

ARTIKEL RISET

Pengembangan Sensor Rasa Asin Impedimetrik Menggunakan Interdigitated Electrode Termodifikasi Membran Lipid 1 – *Hexadecanol*

Annisa W.Q. A'yun^{1*}, Haris Suhendar², Diah Ayu Suci Kinasih³ and Kuwat Triyana⁴

Received: June 9, 2023 | Accepted: Jan 27, 2025 | Published: Mar 18, 2025 | DOI: 10.22146/jfi.v29i1.85487

Ringkasan

Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi rasa asin menggunakan sensor impedimetrik berbasis *interdigitated electrode* yang telah dimodifikasi dengan membran lipid 1-*hexadecanol*. Untuk meningkatkan selektivitas sensor rasa asin, dilakukan optimasi konsentrasi total lipid/PVC/*plasticizer* dalam pelarut THF. Larutan yang diuji adalah rasa asin (NaCl), rasa asam (HCl), rasa manis (sukrosa), rasa pahit (*quinine*), dan rasa umami (MSG). Respons impedansi sensor terhadap larutan diukur pada rentang frekuensi 1 Hz - 100 kHz, kemudian dari respons tersebut dilakukan ekstraksi fitur dengan memilih frekuensi yang paling berpengaruh dalam membedakan rasa. Dari ekstraksi fitur diketahui bahwa frekuensi rendah memiliki kontribusi yang signifikan dalam mendiskriminasi rasa, sehingga diambil rentang frekuensi 1 Hz - 108 Hz dengan data impedansi Z real dan Z imajiner untuk dianalisis menggunakan *principal component analysis* (PCA) dan *linear discriminant analysis* (LDA). Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor membran dalam menyeleksi rasa asin. Skor *koefisien siluet* NaCl dari hasil analisis PCA masing-masing sensor dihitung dan dibandingkan untuk mengevaluasi kemampuan selektivitasnya terhadap rasa asin. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi membran lipid terbaik untuk pelapisan sensor adalah 9 w/v%, dengan *koefisien siluet* 0,75 dan akurasi yang diperoleh dari *k-fold cross-validation* menggunakan LDA adalah 100%. Setelah itu, sensor membran lipid yang optimal tersebut digunakan untuk mengukur beberapa variasi konsentrasi larutan NaCl untuk menguji sensitivitasnya, yaitu 0,01 mM - 0,01 M. Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons impedansi menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaCl.

Kata Kunci : sensor rasa, membran lipid, *interdigitated electrode*, impedimetrik.

Abstract

This study proposes a method for evaluating salty taste using an impedimetric sensor based on an interdigitated electrode modified with a 1-hexadecanol lipid membrane. To improve the selectivity of the saltiness sensor, we optimized the total concentration of lipid/PVC/plasticizer in a THF solvent. The impedance response of the sensor was measured in a frequency range of 1 Hz - 100 kHz, then the feature extraction is performed based on frequency that has the greatest influence on the taste classification. From feature extraction, it is found that low frequency has a significant contribution to the taste classification so that the frequency range 1-108 Hz is taken to be analyzed using principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA) to determine the sensor's membrane performance on saltiness selectivity. Then, the silhouette coefficient score was calculated and compared between sensors to evaluate their saltiness selectivity. Our results show that the best lipid membrane concentration for sensor coating is 9 w/v%, with a silhouette coefficient score is 0.75 for PCA and the accuracy obtained from k-fold cross-validation using LDA is 100%. Furthermore, we used the optimized lipid membrane sensor to measure salt solution concentrations in water to test the sensor's sensitivity. Our results demonstrate that the impedance response decreases as the NaCl concentration increases

Keywords: taste sensor; lipid membrane; interdigitated electrode; impedimetric

1 PENDAHULUAN

Rasa asin merupakan salah satu jenis rasa dasar yang sebagian besar dihasilkan oleh senyawa NaCl [1]. NaCl merupakan garam dapur yang sering digunakan dalam industri makanan [2]. Rasa asin yang tinggi pada makanan dapat mengindikasikan kandungan NaCl yang cukup banyak, begitu pula sebaliknya. Mengonsumsi garam secara tidak seimbang dapat membahayakan kesehatan tubuh. Jika berlebihan, dapat menyebabkan tekanan darah tinggi, yang berujung pada serangan jantung dan stroke; jika kekurangan dapat menyebabkan gangguan otot, ginjal, dan saraf. Oleh karena pentingnya kontrol rasa asin pada makanan, maka diperlukan metode evaluasi yang tepat untuk menilai rasa tersebut, salah satunya dengan menggunakan sensor rasa. Sensor rasa adalah perangkat yang mampu mendeteksi cairan zat tunggal maupun campuran kompleks [3][4][5][6]. Sensor rasa dipercaya dapat menentukan rasa dengan cara yang mirip dengan persepsi rasa biologis pada manusia [7][8][9][10]. Zat rasa yang diukur menggunakan sensor rasa merespons kualitas rasa yang berbeda melalui pola sinyal keluaran yang unik [11][12]. Sensor rasa memiliki sifat selektivitas global, yaitu mampu merespons rasa yang sama secara konsisten seperti lidah manusia, sehingga dapat digunakan untuk melakukan evaluasi yang objektif [13][14].

Untuk mengembangkan sensor rasa, beberapa teknik pengukuran zat rasa telah digunakan pada beberapa penelitian sebelumnya, seperti voltametrik [15][16][17][18], potensiometrik [13][19][20][21] (Marx et al., 2017), dan impedimetrik [22][23][24][25][26]. Berdasarkan penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa metode potensiometrik memiliki sensitivitas yang rendah terhadap larutan non-elektrolit seperti sukrosa dan glukosa [22][23][13], sedangkan metode voltametrik menghasilkan spektrum yang rumit dengan interpretasi yang sulit bila digunakan untuk larutan kompleks [27][23]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dipilih teknik impedimetrik karena karena selain memiliki sistem pengoperasian yang sederhana [28], metode tersebut juga memiliki sensitivitas yang cukup tinggi dan batas deteksi yang sangat rendah. Pengukuran impedimetrik menggunakan bahan karbon mesopori sebagai elektroda sensor dilaporkan menghasilkan pengukuran yang sangat sensitif dengan batas deteksi yang sangat rendah yaitu 0,00045 nM. Impedansi secara konvensional dikarakterisasi dengan *electrochemical*

impedance spectroscopy (EIS) menggunakan sinyal eksitasi sinusoidal [29][30]. EIS adalah metode yang efektif untuk menyelidiki sifat antarmuka elektroda yang dimodifikasi dengan mengukur perubahan tahanan transfer elektron pada permukaan elektroda, yang disebabkan oleh adsorpsi dan desorpsi molekul kimia [31]. Dengan menggunakan prinsip impedimetri, larutan elektrolit dan non-elektrolit lemah juga dapat dideteksi dengan lebih baik karena peningkatan resistensi pada permukaan membran akibat adsorpsi bahan kimia ke dalam membran [32].

