JIPFRI
https://journal.unuha.ac.id/index.php/JIPFRI

JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)
Vol. 10 No. 2, November 2026, hlm. 296–304
p-ISSN 2549-905X | e-ISSN 2549-9076
https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5173

Analisis Interdigital Capacitance Sensor Model Interdigitated Electrode untuk Membedakan Kualitas Minyak Goreng Berdasarkan Kapasitansi

Dewi Lestari[1*], Azzahra Gifiana Masgiyono[2], Rayysa Tiara Aryantari[2], dan Virda Amelia Putri[2]

[1]Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains, Teknik dan Desain, Universitas Trilogi, Jakarta Selatan, Indonesia
[2]Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Tangerang Selatan, Indonesia
[*]Penulis korespondensi: dewy24@trilogi.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima: 06/02/2026
Direvisi: 13/06/2026
Disetujui: 24/11/2026
Terbit: 29/11/2026

Kata kunci:
IDCS
kapasitansi
minyak goreng
minyak jelantah
permitivitas dielektrik
sensor interdigital

Keywords:
capacitance
cooking oil
dielectric permittivity
IDCS
interdigital sensor
waste cooking oil

ABSTRAK

Minyak goreng yang dipakai berulang kali mengalami penurunan mutu akibat oksidasi dan degradasi panas, yang mengubah karakteristik dielektriknya sehingga dapat dikenali melalui pengukuran kapasitansi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja Interdigital Capacitance Sensor (IDCS) model Interdigitated Electrode (IDE) dalam membedakan tingkat pemakaian minyak goreng berdasarkan nilai kapasitansi. Kapasitansi minyak goreng baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah diukur menggunakan sensor interdigital yang terhubung dengan LCR meter, masing-masing sepuluh kali pengulangan. Kapasitansi rata-rata minyak baru 2,14 pF, minyak 1x goreng 2,52 pF, dan minyak jelantah 4,24 pF. Uji ANOVA satu arah menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan antar kelompok ($p < 0,001$). Uji lanjut Tukey HSD menunjukkan minyak jelantah berbeda signifikan dari minyak baru dan minyak 1x goreng, sedangkan minyak baru dan minyak 1x goreng belum berbeda signifikan. Perubahan kapasitansi diduga terkait perubahan karakteristik dielektrik akibat pemanasan berulang. Sensor IDCS berpotensi sebagai teknik non-destruktif untuk membedakan minyak jelantah dari minyak baru dan minyak 1x goreng, tetapi hubungan kapasitansi dengan degradasi kimia masih memerlukan validasi uji kimia.

ABSTRACT

Cooking oil that is used repeatedly deteriorates through oxidation and thermal degradation, which alters its dielectric characteristics and can be detected through capacitance measurements. This study aimed to analyze the performance of an Interdigital Capacitance Sensor (IDCS) with an Interdigitated Electrode (IDE) model in distinguishing the usage level of cooking oil based on capacitance values. The capacitance of fresh oil, once-fried oil, and waste cooking oil was measured with an interdigital sensor connected to an LCR meter, with ten repetitions per sample. The mean capacitance was 2.14 pF for fresh oil, 2.52 pF for once-fried oil, and 4.24 pF for waste cooking oil. One-way ANOVA showed a significant difference in mean capacitance among the groups ($p < 0.001$). Tukey HSD post hoc tests showed that waste cooking oil differed significantly from fresh and once-fried oil, whereas fresh and once-fried oil did not differ significantly. The change in capacitance is presumed to be related to changes in dielectric characteristics caused by repeated heating. The IDCS sensor has potential as a non-destructive technique for distinguishing waste cooking oil from fresh and once-fried oil, but the relationship between capacitance and chemical degradation still requires validation with chemical tests.

Cara mengutip: Lestari, D., Masgiyono, A. G., Aryantari, R. T., & Putri, V. A. (2026). Analisis interdigital capacitance sensor model interdigitated electrode untuk membedakan kualitas minyak goreng berdasarkan kapasitansi. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), 10*(2), 296–304. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5173
Copyright © 2026 Penulis. Artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya kesadaran akan keamanan pangan serta evaluasi kualitas dan masa pakai minyak goreng menjadi suatu hal yang harus diperhatikan. Untuk mengetahui kualitas tersebut dilakukan pengukuran nilai kapasitansi pada variasi minyak goreng, melalui alat Interdigital Capacitance Sensor (IDCS). Interdigital Capacitance Sensor (IDCS) merupakan sensor dengan elektroda koplanar yang tersusun secara periodik berbasis non-destructive (NDT). Non-destructive testing (NDT) adalah serangkaian metode evaluasi yang digunakan untuk menguji properti, kondisi atau kualitas suatu material, komponen atau sistem tanpa menyebabkan kerusakan material tersebut (Sheldon & Bowler, 2014).

