



**RANCANG BANGUN ALAT UKUR KETINGGIAN AIR BERBASIS SENSOR KAPASITIF DI LABORATORIUM PANTAI DAN DINAMIKA PANTAI BRIN KAWASAN YOGYAKARTA**

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WATER LEVEL MEASURING DEVICE BASED ON CAPACITIVE SENSOR AT THE COASTAL AND COASTAL DYNAMICS LABORATORY OF BRIN YOGYAKARTA AREA**

David Suharjanto, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Sumarna\*, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia  
Gatot Susatijo, Laboratorium Pantai dan Dinamika Pantai, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

\*e-mail: Sumarna@uny.ac.id (corresponding author)

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk mewujudkan alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif di Laboratorium Pantai dan Dinamika Pantai BRIN Kawasan Yogyakarta dengan analisis fungsi transfer dan karakteristik alat ukur. Metode dalam penelitian ini meliputi perancangan alat, pengujian alat, pengambilan data, dan analisis data. Rancang bangun alat ukur terdiri dari rangkaian osilator, rangkaian pembagi frekuensi, elektroda sensor, rangkaian komparator, rangkaian gerbang logika, rangkaian filter pasif *low-pass*, rangkaian penguat dan filter aktif *low-pass*. Prinsip kerja alat ukur berupa perubahan ketinggian air ( $\Delta h$ ) pada dua pelat tembaga di elektroda sensor menyebabkan perubahan kapasitansi ( $\Delta C$ ) sehingga didapatkan perubahan tegangan keluaran ( $\Delta V$ ). Elektroda sensor dirancang dengan dua pelat tembaga yang saling berhadapan dengan panjang 1 m, lebar 0,03 m, dan jarak 0,005 m dengan dielektrik air sumur. Rangkaian osilator sebagai pembangkit sinyal *sinusoidal* frekuensi 4 MHz, lalu menjadi sinyal kotak frekuensi 125 kHz oleh rangkaian pembagi frekuensi, rangkaian komparator sebagai pembanding sinyal antar masukan, rangkaian gerbang logika untuk modifikasi sinyal, rangkaian filter pasif *low-pass* untuk mem-filter sinyal, dan rangkaian penguat dan filter aktif *low-pass* untuk menguatkan sekaligus mem-filter sinyal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif berhasil diwujudkan dengan masukan berupa ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm) dengan keluaran sensor berupa tegangan (V) dengan rentang pengukuran 0–100 cm. Alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif termasuk dalam *open-loop system*. Analisis *step response* pada fungsi transfer atau  $H_{total}(s)$  didapatkan persamaan  $y = 0,3x$  yang menggambarkan respons linier dan menunjukkan kesesuaian dengan hasil kalibrasi alat. Hasil ini mengindikasikan bahwa model fungsi transfer yang dikembangkan dapat memprediksi perilaku alat ukur dengan tingkat akurasi yang memadai. Persamaan kalibrasi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif yaitu  $x = \frac{y-2,4421}{0,0408}$  dengan  $y$  adalah tegangan keluaran (V) dan  $x$  adalah ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm) dengan tingkat linieritas 99,71%, sensitivitas 0,04 V per cm, presisi 98,54%, dan akurasi 97,31%.

**Kata Kunci:** Alat ukur, ketinggian air, sensor kapasitif, fungsi transfer

**Abstract.** *This research aims to develop a water level measuring device based on capacitive sensor at the Coastal and Coastal Dynamics Laboratory of BRIN Yogyakarta Area with analysis of transfer functions and measuring instrument characteristics. The methods in this research include device design, device testing, data collection, and data analysis. The device design consists of an oscillator circuit, frequency divider circuit, sensor electrode, comparator circuit, logic gate circuit, passive low-pass filter circuit, amplifier circuit, and active low-pass filter circuit. The working principle of the sensor is that changes in water level ( $\Delta h$ ) between two copper plates in the sensor electrode cause changes in capacitance ( $\Delta C$ ), resulting in changes in the output voltage ( $\Delta V$ ). The sensor electrode is designed with two opposing copper plates measuring 1 meter in length, 0.03 meters in width, and 0.005 meters apart with well water as the dielectric. The oscillator circuit generates a 4 MHz sinusoidal signal, which is then converted into a 125 kHz square wave signal by the frequency divider circuit. The comparator circuit compares input signals, the logic gate circuit modifies the signal, the passive low-pass filter circuit filters the signal, and the amplifier and active low-pass filter circuit amplifies and filters the signal. The results of this research show that the water level measuring device based on capacitive sensor was successfully developed with the height of the sensor electrode submerged in water (cm) as input and the sensor output in the form of voltage (V) with a measuring distance of 0–100 cm. The water level measuring device based on capacitive sensor is classified as an open-loop system. The analysis of the step response for the transfer function or  $H_{total}(s)$  results in the equation  $y = 0.3x$ , which represents a linear response and shows alignment with the device calibration results. This indicates that the developed transfer function model can predict the behavior of the measuring device with a sufficient level of accuracy. The calibration equation of water level measuring device based on capacitive sensor is  $x = \frac{y-2,4421}{0,0408}$ , where  $y$  is the output voltage (V) and  $x$  is the height of the sensor electrode submerged in water (cm) with a linearity of 99.71%, sensitivity of 0.04 V per cm, precision of 98.54%, and accuracy of 97.31%.*

