

Rancang Bangun Sensor Kapasitif Dua Plat Tembaga untuk Mengukur Viskositas Minyak

Difa Raditya Dwitama^{*1}, Maulana Fadhilah Gunawan², Annisa Rahmadhani³, Reni Rahmadewi⁴, Indri Purwita Sary⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Indonesia

Email: ¹2210631160034@student.unsika.ac.id, ²2210631160011@student.unsika.ac.id, ³2210631160029@student.unsika.ac.id, ⁴reni.rahmadewi@staff.unsika.ac.id, ⁵indri@ft.unsika.ac.id

Abstrak

Minyak merupakan fluida yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari maupun industri, namun kualitasnya dapat menurun akibat pemakaian berulang yang ditandai oleh peningkatan viskositas. Pengukuran viskositas secara konvensional menggunakan viskometer dinilai kurang praktis untuk kebutuhan pemantauan secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem sensor kapasitif berbasis dua plat tembaga sejajar sebagai pendekatan alternatif dalam mengukur viskositas minyak secara tidak langsung melalui analisis perubahan kapasitansi dan respon frekuensi sensor. Sistem yang dikembangkan terdiri atas rangkaian astable multivibrator berbasis IC 555, rangkaian F-V converter berbasis IC LM331, serta rangkaian amplifier non-inverting berbasis IC LM358 sebagai pengkondisi sinyal sebelum diolah oleh mikrokontroler ESP32. Pengujian dilakukan pada lima jenis fluida pada suhu konstan 30°C, meliputi minyak murni, minyak filtrasi, minyak jelantah, oli 10W-30W, dan oli 20W-50W. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan viskositas fluida menyebabkan penurunan frekuensi keluaran sensor dari 55,56 kHz menjadi 53,94 kHz. Sistem mampu mengestimasi viskositas pada rentang 57–219 cP dengan sensitivitas frekuensi rata-rata sebesar 0,010 kHz/cP. Rata-rata deviasi hasil estimasi terhadap nilai referensi literatur berada pada rentang 4–8%. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pemanfaatan sensor kapasitif dua plat tembaga sederhana yang dikombinasikan dengan astable multivibrator dan F-V converter sebagai metode alternatif pengukuran viskositas berbiaya rendah yang mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler.

Kata kunci: *Astable Multivibrator, F-V Converter, Mikrokontroler, Sensor Kapasitif, Viskositas Minyak.*

Design Of A Two-Copper-Plate Capacitive Sensor For Measuring Oil Viscosity

Abstract

Oil is a fluid widely used in both household and industrial applications; however, its quality may deteriorate due to repeated usage, which is commonly indicated by an increase in viscosity. Conventional viscosity measurement using viscometers is considered less practical for real-time monitoring applications. This study aims to design a capacitive sensor system based on two parallel copper plates as an alternative approach for indirectly measuring oil viscosity through the analysis of capacitance variations and sensor frequency response. The developed system consists of an IC 555-based astable multivibrator circuit, an LM331-based frequency-to-voltage (F-V) converter circuit, and an LM358-based non-inverting amplifier circuit for signal conditioning before processing by an ESP32 microcontroller. Experiments were conducted on five types of fluids at a constant temperature of 30°C, namely fresh cooking oil, filtered oil, waste cooking oil, SAE 10W-30 engine oil, and SAE 20W-50 engine oil. The results showed that an increase in fluid viscosity caused the sensor output frequency to decrease from 55.56 kHz to 53.94 kHz. The proposed system was able to estimate viscosity within the range of 57–219 cP, with an average frequency sensitivity of 0.010 kHz/cP. The average deviation between the estimated viscosity values and literature reference values ranged from 4% to 8%. The main contribution of this study lies in the utilization of a simple two-parallel-copper-plate capacitive sensor combined with an astable multivibrator and an F-V converter as a low-cost alternative method for viscosity measurement that can be easily integrated with microcontroller-based systems.

Keywords: *Astable Multivibrator, Capacitive Sensor, F-V Converter, Microcontroller, Oil Viscosity.*

1 PENDAHULUAN

Minyak merupakan salah satu fluida yang sering digunakan dalam berbagai sektor, baik pada bidang rumah tangga maupun industri. Dalam penggunaannya, minyak sering mengalami pemakaian berulang, terutama pada minyak goreng, sehingga kualitasnya akan menurun seiring waktu. Penurunan kualitas ini umumnya ditandai oleh perubahan sifat fisik seperti warna, bau, serta peningkatan viskositas. Viskositas merupakan parameter penting karena berkaitan langsung dengan tingkat kekentalan dan karakteristik aliran fluida [1]. Viskositas dapat digunakan sebagai indikator untuk menilai kondisi dan kualitas minyak.

Peningkatan viskositas pada minyak umumnya disebabkan oleh proses degradasi seperti oksidasi dan polimerisasi akibat pemanasan berulang. Proses ini menyebabkan terbentuknya senyawa baru yang meningkatkan kekentalan minyak secara signifikan. Kondisi tersebut tidak hanya memengaruhi performa minyak, tetapi juga berpotensi berdampak pada kesehatan apabila digunakan secara terus-menerus [2]. Oleh karena itu, diperlukan metode pengukuran viskositas yang praktis dan mampu memberikan informasi secara cepat. Hal ini menjadi penting dalam mendukung proses pemantauan kualitas minyak secara berkelanjutan.

Metode konvensional dalam pengukuran viskositas umumnya menggunakan viskometer, baik tipe kapiler maupun rotasional. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang tinggi, metode ini cenderung kurang praktis karena memerlukan prosedur pengujian yang cukup kompleks. Selain itu, waktu pengukuran yang relatif lama menjadi kendala dalam penerapan sistem *monitoring* secara *real-time*. Seiring dengan perkembangan teknologi, berbagai penelitian mulai mengembangkan metode alternatif berbasis sensor untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Salah satunya menunjukkan bahwa sensor berbasis mikrokontroler dapat digunakan untuk mengukur viskositas minyak secara digital dengan hasil yang cukup representatif.

Pengembangan sistem *monitoring* kualitas minyak juga telah dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai sensor dalam sistem berbasis *Internet of Things* (IoT). Pendekatan ini memungkinkan pemantauan kondisi minyak dilakukan secara *real-time* dan berkelanjutan. Sistem berbasis sensor memberikan keunggulan dalam hal kepraktisan serta kemudahan integrasi dengan perangkat elektronik [3]. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi sensor memiliki potensi besar untuk menggantikan metode pengukuran manual. Pengembangan sensor yang sederhana dan efektif menjadi hal yang penting untuk diteliti.

Di sisi lain, sensor kapasitif merupakan salah satu jenis sensor yang dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan sifat listrik suatu bahan. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan nilai kapasitansi yang dipengaruhi oleh permitivitas bahan dielektrik di antara dua elektroda. Minyak sebagai bahan dielektrik memiliki sifat yang dapat berubah seiring dengan kondisi dan tingkat degradasinya. Perubahan tersebut akan memengaruhi nilai kapasitansi yang dihasilkan oleh sensor. Sensor kapasitif berpotensi digunakan untuk mengukur kondisi minyak secara tidak langsung.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sensor kapasitif dapat digunakan untuk mengukur karakteristik fluida berdasarkan perubahan medium di antara elektroda. Nilai kapasitansi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jenis dan kondisi fluida yang diukur [4]. Selain itu, pendekatan sensor lain seperti sensor optik juga menunjukkan bahwa perubahan kualitas minyak dapat direpresentasikan melalui perubahan sinyal listrik. Hal ini memperkuat bahwa karakteristik listrik dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi minyak. Perubahan sifat listrik tersebut juga berkaitan dengan perubahan viskositas, sehingga nilai kapasitansi berpotensi digunakan sebagai parameter tidak langsung dalam pengukuran viskositas minyak.

Untuk mendukung implementasi sensor tersebut, diperlukan sistem pengolahan data yang mampu bekerja secara cepat dan efisien. Seiring dengan perkembangan teknologi sistem tertanam, penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 memungkinkan proses akuisisi dan pengolahan data sensor dilakukan *secara real-time*. Data yang diperoleh dari sensor dapat langsung diolah dan ditampilkan dalam bentuk informasi yang mudah dipahami. Hal ini menjadikan sistem lebih praktis dan aplikatif untuk berbagai kebutuhan *monitoring*. Integrasi sensor dengan mikrokontroler juga mendukung pengembangan sistem yang lebih portabel. Teknologi ini sangat relevan untuk diterapkan dalam penelitian.

