

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. Metode penelitian**

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimen murni. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui pengaruh frekuensi medan eksitasi terhadap karakteristik keluaran sensor seperti sensitivitas, dan daerah kelinieran. Hasil dari eksperimen ini adalah berupa grafik hubungan tegangan terhadap medan magnet (V-B) untuk masing-masing frekuensi medan eksitasi yang berbeda-beda.

#### **3.2. Lokasi Penelitian**

Penelitian yang meliputi kegiatan perancangan dan pembuatan sistem sensor, rangkaian eksitasi, dan rangkaian pengolah sinyal dilakukan di laboratorium elektronika FPMIPA UPI. Sedangkan pengujian sensor dilakukan di Pusat Pengembangan Elektronika dan Telekomunikasi (PPET) LIPI.

#### **3.3. Alat dan Bahan**

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah

- a. Sensor magnetik *fluxgate*
- b. 1 Set rangkaian pengolah analog sensor
- c. Kumparan solenoida
- d. Magnetometer acuan (gauss meter)
- e. Sumber arus DC
- f. Multimeter

### **3.4. Langkah Penelitian**

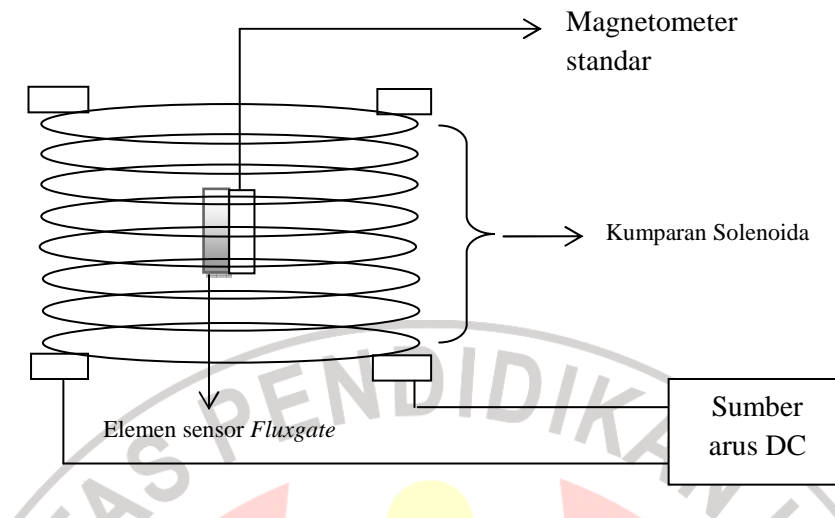
#### **3.4.1. Persiapan**

Tahap awal yang dilakukan pada penelitian ini adalah kajian literatur dan teoritis tentang prinsip dasar dari sensor magnetik *fluxgate*. Kemudian tahap selanjutnya ialah tahap perancangan dan pembuatan sensor dengan teknik (*print circuit board*) PCB. Pada tahap ini penulis mulai merancang elemen sensor dan membuat rangkaian analog sensor yang meliputi Rangkaian eksitasi dan rangkaian pengolah sinyal.

#### **3.4.2. Pelaksanaan**

Karakterisasi bertujuan untuk mengetahui respon keluaran sensor terhadap medan magnet. Karakterisasi dilakukan pada sensor dengan cara memberikan medan magnet DC secara monoton melalui pemberian arus DC pada kumparan solenoida.

Pelaksanaan karakterisasi dilakukan melalui skema eksperimen sebagai berikut



**Gambar 3.1** Skema Pengujian

Sumber medan magnet berupa kumparan diletakan tegak lurus terhadap permukaan bumi. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir medan magnet bumi. Kemudian untuk tata letak bagian sensor yang berfungsi untuk menangkap medan magnet luar, disesuaikan dengan arah medan yang dihasilkan solenoida. Sehingga sensor dapat menangkap medan magnet yang dihasilkan kumparan.

Sebelum dilakukan pengujian sensor fluxgate, mula-mula dilakukan proses inisialisasi sumber medan magnet berupa kumparan solenoida. Inisialisasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan terhadap pemberian arus listrik. Inisialisasi dilakukan dengan cara menempatkan magnetometer acuan ditengah kumparan solenoida. Medan magnet yang berada di tengah daerah kumparan solenoida berasal dari pemberian arus listrik DC. Medan magnet ini kemudian diukur oleh magnetometer acuan.

Pengujian sensor dilakukan setelah tahapan inisialisasi selesai. Pengujian sensor dilakukan dengan cara menempatkan sensor pada titik / tempat yang sama dengan magnetometer acuan yang diinisialisasi. Hal ini bertujuan agar sensor mendapatkan perlakuan medan magnet yang sama oleh kumparan. Pengujian dilakukan dengan pemberian medan magnet secara bertahap pada sensor untuk setiap frekuensi eksitasi yang berbeda.