**Keywords:** *Measuring device, water level, capacitive sensor, transfer function*

## PENDAHULUAN

Laboratorium Pantai dan Dinamika Pantai BRIN Kawasan Yogyakarta adalah salah satu laboratorium di bawah naungan Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi, Deputi Bidang Infrastruktur Riset dan Inovasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan tupoksi melaksanakan kegiatan pelayanan teknologi pantai dan dinamika pantai. Fasilitas pada laboratorium ini yaitu laboratorium uji model fisik, laboratorium uji model numerik, laboratorium survei dinamika pantai, dan laboratorium mekanika tanah dan geoteknik.

Laboratorium uji model fisik gelombang terdapat kebutuhan untuk melakukan pengukuran tinggi gelombang dan ketinggian muka air kolam gelombang dengan tingkat presisi dan akurasi yang baik. Pengukuran tersebut dapat dilakukan dengan sebuah sensor.

Sensor adalah suatu perangkat yang dapat mengubah parameter fisika secara berulang dan andal menjadi bentuk yang dapat dianalisis oleh sistem elektronik (Dunn, 2006). Sensor juga dapat diartikan sebagai suatu elemen sistem yang berhubungan dengan proses pengukuran suatu variabel masukan kemudian menghasilkan suatu keluaran yang tidak tergantung masukannya.

Salah satu jenis sensor adalah sensor kapasitif. Sensor kapasitif adalah sensor yang dapat mendeteksi nilai perubahan kapasitansi. Perubahan kapasitansi tersebut dapat diartikan dengan perubahan muatan listrik. Muatan listrik yang dimaksud adalah kemampuan dari kapasitor dalam menyimpan sejumlah muatan atau energi, sehingga semakin besar nilai kapasitansi ( $C$ ) maka akan semakin besar pula muatan atau energi yang dapat tersimpan di dalamnya. Besar nilai kapasitansi dari sebuah kapasitor dinyatakan dalam satuan farad ( $F$ ).

Penerapan sensor kapasitif dapat dilakukan berbagai macam, salah satunya pada alat ukur ketinggian air. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengondisikan wadah air terdapat dua pelat logam yang saling berhadapan (elektroda sensor) sehingga sensor kapasitif dapat bekerja mendeteksi perubahan ketinggian air menjadi perubahan nilai kapasitansi. Dengan demikian, alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dapat menunjang kegiatan di Laboratorium Pantai dan Dinamika Pantai BRIN Kawasan Yogyakarta.

Alasan dilakukan pembuatan alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dikarenakan penggunaan sensor kapasitif memiliki kepekaan tinggi dan linieritas. Dalam hal ini, kepekaan tinggi yang dimaksud yaitu kemampuan sensor dalam merespons dengan cepat perubahan nilai kapasitansi berdasarkan perubahan ketinggian air. Linieritas yang dimaksud yaitu kemampuan menghasilkan keluaran yang sebanding dengan perubahan ketinggian air.

