

Pengukuran Konstanta Dielektrik Udara pada Perangkat Kapasitor Plat Sejajar Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno

Andrian Wijayono^{1*}, Valentinus Galih Vidia Putra²

^{1,2}Jurusan Teknik Tekstil, Politeknik STTT Bandung

Jalan Jakarta No.31 Bandung, Bandung, Jawa Barat, Indonesia 40272

* E-mail: andrianwijayono@windowslive.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah prototipe alat pengukur konstanta dielektrik udara dan dapat untuk mengukur nilai kapasitansi menggunakan perangkat mikrokontroler Arduino. Pengukuran konstanta dielektrik udara dilakukan dengan melalui prinsip pengukuran kapasitansi dari perangkat kapasitor berkonfigurasi plat-sejajar dengan bahan dielektrik udara. Pengukuran kapasitansi dilakukan dengan prinsip pengisian dan pengosongan kapasitor menggunakan perangkat mikrokontroler Arduino Uno. Proses pengisian dan pengosongan dilakukan dengan menggunakan susunan seri rangkaian resistor-kapasitor (RC) dengan tegangan sumber sebesar 5 Volt dari perangkat mikrokontroler. Pada eksperimen ini telah digunakan sebuah plat sejajar dengan ukuran 29 x 30 cm sebagai elektroda kapasitor, serta sebuah perangkat resistor dengan ukuran 125 megaOhm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku pengisian dan pengosongan perangkat kapasitor plat-sejajar memiliki nilai $R^2 > 0,9$, yang menunjukkan korelasi cukup baik antara hasil prediksi dan eksperimen pada pengukuran kapasitansi. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa prototipe alat pengukur konstanta dielektrik dapat dirancang dengan baik dengan memperlihatkan nilai kapasitansi alat pada keadaan pengisian dan pengosong serta hasil pengukuran menunjukkan nilai konstanta dielektrik udara telah diukur dengan nilai sebesar 0,991 – 1.0346.

Kata kunci: kapasitor, konstanta dielektrik, pengisian, pengosongan,

Abstract

This study aims to design a prototype of an air dielectric constant measuring device and be able to measure the capacitance value using an Arduino microcontroller device. The measurement of the air dielectric constant is carried out by means of the principle of measuring the capacitance of a capacitor device with a plate-parallel configuration with the air dielectric material. Capacitance measurements are carried out with the principle of charging and emptying capacitors using an Arduino Uno microcontroller device. The charging and discharging process is carried out using a series of resistor-capacitor (RC) series with a source voltage of 5 volts from the microcontroller device. This experiment has used a parallel plate with a size of 29 x 30 cm as an electrode capacitor, and a resistor device with a size of 125 megaOhm. The results showed that the behavior of charging and discharging parallel plate capacitor devices has an R^2 value of > 0.9 , which shows a fairly good correlation between the predicted and experimental results on capacitance measurements. The results showed that the prototype of a dielectric constant measuring device can be well designed by showing the capacitance value of the device at the state of filling and emptying and the measurement results show the value of the air dielectric constant has been measured with a value of 0.991 - 1.0346.

Keywords: capacitor, dielectric constant, charging, discharging

PENDAHULUAN

Penerapan fisika dalam berbagai bidang elektronik telah secara luas dilakukan oleh berbagai peneliti. Pengamatan mengenai nilai konstanta dielektrik bahan untuk berbagai kegunaan telah banyak dilakukan oleh

beberapa peneliti (Argin & Karady, 2008; Bandyopadhyay dkk, 1980; Karady dkk, 2004; Karady dkk, 2003; Knott, 1993). Beberapa peneliti telah mengembangkan alat yang dapat mengukur konstanta dielektrik udara namun tidak dapat memperlihatkan pengukuran real time pada proses pengisian dan pengosongan

muatan (Hidayat dkk, 2013; Prihatnolo dkk, 2011; Rosita & Widodo, 2014). Prihatnolo, dkk (2011) menjelaskan bahwa besarnya konstanta dielektrik udara berhubungan dengan sifat isolasi udara terhadap arus listrik. Sifat isolasi adalah hal yang paling penting dan tidak dapat dipisahkan pada peralatan tegangan tinggi (Prihatnolo dkk, 2011). Hidayat, dkk (2013) dan Rosita, dkk (2014) telah mengembangkan alat yang dapat mengukur konstanta dielektrik material dengan menggunakan sistem LCR meter. Nilai konstanta dielektrik udara yang diperoleh oleh Hidayat, dkk (2013) dan Rosita & Widodo (2014) berperan sebagai nilai acuan perbandingan terhadap nilai konstanta dielektrik secara literature, kelemahan dari alat ini adalah tidak dapat diperlihatkan data real time proses pengisian kapasitor dan pengosongan kapasitor. Pada penelitian Rizza, dkk (2018), Pereira, dkk (2016) dan Cahyono, dkk (2017), pengukuran dielektrik dilakukan dengan menggunakan perangkat kapasitor dengan konfigurasi plat sejajar (parallel-plate). Pengukuran konstanta dielektrik material berkaitan dengan pengukuran kapasitansi (Juansah & Irmansyah, 2007; Arum dkk, 2015). Menurut Putra & Purnomosari (2016), pada kapasitor dengan konfigurasi plat sejajar akan berlaku rumusan kapasitansi seperti pada persamaan (1).

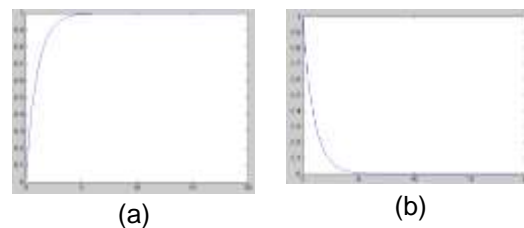
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad 1)$$

Sesuai dengan persamaan (1), C adalah besar kapasitansi kapasitor, ϵ_0 adalah besarnya permitivitas vakum, ϵ_r adalah besarnya permitivitas relatif, d adalah jarak antar kedua plat sejajar kapasitor dan A adalah luasan daerah plat sejajar kapasitor. Pada dasarnya kapasitor terdiri dari dua pelat konduktor yang dipasang berdekatan satu sama lain tapi tidak sampai bersentuhan (Allagui, dkk 2018). Kapasitor dapat menyimpan tenaga listrik dan dapat menyalurkannya kembali (Halliday, Resnick, Walker, 1997). Peristiwa pengisian dan pengosongan muatan kapasitor memegang peranan penting dalam elektronika (Halliday, Resnick, Walker, 1997). Sistem kapasitansi telah digunakan oleh beberapa peneliti untuk berbagai aplikasi, yaitu untuk

aplikasi *activity monitoring* (Arshad, dkk 2016), pengukuran kapasitansi graphene (Xia dkk, 2009), sensor pada bidang *health monitoring* (Mukhopadhyay, 2015; Coyle, dkk 2010; Min, dkk 2014; Hoffmann, dkk 2011; Cheng, dkk 2013; Lee, dkk 2015; Salvo, dkk 2010), serta pengukuran sensor *humidity* (Kondalkar, dkk 2019). Menurut Putra & Purnomosari (2016), rumusan hubungan tegangan kapasitor $V(t)$ terhadap waktu t pada proses pengisian (*charging*) akan sesuai dengan persamaan (2), sedangkan hubungan tegangan kapasitor $V(t)$ terhadap waktu t pada proses pengosongan (*discharging*) akan sesuai dengan persamaan (3). Nilai tegangan kapasitor terhadap waktu akan meningkat secara eksponensial pada proses pengisian hingga mencapai keadaan *steady state*, sedangkan nilai tegangan kapasitor terhadap waktu akan meluruh secara eksponensial pada proses pengosongan hingga tegangan bernilai nol (Dean, dkk 2013; Tang, dkk 2019; Putra & Purnomosari, 2016). Gambar 1 menunjukkan grafik hubungan antara tegangan kapasitor $V(t)$ terhadap waktu t pada proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*).