Menurut prinsip fisika, kemampuan sensor interdigital dalam mengidentifikasi perubahan kualitas minyak goreng didasarkan pada hubungan

antara geometri elektroda dan karakteristik dielektrik lingkungan sekitarnya (Fendri dkk., 2019; Dimitrov dkk., 2020). Struktur multisensor interdigital telah dikembangkan (Maurya & Parasuraman, 2025). Studi mengenai desain dan analisis struktur interdigital juga telah dilakukan pada perangkat mikro-superkapasitor (Anagha dkk., 2023). Struktur ini juga dimanfaatkan pada sensor tekanan yang dapat dikenakan (wearable) (Truong dkk., 2022). Karakteristik kapasitansi juga dipengaruhi oleh struktur elektroda dan integrasinya dengan material sekitarnya (Kaewcharoen dkk., 2025). Struktur interdigital juga dipakai pada penyimpan energi (Xie dkk., 2024). Kapasitansi yang terukur pada sensor mengikuti persamaan utama yang diuraikan pada bagian Metode (Persamaan 1).

Dalam konteks sensor koplanar interdigital, elemen geometris elektroda seperti jumlah, panjang, lebar (ω), dan jarak antar-jari elektroda (s) memengaruhi luas penampang efektif (A) serta jarak medan listrik (d) yang terbentuk di permukaan sensor. Saat minyak goreng dicelupkan pada sensor, minyak itu berfungsi sebagai medium dielektrik dengan nilai permitivitas relatif (ε_r). Pemanasan berulang dalam proses menggoreng akan memodifikasi struktur molekul minyak, yang secara langsung memengaruhi nilai permitivitas dielektriknya. Perubahan karakteristik listrik dari medium ini mengubah distribusi kerapatan medan listrik di antara elektroda.

Sensor Interdigital Capacitor (IDC) dengan konfigurasi Interdigitated Electrode (IDE) merupakan sensor kapasitif yang bekerja berdasarkan prinsip medan listrik fringing (*fringing electric field*) yang terbentuk antara elektroda-elektroda sejajar. Perubahan sifat material yang berada di sekitar elektroda akan memengaruhi nilai kapasitas sensor, sehingga IDC dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik berbagai jenis material. Penambahan elektroda dapat meningkatkan sensitivitas sensor terhadap perubahan permitivitas material yang diuji. Optimasi geometri elektroda interdigital juga berpengaruh terhadap karakteristik dan sensitivitas sensor kapasitif (Huang dkk., 2017). Struktur kapasitor interdigital planar juga telah dikaji untuk pengukuran tekanan (Kasemsin & Boonkirdram, 2024). Selain itu Zhou dkk. (2025) mengembangkan sensor berbasis interdigital kapasitor untuk pengukuran sifat dielektrik material padat, sedangkan Mohammadi dkk. (2022) memanfaatkan struktur interdigital kapasitor untuk pengukuran permitivitas secara diferensial. Berbagai penelitian juga menunjukkan pemanfaatan sensor interdigital dalam pengukuran larutan gula (Angkawisittpan & Manasri, 2012), kelembapan (Dimitrov dkk., 2020), pengukuran tinggi permukaan air (Chetpattananondh dkk., 2014), pemantauan kondisi kabel (Wang dkk., 2022) serta jenis bahan bakar (Hakim dkk., 2025). Pada minyak goreng, Peng dkk. (2013) merancang sistem pendeteksi parameter listrik minyak makan berbasis sensor interdigital, Khaled dkk. (2015) merancang probe kapasitif berelektroda interdigital untuk menilai degradasi minyak goreng, Liu dkk. (2019) menggunakan kapasitansi elektroda interdigital untuk menilai degradasi minyak goreng, Fendri dkk. (2019) mengembangkan sistem ukur untuk sensor kapasitif dengan rugi dielektrik pada minyak makan, dan Thao dkk. (2024) memakai sensor kapasitif mikroelektroda interdigital untuk menilai mutu minyak goreng yang digunakan berulang. Studi terdahulu oleh Rachmanita dan Ahmadi (2019) telah menggunakan sensor IDC yang berbasis Arduino Uno untuk menganalisis karakteristik crude oil berdasarkan perubahan nilai kapasitansi. Namun, penelitian itu ditujukan pada sampel minyak mentah dengan sifat dielektrik yang berbeda dibandingkan minyak goreng. Studi pada minyak goreng di atas menggunakan konfigurasi sensor dan perangkat ukur yang berbeda dari penelitian ini (misalnya rangkaian ukur khusus atau mikroprosesor pada Fendri dkk., 2019 dan Liu dkk., 2019), dan sepanjang pengetahuan penulis belum ada yang membandingkan secara statistik kapasitansi minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah menggunakan sensor IDCS model IDE 10 elektroda dengan LCR meter. Sebagai hasilnya, studi ini mengembangkan penggunaan sensor IDC untuk menilai kualitas minyak goreng dengan mengategorikan beberapa tingkat pemakaian minyak, yakni minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah. Selain berbeda dalam jenis material yang diuji, studi ini juga fokus pada kemampuan sensor untuk mendeteksi perubahan kualitas minyak goreng melalui variasi nilai kapasitansi yang terkait dengan perubahan sifat dielektrik akibat pemanasan dan penggunaan yang berulang. Dengan demikian, penelitian ini memperluas penggunaan sensor IDC dari pengukuran minyak mentah menjadi penilaian

kualitas minyak goreng sebagai indikator kelayakan pemakaian minyak.

