

Kapasitif Sensor Untuk Mengukur Kadar Air Biodiesel: Pengaruh Kombinasi Amplitudo Sinyal Input Terhadap Korelasi Antara Nilai Pergeseran Sudut Fase Sinyal dan Perubahan Nilai Kapasitansi

Hari Sumartono^{a,b*}, Mahfudz Al Huda^c, Berkah Fajar, T.K^a, Achmad Widodo^a, Nacep Suryana^d, Ratno Nuryadi^e

^aDepartemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang, 50275, Jawa Tengah, Indonesia
Jln Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang

^bPusat Riset Teknologi Transportasi-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
KST. BJ Habibie, Tangerang Selatan, 15314, Banten, Indonesia

^cPusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
KST. BJ Habibie, Tangerang Selatan, 15314, Banten, Indonesia

^dPusat Riset Teknologi Konversi Energi-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
KST. BJ Habibie, Tangerang Selatan, 15314, Banten, Indonesia

^ePusat Riset Fotonika-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
KST. BJ Habibie, Tangerang Selatan, 15314, Banten, Indonesia

*E-mail: hari012@brin.go.id

Abstract

The increasing biodiesel blending ratio in diesel fuel in Indonesia has drawn attention from vehicle manufacturer, who demand higher biodiesel quality. Water content is one of the critical quality parameters of biodiesel. Coulometric Karl Fischer titration is a commonly used for water content measurement method, however it is costly. This study investigates the feasibility of using a capacitive sensor based on phase shift angle detection to measure water content in biodiesel. Variations in biodiesel water content will change the capacitance of the sensor, which will be converted by an electronic circuit into an electronic signal output. The phase of the output signal is the one to be observed. Experiments were conducted over two different capacitance ranges (ΔC), namely 7.1-7.6 pF and 25.1-25.6 pF. A clear trend of phase shift angles and capacitance values correlation was observed. The strongest correlation was obtained in the ΔC 7.1-7.6 pF range, when input signal amplitude 10.27 V (S1) and 6.24 V (S2) was injected into the electronic circuit. The linear trendline slope was 27.6199, it indicates a strong relationship between capacitance values and phase shift angle. This result demonstrate that the proposed phase shift based capacitive sensing method is a promising and cost-effective approach for biodiesel water content measurement.

Keywords: capacitive sensors; phase shift angle; biodiesel water content; input signal amplitude

Abstrak

Peningkatan campuran biodiesel di dalam bahan bakar solar di Indonesia menarik perhatian pabrik kendaraan diesel, mereka menuntut kualitas biodiesel yang lebih tinggi. Salah satu parameter yang sangat penting di dalam biodiesel adalah kadar air. Titrasi Coulometric Karl Fischer merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengukur kadar air di dalam biodiesel, namun demikian memerlukan peralatan yang mahal. Penelitian ini mempelajari kemungkinan penggunaan sensor kapasitif berbasis pergeseran sudut fase sinyal untuk mengukur kadar air biodiesel. Perubahan nilai kapasitansi dari sensor kapasitif terjadi akibat perubahan kadar air biodiesel. Perubahan nilai kapasitansi ini oleh rangkaian elektronik diubah menjadi sinyal listrik berupa pergeseran sudut fase sinyal pada sisi keluaran rangkaian elektronik. Pada eksperimen yang dilakukan pada dua rentang nilai kapasitansi ΔC yang berbeda yaitu 7,1-7,6 pF dan 25,1-25,6 pF didapatkan trend perubahan sudut fase sinyal yang jelas. Korelasi terbaik antara nilai pergeseran sudut fase dan ΔC diperoleh pada rentang nilai ΔC 7,1-7,6 pF dengan amplitudo sinyal masukan S1 10,27 Volt dan S2 sebesar 6,24 Volt. Gradien garis trend pada kondisi tersebut adalah 27,6199. Ini menunjukkan hubungan yang jelas antara nilai ΔC dengan nilai pergeseran sudut fase sinyal sehingga metode ini memungkinkan untuk diterapkan dalam pengukuran kadar air biodiesel.

Kata kunci: sensor kapasitif, pergeseran sudut fase, kadar air biodiesel: amplitudo sinyal input

1. Pendahuluan

Peningkatan kesadaran masyarakat terhadap lingkungan hidup mendorong penggunaan energi yang ramah lingkungan. Biodiesel menggunakan bahan baku yang berasal dari tanaman dianggap sebagai bahan bakar yang ramah

lingkungan karena CO₂ yang dihasilkan pada proses pembakaran tidak akan menambah jumlah CO₂ yang beredar di atmosfer, ini karena bahan baku biodiesel berasal dari tanaman yang menyerap CO₂ dari atmosfer dan mengubahnya menjadi buah. Hal ini sejalan dengan peran dari energi terbarukan untuk menurunkan emisi karbon seperti yang disampaikan oleh Naeem *et al.* [1].

Penggunaan bahan bakar baru memerlukan penyesuaian terhadap spesifikasi bahan bakar, pertimbangan lingkungan, dan penyesuaian dari peralatan yang menggunakan bahan bakar baru tersebut. Kadar air merupakan salah satu parameter penting dari biodiesel. Biodiesel cenderung untuk menyerap uap air dari udara sehingga kadar airnya akan meningkat seiring dengan lamanya waktu penyimpanan [2]. Keberadaan air di dalam biodiesel akan memicu tumbuhnya mikroba yang selanjutnya akan membentuk sludge [3-4] dan mempercepat kerusakan bahan bakar. Pada penyimpanan jangka panjang, biodiesel dapat menyebabkan korosi pada tangki penyimpanan yang terbuat dari logam [4]. Oleh karena itu sangat penting untuk dilakukan monitoring kadar air biodiesel selama waktu penyimpanan. Titrasi Coulometric Karl Fischer merupakan metode yang umum digunakan untuk mengukur kadar air biodiesel dengan akurasi yang tinggi [5]. Reaksi kimia antara air dengan reagen yang digunakan dalam metode ini menghasilkan hasil pengukuran yang sangat baik. Namun demikian metode ini memerlukan laboratorium yang memiliki fasilitas tersebut dan mungkin sulit didapatkan di daerah yang terpencil. Selain metode pengukuran kadar air kimiawi terdapat metode pengukuran kadar air menggunakan teknik spectroscopy. Teknik Near Infra-Red (NIR) Spectroscopy telah digunakan dalam pengukuran kadar air biodiesel [6]. NIR spectroscopy merupakan metode yang non-destructive. Metode ini mendeteksi kadar air berdasarkan perubahan spektrum cahaya karena penyerapan sebagian spektrum cahaya oleh air.