### **3.4.3. Pengujian**

#### **1. *Inisialisasi Sumber Medan Magnet***

Sebelum dilakukan pengujian maka terlebih dahulu dilakukan proses inisialisasi terhadap kumparan *solenoida* dan lingkungan (tempat pengukuran). Inisialisasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan *solenoida* dan yang berasal dari lingkungan.

Inisialisasi dilakukan dengan cara memberikan arus listrik pada kumparan *solenoida* secara bertahap sehingga menghasilkan medan magnet yang bervariasi. Medan magnet ini kemudian diukur oleh magnetometer acuan. Hasil pengujian ini kemudian di-plot ke dalam grafik hubungan antara arus listrik terhadap medan magnet.

Hasil inisialisasi ini menghasilkan fungsi transfer / persamaan yang menyatakan hubungan antara arus listrik yang diberikan dengan medan magnet yang terukur  $B(I)$ . Persamaan ini mepresentasikan akumulasi dari semua faktor yang mempengaruhi medan magnet di titik / tempat tersebut.

## 2. *Pengujian Sensor fluxgate*

Pengujian terhadap sensor *fluxgate* dilakukan dengan menempatkan sensor *fluxgate* di tengah kumparan solenoida. Medan magnet diberikan melalui pemberian arus listrik pada kumparan solenoida. Nilai medan magnet yang dihasilkan kumparan solenoida ini dihitung berdasarkan nilai arus listrik yang diberikan dengan menggunakan fungsi transfer yang telah diperoleh sebelumnya (melalui inialisasi kumparan) dan tegangan keluaran berasal dari sensor *fluxgate*.

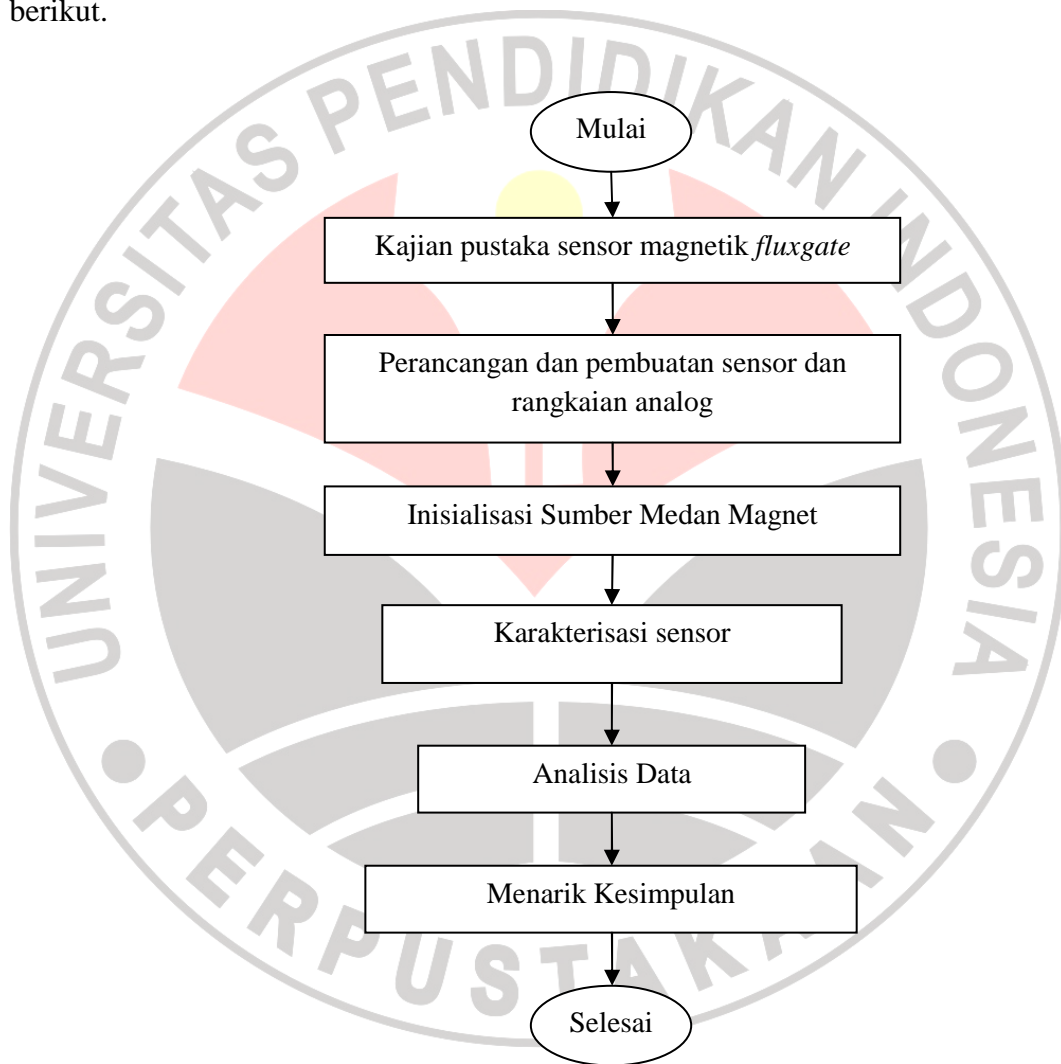
Dalam pengujian ini variabel yang diukur secara langsung adalah arus listrik kumparan solenoida dan tegangan keluaran sensor *fluxgate*. Medan magnet dihitung menggunakan fungsi transfer hubungan B terhadap I. Pengukuran Arus dan tegangan dilakukan secara berulang untuk masing-masing nilai frekuensi yang berbeda. Sedangkan variabel yang diukur secara tidak langsung merupakan parameter karakteristik sensor meliputi sensitivitas, dan daerah kelinieran yang diperoleh dari analisis grafik hubungan antara medan magnet dan tegangan keluaran.