$$V = \frac{Q}{C} = \epsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (2)$$

$$V = \epsilon e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$



Gambar 1. Hubungan antara tegangan kapasitor $V(t)$ terhadap waktu t pada; (a) proses pengisian (*charging*) dan (b) proses pengosongan (*discharging*) (Putra & Purnomosari, 2016)

Putra, dkk (2019) telah berhasil merancang suatu metode untuk mengukur kapasitansi dengan cukup baik (dengan nilai R^2 lebih besar dari 0,9) menggunakan perangkat mikrokontroler Arduino Uno. Pengukuran kapasitor dapat dilakukan dengan metode pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). sebuah perangkat

kapasitor yang tersusun secara seri dengan sebuah resistor (rangkaiannya R-C) dan terhubung dengan perangkat Mikrokontroler Arduino Uno. Pada penelitian ini, perangkat mikrokontroler mengambil peranan penting sebagai perangkat akuisisi data. Penelitian mengenai akuisisi data kapasitor telah menjadial yang penting dan telah dilakukan oleh parapeneliti (Arshad, dkk, 2016; Laflamme, dkk 2013; Laflamme, dkk 2015). Menurut Putra & Purnomosari (2016), pengukuran konstanta dielektrik udara didasarkan pada rumusan kapasitor plat sejajar pada persamaan (4) dengan nilai kapasitansi C hasil pengukuran, serta luasan elektroda A dan nilai jarak antar elektroda d yang telah diketahui. Pengukuran dielektrik udara telah dilakukan pada konfigurasi elektroda kapasitor plat-sejajar (*parallel-plate*) berbasis Arduino yang merekam dan menampilkan data hasil pengukuran pada layar serial monitor. Pada penelitian ini telah diamati pengaruh dari jarak elektroda plat sejajar terhadap nilai kapasitansi dari perangkat kapasitor yang dirancang.

$$\epsilon_r = \frac{C d}{A \epsilon_0} \quad (4)$$

Sesuai dengan rumusan pada persamaan (1), (2) dan (3), maka rumusan hubungan tegangan kapasitor terhadap waktu untuk kapasitor plat sejajar pada proses charging dapat dituliskan sesuai dengan persamaan (5).

$$V = \epsilon \left(1 - e^{-\frac{t d}{R \epsilon_0 \epsilon_r A}} \right) = \epsilon (1 - e^{-t b}) \quad (5)$$

Rumusan hubungan tegangan kapasitor terhadap waktu untuk kapasitor plat sejajar pada proses charging dapat dituliskan sesuai dengan persamaan (6).

$$V = \epsilon e^{-\frac{t d}{R \epsilon_0 \epsilon_r A}} = \epsilon e^{-t b} \quad (6)$$

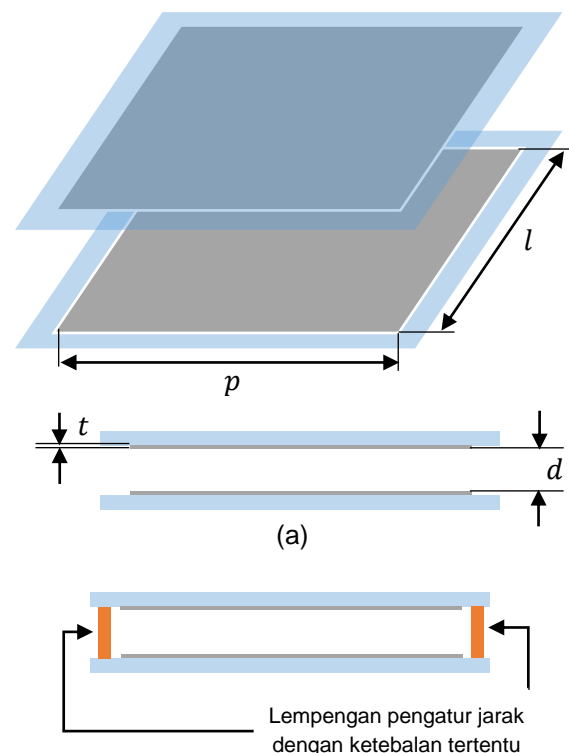
METODE EKSPERIMEN

Perancangan sistem pengukuran diawali dengan perancangan dan fabrikasi elektroda sensor yang ukuran bahan disesuaikan dengan persamaan 4, 5 dan 6. Elektroda sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah elektroda kapasitor plat sejajar. Pada tahap ini dilakukan perancangan desain

elektroda kapasitor plat sejajar dengan spesifikasi pada Tabel 1. Agar nilai C dapat diamati dan konstanta dielektrik dapat ditentukan dari persamaan 4, maka dirancang agar grafik pengisian dan pengosongan memiliki durasi waktu yang cukup lama dengan membuat besar luasan lempengan menjadi cukup besar dibandingkan ketebalan jarak antar lempengan (30 cm x 29 cm), namun jarak antara dua plat cukup kecil (0.01 mm). Rancangan disesuaikan dengan ketersediaan bahan dan fungsinya agar pembuatan prototipe dapat dirancang dengan biaya yang minimal dan hasil luaran yang baik. Rancangan elektroda plat sejajar dapat dilihat pada Gambar 2(a). Jarak antar plat elektroda diatur menggunakan lempeng isolator dengan ketebalan tertentu (0.01 mm) sesuai ilustrasi pada Gambar 2(b). Plat elektroda yang digunakan terbuat dari bahan lempengan aluminium dengan ketebalan 0,01 mm.

Tabel 1. Desain spesifikasi elektroda sensor

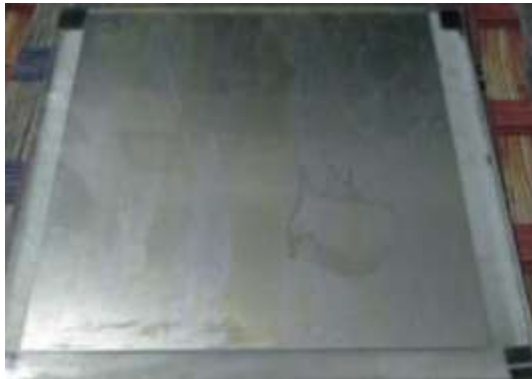
Parameter	Ukuran
Panjang elektroda (p)	30 cm
Lebar elektroda (l)	29 cm
Tebal elektroda (t)	0,01 mm
Jarak antar elektroda (d)	1 mm; 2 mm; 3 mm



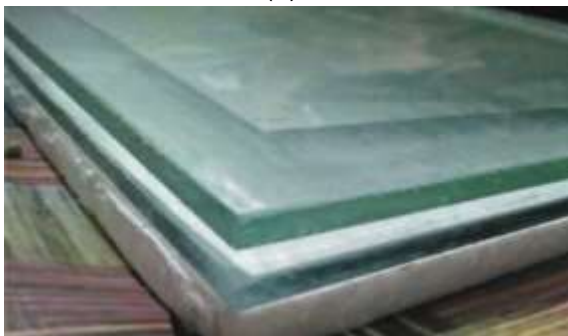
(b)

Gambar 2. (a) Rancangan elektroda plat sejajar; (b) pengaturan jarak antar plat elektroda

Desain rancangan konfigurasi plat elektroda yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan susunan pada Gambar 2. Gambar 3 menunjukkan hasil rancangan elektroda sesuai dengan susunan pada Gambar 2.