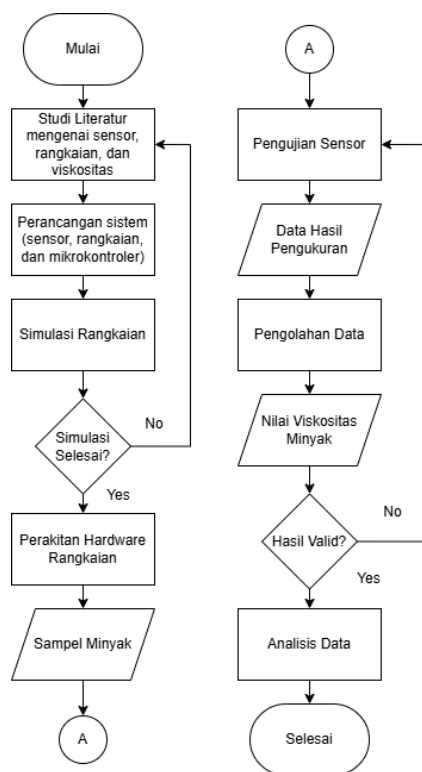
Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan sensor untuk pemantauan kualitas minyak, sebagian besar masih menggunakan sensor optik, sensor warna, maupun metode pengukuran langsung menggunakan viskometer digital. Penggunaan sensor kapasitif berbasis dua plat tembaga untuk mengestimasi viskositas minyak masih relatif terbatas, terutama pada konfigurasi sederhana yang dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler berbiaya rendah. Selain itu, kajian mengenai hubungan antara perubahan permitivitas dielektrik fluida, kapasitansi sensor, dan respon frekuensi osilator terhadap perubahan viskositas minyak masih belum banyak dilaporkan. Dibandingkan sensor optik maupun sensor warna yang memerlukan sistem pencahayaan dan kalibrasi yang lebih kompleks, sensor kapasitif dua plat tembaga memiliki konstruksi yang lebih sederhana, biaya implementasi yang lebih rendah, serta mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler. Oleh karena itu, pendekatan ini berpotensi menjadi alternatif untuk pengukuran karakteristik minyak secara praktis dan ekonomis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sensor kapasitif berbasis dua plat tembaga sebagai alat ukur viskositas minyak secara tidak langsung. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis hubungan antara perubahan kapasitansi, respon frekuensi sensor, dan viskositas minyak sebagai dasar pengembangan metode estimasi viskositas berbasis karakteristik dielektrik fluida. Penelitian dibatasi pada perancangan sensor, integrasi dengan mikrokontroler, serta pengujian pada sampel minyak dengan variasi kondisi, sedangkan aspek kimiawi minyak tidak dibahas secara mendalam. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh alternatif metode pengukuran viskositas yang lebih sederhana, ekonomis, dan mudah diimplementasikan dibandingkan metode konvensional.

2 METODE PENELITIAN

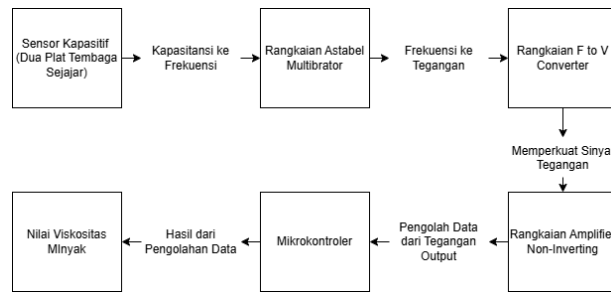
Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami prinsip kerja sensor kapasitif serta metode interfacing ke sistem elektronik. Metode interfacing merupakan teknik untuk menghubungkan sensor dengan rangkaian atau sistem elektronik agar sinyal yang dihasilkan dapat diproses lebih lanjut. Tahap selanjutnya adalah perancangan sistem yang meliputi sensor kapasitif dua plat sejajar, rangkaian astable multivibrator, rangkaian F–V converter lalu ke rangkaian amplifier non-inverting, serta integrasi dengan mikrokontroler. Setelah itu, dilakukan simulasi untuk memastikan rancangan bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Rancangan yang telah sesuai kemudian direalisasikan dalam bentuk perangkat keras melalui proses perakitan. Tahap berikutnya adalah pengujian sistem menggunakan sampel minyak untuk memperoleh data pengukuran. Data yang dihasilkan selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem. Berikut pada Gambar 1 merupakan diagram alir dari penelitian yang dilakukan:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Gambar 1 terlihat alur penelitian yang akan dilakukan. Selanjutnya terdapat diagram blok sistem yang menggambarkan alur kerja rangkaian yang digunakan dalam penelitian ini. Diagram blok tersebut menunjukkan hubungan antar komponen utama dalam sistem, mulai dari proses akuisisi sinyal hingga pengolahan data. Selain itu, diagram blok ini juga mempermudah dalam memahami urutan proses konversi sinyal yang terjadi pada sistem. Dengan adanya diagram blok, setiap tahapan kerja sistem dapat diidentifikasi secara lebih jelas dan sistematis. Berikut merupakan diagram blok sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2:



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

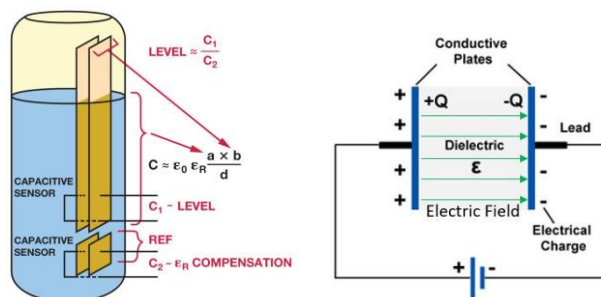
Berdasarkan diagram blok sistem pada Gambar 2, menggambarkan alur kerja rangkaian secara berurutan mulai dari sensor hingga keluaran sistem. Sensor kapasitif dua plat tembaga berfungsi mendeteksi perubahan sifat minyak yang memengaruhi nilai kapasitansi. Perubahan tersebut kemudian diubah menjadi sinyal frekuensi oleh rangkaian astable multivibrator dan selanjutnya dikonversi menjadi tegangan oleh rangkaian F–V converter. Selanjutnya ke rangkaian amplifier non-inverting berfungsi untuk memperkuat sinyal tegangan keluaran dari rangkaian F–V converter tanpa mengubah fase sinyal, sehingga diperoleh sinyal yang lebih stabil dan sesuai untuk proses pembacaan oleh mikrokontroler. Selanjutnya diolah mikrokontroler untuk menghasilkan nilai viskositas secara tidak langsung.

2.1 Perancangan Sensor Kapasitif

Sensor kapasitif terdiri dari dua elektroda konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Sensor kapasitif pada penelitian ini dirancang menggunakan dua plat tembaga yang disusun secara sejajar dengan minyak sebagai bahan dielektrik di antaranya. Prinsip kerja sensor didasarkan pada perubahan nilai kapasitansi akibat variasi permitivitas bahan yang berada di antara kedua elektroda [5]. Ketika kondisi minyak mengalami perubahan, baik akibat pemanasan maupun degradasi, maka sifat dielektriknya juga berubah sehingga memengaruhi nilai kapasitansi yang dihasilkan. Dengan demikian, perubahan kondisi minyak dapat direpresentasikan melalui perubahan kapasitansi. Secara teoritis, nilai kapasitansi dua plat sejajar dinyatakan sebagai:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \tag{1}$$

Persamaan (1) menunjukkan hubungan antara kapasitansi dengan sifat fisik medium yang berada di antara dua pelat. Nilai kapasitansi dipengaruhi oleh konstanta dielektrik fluida, luas penampang pelat, dan jarak antar pelat. Pada persamaan (1), C merupakan kapasitansi (Farad), ϵ adalah permitivitas medium (F/m), A adalah luas permukaan pelat (m²), dan d adalah jarak antar pelat (m). Berdasarkan hubungan tersebut, perubahan sifat minyak akan memengaruhi nilai kapasitansi yang dihasilkan sensor, sehingga dapat digunakan sebagai pendekatan tidak langsung dalam mengidentifikasi perubahan viskositas. Konfigurasi dua plat sejajar dipilih karena memiliki struktur sederhana dan sensitivitas yang cukup baik terhadap perubahan medium. Selain itu, material tembaga digunakan karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi serta stabil dalam aplikasi pengukuran berbasis kapasitansi [6]. Berikut gambaran sensor kapasitif dengan dua plat tembaga sejajar :