Penelitian ini dilakukan untuk menjembatani celah tersebut dengan memusatkan pada penerapan sensor IDCS model IDE 10 elektroda pada bahan pangan, yaitu minyak goreng, untuk membedakan kualitasnya berdasarkan variasi penggunaan (minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah). Ada tiga aspek utama yang membedakan studi ini dari penelitian sensor minyak goreng sebelumnya (Liu dkk., 2019; Thao dkk., 2024). Pertama, pengaturan geometri sensor dioptimalkan dengan memanfaatkan 10 elektroda koplanar agar dapat mendeteksi perubahan kapasitansi mikro yang sangat kecil akibat adanya degradasi termal minyak. Kedua, sistem pengukuran tidak lagi memakai mikrokontroler konvensional, tetapi dihubungkan dengan instrumen LCR meter berkinerja tinggi untuk memantau respons kapasitansi pada rentang frekuensi tertentu secara lebih stabil dan tepat. Ketiga, penelitian ini menggunakan parameter validasi statistik yang lebih luas dengan menghitung nilai rata-rata dan deviasi standar dari sepuluh kali pengulangan pengukuran pada setiap sampel. Metode ini menjamin keandalan dan keselarasan data yang dihasilkan, sehingga sensor IDCS ini tidak hanya dapat mendeteksi variasi nilai kapasitansi, tetapi juga berpotensi menjadi cara non-destruktif untuk membedakan kondisi pemakaian minyak goreng.

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja *Interdigital Capacitance Sensor* (IDCS) dalam mendeteksi perubahan sifat dielektrik pada minyak goreng dengan tingkat pemakaian berbeda. Sensor IDCS yang digunakan dirancang menggunakan dua elektroda berbentuk jari yang saling berseling dan dicetak pada substrat kaca menggunakan bahan konduktor tembaga (Cu) seperti pada Gambar 1. Sensor memiliki panjang elektroda sebesar 11,25 mm dengan jarak antar elektroda sebesar 1,058 mm dan luas aktif sekitar 363,75 mm^2. Struktur elektroda dirancang untuk menghasilkan distribusi medan listrik yang sensitif terhadap perubahan konstanta dielektrik sampel minyak goreng. Prinsip kerja sensor didasarkan pada perubahan nilai kapasitansi akibat variasi konstanta dielektrik relatif (ε_r) minyak goreng yang memengaruhi medan listrik di antar elektroda. Fabrikasi sensor dilakukan menggunakan metode *printed circuit board (PCB) etching* untuk menghasilkan pola elektroda yang presisi dan seragam sehingga mampu meningkatkan sensitivitas sensor terhadap perubahan sifat dielektrik sampel. Lebar jari elektroda 32,33 mm, jumlah pasang jari 7 pasang, dan tebal substrat kaca 1,6 mm.



Gambar 1. Desain interdigital capacitance sensor (IDCS) model IDE

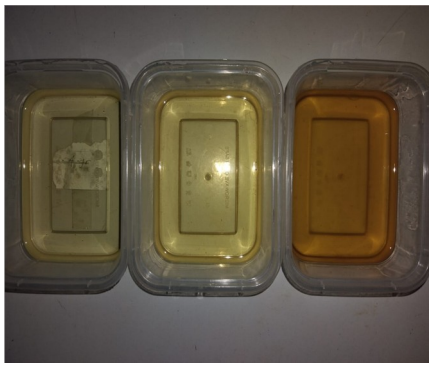
Jarak antar elektroda 1,058 mm serta panjangnya 11,25 mm sedemikian rupa untuk memperoleh sensitivitas yang optimal terhadap perubahan permitivitas minyak goreng. Secara matematis, kapasitansi sensor berbanding lurus dengan permitivitas bahan, yang dinyatakan melalui persamaan:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

dengan C adalah kapasitansi, ε_0 merupakan permitivitas vakum, ε_r adalah konstanta dielektrik relatif bahan, A adalah luas efektif elektroda, dan d adalah jarak antar elektroda. Perubahan kualitas minyak goreng akibat pemakaian berulang menyebabkan perubahan nilai konstanta dielektrik, sehingga nilai kapasitansi sensor juga berubah. Semakin tinggi konstanta dielektrik minyak, maka semakin besar nilai kapasitansi yang terukur pada sensor IDCS.