Sistem kontrol adalah kombinasi dari komponen-komponen dalam sistem yang berfungsi untuk melakukan sesuatu sesuai keinginan yang telah ditentukan sebelumnya (Paraskevopoulos, 2002). Alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif didesain dalam sistem kontrol berjenis *open-loop system*, di mana tidak ada umpan balik dari keluaran yang kembali ke masukan. Dengan kata lain, sensor hanya mengukur ketinggian elektroda sensor yang tercelup air kemudian memberikan tegangan keluaran. Sistem kontrol berjenis *open-loop system* ini dapat dianalisis menggunakan fungsi transfer. Fungsi transfer berperan penting dalam analisis sistem karena dapat memberikan hubungan matematis antara masukan dan keluaran dari sistem dalam domain Laplace, yang memungkinkan pemahaman lebih mendalam mengenai bagaimana sistem merespons sinyal masukan. Selain itu, karakterisasi alat ukur dapat dianalisis untuk mengetahui tingkat linieritas, sensitivitas, presisi, dan akurasi alat ukur ketinggian air. Karakterisasi dapat dilakukan dengan kalibrasi alat ukur dari regresi linier sederhana untuk memperoleh hubungan matematis antara ketinggian elektroda sensor yang tercelup air dengan tegangan keluaran alat ukur ketinggian air.

## **METODE**

### **Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari sampai Juni 2024 di Laboratorium Pantai & Dinamika Pantai BRIN Kawasan Yogyakarta dan Laboratorium Elektronika & Instrumentasi Departemen Pendidikan Fisika FMIPA UNY.

### **Variabel Penelitian**

Variabel bebas yaitu ketinggian air (cm), nilai ketinggian elektroda sensor yang tercelup air. Variabel terikat yaitu adanya perubahan ketinggian air ( $\Delta h$ ), nilai kapasitif pada sensor ketinggian air akan berubah ( $\Delta C$ ), perubahan nilai kapasitif ( $\Delta C$ ) mengakibatkan perubahan nilai tegangan ( $\Delta V$ ) pada keluaran rangkaian sensor ketinggian air. Variabel kontrol yaitu suhu ( $^{\circ}C$ ), nilai suhu pada lingkungan sekitar yang dapat memengaruhi hasil pengukuran.

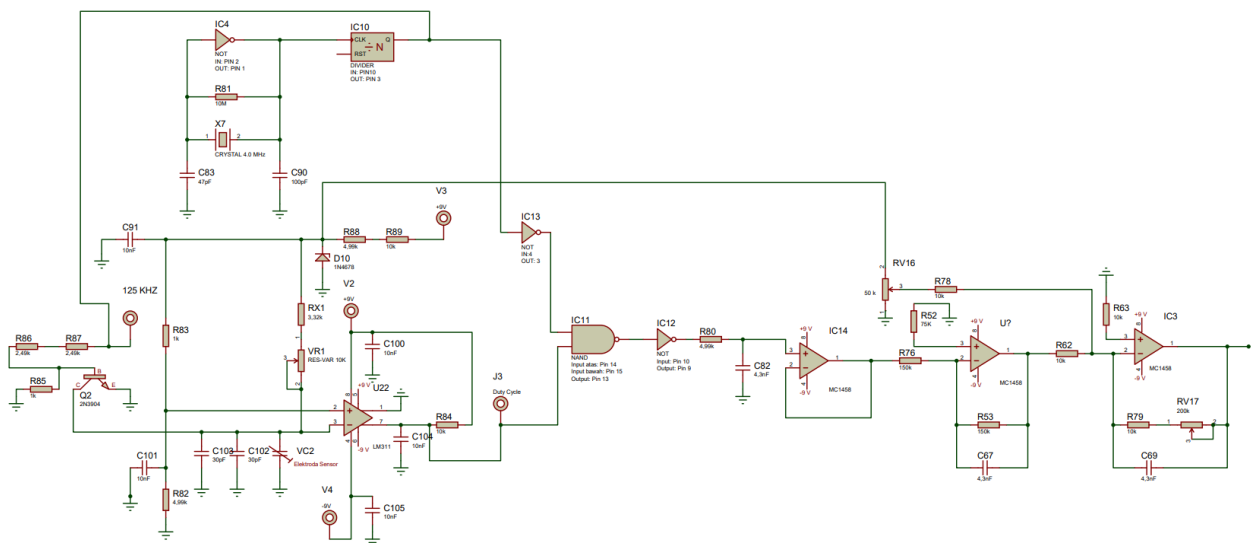
## Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan yaitu IC MC14572 (ON Semiconductor, 2014), IC LM311 (Motorola Incorporated, 1996), IC MC1458 (Texas Instruments Incorporated, 1999), IC TC4040 (Texas Instruments Incorporated, 2003), air sumur, dua pelat tembaga dengan panjang 1 m, lebar 0,03 m, dan jarak 0,005 m, paralon 100 cm, dan komponen-komponen sistem sensor ketinggian air berbasis kapasitif.