Gambar 3. Sensor Kapasitif

Berdasarkan gambaran sensor pada Gambar 3, dalam penelitian ini menggunakan dua plat tembaga dengan masing-masing memiliki panjang 5 cm dan lebar 2 cm. Jarak diantara kedua plat sebesar 7 cm sesuai dengan diameter wadah. Ukuran wadah memiliki berbentuk tabung yang memiliki diameter 7 cm. Dengan demikian untuk

nilai kapasitansi plat tembaga berdasarkan teori kapasitansi adalah sebagai berikut. Pada persamaan (2), A merupakan luas permukaan plat (m²), p merupakan panjang plat (m), dan l merupakan lebar plat (m). Diketahui : Panjang = 5cm = 0,05m

Lebar = 2cm = 0,02m

$$\text{Luas plat (A)} = P \times L = 0,05 \times 0,02 = 0,001\text{m}^2 \quad (2)$$

d (jarak antar plat) = 7cm = 0,07m

Untuk permitivitas bahan menggunakan persamaan berikut :

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad (3)$$

Dimana :

$$\epsilon_0 = \text{permitivitas ruang hampa} \left(8,854 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \right)$$

$$\epsilon_r = \text{permitivitas relatif} (2 - 3)$$

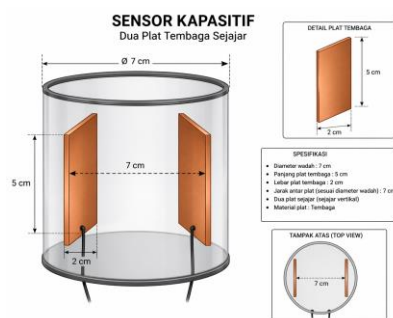
Pada persamaan (3), ε merupakan permitivitas bahan (F/m), dan ε_r merupakan permitivitas relatif bahan. Berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai permitivitas minyak, didapat sekitar 2,2–2,3, sehingga pada penelitian ini menggunakan 2,3 sebagai konstanta untuk permitivitas relatif pada minyak. Rentang permitivitas merupakan konstanta umumnya yang terdapat pada minyak. Sehingga didapat untuk permitivitas bahan dari minyak adalah :

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r = 2,3 \times 8,854 \times 10^{-12} = 2,036 \times 10^{-11} \frac{F}{m}$$

Sehingga nilai kapasitansi yang dihasilkan dari dua plat tembaga tersebut adalah :

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = 2,036 \times 10^{-11} \times \frac{0,001}{0,07} = 2,91 \times 10^{-13} F = 0,291 pF$$

Nilai kapasitansi dapat berubah-ubah tergantung jenis minyak yang akan diuji. Ini merupakan standar yang biasanya terdapat pada pengukuran untuk minyak kemasan pada umumnya. Karena berbeda jenis minyak maupun fluida, berbeda juga nilai kapasitansinya. Selain itu, faktor perbedaan posisi pada saat pengujian menjadi pengaruh juga dari berubahnya nilai kapasitansi. Selanjutnya Gambar 4 merupakan skema desain dari sensor kapasitif dua plat tembaga sejajar :



Gambar 4. Skema Desain Sensor Kapasitif

2.2 Perancangan Rangkaian Astable Multivibrator

Rangkaian astable multivibrator dimanfaatkan untuk mengubah perubahan nilai kapasitansi menjadi sinyal dalam bentuk frekuensi. Pada rangkaian ini, kapasitor mengalami proses pengisian dan pengosongan muatan secara berulang sehingga menghasilkan sinyal osilasi yang kontinu. Frekuensi dari sinyal yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh nilai komponen resistor dan kapasitor yang digunakan. Dengan adanya mekanisme ini, perubahan kecil pada nilai kapasitansi dapat langsung memengaruhi karakteristik sinyal keluaran. Oleh karena itu, rangkaian ini cocok digunakan sebagai pengubah besaran kapasitif menjadi sinyal listrik yang dinamis [7].

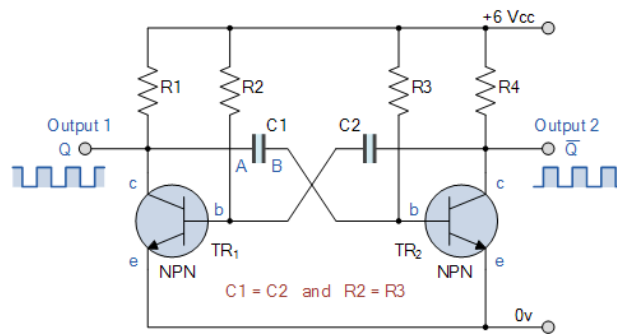
Dalam penerapannya, perubahan kapasitansi dari sensor akan menyebabkan perubahan frekuensi pada keluaran rangkaian. Hal ini menjadikan astable multivibrator sebagai metode yang efektif untuk mengonversi parameter kapasitif menjadi sinyal yang lebih mudah diamati dan diukur. Selain itu, rangkaian ini banyak digunakan sebagai pembangkit pulsa dalam berbagai aplikasi elektronika. Keunggulan utamanya terletak pada desain yang sederhana serta kestabilan dalam menghasilkan sinyal periodik. Secara umum, karakteristik frekuensi

dan lebar pulsa yang dihasilkan ditentukan oleh kombinasi nilai resistor dan kapasitor pada rangkaian. Secara teoritis, astable multivibrator merupakan sebuah rangkaian osilator yang dimana memiliki frekuensi osilasi sebagai output rangkaian. Untuk mencari frekuensi osilasi pada rangkaian astable multivibrator adalah sebagai berikut :

$$f_o = \frac{1}{1.38 \times RC} \tag{4}$$

$$f_o = \frac{1}{0.693 \times (R_1 + 2R_2)C} \tag{5}$$

Pada persamaan (4) dan (5), f_o merupakan frekuensi osilasi (Hz), R_1 , dan R_2 merupakan resistor (Ω), serta C merupakan kapasitansi (F). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa frekuensi osilasi dipengaruhi oleh nilai resistor dan kapasitor pada rangkaian. Semakin besar nilai kapasitansi, maka frekuensi osilasi yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini menjadi dasar penggunaan rangkaian astable multivibrator sebagai pengubah perubahan kapasitansi sensor menjadi sinyal frekuensi.

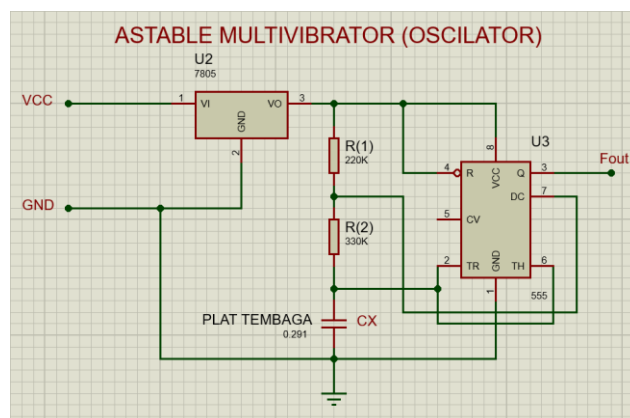


Gambar 5. Astable Multivibrator

Berdasarkan pada Gambar 5, perancangan rangkaian astable multivibrator terdiri dari beberapa komponen berikut:

1. IC 7805
2. IC 555N
3. Dua plat Tembaga yang diinisialisasikan Kapasitor (Cx)
4. Resistor 220k
5. Resistor 330k
6. Sumber VCC dan GND

Rangkaian dibuat menggunakan simulasi proteus untuk mengetahui karakteristik dan cara kerja sistem rangkaian. Selanjutnya dilakukan perakitan pada papan model breadboard untuk mengetahui cara kerja rangkaian secara langsung serta dapat dilakukannya pengujian pada rangkaian tersebut. Adapun untuk rangkaian simulasi proteusnya ditampilkan pada Gambar 6 sebagai berikut :

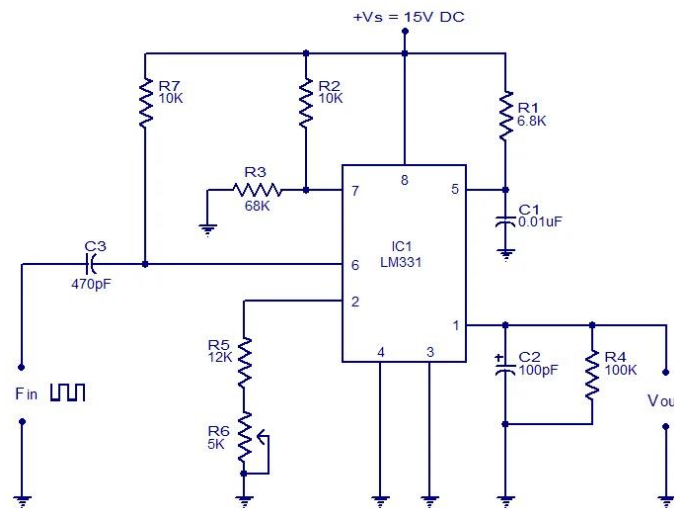


Gambar 6. Simulasi Astable Multivibrator

2.3 Perancangan Rangkaian F to V Converter

Rangkaian *Frequency to Voltage (F-V) converter* digunakan untuk mengubah sinyal frekuensi menjadi sinyal tegangan yang memiliki hubungan sebanding. Konversi ini diperlukan karena sistem mikrokontroler lebih mudah membaca dan memproses sinyal dalam bentuk tegangan dibandingkan frekuensi secara langsung. Dalam sistem sensor, perubahan kapasitansi umumnya terlebih dahulu diubah menjadi frekuensi, kemudian dikonversi menjadi tegangan agar dapat diolah lebih lanjut. Pendekatan ini merupakan bagian dari *signal conditioning* yang berfungsi menyederhanakan proses akuisisi data. Penelitian menunjukkan bahwa konversi frekuensi ke tegangan menghasilkan keluaran yang bergantung langsung pada frekuensi input, sehingga cocok digunakan dalam sistem pembacaan sensor .

