FFT adalah DFT jika ada sebuah fungsi  $f(x)$  yang periodic, dengan periode  $2\pi$  dan diasumsikan bahwa  $N$  adalah jumlah dari  $f(x)$  dimana nilai  $x$  diambil dari interval  $0 \leq x \leq 2\pi$ . Maka didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$x_k = \frac{2\pi k}{N} \quad (2.10)$$

dimana  $k = 0, 1, N-1$ . Kemudian persamaan DFT adalah sebagai berikut.

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-inx_k} \quad (2.11)$$

DFT membutuhkan  $N^2$  pengoperasian yang dimana memakan waktu yang sangat lama. Permasalahan ini bisa diatasi dengan adanya FFT dimana FFT hanya membutuhkan  $N \log_2 N$ . Cara mempercepat DFT adalah dengan memanfaatkan sifat periodik dari gelombang sinus dimana persamaan 2.10 dibagi menjadi ganjil dan genap. Perubahan ganjil dan genap menyebabkan nilai dari  $N$  berubah menjadi  $m = N/2$ , sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$F_{k,odd} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n} e^{-\frac{i2\pi k(2n)}{N/2}} \quad (2.12)$$

$$F_{k,even} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n+1} e^{-\frac{i2\pi k(2n+1)}{N/2}} \quad (2.13)$$

$F_{k,odd}$  adalah persamaan untuk nilai  $N$  yang ganjil sedangkan  $F_{k,even}$  untuk nilai  $N$  yang bernilai genap (Kreyszig, 2011).

## 2.9 Penelitian Sebelumnya

Berikut adalah hasil rangkuman dari penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

| Peneliti               | Judul   | Metode  | Hasil  |
|------------------------|---|---|--|
| Neville et al, 2010    | <i>Accelerometers: An Underutilized Resource in Sport Monitoring</i>              | Menggunakan sensor accelerometer tracking unit yang dikenakan atlet | Didapatkan hubungan yang linear antara kecepatan dan frekuensi langkah kaki dengan didapatkan nilai $R^2=0.820$ ketika berjalan dan $R^2=0.838$ ketika berlari |
| Montgomery et al, 2010 | <i>Quantifying Movement demands of AFL Football Using GPS Tracking</i>            | Menggunakan GPS yang dipasang pada rompi latihan                    | GPS bisa digunakan untuk mengukur kecepatan lari dengan tingkat akurasi yang baik dengan tingkat <i>error</i> 1% sampai 5%                                     |
| Arvidsson et al, 2019  | <i>Measurement of Physical Activity in Clinical Practice Using Accelerometers</i> | Accelerometer dipasang pada paha, pergelangan tangan dan pinggang   | Data percepatan yang didapat dari pinggang, paha dan pergelangan tangan dapat digunakan untuk menentukan intensitas aktivitas, posisi badan dan tipe aktivitas |
| Li et al, 2009         | <i>Walking Speed Estimation Using a Shank-Mounted Inertial</i>                    | Alat dipasang pada betis dan berjalan dengan                        | Pengukuran dilakukan dengan mensikluskan gelombang langkah kaki yang didapatkan melalui  |

*Measurement* kecepatan data *gyroscope*.  
*Unit* divariasikan Sehingga hasil yang  
didapatkan estimasi  
*error* rata-ratanya  
adalah 7%

---



[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)