Rancang Bangun Sensor Pengukur *Level Interface* Air dan Minyak pada *Mini Plant* Separator

Ade Setio Nugroho[1], Faridah[2], Kutut Suryopratomo [3]

[1,2,3]*Jurusan Teknik Fisika FT UGM*
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA
[1]adesetio@yahoo.com
[2]faridah@ugm.ac.id
[3]kutut@ugm.ac.id

Intisari—**Pada penelitian ini dibuat rancang bangun sensor pengukur *interface* air dan minyak pada *mini plant separator* dengan menggunakan 2 metode, yaitu sensor kapasitif dan sensor resistif. Untuk sensor kapasitif, air dan minyak berperan sebagai dielektriknya, dimana perubahan nilai kapasitansinya berdasarkan perubahan ketinggian plat konduktor yang terendam air. Untuk sensor resistif, potensiometer digunakan sebagai *sensing element,* pelampung yang memiliki massa jenis diantara air dan minyak, dihubungkan ke potensiometer menggunakan lengan, perubahan ketinggian air akan merubah posisi pelampung yang akan memutar potensiometer. Berdasarkan hasil pengujian terhadap sensor kapasitif dan resistif, sensor kapasitif tidak bisa digunakan untuk studi kasus penelitian ini, karena memiliki pengukuran yang tidak stabil dan *time response* yang lama. Tanpa rangkaian *amplifier,* sensor resistif yang digunakan memiliki rentang tegangan keluaran sebesar 0,35 V – 0,67 V. Setelah melewati rangkaian *amplifier* rentang tengangan keluaran menjadi 2,56 V – 4,88 V dengan sensitivitas sebesar 0,25 volt/cm. Sensor memiliki inakurasi sebesar 1 cm yang disebabkan oleh histeresis. Histeresis tidak bisa dihindari, namun bisa dikurangi dengan memperbesar volume dari pelampung, agar nilai dari gaya angkat bertambah. Bisa juga dengan memperpanjang lengan, agar torsi yang dihasilkan lebih besar.**
Kata kunci— *Sensor, Kapasitif, Resistif, Potensiometer, Interface*

Abstract— **In this research, acapacitive-resistive interface level sensor that measures the interface of oil and water has been made using 2 methods. For the capacitive sensor, the oil and water are treated as a dielectric material. The capacitancevalue changesbychanging the height ofthe conductorplatethatis submerged in water. For the resistive sensor, potentiometeris usedas asensingelement. Float which has densitybetweenthe oil and water is connectedto thearm, the changes of the height ofthe waterwillchange thefloatpositionthat willrotate thepotentiometer. Based on the tests result of capacitive and resistive sensor, capacitivesensorscannotbe usedforthisresearchcase study, because it has an unstable measurement and a long response time. Without theamplifiercircuit, theresistivesensor that usedhasoutputvoltage rangefrom 0.35V to 0.67V. After passing through the amplifier circuit, output voltage range from 2.56 V to 4.88 V with the sensitivity of 0.256 volts/cm. The sensorhas1cm inaccurationcaused byhysteresis. Hysteresisis inevitableforsensorsthatusesfloat, but it canbe reducedby increasing thevolumeof thefloat, so thatthe valueofthe lift force increases. It could alsoextendthe arm, so thatthe torque generatedgreater.**
Keywords— *Sensor, Capacitive, Resistive, Potentiometer, Interface*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi sangatlah pesat, begitu juga dengan persaingan untuk memasuki dunia kerja di industri proses. Wawasan dalam dunia industri sangatlah penting untuk menjadi modal awal memasuki dunia industri, oleh karena itu dibutuhkan sebuah media pembelajaran sebagai gambaran dari dunia industri proses sebagai aplikasi dari teori di lapangan.

Salah satu aplikasi di dunia industri adalah separator.Separator adalah sebuah vessel (bejana tekan) yang di gunakan di perusahaan-perusahaan minyak dan gas untuk memisahkan air, minyak, dan gas yang masih berupa *crude oil* yang baru diambil dari perut bumi.Pada keadaan sebenarnya di sumur minyak (*wellhead*), sebagian besar keadaannya adalah *high pressure*, maka tidak memerlukan pompa untuk menaikkan air dari sumur.Tekanan di dalam separator juga *high pressure*. Proses pemisahan adalah bagian yang penting dalam rangkaian proses produksi, dimana terdapat beberapa variable kontrol yang harus diperhatikan seperti suhu, tekanan dan ketinggian.

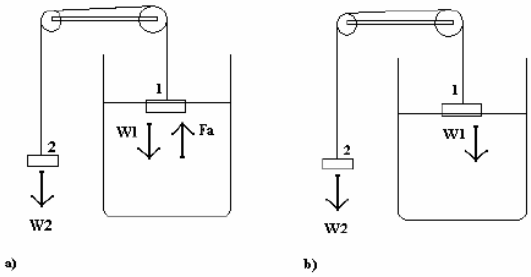
Untuk melakukan pengukuran suhu, tekanan , ketinggian, diperlukan sebuah. Sensor merupakan alat digunakan untuk mendeteksi kondisi suatu proses, yaitu perangkat keras untuk mengubah informasi suatu bentuk energi ke informasi bentuk energi listrik secara proporsional. Dalam pengukuran ketinggian permukaan cairan, ada beberapa prinsip transduksi yang bisa digunakan, seperti resistif dan kapasitif.

II. STUDI PUSTAKA

Sistem pengukur level air berbasis kapasitif dibuat menggunakan efek kapasitansi dari dua konduktor (kabel). Sistem pengujian dibuat dalam ukuran sebenarnya (tinggi 4 m), sehingga karakteristik sensor dan sistem yang digunakan dapat dibuat hingga range 380 cm. Pengujian dilakukan dengan melakukan pengukuran pada beberapa titik sampe level air, baik level air naik maupun turun. Perubahan kapasitansi yang terjadi pada sensor akan di konversi menjadi tegangan dengan menggunakan blok konverter yang terdiri dari IC NE 555 dan IC LM 2917.

Dilakukan pula pengujian pada sistem yang lebih kecil dengan tujuan untuk mengetahui lebih dalam karakteristik sensor dan faktor pengganggu yang lain. Salah satu faktor pengganggu adalah gelombang radio, baik itu HF, VHF, maupun UHF, secara signifikan melakukan interferensi pada hasil keluaran sensor pada sistem kecil. Gelombang radio VHF yang dipancarkan dengan daya 0,5 watt mampu mengubah nilai kapasistansi keluaran hingga 7,04% dari nilai aslinya. Sedangkan gelombang radio UHF yang dipancarkan dengan daya yang sama mampu mengubah nilai kapasitansi keluaran hingga 25,35% dari nilai aslinya. Faktor lain yang mempengaruhi respon kapasitansi keluaran pada sistem sensor kecil adalah suhu medium, baik itu air maupun udara yang berperan sebagai dielektrik dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,99. [1]

Sensor berbasis resistansi di desain dengan menggunakan metode *float to resistance* yang memanfaatkan prinsip dari hukum Archimedes. Ada sebuah pelampung yang dikopel dengan pelampung yang lain, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gbr. 1 Desain pelampung [3]

W2 didesain sedimikian rupa sehingga nilainya lebih kecil dari W1.Sistem didesain agar W1 – W2 < Fa.[3]

III. DASAR TEORI

Sensor adalah alat yang digunakan untuk mendeteksi adanya besaran mekanis, magnetis, panas, sinar, dan kimia.Kemudian merubah besaran tersebut menjadi sinyal listrik secara proporsional.

Secara umum sensor di klasifikasikan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Sensor Aktif
2. Sensor Pasif

Sensor aktif adalah jenis sensor yang tidak memerlukan sumber energi tambahan dan langsung mendapatkan sinyal listrik sebagai respon dari stimulus dari luar.Energi inputan tadi di konversi oleh sensor menjadi sinyal keluaran.Contohnya adalah termokopel, photodiode, dan piezoelektrik sensor.

Sensor pasif adalah kebalikan dari sensor aktif, memerlukan energitambahan dari luar untuk operasinya, yang biasa disebut sinyal eksitasi. Sinyal itu di modifikasi oleh sensor untuk mendapatkan sinyal keluaran.Sensor aktif terkadang disebut parametrik, karena sifatnya yang berubah sebagai respon dari efek eksternal dan sifat ini kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik.

Sebagian besar stimulus dari sensor bukanlah berupa tegangan listrik, oleh karena itu, dari input menuju output, sensor membutuhkan beberapa langkah konversi energi sebelum menghasilkan output berupa sinyal listrik. Namun, dalam perhitungan karakteristik sensor, fenomena atau langkah-langkah yang dibutuhkan untuk mengkonversi energi tidak terlalu diperhatikan. Dalam perhitungan karakteristik, sensor di anggap sebagai *black box*, dimana yang diperhatikan hanyalah hubungan antara output sinyal listrik dan input stimulus.