Secara umum, hubungan antara frekuensi masukan dan tegangan keluaran bersifat linier dalam rentang kerja tertentu, sehingga memungkinkan dilakukan proses kalibrasi. Prinsip kerja rangkaian ini memanfaatkan proses pengisian dan pengosongan kapasitor untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang proporsional terhadap frekuensi sinyal. Dalam sistem sensor modern, metode ini sering digunakan untuk meningkatkan kemudahan integrasi dengan sistem digital. Selain itu, pendekatan konversi sinyal seperti ini juga banyak digunakan pada sistem pembacaan sensor kapasitif karena mampu meningkatkan akurasi dan stabilitas pengukuran . Dengan demikian, F-V converter menjadi bagian penting dalam menghubungkan sinyal sensor dengan sistem pengolahan data berbasis mikrokontroler. Secara teori rangkaian F to V Converter adalah sebagai berikut :

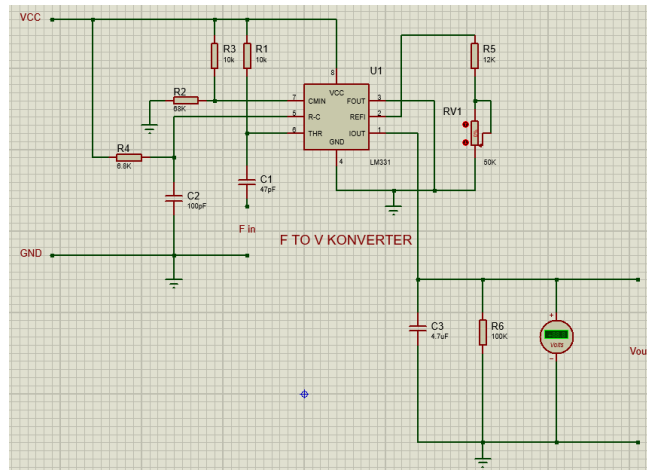


Gambar 7. F to V Converter

Berdasarkan pada Gambar 7, perancangan rangkaian F to V Converter terdiri dari beberapa komponen berikut :

1. IC LM331
2. Kapasitor 47pF
3. Kapasitor 100pF
4. Kapasitor Elco 4,7uF
5. Resistor 6,8k
6. Resistor 68k
7. Resistor 10k
8. Resistor 12k
9. Resistor 100k
10. Potensiometer 50k
11. Sumber VCC dan GND

Rangkaian dibuat menggunakan simulasi proteus untuk mengetahui karakteristik dan cara kerja sistem rangkaian. Selanjutnya dilakukan perakitan pada papan model breadboard untuk mengetahui cara kerja rangkaian secara langsung serta dapat dilakukannya pengujian pada rangkaian tersebut. Adapun untuk rangkaian simulasi proteusnya ditampilkan pada Gambar 8 sebagai berikut :



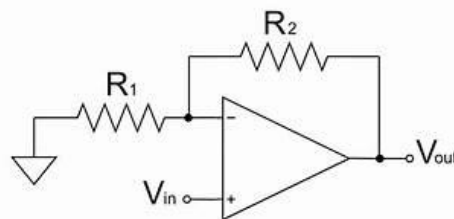
Gambar 8. Simulasi F to V Converter

2.4 Perancangan Rangkaian Amplifier Non-Inverting

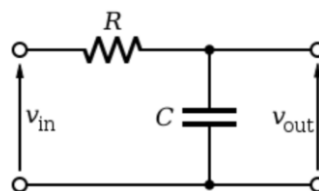
Rangkaian amplifier non-inverting merupakan konfigurasi penguat berbasis op-amp yang menghasilkan tegangan keluaran searah (tidak terbalik fase) terhadap sinyal masukan dengan faktor penguatan tertentu. Rangkaian ini digunakan untuk memperkuat sinyal tegangan keluaran dari rangkaian *Frequency to Voltage (F-V) converter* sebelum masuk ke mikrokontroler ESP32. Konfigurasi ini dipilih karena mampu memberikan penguatan tanpa membalik fase sinyal, sehingga bentuk sinyal tetap sesuai dengan kondisi aslinya. Selain itu, amplifier non-inverting memiliki impedansi input yang tinggi sehingga tidak membebani rangkaian sebelumnya, khususnya pada bagian F-V converter yang menghasilkan sinyal berlevel rendah. Penguatan sinyal diperlukan agar tegangan keluaran berada pada rentang yang sesuai dengan pembacaan ADC mikrokontroler, sehingga proses akuisisi data menjadi lebih akurat dan stabil.

Selain penguatan, pada rangkaian ini juga ditambahkan low-pass filter RC yang berfungsi untuk meredam komponen frekuensi tinggi atau noise pada sinyal. Filter ini bekerja dengan melewatkan sinyal frekuensi rendah dan melemahkan sinyal frekuensi tinggi sehingga menghasilkan tegangan yang lebih halus dan stabil [8]. Penggunaan filter menjadi penting karena sinyal hasil konversi dari F-V converter masih mengandung ripple akibat proses switching. Dengan adanya low-pass filter, sinyal yang masuk ke mikrokontroler menjadi lebih representatif terhadap nilai sebenarnya. Kombinasi antara amplifier dan filter ini merupakan bagian dari proses *signal conditioning* yang umum digunakan dalam sistem berbasis sensor untuk meningkatkan kualitas pembacaan sinyal. Secara teori, rangkaian amplifier non inverting dan low pass filter ditampilkan pada Gambar 9 dan 10 sebagai berikut :

Non-Inverting Amplifier Circuit



Gambar 9. Non Inverting

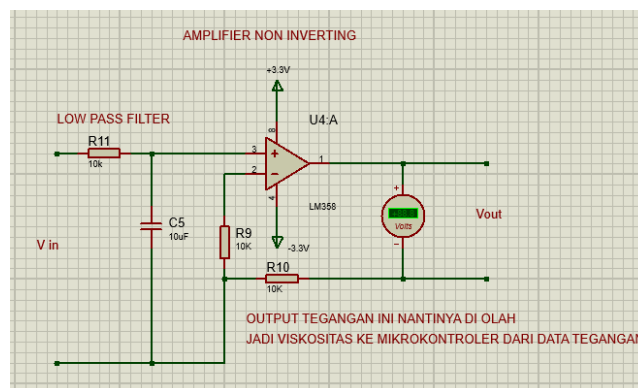


Gambar 10. Low Pass Filter

Berdasarkan pada Gambar 9 dan 10, perancangan rangkaian amplifier non inverting dan low pass filter terdiri dari beberapa komponen berikut :

1. IC LM358
2. Resistor 10k
3. Kapasitor 10uF
4. Sumber VCC dan GND

Rangkaian dibuat menggunakan simulasi proteus untuk mengetahui karakteristik dan cara kerja sistem rangkaian. Selanjutnya dilakukan perakitan pada papan model breadboard untuk mengetahui cara kerja rangkaian secara langsung serta dapat dilakukannya pengujian pada rangkaian tersebut. Adapun untuk rangkaian simulasi proteusnya ditampilkan pada Gambar 11 sebagai berikut :



Gambar 11. Simulasi Rangkaian Amplifier Non Inverting

2.5 Kalibrasi dan Pengolahan Data

Proses kalibrasi dilakukan untuk memperoleh hubungan empiris antara frekuensi keluaran sensor kapasitif dan nilai viskositas fluida yang diuji. Setiap sampel fluida diukur sebanyak tiga kali pengulangan pada suhu konstan 30°C, kemudian nilai frekuensi dan tegangan keluaran dirata-ratakan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi pengukuran dan meningkatkan reliabilitas data. Pendekatan pengulangan pengukuran dan perataan data merupakan metode yang umum digunakan dalam sistem sensor kapasitif untuk meningkatkan kestabilan hasil pembacaan [9], [10].

