

ANALISIS RESPON LAPISAN TIPIS POLIANILIN TERHADAP AROMA KUNYIT

¹⁾Erfina Nur Rahayu, ²⁾Nugrahani Primary Putri, ³⁾Evi Suaebah

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: erfinanur.21051@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nugrahaniprimary@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: evisuaebah@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini telah berhasil mengeksplorasi potensi polianilin (PANI) sebagai material sensor, khususnya untuk aplikasi sensor aroma. PANI disintesis menggunakan metode elektrodeposisi untuk menghasilkan lapisan tipis yang terdepositasi pada permukaan kaca konduktif ITO. Lapisan tipis PANI kemudian dikarakterisasi untuk mengetahui performanya dalam mendeteksi aroma kunyit melalui perubahan nilai resistansi ketika berinteraksi dengan aroma kunyit. Data resistansi yang diperoleh dianalisis untuk menentukan sensitivitas, repeatabilitas, waktu respon, dan waktu pemulihan sensor. Untuk volume *essential oil* kunyit yang digunakan dalam pengujian adalah 0,5 ml. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai sensitivitas PANI dalam mendeteksi aroma kunyit yaitu sebesar 7,64%. PANI juga menunjukkan repeatabilitas yang baik dalam mendeteksi aroma kunyit, karena nilai resistansi bisa kembali ke titik resistansi awal, selain itu dihasilkan waktu respon sebesar 152 s dan waktu pemulihan 130 s. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa PANI menunjukkan performa yang baik dalam mendeteksi aroma kunyit sehingga berpotensi untuk dikembangkan sebagai material sensor fungsional.

Kata Kunci: polianilin, aroma kunyit, sensitivitas

Abstract

This study successfully explored the potential of polyaniline (PANI) as a sensor material, particularly for aroma sensor applications. PANI was synthesized using the electrodeposition method to produce a thin film deposited on the surface of conductive ITO glass. The PANI thin film was then characterized to evaluate its performance in detecting turmeric aroma through changes in resistance upon interaction with the aroma. The obtained resistance data were analyzed to determine the sensor's sensitivity, repeatability, response time, and recovery time. The volume of turmeric essential oil used in the test was 0.5 mL. The results showed that the sensitivity of PANI in detecting turmeric aroma was 7,64%. PANI also demonstrated good repeatability in detecting the aroma, as the resistance values were able to return to their initial point. In addition, a response time of 152 seconds and a recovery time of 130 seconds were obtained. Based on these findings, it can be concluded that PANI exhibits good performance in detecting turmeric aroma and has strong potential to be developed as a functional sensor material.

Keywords: polyaniline, turmeric aroma, sensitivity

I. PENDAHULUAN

Beberapa waktu terakhir, polimer konduktif menjadi topik penelitian yang menarik karena sifatnya yang unik, beragam aplikasi, serta potensi modifikasinya yang luas [1]. Polimer konduktif tergolong polimer organik dengan struktur terkonjugasi karena adanya karbon yang terhibridisasi pada *blackbone*, yang menghasilkan sifat unik seperti sifat optik, magnet, dan terutama sifat listriknya [2][3]. Semua polimer memiliki ciri khas berupa ikatan tunggal (σ) dan rangkap (π) yang tersusun secara bergantian, serta keberadaan ikatan rangkap π yang menyebar di sepanjang struktur terkonjugasinya, hal ini menjadikan polimer tersebut mudah mengalami proses oksidasi reduksi [4]. Terdapat beberapa jenis polimer konduktif seperti polipirrol (PPY), polianilin (PANI), polidiasetilena (PDA), poliaktilena (PA), politiopena (PTH), serta turunannya. PANI merupakan salah satu jenis polimer konduktif yang populer karena memiliki konduktivitas listrik yang baik, harga monomer yang rendah, mudah disintesis, dan stabilitas yang baik [3]. Karakteristik yang dimiliki PANI ini menjadikannya banyak diaplikasikan dalam bidang seperti sensor, pelapis anti-korosi, baterai, kapasitor, fotovoltai, dan perangkat elektronik lainnya [5][6][7][8].