### 3.5. **Diagram Alur Penelitian**

Diagram Alur penelitian menggambarkan secara keseluruhan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini diawali dengan kajian pustaka dan teoritis tentang sensor *fluxgate*, kemudian dilanjutkan dengan tahapan perancangan elemen sensor dan pembuatan rangkaian elektronik. Setelah ini selesai dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah tahapan

pengujian, bertujuan untuk mengamati karakteristik keluaran sistem keseluruhan. Tahap terakhir adalah tahap analisis terhadap hasil pengujian dan menarik kesimpulan.

Adapun diagram alur keseluruhan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

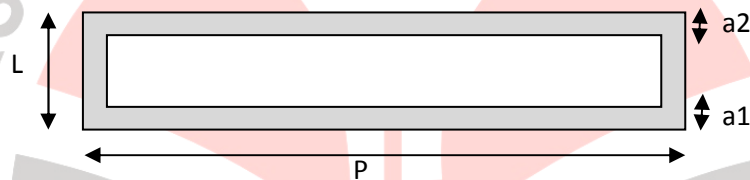


**Gambar 3.2** Diagram Alur Penelitian

### 3.6. Desain Elemen Sensor

Elemen sensor yang dirancang terdiri dari inti feromagnetik dan sistem lilitan kawat. Material inti yang digunakan pada penelitian ini adalah material inti yang dikenal dengan nama dagang *kern*. Inti ini memiliki massa jenis  $6,19 \text{ g/cm}^3$ , permeabilitas relatif 16, gaya koersif  $130 \text{ A/m}$ , dan medan saturasi  $0,04 \text{ T}$ . Selain itu bahan ini mudah didapat dan harganya sangat murah.

Inti yang digunakan berbentuk pita yang memiliki konstruksi dan dimensi seperti pada gambar



**Gambar 3.3** Desain Inti

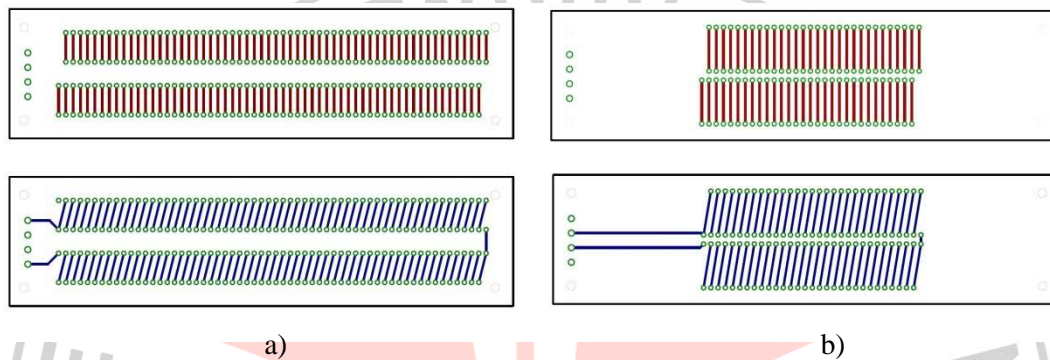
Dengan  $P = 8,15 \text{ cm}$ ,  $L = 1,196 \text{ cm}$ ,  $a1 = 0,277 \text{ cm}$ ,  $a2 = 0,301 \text{ cm}$ , dan tebal =  $0,0601 \text{ cm}$ . Inti feromagnetik dirancang membentuk loop tertutup. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi reduksi aliran medan magnet yang dihasilkan inti keluar sistem rangkaian magnet.