(a)



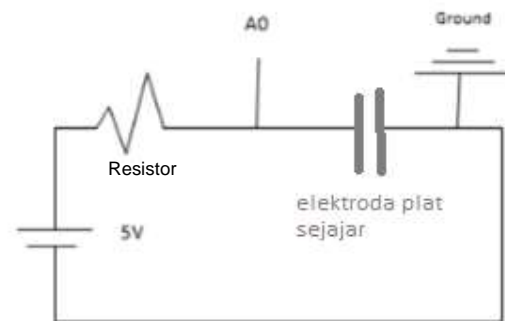
(b)



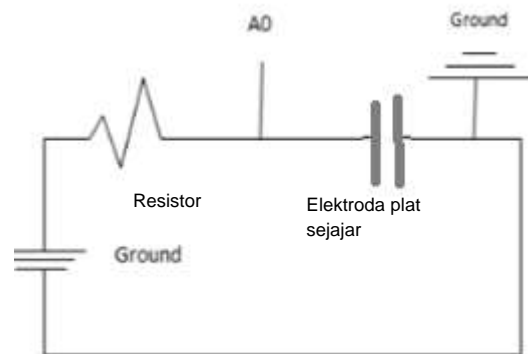
(c)

Gambar 3. Elektroda plat sejajar hasil fabrikasi (a) tampak atas, (b) tampak samping, (c) pengukuran konstanta dielektrik udara

Tahapan kedua pada penelitian ini adalah perancangan sistem pengukuran kapasitansi berbasis mikrokontroler Arduino Uno. Rangkaian sistem pengukuran kapasitansi pada proses pengisian (*charging*) kapasitor dapat dilihat sesuai dengan Gambar 4. Besar tegangan sumber yang digunakan adalah sebesar 5 Volt. Gambar 4 menunjukkan rangkaian kapasitor dan sensor yang tersusun dalam rangkaian seri, yang terhubung pada Pin A0, Pin 5V dan pin GND. Gambar 5 menunjukkan rangkaian sistem pengukuran kapasitansi pada proses pengosongan (*discharging*) perangkat kapasitor.



Gambar 4. Rangkaian sistem pengukuran kapasitansi pada proses pengisian kapasitor (*charging*)



Gambar 5. Rangkaian sistem pengukuran kapasitansi pada proses pengosongan kapasitor (*discharging*)

Prosedur metode pengukuran kapasitansi dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Membuat program Arduino pada komputer
2. Resistor dan kapasitor dirangkai sesuai dengan skema pada Gambar 4.
3. Perangkat sistem pengukuran

- kapasitansi dihubungkan ke komputer.
4. Program dimasukan pada Arduino.
 5. Perangkat elektroda diisi hingga mencapai tegangan maksimum 5V atau sampai nilainya konstan.
 6. Perangkat elektroda dikosongkan dari 5V hingga 0V atau hingga nilainya konstan.
 7. Perhitungan konstanta dielektrik dilakukan pada *Microsoft Excel* untuk membandingkan hasil eksperimen dan hasil teori.
 8. Tahapan 1-7 diulangi untuk jarak elektroda masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran nilai konstanta dielektrik udara dengan cara mengukur nilai kapasitansi elektroda plat sejajar. Nilai kapasitansi diperoleh dengan metode pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) elektroda, yang kemudian direkam oleh Arduino dan diolah menggunakan metode *fitting data* terhadap persamaan (2) dan (3). Nilai konstanta dielektrik udara diperoleh sesuai dengan rumusan kapasitor plat sejajar pada persamaan (5) dan (6).

HASIL

Pengukuran konstanta dielektrik udara pada kondisi pengisian (*charging*)

Pengujian kali ini yaitu pengisian (*charging*) pada elektroda plat sejajar (dengan jarak antar elektroda 1 mm) dengan dielektrik udarayang dilakukan menggunakan tegangan sumber 5V. Pengisian (*charging*) dilakukan sesuai dengan skema rangkaian pada Gambar 4. Proses ini disebut sebagai proses pengisian secara eksperimen sehingga menghasilkan tegangan eksperimen pada setiap 20 milisecond dari tegangan awal 0 volt hingga 5 volt yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil prediksi teori. Tabel 2 menunjukkan data tegangan eksperimen pada proses pengisian elektroda kapasitor plat sejajar berdielektrik udara.(jarak antar elektroda 1 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm).

Tabel 2. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengisian kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 1 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}} - V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}} - V_{\text{eksp}})^2$
0	0	10.30	0.00	0.0000	14.2797
0.22	0.02	10.30	0.93	0.5056	12.6654
1.12	0.04	10.30	1.69	0.3235	7.0695
1.81	0.06	10.30	2.31	0.2454	3.8764
2.36	0.08	10.30	2.81	0.1999	2.0131
2.8	0.1	10.30	3.22	0.1726	0.9581
3.15	0.12	10.30	3.55	0.1582	0.3954
3.45	0.14	10.30	3.82	0.1356	0.1081
3.72	0.16	10.30	4.04	0.1013	0.0035
3.95	0.18	10.30	4.22	0.0715	0.0293
4.15	0.2	10.30	4.36	0.0454	0.1378
4.32	0.22	10.30	4.48	0.0261	0.2928
4.46	0.24	10.30	4.58	0.0140	0.4640
4.57	0.26	10.30	4.66	0.0075	0.6259
4.66	0.28	10.30	4.72	0.0037	0.7764
4.73	0.3	10.30	4.77	0.0018	0.9047
4.78	0.32	10.30	4.82	0.0012	1.0023
4.81	0.34	10.30	4.85	0.0016	1.0633
4.83	0.36	10.30	4.88	0.0023	1.1049
4.86	0.38	10.30	4.90	0.0016	1.1689
4.88	0.4	10.30	4.92	0.0015	1.2125
4.91	0.42	10.30	4.93	0.0006	1.2795
4.92	0.44	10.30	4.95	0.0007	1.3022
4.94	0.46	10.30	4.96	0.0003	1.3483
4.95	0.48	10.30	4.96	0.0002	1.3716
4.9	0.5	10.30	4.97	0.0050	1.2570
\bar{x} 3.778				Jumlah 2,0272	Jumlah 56,7107

Untuk menentukan nilai tegangan secara teori maka dapat menggunakan persamaan (7).

$$b = \frac{d}{R \epsilon_0 \epsilon_r A} \quad (7)$$

Persamaan tersebut berasal dari persamaan nilai perubahan tegangan terhadap waktu untuk proses *charging* kapasitor elektroda plat sejajar sesuai persamaan (5). Nilai b

merupakan hasil *fitting data* antara data hasil eksperimen terhadap persamaan (5).