Polianilin (PANI) adalah material yang terbentuk dari monomer anilin ($C_6H_5NH_2$), yang merupakan turunan benzena dengan atom hidrogen yang digantikan oleh gugus NH_2 . Struktur PANI terdiri dari unit *benzoid* dan *quinoid*, yang terhubung melalui ikatan amina ($-NH-$) dan imina ($-N=$) [9]. PANI memiliki kemampuan mengalami perubahan tingkat oksidasi, yang sangat dipengaruhi oleh metode polimerisasi serta jenis doping yang digunakan. Secara umum, terdapat empat bentuk utama tingkat oksidasi PANI, yaitu *Leucomeraldine base* (LB) merupakan bentuk paling tereduksi ($y = 1$), berwarna putih atau tidak berwarna, dan bersifat isolator. *Emeraldine base* (EB) berada pada kondisi setengah teroksidasi ($y = 0,5$), berwarna biru, namun tetap bersifat isolator karena belum mengalami proses protonasi. Ketika EB mengalami protonasi, akan berubah menjadi *emeraldine salt* (ES) yang berwarna hijau dan bersifat konduktif, menjadikannya bentuk paling umum digunakan dalam aplikasi sensor. Sementara itu, *pernigraniline base* (PB) merupakan bentuk paling teroksidasi ($y = 0$), dengan warna biru keunguan dan juga bersifat non-konduktif. Di antara semua bentuk tersebut, emeraldine base (EB) dikenal paling stabil pada suhu ruang. [10]. Pada kondisi *emeraldine base* (EB), bentuk oksidasi PANI tetap stabil pada suhu ruang dengan konduktivitas yang berkisar 10^{-9} S/cm hingga 10^{-2} S/cm setelah melalui proses doping [11].

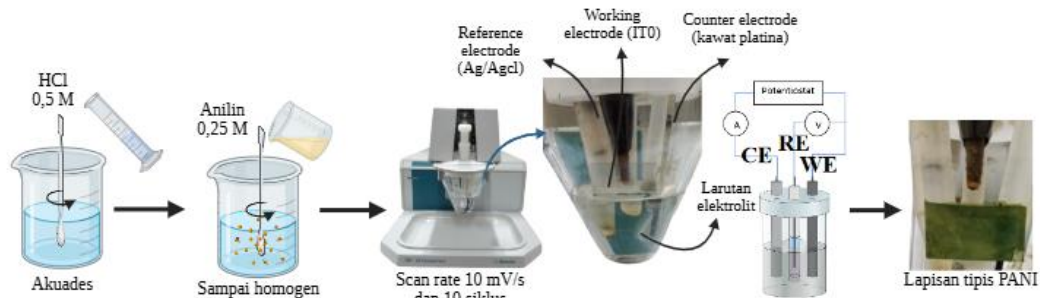
Konduktivitas listrik yang baik dan tingginya elektroaktivitas membuat PANI sering kali diaplikasikan sebagai material sensor [12]. Eksplorasi lebih lanjut mengenai aplikasi PANI dalam bidang sensor terus dikembangkan untuk memahami dan memaksimalkan potensi PANI dalam berbagai aspek deteksi, salah satunya yaitu deteksi aroma. Aroma merupakan molekul-molekul kecil yang mudah menguap yang dilepaskan. Sifat listrik PANI yang unik serta keberadaan berbagai gugus fungsi yang memungkinkan adanya interaksi dengan beragam molekul aroma [13]. Pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu elektrodeposisi dengan menggunakan substrat ITO dikarenakan untuk bahan sensor memerlukan permukaan yang luas, memiliki ketahanan yang baik terhadap temperatur tinggi, dan bersifat konduktif sehingga cocok digunakan dalam pembuatan lapisan tipis PANI. Aroma yang diujikan berupa *essential oil* kunyit untuk mengeksplorasi potensi PANI sebagai material sensor aroma [14].