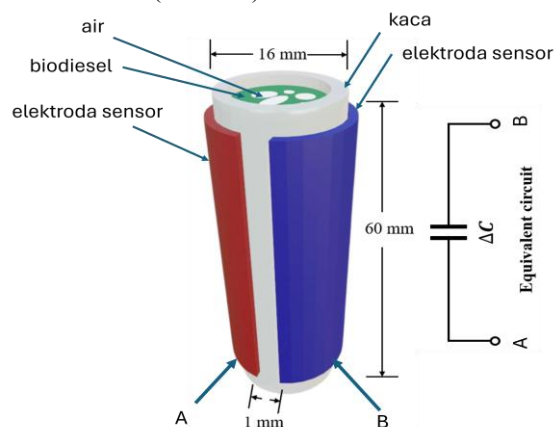
Teknik pengukuran menggunakan sensor kapasitif juga menjadi metode alternatif yang menjanjikan untuk mengukur kadar air rendah di dalam cairan dengan akurat. Demori *et al.* [7] dan Sagarika *et al.* [8] meneliti penggunaan sensor kapasitif untuk mendeteksi ketinggian kolom air. Selain desain sensor, sensitivitas dan resolusi sensor kapasitif juga dipengaruhi oleh konfigurasi rangkaian. Berbagai konfigurasi rangkaian yang ditemukan dalam literatur bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dan resolusi rangkaian pengkondisian sinyal [9, 10]. Salah satu varian tersebut adalah penguat muatan, yang mampu mengubah kapasitansi menjadi sudut fasa, secara efektif mengukur perubahan kapasitansi yang sangat kecil. Penguat muatan, yang umumnya digunakan sebagai sensor muatan pada perangkat elektronik skala nano [11, 12], juga dapat digunakan untuk mengukur level fluida dua fasa. Penelitian tentang penggunaan sensor kapasitif dengan metode pergeseran sudut fase juga dilakukan oleh Zubair *et al.* [13] untuk mengukur kadar air di dalam minyak bumi. Pada penelitian ini kami menggunakan sensor kapasitif berbasis pergeseran sudut fase sinyal untuk mendeteksi kadar air di dalam biodiesel. Metode ini tidak memerlukan kontak langsung, sederhana dan memungkinkan untuk dilakukan pengukuran kadar air secara real-time. Fokus kami saat ini adalah untuk meneliti pengaruh dari amplitudo sinyal masukan S1 dan S2 terhadap nilai pergeseran sudut fase sinyal keluaran dan korelasinya dengan nilai kapasitansi dari sensor.

2. Metodologi

2.1. Sensor Kapasitif Semi Silinder

Sensor kapasitif semi silinder adalah sensor kapasitif yang berbentuk seperti cincin yang dibelah menjadi 2 yang kedua bagiannya tidak terhubung [14]. Kedua keping elektroda berbentuk setengah cincin tersebut diletakkan saling berhadapan dan ditempelkan pada permukaan luar tabung kaca ataupun tabung yang terbuat dari bahan dielektrik lainnya.

Pada gambar 1 terlihat contoh desain sebuah sensor kapasitif semi silinder yang terpasang pada tabung kaca. Titik A dan B merupakan titik yang akan menghubungkan masing masing elektroda dengan rangkaian elektronik. Selanjutnya rangkaian elektronik ini akan mengubah nilai kapasitansi dari sensor tersebut menjadi sinyal listrik yang akan dianalisa lebih lanjut. Dimensi penting sensor terdiri dari diameter sensor ($D=16$ mm), panjang atau tinggi sensor ($h=60$ mm), dan jarak celah antara kedua elektroda ($d=1$ mm).



Gambar 1. Sensor kapasitif semi silinder, tinggi elektroda sensor $h=60$ mm, diameter $D=16$ mm dan jarak celah antar elektroda $d=1$ mm.

Nilai kapasitansi dari sensor tergantung pada dimensi sensor dan kandungan zat yang berada diantara kedua keping elektroda sensor. Untuk sensor saat kosong (berisi udara) maka nilai kapasitansinya dapat dihitung menggunakan rumus (1) [11], dengan ϵ_0 adalah permitivitas dari ruang hampa, ϵ_1 adalah permitivitas dari udara, n adalah jumlah segmentasi elemen dari keping elektroda, d adalah jarak celah antar keping elektroda dan Δd adalah segmentasi kenaikan jarak celah (jarak elektroda).

$$C_0 = \sum_{i=1}^n 2 * \epsilon_0 * \epsilon_1 * A * \left[\frac{1}{d+(i-1)\Delta d} \right] + \left[\frac{\epsilon_0 * \epsilon_1 * A}{2R} \right] \quad (1)$$

Karena nilai kapasitansi dari sensor kapasitif tergantung kepada zat yang berada diantara kedua keping elektroda maka kita perlu merinci zat apa saja yang berada diantara kedua keping elektroda tersebut. Terdapat material kaca dari tabung kaca yang digunakan sebagai penampung cairan, selain itu juga terdapat cairan yang mengisi sensor tersebut. Nilai keseluruhan kapasitansi dari sensor merupakan penjumlahan seri dari nilai kapasitansi akibat masing masing bahan yang ada diantara kedua keping elektroda yang dapat dihitung menggunakan rumus (2) [7].