Pada pengujian ini diketahui nilai resistansi R sebesar 125 megaOhm, jarak antar elektroda d sebesar 0,001 meter, luasan elektroda A sebesar 0,087 meter², dan nilai ϵ_0 sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, serta nilai b yang diperoleh dari *fitting data* sebesar 10,3029, maka nilai ϵ_r dapat ditentukan sebagai berikut(persamaan (9)).

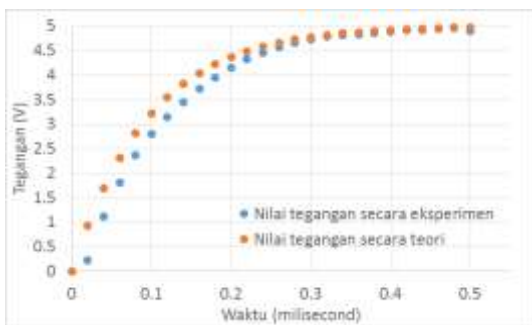
$$\epsilon_r = \frac{d}{R \epsilon_0 b A} \tag{8}$$

$$\epsilon_r = \frac{(0,001)}{(125 \times 10^6)(8,85 \times 10^{-12})(10,3029)(0,087)} = 1.00528498 \tag{9}$$

Untuk melihat keakuratan penentuan nilai konstanta dielektrik udara berdasarkan data nilai tegangan secara eksperimen, data diplotkan pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Dari kurva pada Gambar 6 dapat dilihat perbedaan antara tegangan secara eksperimen dan teori sangat sedikit untuk melihat nilai keakuratannya, maka dicari R^2 dari kurva tersebut dengan menggunakan teorema fitting. Persamaan (9) merupakan hasil perhitungan R^2 untuk melihat kesesuaian antara nilai teori dan nilai eksperimen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(V_{te} - V_{eksp})^2}{\sum(V_{avg} - V_{eksp})^2} = 1 - \frac{2,0272}{56,7107} = 0.964253619 \tag{9}$$



Gambar 6. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 1 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

Dapat dilihat dari R^2 perhitungan sebelumnya bahwa tegangan secara eksperimen sesuai dengan tegangan secara teori, hal ini menunjukkan metode ini dapat

digunakan untuk menentukan nilai konstanta dielektrik udara. Berdasarkan nilai R^2 diatas dapat dikatakan bahwa antara eksperimen dan teori hasilnya hampir mendekati nilai yang sama. Sesuai dengan persamaan (1), nilai kapasitansi dari kapasitor elektroda plat sejajar pada eksperimen tersebut adalah sebesar $7,765 \times 10^{-10}$ Farad.

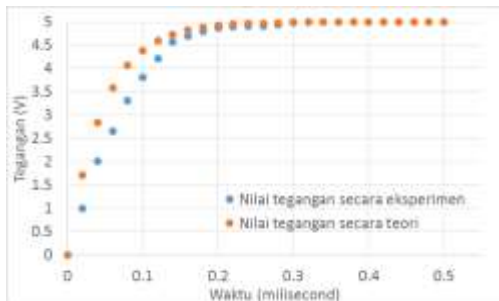
Semakin besar nilai jarak antar elektroda maka akan semakin kecil kapasitansi. Pada penelitian ini telah diamati pengaruh jarak antar elektroda terhadap hasil pengukuran nilai kapasitansi perangkat kapasitor plat sejajar dan konstanta dielektrik udara. Dalam pengujian ini dapat dibandingkan antara kapasitor plat sejajar dengan jarak antar elektroda masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Pada Tabel 3 di bawah ini adalah hasil akuisisi data nilai tegangan secara eksperimen dan teori untuk kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara pada proses pengisian dengan jarak antar elektroda 2 mm, tegangan sumber 5 Volt, dan hambatan sebesar 125 megaOhm.

Tabel 3. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengisian kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 2 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{te}-V_{eksp})^2$	$(V_{avg}-V_{eksp})^2$
0	0	20.97	0.00	0.0000	18.3374
1	0.02	20.97	1.71	0.5080	5.1630
2.01	0.04	20.97	2.84	0.6869	2.6316
2.66	0.06	20.97	3.58	0.8448	0.9452
3.31	0.08	20.97	4.07	0.5713	0.2230
3.81	0.1	20.97	4.39	0.3316	0.0052
4.21	0.12	20.97	4.60	0.1492	0.0828
4.57	0.14	20.97	4.73	0.0271	0.1745
4.7	0.16	20.97	4.83	0.0157	0.2681
4.8	0.18	20.97	4.89	0.0073	0.3455
4.87	0.2	20.97	4.92	0.0030	0.3816
4.9	0.22	20.97	4.95	0.0025	0.3941
4.91	0.24	20.97	4.97	0.0033	0.4068
4.92	0.26	20.97	4.98	0.0034	0.4459

4.95	0.28	20.97	4.99	0.0013	0.5152
5	0.3	20.97	4.99	0.0001	0.5152
5	0.32	20.97	4.99	0.0000	0.5152
5	0.34	20.97	5.00	0.0000	0.5152
V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}}-V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}}-V_{\text{eksp}})^2$
5	0.36	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.38	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.4	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.42	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.44	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.46	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.48	20.97	5.00	0.0000	0.5152
5	0.5	20.97	5.00	0.0000	0.5152
\bar{x} 4,282			Jumlah 3,1554	Jumlah 36,1883	

Dapat dapat dilihat bahwa waktu proses pengisian kapasitor plat sejajar dengan jarak antar elektroda 1 mm lebih besar dibandingkan pada kondisi 2 mm. Nilai tegangan secara eksperimen dan teori diplotkan kurva hubungan tegangan dan waktu pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 2 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

Pada pengujian ini diketahui nilai resistansi R sebesar 125 megaOhm, jarak antar elektroda d sebesar 0,002 meter, luasan elektroda A sebesar 0,087 meter², dan nilai ϵ_0 sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, serta nilai b yang diperoleh dari *fitting data* sebesar 20,9693. Data hasil pengujian menunjukkan hasil pengukuran kapasitansi sebesar $3,815 \times 10^{-10}$ Farad dan konstanta dielektrik udara sebesar 0,991. Kesesuaian antara teori dan hasil secara eksperimen didapatkan R^2 sebesar

0,9128.

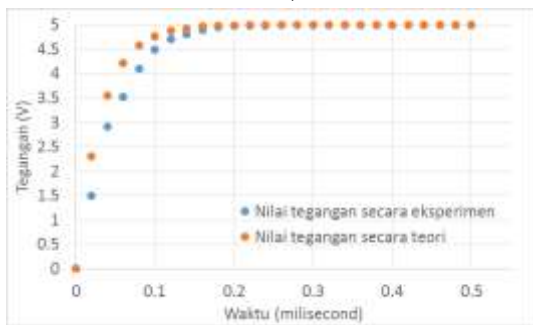
Tabel 4 menunjukkan hasil akuisisi data nilai tegangan secara eksperimen dan teori untuk kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara pada proses pengisian dengan jarak antar elektroda 3 mm, tegangan sumber 5 Volt, dan hambatan sebesar 125 megaOhm.