Modifikasi kimia pada komposisi membran lipid telah dilakukan agar selektif terhadap rasa tertentu. Wu dkk. (2020) melaporkan bahwa beberapa jenis lipid dapat digunakan untuk mendeteksi rasa tertentu, seperti *trioctylmethylammonium chloride* (TOMA) untuk deteksi rasa umami, *tetradodecylammonium bromide* (TDAB) dan *trimellitic acid* untuk deteksi rasa manis, *phosphoric acid di(2-ethylhexyl) ester* (PAEE), *oleic acid* (OA), *trioctylmethylammonium chloride* (TOMA) untuk deteksi rasa asam, *phosphoric acid di-n-decyl ester* (PADE) untuk deteksi rasa pahit, dan *tetradodecylammonium bromide* (TDAB), *1-hexadecanol* untuk deteksi rasa asin [2][21].

Dalam penelitian ini, kami mengembangkan sensor selektif rasa asin menggunakan *interdigitated electrode* (IDE) yang telah dimodifikasi dengan membran lipid *1-hexadecanol*. Membran lipid bertindak sebagai elemen pengenalan, yaitu mengubah informasi rasa yang dihasilkan oleh zat kimia menjadi perubahan impedansi pada pengukuran impedimetri [12][33]. Lipid *1-hexadecanol* memiliki gugus -OH yang akan terionisasi bila dilarutkan dalam pelarut. Atom O akan menghasilkan muatan parsial negatif, sehingga membran lipid cenderung bermuatan negatif. Muatan negatif membran diharapkan dapat berinteraksi secara elektrostatis dengan ion positif yang dihasilkan dari senyawa kimia NaCl. IDE digunakan sebagai elektroda sensor karena dapat mengukur sampel dengan volume kecil [34][35]. Sel elektrokimia IDE telah dirancang khusus untuk penggunaan volume sampel $\leq 10 \mu\text{L}$ sehingga dengan jumlah yang sangat sedikit, sampel sudah dapat diuji (*MicruX Technologies*). Selain itu, konfigurasi interdigitasi pada IDE dapat meningkatkan sensitivitas pengukuran spektroskopi impedansi [34]. Dalam prakteknya, IDE dapat langsung digunakan untuk mengukur senyawa kimia dari lima larutan rasa dasar. Namun kemampuan deteksinya tidak selektif terhadap rasa tertentu, khususnya rasa asin. Oleh karena itu, kami memodifikasi IDE untuk meningkatkan selektivitas rasa asin dengan melapisi membran lipid selektif ion *1-hexadecanol* pada permukaannya. Dalam

*Correspondence: annisa.wachida.q@mail.ugm.ac.id

¹ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Yogyakarta, Indonesia

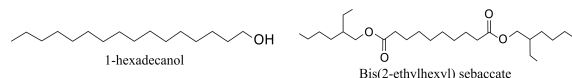
Full list of author information is available at the end of the article

penelitian ini, kami memvariasikan konsentrasi total lipid/PVC/*plasticizer* dalam larutan membran lipid dan mengukur respons impedansi dari rasa asin (NaCl) beserta empat rasa dasar lainnya, yaitu asam (HCl), umami (MSG), manis (sukrosa), dan pahit (*quinine*). Hasil pengukuran impedansi terhadap larutan uji akan diamati dan dianalisa dengan menggunakan metode PCA dan LDA. Diharapkan dengan menggunakan sensor impedimetrik *interdigitated electrode* yang telah dimodifikasi dengan membran lipid *1-hexadecanol* dapat menghasilkan sensor yang selektif terhadap rasa asin.

2 METODE PENELITIAN

2.1. Material

1-hexadecanol sebagai lipid, *bis(2-ethylhexyl) sebacate* (BEHS) sebagai *plasticizer*, *polyvinyl chloride* (PVC) sebagai bahan penguat membran, dan *tetrahydrofuran* (THF) sebagai pelarut. Struktur kimia material lipid ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Struktur kimia lipid (Lu et al., 2017)

2.2. Pembuatan Membran Liquid

Membran lipid terdiri dari tiga komponen utama yaitu lipid, PVC, dan *plasticizer*. Konsentrasi total lipid/PVC/*plasticizer* dalam pelarut THF divariasikan menjadi 3 w/v %, 5 w/v %, 7 w/v %, 9 w/v %, dan 11 w/v %. Sebanyak 0,24 gr lipid dan 8 ml THF digunakan untuk membuat larutan lipid. Setelah itu, 0,31 ml larutan lipid tersebut ditambahkan ke dalam 0,2 gr *plasticizer*, 0,1 gr PVC, dan THF dengan volume tertentu sesuai variasi yang dilakukan. Semua komponen diaduk menggunakan *hot plate stirrer* hingga homogen pada suhu ruang ($\pm 27^{\circ}\text{C}$).

2.3. Pembuatan Larutan Uji

Lima bahan sampel rasa yang diukur untuk mengevaluasi selektivitas sensor, diantaranya yaitu asin (NaCl), asam (HCl), umami (MSG), pahit (*quinine*), dan manis (sukrosa). Semua sampel ditimbang massanya untuk konsentrasi 0,01 M dan diencerkan dengan aquadest hingga volume 100 ml.

2.4. Coating membran lipid pada IDE

Setelah dibersihkan sesuai prosedur dari *MicruX Technologies*, IDE diletakkan di atas cawan petri. Selanjutnya, larutan membran lipid diteteskan pada

sel elektrokimia IDE menggunakan mikropipet sebanyak $\pm 5 \mu\text{L}$ dengan metode *drop casting*. Setelah itu, IDE disimpan dalam wadah tertutup berukuran kecil agar membran yang terbentuk menjadi bening. Membran dikeringkan selama ± 1 hari, kemudian divakum menggunakan gas nitrogen.