Data frekuensi yang diperoleh dari rangkaian astable multivibrator selanjutnya digunakan sebagai parameter utama dalam estimasi viskositas. Hubungan antara perubahan karakteristik fluida dan respons sensor ditentukan melalui proses kalibrasi berdasarkan nilai viskositas referensi yang diperoleh dari literatur. Pendekatan kalibrasi ini sejalan dengan berbagai penelitian sensor berbasis kapasitif dan sensor pemantauan kualitas minyak yang memanfaatkan perubahan parameter listrik untuk mengidentifikasi karakteristik fluida [11], [12].

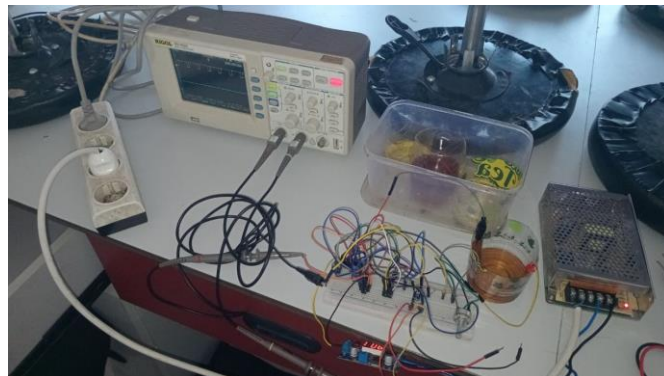
Untuk memperoleh model estimasi, dilakukan pendekatan regresi linier sederhana antara frekuensi keluaran sensor dan nilai viskositas referensi. Persamaan empiris yang diperoleh kemudian diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 untuk melakukan estimasi viskositas secara real-time. Penggunaan model empiris berbasis regresi dipilih karena memiliki kompleksitas komputasi yang rendah sehingga sesuai untuk aplikasi sistem tertanam (embedded system).

Selanjutnya, hasil estimasi viskositas dibandingkan dengan nilai referensi untuk mengevaluasi performa sistem. Analisis dilakukan dengan mengamati kecenderungan perubahan frekuensi terhadap peningkatan viskositas serta kemampuan sensor dalam membedakan karakteristik masing-masing fluida. Melalui proses kalibrasi dan pengolahan data tersebut, sistem diharapkan mampu menghasilkan estimasi viskositas yang representatif dan konsisten terhadap perubahan sifat fisik minyak yang diuji.

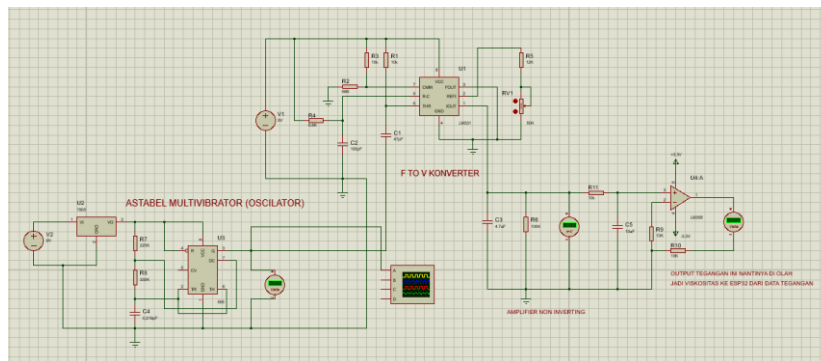
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dipaparkan hasil pengujian dari masing-masing blok rangkaian sistem sensor kapasitif untuk pengukuran viskositas minyak, mulai dari tahap konversi kapasitansi hingga penguatan sinyal akhir. Pengujian dilakukan secara bertahap guna memastikan setiap rangkaian bekerja sesuai dengan rancangan sistem yang diinginkan. Secara garis besar, sistem ini mengandalkan perubahan nilai dielektrik pada sensor plat tembaga yang kemudian diproses melalui rangkaian analog agar dapat diinterpretasikan menjadi data yang terukur. Hasil data yang diperoleh, baik dalam bentuk sinyal osilasi, frekuensi, maupun tegangan, akan dianalisis korelasinya

terhadap karakteristik viskositas dari berbagai sampel minyak yang telah diuji. Selain itu pengujian dilakukan juga secara simulasi rangkaian menggunakan software proteus yang mana bisa memperkuat hasil dari analisis pembacaan sensor. Untuk keseluruhan rangkaian dari sensor kapasitif ditampilkan pada Gambar 12 dan 13 sebagai berikut :



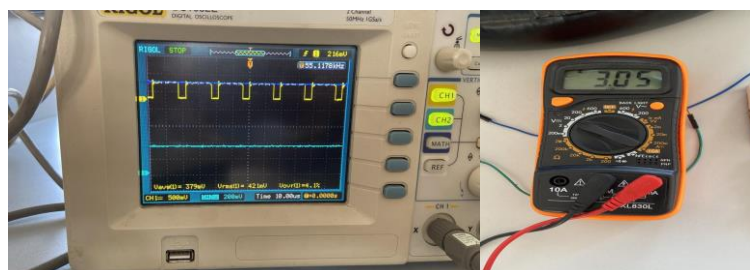
Gambar 12. Rangkaian Sensor Kapasitif



Gambar 13. Simulasi Sensor Kapasitif

3.1 Hasil Pengukuran Sensor dengan Rangkaian Astable Multivibrator dan F to V Converter

Pengujian pertama dilakukan dengan rangkaian astable multivibrator dan rangkaian F to V Converter yang sudah dihubungkan dengan dua plat tembaga sejajar. Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon sensor terhadap berbagai jenis fluida pada suhu konstan sebesar 30°C. Parameter yang diamati pada penelitian ini adalah frekuensi keluaran dari rangkaian osilator berbasis IC 555 serta tegangan hasil konversi frekuensi ke tegangan (F-V converter). Hasil pengujian rangkaian tersebut ditampilkan pada Gambar 14 sebagai berikut :



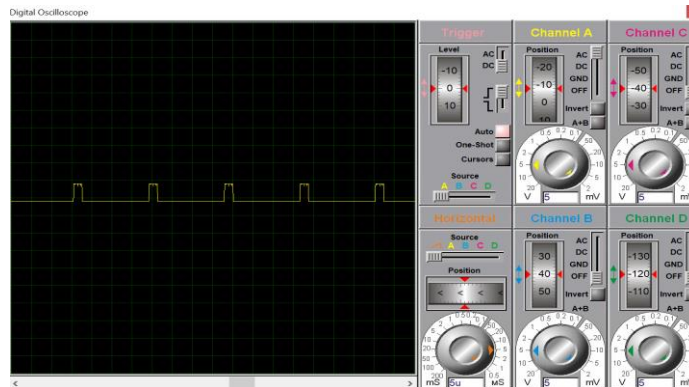
Gambar 14. Hasil Pengujian Rangkaian Astabel Multivibrator dengan F to V Converter

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 14, Penggunaan suhu konstan bertujuan untuk menghilangkan pengaruh temperatur terhadap viskositas fluida, sehingga perubahan parameter yang diamati dapat dikaitkan secara langsung dengan karakteristik fluida yang diuji. Hasil pengukuran frekuensi dan tegangan keluaran sensor untuk setiap sampel fluida ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Hasil Pengukuran Rangkaian Astabel Multivibrator dengan F to V Converter

Jenis Fluida	Frekuensi (kHz)	Tegangan (V)	Vavg (mV)	Vrms (mV)
Minyak murni	55,5632 kHz	3,12	381	419
Minyak filtrasi	55,1178 kHz	3,05	379	421
Minyak jelantah	54,9370 kHz	2,97	387	427
Oli 10W-30W	54,4595 kHz	2,77	373	420
Oli 20W-50W	53,9371 kHz	2,70	373	416

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa frekuensi keluaran sensor mengalami penurunan seiring dengan perubahan jenis fluida. Minyak murni memiliki frekuensi tertinggi, sedangkan oli 20W-50 memiliki frekuensi terendah. Selain frekuensi, parameter tegangan keluaran juga menunjukkan kecenderungan yang serupa. Nilai tegangan rata-rata (Vavg) dan tegangan RMS (Vrms) mengalami sedikit perubahan antar jenis fluida, meskipun tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan perubahan frekuensi. Hal ini menunjukkan bahwa parameter frekuensi memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dalam membedakan karakteristik fluida. Secara umum, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem sensor yang dirancang mampu merespon perubahan jenis fluida dengan cukup baik, yang ditunjukkan oleh adanya perbedaan nilai frekuensi dan tegangan pada setiap sampel yang diuji. Adapun dari rangkaian tersebut berikut hasil simulasi pada software proteus yang telah dibuat ditampilkan pada Gambar 15 sebagai berikut :