Sensor memiliki 2 jenis karakteristik yaitu :

1. Karakteristik Statis
2. Karakteristik Dinamis

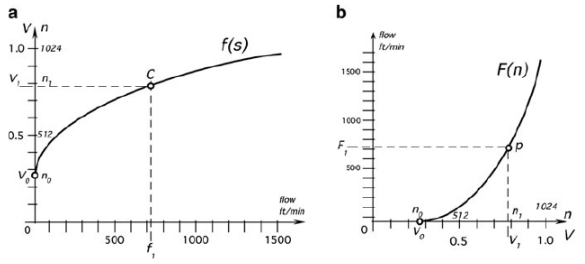
Karaketeristik Statis adalah karakteristik yang dimiliki oleh sensor pada saat keadaan sudah steady.Seperti, Fungsi alih, Linearity, Sensitivity, akurasi, error, histerisis, repeatability, resolusi, span, dll.

Karakteristik Dinamis adalah karakteristik yang dimiliki oleh sensor pada saat keadaan menuju steady atau pada saat keadaan transien. Seperti, Zero order system, First order system, second order system.

A. Fungsi Alih

Setiap sensor memiliki perhitungan ideal atau teoritikal untuk hubungan antara input – output (stimulus-response). Output dari sensor akan selalu merepresentasikan nilai sebenarnya dari stimulus, jika sebuah sensor di design dan di fabrikasi dengan material yang ideal dan pekerja serta alat yang ideal. Hubungan ideal antara input-output bisa di jelaskan dalam bentuk table, grafik, rumus matematis, atau sebagai solusi dari sebuah persamaan matematis.Jika fungsi dari input-output tidak berubah terhadap waktu, ini biasa disebut fungsi alih.

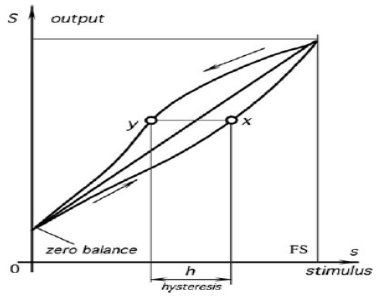
Fungsi alih merepresentasikan hubungan antara stimulus sdan respon dari sinyal listrik S yang dihasilkan oleh sensor. Sebagai contoh pada Gambar 2.



Gbr. 2a) transfer function b) invers transfer function [4]

B. Hysterisis

Hysterisis adalah deviasi dari output sensor pada titik tertentu dari sinyal input ketika didekati dari arah yang berlawanan. Sebagai contoh, Seperti pada Gambar 3.



Gbr. 3*Hysterisis* [4]

Hysterisis biasa disebabkan oleh gemotri dari design sensor, friksi, dan struktur yang berubah pada material.

C. Sensor Kapasitif

Kapasitansi didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu kapasitor untuk dapat menampung muatan elektron pada beda potensial tertentu. Dalam satuan Standar Internasional (SI), kapasitansi dinyatakan dalam coulomb (Q) per volt (V) atau disebut farad (F) yang didefinisikan oleh seorang penemu Inggris Michael Faraday sebagai :

1 F = 1 C/V

Karena farad merupakan satuan yang cukup besar, sering digunakan subkelipatan dari farad seperti microfarad (1 µF = 10^{-6} F) atau picofarad (1 pF = 10^{-12}).

Sensor kapasitif merupakan sensor yang bekerja berdasarkan konsep kapasitif.Kapasitansi bisa dikalkulasi dengan mengetahui geometri konduktor dan sifat dielektrik penyekat di antara konduktor. Sebagai contoh, besar kapasitansi dari sebuah kapasitor "pelat-sejajar" yang tersusun dari dua lempeng sejajarnya seluas *A* yang dipisahkan oleh jarak *d* adalah sebagai berikut:

$$C = \varepsilon_0 K \frac{A}{D}$$

Dengan:

C = Kapasitansi (Farad)
ε_0 =Tetapan Permitivitas Ruang Hampa
K = Konstanta Dielektrik
A = Luasan Plat (m^2)
D = Jarak Antar Plat (m)

D. Resistansi

Resistansi adalah perbandingan antara tegangan listrik dari suatu komponen elektronik(misalnya resistor) dengan arus listrik yang melewatinya.Material yang memiliki resistivitas listrik disebut resistor.

E. Potensiometer

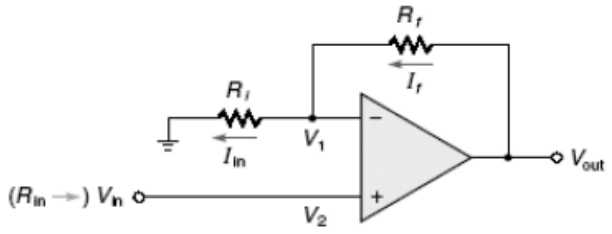
Potensiometer biasa disebut juga sebagai *variable resistor,* yaitu resistor yang dapat diubah-ubah nilai resistansinya.Potensiometer digunakan sebagai sensing element pada sensor level berbasis resistif dengan prinsip kerja berdasarkan perpindahan.

F. Operational Amplifier

Operational amplifier adalah sirkuit terintegrasi yang terdiri dari transistor, resistor, dan juga kapasitor yang berfungsi untuk menguatkan tegangan. Ada beberapa jenis op amp seperti inverting amplifier dan om non inverting amplifier.

Inverting amplifier adalah penguat pembalik. Rangkaiannya hanya memerlukan dua tahanan yaitu Ri dan Rf. Maksud dari pembalik adalah saat tegangan input positif masuk hasilnya akan dikuatkan tetapi dengan fasa yang berbeda yaitu menjadi negatif.

Non Inverting Amplifier mirip dengan penguat inverting tetapi fasa daritegangan input akan sama dengan fasa tegangan output, penguatan dari non inverting amplifier akan selalu lebih dari 1.



Gbr. 4*Non inverting amplifier*

Hubungan antara tegangan output dan tegangan input dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{out} = (1 + \frac{Rf}{Ri})\ V_{in}$$

IV. PELAKSANAAN PENELITIAN

Metodologi penelitian ini adalah berbasis rancang bangun.Perancangan sensor dilakukan berdasarkan studi pustaka dan dasar teori yang telah dipelajari.Perancangan sensor menggunakan 2 metode yaitu sensor berbasis kapasitif dan resistif.

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan landasan teori dan prinsip kerja dari sensor yang dirancang. Studi pustaka meliputi penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya tentang sensor berbasis kapasitif dan resistif, serta studi literatur dari *textbook* mengenai karakteristik dasar sensor, prinsip transduksi sensor, dan materi lain yang dibutuhkan.

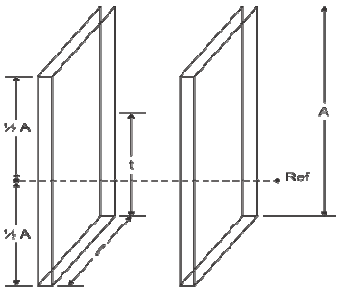
A. Perancangan Sensor Berbasis Kapasitif

Perancangan sensor berbasis kapasitif dibuat sesuai dengan landasan teori yang telah dipelajari. Sensor kapasitansi yang dirancang berupa kapasitor dengan konduktor berupa plat sejajar yang berbentuk persegi panjang. Konduktornya adalah plat PCB yang dengan ukuran 20 cm x 10 cm. Sensor ini akan memperlakukan air dan minyak sebagai bahan dielektriknya. Sensor dibuat selalu tenggelam di dalam air dan minyak, sehingga hanya ada 2 dielektrik yaitu dielektrik air dan minyak, tanpa udara. Nilai kapasitansi akan berubah-rubah terhadap luasan plat yang terendam air dan minyak yang berkorespondesi dengan tinggi air.

Seluruh plat akan di celupkan di dalam air dan minyak, dimana ada titik referensi yaitu set point. Pada titik referensi, dimana tinggi plat yang terendam air dan terendam minyak sama seperti pada gambar, akan didapat rumus matematis yaitu,

$C_{total} = C_{air} + C_{minyak}$

$Ctotal = \varepsilon_0 K\text{air}\frac{0{,}5A}{D} + \varepsilon_0 K\text{minyak}\frac{0{,}5A}{D}$



Gbr. 4 Ketinggian air di titik referensi

B. Perancangan Sensor Berbasis Resisitif

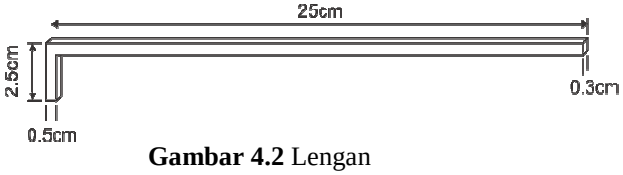
Sensor berbasis resistif ini dirancang berdasarkan perpindahan dari pelampung yang akan merubah resistansi dari variable resistor dan berkorespondesnsi dengan ketinggian antar muka air dan minyak.