## Teknik Pengambilan Data

### 1. Tahap Rancang Bangun Alat

- Desain rangkaian dibuat dengan software proteus. Kemudian pengecekan dilakukan agar tidak terdapat korsleting dalam rangkaian. Komponen-komponen disiapkan sesuai desain rangkaian pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

- Pembuatan rangkaian secara utuh pada *PCB* yang akan digunakan sebagai alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif.
  - Penyolderan komponen pada *PCB* sesuai desain rangkaian.
  - Elektroda sensor kapasitif dirancang pada paralon berdasarkan desain.
  - Pengujian dan kalibrasi alat serta memastikan prinsip kerja rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dapat berjalan dengan baik.
- Tahap Pengujian Alat
    - Rangkaian elektroda sensor kapasitif diuji untuk tiap-tiap perubahan nilai kapasitif berdasarkan ketinggian elektroda yang tercelup air.
    - Rangkaian osilator diuji dengan memastikan keluaran osilator adalah gelombang sinusoidal 4 MHz.
    - Rangkaian pembagi frekuensi diuji dengan membandingkan memastikan keluaran pembagi frekuensi adalah gelombang kotak 125 kHz.
    - Rangkaian komparator diuji untuk tiap-tiap perubahan nilai kapasitif berdasarkan ketinggian air yang tercelup pada elektroda sensor sebagai masukan terhadap tegangan serta frekuensi keluaran dari rangkaian komparator.
    - Rangkaian gerbang logika diuji dengan membandingkan bentuk gelombang dan frekuensi masukan terhadap bentuk gelombang dan frekuensi keluaran pada masing-masing gerbang logika.

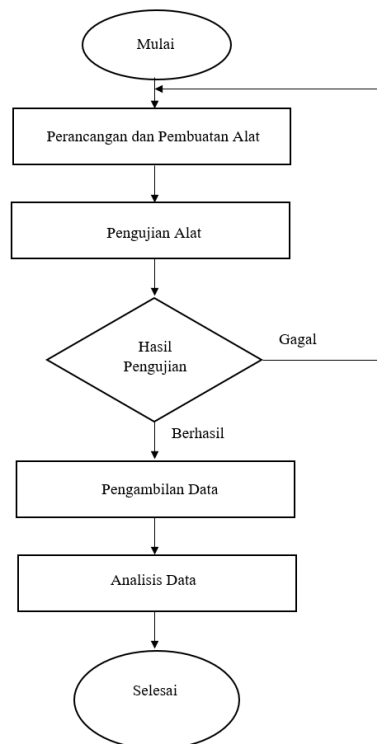
- f. Rangkaian filter pasif *low-pass* diuji untuk tiap-tiap perubahan frekuensi terhadap penguatan tegangan atau perbandingan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran.
- g. Rangkaian *buffer* diuji untuk tiap-tiap perubahan frekuensi terhadap penguatan tegangan atau perbandingan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran.
- h. Rangkaian penguat dan filter aktif *low-pass* diuji untuk tiap-tiap perubahan frekuensi terhadap penguatan tegangan atau perbandingan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran.
- i. Rangkaian *buffer* diuji dengan penguat & filter aktif *low-pass* untuk tiap-tiap perubahan frekuensi terhadap penguatan tegangan atau perbandingan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran.
- j. Rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif diuji untuk tiap-tiap perubahan ketinggian air terhadap tegangan keluaran.

### **Teknik Analisis Data**

1. Rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif yang terdiri dari rangkaian osilator, rangkaian pembagi frekuensi, elektroda sensor, rangkaian komparator, rangkaian gerbang logika, rangkaian filter pasif *low-pass*, rangkaian *buffer*, dan rangkaian penguat & filter aktif *low-pass* dianalisis.
2. Hubungan antara tegangan (V) sebagai keluaran dengan ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm) sebagai masukan pada alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dianalisis untuk mendapatkan persamaan kalibrasi alat. Kemudian karakteristik alat ukur dianalisis untuk mengetahui tingkat presisi, akurasi, linieritas, dan sensitivitas.
3. Model dalam bentuk persamaan transformasi Laplace dirumuskan.
4. Hubungan antara masukan dan keluaran fungsi transfer masing-masing diagram blok dirumuskan.
5. Grafik *step response* fungsi transfer pada masing-masing diagram blok dianalisis dengan MATLAB.
6. Grafik *step response* fungsi transfer total dianalisis dengan MATLAB.