$$C_t = \left[\frac{C_a * C_w}{C_a + C_w} \right] \quad (2)$$

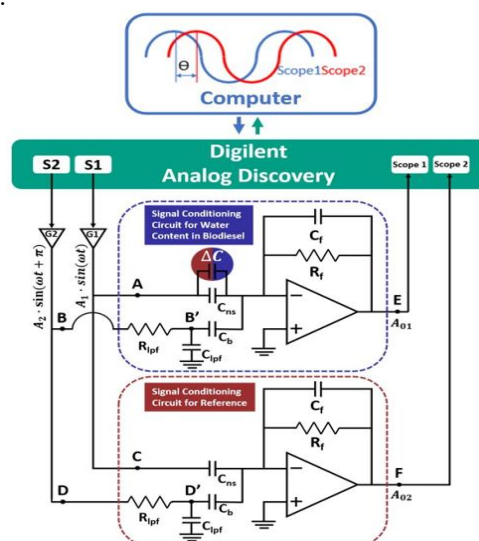
Karena bentuk tabung kaca yang menjadi bagian dari sensor adalah tetap, maka komponen nilai kapasitansi akibat bahan kaca tersebut adalah tetap. Dengan demikian perubahan nilai kapasitansi dari sensor tersebut dipengaruhi oleh perubahan komposisi zat yang berada di dalam cairan yang berada di dalam sensor (C_a). Permitivitas gabungan dari fluida yang berada di dalam sensor (air dan biodiesel) dapat dihitung menggunakan rumus (3) [14].

$$\epsilon_a = \left[\frac{V_w * \epsilon_w + V_b * \epsilon_b}{V_t} \right] \quad (3)$$

V_w adalah volume air di dalam cairan, V_b adalah volume biodiesel di dalam cairan. V_t adalah volume keseluruhan cairan di dalam sensor, ϵ_w adalah permitivitas dari air, dan ϵ_b adalah permitivitas dari biodiesel. Untuk menghitung nilai kapasitansi dari sensor kapasitif saat berisi biodiesel yang mengandung air dapat digunakan persamaan 1 dengan menggantikan permitivitas ϵ_1 dengan permitivitas gabungan biodiesel dan air ϵ_a . Dengan menggunakan program numerik kita dapat menghitung nilai kapasitansi dari sensor kapasitif dengan dimensi tertentu saat diisi dengan biodiesel yang mempunyai kadar air yang sudah diketahui.

2.2. Peralatan dan Bahan

Pada penelitian ini kami membuat sistem pengukuran menggunakan sensor kapasitif berbasis pergeseran sudut fase [15]. Sistem pengukuran ini terdiri dari sensor kapasitif semi silinder, rangkaian elektronik pengubah nilai kapasitansi menjadi sinyal listrik, pembangkit sinyal sinus dan osciloscop (keduanya menyatu di dalam modul Digilent Analog Discovery 2), dan komputer untuk mengendalikan pengujian. merekam dan memproses data, lihat gambar 2. Modul Digilent Analog Discovery 2 membangkitkan 2 sinyal sinus yang berbeda fase 180° . Kedua sinyal ini dimasukkan ke dalam rangkaian elektronik melalui 4 titik masukan yang ada di dalam rangkaian, selanjutnya sinyal keluaran dari rangkaian elektronik dimasukkan ke dalam osciloscop yang ada pada modul Digilent Analog Discovery 2. Data tegangan dan fase dari 2 sinyal yang berasal dari saluran keluaran rangkaian elektronik diukur oleh osiloskop dan direkam di dalam komputer [16].



Gambar 2. Sistem pengukuran menggunakan sensorkapasitif berbasis pergeseran sudut fase yang terdiri dari rangkaian elektronik pengkonversi nilai kapasitansi menjadi sinyal listrik, modul Digilent Analog Discovery 2 dan komputer [15]

Sinyal sinus $A_2 \cdot \sin(\omega t + \pi)$ dimasukkan ke dalam rangkaian elektronik melalui titik B pada rangkaian pengukur (rangkaian bagian atas) dan melalui titik D pada rangkaian referensi (rangkaian bagian bawah). Selanjutnya sinyal ini

melewati *Low Pass Filter* (LPF) dan mengalami pergeseran sudut fase kecil sebesar ψ , pergeseran kecil ini sangat berpengaruh terhadap sensitivitas perubahan sudut fase [17]. Dengan demikian sinyal tersebut selanjutnya menjadi $A_2 \cdot \sin(\omega t + \pi - \psi)$ [18, 19]. Sementara itu sinyal sinus lainnya $A_1 \cdot \sin(\omega t)$ dimasukkan ke dalam rangkaian elektronik melalui titik A pada rangkaian pengukur dan titik C pada rangkaian referensi. Setelah melalui titik A selanjutnya sinyal akan melalui ΔC pada rangkaian pengukur. Kedua sinyal pada rangkaian pengukur maupun rangkaian referensi selanjutnya akan masuk ke *operational amplifier* (opam) dimana nilai kapasitansi akan diubah menjadi tegangan. Perbandingan dari amplitudo sinyal keluaran terhadap amplitudo sinyal masukan dapat dihitung berdasarkan persamaan 4 dan persamaan 5 [15].

$$\frac{A_{01}}{A_1} = \left(-\frac{C_{ns} + \Delta C}{C_f} \right) \sin(\omega t) - \frac{C_b}{bC_f} \sin(\omega t + \pi - \psi) \quad (4)$$

$$\frac{A_{02}}{A_2} = \left(-\frac{C_{ns}}{C_f} \right) \sin(\omega t) - \frac{C_b}{bC_f} \sin(\omega t + \pi - \psi) \quad (5)$$

Karena $C_b = b \cdot C_{ns}$ maka persamaan 4 dan 5 dapat ditulis menjadi:

$$\frac{A_{01}}{A_1} = \left(-\frac{C_{ns} + \Delta C}{C_f} \right) \sin(\omega t) - \frac{C_{ns}}{C_f} \sin(\omega t + \pi - \psi) \quad (6)$$

$$\frac{A_{02}}{A_2} = \left(-\frac{C_{ns}}{C_f} \right) \sin(\omega t) - \frac{C_{ns}}{C_f} \sin(\omega t + \pi - \psi) \quad (7)$$