Untuk membuat sistem lilitan kawat maka digunakan teknologi PCB. Di mana jalur-jalur (*track*) pada PCB dirancang untuk menggantikan sistem lilitan kawat konvensional. Teknik ini memiliki kelebihan diantaranya memiliki luas penampang yang besar, ukuran kecil, dan mudah diproduksi secara massal.

Pada pembuatan sistem lilitan kawat sensor, digunakan 4 lapis PCB dengan ukuran masing-masing  $88,26 \times 22,54 \text{ mm}$ . Sepasang lapis PCB untuk

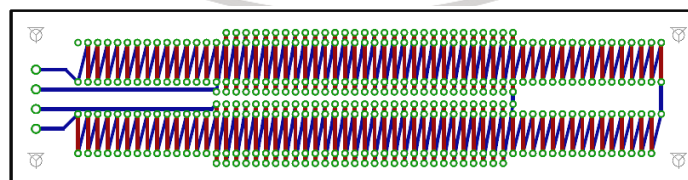
membuat konfigurasi lilitan eksitasi dan sepasang lainnya untuk lilitan *pick-up*. Jumlah lilitan eksitasi dibuat  $60 \times 2$  lilitan sedangkan lilitan *pick-up* dibuat  $30 \times 2$  lilitan.

Adapun desain PCB yang dibuat pada sensor ini, tampak seperti pada gambar di bawah



**Gambar 3.4** Desain PCB a). Lilitan eksitasi, b). Lilitan *pick-up*

Keempat lapis PCB kemudian ditumpuk. Mula-mula inti diimpit oleh sepasang lapis eksitasi. Pastikan tidak ada lubang yang tertutup, kemudian hubungkan antar lubang dengan kawat. Setelah itu (inti, dan 2 lapis eksitasi) secara bersama-sama, diimpit oleh sepasang lapis *pick-up*. Kemudian hubungkan lubang pada lapisan *pick-up* melalui kawat. Sehingga keseluruhan elemen sensor akan tampak seperti pada gambar 3.5 dengan inti berada didalamnya.



**Gambar 3.5** Desain Elemen Sensor dengan Teknik PCB



Sistem tumpuk lapisan PCB ini dilakukan agar Kumparan *pick-up* dapat menangkap medan magnet *homogen* yang dihasilkan oleh kumparan eksitasi dan inti secara langsung. Selain itu keuntungan yang diperoleh adalah penampang kumparan *pick-up* menjadi lebih luas.

Sensor yang telah dibuat menggunakan teknik PCB ini memiliki dimensi dan karakteristik listrik, seperti yang tertera pada tabel 3.1

**Tabel 3.1** Spesifikasi Sensor

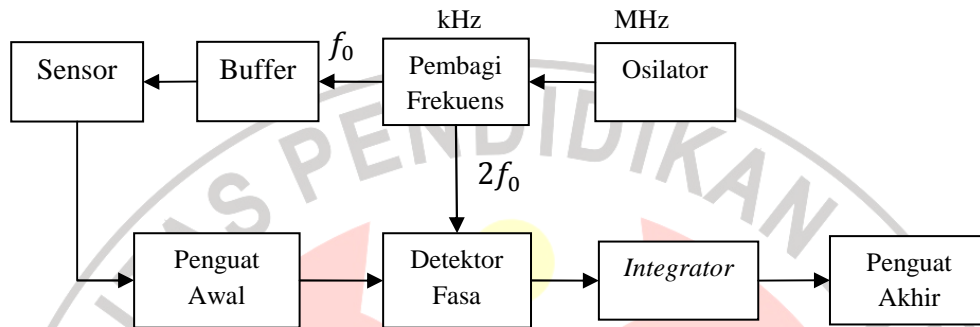
|                  | Dimensi total | Eksitasi    | <i>Pick up</i> |
|------------------|---------------|-------------|----------------|
| N lilitan        |               | 60          | 30             |
| Panjang (mm)     | 88,265        | 2 × 74,93   | 2 × 38,1       |
| Lebar (mm)       | 22,542        | 2 × 5,08    | 2 × 7,62       |
| t (mm)           | 4,5           |             |                |
| n (lilitan/m)    |               | 800,7473642 | 787,4015748    |
| R (ohm)          |               | 4,4         | 3,7            |
| Induktansi (mH)  |               | 0,017       | 0,002          |
| kapasitansi (uF) |               | 0,002       | 1,13           |

### 3.7. Pembuatan Rangkaian Elektronik Sensor

Elemen sensor dan rangkaian elektronika sensor *fluxgate* merupakan keseluruhan sistem yang terintegrasi. Rangkaian elektronik sensor *fluxgate* terdiri dari rangkaian eksitasi dan rangkaian pengolah sinyal. Sensor *fluxgate* tidak dapat bekerja tanpa adanya rangkaian eksitasi dan sinyal yang dihasilkan oleh sensor, perlu diolah terlebih dahulu melalui rangkaian pengolah sinyal.