Persamaan (1) merupakan bentuk dasar kapasitor pelat sejajar. Pada sensor interdigital, elektrodanya koplanar sehingga garis medan listrik berbentuk lengkung fringing yang menembus medium di atas substrat, bukan medan seragam di antara dua pelat. Karena itu A dan d pada Persamaan (1) diperlakukan sebagai luas dan jarak efektif, dan persamaan ini dipakai sebagai pendekatan orde pertama untuk menjelaskan arah perubahan kapasitansi terhadap konstanta dielektrik. Perhitungan kuantitatif yang lebih tepat untuk geometri IDE memerlukan model yang sesuai, misalnya pemetaan konformal dengan integral eliptik yang juga memperhitungkan permitivitas substrat

(Fendri dkk., 2019). Konstanta dielektrik relatif minyak makan umumnya berkisar sekitar 2–4 (Liu dkk., 2019), dengan nilai terukur sekitar 3,0–3,25 pada beberapa jenis minyak (Fendri dkk., 2019). Penelitian ini membandingkan kapasitansi antar kelompok minyak sehingga tidak mengonversinya menjadi nilai konstanta dielektrik absolut.



Gambar 2. Minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga kelompok sampel minyak goreng: (1) minyak baru (belum pernah digunakan), (2) minyak 1x goreng (penggunaan satu kali penggorengan), dan (3) minyak jelantah (minyak goreng bekas pemakaian berulang hingga lima kali penggorengan), seperti pada Gambar 2. Minyak yang digunakan adalah minyak goreng merek Bimoli, dengan bahan yang digoreng berupa tahu goreng, pada suhu penggorengan 170 °C selama 6 menit per siklus. Untuk menjaga kebersihan sensor dan mencegah kontaminasi silang antar sampel, sensor dibersihkan secara teliti setiap kali pergantian pengukuran. Alat yang digunakan terdiri atas LCR meter untuk mengukur nilai kapasitansi, multimeter digital untuk memastikan konektivitas sensor, serta komputer atau laptop untuk pencatatan dan analisis data, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Alat dan bahan pengukuran IDCS

Pertama, sensor IDCS dibersihkan menggunakan akuades kemudian dikeringkan menggunakan kain bebas serat untuk menghilangkan sisa cairan pada permukaan elektroda. Selanjutnya, sampel minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah disiapkan masing-masing sebanyak 50 mL dalam wadah terpisah. Sebelum pengukuran dilakukan, seluruh sampel didiamkan pada suhu ruang $(\pm 27\ ^\circ\mathrm{C})$ selama kurang lebih 30 menit setelah proses penggorengan agar suhu sampel stabil. Sensor kemudian dicelupkan ke dalam sampel dengan kedalaman sekitar 2 cm hingga seluruh area aktif elektroda terendam seperti pada Gambar 4.

Pengukuran nilai kapasitansi dilakukan menggunakan *LCR meter* pada setiap sampel secara berurutan dari minyak baru hingga minyak dengan tingkat pemakaian tertinggi untuk meminimalkan kontaminasi silang. Setelah setiap pengukuran, sensor dibersihkan kembali menggunakan akuades dan dikeringkan sebelum digunakan pada sampel berikutnya. Data hasil pengukuran kemudian dicatat dan dianalisis untuk mengetahui pengaruh tingkat pemakaian minyak terhadap perubahan nilai kapasitansi sensor IDCS.

Pengukuran nilai kapasitansi dilakukan menggunakan *LCR meter* pada rentang frekuensi 2 kHz hingga 200 kHz. Sebelum pengukuran dilakukan, alat terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan metode *open-short* untuk mengurangi pengaruh kapasitansi parasit dan kesalahan pengukuran. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak sepuluh kali pengulangan untuk meningkatkan keandalan data dan mengurangi kemungkinan kesalahan eksperimen. Data hasil pengukuran kemudian disimpan untuk dianalisis secara kuantitatif. Nilai pada Tabel 2 diperoleh pada frekuensi 20 kHz. Suhu sampel tidak diukur secara langsung selama pengukuran sehingga dianggap setara suhu ruang kurang lebih 27 °C.



Gambar 4. Sistem pengukuran kapasitansi minyak goreng

Data kapasitansi dari setiap sampel minyak goreng dianalisis untuk mengetahui hubungan antara nilai kapasitansi dengan tingkat pemakaian minyak. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata, standar deviasi, serta koefisien variasi (CV) untuk menilai kestabilan hasil ukur. Nilai rata-rata kapasitansi dihitung dari sepuluh kali pengukuran pada setiap jenis sampel untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif.

$$\overline{C} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n} \quad (2)$$

Standar deviasi (s) digunakan untuk mengetahui tingkat kestabilan hasil pengukuran, dengan n jumlah pengulangan dan C_i nilai kapasitansi pada pengulangan ke-i.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(C_i - \overline{C}\right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Untuk menguji perbedaan rata-rata kapasitansi antar tiga kelompok sampel (minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah) digunakan uji ANOVA satu arah dengan uji lanjut Tukey HSD pada taraf signifikansi 0,05, yang didahului uji normalitas Shapiro–Wilk dan uji homogenitas varians Levene. Uji Kruskal–Wallis digunakan sebagai uji pendukung apabila asumsi normalitas tidak terpenuhi.