Variable Resistor yang digunakan adalah potensiometer multi turn, atau biasa disebut potensiometer wire wound 10K. Potensiometer ini memiliki linearitas yang baik dan resolusi yang baik yaitu 0,5°. Selain memiliki linearitas yang baik, potensiometer ini memiliki friksi yang sangat kecil relatif terhadap potensiometer yang lain, seperti potensiomter karbon dan potensiometer slide.

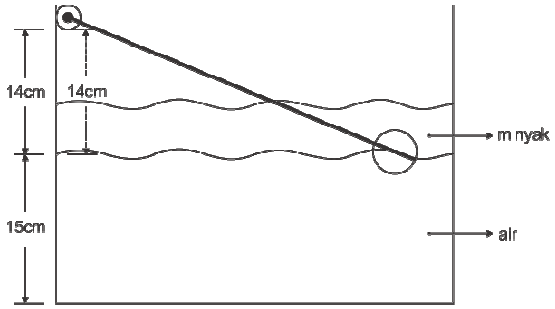
Pelampung yang digunakan adalah bola pingpong berdiameter 4 cm. bola pingpong diisi pasir agar massa nya bertambah, sehingga massa jenisnya akan bertambah pula. Dengan menghitung volume dari bola pingpong, maka massa dari pasir yang harus dimasukkan ke dalam bola pingpong bisa diketahui.

Volume Bola Pingpong adalah 33,5 x 10^{-6} m^3. Agar di dapat massa jenis dari pelampung yang lebih dari 800 kg/m^3, maka massa minimum dari pelampung adalah26,8 gr dan Massa Maksimumnya adalah33,5 gr.

Lengan yang digunakan adalah acrylic dengan tebal 3 mm dan lebar 5 mm. Penggunaan acrylic sebagai lengan dikarenakan acrylic memiliki massa yang relatif ringan. Ukuran dan geometri lengan akan ditunjukkan pada Gambar 5.

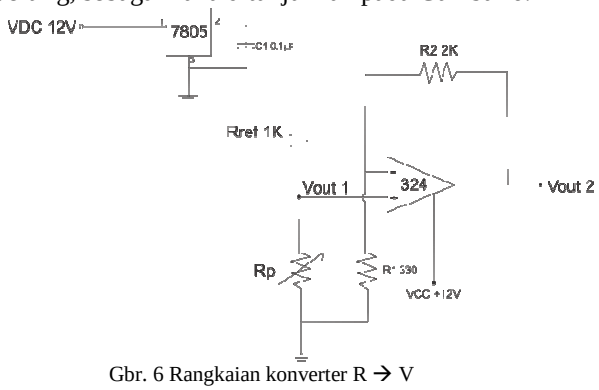


Gambar 4.2 Lengan



Gbr. 5 Desain Sensor Resistansi dengan Lengan

Rangkaian yang digunakan untuk mengkonversi nilai resistansi menjadi nilai tegangan adalah rangkain pembagi tegangan yang disambungkan dengan operational amplifier non inverting, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gbr. 6 Rangkaian konverter R → V

$\text{Vout 1} = \frac{Rp}{Rp+Rref}$ x Vcc

$= \frac{Rp}{Rp+1k}$x5v

$\text{Vout 2} = (\frac{R2}{R1} + 1)$ x Vout 1

$= (\frac{2k}{330} + 1)$ x Vout 1

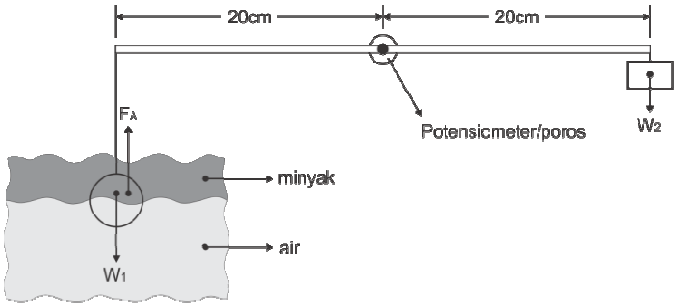
C. Jungkat – Jungkit

Desain menggunakan jungkat – jungkit dibuat dengan menggunakan hukum kesetimbangan benda tegar, dengan menghitung kesetimbangan momen pada lengan. Desain terbuat dari lengan dengan 2 beban di ujung-ujungnya, yang satu sebagai pelampung, yang satu lagi sebagai kopel. Potensiometer berlaku sebagai poros lengan, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

$$\sum \tau = 0$$

(W1 x L) – (W2 x L) = 0

((Wp x L) - ((FA air + FA minyak) x L))–(W2 x L) = 0



Gbr. 6 Desain jungkat - jungkit

Untuk menghitung nilai W2, dengan memperhitungkan nilai W1 maksimum dan nilai W1 minimum. Nilai W1 akan bernilai maksimum ketika benda seluruhnya berada di dalam minyak. Dengan menggunakan hukum Archimedes, nilai W1 maksimum bisa didapat dengan menggunakan persamaan:

W2 maksimum = W pelampung – FA minyak

= (Mp x g) – (ρ_{minyak} x$V_{benda\ yang\ tercelup}$ x g)

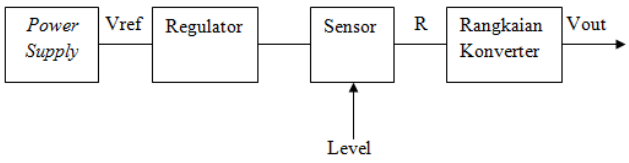
= (28 x 10^{-3} kg x 9,8 m/s^2) - (800 kg/m^3 x 33,5 m^3 x 10^{-6} x 9,8 m/s^2)

= 0,2744 - 0,2626

= 0, 0118 N

Berat maksimum dari W2 adalah 0,0118 N dan massa maksimumnya adalah 1,18 gr.

Sensor diuji dengan 2 cara, yaitu uji naik dan uji turun. Uji turun adalah, sensor di set pada titik *set point*, kemudian tinggi air dikurangi, lalu diliat perubahan resistansinya. Sedangkan uji naik kebalikan dari uji turun, setelah air diturunkan permukaannya, air ditambah lagi, lalu dilihat lagi perubahan resistansinya. Pengukuran resistansi menggunakan LCR meter. Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui kestabilan pengukuran dari rancangan sensor yang telah dibuat.



Gbr. 7 Blok Pengujian Sensor

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada sensor ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data respon dari sensor terhadap perubahan ketinggian antarmuka air dan minyak untuk mengetahui karakteristik sensor.

A. Hasil Pengujian Sensor Kapasitansi

.

Pengujian dilakukan dengan mengukur langsung nilai kapasitansi sensor pada setiap ketinggian antarmuka air dan minyak dengan menggunakan LCR meter.Pengujian di lakukan selama 7 menit di tiap titik pengukuran. Hasil Pengujian bisa dilihat pada Tabel 1.

Gbr. 8 Sensor Kapasitansi

Tabel 1.Hasil Pengujian Sensor Kapasitansi

Tinggi air (cm)	Tinggi minyak (cm)	Ctot (teori) nF	Ctot (eksperimen), nF Menit							
			0	1	2	3	4	5	6	7
udara		0.05	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
5	5	2.17	9.7	11.1	11.4	11.6	11.7	11.8	11.9	12.1
6	4	2.54	11	11.4	11.68	11.97	12.13	12.29	12.42	12.52
7	3	2.95	12.47	12.85	13.14	13.24	13.45	13.55	13.65	13.82
8	2	3.42	11.3	11.93	12.16	12.4	12.6	12.8	13	13.16

Sensor kapasitansi yang dirancang berupa kapasitor dengan konduktor berupa plat sejajar yang berbentuk persegi panjang. Konduktornya adalah plat PCB dengan ukuran 20 cm x 10 cm. Sensor ini akan memperlakukan air dan minyak sebagai bahan dielektriknya. Sensor dibuat selalu tenggelam di dalam air dan minyak, sehingga hanya ada 2 dielektrik yaitu dielektrik air dan minyak, tanpa udara. Nilai kapasitansi akan berubah-rubah terhadap luasan plat yang terendam air dan minyak yang berkorespondesi dengan tinggi air.