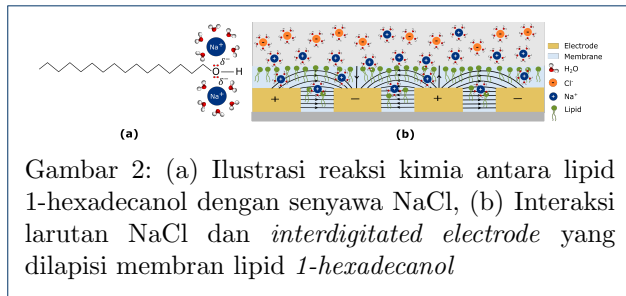
2.5. Prosedur Pengukuran

Sensor rasa terdiri dari IDE emas terlapisi membran lipid *1-hexadecanol* sebagai elektroda sensor dan potensiostat sebagai alat untuk mengukur EIS sampel. Potensial AC yang diaplikasikan 300 mV dengan rentang frekuensi 1 Hz -100 kHz. Volume sampel yang diujikan $\pm 5 \text{ L}$ dengan pengulangan pengukuran sebanyak 5 kali secara berurut. Data impedansi elektrokimia yang dihasilkan terdiri dari impedansi real (Z'), impedansi imajiner (Z''), impedansi mutlak ($|Z|$), dan sudut fasa (π). Semuanya ditampilkan dalam Nyquist plot dan Bode plot. Kemudian data dianalisis menggunakan PCA dan LDA. Fitur yang dipakai adalah yang dapat membedakan sampel paling baik yaitu impedansi real (Z') dan impedansi imajiner (Z'') pada rentang frekuensi 1 Hz -108 Hz. Dalam rentang tersebut ada 21 frekuensi yang dipakai sehingga ada 42 data impedansi yang digunakan untuk analisis PCA dan LDA. Setelah itu, dari hasil analisis PCA dihitung *silhouette coefficient cluster* rasa asin terhadap *cluster* rasa lain untuk mengetahui jarak pisah *cluster* rasa asin dari *cluster* rasa lain. Semakin nilai *silhouette coefficient* mendekati 1, maka semakin baik *cluster* tersebut terpisah dari *cluster* lain. Hal tersebut dilakukan untuk menetapkan konsentrasi optimal membran lipid dalam menyeleksi rasa asin. Kemudian untuk memperoleh akurasi sensor, fitur yang dipakai untuk analisis divalidasi menggunakan *k-fold cross validation* ($k=5$) dengan model *machine learning* LDA.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Lipid *1-hexadecanol* memiliki gugus -OH yang akan terionisasi ketika dilarutkan dalam pelarut. Muatan negatif parsial yang dihasilkan atom O akan berinteraksi secara elektrostatis dengan ion Na^+ karena keduanya memiliki muatan yang berbeda (Gambar 2(a)). Ketika terjadi kontak diantara keduanya, ion positif dari larutan NaCl akan menarik muatan negatif membran lipid sehingga senyawa NaCl dapat dideteksi oleh sensor membran (Gambar 2(b)).

Membran lipid yang dilapiskan diatas permukaan IDE akan membentuk kapasitor dan prinsip pengoperasian sensor tersebut didasarkan pada elektrodinamika dua pelat kapasitor paralel. Untuk menghasilkan medan listrik antar elektroda, potensial AC diaplikasikan pada terminal positif dan negatif.



Garis fluks medan listrik yang dihasilkan dari elektroda positif ke elektroda negatif akan menembus material larutan yang diuji dan menyebabkan perubahan impedansi sensor. Karena sensor berperilaku seperti kapasitor, reaktansi kapasitifnya merupakan fungsi dari material larutan yang diuji sehingga ketika zat rasa bereaksi dengan membran lipid yang berfungsi sebagai bahan dielektrik, maka konstanta dielektrik membran akan berubah dan menyebabkan perubahan reaktansi kapasitif sensor [4][9][36].

Hasil pengujian EIS terhadap larutan uji yang diperoleh dengan menggunakan sensor IDE terlapisi membran lipid ditampilkan dalam Nyquist plot (Gambar 3) berikut ini.

Z' real (Z') dan Z'' imajiner (Z'') masing-masing mewakili resistansi dan reaktansi larutan uji. Resistor dalam rangkaian AC berperilaku sama seperti ketika berada dalam rangkaian DC. Oleh karena itu, nilai impedansi resistor sebanding dengan resistansi resistor dan hanya terdiri dari bagian real sehingga nilai Z' positif. Sedangkan Z'' bernilai negatif karena tegangan kapasitor tertinggal oleh respons arus kapasitor sebesar 90% sehingga reaktansi larutan bersifat kapasitif. Nyquist plot pada Gambar 3 diatas menunjukkan adanya fenomena elektrokimia yang terjadi akibat interaksi membran lipid dengan larutan. Intersep pada frekuensi tinggi sumbu real mewakili impedansi larutan (R_s) dimana resistansi larutan merupakan hambatan yang ada pada masing-masing larutan yang menyebabkan perubahan impedansi bagian real saat berinteraksi dengan sensor membran lipid. Kemudian, wilayah frekuensi tengah yang berbentuk semicircle tidak sempurna berkaitan dengan impedansi dari proses transfer muatan dari larutan-membran lipid (R_{ct}) dan kapasitansi lapisan ganda listrik yang terbentuk pada antarmuka membran lipid-larutan. Lalu, di wilayah frekuensi rendah muncul garis linear dengan kemiringan sebesar $\pm 45^\circ$ menunjukkan adanya impedansi Warburg yang merupakan hasil dari proses difusi pada antarmuka membran lipid-larutan. Impedansi Warburg tersebut bergantung pada frekuensi gangguan potensial. Pada