Rangkaian eksitasi berfungsi sebagai pembangkit gelombang medan eksitasi. Rangkaian ini terdiri dari osilator, pembagi frekuensi, dan *buffer*.

Sedangkan rangkaian pengolah sinyal terdiri dari penguat awal, detektor fasa, *integrator* dan penguat akhir. Keseluruhan sistem rangkaian ini dapat ditunjukkan melalui diagram blok pada gambar 3.6



**Gambar 3.6** Sistem Rangkaian Elektronik Sensor *Fluxgate*

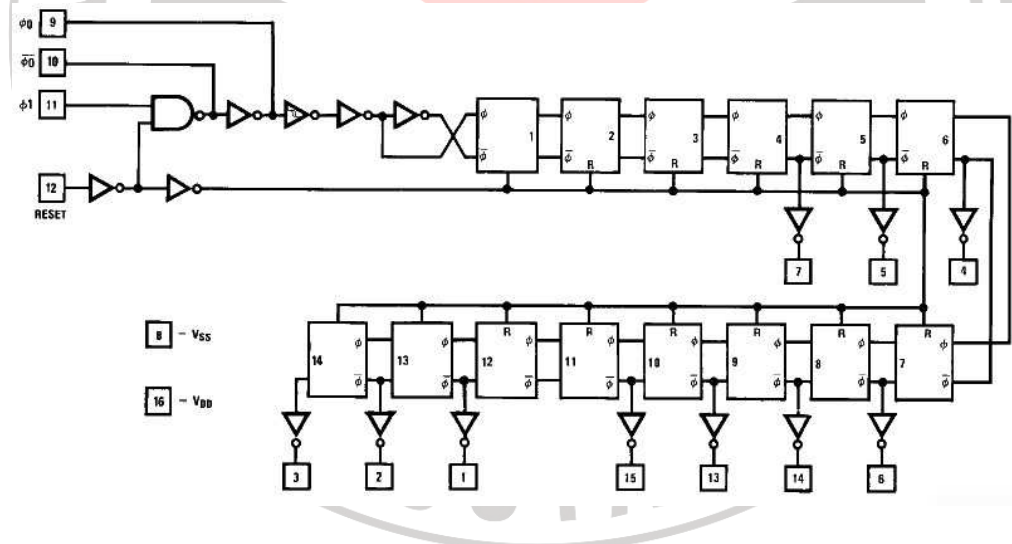
Osilator menghasilkan gelombang kotak yang memiliki frekuensi dengan orde MHz. Frekuensi ini kemudian dibagi oleh rangkaian pembagi frekuensi menghasilkan frekuensi  $f_0$  dan  $2f_0$  yang berorde kHz. Frekuensi  $f_0$  yang terlebih dahulu melalui buffer digunakan untuk membangkitkan sensor. Keluaran sensor yang berupa gelombang sinusoidal kemudian dikuatkan oleh penguat awal. Rangkaian penguat awal terdiri dari pengubah tegangan dan *differensiator*. Kemudian sinyal diteruskan ke detektor fasa. Detektor fasa berfungsi untuk meneruskan sinyal dengan fasa kelipatan  $2\pi$ . Sehingga keluaran dari rangkaian ini berupa sinyal yang telah disearahkan. Sinyal yang telah disearahkan ini kemudian diratakan oleh rangkaian *integrator* menjadi sinyal DC. Terakhir sinyal DC ini dikuatkan oleh rangkaian penguat akhir dalam bentuk rangkaian penguat *non-inverting*.

### 3.8. Rangkaian Eksitasi

#### 3.8.1. Osilator dan Pembagi frekuensi

Pada rangkaian analog sensor, osilator merupakan rangkaian dasar yang sangat penting. Hal ini disebabkan karena stabilitas dari frekuensi medan yang dihasilkan tergantung pada stabilitas osilator. Untuk mendapatkan kestabilan maka digunakan kristal.

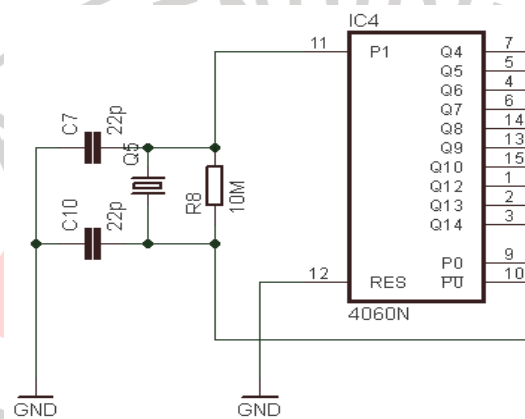
Osilator berfungsi sebagai penghasil sinyal eksitasi yang akan diberikan pada lilitan eksitasi. Kristal yang dirangkai dengan IC CD4060, berfungsi sebagai pembangkit sinyal sekaligus sebagai pembagi frekuensi sinyal kotak. IC ini dapat membagi frekuensi kristal menjadi  $2^4$ ,  $2^5$ ,  $2^6$ ,  $2^7$ ,  $2^8$ ,  $2^9$ ,  $2^{10}$ ,  $2^{12}$ ,  $2^{13}$ , dan  $2^{14}$ .