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian berbasis eksperimen ini dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu tahap preparasi, sintesis, karakterisasi, dan analisis data eksperimen yang saling berkaitan. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fisika Material serta Laboratorium Instrumentasi Kimia Universitas Negeri Surabaya dengan mengikuti prosedur standar. Pada tahap sintesis, proses diawali dengan pembuatan larutan elektrolit, yaitu HCl 0,5 M sebanyak 1,25 ml yang dilarutkan terlebih dahulu ke dalam 28,7 ml aquades di dalam gelas beaker, kemudian diaduk secara merata hingga benar-benar homogen. Selanjutnya, larutan ditambahkan anilin 0,5 M sebanyak 0,69 ml dan kembali diaduk agar tercampur sempurna sehingga membentuk larutan homogen. Setelah itu, larutan ditutup rapat menggunakan alumunium foil untuk menghindari kontaminasi sebelum kemudian dideposisi pada substrat ITO menggunakan metode voltametri siklik dengan parameter scan rate 10 mV/s dan dilakukan sebanyak 10 siklus [14]. Hasil sintesis berupa lapisan tipis polianilin (PANI) kemudian diuji performanya melalui uji sensing untuk mengevaluasi potensi material tersebut dalam mendeteksi aroma, khususnya aroma kunyit.

Pada tahap pengujian ini digunakan volume essential oil kunyit sebanyak 0,5 ml dengan pengulangan sebanyak tiga kali guna memastikan konsistensi hasil yang diperoleh.



Gambar 1. Sintesis lapisan tipis PANI

B. Teknik Pengumpulan Data

Sampel lapisan tipis PANI yang telah berhasil disintesis menggunakan metode elektrodposisi menunjukkan hasil berupa lapisan berwarna kehijauan yang melekat pada permukaan ITO. Sampel ini kemudian dikarakterisasi menggunakan beberapa uji, seperti uji *Fourier Transform InfraRed* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan jenis ikatan kimia yang terbentuk pada lapisan tipis PANI, guna memastikan bahwa struktur kimia yang terbentuk sudah sesuai. Selanjutnya karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) EDX untuk mengetahui morfologi dari lapisan tipis PANI dan unsur-unsur kimia yang terdapat di dalamnya. Kemudian untuk mengetahui performa sensor berbasis lapisan tipis PANI dalam mendeteksi aroma kunyit, maka dilakukan pengukuran resistansi menggunakan alat LCR Meter. Pengujian ini dilakukan dengan mencatat nilai perubahan resistansi selama proses sensing berlangsung.

C. Teknik Pengolahan Data

Data perubahan resistansi yang diperoleh dari pengukuran menggunakan LCR Meter selanjutnya dianalisis untuk mengetahui performa sensor dalam mendeteksi aroma kunyit. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak origin untuk memvisualisasikan perubahan resistansi dalam bentuk grafik. Selanjutnya data perubahan resistansi digunakan untuk menghitung sensitivitas sensor dengan menggunakan persamaan (1):

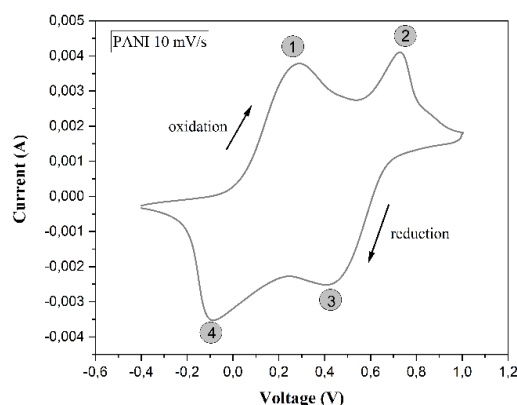
$$S = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_0 - R}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan S adalah sensitivitas sensor, R adalah resistansi setelah diinjeksi aroma kunyit dan dinyatakan dalam ohm (Ω), dan R_0 adalah resistansi sebelum diinjeksi *essensial oil* kunyit dalam ohm (Ω).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis *Cyclic Voltammetry*

Metode elektrodposisi PANI menghasilkan kurva voltammogram yang diambil dari salah satu siklus selama elektrodposisi berlangsung seperti yang terlihat pada gambar 2. Kurva tersebut juga membentuk loop tertutup dengan 2 pasang puncak yakni puncak oksidasi dan puncak reduksi, kurva ini menunjukkan adanya proses redoks reversibel yang terjadi selama proses pemindaian tegangan pada metode elektrodposisi.