Tabel 4. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengisian kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 3 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}}-V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}}-V_{\text{eksp}})^2$
0	0	31.01	0.00	0.0000	19.8607
1.5	0.02	31.01	2.31	0.6572	2.3610
2.92	0.04	31.01	3.55	0.4013	0.8771
3.52	0.06	31.01	4.22	0.4928	0.1271
4.1	0.08	31.01	4.58	0.2319	0.0019
4.5	0.1	31.01	4.77	0.0756	0.0642
4.71	0.12	31.01	4.88	0.0285	0.1249
4.81	0.14	31.01	4.93	0.0156	0.1967
4.9	0.16	31.01	4.96	0.0042	0.2435
4.95	0.18	31.01	4.98	0.0010	0.2740
4.98	0.2	31.01	4.99	0.0001	0.2846
4.99	0.22	31.01	4.99	0.0000	0.2846
4.99	0.24	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.26	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.28	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.3	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.32	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.34	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.36	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.38	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.4	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.42	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.44	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.46	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.48	31.01	5.00	0.0000	0.2954
5	0.5	31.01	5.00	0.0000	0.2954
\bar{x} 4,457			Jumlah 1,9081	Jumlah 28,8352	

Perilaku pengisian kapasitor plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak elektroda 3

mm memiliki waktu pengisian yang lebih singkat dibandingkan dengan kapasitor berjarak 2 mm dan 1 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jarak elektroda pada perangkat kapasitor plat sejajar akan menghasilkan kapasitansi yang semakin kecil. Nilai tegangan secara eksperimen dan teori diplotkan kurva hubungan tegangan dan waktu pada Gambar 8. Pada kondisi jarak antar elektroda sebesar 3 mm, didapatkan nilai b yang diperoleh dari *fitting data* sebesar 31,007. Data hasil pengujian menunjukkan hasil pengukuran kapasitansi sebesar $2,58 \times 10^{-10}$ Farad dan konstanta dielektrik udara sebesar 1,0053. Kesesuaian antara teori dan hasil secara eksperimen didapatkan R^2 sebesar 0,93383. Nilai konstanta dielektrik udara yang telah didapatkan secara eksperimen melalui pengukuran kapasitansi metode *charging* berada pada kisaran 0,991 – 1,0053 dengan nilai R^2 lebih besar dari 0,9.



Gambar 8. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 3 mm; tegangan sumber 5 Volt; resistor 125 megaOhm)

Pengukuran konstanta dielektrik udara pada kondisi pengosongan (*discharging*)

Pengujian kali ini yaitu pengosongan (*discharging*) pada elektroda plat sejajar (dengan jarak antar elektroda 1 mm) dengan dielektrik udara. Pengosongan (*discharging*) dilakukan sesuai dengan skema rangkaian pada Gambar 5. Proses ini disebut sebagai proses pengosongan secara eksperimen yang menghasilkan tegangan eksperimen pada setiap 20 milisecond dari tegangan awal 5 volt hingga 0 volt yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil prediksi teori. Tabel 5 menunjukkan data

tegangan eksperimen pada proses pengosongan elektroda kapasitor plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 1 mm dan hambatan sebesar 125 megaOhm).

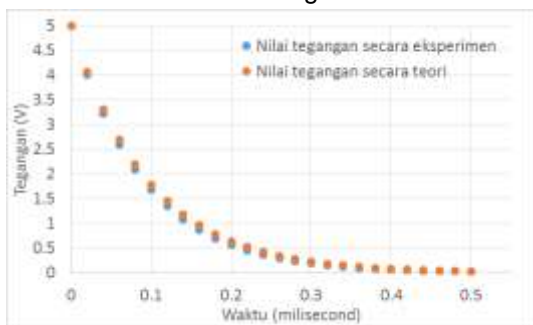
Tabel 5. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengosongan kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 1 mm; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}} - V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}} - V_{\text{eksp}})^2$
5	0	10,29	5,00	0,0000	16,1882
4,02	0,02	10,29	4,07	0,0025	9,2627
3,23	0,04	10,29	3,31	0,0069	5,0781
2,6	0,06	10,29	2,70	0,0093	2,6356
2,09	0,08	10,29	2,19	0,0110	1,2398
1,68	0,1	10,29	1,79	0,0114	0,4949
1,35	0,12	10,29	1,45	0,0109	0,1395
1,08	0,14	10,29	1,18	0,0108	0,0107
0,87	0,16	10,29	0,96	0,0087	0,0114
0,7	0,18	10,29	0,78	0,0071	0,0765
0,56	0,2	10,29	0,64	0,0061	0,1735
0,45	0,22	10,29	0,52	0,0048	0,2772
0,36	0,24	10,29	0,42	0,0040	0,3801
0,29	0,26	10,29	0,34	0,0029	0,4713
0,24	0,28	10,29	0,28	0,0016	0,5425
0,19	0,3	10,29	0,23	0,0015	0,6186
0,15	0,32	10,29	0,19	0,0013	0,6832
0,12	0,34	10,29	0,15	0,0010	0,7337
0,1	0,36	10,29	0,12	0,0005	0,7683
0,08	0,38	10,29	0,10	0,0004	0,8038
0,06	0,4	10,29	0,08	0,0005	0,8400
0,05	0,42	10,29	0,07	0,0003	0,8585
0,04	0,44	10,29	0,05	0,0002	0,8771
0,03	0,46	10,29	0,04	0,0002	0,8959
0,03	0,48	10,29	0,04	0,0000	0,8959
0,02	0,5	10,29	0,03	0,0001	0,9150
\bar{x} 0,977				Jumlah 0,1039	Jumlah 45,8719

Pada pengujian ini diketahui nilai resistansi R sebesar 125 megaOhm, jarak antar elektroda d sebesar 0,001 meter, luasan elektroda A sebesar 0,087 meter², dan nilai ϵ_0 sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Telah didapatkan nilai b dari *fitting data* sebesar 10,29122. Data

hasil pengujian menunjukkan hasil pengukuran kapasitansi sebesar $7,774 \times 10^{-10}$ Farad dan konstanta dielektrik udara sebesar 1,0096. Kesesuaian antara teori dan hasil secara eksperimen didapatkan R^2 sebesar 0,99773. Nilai tegangan secara eksperimen dan teori diplotkan kurva hubungan tegangan dan waktu pada Gambar 9.

Pada pengujian selanjutnya telah diamati pengaruh jarak antar elektroda pada proses pengosongan (*discharging*) perangkat kapasitor berdielektrik udara terhadap nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik yang terukur. Masing-masing pengujian pengosongan dilakukan pada jarak antar elektroda sebesar 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Pada Tabel 6 di bawah ini adalah hasil akuisisi data nilai tegangan secara eksperimen dan teori untuk kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara pada proses pengosongan dengan jarak antar elektroda 2 mm dan hambatan sebesar 125 megaOhm.