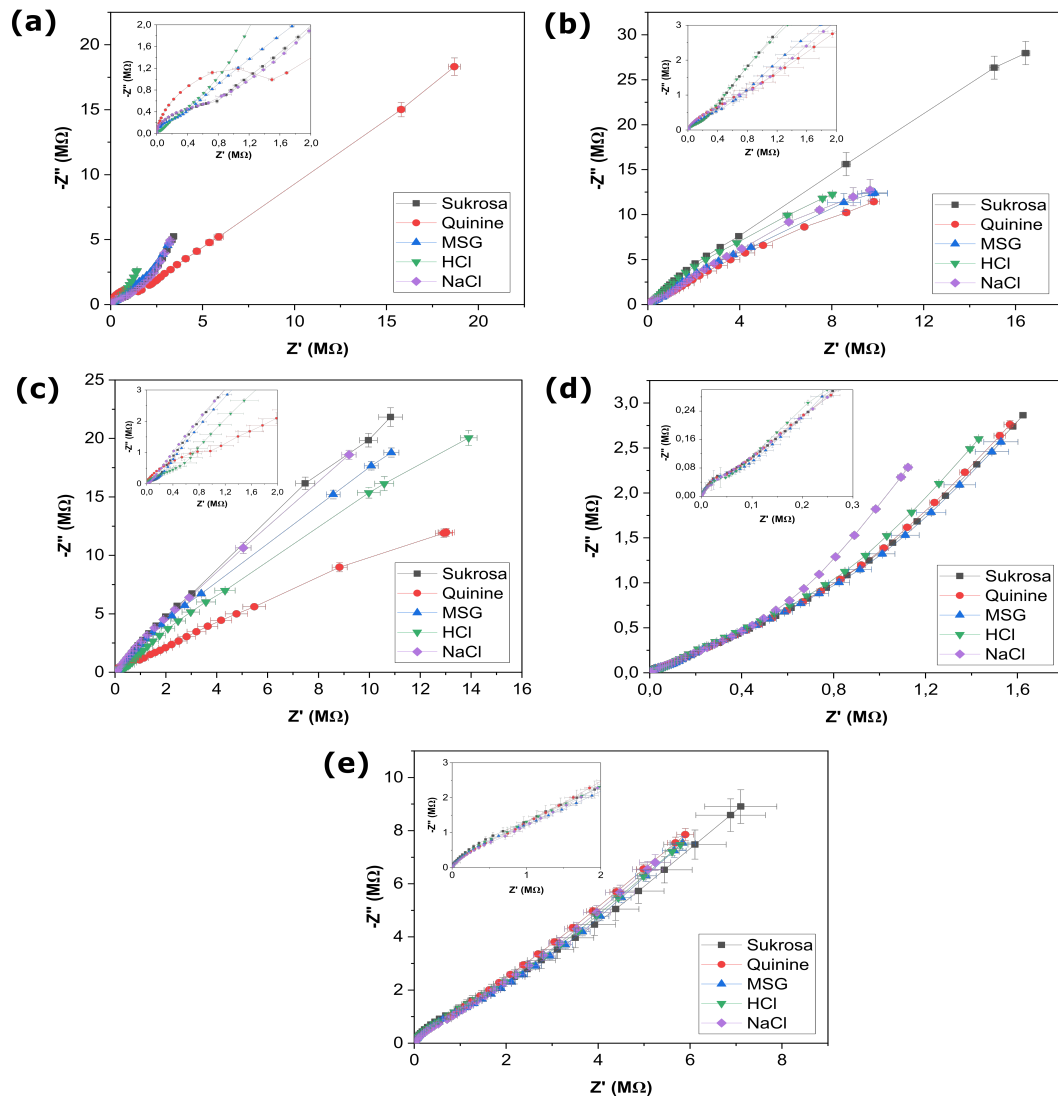
frekuensi tinggi, nilai impedansi Warburg kecil karena difusi reaktan tidak bergerak terlalu jauh, sedangkan pada frekuensi rendah reaktan berdifusi lebih jauh sehingga impedansi Warburg meningkat. Respons impedansi lainnya dari pengujian EIS direpresentasikan dalam Bode plot Gambar 4 berikut ini

Hasil impedansi mutlak yang diperoleh dari pengukuran EIS menggunakan IDE merupakan kombinasi sifat resistif dan kapasitif dari material larutan yang di deteksi [37]. Pada frekuensi tinggi, sifat resistif mendominasi dan kapasitansi kapasitif bernilai nol karena efek interaksi lapisan ganda antara ion larutan dengan muatan pada permukaan elektroda tidak teramati. Oleh karena itu impedansi yang berkontribusi hanya impedansi larutan (R_s). Sedangkan pada frekuensi rendah, sifat kapasitif yang mendominasi sehingga impedansi yang terlibat tidak hanya impedansi larutan (R_s) namun juga impedansi transfer muatan (R_{ct}). Oleh karena itu, impedansi mutlak pada frekuensi tersebut bernilai sangat besar karena impedansi akibat interaksi ion larutan dengan muatan pada permukaan elektroda (R_{ct}) juga berkontribusi terhadap pengukuran respons impedansi.