Analisis karakteristik listrik sensor dilakukan dengan mengamati perubahan nilai kapasitansi rata-rata langsung terhadap tingkat pemakaian minyak. Berdasarkan data eksperimen, nilai kapasitansi rata-rata yang dihasilkan dari sepuluh kali pengulangan digunakan untuk melihat tren perubahan sifat dielektrik minyak secara kualitatif akibat degradasi selama pemakaian.

Hasil pengukuran dibandingkan antara minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah. Parameter yang dianalisis meliputi perubahan kapasitansi dan kestabilan respons. Pengukuran dilakukan pada rentang frekuensi 2 kHz hingga 200 kHz sebagai kondisi operasi untuk menghasilkan nilai kedua parameter tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pengukuran nilai kapasitansi pada akuades

Pengukuran ini dilakukan dengan memasukkan IDCS ke dalam akuades untuk mengukur nilai konsistensi atau kestabilan dari desain Interdigital sensor kapasitansi model IDE.

Tabel 1. Nilai kapasitansi pada akuades

Pengukuran ke-	IDCS (10 elektroda) (pF)
1	143
2	143
3	144
4	140
5	148
6	146
7	151
8	150
9	154
10	148

Berdasarkan Tabel 1, hasil pengukuran kapasitansi menunjukkan nilai rata-rata dari 10 kali pengulangan adalah 146,7 pF dengan standar deviasi 4,296 pF. Berdasarkan data tersebut, tingkat presisi pengukuran IDCS dinyatakan dalam koefisien variasi (coefficient of variation, CV) sebagai berikut:

$$CV = \frac{SD}{\overline{x}} \times 100\,\% = \frac{4{,}296}{146{,}7} \times 100\,\% \approx 2{,}93\,\% \quad (4)$$

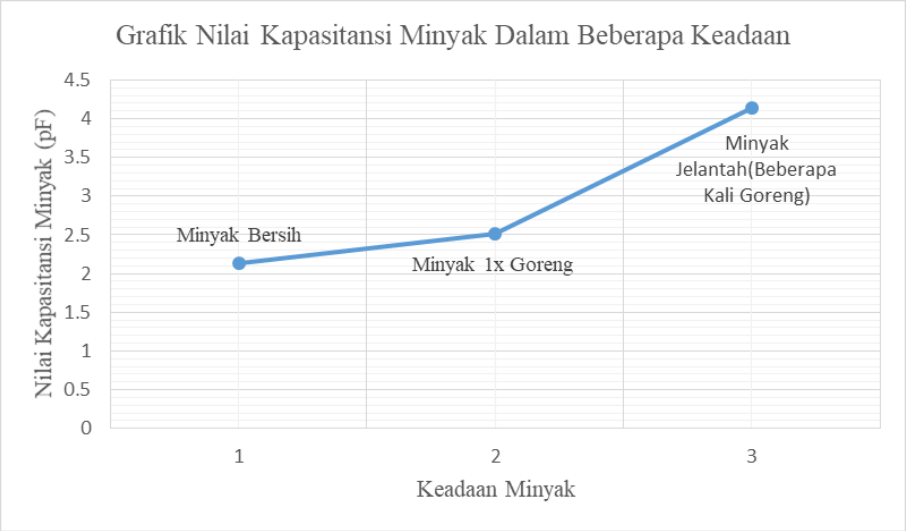
Pengukuran nilai kapasitansi pada minyak

Pengukuran nilai kapasitansi minyak telah dilakukan pada tiga kondisi sampel minyak yang berbeda, yaitu minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah. Masing-masing kondisi diukur sebanyak 10 kali pengulangan. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran kapasitansi IDCS pada tiga jenis minyak

No	Minyak baru (pF)	Minyak 1x goreng (pF)	Minyak jelantah (pF)
1	1,4	5,2	6,0
2	2,4	3,7	4,2
3	2,7	1,8	4,0
4	3,2	2,9	4,8
5	3,5	1,8	4,9
6	2,6	1,4	2,8
7	1,6	2,0	2,6
8	1,3	1,8	4,0
9	1,5	2,2	5,8
10	1,2	2,4	3,3