Gambar 9. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 1 mm dan resistor 125 megaOhm)

Tabel 6. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengosongan kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 2 mm; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}} - V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}} - V_{\text{eksp}})^2$
5	0	20.08	5.00	0.0000	19.7136
3.29	0.02	20.08	3.35	0.0031	2.5600
2.16	0.04	20.08	2.24	0.0062	0.7396
1.42	0.06	20.08	1.50	0.0061	0.1369
0.93	0.08	20.08	1.00	0.0053	0.0025
0.61	0.1	20.08	0.67	0.0037	0.0256

0.4	0.12	20.08	0.45	0.0024	0.0900
0.26	0.14	20.08	0.30	0.0016	0.1521
0.17	0.16	20.08	0.20	0.0010	0.2025
V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}} - V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}} - V_{\text{eksp}})^2$
0.11	0.18	20.08	0.13	0.0006	0.2304
0.08	0.2	20.08	0.09	0.0001	0.2601
0.05	0.22	20.08	0.06	0.0001	0.2809
0.03	0.24	20.08	0.04	0.0001	0.2916
0.02	0.26	20.08	0.03	0.0000	0.3025
0.01	0.28	20.08	0.02	0.0001	0.3025
0.01	0.3	20.08	0.01	0.0000	0.3025
0.01	0.32	20.08	0.01	0.0000	0.3136
0	0.34	20.08	0.01	0.0000	0.3136
0	0.36	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.38	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.4	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.42	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.44	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.46	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.48	20.08	0.00	0.0000	0.3136
0	0.5	20.08	0.00	0.0000	0.3136
\bar{x} 0,56				Jumlah 0,0306	Jumlah 28,7293

Pada pengujian ini diketahui nilai resistansi R sebesar 125 megaOhm, jarak antar elektroda d sebesar 0,002 meter, luasan elektroda A sebesar 0,087 meter², dan nilai ϵ_0 sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Telah didapatkan nilai b dari *fitting data* sebesar 20.0846. Data hasil pengujian menunjukkan hasil pengukuran kapasitansi sebesar $3,983 \times 10^{-10}$ Farad dan konstanta dielektrik udara sebesar 1,03465. Kesesuaian antara teori dan hasil secara eksperimen didapatkan R^2 sebesar 0.9989. Nilai tegangan secara eksperimen dan teori diplotkan kurva hubungan tegangan dan waktu pada Gambar 10.

Tabel 7 menunjukkan data tegangan eksperimen pada proses pengosongan elektroda kapasitor plat sejajar berdielektrik udara. (dengan jarak antar elektroda 3 mm dan hambatan sebesar 125 megaOhm). Pada pengujian ini diketahui nilai resistansi R sebesar 125 megaOhm, jarak antar elektroda d sebesar 0,003 meter, luasan elektroda A

sebesar 0,087 meter², dan nilai ϵ_0 sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Telah didapatkan nilai b dari *fitting data* sebesar 31.03535. Data hasil pengujian menunjukkan hasil pengukuran kapasitansi sebesar $2,578 \times 10^{-10}$ Farad dan konstanta dielektrik udara sebesar 1.0044. Kesesuaian antara teori dan hasil secara eksperimen didapatkan R^2 sebesar 0.9734. Nilai tegangan secara eksperimen dan teori diplotkan kurva hubungan tegangan dan waktu pada Gambar 11.

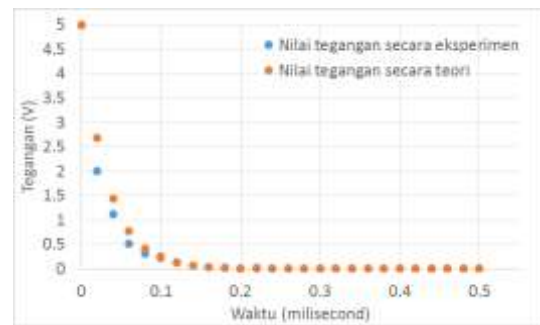


Gambar 10. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 2 mm dan resistor 125 megaOhm)

Tabel 7. Data nilai perubahan tegangan tiap waktu pada pengosongan kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara (dengan jarak antar elektroda 3 mm; resistor 125 megaOhm)

V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}}-V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}}-V_{\text{eksp}})^2$
5	0	31.04	5.00	0.0000	21.4797
2	0.02	31.04	2.69	0.4731	0.5694
1.12	0.04	31.04	1.44	0.1055	0.0239
0.52	0.06	31.04	0.78	0.0659	0.0031
0.31	0.08	31.04	0.42	0.0116	0.0133
0.25	0.1	31.04	0.22	0.0007	0.0508
0.14	0.12	31.04	0.12	0.0004	0.0873
0.07	0.14	31.04	0.06	0.0000	0.1059
0.04	0.16	31.04	0.03	0.0000	0.1193
0.02	0.18	31.04	0.02	0.0000	0.1263
0.01	0.2	31.04	0.01	0.0000	0.1193
0.02	0.22	31.04	0.01	0.0002	0.1335
0	0.24	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.26	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.28	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.3	31.04	0.00	0.0000	0.1335

0	0.32	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.34	31.04	0.00	0.0000	0.1335
V_{eksp}	T	B	V_{teori}	$(V_{\text{te}}-V_{\text{eksp}})^2$	$(V_{\text{avg}}-V_{\text{eksp}})^2$
0	0.36	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.38	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.4	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.42	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.44	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.46	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.48	31.04	0.00	0.0000	0.1335
0	0.5	31.04	0.00	0.0000	0.1335
\bar{x}	0,56			Jumlah 0,0306	Jumlah 28,7293



Gambar 11. Kurva perubahan tegangan $V_c(t)$ (kapasitor elektroda plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak antar elektroda 3 mm dan resistor 125 megaOhm)

Perilaku pengosongan kapasitor plat sejajar berdielektrik udara dengan jarak elektroda 3 mm memiliki waktu pengosongan yang lebih singkat dibandingkan dengan kapasitor berjarak 2 mm dan 1 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jarak elektroda pada perangkat kapasitor plat sejajar akan menghasilkan kapasitansi yang semakin kecil. Nilai konstanta dielektrik udara yang telah didapatkan secara eksperimen melalui pengukuran kapasitansi metode *discharging* berada pada kisaran 1,0044 – 1,0347 dengan nilai R^2 lebih besar dari 0,9.

PEMBAHASAN

Pengukuran konstanta dielektrik udara telah dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan perangkat elektroda plat sejajar berbasis mikrokontroller Arduino Uno. Pengamatan telah dilakukan untuk variasi

jarak antar plat elektroda masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Hasil pengukuran konstanta dielektrik udara dan nilai kapasitansi telah diukur untuk setiap variasi kondisi jarak antar elektroda.