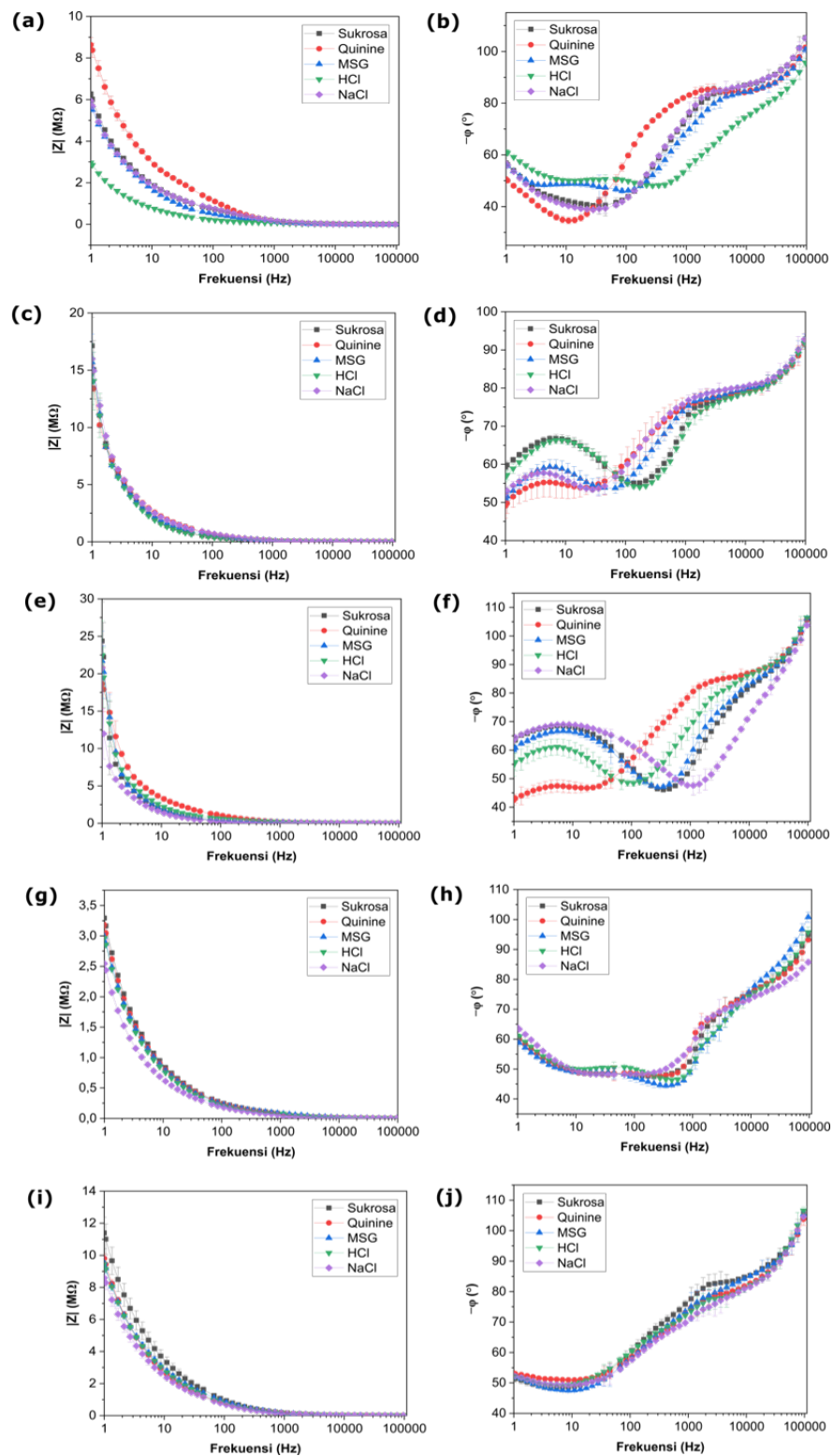
Berdasarkan grafik frekuensi vs Z' mutlak (Gambar 4(a,c,e,g,i)) terlihat bahwa spektrum membran lipid 3 w/v % dan 5 w/v % belum memperlihatkan profil yang unik, kemudian pada membran lipid 7 w/v % mulai menunjukkan perbedaan bentuk profil antara senyawa NaCl dengan senyawa lainnya. Lalu pada membran lipid 9 w/v %, bentuk profil senyawa NaCl dengan senyawa lainnya terlihat sangat terbedakan, hal itu menunjukkan bahwa pada konsentrasi tersebut membran lipid dapat membedakan NaCl dari senyawa lain dengan cukup baik. Kemudian dari grafik frekuensi vs sudut fase (Gambar 3(b,d,f,h,j)), masing-masing senyawa lima rasa dasar memiliki nilai sudut fase yang berbeda namun profil spektrum sudut fase setiap sampel hampir sama yaitu bernilai negatif dan fluktuatif. Semua sudut fase larutan uji tersebut bernilai negatif karena bersifat kapasitif.

Selanjutnya data impedansi yang telah diperoleh dianalisis dengan PCA dan LDA untuk mendapatkan visualisasi kemampuan IDE yang telah dilapisi membran lipid 1-hexadecanol dalam menyeleksi rasa asin. Analisis dilakukan dengan menggunakan fitur Z' real dan Z'' imajiner dalam rentang frekuensi 1 Hz - 108 Hz. Fitur tersebut dipilih karena memiliki kontribusi yang cukup signifikan dalam membedakan lima rasa dasar. Gambar ?? berikut ini merupakan hasil analisis PCA dan LDA nya.

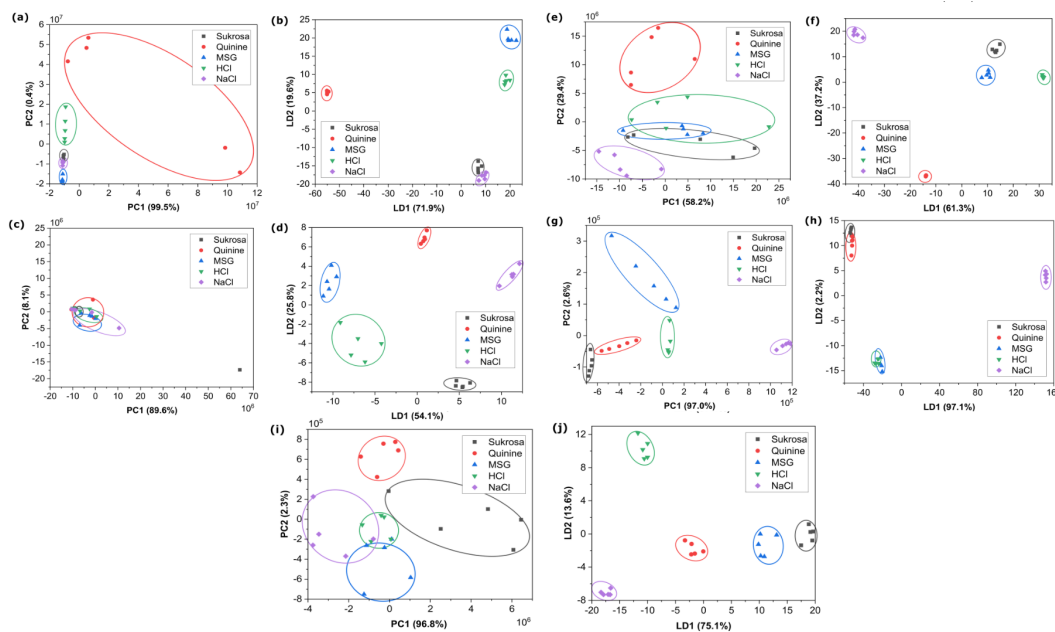
Plot PCA yang diperoleh dari membran lipid 3 w/v % dan 5 w/v % tidak beraturan sehingga



Gambar 3: Nyquist plot hasil pengujian EIS lima rasa dasar menggunakan IDE yang telah dilapisi membran dengan variasi konsentrasi total lipid/PVC/plasticizer (a) 3 w/v %, (b) 5 w/v %, (c) 7 w/v %, (d) 9 w/v %, (e) 11 w/v %



Gambar 4: Bode plot hasil pengujian EIS lima rasa dasar menggunakan IDE yang telah dilapisi membran dengan variasi konsentrasi total lipid/PVC/plasticizer (a,b) 3 w/v %, (c,d) 5 w/v %, (e,f) 7 w/v %, (g,h) 9 w/v %, (i,j) 11 w/v %



Gambar 5: Hasil analisis PCA dan LDA lima rasa dasar menggunakan IDE yang telah dilapisi membran lipid dengan variasi konsentrasi total lipid atau PVC atau *plasticizer*: (a,b) 3 w/v%, (c,d) 5 w/v%, (e,f) 7 w/v%, (g,h) 9 w/v%, dan (i,j) 11 w/v%.