### **Diagram Alir Tahapan Penelitian**

Diagram alir tahap penelitian ditunjukkan oleh Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Diagram alir tahap penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Karakterisasi Alat Ukur

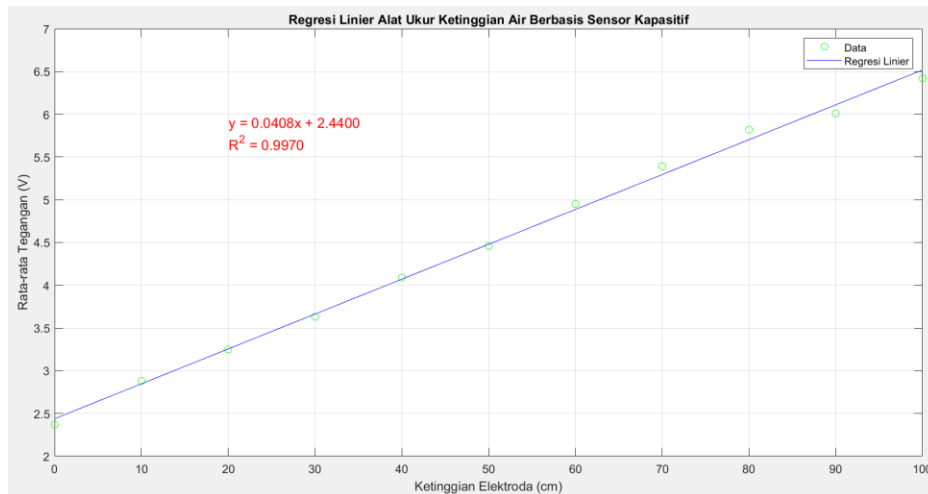
Karakterisasi berfungsi untuk mengetahui tingkat linearitas, sensitivitas, akurasi, dan presisi alat ukur. Sebelum melakukan karakterisasi alat, menganalisis kalibrasi alat dilakukan terlebih dahulu. Kalibrasi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif berfungsi untuk menemukan hubungan matematis antara keluaran sensor yaitu tegangan (V) dengan masukan sensor yaitu ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm) sehingga nilai keluaran tersebut dapat memperkirakan nilai masukan alat. Kalibrasi alat dapat dilakukan dengan mencari regresi linier sederhana antara masukan dan keluaran sensor. Pengambilan data kalibrasi alat didapatkan melalui pengulangan pengukuran sebanyak 3 kali pada setiap ketinggian elektroda sensor yang tercelup air, yang diukur menggunakan multimeter. Dengan demikian, didapatkan hasil pengukuran seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengukuran tegangan keluaran pada alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

Ketinggian elektroda sensor tercelup (cm)	Pengukuran ke-1 (V)	Pengukuran ke-2 (V)	Pengukuran ke-3 (V)	Rata-rata (V)
0	2,438	2,375	2,311	2,37
10	2,931	2,88	2,829	2,88
20	3,301	3,251	3,208	3,25
30	3,683	3,600	3,621	3,63
40	4,132	4,069	4,054	4,09
50	4,55	4,413	4,417	4,46
60	4,971	4,998	4,891	4,95
70	5,391	5,304	5,480	5,39

80	5,883	5,821	5,761	5,82
90	6,072	6,030	5,920	6,01
100	6,500	6,401	6.372	6,42

Kemudian berdasarkan Tabel 1, analisis regresi linier sederhana dari alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif didapatkan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Regresi linier alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

Berdasarkan Gambar 3, dapat diketahui bahwa linieritas hubungan antara ketinggian elektroda sensor yang tercelup dengan nilai tegangan yang diindikasikan oleh nilai  $R^2$  adalah 0,9971 atau 99,71% sedangkan sensitivitas alat ukur yang diindikasikan oleh slope grafik adalah 0,04 V per cm. Nilai ini menunjukkan seberapa responsif alat ukur terhadap perubahan ketinggian air. Kemudian didapatkan persamaan linier ( $y = ax + b$ ) yaitu  $y = 0,0408x + 2,4421$ . Persamaan ini dapat digunakan sebagai kalibrasi alat dengan memodifikasinya menjadi  $x = \frac{y-2,4421}{0,0408}$ , dengan  $x$  adalah ketinggian elektroda sensor tercelup air sedangkan  $y$  adalah tegangan keluaran. Persamaan ini menegaskan bahwa hubungan antara ketinggian air dan tegangan alat ukur bersifat linier dan dapat diprediksi dengan akurat dalam rentang nilai yang cukup lebar.