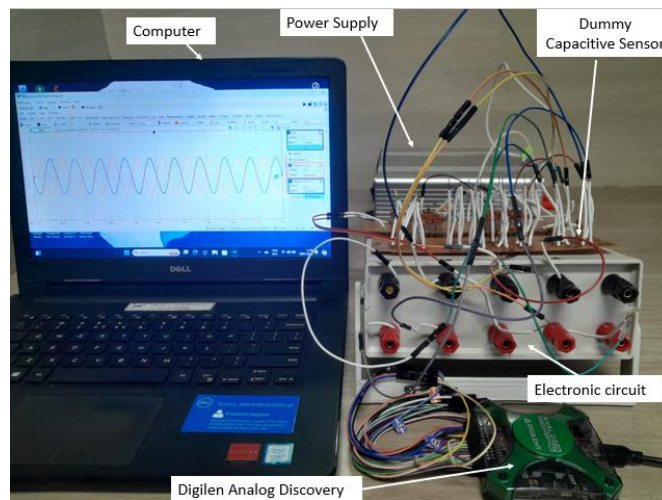
Selanjutnya selisih pergeseran sudut fase dari sinyal keluaran pada titik E dan D dapat dihitung menggunakan persamaan 8 [15]:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\psi)}{\frac{C_{ns} + \Delta C}{C_{ns}} - \cos(\psi)} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\psi)}{1 - \cos(\psi)} \right) \quad (8)$$

Suku pertama dari persamaan 8 merupakan sudut fase dari sinyal keluaran dari rangkaian pengukur dan suku kedua adalah sudut fase dari sinyal keluaran dari rangkaian referensi. Pada penelitian ini yang menjadi perhatian utama adalah korelasi antara kombinasi amplitudo sinyal masukan A_1 dan A_2 terhadap pergeseran sudut fase sinyal. Detail dari komponen elektronik yang dipergunakan dalam rangkaian yang terlihat pada gambar 2 adalah seperti berikut ini: $C_b = 69$ pF, $C_{ns} = 39,5$ pF, $C_f = 100$ pF, $R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_{lpf} = 160$ pF dan $R_{lfp} = 1$ k Ω .

2.3. Studi Eksperimental

Percobaan dilakukan dengan menggunakan peralatan dan bahan seperti yang terlihat pada gambar 3 yang terdiri dari adaptor, Digilent Analog Discovery 2, komputer, dan serangkaian capacitor yang digunakan sebagai pengganti nilai ΔC dari sensor kapasitif semi silinder. Eksperimen dilakukan dengan menginjeksikan sinyal sinus S1 dan S2 pada frekwensi 70 kHz. Sinyal S1 dan S2 mempunyai beda fase awal 180°, dengan kombinasi amplitudo bervariasi dari nilai 0,5 Volt-13 Volt, dengan variasi amplitudo sebanyak 12 pada nilai S1 dan 12 nilai amplitudo pada S2. Sehingga terdapat 144 titik pengukuran untuk setiap nilai ΔC yang digunakan dalam eksperimen. Pengujian dilakukan menggunakan program python untuk mengendalikan pengujian, mengukur, mengolah dan merekam data. Data yang direkam adalah data amplitudo S1 dan S2, fase sinyal keluaran 1 dan 2 serta selisih fase antara sinyal 1 dan sinyal 2.



Gambar 3. Foto peralatan yang dipergunakan dalam eksperimen yang terdiri dari adaptor, rangkaian elektronik, serangkaian kapasitor, Digilent Analog Discovery 2 dan komputer

Perhitungan nilai kapasitansi (ΔC) dari sensor kapasitif semi silinder dilakukan dengan target deteksi kadar air biodiesel berada pada rentang 500-1000 ppm. Dilakukan perhitungan nilai kapasitansi dari sensor saat kadar air biodiesel 500 ppm, 600 ppm, 700 ppm, 800 ppm, 900 ppm dan 1000 ppm menggunakan persamaan 1 dan persamaan 3. Dimensi sensor adalah sebagai berikut: tinggi sensor $h=60$ mm, diameter lengkung sensor $D=16$ mm, dan jarak celah antar keping elektroda sensor $d=1$ mm. Permittivitas air 80 dan permittivitas biodiesel 2.35. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program numerik dengan software scilab dan hasilnya ditampilkan pada tabel.1.

Tabel. 1 Kadar air biodiesel dan nilai kapasitansi dari sensor kapasitif semi silinder

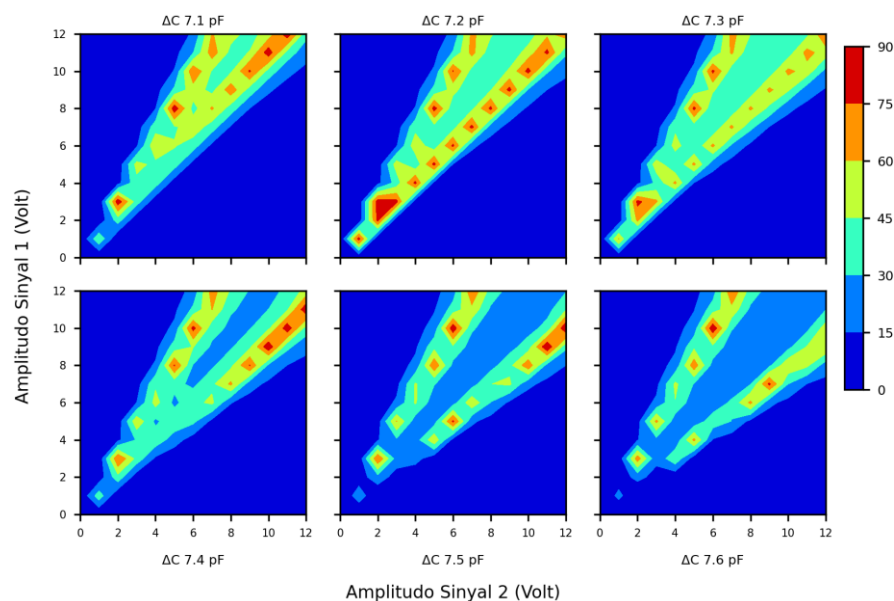
No.	Kadar Air Biodiesel (ppm)	ΔC (pF)
1	500	6.994
2	600	7.192
3	700	7.391
4	800	7.589
5	900	7.787
6	1000	7.986

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan nilai ΔC 7,1-7,6 pF sesuai dengan nilai sensor saat diisi dengan biodiesel dengan kadar air 500-100 ppm. Pengukuran juga dilakukan dengan menggunakan nilai ΔC 25,1-25,6 pF untuk mengetahui respon system pengukuran terhadap nilai ΔC pada rentang yang berbeda.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kontur Pergeseran Sudut Fase