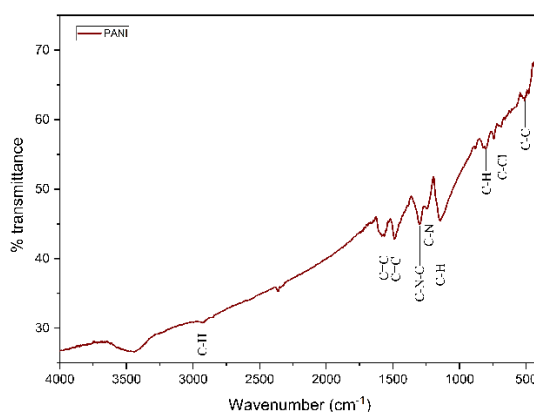


Gambar 2. Grafik voltammogram lapisan tipis PANI

Berdasarkan kurva voltamogram tersebut dapat diamati bahwa terdapat 2 puncak oksidasi (puncak 1 dan 2) yang cenderung ke arah positif serta puncak reduksi (puncak 3 dan 4) yang cenderung ke arah negatif, hal ini menunjukkan bahwa adanya perpindahan elektron selama proses elektropolimerisasi berlangsung. Pada puncak oksidasi yakni pada potensial +0,28V dan +0,73V yang merupakan perubahan fase PANI dari *leucoemeraldine base* (LB) menjadi *emeraldine salt* (ES). Saat PANI mengalami oksidasi, elektron dilepaskan dari rantai polimer ke elektroda. Untuk menjaga keseimbangan muatan, maka akan ada penyisipan anion pada rantai amina dan imina PANI untuk menggantikan muatan negatif yang hilang. Selanjutnya berubah menjadi fase *pernigraniline base* (PB) yang ditandai lapisan berwarna ungu karena adanya proton yang terdelokalisasi [15]. Ketika arah pemindaian dibalik dari potensial positif ke negatif terjadi proses reduksi yang ditandai dengan puncak pada potensial +0,42V dan -0,09V. Pada tahap ini elektron yang dilepaskan kembali masuk pada rantai polimer PANI dan anion terdeportasi dari rantai polimer sehingga menyebabkan PB tereduksi menjadi ES dan kemudian kembali menjadi LB [16]. Selain itu, laju pindai yang relatif lambat, yaitu 10 mV/s, memberikan waktu cukup bagi reaksi redoks untuk berlangsung secara menyeluruh, sehingga puncak-puncak redoks terlihat lebih tajam dan simetris.

B. Analisis Gugus Fungsi dengan Fourier Transform InfraRed (FTIR)

PANI yang telah berhasil disintesis melalui metode elektrodposisi kemudian dikarakterisasi lebih lanjut menggunakan instrumen Fourier Transform Infrared (FTIR) dengan tujuan untuk mengidentifikasi serta memastikan gugus fungsi yang terbentuk pada material. Spektrum FTIR ini digunakan sebagai dasar untuk mengkonfirmasi keberadaan gugus karakteristik khas dari PANI, terutama gugus benzoid dan quinoid yang berperan sebagai indikator utama dalam menentukan struktur polimer terkonjugasi tersebut. Dengan adanya analisis FTIR, dapat diketahui secara lebih jelas struktur kimia yang terbentuk sehingga validitas proses sintesis dapat dipastikan. Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR tersebut diperoleh spektrum berupa grafik yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik FTIR lapisan tipis PANI