Sebelum dilakukan pengujian, nilai kapasitansi untuk setiap titik dihitung secara teori untuk dibandingkan dengan

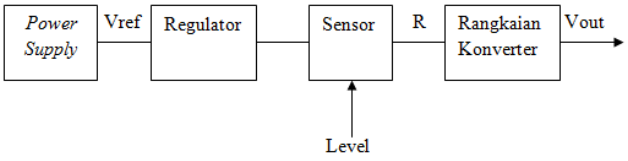
nilai eksperimen.Seperti yang terlihat pada Tabel 1, nilai kapasitansi secara teori dan secara eksperimen memiliki perbedaan yang sangat besar. Hal ini bisa dikarenakan sifat dari pelapis konduktor plat PCB yang digunakan, yang bisa menambah dielektriknya. Nilai kapasitansi dari sensor terus naik hingga menit ke 7, ketika air ditambahkan, nilai kapasitansinya turun kembali, baru kemudian naik lagi. Dari Tabel 1 bisa dilihat bahwa sensor kapasitif plat sejajar dengan menggunakan PCB sebagai konduktor ini memiliki *time response* yang lama dan pengukuran yang tidak stabil. *Time response* adalah waktu yang dibutuhkan sensor untuk mecapai keadaan *steady*.

Pada tinggi air 6 cm, nilai kapasitansi sebesar 11 nF pada menit ke-0 dan terus naik hingga 12,52 nF pada menit ke 7, namun pada ketinggian air 8 cm, nilai kapasitansi kembali lagi pada 11,3 nF dan terus naik hingga 13,16 nF pada menit ke-7. Peningkatan nilai kapasitansi terjadi karena luas penampang plat (A) yang terendam air semakin besar dengan semakin tingginya air, maka nilai kapasitansi total yang merupakan penjumlahan dari nilai kapasitansi di air dan nilai kapasitansi di minyak akan semakin besar. Karena nilai konstanta dielektrik air pada suhu 25°C sebesar K=80, sedangkan minyak mempunyai konstanta dielektrik sebesar K=1,8.

Suhu lingkungan dapat mempengaruhi nilai dari sensor kapasitansi, oleh karena itu, pengukuran pada jam yang berbeda, akan menimbulkan hasil pengukuran yang berbeda-beda, karena suhu yang berbeda, akan menghasilkan nilai konstanta dielektrik yang berbeda pula. Selain suhu lingkungan faktor lain yang mengganggu hasil pengukuran adalah lengketnya minyak di plat konduktor, hal ini menyebabkan perbedaan nilai konstanta dielektrik di antara plat konduktor.

B. Hasil Pengujian Sensor Resistansi Dengan Lengan

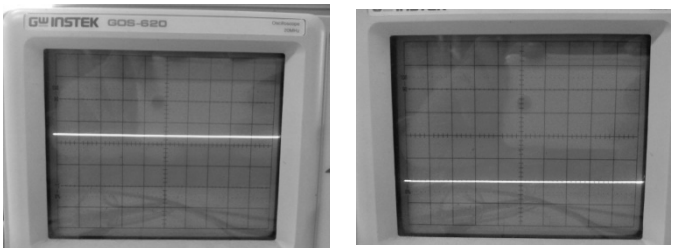
Pengujian sensor dilakukan dengan 4 tahapan seperti pada Gambar 9. Pengujian di tiap blok dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dari tiap-tiap blok.



Gbr. 9 Tahap Pengujian Sensor

C. Pengujian Blok Power Supply

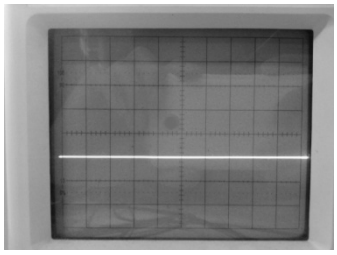
Pengujian *power supply* dilakukan untuk melihat karakteristik tegangan dari catu daya yang digunakan. Pengujian menggunakan multimeter dan *oscilloscope.* Multimeter digunakan untuk mengukur langsung tegangan keluaran dari *power supply*, terjadi fluktuasi tegangan dalam orde 0,01 V. Kemudian digunakan *oscilloscope* untuk melihat kestabilan dari tegangan keluaran *power supply* seperti pada Gambar 10. *Power supply* memiliki tegangan yang stabil, namun setiap *power supply* di laboratorium memiliki tengangan keluaran yang berbeda–beda. Catu daya yang diperlukan adalah 12 Volt DC, tegangan keluaran dari beberapa catu daya yang ada di laboratorium berkisar 11,7 V – 12,1 V. Oleh karena itu tetap dibutuhkan regulator untuk menstabilkan tegangan dan untuk mendapatkan tegangan masukan untuk sensor yang tetap walaupun menggunakan *power supply* yang berbeda-beda.



Gbr. 10 Pengujian *PowerSupply* dengan *Oscilloscope* a) 12 V ; b) Titik Referensi 0 V

D. Pengujian Blok Regulator

Pengujian regulator dilakukan untuk melihat karakteristik dari IC 7805 yang digunakan sebagai regulator untuk menurunkan.tegangan *power supply* dari 12 V menjadi 5 V. Regulator juga difungsikan untuk menstabilkan tegangan, sehingga jika ada fluktuasi dari tegangan sumber, maka tegangan masukan untuk sensor tetap 5 V. Regulator memiliki tegangan yang stabil, pengujian dilakukan menggunakan *oscilloscope* untuk melihat kestabilan tegangan seperti pada Gambar 11.



Gbr. 11 Pengujian Regulator dengan *Oscilloscope*

Berdasarkan *datasheet* dari IC 7805, tegangan keluaran dari IC regulator 7805 adalah 5 Volt DC, namun setelah diukur menggunakan multimeter, tegangan keluarannya hanyalah 4,93 Volt DC. Hal ini dikarenakan toleransi error dari IC tersebut sebesar +/- 2%. Pengujian dilakukan dengan menggunakan 4 *Power supply*, setiap *power supply* memiliki tegangan keluaran akutal yang berbeda-beda untuk tegangan +12 V. Hasil pengujian bisa dilihat pada Tabel2.

Tabel 2 Hasil Pengujian Regulator

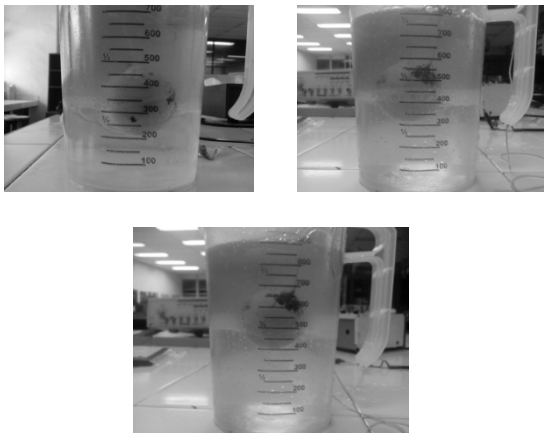
Tegangan dari catu daya (V)	Tegangan Keluaran dari IC 7805
11,7	4,93
11,98	4,93
11,95	4,93
12,1	4,93

E. Pengujian Blok Sensor

Pengujian pada sensor ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data respon dari sensor terhadap perubahan ketinggian antarmuka air dan minyak untuk mengetahui karakteristik sensor.Pengujian dilakukan dengan mengukur langsung nilai resistansi sensor pada setiap ketinggian antarmuka air dan minyak dengan menggunakan LCR meter.Pengujian dilakukan dengan menaikkan tinggi permukaan air. Kemudian dilakukan pengukuran pada perbedaan ketinggian antarmuka air dan minyak dengan rentang 5 mm. Pada blok ini dilakukan juga uji pelampung, untuk melihat karakteristik pelampungnya.

Uji Pelampung

Uji pelampung dilakukan untuk melihat karakteristik pelampung tanpa diberi beban lengan. Untuk melihat gaya apung dari pelampung dan memastikan bahwa pelmapung tenggelam di minyak dan mengapung di air. Hasil pengujian bisa dilihat pada Gambar 12.Pengujian dilakukan pada tiga titik ketinggian air.

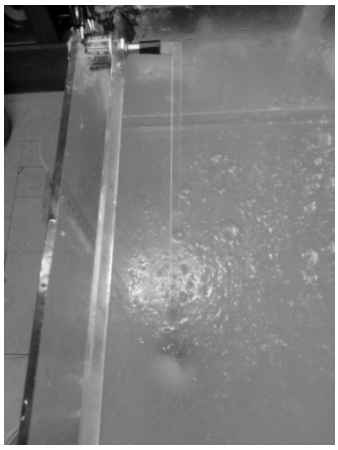


Gbr. 12 Uji Pelampung

Pelampung diuji menggunakan gelas ukur, titik pertama dengan ketinggian air 350 ml, titik kedua dengan ketinggian air 450 ml, dan titik ketiga dengan ketinggian air 550 ml. Pelampung memiliki karakteristik yang bagus, yang selalu mengikuti ketinggian antarmuka air dan minyak, walau diberikan gangguan berupa air sebesar 100 ml.