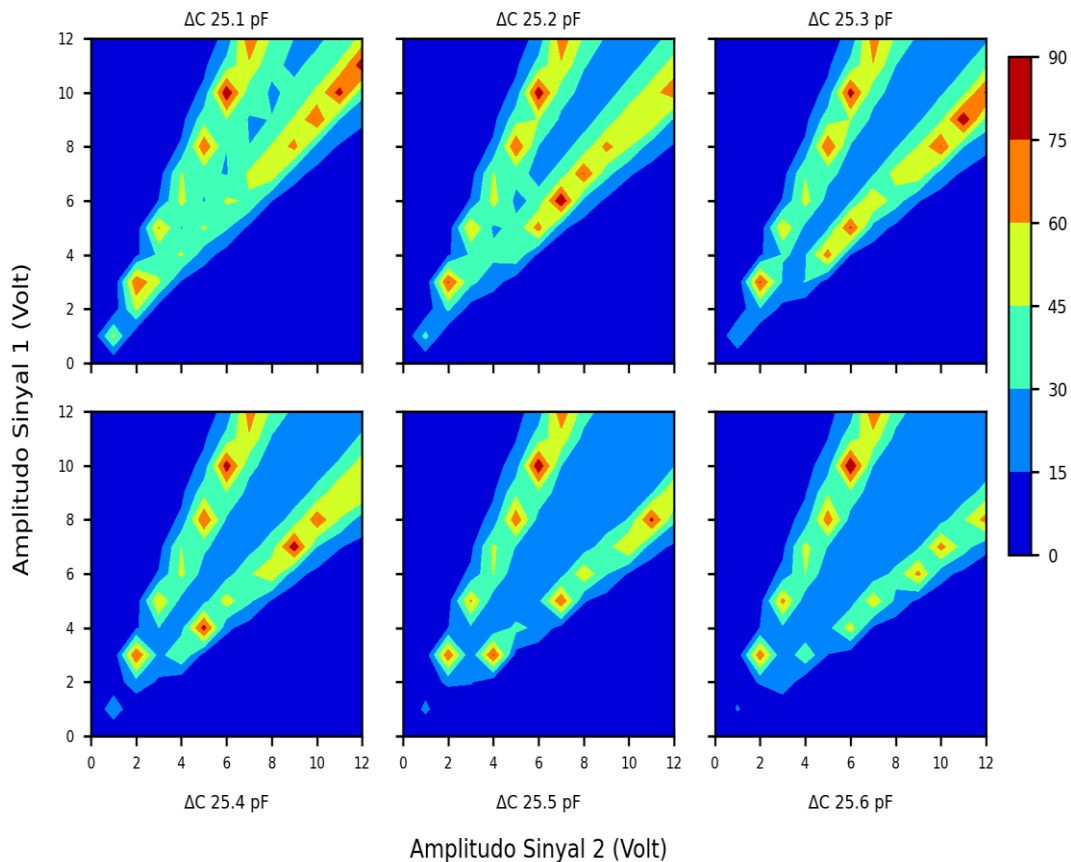
Gambar 4 menampilkan plot kontur dari nilai pergeseran sudut fase terhadap kombinasi amplitudo sinyal masukan S1 0,5-12,4 Volt dengan amplitudo sinyal masukan S2 0,5-13 Volt, frekwensi sinyal 70 kHz dan perbedaan fase awal sinyal 180° . Daerah dengan warna merah menunjukkan nilai pergeseran sudut fase yang tinggi, sementara warna biru menunjukkan daerah dengan nilai pergeseran sudut fase yang rendah. Pada gambar 4 tampak daerah dengan nilai pergeseran sudut fase yang tinggi membentuk segitiga miring yang membentang dari sudut kiri bawah dan melebar menuju sudut kanan atas, dengan dua garis pada tepi kiri dan kanan yang mempunyai nilai pergeseran sudut fase yang tinggi. Titik titik dengan nilai pergeseran sudut fase yang tinggi menunjukkan kombinasi dari amplitudo S1 dan S2 yang memberikan pergeseran sudut maksimum untuk nilai ΔC 7,1-7,6 pF. Semakin besar nilai ΔC maka semakin melebar pula segitiga pada plot kontur tersebut. Ini berarti kombinasi amplitudo S1 dan S2 yang menghasilkan pergeseran sudut fase maksimum sedikit berubah pada nilai ΔC yang lebih tinggi, atau dengan kata lain jika kombinasi amplitudonya disamakan maka akan terdapat perbedaan nilai pergeseran sudut fase dari ΔC yang berbeda. Fenomena inilah yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur kadar air biodiesel dengan menggunakan sensor kapasitif berbasis pergeseran sudut fase sinyal.



Gambar 4. Plot kontur nilai pergeseran sudut fase sinyal terhadap kombinasi amplitudo S1 dan S2 pada rentang nilai ΔC 7,1-7,6 pF

Gambar 5 memperlihatkan plot kontur dari nilai pergeseran sudut fase terhadap kombinasi amplitudo S1 dan S2 pada saat pengukuran dengan nilai ΔC berada pada rentang 25,1-25,6 pF. Tampak trend yang serupa dengan hasil

eksperimen saat menggunakan nilai ΔC 7,1-7,6 pF. Ini mengindikasikan bahwa fenomena yang sama dapat ditemukan pada rentang nilai ΔC yang berbeda. Ini berarti kita dapat membuat sensor dengan dimensi yang berbeda, sesuai dengan kondisi penggunaannya sehingga nilai ΔC berada pada rentang 25,1-25,6 pF.