Gambar 3.7 Diagram Skematik IC 4060

Frekuensi gelombang eksitasi yang digunakan pada rangkaian eksitasi adalah frekuensi dengan orde kHz, sedangkan kristal yang digunakan berorde MHz. Maka frekuensi yang dihasilkan oleh kristal harus dibagi oleh IC 4060

sehingga menghasilkan frekuensi  $f_0$  yang berorde kHz. Selain itu frekuensi ini juga dibagi dengan pembagi D flip-flop sehingga menghasilkan frekuensi  $2f_0$ , frekuensi ini nantinya diperlukan pada rangkaian pengolah sinyal. Keseluruhan Rangkaian osilator dan pembagi frekuensi dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.8



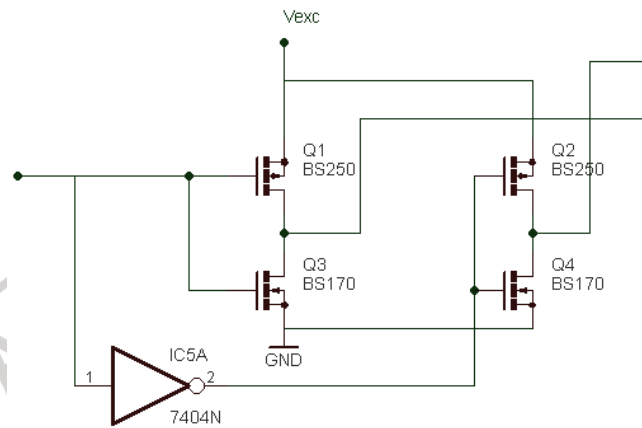
**Gambar 3.8** Osilator dan Pembagi frekuensi

### 3.8.2. Rangkaian penyangga (*buffer*)

Rangkaian penyangga berfungsi untuk menstabilkan sinyal keluaran yang berasal dari rangkaian sebelumnya agar dapat diteruskan. Rangkaian *buffer* yang ideal memiliki penguatan satu dengan impedansi masukan yang sangat besar dan impedansi keluaran yang sangat kecil.

Pada penelitian ini digunakan MOSFET sebagai rangkaian *buffer*. Untuk menguatkan arus sebelum sinyal masuk ke dalam MOSFET, terlebih dahulu sinyal dilewatkan pada 6 gerbang NOT dari IC 7404 yang dirangkai secara paralel. Selanjutnya sinyal tersebut dilewatkan pada dua transistor MOSFET yang

berbeda tipe, n-MOS dan p-MOS, di mana dua MOSFET ini berfungsi sebagai CMOS *inverter*.

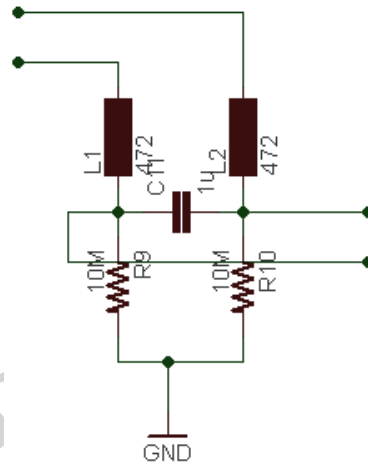


**Gambar 3.9** Rangkaian *Buffer*

Rangkaian di atas menggunakan prinsip logika. Keluaran dari rangkaian *buffer* berbentuk sinyal kotak. Rangkaian logika ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan TTL karena memiliki daya disipasi yang lebih rendah serta arus keluaran yang lebih tinggi, sehingga rangkaian ini cocok sebagai *buffer*.

### 3.8.3. Pembangkit Eksitasi

Pembangkit sinyal eksitasi merupakan bagian yang penting dalam rangkaian eksitasi. Sinyal eksitasi harus memiliki tegangan yang cukup untuk menggerakkan lilitan eksitasi, ini diperlukan agar sinyal dapat mensaturasi inti . Rangkaian pembangkit sinyal eksitasi ini terdiri dari induktor, kapasitor, dan resistor, seperti pada gambar 3.10



**Gambar 3.10** Rangkain Eksitasi

Selain sebagai pembangkit eksitasi, rangkaian ini juga berfungsi untuk mengubah sinyal masukan yang berbentuk kotak menjadi sinyal sinusoidal. Hal ini terjadi karena pada dasarnya rangkaian ini merupakan rangkaian LR. Kapasitor yang digunakan berfungsi sebagai penghalang arus searah yang mungkin mengalir ke dalam rangkaian eksitasi. Hal ini memungkinkan karena sifat kapasitor yang hanya dapat melewatkan arus bolak-balik.