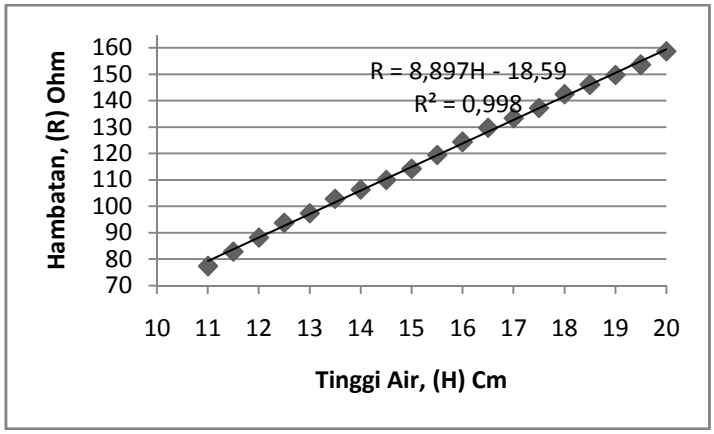
Uji Sensor

Lengan dengan panjang 25cm langsung dihubungkan dengan potensiometer dengan sudut kemiringan yang sudah diperhitungkan, agar didapatkan perubahan nilai resistansi tiap perubahan ketinggian antarmuka air dan minyak minimal 5 mm.



Gbr. 13 Sensor Resistif Dengan Lengan

Pengujian dengan lengan yang langsung dipasang di potensiometer (Gambar 13) memiliki hasil pengukuran yang bagus. Hasil pengujian ditunjukkan oleh Gambar 14, nilai pengukuran resistansi tidak berubah secara signifikan walaupun sistem di set ulang. Berdasarkan Gambar 14, resistansi semakin besar dengan semakin tingginya ketinggian antarmuka air dan minyak. Resistansi yang dihasilkan sensor adalah 77,3 Ω – 158,7 Ω. Uji sensor ini menunjukkan linieritas yang bagus.



Gbr. 14 Grafik Hubungan Hambatan (R) terhadap Tinggi air (H)

F. Pengujian Blok Rangkaian Konverter R → V

Pengujian konverter resistansi ke tegangan dilakukan untuk melihat seberapa proportional hasil konversi dari resistansi ke tegangan, karena sebuah sensor harus bisa mengkonversi fenomena atau stimulus yang masuk menjadi besaran listrik secara proporsional.Desain yang dipakai adalah desain sensor resistansi dengan menggunakan lengan.

Rangkain konverter terdiri dari 2 rangkain, yaitu *voltage divider* dan rangkaian *amplifier*.Sumber tegangan berupa Vcc 12 Volt DC dari *power supply*, yang kemudian diturunkan tegangannya menjadi 5 Volt DC menggunakan IC 7805.

Hasil Pengujian Voltage Divider

*Voltage divider*adalah rangkaian pembagi tegangan seperti pada Gambar 15 yang berfungsi untuk merubah nilai resistansi menjadi tegangan. Rref yang digunakan sebesar 1 KΩ.Terdapat perbedaan nilai tegangan keluaran antara teori dan hasil pengukuran. Perbedaan nilai ini dikarenakan turunnya tegangan keluaran dari IC regulator 7805 yang seharusnya 5 Volt DC, tetapi pada saat dilakukan uji regulator, tegangan keluaran dari IC regulator 7805 hanyalah 4,93 Volt DC.

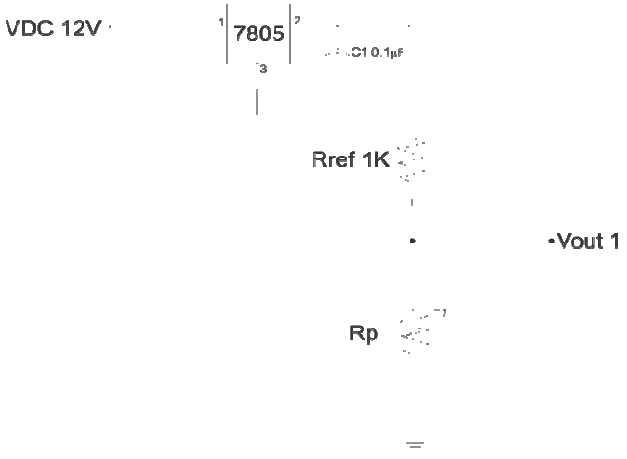
$$\text{Vout 1 teori} = \frac{Rp}{Rp+Rref} \text{ x Vcc}$$

$$= \frac{Rp}{Rp+1k} \text{ x 5 V}$$

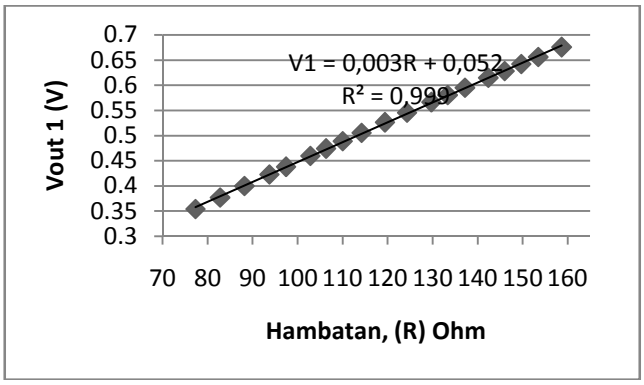
$$\text{Vout 1 aktual} = \frac{Rp}{Rp+Rref} \text{ x Vcc}$$

$$= \frac{Rp}{Rp+1k} \text{ x 4,93 V}$$

Perbedaan tegangan keluaran antara teori dan aktual adalah sebesar 0,01 Volt atau sebesar 10 mV.



Gbr. 15 Rangkaian *Voltage Divider*

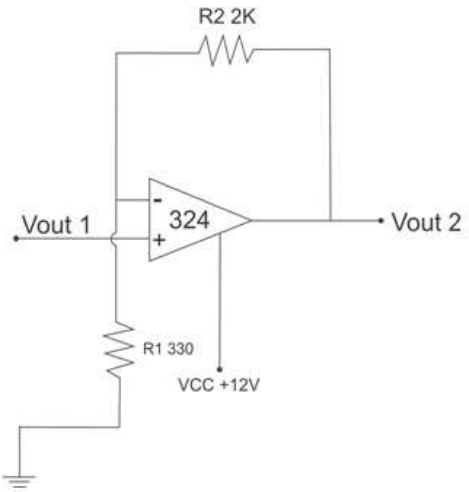


Gbr. 16 Grafik Hubungan Vout 1 (V) Terhadap Hambatan (R)

Bisa dilihat pada Gambar 16, tegangan keluaran dari sensor tanpa rangkaian *amplifier* adalah 0,35 V – 0,67 V. Karakteristik rangkaian *voltage divider* ini cukup baik, karena mempunyai faktor korelasi hampir 1 yaitu 0,999. Namun, tegangan keluaran dari *voltage divider* ini memiliki perbedaan yang sangat kecil antara titik ketinggian air yang satu dengan titik ketinggian air yang lain. Perbedaan nilai tegangan dalam orde mV, hal ini akan menyulitkan *controller*, terutama *Analoge Digital Konverter* (ADC) untuk membaca perbedaan tegangan ini. Oleh karena itu dibutuhkan rangkain *amplifier* untuk menguatkan tegangan keluaran, supaya memiliki sensitivitas yang lebih besar yang setidaknya dalam orde 0,1 V untuk perbedaan tiap ketinggian antarmuka air dan minyak.

Hasil Pengujian Rangkain Amplifier

Pengujian konverter R → V dengan rangkaian amplifier menggunakan IC LM 324 seperti pada Gambar 17.