Tingkat presisi dari alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dapat diperoleh dari mencari standar deviasi dari data pengukuran. Tingkat presisi dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Presisi (\%)} = 100\% - \text{standar deviasi(\%)} \quad (1)$$

dimana

$$\text{Standar deviasi (s)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Serta

$$\text{Standar deviasi (\%)} = \left(\frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%\right) \quad (3)$$

Kemudian dari persamaan tersebut dihasilkan nilai presisi seperti pada Tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Tingkat presisi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

No.	Ketinggian sensor tercelup (cm)	Rata-rata tegangan sensor (V)	Presisi (%)
1.	0	2,37	97,33
2.	10	2,88	98,23
3.	20	3,25	98,57
4.	30	3,63	98,81
5.	40	4,09	98,99
6.	50	4,46	98,25
7.	60	4,95	98,88
8.	70	5,39	98,37
9.	80	5,82	98,95
10.	90	6,01	98,69
11.	100	6,42	98,96
Rata-rata			98,54

Berdasarkan perhitungan tingkat presisi di atas, diperoleh bahwa tingkat presisi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif memiliki rata-rata sebesar 98,54%. Nilai tingkat presisi tersebut memberikan informasi bahwa sensor memiliki tingkat pembacaan yang stabil dengan memberikan hasil yang konsisten dari pengukuran 0 – 100 cm. Terlihat dari nilai presisi tersebut juga menunjukkan konsistensi pembacaan yang tinggi dengan nilai eror kurang dari 2%. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa tingkat presisi sensor termasuk baik.

Tingkat akurasi dari alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dapat diperoleh dengan mencari nilai eror antara ketinggian air dengan ketinggian air perhitungan yang berdasarkan persamaan regresi linier pada gambar 1. Tingkat akurasi dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Akurasi (\%)} = 100\% - \text{eror(\%)} \quad (4)$$

Di mana

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{\text{ketinggian air} - \text{ketinggian air perhitungan}}{\text{ketinggian air}} \times 100\% \right| \quad (5)$$

Serta

$$\text{ketinggian air perhitungan (cm)} = \frac{\text{Tegangan sensor} - 2,4421}{0,0408} \quad (6)$$

Kemudian dari persamaan tersebut dihasilkan nilai akurasi seperti pada Tabel 3 di bawah.



Tabel 3. Tingkat akurasi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

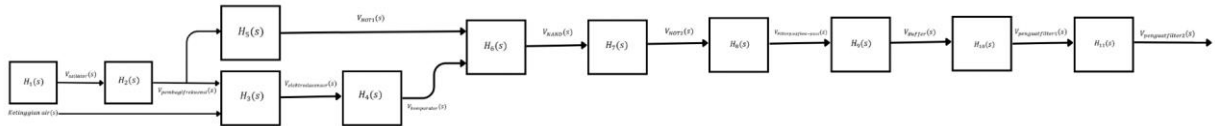
No.	Ketinggian sensor tercelup (cm)	Rata-rata tegangan sensor (V)	Ketinggian air perhitungan (cm)	Akurasi (%)
1.	0	2,37	-1,65	-
2.	10	2,88	10.73	92,67
3.	20	3,25	19.88	99,42
4.	30	3,63	29.23	97,43
5.	40	4,09	40.27	99,33
6.	50	4,46	49.46	98,92
7.	60	4,95	61.55	97,42
8.	70	5,39	72.29	96,72
9.	80	5,82	82.83	96,46
10.	90	6,01	87.38	97,09
11.	100	6,42	97.6	97,60
Rata-rata				97,31

Berdasarkan perhitungan tingkat akurasi di atas, diperoleh bahwa tingkat akurasi alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif memiliki rata-rata sebesar 97,31%, dengan mengabaikan nilai pada pengukuran di titik 0 cm karena memberikan hasil dengan pembagian oleh 0. Namun hasil akurasi pada 0 cm menunjukkan nilai -1,65 yang mana dapat dikatakan mendekati nilai ukurnya. Nilai tingkat akurasi tersebut memberikan informasi bahwa alat ukur memiliki kemampuan untuk melakukan pengukuran ketinggian air berbasis sensor kapasitif dengan hasil yang mendekati nilai sebenarnya pada pengukuran 0–100 cm. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa tingkat akurasi alat ukur termasuk baik.