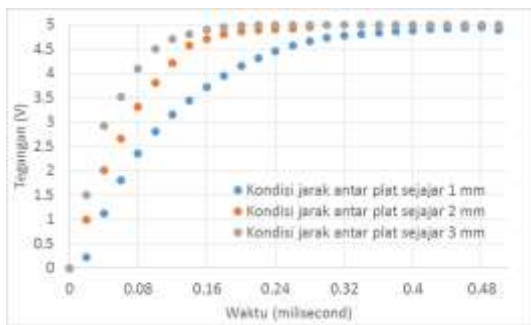
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa jarak antar elektroda mempengaruhi laju pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) perangkat kapasitor elektroda plat sejajar. Tabel 8 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa semakin besar jarak antar elektroda akan menghasilkan waktu proses pengisian dan pengosongan yang lebih singkat. Laju pengisian dan pengosongan perangkat kapasitor secara langsung menggambarkan besarnya nilai kapasitansi dari suatu perangkat kapasitor (Putra dkk, 2019). Berdasarkan hal tersebut, semakin besar jarak antar elektroda akan menghasilkan nilai kapasitansi yang lebih kecil. Tabel 9 menunjukkan besar nilai kapasitansi perangkat kapasitor elektroda plat sejajar pada kondisi jarak antar elektroda masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Gambar 12(a) dan Gambar 12(b) menunjukkan perbandingan laju perubahan tegangan $V_c(t)$ perangkat kapasitor elektroda plat sejajar untuk masing-masing kondisi jarak antar elektroda saat proses *charging* dan *discharging*.

Gambar 12. Laju perubahan tegangan V_c terhadap waktu t perangkat kapasitor pada proses (a) *charging* dan (b) *discharging*
 Tabel 8. Waktu yang dibutuhkan pada proses pengisian dan pengosongan perangkat kapasitor elektroda plat sejajar untuk mencapai keadaan *steady state*

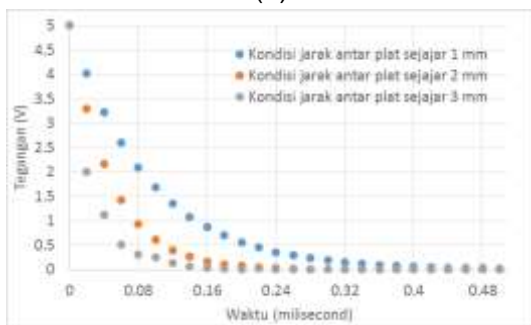
Kondisi jarak antar elektroda	Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan <i>steady state</i>	
	Metode pengisian (<i>charging</i>)	Metode pengosongan (<i>discharging</i>)
1 mm	500 milisecond	500 milisecond
2 mm	280 milisecond	300 milisecond
3 mm	240 milisecond	220 milisecond

Tabel 9. Nilai kapasitansi (C) perangkat kapasitor elektroda plat sejajar untuk mencapai keadaan *steady state*

Kondisi jarak antar elektroda	Nilai kapasitansi perangkat kapasitor elektroda plat sejajar	
	Metode pengisian (<i>charging</i>)	Metode pengosongan (<i>discharging</i>)
1 mm	$7,765 \times 10^{-10}$ F	$7,774 \times 10^{-10}$ F
2 mm	$3,815 \times 10^{-10}$ F	$3,983 \times 10^{-10}$ F
3 mm	$2,58 \times 10^{-10}$ F	$2,578 \times 10^{-10}$ F



(a)

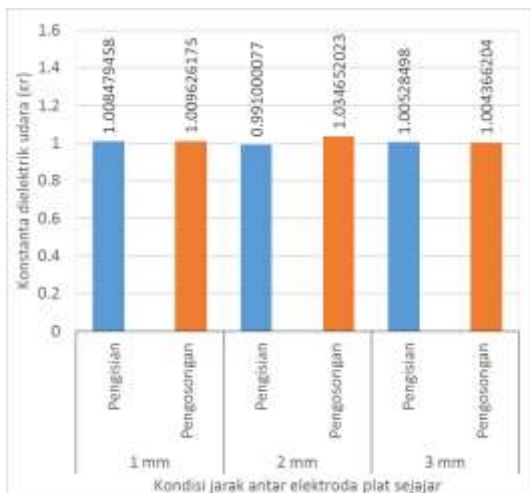


(b)

Hasil yang didapatkan pada Tabel 8 dan Tabel 9 sesuai dengan persamaan (1) mengenai hubungan kapasitansi dan jarak antar elektroda konduktif yang terpisah oleh dielektrik, yaitu semakin besar jarak antar elektroda maka semakin kecil kapasitansi yang diperoleh. Telah didapatkan nilai kapasitansi pada proses pengisian dan pengosongan yang relatif sama untuk kondisi jarak antar elektroda yang sama. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (5) dan (6), bahwa waktu pengisian dan pengosongan dari satu perangkat kapasitor akan memiliki nilai yang sama.

Pada penelitian ini telah dilakukan pengamatan pengaruh kondisi jarak antar elektroda plat sejajar terhadap hasil pengukuran konstanta dielektrik udara. Gambar 13 menunjukkan perbandingan nilai

konstanta dielektrik udara pada kondisi jarak antar elektroda plat sejajar masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Pada masing-masing kondisi jarak antar elektroda plat sejajar menunjukkan nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) udara yang relatif sama, yaitu pada kisaran 0,991 – 1.0346 dengan nilai kesesuaian R^2 masing-masing lebih besar dari 0,9. Grafik pada Gambar 13 menunjukkan bahwa kondisi jarak antar elektroda plat sejajar tidak mempengaruhi hasil pengukuran nilai konstanta dielektrik udara. Perubahan pada kondisi jarak antar plat elektroda terbukti berpengaruh terhadap nilai kapasitansi, namun tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil pengukuran nilai konstanta dielektrik udara, sesuai dengan data yang diperoleh pada Tabel 9 dan Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan nilai konstanta dielektrik udara (ϵ_r) pada kondisi jarak antar elektroda plat sejajar masing-masing 1 mm, 2 mm dan 3 mm

PENUTUP

Pada penelitian ini telah ditemukan sebuah prototipe alat pengukur konstanta dielektrik udara dan nilai kapasitansi menggunakan perangkat mikrokontroler Arduino Uno. Pengaruh jarak antar elektroda plat sejajar terhadap nilai kapasitansi telah diamati pada penelitian ini. Semakin besar jarak antar elektroda plat sejajar maka semakin kecil kapasitansi yang diperoleh. Telah didapatkan bahwa perbedaan kondisi jarak antar elektroda dapat menghasilkan nilai

pengukuran konstanta dielektrik yang relatif sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku pengisian dan pengosongan perangkat kapasitor plat-sejajar memiliki nilai R square $> 0,9$, yang menunjukkan korelasi cukup baik antara hasil prediksi dan eksperimen pada pengukuran kapasitansi. Hasil pengukuran menunjukkan nilai konstanta dielektrik udara telah diukur dengan nilai sebesar 0,991 – 1.0346.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Lab. Fisika-Mekatronika Politeknik STTT Bandung, serta rekan-rekan dosen Politeknik STTT Bandung yang telah memberikan dukungan pada penelitian ini.