Berdasarkan hasil pengukuran, nilai kapasitansi mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya tingkat pemakaian minyak. Minyak baru memiliki rata-rata kapasitansi sebesar 2,14 pF dengan standar deviasi 0,84 pF. Pada minyak 1x goreng, rata-rata kapasitansi meningkat menjadi 2,52 pF dengan standar deviasi 1,15 pF. Sementara itu, minyak jelantah menunjukkan rata-rata kapasitansi tertinggi, yaitu 4,24 pF disertai standar deviasi 1,16 pF. Kenaikan rata-rata kapasitansi, terutama pada minyak jelantah, mencerminkan perubahan sifat dielektrik minyak akibat pemakaian berulang. Standar deviasi ketiga kelompok relatif sebanding (0,84–1,16 pF), sehingga sebaran data antar kelompok tidak berbeda jauh. Namun, koefisien variasi pada sampel minyak (27–46%) jauh lebih besar daripada pada akuades (2,9%), sehingga konsistensi pengukuran pada sampel minyak perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Hubungan antara kondisi minyak dengan nilai kapasitansi ditampilkan secara visual pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik rata-rata nilai kapasitansi IDCS pada berbagai kondisi minyak

Untuk menguji apakah perbedaan rata-rata tersebut bermakna secara statistik, dilakukan uji ANOVA satu arah terhadap ketiga kelompok (n = 10 per kelompok). Hasilnya menunjukkan perbedaan rata-rata kapasitansi yang signifikan antar kelompok ($F(2,27) = 11,13$; $p < 0,001$). Uji lanjut Tukey HSD menunjukkan bahwa minyak jelantah berbeda signifikan dari minyak baru (selisih rata-rata 2,10 pF; $p < 0,001$) dan dari minyak 1x goreng (selisih 1,72 pF; $p = 0,003$), sedangkan perbedaan antara minyak baru dan minyak 1x goreng (0,38 pF) tidak signifikan ($p = 0,705$). Asumsi homogenitas varians terpenuhi (uji Levene, $p = 0,856$), tetapi data kelompok minyak 1x goreng menyimpang dari normalitas (uji Shapiro–Wilk, $p = 0,024$); sebagai uji pendukung, uji Kruskal–Wallis memberikan kesimpulan yang sama ($H = 13,09$; $p = 0,001$). Dengan demikian, kenaikan kapasitansi pada minyak 1x goreng belum dapat dibedakan secara statistik dari minyak baru, sedangkan minyak jelantah dapat dibedakan dari kedua kelompok lainnya.

Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian sensor IDCS terhadap tiga kategori minyak (minyak baru, minyak 1x goreng, dan minyak jelantah), ditemukan bahwa nilai kapasitansi cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya tingkat penggunaan minyak. Minyak baru menunjukkan rata-rata kapasitansi rendah (2,14 pF), diikuti minyak 1x goreng (2,52 pF), dan minyak jelantah tertinggi (4,24 pF). Uji ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perbedaan tersebut signifikan ($p < 0,001$), tetapi perbedaan itu terutama berasal dari minyak jelantah, sedangkan minyak baru dan minyak 1x goreng belum berbeda signifikan. Namun, perlu ditekankan bahwa temuan ini hanya menunjukkan perbedaan nilai kapasitansi antar kondisi minyak, bukan secara langsung menggambarkan kualitas atau tingkat degradasi minyak. Tanpa didukung validasi kimia (seperti total polar compounds, peroxide value, acid value, warna, viskositas atau kadar air; Li dkk., 2016; Zahir dkk., 2017), sensor IDCS belum dapat menyimpulkan bahwa kapasitansi berbanding lurus dengan degradasi minyak. Oleh karena itu, pernyataan lebih

lanjut mengenai hubungan antara kapasitansi dan kerusakan molekul minyak masih memerlukan pembuktian melalui uji kimia pendukung.

Secara fisis, kenaikan kapasitansi pada minyak jelantah dapat dijelaskan oleh perubahan permitivitas relatif medium di atas elektroda. Pemanasan berulang pada suhu tinggi disertai oksigen dan uap air memicu oksidasi, hidrolisis, dan polimerisasi (Liu dkk., 2019; Fendri dkk., 2019), sehingga terbentuk senyawa polar seperti asam lemak bebas, peroksida, dan aldehida. Senyawa polar tersebut meningkatkan kemampuan molekul berpolarisasi terhadap medan listrik sehingga konstanta dielektrik efektif minyak naik; karena kapasitansi sensor berbanding lurus dengan permitivitas medium (Persamaan 1 pada bagian Metode), kapasitansi yang terukur ikut meningkat. Pada minyak 1x goreng, perubahan komposisi tersebut kemungkinan masih kecil sehingga kenaikan kapasitansinya (0,38 pF) belum dapat dibedakan dari variasi pengukuran. Mekanisme ini masih bersifat dugaan karena belum diverifikasi melalui uji kimia pada penelitian ini. Sebagai pembanding, Liu dkk. (2019) melaporkan bahwa kapasitansi elektroda interdigital pada minyak goreng meningkat seiring lamanya penggorengan dan berkorelasi dengan total polar material, dengan kenaikan yang kecil (sekitar 34,08 pF menjadi 34,32 pF pada 25 °C setelah 12 jam penggorengan), sedangkan konstanta dielektrik relatif minyak goreng dilaporkan berada pada kisaran 2–4. Kenaikan relatif pada penelitian ini (2,14 pF menjadi 4,24 pF) jauh lebih besar, yang kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan geometri sensor, rentang frekuensi, sistem ukur, dan kondisi sampel, sehingga perbandingan nilai absolut antar studi perlu dilakukan dengan hati-hati. Arah kenaikan kapasitansi terhadap tingkat pemakaian minyak yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan temuan Fendri dkk. (2019), yang melaporkan bahwa permitivitas relatif minyak makan berada pada kisaran sekitar 3–3,25 dan meningkat seiring lamanya pemanasan setelah penurunan awal akibat penguapan air, seiring bertambahnya senyawa polar. Kenaikan permitivitas ini secara fisis mendukung peningkatan nilai kapasitansi yang terukur pada sensor IDCS.

SIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kinerja sensor IDCS model IDE 10 elektroda untuk membedakan tingkat pemakaian minyak goreng berdasarkan nilai kapasitansi. Rata-rata kapasitansi meningkat dari minyak baru (2,14 pF) ke minyak 1x goreng (2,52 pF) dan minyak jelantah (4,24 pF). Uji ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan antar kelompok ($p < 0,001$), tetapi uji lanjut hanya menunjukkan perbedaan signifikan pada minyak jelantah terhadap dua kelompok lainnya, sedangkan minyak baru dan minyak 1x goreng belum dapat dibedakan secara statistik. Namun, berdasarkan data yang diperoleh pada penelitian ini, nilai kapasitansi belum dapat secara langsung digunakan untuk menentukan kelayakan konsumsi maupun tingkat risiko kesehatan akibat penggunaan minyak tersebut. Diperlukan validasi lebih lanjut melalui pengujian parameter mutu minyak yang telah diakui, seperti total polar compounds (TPC), peroxide value, acid value, viskositas, dan kadar air. Meskipun demikian, sensor IDCS menunjukkan potensi sebagai metode pemantauan perubahan karakteristik minyak goreng secara cepat dan non-destruktif yang dapat mendukung evaluasi kualitas minyak terutama untuk mendeteksi minyak jelantah. Penelitian lanjutan disarankan menguji setiap tingkat pemakaian (1, 3, dan 5 kali penggorengan) sebagai kelompok tersendiri, mengontrol suhu sampel, serta membandingkan kapasitansi dengan hasil uji kimia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami para penulis menyampaikan terima kasih kepada PLT UIN Syarif Hidayatullah Jakarta yang telah memberikan dukungan berupa fasilitas dan kesempatan sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Semua dukungan tersebut sangat membantu dalam penyusunan dan penyelesaian penelitian ini.

PERNYATAAN

Kontribusi Penulis: Dewi Lestari bagian ide dan teori, Azzahra Gifiana Masgiyono bagian kurasi data, Rayysa Tiara Aryantari bagian analisis formal, Virda Amelia Putri bertugas menyesuaikan templat penulisan.

Pendanaan: Pendanaan bersumber dari dana mandiri penulis.

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian maupun publikasi artikel ini.

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial (AI): Penulis menggunakan ChatGPT (OpenAI) dan Claude untuk membantu penyempurnaan bahasa, penyusunan kalimat, dan perbaikan struktur penulisan naskah. Seluruh hasil yang dihasilkan oleh AI telah ditinjau dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas kekurangan data, interpretasi hasil, dan isi akhir naskah.

Persetujuan Etik: Penelitian ini tidak melibatkan partisipan manusia atau hewan sehingga tidak memerlukan persetujuan etik.

Ketersediaan Data: Data tidak dibagikan.

REFERENSI

Anagha, P., Gopan GS, S., & Abraham, N. (2023). Simulation studies on the design and analysis of interdigital and fractal-based micro-supercapacitors. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, *12*(6), Article 061003. https://doi.org/10.1149/2162-8777/acdd99

Angkawisittpan, N., & Manasri, T. (2012). Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor. *Measurement Science Review, 12*(1). https://doi.org/10.2478/v10048-012-0002-0

Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P., & Jindapetch, N. (2014). A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. *Sensors and Actuators A: Physical, 209*, 175–182. https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.040

Dimitrov, K. C., Song, S., Chang, H., Lim, T., Lee, Y., & Kwak, B.-J. (2020). Interdigital capacitor-based passive LC resonant sensor for improved moisture sensing. *Sensors, 20*(21), 6306. https://doi.org/10.3390/s20216306

Fendri, A., Kallel, A. Y., Nouri, H., Ghariani, H., & Kanoun, O. (2019). Measurement system for lossy capacitive sensors: Application to edible oils quality assessment. *Sensors, 19*(19), 4299. https://doi.org/10.3390/s19194299