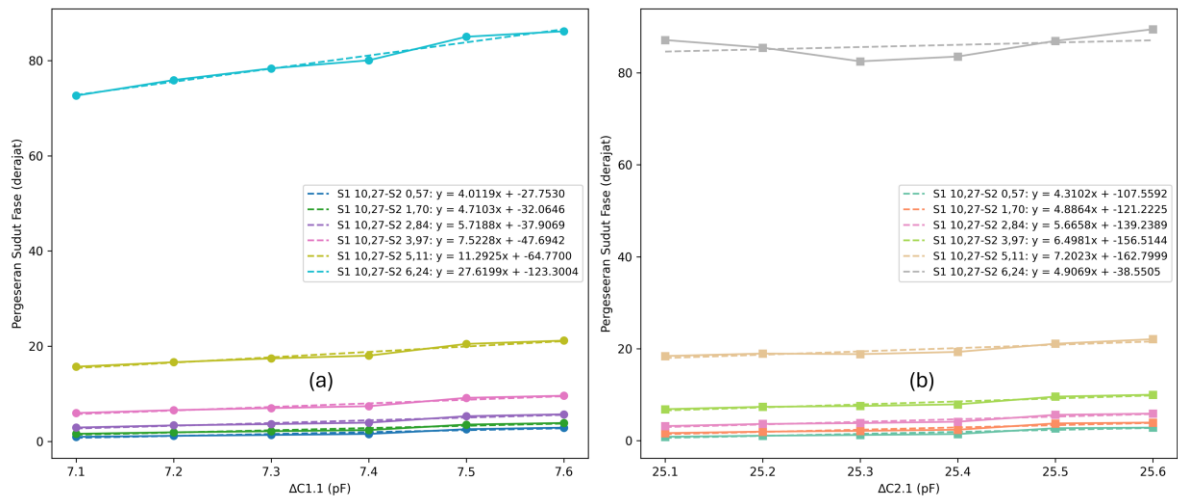


Gambar 5. Plot kontur nilai pergeseran sudut fase sinyal terhadap kombinasi amplitudo S1 dan S2 pada rentang nilai ΔC 25,1-25,6 pF

3.2. Hubungan Nilai Pergeseran Sudut Fase dan Kombinasi Amplitudo Sinyal Masukan S1 dan S2

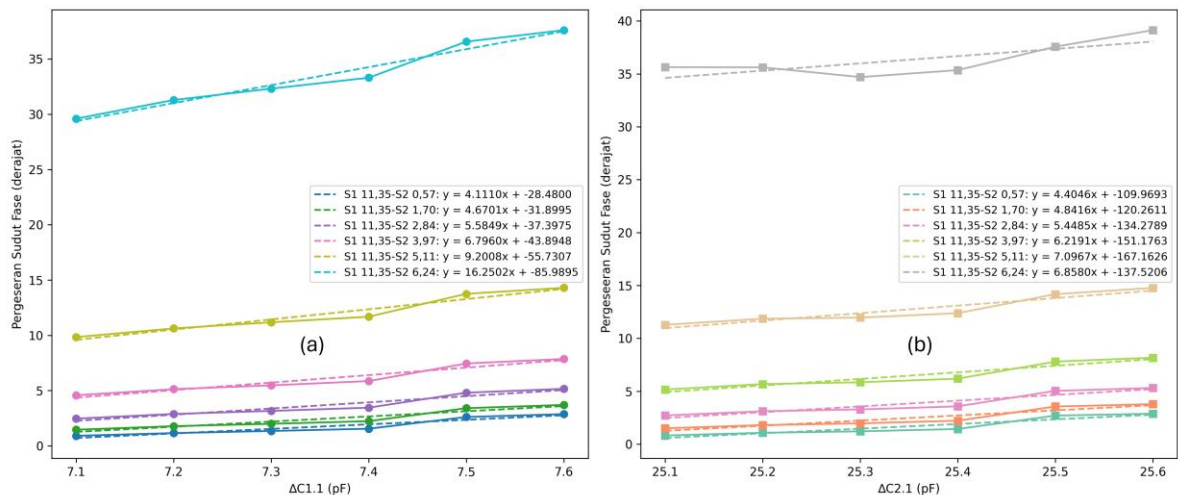
Plot kontur pada gambar 4 dan gambar 5 menunjukkan pola pengaruh kombinasi amplitudo sinyal masukan terhadap nilai pergeseran sudut pada setiap nilai ΔC . Untuk mengetahui lebih detail bagaimana korelasi antara nilai ΔC dengan nilai pergeseran sudut fase pada kombinasi amplitudo sinyal masukan tertentu maka kita harus mengolah data kontur plot lebih lanjut. Dengan mengambil data nilai pergeseran sudut fase pada ΔC yang berbeda beda pada kombinasi amplitudo sinyal masukan yang sama.

Gambar 6 memperlihatkan korelasi antara pergeseran sudut fase dengan nilai kapasitansi sensor ΔC pada saat rangkaian elektronik diinjeksi dengan sinyal sinus S1 sebesar 10,27 Volt dan dengan sinyal S2 sebesar 0,57 Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt. Grafik 6(a) memperlihatkan korelasi pergeseran sudut fase dengan nilai ΔC pada rentang 7,1-7,6 pF, sedangkan gambar 6(b) menunjukkan korelasi pergeseran sudut fase dengan ΔC pada rentang 25,1-25,6 pF. Pada gambar 6(a) terlihat nilai sudut fase meningkat seiring kenaikan ΔC pada seluruh kombinasi amplitudo S1 dan S2. Nilai pergeseran sudut fase semakin besar seiring dengan kenaikan nilai amplitudo S2 dan mencapai nilai tertinggi pada saat amplitudo S2 sekitar 0.6 kali amplitudo S1, ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh N. Suryana *et al.* dengan nilai pergeseran sudut fase tertinggi dicapai pada saat $S2 \approx 0,5 S1$ [18]. Pada gambar 6(b) dengan kombinasi amplitudo yang sama dengan gambar 6(a) terlihat trend yang serupa dengan gambar 6(a), hanya saja pada saat amplitudo S2 sebesar 6,24 Volt garis trend kurva korelasi pergeseran sudut fase terhadap ΔC membuat garis lurus yang miring ke arah kanan dengan gradien yang kecil yaitu 4,9069 dan ada 2 titik data pada bagian tengah yang terletak jauh di bawah garis trend. Jadi pada kombinasi amplitudo S1 10,27 Volt dan S2 6,24 Volt untuk rentang nilai ΔC 25,1-25,6 pF tidak bagus jika dipergunakan untuk aplikasi pengukuran kadar air biodiesel. Gradien persamaan garis yang terbesar diperoleh pada kombinasi amplitudo S1=10,27 Volt dan S2=6,24 Volt pada rentang ukur ΔC 7,1-7,6 pF dengan nilai gradien sebesar 27,6199.