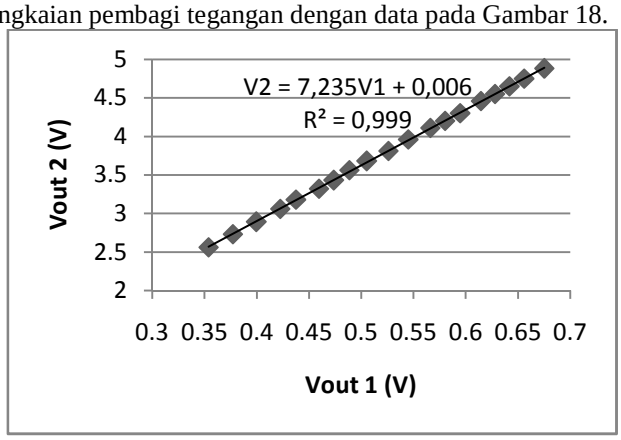


Gbr. 17 Rangkaian *Amplifier*

$$\text{Vout 2} = (\frac{R2}{R1} + 1) \text{ x Vout 1}$$

$$= (\frac{2k}{330} + 1) \text{ x Vout 1}$$

Penggunaan IC LM 324 ini dikarenakan sumber untuk catu daya IC ini lebih hanya memerlukan satu catu daya, yaitu catu daya positif. Penguatan yang digunakan adalah penguatan *non inverting*, penguatan *non inverting* ini digunakan agar tegangan keluaran setelah dikuatkan memiliki fase yang sama dengan tegangan masukannya. Tegangan masukan untuk rangkaian amplifier ini adalah tegangan keluaran pada rangkaian pembagi tegangan dengan data pada Gambar 18.



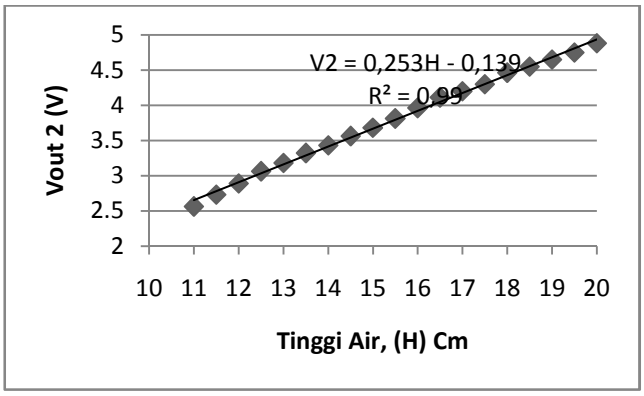
Gbr. 18 Grafik Hubungan Vout 2 (V) Terhadap Vout 1 (V)

Rentang tegangan keluaran dari sensor adalah 2,56 V – 4,88 V masih masuk dalam rentang keluaran yang diinginkan (0-5V), perhitungan besarnya penguatan rangkaian *amplifier* dirancang dengan menyesuaikan karakteristik ADC yang digunakan sebelum masuk ke *controller*. Hasil pengujian karakteristik ADC menunjukkan respon yang baik pada rentang 3 V - 5 V.

G. Hasil Pengujian Penggabungan Blok Sensor Dengan Konverter

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dari gabungan blok sensor dan konverter. Untuk mendapatkan respon tegangan konverter terhadap ketinggian antarmuka air dan minyak. Respon tegangan blok konverter ditampilkan dan dicatat menggunakan multimeter.

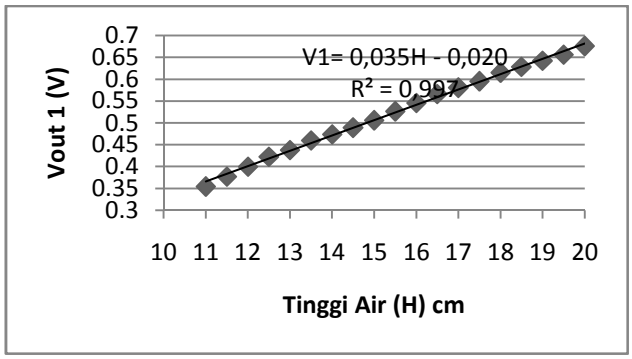
Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 19 adalah data respon tegangan terhadap ketinggian antarmuka air dan minyak hasil penggabungan sensor dengan sistem konverter. Tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki rentang 2,56 V – 4,88 V untuk ketinggian antar muka air 11 cm – 20 cm.



Gbr. 19 Grafik Hubungan Vout 2 (V) Terhadap Tinggi Air (H)

Karakteristik tegangan keluaran dilihat dengan menggunakan *trendline*.Pendekatan *trendline* yang digunakan merupakan persamaan linier yang mempunyai faktor korelasi 0,996.Persamaan yang didapatkan dari pendekatan menggunakan *trendline* juga menunjukkan sensitivitas dari sensor. Sensitivitas dari sensor adalah 0,25 volt/cm. Persamaan untuk sensitivitas, berdasarkan Gambar 5.12 adalah V (H) = 0,253H – 0,139, dimana 0,253 adalah *slope* dari sensitivitas, H adalah stimulus yang berupa ketinggian air, dan – 0,139 adalah konstanta. *Span* atau *full scale input* dari sensor adalah 9 cm.

Gambar 19 membuktikan, bahwa *operational amplifier* telah menaikkan sensitivitas, jika dibandingkan dengan tegangan keluaran tanpa amplifier terhadap tinggi air seperti terlihat pada Gambar 20.



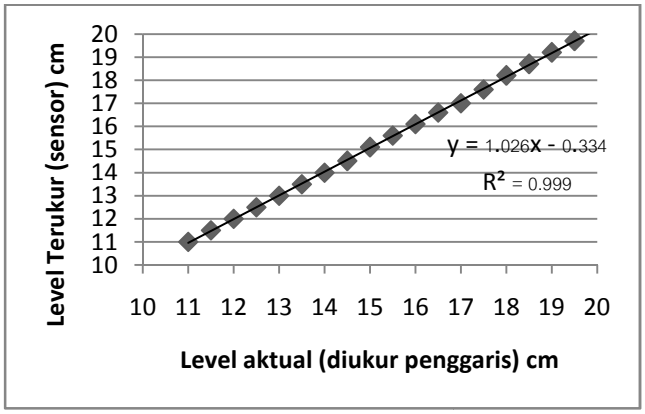
Gbr. 20 Grafik Hubungan Vout 1 (V) Terhadap Tinggi Air (H)

Sensitivitas dari sensor tanpa *amplifier* hanyalah 0,035 volt/cm. Dengan sensivitas 0,035 volt/cm, kontroller akan kesulitan membaca perbedaan ketinggian air. Dengan melihat perbedaan sensitivitas dari rangkaian tanpa rangkain amplifier dan rangkaian dengan amplifier, maka terlihat bahwa amplifier sangat dibutuhkan untuk menaikkan sensitivitas, yaitu menaikkan sensitivitas sensor menjadi 0,25 volt/cm.

H. Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan untuk mendapatkan keakuratan dari sensor, yaitu dengan membandingkan *level* aktual yang diukur dengan penggaris dan *level* yang terukur dari sensor.

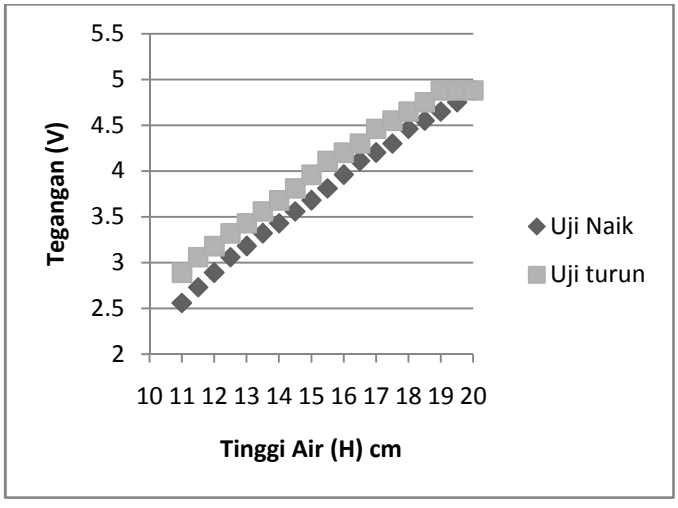
Hasil pengujian seperti terlihat pada Gambar 21, sensor memiliki keakuratan yang bagus, bisa dilihat dari koefisien korelasi yang bernilai 0,999. Error pada sensor terjadi pada ketinggian air 15 cm sampai 20 cm, yaitu sebesar 0,1 – 0,2 cm. Error terbesar terjadi pada ketinggian air 18 – 20 cm yaitu sebesar 0,2 cm. Error ini terjadi karena terbentuknya gelembung-gelembung yang sulit diidentifikasi, apakah itu termasuk kedalam minyak, atau air.



Gbr. 21 Grafik Uji Akurasi

I. Uji Histeresis

Untuk mendapatkan hasil uji histeresis, dilakukan pengujian naik dan turun, untuk mendapatkan keakurasian dari sensor.Hasil pengujian bisa dilihat pada Gambar 22.