Hakim, G. P. N., Mansor, M. R. A., & Septiyana, D. (2025). Adaptive neuro fuzzy inference system mathematical model for detecting gasoline type using inter digital capacitance sensor. *Scientific Contributions Oil and Gas, 48*(4), 173–180. https://doi.org/10.29017/scog.v48i4.1862

Huang, Y., Zhan, Z., & Bowler, N. (2017). Optimization of the coplanar interdigital capacitive sensor. *AIP Conference Proceedings, 1806*(1), Article 110017. https://doi.org/10.1063/1.4974695

Kaewcharoen, A., Arpanutud, K., Akkaraekthalin, P., Sittimart, P., & Chalermwisutkul, S. (2025). Capacitance Characteristics of Glass-Embedded Interdigitated Capacitors for Touch Sensing Applications. *Sensors*, *25*(22), Article 6941. https://doi.org/10.3390/s25226941

Kasemsin, W., & Boonkirdram, S. (2024). Design of a planar interdigital capacitor for pressure measurement. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 64–72. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003400

Khaled, A. Y., Aziz, S. A., & Rokhani, F. Z. (2015). Capacitive sensor probe to assess frying oil degradation. *Information Processing in Agriculture, 2*(2), 142–148. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.002

Li, J., Cai, W., Sun, D., & Liu, Y. (2016). A quick method for determining total polar compounds of frying oils using electric conductivity. *Food Analytical Methods, 9*, 1444–1450. https://doi.org/10.1007/s12161-015-0324-2

Liu, M., Qin, X., Chen, Z., Tang, L., Borom, B., Cao, N., Barnes, D., Cheng, K., Chen, J., Wang, T., & Rao, J. (2019). Frying oil evaluation by a portable sensor based on dielectric constant measurement. *Sensors, 19*(24), 5375. https://doi.org/10.3390/s19245375

Maurya, O. P., & Parasuraman, S. (2025). Interdigital multisensor structures for resistance and capacitance sensing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *74*, 1–10. https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3551004

Mohammadi, P., Mohammadi, A., & Kara, A. (2022). T-junction loaded with interdigital capacitor for differential measurement of permittivity. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *71*, 1–8. https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3200600

Peng, Y., Zhao, L., & Yang, S. (2013). Edible oil electrical parameters detection system design based on interdigital sensor. *Proceedings of the 2013 International Conference on Information Science and Computer Applications (ISCA 2013)*. https://doi.org/10.2991/isca-13.2013.30

Rachmanita, R. E., & Ahmadi, H. (2019). Perancangan sistem pengukuran kapasitansi crude oil menggunakan interdigital capacitors (IDCs) berbasis Arduino Uno. *JIPFRI, 3*(2), 54–61. https://doi.org/10.30599/jipfri.v3i2.471

Sheldon, R. T., & Bowler, N. (2014). An interdigital capacitive sensor for nondestructive evaluation of wire insulation. *IEEE Sensors Journal, 14*(4), 961–970. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2301293

Thao, L. Q., Kien, D. T., Thien, N. D., Bach, N. C., Dung, T. T., & Thuy, L. T. M. (2024). Rapid assessment of degraded frying oil quality using interdigitated microelectrode capacitive sensors. *European Journal of Lipid Science and Technology, 126*(1), Article e2300138. https://doi.org/10.1002/ejlt.202300138

Truong, T., Kim, J. S., Yeun, E., & Kim, J. (2022). Wearable capacitive pressure sensor using interdigitated capacitor printed on fabric. *Fashion and Textiles*, *9*(1), Article 46. https://doi.org/10.1186/s40691-022-00320-w

Wang, X., Al Imran, M. N., Ali, M., & Zhang, B. (2022). Interdigital capacitor sensor-based cable health monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *70*(7), 7301–7309. https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3203764

Xie, Q., Yi, C., Zhang, H., Xia, H., Xu, G., Miao, C., Yang, L., Shui, T., Zhang, W., & Sun, Z. (2024). Stretchable Zn-ion hybrid capacitor with hydrogel encapsulated 3D interdigital structure. *Advanced Energy Materials*, *14*(8), Article 2303592. https://doi.org/10.1002/aenm.202303592

Zahir, E., Saeed, R., Hameed, M. A., & Yousuf, A. (2017). Study of physicochemical properties of edible oil and evaluation of frying oil quality by Fourier Transform-Infrared (FT-IR) spectroscopy. *Arabian Journal of Chemistry, 10*, S3870–S3876. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.025

Zhou, T., Lin, M., Liu, G., & Qi, B. (2025). A microwave sensor based on interdigital capacitors and electrodes for solid dielectric measurement. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, *35*(12), 1921–1924. https://doi.org/10.1109/LMWT.2025.3600430