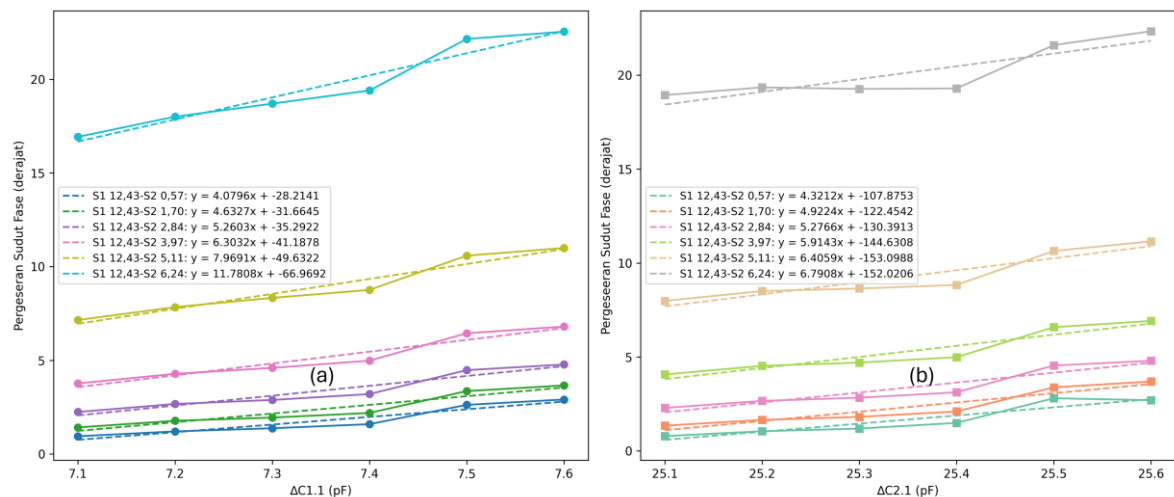
Gambar 6. Kurva korelasi pergeseran sudut fase sinyal dengan nilai ΔC pada saat amplitudo $S_1=10,27$ dan amplitudo $S_2=0,57$ Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt, (a) dengan rentang ukur ΔC 7,1-7,6 pF, dan (b) rentang ukur ΔC 25,1-25,6 pF

Gambar 7 memperlihatkan korelasi antara pergeseran sudut fase dengan nilai kapasitansi sensor ΔC pada saat rangkaian elektronik diinjeksi dengan sinyal sinus S_1 sebesar 11,35 Volt dan dengan sinyal S_2 sebesar 0,57 Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt. Grafik 7(a) memperlihatkan korelasi pergeseran sudut fase dengan nilai ΔC pada rentang 7,1-7,6 pF, sedangkan gambar 7(b) menunjukkan korelasi pergeseran sudut fase dengan nilai ΔC pada rentang 25,1-25,6 pF. Secara umum penampakan kurva pada gambar 7 (a) dan 7(b) mirip dengan gambar 6(a) dan 6(b) namun demikian nilai gradien garis trend nya lebih rendah. Gradien garis terbesar dicapai saat $S_1=11,35$ Volt berkombinasi dengan $S_2=6,24$ Volt, pada rentang ukur ΔC 7,1-7,6 pF yaitu sebesar 16,2502.



Gambar 7. Kurva korelasi pergeseran sudut fase sinyal dengan nilai ΔC pada saat amplitudo $S_1=11,35$ dan $S_2=0,57$ Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt, (a) dengan ΔC 7,1-7,6 pF, dan (b) ΔC 25,1-25,6 pF

Gambar 8 memperlihatkan korelasi antara pergeseran sudut fase dengan nilai kapasitansi sensor ΔC pada saat rangkaian elektronik diinjeksi dengan sinyal sinus S_1 sebesar 12,43 Volt dan dengan sinyal S_2 sebesar 0,57 Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt. Grafik 8(a) memperlihatkan korelasi pergeseran sudut fase dengan nilai ΔC pada rentang 7,1-7,6 pF, sedangkan gambar 8(b) menunjukkan korelasi pergeseran sudut fase dengan nilai ΔC pada rentang 25,1-25,6 pF. Secara umum penampakan kurva pada gambar 8 (a) dan 8(b) mirip dengan gambar 6(a) dan 6(b) namun demikian nilai gradien garis trend nya lebih rendah. Gradien garis terbesar dicapai saat $S_1=12,43$ Volt berkombinasi dengan $S_2=6,24$ Volt, pada rentang ukur ΔC 7,1-7,6 pF sebesar 11,7808. Perbedaan nilai gradien garis trend pada rentang nilai ΔC dan kombinasi amplitudo sinyal masukan S_1 dan S_2 yang berbeda beda juga kami dapatkan dalam penelitian kami lainnya sehingga menjadi hal yang sangat penting untuk dipertimbangkan pemilihannya dalam aplikasi pengukuran kadar air biodiesel [15].



Gambar 8. Kurva korelasi pergeseran sudut fase sinyal dengan nilai ΔC pada saat amplitudo $S1=12,43$ dan amplitudo $S2=0,57$ Volt, 1,70 Volt, 2,84 Volt, 3,97 Volt, 5,11 Volt dan 6,24 Volt, (a) dengan rentang ukur ΔC 7,1-7,6 pF, dan (b) rentang ukur ΔC 25,1-25,6 pF