Gambar 15. Hasil Simulasi Rangkaian Astable Multivibrator

Dari hasil simulasi osiloskop pada rangkaian simulai, didapat frekuensinya adalah :

$$f = \frac{1}{T} \tag{6}$$

Pada persamaan (6), fff merupakan frekuensi keluaran dalam satuan hertz (Hz), sedangkan TTT merupakan periode gelombang dalam satuan sekon (s). Berdasarkan tampilan osiloskop, diperoleh jumlah kotak sebesar 4 div dengan skala waktu sebesar 5 μs/div. Maka periode gelombang dapat dihitung sebagai berikut:

$$T = \text{Jumlah Kotak} \times \frac{\text{Time}}{\text{Div}}$$

$$T = 4 \times 5 \mu\text{s} = 20 \mu\text{s}$$

$$T = 20 \times 10^{-6}$$

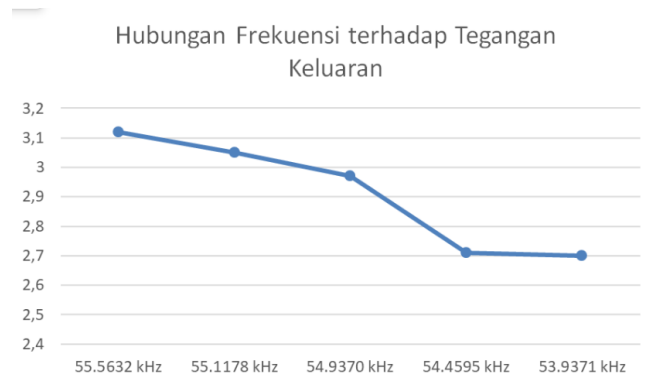
$$f = \frac{1}{20 \times 10^{-6}}$$

$$f = \frac{1.000.000}{20}$$

$$f = 50.000 \text{ Hz atau } 50 \text{ kHz}$$

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian maupun hasil pengujian sensor langsung, dilakukan perhitungan frekuensi berdasarkan periode gelombang yang terbaca pada osiloskop yang mana menghasilkan sekitar 50kHz. Nilai frekuensi yang diperoleh dari kedua metode tersebut menunjukkan korelasi yang konsisten, yang memvalidasi bahwa sistem telah bekerja sesuai dengan prinsip perancangan awal.

3.2 Analisis Hubungan Frekuensi terhadap Tegangan Keluaran



Gambar 14. Hubungan Frekuensi terhadap Tegangan Keluaran.

Berdasarkan Gambar 14, terlihat bahwa tegangan keluaran mengalami penurunan seiring dengan menurunnya frekuensi. Pada frekuensi tertinggi sebesar 55,5632 kHz, tegangan keluaran mencapai sekitar 3,12 V, sedangkan pada frekuensi terendah sebesar 53,9371 kHz, tegangan keluaran menurun hingga sekitar 2,70 V. Pola ini menunjukkan bahwa rangkaian F-V converter bekerja sesuai dengan prinsip dasarnya, dimana tegangan keluaran berbanding lurus dengan frekuensi masukan. Dengan demikian, perubahan frekuensi akibat perbedaan karakteristik fluida dapat dikonversi menjadi perubahan tegangan yang terukur. Penurunan frekuensi yang terjadi pada fluida dengan viskositas lebih tinggi menyebabkan tegangan keluaran juga semakin rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sensor yang digunakan memiliki sensitivitas terhadap perubahan viskositas fluida.

3.3 Hasil Pengukuran Sensor dengan Rangkaian Amplifier Non-Inverting

Tahap selanjutnya dari pemrosesan sinyal analog pada sistem ini adalah pengkondisian sinyal (*signal conditioning*) menggunakan rangkaian *amplifier non-inverting* berbasis IC LM358. Sinyal tegangan yang sebelumnya dihasilkan oleh *Frequency to Voltage (F to V) Converter* diumpankan ke rangkaian ini untuk disesuaikan level amplitudonya sebelum dibaca oleh *Analog-to-Digital Converter (ADC)* pada mikrokontroler ESP32. Penggunaan konfigurasi *non-inverting* bertujuan untuk menguatkan tegangan tanpa membalik fase sinyal, serta menjaga impedansi masukan tetap tinggi agar tidak membebani rangkaian sebelumnya. Pengukuran pada tahap ini difokuskan untuk melihat bagaimana respons komponen penguat analog terhadap perubahan sinyal dari berbagai sampel fluida.



Gambar 15. Hasil Pengujian Rangkaian Amplifier Non-Inverting

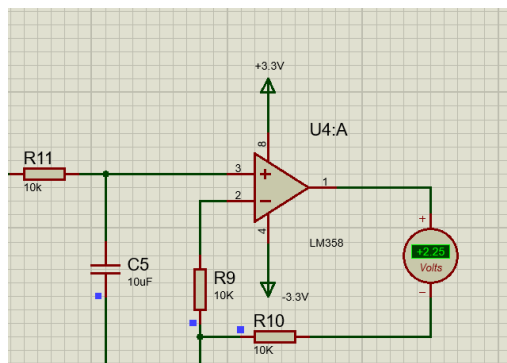
Validasi terhadap kinerja operasional rangkaian penguat dilakukan dengan mengamati nilai tegangan secara langsung pada instrumen ukur. Proses validasi pengukuran tegangan keluaran menggunakan multimeter digital ini diperlihatkan pada Gambar 15. Tahap ini krusial untuk memastikan tidak ada rugi-rugi tegangan yang signifikan pada jalur transmisi analog.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Rangkaian Amplifier Non-Inverting

Jenis Fluida	Tegangan (V)
Minyak murni	2,03
Minyak filtrasi	2,07
Minyak jelantah	2,10
Oli 10W-30W	2,10
Oli 20W-50W	2,14

Interpretasi data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa penambahan tahapan *amplifier* memberikan kontribusi signifikan dalam membedakan karakteristik elektrik antar sampel fluida melalui representasi tegangan analog. Secara fenomenologis, terlihat adanya kecenderungan peningkatan tegangan yang berbanding lurus dengan tingkat kekentalan fluida, mulai dari 2,03 V pada minyak murni hingga mencapai puncaknya sebesar 2,14 V pada oli 20W-50W. Hasil ini mengonfirmasi hipotesis awal bahwa perubahan permitivitas dielektrik pada sensor kapasitif dapat diekstraksi menjadi besaran tegangan yang stabil. Penguatan ini sangat krusial untuk memastikan bahwa fluktuasi kecil pada nilai kapasitansi sensor dapat terbaca oleh mikrokontroler dengan rasio sinyal terhadap desas (*signal-to-noise ratio*) yang memadai.

Namun demikian, analisis kritis terhadap Tabel 2 juga mengungkap adanya limitasi pada resolusi perangkat keras analog, yang terindikasi dari kesamaan nilai tegangan sebesar 2,10 V pada sampel minyak jelantah dan oli 10W-30W. Fenomena tumpang tindih data (*data overlap*) ini secara teknis disebabkan oleh ambang batas sensitivitas IC LM358 dalam merespons selisih frekuensi yang sangat rapat pada viskositas tingkat menengah. Kondisi tersebut menegaskan bahwa meskipun rangkaian *amplifier* sangat efektif dalam melakukan *scaling* tegangan untuk kebutuhan monitoring, akurasi penentuan nilai viskositas dalam satuan *centiPoise* (cP) memerlukan komparasi dengan parameter frekuensi digital. Integrasi antara penguatan analog dan pengolahan frekuensi digital inilah yang menjamin reliabilitas sistem dalam mengidentifikasi profil viskositas secara presisi. Adapun dari rangkaian tersebut berikut hasil simulasi pada software proteus yang ditunjukkan gambar 16:



Gambar 16. Hasil Simulasi Rangkaian Amplifier Non-Inverting

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian pada Gambar 16 maupun hasil pengujian sensor langsung, diperoleh data karakteristik penguatan sinyal yang konsisten pada tahap *signal conditioning*. Simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak Proteus memberikan estimasi penguatan yang sesuai dengan respon aktual pada *hardware*, sehingga menunjukkan bahwa model rangkaian telah merepresentasikan kondisi riil di lapangan secara akurat. Konsistensi ini mengonfirmasi bahwa level tegangan keluaran yang diteruskan ke ADC ESP32 tetap terjaga linearitasnya terhadap perubahan variabel input, sehingga dapat meminimalisir kesalahan pembacaan data pada mikrokontroler. Konfigurasi penguat *non-inverting* ini terbukti efektif dalam menyesuaikan amplitudo sinyal tanpa mengubah fase, serta memastikan sistem memiliki stabilitas yang diperlukan untuk proses akuisisi data yang presisi.