### 3.9. Rangkaian Pengolah Sinyal

#### 3.9.1. Penguat Awal

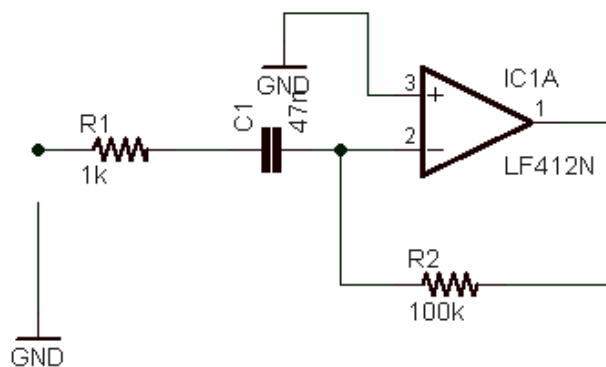
Sinyal yang dihasilkan oleh sensor, merupakan sinyal yang merepresentasikan medan magnet yang diukur. Sinyal ini berbentuk gelombang sinusoidal dan masih sangat lemah hingga berorde di bawah mV. Oleh karena itu sinyal ini perlu diperkuat terlebih dahulu oleh penguat awal.

Sebelum dilewatkan pada rangkaian penguat awal, terlebih dahulu sinyal dilewatkan pada resistor penyangga. Tujuan dari resistor penyangga ini untuk mengkonversi arus yang berasal dari lilitan *pick-up*, menjadi tegangan. Selanjutnya sinyal dilewatkan pada rangkaian penguat awal yang merupakan rangkaian *differensiator* / tapis lolos tinggi. Rangkaian ini berfungsi sebagai pendiferensial sinyal sekaligus sebagai penguat sinyal berfrekuensi tinggi.

Rangkaian ini memiliki frekuensi *cut-off*

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

Karena  $f_{cutoff} \ll f_0$  (frekuensi sinyal), maka rangkaian ini berfungsi sebagai rangkaian pendiferensial.



**Gambar 3.11** Rangkaian Penguat Awal

Penguatan pada rangkaian *differensiator* ini sesuai dengan persamaan

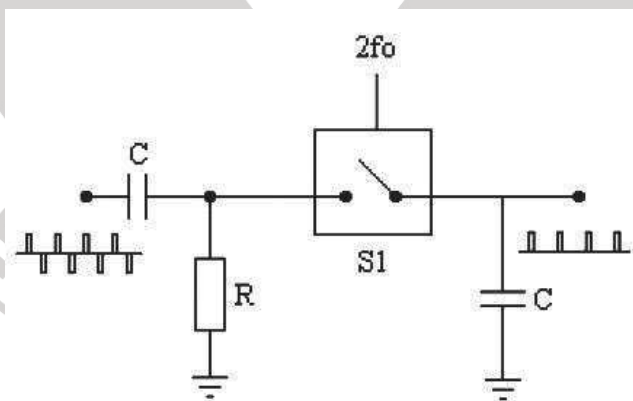
$$V_{out} = RC \frac{dV_{in}}{dt} \quad (3.2)$$

Untuk menjaga kestabilan sinyal yang akan masuk ke rangkaian selanjutnya maka keluaran dari rangkaian *differensiator* ditambahkan sebuah *buffer*.

### 3.9.2. Detektor Fasa

Rangkaian detektor fasa berfungsi sebagai penyearah sinyal AC dengan cara meloloskan sinyal yang sefasa atau yang memiliki fasa kelipatan  $2\pi$  dan seterusnya. Hal ini berarti detektor fasa berfungsi meneruskan sinyal yang mengandung harmonisasi genap menggunakan frekuensi dari osilator  $2f_0$  sebelumnya, sebagai pengendali. Sehingga sinyal yang keluar dari detektor fasa dapat berupa sinyal positif atau negatif

Rangkaian detektor fasa terdiri dari sebuah *differensiator* dan sebuah saklar analog. Saklar analog ini dikendalikan oleh frekuensi  $2f_0$ , yang berasal dari osilator. Salah satu IC yang memiliki saklar adalah CD4053.