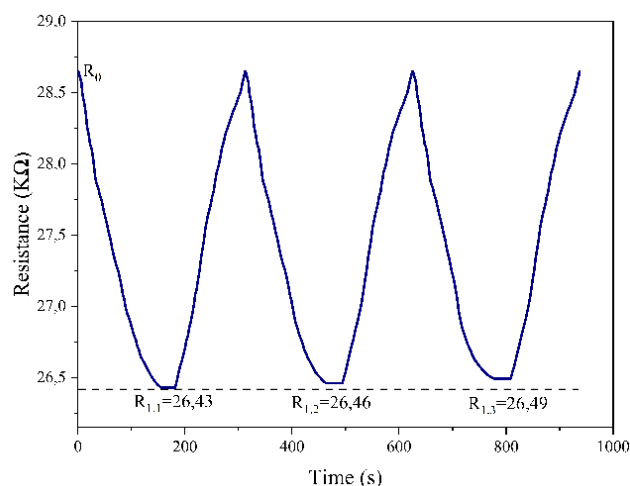
Hasil karakterisasi lapisan tipis PANI menggunakan FTIR pada rentang bilangan gelombang 400-4000 cm^{-1} , diperoleh hasil karakterisasi yang terdapat pada Tabel 1. Bilangan gelombang 1487,12 cm^{-1} dan 1564,27 cm^{-1} mengindikasikan adanya cincin benzoid dan quinoid dari peregangan C=C yang umumnya terdapat pada fase PANI [17]. Puncak 2926,01 cm^{-1} menunjukkan ikatan C-H alifatik, sementara puncak 1145,72 cm^{-1} menandakan getaran C-H aromatik, mengindikasikan fase *emeraldine salt* (ES) yang memiliki konduktivitas tinggi [18]. Berdasarkan hasil yang diperoleh terdapat pergeseran pita serapan, baik ke arah bilangan gelombang lebih tinggi maupun lebih rendah, seperti pada ikatan regangan C-N-C berdasarkan penelitian Komariyah & Putri (2021) terdapat pada bilangan gelombang 1296.04 cm^{-1} sedangkan dalam hasil karakterisasi ini bergeser menjadi 1298.09 cm^{-1} [19]. Pergeseran ini kemungkinan disebabkan karena adanya variasi dalam parameter sintesis seperti konsentrasi monomer, jenis elektrolit, suhu, serta kondisi deposisi. Meskipun demikian posisi pita serapan masih berada dalam rentang yang sesuai dengan spektrum karakteristik PANI, dan keberadaan pita serapan khas dan menunjukkan fase yang terbentuk adalah *emeraldine salt*. Dengan demikian, meskipun terdapat sedikit perbedaan terhadap posisi pita serapan pada hasil ini dibandingkan referensi dengan metode sintesis yang sama, struktur kimia yang dihasilkan tetap sesuai dan mendukung aplikasi PANI sebagai material konduktif dalam sensor aroma.

Tabel 1. Jenis ikatan kimia pada hasil uji FTIR lapisan tipis PANI

Datasheet (Range)	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		Jenis Ikatan
	Reference	Result	
3000-2840	2917.15 [19]	2926.01	C - H <i>aliphatic stretching</i>
1600-1450	1583 [17]	1564.27	C = C <i>stretching of the quinoid chain</i>
	1488 [17]	1487.12	C = C <i>stretching of the benzoid chain</i>
1350-1200	1296.04 [19]	1298.09	C - N - C <i>stretching vibration</i>
	1240 [20]	1246.02	C - N <i>stretching</i>
1150-1000	1140 [18]	1145.72	C - H <i>aromatic in-plane deformation vibration</i>
1000-800	800 [21]	802.39	C - H <i>out-o- plane bending vibrations in benzoid units</i>
700-400	697 [22]	688.59	C - Cl <i>out-o- plane bending</i>
	497[22]	484.13	C - C <i>out-of-plane bending vibration in benzoid units</i>