REFERENCES

- Allagui, A., Elwakil, A. S., Fouda, M. E., & Radwan, A. G. (2018). Capacitive behavior and stored energy in supercapacitors at power line frequencies. *Journal of Power Sources*, 390, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.035>
- Argin, M., & Karady, G. G. (2008). Characterization of polyurethane foam dielectric strength. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(2), 350-356. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483452>
- Arshad, A., Khan, S., Alam, A. H. M. Z., Tasnim, R., Gunawan, T. S., Ahmad, R., & Nataraj, C. (2016). An activity monitoring system for senior citizens living independently using capacitive sensing technique. In *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520405>
- Arum, Z. H., Widodo, C. S., & Saroja, G. (2015). Studi pengukuran nilai konstanta dielektrik oli berbagai viskositas pada frekuensi 100 Hz-2000 Hz. *Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya*.
- Bandyopadhyay, P. C., Chaki, T. K., Srivastava, S., & Sanyal, G. S. (1980). Dielectric behavior

- of polystyrene foam at microwave frequency. *Polymer Engineering & Science*, 20(6), 441-446. <https://doi.org/10.1002/pen.760200610>
- Cahyono, B.E., Supriyadi, S. & Rofiq, M.A. (2017). Karakteristik Sensor Kapasitif Pelat Sejajar Dalam Aplikasinya Sebagai Instrumen Pengukur Curah Hujan Berbasis Arduino Uno. *Indonesian Journal of Applied Physics*. Vol. 7, No. 2. <https://doi.org/10.13057/ijap.v7i2.14248>
- Cheng, J., Amft, O., Bahle, G., & Lukowicz, P. (2013). Designing Sensitive Wearable Capacitive Sensors for Activity Recognition. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 3935–3947. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2259693>
- Coyle, S., King-Tong Lau, Moyna, N., O’Gorman, D., Diamond, D., Di Francesco, F., Costanzo, D., Salvo, P., Trivella, M.G., De Rossi, D.E., Taccini, N., Paradiso, R., Porchet, J.A., Ridolfi, A., Luprano, J., Chuzel, C., Lanier, T., Cavalier, R., Schoumacker, S., Mourier, V., Chartier, I., Convert, R., De Moncuit, H., & Bini, C. (2010). BIOTEX—Biosensing Textiles for Personalised Healthcare Management. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(2), 364-370. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.203.8484>
- Dean, R. N., & Rane, A. K. (2013). A Digital Frequency-Locked Loop System for Capacitance Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(4), 777–784. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2240092>
- Halliday, D., Resnick, R., Walker. (1997). *Fundamentals of Physics-Extended, 5th*, John Wiley & Sons, New York.
- Hidayat, M. R., Widodo, C. S., & Saroja, G. (2013). Kajian Karakteristik Biolistrik Kulit Ikan Lele (*Clarias Batrachus*) Dengan Metode Dielektrik Frekuensi Rendah. *Dessertasi Doktor: Universitas Brawijaya*.
- Hoffmann, T., Eilebrecht, B., & Leonhardt, S. (2011). Respiratory Monitoring System on the Basis of Capacitive Textile Force Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 11(5), 1112–1119. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2082524>
- Juansah, J., & Irmansyah, I. (2012). Kajian Sifat Dielektrik Buah Semangka Dengan Pemanfaat Sinyal Listrik Frekuensi Rendah. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung*, 5(3).
- Karady, G. G., Argin, M., Rahmatian, F., & Rose, A. H. (2004, October). Polyurethane foam application for high voltage insulation. In *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*. (pp. 526-529). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2004.1364303>
- Karady, G. G., Argin, M., Shi, B., Rahmatian, F., & Rose, A. H. (2003, September). Electrical properties of rigid pour polyurethane foam applied for high voltage insulation. In *2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495)* (Vol. 3, pp. 870-874). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TDC.2003.1335051>
- Knott, E. F. (1993). Dielectric constant of plastic foams. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 41(8), 1167-1171. <https://doi.org/10.1109/8.244664>
- Kondalkar, V. V., Ryu, G., Lee, Y., & Lee, K. (2019). Development of highly sensitive and stable humidity sensor for real-time monitoring of dissolved moisture in transformer-insulating oil. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.162>
- Laflamme, S., Saleem, H. S., Vasan, B. K., Geiger, R. L., Chen, D., Kessler, M. R., & Rajan, K. (2013). Soft Elastomeric Capacitor Network for Strain Sensing Over Large Surfaces. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(6), 1647–1654. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2283365>
- Laflamme, S., Ubertini, F., Saleem, H., D’Alessandro, A., Downey, A., Ceylan, H., & Materazzi, A. L. (2015). Dynamic Characterization of a Soft Elastomeric Capacitor for Structural Health Monitoring. *Journal of Structural*

- Engineering*, 141(8), 04014186.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001151](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001151)
- Lee, H. J., Hwang, S. H., Yoon, H. N., Lee, W. K., & Park, K. S. (2015). Heart Rate Variability Monitoring during Sleep Based on Capacitively Coupled Textile Electrodes on a Bed. *Sensors*, 15(5), 11295–11311.
<https://doi.org/10.3390/s150511295>
- Min, S.D., Yun, Y., & Shin, H. (2014). Simplified Structural Textile Respiration Sensor Based on Capacitive Pressure Sensing Method. *IEEE Sensors Journal*, 14(9), 3245–3251.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2327991>
- Mukhopadhyay, S. C. (2015). Wearable Sensors for Human Activity Monitoring: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 15(3), 1321–1330.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2370945>
- Pereira, R. G., Naik, D. A., Naik, S. S., Naik, S. D., & Cardoso, S. (2016). Capacitive sensor interfaced with arduino. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2(15), 90-95.
- Prihatnolo, S. T., Syakur, A., & Facta, M. (2011). Pengukuran Tegangan Tembus Dielektrik Udara Pada berbagai Sela Dan Bentuk Elektroda Dengan Variasi Temperatur Sekitar. *Dessertasi Doktor: Universitas Diponegoro*.
- Putra, V.G.V., & Purnomosari, E. (2016). *Pengantar Listrik Magnet Dan Terapannya*. CV. Mulia Jaya. ISBN 978-6020-72713-2-6.
- Putra, V. G. V., Wijayono, A., Purnomosari, E., Ngadiono, N., & Irwan, I. (2019). Metode Pengukuran Kapasitansi Dengan Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika Dan Riset Ilmiah)*, 3(1), 36-45.
<https://doi.org/10.30599/jipfri.v3i1.425>
- Rizza, H., Sudarti, S., & Handono, S. (2019). Aplikasi Kapasitansi Meter Disertai Sistem Data Logger Berbasis Arduino Uno Untuk Uji Tingkat Kematangan Buah Pisang. *FKIP e-PROCEEDING*, 3(2), 1-5.
- Rosita, F. N., & Widodo, C. S. (2014). Kajian Pengaruh Campuran Lemak Babi Terhadap Konstanta Dielektrik Lemak Ayam Menggunakan Metode Dielektrik. *Dessertasi Doktor: Universitas Brawijaya*.
- Salvo, P., Di Francesco, F., Costanzo, D., Ferrari, C., Trivella, M. G., & De Rossi, D. (2010). A Wearable Sensor for Measuring Sweat Rate. *IEEE Sensors Journal*, 10(10), 1557–1558.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2046634>
- Tang, X., Li, S., Shen, L., Zhao, W., Yang, X., Williams, R., Liu, J., Tan, Z., Hall, N. & Sun, N. (2019). 18.2 A 16fJ/Conversion-Step Time-Domain Two-Step Capacitance-to-Digital Converter. In *2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*.
<https://doi.org/10.1109/ISSCC.2019.8662359>
- Xia, J., Chen, F., Li, J., & Tao, N. (2009). Measurement of the quantum capacitance of graphene. *Nature Nanotechnology*, 4(8), 505–509.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2009.177>