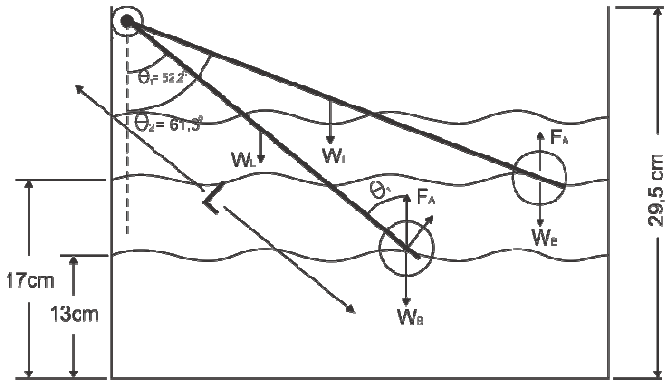


Gbr. 22 Grafik Uji Histeresis

Seperti terlihat pada Gambar 22, terjadi *dead band* sebesar 1 cm ketika dilakukan uji turun yang menghasilkan inakurasi dari sensor sebesar 1 cm. Jadi satu nilai tegangan bisa merepresentasikan 2 titik yang berbeda misalkan pada nilai tegangan 3,68 V, bisa merepresentasikan ketinggian antarmuka air dan minyak 14 cm atau 15 cm. Hal ini biasa disebut dengan histeresis.

Histeresis yang terjadi bisa terjadi disebabkan beberapa hal seperti, defleksi karena elastisitas dari lengan itu sendiri, histeresis dari potensiometer, dan juga variasi nilai gaya penggerak sebagai fungsi sudut yang dibentuk antara lengan dan arah vertikal gravitasi.

Pengaruh variasi dari gaya penggerak yang merupakan fungsi sudut bisa dilihat pada Gambar 23, sudut yang terbentuk antara lengan dan arah vertikal gravitasi mempengaruhi gaya yang diteruskan dari pelampung oleh lengan.



Gbr. 23 Variasi Sudut Terhadap Gaya yang Diteruskan Lengan

Gaya-gaya yang bekerja adalah:

F_A	=	Gaya Angkat atau Gaya Apung (N)
	=	F_A Air + F_A Minyak
W_B	=	Berat Pelampung (N)
W_L	=	Berat Lengan (N)
L	=	Panjang Lengan (m)

Gaya yang diteruskan ke lengan dalam bentuk torsi untuk mengangkat lengan adalah:

$$\tau = (F_A \sin\theta \text{ x } L) - (W_B \sin\theta \text{ x } L) - (W_L \sin\theta \text{ x } 0{,}5L)$$

$$= (F_A - W_B - 0{,}5W_L) \text{ x } L \text{ x } \sin\theta$$

Gaya yang diteruskan ke lengan untuk mengangkat pelampung adalah $(F_A - W_B - 0{,}5W_L)$ x L x sin θ. Hal ini berarti, semakin kecil sudut yang dibentuk antara lengan dan garis vertikal, maka semakin semakin kecil gaya yang diteruskan oleh lengan. Torsi minimum yang dibutuhkan untuk memutar potensiometer adalah:

$$\tau = (F_A \sin\theta \text{ x } L) - (W_B \sin\theta \text{ x } L) - (W_L \sin\theta \text{ x } 0{,}5L)$$

$= \quad (F_A - W_B - 0{,}5W_L) \times L \times \sin\theta$

$= \quad (0{,}305 - 0{,}274 - 0{,}024)\ N \times 25 \times 10^{-2}\ m \times \sin 50{,}2°$

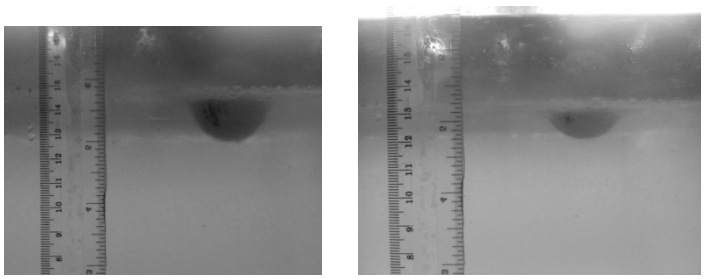
$= \quad 1{,}92 \times 10^{-2}\ Nm$

Untuk mengurangi histeresis ini bisa dilakukan beberapa hal, yaitu dengan memperbesar volume dari pelampung, agar nilai dari F_A bertambah, dan juga memperpanjang lengan, agar torsi yang dihasilkan lebih besar.

Hal lain yaitu defleksi, terjadi karena sifat elastisitas dari lengan yang terbuat dari akrilik. Defleksi ini menyebabkan gaya yang masuk ke lengan dan seharusnya diteruskan lengan untuk memutar potensiometer, tidak sampai ke potensiometer, namun digunakan untuk merubah bentuk dari lengan.

Satu faktor lagi adalah histeresis dari potensiometer itu sendiri juga menjadi faktor dari fenomena histeresis yang terjadi pada penelitian ini.Potensiometer memiliki sifat histeresis sendiri, namun sulit untuk mencari data histeresis itu, karena sulit untuk mengambil data putar potensiometer setiap derajatnya dan tidak tersedia data sekunder untuk data histeresis dari potensiometer yang digunakan.Pengujian histeresis dari potensiometer dilakukan dengan menggunakan busur dan benang, busur dipasang pada potensiometer dan benang digunakan untuk memutar potensiometernya yang mengikuti garis dari busur derajat.Metode ini tdiak berhasil untuk mengukur histeresis dari potensiometer, karena sulitnya memutar potensiometer sebesar 1° dengan menggunakan benang.

Karena gaya yang dibutuhkan di setiap titik untuk memutar potensiometer sama, maka jika gaya yang diteruskan oleh lengan berkurang, sistem harus menambah gaya yang masuk pada pelampung dengan cara merubah volume dari pelampung yang tercelup di air dan minyak. Kondisi pelampung pada saat naik dan turun terlihat pada Gambar 24.

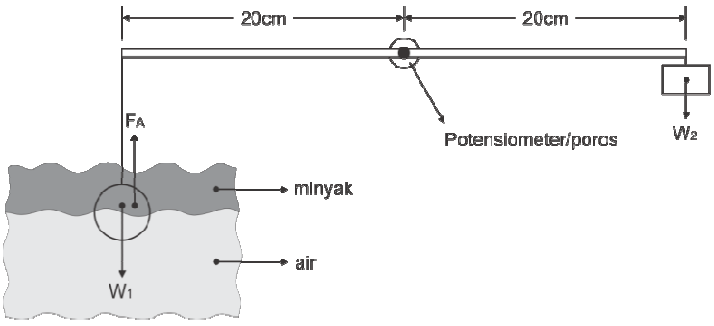


Gbr. 24 a) Pelampung saat naik ; b) Pelampung saat turun

Untuk sistem dalam skala besar seperti di industri, histeresis yang terjadi tidak berpengaruh terlalu signifikan, karena rentang pengukuran yang besar, jadi histeresis yang terjadi seperti ini hampir bisa diabaikan.

I. Hasil Pengujian Sensor Resistansi Dengan Jungkat-Jungkit

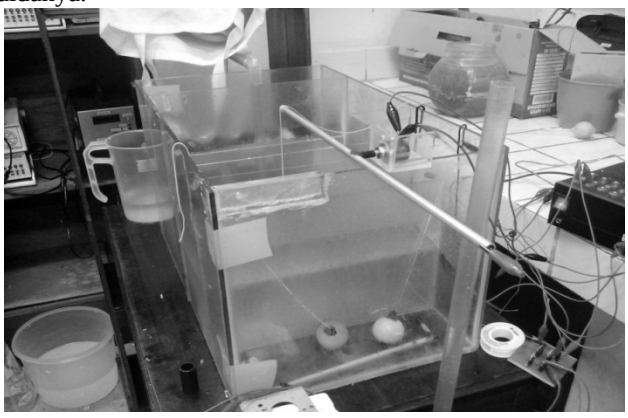
Sensor resistansi dengan jungkat-jungkit ini dibuat untuk menanggulangi histeresis yang terjadi pada sensor resistansi dengan lengan langsung ke potensiometer, dengan member kopel untuk membantu gaya apung, dengan desain seperti pada Gambar 25.



Gbr. 25 Desain jungkat – jungkit

Pengujian pada sensor ini (Gambar 26) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data respon dari sensor terhadap perubahan ketinggian antarmuka air dan minyak untuk mengetahui karakteristik sensor.Pengujian dilakukan dengan mengukur langsung nilai resistansi sensor pada setiap ketinggian antarmuka air dan minyak dengan menggunakan LCR meter.Pengujian dilakukan dengan uji naik dan uji turun, yaitu menaikkan dan menurunkan tinggi permukaan air. Kemudian dilakukan pengukuran pada perbedaan ketinggian antarmuka air dan minyak dengan rentang 5 mm.