menunjukkan bahwa konsentrasi tersebut tidak mampu membedakan senyawa NaCl sama sekali (Gambar 4.3(a,c)). Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh kandungan lipid dalam membran yang masih cukup sedikit sehingga muatan negatif pada permukaan membran tidak banyak dan menyebabkan rendahnya interaksi ion Na^+ larutan NaCl dengan muatan negatif membran. Kemudian pada membran lipid 7 w/v %, *cluster* senyawa NaCl mulai sedikit terpisahkan dari *cluster* senyawa lain (Gambar 4.3(e)). Hal itu menunjukkan bahwa pada konsentrasi tersebut, membran lipid mulai dapat memberi respons yang khusus terhadap senyawa NaCl. Lalu pada membran lipid 9 w/v %, *cluster* senyawa NaCl sudah dapat terbedakan dengan sangat baik dimana *cluster* senyawa lain saling berdekatan satu sama lain, sedangkan *cluster* NaCl terpisah jauh dari *cluster* senyawa lain. Hal ini menunjukkan bahwa membran lipid pada konsentrasi tersebut dapat merespons secara selektif terhadap senyawa NaCl. Dari plot PCA, konsentrasi 7 w/v % dan 9 w/v % menunjukkan bahwa dengan penambahan kandungan lipid dapat meningkatkan muatan permukaan pada membran sehingga interaksinya dengan ion dari larutan meningkat. Selanjutnya, pada membran lipid 11 w/v % terlihat bahwa titik-titik data pada *cluster* NaCl dan *cluster* senyawa lain mulai menyebar dan bercampur satu sama lain sehingga dapat dikatakan

bahwa kemampuan membran lipid dalam menyeleksi senyawa NaCl pada konsentrasi tersebut menurun. Terjadinya penurunan kemampuan membran lipid konsentrasi 11 w/v % dalam menyeleksi rasa asin yang cukup signifikan kemungkinan disebabkan oleh tebal membran lipid yang semakin bertambah sehingga mengurangi kemampuan medan listrik untuk menembus membran dan berinteraksi dengan material larutan yang diujikan. Kemudian dari hasil plot LDA, secara umum senyawa kimia lima rasa dasar dapat terbedakan dengan baik dan pada konsentrasi membran lipid 9 w/v % terlihat bahwa *cluster* NaCl sangat terpisahkan dari *cluster* senyawa lain. Hal ini menguatkan bahwa membran lipid dengan konsentrasi tersebut dapat menyeleksi rasa asin (senyawa NaCl) paling optimal dibandingkan konsentrasi lain. Dengan menggunakan *k-fold cross validation*, diperoleh akurasi sensor membran lipid pada konsentrasi ini sebesar 100 %.

Selektivitas rasa asin dapat dikaitkan dengan *silhouette coefficient*-nya karena nilai tersebut merupakan indeks validitas *cluster* yang mencerminkan keterpisahan *cluster* [38]. Tabel 1 berikut menampilkan *silhouette coefficient cluster* NaCl dari hasil analisis PCA setiap variasi konsentrasi membran lipid.

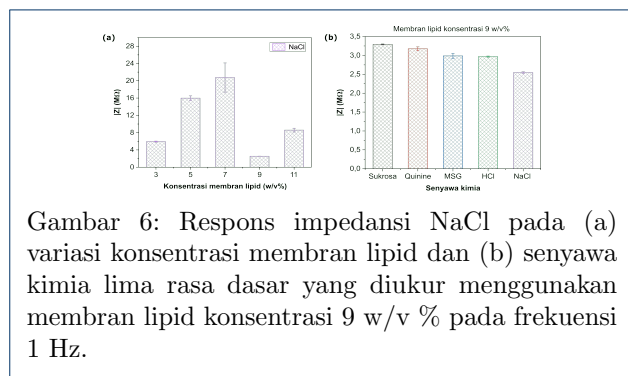
Tabel 1 menunjukkan bahwa membran lipid 3 w/v % dan 5 w/v % memiliki *silhouette coefficient*

Tabel 1: *Silhouette coefficient cluster* NaCl hasil analisis PCA

Konsentrasi membran lipid	Silhouette coefficient
3 w/v%	-0,40
5 w/v%	-0,25
7 w/v%	0,22
9 w/v%	0,75
11 w/v%	0,27

negatif karena terjadi misklasifikasi *cluster* NaCl dimana *cluster* bercampur dan tidak dapat terbedakan dengan yang lain, sedangkan *silhouette coefficient* membran lipid 7 w/v % bernilai positif namun nilainya masih cukup rendah karena dari plot PCA terlihat bahwa *cluster* NaCl sudah mulai terpisahkan namun masih agak berdekatan dengan *cluster* senyawa lain. Kemudian untuk membran lipid 9 w/v %, *silhouette coefficient* NaCl nya paling tinggi diantara konsentrasi lain karena *cluster* NaCl terpisahkan dengan sangat baik dari *cluster* senyawa lain, sedangkan pada membran lipid konsentrasi 11 w/v% *silhouette coefficient* NaCl mengalami penurunan cukup drastis karena *cluster* NaCl sudah tidak dapat terbedakan lagi dengan baik dari *cluster* senyawa lain. Dengan begitu, selektivitas membran lipid terhadap rasa asin pada konsentrasi 9 w/v % adalah yang paling optimal karena pada konsentrasi tersebut *silhouette coefficient* NaCl mencapai nilai tertinggi.

Kemampuan selektivitas membran 9 w/v % terhadap rasa asin dapat dilihat secara spesifik pada frekuensi tertentu yang memberikan nilai Z mutlak variansi terbesar terhadap rasa asin, yaitu 1 Hz (Gambar 6).

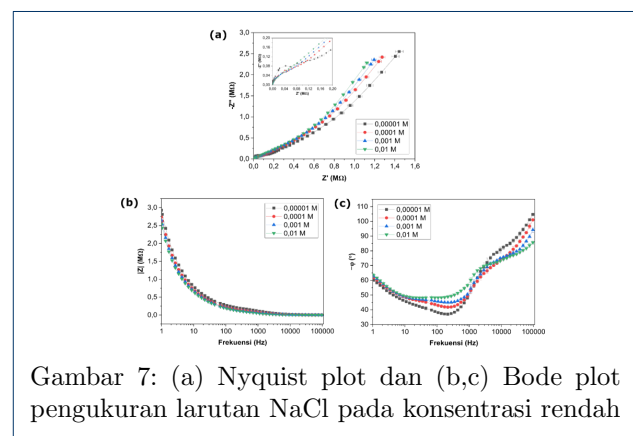


Gambar 6: Respons impedansi NaCl pada (a) variasi konsentrasi membran lipid dan (b) senyawa kimia lima rasa dasar yang diukur menggunakan membran lipid konsentrasi 9 w/v % pada frekuensi 1 Hz.