3.4 Analisis Pengujian Keseluruhan Rangkaian Sensor Terhadap Viskositas Minyak

Pengujian pada tahap ini merupakan pengujian keseluruhan sistem yang melibatkan sensor, rangkaian pengkondisi sinyal, serta mikrokontroler. Data yang diperoleh merupakan hasil pembacaan akhir sistem yang telah melalui proses penguatan sinyal menggunakan amplifier dan konversi oleh mikrokontroler. Nilai frekuensi dan viskositas yang ditampilkan pada serial monitor merupakan hasil pengolahan data secara real-time oleh mikrokontroler. Frekuensi yang dibaca merupakan frekuensi keluaran dari rangkaian osilator, sedangkan nilai

viskositas diperoleh dari hasil konversi menggunakan persamaan empiris yang telah diprogram sebelumnya. Berikut data pengujian di tabel 3.

Tabel 3. Hasil Estimasi Viskositas Fluida

Jenis Fluida	Frekuensi (kHz)	Viskoistas (cP)
Minyak murni	50,12 kHz	57
Minyak filtrasi	50,59 kHz	75
Minyak jelantah	51,31 kHz	112
Oli 10W-30W	52,23 kHz	210
Oli 20W-50W	53,40 kHz	219

Berdasarkan tabel 3 hasil pengujian, terlihat bahwa nilai viskositas meningkat seiring dengan perubahan jenis fluida. Minyak murni memiliki viskositas yang lebih rendah dibandingkan minyak jelantah maupun oli. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan karakteristik fluida berdasarkan tingkat kekentalannya. Frekuensi yang dihasilkan oleh sensor menunjukkan adanya variasi terhadap jenis fluida yang diuji. Perubahan frekuensi ini dipengaruhi oleh perubahan sifat listrik fluida yang berhubungan dengan viskositasnya. Namun demikian, terdapat beberapa ketidaksesuaian data dimana nilai frekuensi tidak sepenuhnya mengikuti teori. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor seperti noise pada rangkaian, kestabilan amplifier, serta variasi kondisi pengujian. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh lebih bersifat sebagai pendekatan untuk menunjukkan perbedaan karakteristik viskositas antar fluida.

Meskipun demikian, variasi frekuensi yang diperoleh masih menunjukkan adanya perbedaan respon sensor terhadap masing-masing jenis fluida yang diuji. Fluktuasi nilai frekuensi yang terjadi diduga dipengaruhi oleh sensitivitas sensor kapasitif terhadap kondisi pengukuran, toleransi komponen elektronik, serta gangguan noise pada rangkaian analog yang digunakan. Selain itu, penggunaan rangkaian astable multivibrator, F-V converter, dan amplifier analog menyebabkan sinyal keluaran tidak selalu berada pada kondisi ideal sehingga hubungan antara frekuensi dan viskositas tidak sepenuhnya linear. Kondisi tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada sistem sensor berbasis rangkaian analog, sehingga nilai frekuensi yang diperoleh lebih merepresentasikan kecenderungan perubahan karakteristik fluida dibandingkan hubungan matematis yang linier sempurna.

Untuk mengevaluasi performa sensor, dilakukan analisis sensitivitas berdasarkan perubahan frekuensi terhadap perubahan viskositas fluida. Berdasarkan data pengujian diperoleh sensitivitas rata-rata sebesar 0,010 kHz/cP. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan viskositas melalui perubahan frekuensi keluaran, meskipun masih terdapat fluktuasi akibat keterbatasan sistem pengukuran.

Nilai viskositas yang diperoleh berada dalam rentang yang sesuai dengan karakteristik umum masing-masing jenis minyak berdasarkan literatur, dimana minyak goreng memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan oli mesin [13]. Selain itu, peningkatan viskositas pada minyak jelantah dibandingkan minyak murni juga sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penggunaan minyak secara berulang menyebabkan perubahan sifat fisik dan peningkatan kekentalan akibat proses pemanasan dan oksidasi [14].

Hubungan frekuensi dan viskositas yang diperoleh pada penelitian ini tidak menunjukkan pola linear yang sempurna untuk setiap jenis fluida yang diuji. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa respon sensor tidak hanya dipengaruhi oleh viskositas, tetapi juga oleh karakteristik dielektrik masing-masing fluida. Variasi permitivitas relatif, komposisi kimia, serta sifat fisik fluida yang berbeda menyebabkan perubahan kapasitansi yang tidak selalu berbanding lurus terhadap perubahan viskositas. Akibatnya, hubungan antara frekuensi keluaran sensor dan viskositas tidak membentuk pola linear yang sempurna sebagaimana pada kondisi teoritis.

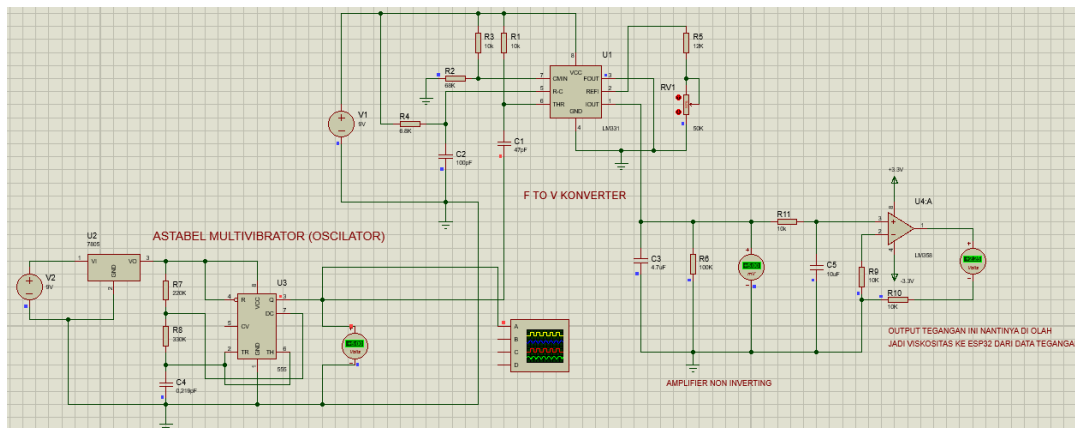
Namun demikian, secara teori perubahan sifat fluida seperti viskositas dapat mempengaruhi karakteristik listrik dan respon frekuensi pada rangkaian osilator. Akan tetapi, hasil pengujian menunjukkan adanya deviasi yang kemungkinan disebabkan oleh faktor eksternal seperti noise pada rangkaian analog, ketidakstabilan penguatan sinyal, serta keterbatasan resolusi IC LM331 dan LM358. Faktor-faktor tersebut dapat mempengaruhi kestabilan frekuensi keluaran sehingga menghasilkan perbedaan antara hasil pengukuran dan kondisi ideal berdasarkan teori.

Selain itu, faktor suhu juga dapat mempengaruhi nilai viskositas fluida, dimana peningkatan suhu cenderung menurunkan viskositas cairan [15]. Oleh karena itu, pengukuran viskositas perlu dilakukan pada kondisi suhu yang terkontrol agar hasil yang diperoleh lebih konsisten dan akurat. Secara keseluruhan, sistem yang dirancang telah mampu mendeteksi perbedaan karakteristik viskositas antar fluida, meskipun masih diperlukan kalibrasi dan penyempurnaan sistem untuk meningkatkan akurasi pengukuran.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan sensor optik dan sensor warna untuk identifikasi kualitas minyak, pendekatan sensor kapasitif pada penelitian ini menawarkan konstruksi yang lebih sederhana dan biaya implementasi yang lebih rendah. Sensor optik umumnya memanfaatkan perubahan intensitas

cahaya atau karakteristik warna sebagai parameter pengukuran, sedangkan sensor kapasitif pada penelitian ini bekerja berdasarkan perubahan sifat dielektrik fluida yang mempengaruhi nilai kapasitansi dan frekuensi keluaran sensor. Pendekatan tersebut memungkinkan sistem melakukan pengukuran secara lebih sederhana dengan integrasi perangkat keras yang relatif mudah. Meskipun demikian, tingkat akurasi sistem masih dapat ditingkatkan melalui optimasi dimensi elektroda, peningkatan resolusi ADC, dan penerapan algoritma kalibrasi yang lebih kompleks. Selain itu, penggunaan komponen pengondisi sinyal dengan tingkat stabilitas yang lebih tinggi juga berpotensi meningkatkan konsistensi pembacaan frekuensi sehingga hasil estimasi viskositas menjadi lebih akurat.