Pada saat dilakukan pengujian, pelampung yang memiliki massa jenis 850 kg/m^3 dan massa 28 gr, seharusnya mengambang di antarmuka air dan minyak, karena memiliki massa jenis di antara minyak dan air. Namun saat diuji, pelampung masih mengapung di minyak. Mengapungnya sebuah benda di dalam fluida disebabkan oleh massa jenisnya yang masih lebih kecil dibandingkan dengan massa jenis fluidanya.



Gbr. 26 Sensor Resistansi dengan jungkat-jungkit

Untuk mencari massa jenis dari minyak yang aktual, dilakukan perhitungan empiris dengan mengambil minyak sebesar 100 ml menggunakan gelas ukur, kemudian ditimbang menggunakan neraca massa digital. Massa yang terukur di neraca massa digital sebesar 86,1 gr. Dengan menggunakan persamaan, didapat massa jenis aktual dari minyak sebesar 861 kg/m^3.

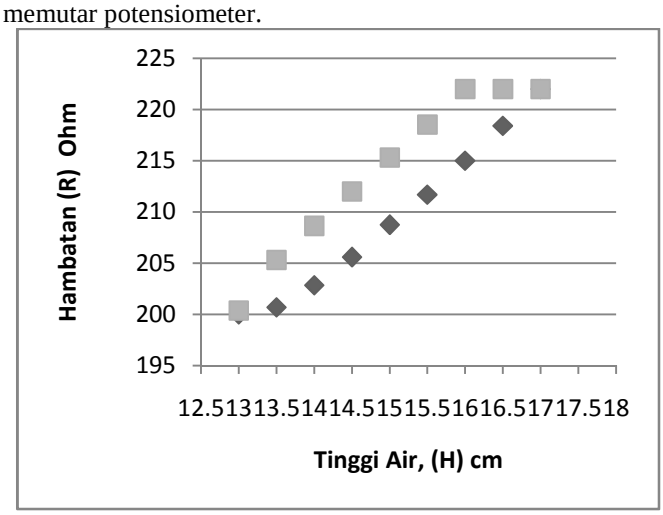
$$\text{Massa Jenis } (\rho) = \frac{\text{Massa (M)}}{\text{Volume (V)}} = \frac{86{,}1 \times 10^{-3}\ \text{Kg}}{100 \times 10^{-6}\ \text{m}^3} = 861\ \text{kg/m}^3$$

Pelampung didesain ulang dengan massa 32,5 gr dan massa jenis 970 kg/m^3,Berat untuk kopel juga didesain ulang, karena perubahan dari berat pelampung dan massa jenis minyak.

$$\text{W kopel maksimum} = \text{W pelampung} - \text{FA minyak} = (\text{Mp} \times \text{g}) - (\rho_{\text{minyak}} \times V_{\text{benda yang tercelup}} \times \text{g})$$
$$= (32{,}5 \times 10^{-3}\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2) - (861\ \text{kg/m}^3 \times 33{,}5\ \text{m}^3 \times 10^{-6} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2)$$
$$= 0{,}3185 - 0{,}2826 = 0{,}0358\ \text{N}$$

Berat kopel maksimum adalah 0,0358 N dan massa maksimumnya adalah 3,58 gr. Massa kopel divariasikan untuk mendapatkan kesetimbangan momen, kemudian didapat massa kopel sebesar 1,5 gr untuk mendapatkan kesetimbangan momen pada titik referensi yaitu ketinggian air 15 cm.

Hasil pengujian sensor resistansi dengan jungkat-jungkit bisa dilihat pada Gambar 27. Seperti yang terlihat pada Gambar 27, pada saat uji turun tetap terjadi *dead band* sebesar 1 cm, *dead band* terjadi karena pelampung kekurangan gaya berat ke bawah yang disebabkan oleh berat kopel, pelampung perlu gaya yang lebih untuk bisa turun mengangkat kopel dan memutar potensiometer.



Gbr. 27 Grafik Hubungan Hambatan (R) Terhadap Tinggi Air (T)

Desain ini masih belum bisa menanggulangi histeresis yang terjadi pada desain sensor resistif dengan lengan. Kekurangan lain dari desain ini adalah sulitnya untuk mencari kesetimbangan momen dari sistem, yang menyebabkan sulitnya mendapat nilai pengukuran yang sama jika sistem diset ulang dari awal. Sulitnya mencari kesetimbangan momen dikarenakan berat dari lengan yang relatif jauh lebih besar daripada berat pelampung dan berat kopel.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari analisis data-data yang didapatkan dari hasil pengujian dan pengukuran yang telah dilakukan terhadap rancang bangun sensor pengukur ketinggian antarmuka air dan minyak dengan menggunakan metode kapasitif dan resistif pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Sensor kapasitif yang digunakan pada penelitian terbuat dari plat PCB sebagai konduktor, menghasilkan pengukuran yang tidak stabil dan tidak bisa digunakan untuk studi kasus penelitian ini. Tidak stabilnya hasil pengukuran ini bisa disebabkan oleh beberapa hal seperti, pancaran frekuensi tinggi yang ada di laboratorium, dan juga variasi suhu lingkungan yang dapat mengganggu hasil pengukuran sensor kapasitif.

Sensor resistif yang menggunakan lengan dan jungkat jungkit yang memakai potensiometer sebagai poros, menghasilkan pengukuran dan karakteristik yang lebih baik dibandingkan sensor kapasitansi, dalam studi kasus penelitian ini. Rangkaian pengkondisi sinyal berupa *amplifier* dibutuhkan untuk memperkuat sinyal, karena berdasarkan data yang didapat, sinyal keluaran tanpa *amplifier* adalah 0,35 V – 0,67 V. Hal ini akan menyulitkan ADC untuk membedakan titik satu dan titik yang lainnya, karena perbedaan tiap titik ketinggian air masih dalam orde mV. Tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki rentang 2,56 V – 4,88 V untuk ketinggian antarmuka air 11 cm – 20 cm dengan sensitivitas dari sensor sebesar 0,25 volt/cm. Histeresis pada sensor resistif yang menggunakan pelampung tidak bisa dihindari, namun bisa dikurangi dengan memperbesar volume dari pelampung, agar nilai dari gaya apung bertambah, dan/atau juga memperpanjang lengan, agar torsi yang dihasilkan lebih besar.

Saran

Dari penelitian yang dilakukan terhadap rancang bangun sensor pengukur ketinggian antarmuka air dan minyak dengan menggunakan metode kapasitif dan resistif, masih terdapat banyak kekurangan. Untuk itu, terdapat beberapa saran untuk penelitian di masa yang akan datang:

1. Pemilihan bahan konduktor untuk sensor kapasitif mempengaruhi kinerja dari sensor, oleh karena itu, pemilihan bahan konduktor dan bahan penyambung plat, harus benar-benar diperhatikan.

2. Memperhatikan faktor suhu fluida yang diukur dan suhu lingkungan, suhu lingkungan dan suhu fluida sebisa mungkin dijaga tetap agar didapat pengukuran yang stabil
3. Untuk pengukuran skala kecil seperti ketinggian air di *mini plant* separator pada penelitian ini, sebaiknya tidak menggunakan sensor berbasis gerak mekanik atau menggunakan pelampung, karena histeresis yang terjadi lumayan besar yang disebabkan oleh gaya apungnya.
4. Dilakukan terlebih dahulu pengujian terhadap sumber tegangan, agar didapat sumber tegangan yang stabil, sehingga tegangan keluaran yang dihasilkan bisa sama pada setiap pengukuran.
5. Pada kasus penelitian ini, sensor berbasis citra sekiranya bisa bekerja lebih optimal, dengan menggunakan perbedaan warna pada air dan minyak, sehingga bisa terdeteksi lebih mudah antarmuka air dan minyak.

REFERENSI

[1] Arya. Rancang Bangun Sistem Pengukur Level Ketinggian Air dengan Memanfaatkan Efek Kapasitansi pada Konduktor Berbasis PSoC. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 2009.

[2] Teguh. Rancang Bangun Sistem Pengukur Konsentrasi Larutan Gula Dengan Memanfaatkan Efek Kapasitansi Berbasis PSoC. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 2011.

[3] Antoni Susuiono. Aplikasi Scada System Pada Miniatur Water Level Control. Jurnal, Jurusan Teknik Eelektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra Surabaya, Surabaya, 2006.

[4] Fraden, Jacob. *Handbook of Modern Sensor*.Springer, New York, 2010.

[5] Tipler. *Fisika Untuk Sains dan Teknik*. Erlangga, Jakarta, 1998.