4. Kesimpulan

Pola perubahan plot kontur yang jelas terlihat saat terjadi perubahan nilai ΔC mengindikasikan ada korelasi yang kuat antara nilai pergeseran sudut fase dengan nilai kapasitansi. Dengan menggali lebih jauh korelasi antara nilai pergeseran sudut fase sinyal dengan nilai ΔC diperoleh hubungan yang linear pada saat kombinasi amplitudo sinyal masukan $S1$ dan $S2$ tertentu dengan rentang nilai ΔC tertentu. Kombinasi amplitudo $S1=10,27$ Volt dan $S2=6,24$ Volt memberikan korelasi yang paling baik dengan gradien garis sebesar 27,6199 pada rentang nilai ΔC 7,1-7,6 pF. Hasil penelitian ini menguatkan kemungkinan penggunaan metode pengukuran kadar air biodiesel menggunakan sensor kapasitif berbasis pergeseran sudut fase sinyal.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami ucapkan kepada Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material – Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memberikan pendanaan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Muhammad Abubakr Naeem, Michael Appiah, John Taden, Richard Amoasi, and Bright Akwasi Gyamfi. "Transitioning to clean energy: Assessing the impact of renewable energy, bio-capacity and access to clean fuel on carbon emissions in OECD economies." *Energy Economics* 127 (2023) 107091. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107091>
- [2] Nur Allif Fathurrahman, Kemal Ginanjar, Rossy Dwi Devitasari, Mamay Maslahat, Riesta Anggarani, Lies Aisyah, Ariana Soemanto, Maharani Dewi Solikhah, Arfie Thahar, Edi Wibowo, Cahyo Setyo Wibowo. "Long-term storage stability of incorporated hydrotreated vegetable oil (HVO) in biodiesel-diesel blends at highland and coastal areas." *Fuel Communications* 18 (2024) 100107. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2024.100107>
- [3] Juciana Clarice Cazarolli, Thais Livramento Silva, Mariane Rodrigues Lobato, Jhonata Rodrigues de Brito, Pabulo Henrique Rampelotto, Jo˜ao Victor de Souza Rocha, Aline Oliboni de Azambuja, Michelle Bertoni Mann, Marco Flores Ferrˆao, Maria do Carmo Ruaro Peralba, Mˆarcia Martinelli, Ana Paula Guedes Frazzon a, Jeverson Frazzon, Patrˆicia Dorr de Quadros, Flˆavio Anastˆacio de Oliveira Camargo, Fˆatima Menezes Bento. "Impact of water content on microbial growth in Brazilian biodiesel during simulated storage." *Fuel* 297 (2021) 120761. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120761>
- [4] Leily Nurul Komariah, Susila Arita, Muhammad Rendana, Cindi Ramayanti, Ni Luh Suriani, Desi Erisna. "Microbial contamination of diesel-biodiesel blends in storage tank; an analysis of colony morphology." *Heliyon* 8 (2022) e09264. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09264>
- [5] M. P. Vicentim, M. V. B. Sousa, V. F. Silva, V. L. Mateus, J. M. Rodrigues, and V. S da Cunha., "Water content determination in biodiesel: Optimization of methodology in coulometric Karl Fischer titration," *J. ASTM Int.*, vol. 7, no. 2, 2010, Art. no. 102615, <http://doi.org/10.1520/JAI102615>.
- [6] Roman M. Balabin and Ravilya Z. Safieva, "Near-Infrared (NIR) Spectroscopy for Biodiesel Analysis: Fractional Composition, Iodine Value, and Cold Filter Plugging Point from One Vibrational Spectrum", *Energy & Fuels*, Vol 25, Issue 5, 2011.
- [7] M. Demori, V. Ferrari, and D. Strazza, "A sensor system for oil fraction estimation in a two phases oil-water flow," *Procedia Chem.* Vol. 1, issue 1, pp. 1247-1250, September 2009, <https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.311>.

- [8] Sagarika PAL, Rasmiprava BARIK. "Design, Development and Testing of a Semi Cylindrical Capacitive Sensor for Liquid Level Measurement." *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 116, Issue 5, May 2010, pp. 13-20.
- [9] K. Mochizuki, T. Masuda, and K. Watanabe, "An interface circuit for high accuracy signal processing of differential-capacitance transducers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vo. 47, no. 4, pp. 823-827, August 1998.
- [10] O. Kanoun, A.Y. Kallel, and A. Fendri, "Measurement Methods for Capacitances in The Range of 1 pF – 1 nF: A Review," *Measurement*, vol.195, pp. 111067, May 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111067.
- [11] A. N. Cleland, D. Esteve, C. Urbina, and M. H. Devoret, "Very low noise photodetector based on the single electron transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, issue 23, pp. 2820–2822, December 1992, doi: 10.1063/1.108048.
- [12] Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi, and M. Tabe, "Detection of field-induced single-acceptor ionization in Si by single-hole-tunneling transistor", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, issue 4, 042103, July 2007, doi: 10.1063/1.2762278.
- [13] Muhammad Zubair, and Tong Boon Tang. "A High Resolution Capacitive Sensing System for the Measurement of Water Content in Crude Oil." *Sensors* **2014**, 14, 11351-11361; doi:10.3390/s140711351
- [14] Cheng-Ta Chiang, and Yu-Chung Huang. "A Semicylindrical Capacitive Sensor With Interface Circuit Used for Flow Rate Measurement." *IEEE Sensors Journal*, VOL. 6, NO. 6, DECEMBER 2006
- [15] H. Sumartono, M. A. Huda, F. T. K. Berkah, A. Widodo, N. Suryana, A. Muhamed, I. M. Isa, S.A. Bakar, and R. Nuryadi, "Improved Low Concentration Water Content Detection in Biodiesel utilizing Phase Shift-Based Capacitive Method," *IEEE Sensors J.*, vol. 24, no. 24, pp. 41981–41988, Dec. 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3483290.
- [16] Nacep Suryana, Fatih Dzulfikar, Hari Sumartono, Mahfudz Al Huda, Vivi Purwandari, Lia Aprilia, Brian Yulianto, Ratno Nuryadi, "Highly Sensitive Detection of Pb²⁺ in Water Using Phase Shift-Based Capacitive Sensor Immobilized With Graphene Oxide," *IEEE Sensors J.*, vol. 25, no. 11, pp. 20593 - 20601, 1 June 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3559586.
- [17] R. F. Wolffenbuttel, P. P. L. Regtien, "Capacitance-to-Phase Angle Conversion for the Detection of Extremely Small Capacities," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-36, issue 4, pp. 868-872, December 1987, <https://doi.org/10.1109/TIM.1987.6312572>.
- [18] N. Suryana, M. A. Huda, O. Choirunnisa, A. E. Mulyono, R. D. Samanhudi, K. F. A. Sukra, F. Dzulfikar, B. Yulianto, and R. Nuryadi, "Optimization of Phase Shift Based Capacitive Sensor for Water Content Detection in Biodiesel," *IEEE Sensors J.*, Vol. 22, issue 16, pp. 16131-16140, August 2022, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3188039>.
- [19] F. Dzulfikar, N. Suryana, M. A. Huda, H. Daulay, and R. Nuryadi, "180-Degree phase different sinusoidal signal generator using direct digital synthesizer and coupled op-amps," *AIP Conf. Proc.*, Vol. 2501, issue 1, 030004, August 2022, <http://dx.doi.org/10.1063/5.0095522>.