Dari Gambar 6(a,b) dapat diketahui bahwa NaCl memiliki respons impedansi berupa nilai Z mutlak paling kecil pada konsentrasi 9 w/v %. Di konsentrasi tersebut, NaCl juga memiliki Z mutlak paling kecil dibandingkan senyawa kimia lainnya sehingga dapat dikatakan bahwa dengan diukur pada frekuensi

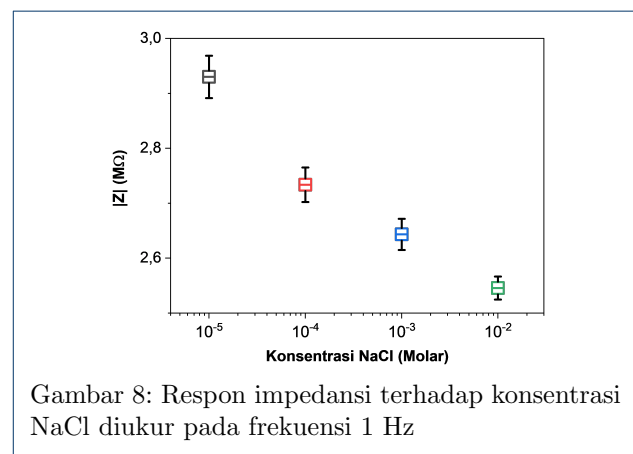
rendah, membran lipid konsentrasi 9 w/v % dapat merespons secara selektif terhadap rasa asin karena pada konsentrasi tersebut banyak muatan negatif dari membran lipid yang berinteraksi dengan ion Na^+ pada larutan NaCl sehingga menghasilkan nilai impedansi yang kecil.

Setelah itu, membran lipid konsentrasi 9 w/v % digunakan untuk mengukur beberapa variasi konsentrasi larutan NaCl dalam air untuk menguji sensitivitas sensor, yaitu 0,01 mM – 0,01 M. Gambar 7 menunjukkan bahwa selain selektif terhadap rasa asin, sensor ini juga cukup sensitif karena dapat digunakan untuk mengukur larutan NaCl dengan baik pada semua variasi konsentrasi.



Gambar 7: (a) Nyquist plot dan (b,c) Bode plot pengukuran larutan NaCl pada konsentrasi rendah

Hubungan antara konsentrasi NaCl dengan respons impedansi dapat dilihat secara lebih spesifik pada frekuensi 1 Hz.



Gambar 8: Respon impedansi terhadap konsentrasi NaCl diukur pada frekuensi 1 Hz

Gambar 8 menunjukkan bahwa respons impedansi semakin menurun seiring meningkatnya konsentrasi NaCl. Hal tersebut dikarenakan dengan semakin tingginya konsentrasi NaCl maka jumlah ion dalam larutan yang berinteraksi dengan muatan lipid

semakin banyak sehingga menghasilkan impedansi yang lebih kecil [39].

4 KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa konsentrasi membran lipid terbaik untuk pelapisan sensor IDE impedimetri adalah 9 w/v%, dengan silhouette coefficient NaCl hasil analisis PCA adalah 0,75. Akurasi yang didapat dari k-fold cross-validation menggunakan LDA adalah 100 %. Selanjutnya, sensor membran lipid yang optimal tersebut digunakan untuk pengukuran konsentrasi larutan NaCl dalam air untuk menguji sensitivitas sensor. Hasilnya menunjukkan bahwa sensor ini cukup sensitif karena dapat digunakan untuk mengukur larutan NaCl dengan baik pada semua variasi konsentrasi. Semakin tinggi konsentrasi NaCl, respons impedansi semakin menurun.

PENULIS

- 1 Annisa Wachida Qurrata A'yun
Dari :
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada
- 2 Haris Suhendar
Dari :
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Negeri Jakarta
- 3 Diah Ayu Suci Kinasih
Dari :
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Negeri Jakarta
- 4 Kuwat Triyana
Dari :
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada



Jurnal Fisika Indonesia, its website and the articles published are licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). © Departemen of Physics Universitas Gadjah Mada.

Author details

¹ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Yogyakarta, Indonesia. ² Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Negeri Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia. ³ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Negeri Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia. ⁴ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Yogyakarta, Indonesia.