Adapun berikut pada Gambar 17 merupakan hasil dari simulasi keseluruhan rangkaian sensor kapasitif pada software proteus :



Gambar 17. Hasil Simulasi Keseluruhan Rangkaian Sensor Kapasitif

Berdasarkan pada Gambar 17, terlihat skema integrasi seluruh blok rangkaian yang membentuk sistem sensor kapasitif secara utuh pada perangkat lunak Proteus. Visualisasi simulasi ini bertujuan untuk memverifikasi fungsionalitas tiap blok rangkaian secara simultan dan memastikan bahwa integrasi antarkomponen telah berjalan selaras dengan data empiris yang diperoleh pada tahap pengujian *hardware*. Dalam tahap ini, alur pemrosesan sinyal mulai dari osilator, konversi frekuensi ke tegangan (F to V), hingga penguatan akhir dipantau secara mendalam untuk menjamin linearitas respon sistem. Hasil integrasi ini pada akhirnya memberikan landasan teoretis yang kuat, sekaligus membuktikan bahwa rancangan sistem telah memenuhi spesifikasi teknis yang diperlukan untuk mengukur variasi viskositas minyak secara akurat.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem sensor kapasitif berbasis dua plat tembaga sejajar sebagai metode pengukuran viskositas minyak secara tidak langsung. Sensor yang dirancang memanfaatkan perubahan nilai kapasitansi akibat perbedaan permitivitas dielektrik fluida, yang kemudian diproses melalui rangkaian astable multivibrator untuk dikonversi menjadi sinyal frekuensi, dilanjutkan dengan rangkaian F–V converter untuk menghasilkan tegangan, serta rangkaian amplifier non-inverting berbasis IC LM358 untuk pengondisian sinyal sebelum diolah oleh mikrokontroler ESP32.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perbedaan karakteristik fluida yang diuji melalui perubahan frekuensi dan tegangan keluaran, meskipun masih terdapat fluktuasi pengukuran yang diduga dipengaruhi oleh noise rangkaian analog, toleransi komponen elektronik, dan keterbatasan resolusi sistem. Minyak murni menghasilkan frekuensi tertinggi sebesar 55,56 kHz dengan tegangan 3,12 V, sedangkan oli 20W-50W menghasilkan frekuensi terendah sebesar 53,94 kHz dengan tegangan 2,70 V, yang mencerminkan korelasi antara tingkat viskositas fluida dengan parameter kelistrikan yang dihasilkan sensor. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan karakteristik dielektrik fluida yang mempengaruhi kapasitansi sensor dapat direpresentasikan melalui perubahan frekuensi keluaran dan dimanfaatkan untuk mengestimasi viskositas secara tidak langsung. Berdasarkan hasil pengujian, sensor menunjukkan sensitivitas rata-rata sekitar 0,010 kHz/cP dan mampu membedakan lima jenis fluida dengan rentang estimasi viskositas 57–219 cP.

Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan pada resolusi perangkat keras analog, yang terindikasi dari tumpang tindihnya nilai tegangan pada sampel minyak jelantah dan oli 10W-30W. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi penentuan viskositas secara presisi masih memerlukan kombinasi antara pembacaan tegangan analog dan parameter frekuensi digital dari mikrokontroler. Secara keseluruhan, sistem sensor kapasitif dua plat tembaga yang dirancang dalam penelitian ini terbukti dapat digunakan sebagai alternatif metode

pengukuran viskositas yang lebih sederhana, ekonomis, dan mudah diintegrasikan dengan sistem elektronik berbasis mikrokontroler dibandingkan dengan metode konvensional. Untuk penelitian selanjutnya, akurasi dan sensitivitas pembacaan sensor masih dapat ditingkatkan melalui beberapa pendekatan, di antaranya penggunaan komponen analog dengan resolusi yang lebih tinggi, optimasi jarak dan luas permukaan plat tembaga, serta penerapan algoritma kalibrasi yang lebih presisi pada mikrokontroler. Selain itu, pengembangan sistem ke arah pemantauan berbasis IoT secara real-time juga dapat menjadi langkah lanjutan yang potensial guna memperluas cakupan aplikasi sensor ini dalam monitoring kualitas minyak secara berkelanjutan dan lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. Pratiwi, A. Luthfia, J. Fisika, F. Matematika, D. Ilmu, and P. Alam, "PENGUKURAN VISKOSITAS OLI DAN MINYAK GORENG MENGGUNAKAN SENSOR MINI REED SWITCH MAGNETIC BERBASIS ARDUINO," *ORBITA: Jurnal Pendidikan dan Ilmu Fisika*, vol. 9, Nov. 2023.
- [2] N. Mutawakkillah, M. Yantidewi, and) Muhimmatul Khoiro, "IMPLEMENTASI SENSOR FIBER OPTIK DALAM MENGUKUR KUALITAS MINYAK GORENG SAWIT," *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, vol. 13, pp. 95–102, 2024.
- [3] D. Dendi, B. Sugiarto, and T. A. Wiharso, "Jurnal FUSE-Teknik Elektro Prototipe Alat Pendeteksi Kualitas Minyak Goreng Kelapa Sawit Menggunakan Sensor TCS3200 dan Metode Fuzzy Logic," *Jurnal FUSE –Teknik Elektro*, vol. 3, pp. 79–84, Dec. 2023, [Online]. Available: <https://journal.uniga.ac.id/index.php/JFT/index>
- [4] M. Z. U. Rahman, O. M. Aldossary, and T. Islam, "A constant phase impedance sensor for measuring conducting liquid level," *ISA Trans.*, vol. 115, pp. 250–258, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2021.01.024.
- [5] M. F. Naveed, A. Amaar, S. S. Khan, M. Omar, and S. Larkin, "Detection and continuous monitoring of moisture content in transformer oil using fractal-based capacitive sensor," *Heliyon*, vol. 10, no. 24, p. e40995, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40995.
- [6] Y. Usman, R. Rahman, and E. Papilaya, "Analisis Perbandingan Nilai Konstanta Dielektrik Dari Minyak Goreng Kemasan, Minyak Goreng Curah dan Minyak Jelantah," *Jurnal Fisika Papua*, vol. 2, no. 2, pp. 114–119, Aug. 2023, doi: 10.31957/jfp.v2i2.81.
- [7] S. Rangkuti, dan Muhamad Zakaria, and C. Author, "RANCANG BANGUN PROTOTIPE PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN METODE PWM MENGGUNAKAN MULTIVIBRATOR ASTABLE," *JURNAL SOSIAL DAN SAINS*, vol. 2, pp. 616–625, May 2022, [Online]. Available: <http://sosains.greenvest.co.id>
- [8] J. E. Elektro, B. Murtianta, D. Susilo, K. S. Wacana, and B. M. Edu, "PENGUAT KELAS D FREKUENSI TETAP ORDE 2," May 2022. [Online]. Available: <https://journal.uny.ac.id/index.php/jee>
- [9] R. Bensalem *et al.*, "Design of an Integrated Micro-Viscometer for Monitoring Engine Oil," *Sensors*, vol. 22, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22145157.
- [10] L. Lauritsch, F. Linhart, and M. Da Silva, "Capacitive and Wireless Gas Holdup Sensing in a Loop Reactor Using a Magnetically Coupled Resonant Circuit," *IEEE Sens. Lett.*, vol. 9, no. 8, 2025, doi: 10.1109/LENS.2025.3585250.
- [11] Y. Wang, T. Lin, D. Wu, L. Zhu, X. Qing, and W. Xue, "A New In Situ Coaxial Capacitive Sensor Network for Debris Monitoring of Lubricating Oil," *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1777, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22051777.
- [12] Y. Zaarour *et al.*, "Engine Oil Quality Monitoring Using an Additively Manufactured X-Band Microwave Waveguide Sensor," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 181341–181350, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3509643.
- [13] I. Niță, S. Osman, and O. Iulian, "Dynamic viscosity dependence on temperature for fuels used for diesel engine," *Ovidius University Annals of Chemistry*, vol. 32, no. 1, pp. 98–103, Jan. 2021, doi: 10.2478/auoc-2021-0014.
- [14] J. Corach, P. A. Sorichetti, and S. D. Romano, "Electrical properties and kinematic viscosity of biodiesel," *Fuel*, vol. 299, p. 120841, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120841.
- [15] I. Stanciu, "Study Rheological Behavior of Rapeseed Oils Compared to Mineral Oil," *Oriental Journal Of Chemistry*, vol. 37, no. 1, pp. 247–249, Feb. 2021, doi: 10.13005/ojc/370135.