Berdasarkan analisis pada alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif di atas. Analisis karakterisasi tersebut menunjukkan tingkat linearitas, sensitivitas, akurasi, dan presisi yang baik. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa sistem memenuhi standar minimal dan layak digunakan sebagai alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif.

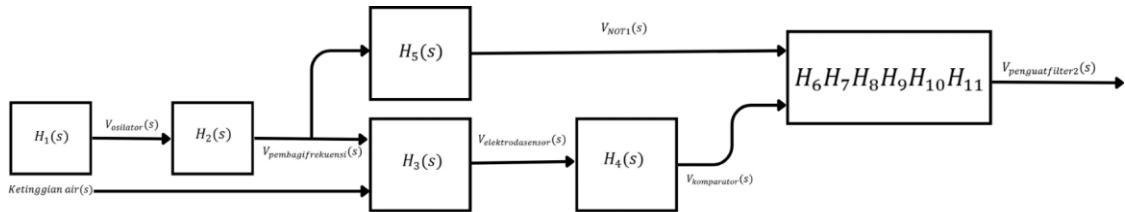
## 2. Analisis Fungsi Transfer

Diagram blok dengan fungsi transfer total dalam rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif ini secara keseluruhan dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.



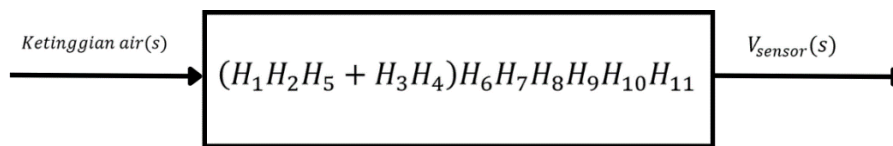
Gambar 4. Diagram blok rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif

Diagram blok pada gambar 4 dapat disederhanakan menggunakan aturan penyederhanaan dan penggabungan diagram blok menjadi seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif hasil penggabungan

Kemudian untuk mempermudah penyederhanaan diagram blok total, maka diagram blok  $H_5$  pada gambar 5 dapat diabaikan sehingga masukan dari diagram blok sistem tinggal *ketinggian air* ( $s$ ) dengan keluaran  $V_{penguatfilter2}(s)$  yang dapat ditulis sebagai  $V_{sensor}(s)$ , dengan penyederhanaan tersebut didapatkan diagram blok total pada alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok total rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif dengan penyederhanaan

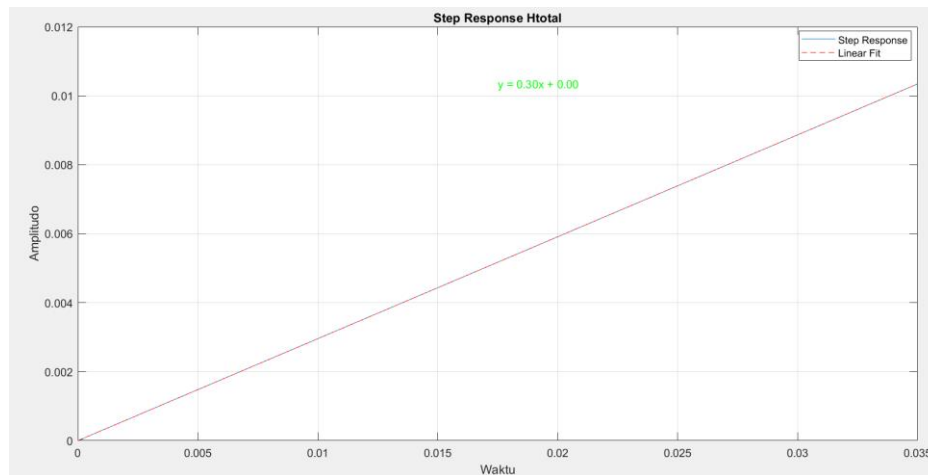
Berdasarkan hasil penggabungan dan penyederhanaan diagram blok yang telah dilakukan, maka fungsi transfer total dari rangkaian alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif adalah sebagai berikut:

$$H_{total}(s) = \frac{V_{sensor}(s)}{Ketinggian\ air(s)} \tag{7}$$

$$H_{total}(s) = H_1 H_2 H_3 H_4 H_6 H_7 H_8 H_9 H_{10} H_{11} \tag{8}$$

$$H_{total}(s) = \left( \frac{107 + 0,02s + 1,584 \cdot 10^{-8} s^2}{32(1 + 7,6 \cdot 10^{-5} s + 3,0984 \cdot 10^{-14} s^2 + 1,584 \cdot 10^{-19} s^3)} \frac{4,3035}{97,38s} \right) \frac{20 \cdot 10^3}{10000 + 1,0761s + 1,861742921 \cdot 10^{-5} s^2 + 2,82331206 \cdot 10^{-12} s^3} \tag{9}$$

Fungsi step atau *step response* dalam fungsi transfer  $H_{total}(s)$  dapat digambarkan dengan analisis menggunakan MATLAB, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Step response rangkaian total

Berdasarkan Gambar 7, menunjukkan rangkaian alat ukur bekerja dengan baik dalam merespons perubahan ketinggian air secara linier dengan persamaan  $y = 0,3 x$ . Artinya, setiap perubahan dalam keluaran alat ukur berbanding lurus dengan perubahan ketinggian air secara stabil.

## SIMPULAN

Alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif berhasil diwujudkan dengan masukan berupa ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm) memberikan keluaran berupa tegangan (V). Alat ukur terdiri dari rangkaian osilator, rangkaian pembagi frekuensi, elektroda sensor, rangkaian sumber daya, rangkaian komparator, rangkaian gerbang logika, rangkaian filter pasif *low-pass*, dan rangkaian penguat dan filter aktif *low-pass*. Alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif termasuk dalam *open-loop system*. Analisis *step response* pada fungsi transfer atau  $H_{total}(s)$  didapatkan persamaan  $y = 0,3x$  yang menggambarkan respons linier dan menunjukkan kesesuaian dengan hasil kalibrasi alat. Hasil ini mengindikasikan bahwa model fungsi transfer yang dikembangkan dapat memprediksi perilaku alat ukur dengan tingkat akurasi yang memadai. Karakterisasi alat ukur menunjukkan tingkat linieritas 99,71%, sensitivitas 0,04 V per cm, presisi 98,54%, dan akurasi 97,31%. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa tingkat linearitas, sensitivitas, akurasi, dan presisi yang baik. Dengan demikian, sistem alat ukur memenuhi standar minimal dan layak digunakan sebagai alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif. Kalibrasi pada alat ukur ketinggian air berbasis sensor kapasitif didapatkan dengan persamaan regresi linier  $y = 0,0408x + 2,4421$ . Kemudian dimodifikasi menjadi persamaan kalibrasi alat yaitu  $x = \frac{y-2,4421}{0,0408}$ , dengan  $y$  adalah tegangan keluaran (V) dan  $x$  adalah ketinggian elektroda sensor yang tercelup air (cm). Persamaan ini sebagai hubungan antara ketinggian air dan tegangan sensor bersifat linier dan dapat diprediksi dengan akurat dalam rentang nilai yang cukup lebar.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan ini. Terima kasih kepada Bapak Sumarna, M.Si., M.Eng.,

selaku dosen pembimbing I dan Bapak Gatot Susatijo, ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, petunjuk, dan arahan. Sekali lagi, terima kasih kepada berbagai pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

## DAFTAR PUSTAKA

Dunn, William C. (2006). *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*. Norwood: ARTECH HOUSE.

Motorola Incorporated. (1996). *Highly Flexible Voltage Comparators* LM311 LM211. Schaumburg, Illinois: Motorola Incorporated.

ON Semiconductor. (2014). *Hex Gate IC* MC1457. Phoenix, Arizona: Semiconductor Components Industries, LLC.

Paraskevopoulos, P. N. (2002). *Modern Control System*. New York: Marcel Dekker.

Texas Instruments Incorporated. (1999). *DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS* MC1458, MC1558. Dallas: Texas Instruments Incorporated.

Texas Instruments Incorporated. (2003). *CMOS Ripple-Carry Binary Counter/Dividers* CD4020B, CD4024B, CD4040B Types. Dallas: Texas Instruments Incorporated.