Pustaka

1. Toko K. Taste Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2000;64(1–3):205–15.
2. Chen R, Hidekazu I, Toko K. Development of Sensor with High Selectivity for Saltiness and Its Application in Taste Evaluation of Table Salt. *Sensors and Materials*. 2010;22(6):313–25.
3. Vlasov Y, Legin A, Rudnitskaya A, Di Natale C, D'Amico A. Nonspecific Sensor Arrays ("Electronic Tongue") for Chemical Analysis of Liquids: (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2005;77(11):1965–83.
4. Wiziack NKL, Paterno LG, Fonseca FJ, Mattoso LHC. Effect of Film Thickness and Different Electrode Geometries on The Performance of Chemical Sensors Made of Nanostructured Conducting Polymer Films. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007;122(2):484–92.
5. Khan MRR, Khalilian A, Kang SW. A High Sensitivity IDC-Electronic Tongue Using Dielectric/Sensing Membranes with Solvatochromic Dyes. *Sensors*. 2016;16(5):668.
6. Queiroz DP, Florentino ADO, Bruno JC, Da Silva JHD, Riul A, Giacometti JA. The Use of An E-Tongue for Discriminating Ethanol/Water Mixtures and Determination of Their Water Content. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;230:566–70.
7. Medeiros ES, Gregório R, Martinez RA, Mattoso LHC. A Taste Sensor Array Based on Polyaniline Nanofibers for Orange Juice Quality Assessment. *Sensor Letters*. 2009;7(1):24–30.
8. Latha RS, Lakshmi PK. Electronic Tongue: An Analytical Gustatory Tool. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*. 2012;3(1):3–8.
9. Khan RR, Kang SW. Highly Sensitive Multi-Channel IDC Sensor Array for Low Concentration Taste Detection. *Sensors*. 2015;15(6):13201–21.
10. Ross CF. Considerations of The Use of The Electronic Tongue in Sensory Science. *Current Opinion in Food Science*. 2021;40:87–93.
11. Szwacki J, Lisowska-Oleksiak A, Szpakowska M. Polymer Membranes Loaded with Lipids for Taste Sensing: Electrochemical Impedance Spectroscopy Studies. *Desalination*. 2006;198(1–3):1–7.
12. Iiyama S, Ezaki S, Toko K. Sensitivity-Improvement of Taste Sensor by Change of Lipid Concentration in Membrane. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009;141(2):343–8.
13. Kobayashi Y, Habara M, Ikezaki H, Chen R, Naito Y, Toko K. Advanced Taste Sensors Based on Artificial Lipids with Global Selectivity to Basic Taste Qualities and High Correlation to Sensory Scores. *Sensors*. 2010;10(4):3411–43.
14. Sharma G, Kumar S, Kumar A, Sharma A, Kumar R, Kaur R, et al. Development of Lipid Membrane Based Taste Sensors for Electronic Tongue. *Procedia Computer Science*. 2015;70:146–52.
15. Labrador RH, Masot R, Alcañiz M, Baigts D, Soto J, Martínez-Mañez R, et al. Prediction of NaCl, Nitrate and Nitrite Contents in Minced Meat by Using A Voltammetric Electronic Tongue and An Impedimetric Sensor. *Food Chemistry*. 2010;122(3):864–70.
16. Wei Z, Wang J. The Evaluation of Sugar Content and Firmness of Non-Climacteric Pears Based on Voltammetric Electronic Tongue. *Journal of Food Engineering*. 2013;117(1):158–64.
17. Morais TCB, Rodrigues DR, De Carvalho Polari Souto UT, Lemos SG. A Simple Voltammetric Electronic Tongue for The Analysis of Coffee Adulterations. *Food Chemistry*. 2019;273:31–8.
18. Wang J, Zhu L, Zhang W, Wei Z. Application of The Voltammetric Electronic Tongue Based on Nanocomposite Modified Electrodes for Identifying Rice Wines of Different Geographical Origins. *Analytica Chimica Acta*. 2019;1050:60–70.
19. Dias LG, Fernandes A, Veloso ACA, Machado AASC, Pereira JA, Peres AM. Single-Cultivar Extra Virgin Olive Oil Classification Using A Potentiometric Electronic Tongue. *Food Chemistry*. 2014;160:321–9.
20. Toko K, Tahara Y, Habara M, Kobayashi Y, Ikezaki H. Taste Sensor: Electronic Tongue with Global Selectivity. In: *Essentials of Machine Olfaction and Taste*. John Wiley & Sons; 2016. p. 87–174.
21. Wu X, Tahara Y, Yatabe R, Toko K. Taste Sensor: Electronic Tongue with Lipid Membranes. *Analytical Sciences*. 2020;36(2):147–59.
22. Toko K, Akiyama H, Chishaki K, Ezaki S, Iyota T, Yamafuji K. Detection of Taste Substances Using Impedance Change in Lipid/Polymer Membranes. *Sensors and Materials*. 1997;9(5):321–9.
23. Riul A, De Sousa HC, Malmegrim RR, Dos Santos DS, Carvalho ACPF, Fonseca FJ, et al. Wine Classification by Taste Sensors Made From Ultra-Thin Films and Using Neural Networks. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2004;98(1):77–82.
24. Garcia-Hernandez C, Comino CS, Martín-Pedrosa F, Rodríguez-Mendez ML, García-Cabezón C. Impedimetric Electronic Tongue Based on Nanocomposites for The Analysis of Red Wines. Improving The Variable Selection Method. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018;277:365–72.
25. Daikuzono CM, Delaney C, Morrin A, Diamond D, Florea L,

- Oliveira Jr ON. Paper Based Electronic Tongue—A Low-Cost Solution for The Distinction of Sugar Type and Apple Juice Brand. *Analyst*. 2019;144(8):2827-32.
26. Rodrigues DR, Fragoso WD, Lemos SG. Electronic Tongue Based on A Single Impedimetric Sensor and Complex Numbers-Supervised Pattern Recognition. *Electrochimica Acta*. 2021;397:139312.
27. Riul A, Malmegrim RR, Fonseca FJ, Mattoso LHC. An Artificial Taste Sensor Based on Conducting Polymers. *Biosensors and Bioelectronics*. 2003;18(11):1365-9.
28. Kulkarni MB, Ayachit NH, Aminabhavi TM. Biosensors and Microfluidic Biosensors: From Fabrication to Application. *Biosensors*. 2022;12(7):543.
29. Sihvo J, Stroe DI, Messo T, Roinila T. A Fast Approach for Battery Impedance Identification Using Pseudo Random Sequence (PRS) Signals. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;35(3):2848-57.
30. Magar HS, Hassan RYA, Mulchandani A. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors*. 2021;21(19):6578.
31. Colomer-Farrarons J, Miribel-Català PL, Rodríguez-Villarreal ÁI, Samitier J. Portable Bio-Devices: Design of Electrochemical Instruments from Miniaturized to Implantable Devices. In: *New Perspectives in Biosensors Technology and Applications*. InTech; 2011.
32. Akiyama H, Tsuzaki T, Toko K, Yamafuji K. Taste Sensor Using Membrane Impedance Change. *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan E*. 1997;117(2):89-94.
33. Baldwin EA, Bai J, Plotto A, Dea S. Electronic Noses and Tongues: Applications for the Food and Pharmaceutical Industries. *Sensors*. 2011;11(5):4744-66.
34. Dizon A, Orazem ME. On The Impedance Response of Interdigitated Electrodes. *Electrochimica Acta*. 2019;327:135000.
35. Poghosian A, Geissler H, Schöning MJ. Rapid Methods and Sensors for Milk Quality Monitoring and Spoilage Detection. *Biosensors and Bioelectronics*. 2019;140:111272.
36. Nag A, Mukhopadhyay SC. Fabrication and Implementation of Printed Sensors for Taste Sensing Applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;269:53-61.
37. Varshney M, Li Y. Interdigitated Array Microelectrodes Based Impedance Biosensors for Detection of Bacterial Cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 2009;24(10):2951-60.
38. Bagirov AM, Aliguliyev RM, Sultanova N. Finding Compact and Well-Separated Clusters: Clustering using Koefisien siluets. *Pattern Recognition*. 2022;135:109144.
39. Zhu L, Wang X, Han Y, Cai Y, Jin J, Wang H, et al. A PVC/Polypyrrole Sensor Designed for Beef Taste Detection using Electrochemical Methods and Sensory Evaluation. *Meat Science*. 2018;137:1-8.