**Gambar 3.12** Detektor Fasa



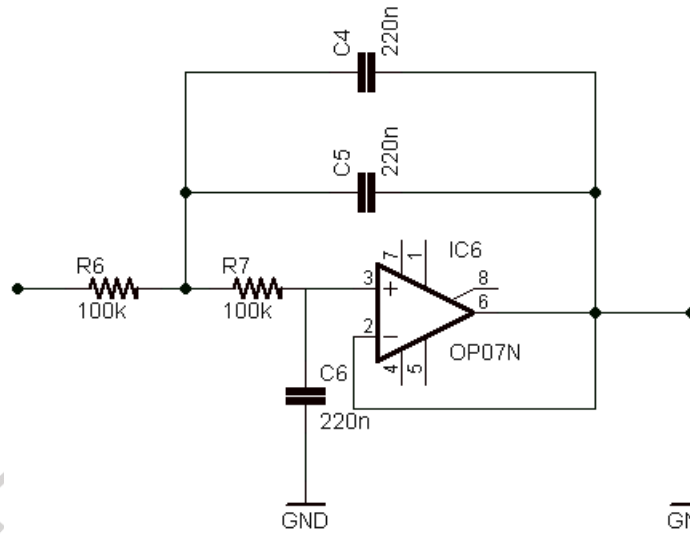
Kemudian sinyal yang keluar dari detektor fasa dimasukkan ke dalam *buffer* kembali agar sinyal tidak lemah. Keluaran *buffer* kemudian dimasukkan ke dalam tapis lolos rendah.

### 3.9.3. *Integrator*

Rangkaian *integrator* berfungsi sebagai pengintegral sinyal masukan sekaligus sebagai tapis lolos rendah. Jika domain yang digunakan adalah domain frekuensi maka ia berfungsi sebagai tapis, namun jika domain waktu yang digunakan maka rangkaian tersebut berfungsi sebagai *integrator*.

Berdasarkan komponen yang digunakan, ada dua macam *integrator*, yaitu pasif dan aktif. *Integrator* pasif menggunakan komponen pasif yaitu kapasitor dan resistor saja. Sedangkan *integrator* aktif menggunakan penguat operasional di samping menggunakan kapasitor dan resistor.

Tapis lolos rendah *Sallen Key* tipe *Butterworth* merupakan tapis lolos rendah aktif dan juga pengembangan dari tapis lolos rendah pasif. Penggunaan tapis lolos rendah *Sallen Key* tipe *Butterworth* orde dua ini memiliki keunggulan, diantaranya adalah penguatan sinyal pada frekuensi di atas frekuensi kutub adalah -20 dB, dan keluarannya yang stabil. Rangkaian tapis lolos rendah *Sallen Key* orde dua yang buat, tampak seperti pada gambar 3.13

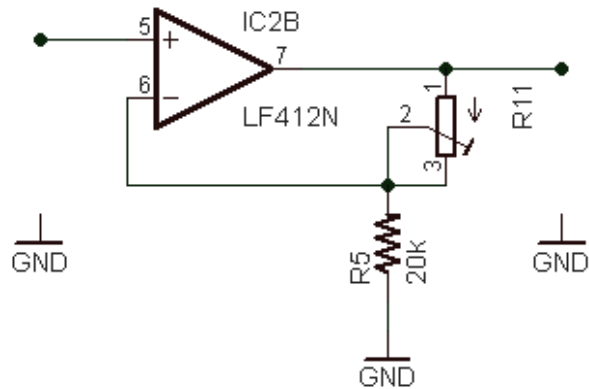


**Gambar 3.13** Rangkaian Tapis Lolos Rendah

Frekuensi kutub yang dibuat sangat kecil bila dibandingkan dengan frekuensi pulsa  $f_0$ , sehingga rangkaian tapis ini berfungsi sebagai *integrator*. Maka setelah melalui rangkaian ini, sinyal yang berasal dari detektor fasa akan mengalami proses perubahan menjadi sinyal DC.

#### 3.9.4. Penguat Akhir

Tegangan DC yang berasal dari *integrator* perlu dikuatkan oleh rangkaian penguat akhir. Rangkaian penguat yang digunakan merupakan rangkaian penguat *non inverting*. Sehingga sinyal keluaran memiliki fasa yang sama dengan sinyal masukan. Rangkaian penguat yang digunakan, tampak seperti pada gambar 3.14



**Gambar 3.14** Rangkaian Penguat Akhir

Berdasarkan gambar, rangkaian tersebut memiliki faktor penguatan  $G$ , di mana

$$G = \frac{R_5 + VR}{R_5} \quad (3.3)$$

Dengan  $VR$  merupakan variabel resistor yang dapat diatur.

Keseluruhan bagian yang telah dirangkai, bekerja secara analog. Keluaran yang diperoleh dari keseluruhan rangkaian ini berupa tegangan analog yang merepresentasikan besar medan magnet yang dideteksi.