C. Analisis Performa Lapisan Tipis PANI sebagai Sensor Aroma Kunyit

Lapisan tipis polianilin (PANI) digunakan untuk mendeteksi aroma essential oil kunyit dengan memonitor perubahan resistansi menggunakan alat LCR Meter. Proses deteksi dimulai dengan mengukur resistansi awal (R_0) dari sampel PANI yang dicapit menggunakan klem buaya yang terhubung ke LCR Meter dalam sebuah chamber yang belum di injeksi *essential oil kunyit*. Resistansi awal (R_0) direkam sebesar 28,65 Ω . Selanjutnya, *essential oil kunyit* diinjeksikan ke dalam chamber, yang menyebabkan perubahan resistansi (R_1) pada lapisan tipis PANI. Perubahan ini berlanjut hingga mencapai titik jenuh di mana tidak terjadi lagi perubahan resistansi. Setelah mencapai titik jenuh selama 30 detik, *essential oil kunyit* dikeluarkan dari chamber, dan resistansi kembali ke nilai resistansi awal. Proses ini diulang dalam 3 siklus untuk memastikan sensor PANI menunjukkan sifat yang konsisten dan dapat diulang dalam mendeteksi essential oil kunyit.

**Gambar 4.** Performa sensor berbasis lapisan tipis PANI

Hasil uji performa lapisan tipis PANI dalam mendeteksi aroma kunyit menunjukkan adanya perubahan resistansi ketika *essential oil kunyit* diinjeksikan kedalam chamber, hal ini menunjukkan adanya interaksi antara PANI dengan aroma kunyit. Nilai resistansi awal sensor (R_0) sekitar 28,65 K Ω , resistansi kemudian menurun hingga mencapai resistansi (R_1) 26,43 K Ω dengan waktu respon sebesar 152s dan waktu pemulihan 130s. PANI merupakan polimer konduktif yang konduktivitasnya sangat bergantung pada tingkat doping, yaitu banyaknya proton atau ion yang terikat pada gugus imina ($-N=$) dan amino ($-NH-$) dalam rantai polimernya. Dalam bentuk konduktif (*emeraldine salt*), PANI memiliki pembawa muatan berupa *hole* (muatan positif) yang bergerak sepanjang rantai polimer. Ketika sensor PANI dipaparkan pada aroma kunyit, molekul volatil seperti *ar-turmeron*, *turmeron*, dan *zingiberen* akan teradsorpsi pada permukaan lapisan tipis PANI [23]. Adsorpsi ini akan mengganggu proses transfer elektron di sepanjang rantai polimer PANI, karena senyawa volatil tersebut bertindak sebagai penyumbang elektron sehingga mengurangi jumlah *hole* (muatan positif) pada PANI [24]. Interaksi ini akan mengubah jumlah serta jenis pembawa muatan dalam struktur PANI, yang kemudian menghasilkan perubahan berupa penurunan nilai resistansi dan peningkatan tegangan saat sensor

terpapar aroma *volatile* [13]. Selanjutnya dari nilai perubahan resistansi sensor yang diperoleh maka dapat diketahui sensitivitas sensor dalam mendeteksi aroma kunyit dengan memasukkan nilai tersebut kedalam persamaan (1).

$$S(\%) = \frac{2,19}{28,65} \times 100\% = 7,64\%$$

Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh nilai sensitivitas sensor sebesar 7,64%. Meskipun penelitian ini masih bersifat eksplorasi dan hanya mencakup satu kali manipulasi data, hasil awal ini menunjukkan potensi PANI sebagai material sensor aroma. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan mengevaluasi performa PANI dalam bidang material sensor salah satunya sensor gas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, sensitivitas yang diperoleh dari penelitian ini relatif tinggi. Pada sensor gas methanol dengan metode sintesis yang sama elektrodposisi menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah yaitu 1,2% pada konsentrasi 5 ppm, meskipun dengan waktu pemulihan yang cepat 15s [19]. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun sensor tersebut dapat kembali ke kondisi awal dengan cepat, kemampuannya dalam mendeteksi keberadaan gas *methanol* dalam konsentrasi kecil masih terbatas. Di sisi lain, sensor terhadap aroma *gummy candy* yaitu aroma apel, stroberi, dan anggur memiliki sensitivitas yang tinggi, yaitu berkisar antara 8,4% hingga 112%. Namun untuk waktu responnya jauh lebih lambat yaitu antara 180 s hingga 660 s [25]. Jika diamati dengan sensor lainnya, sensor aroma kunyit dalam penelitian ini menunjukkan keseimbangan yang baik antara sensitivitas dan waktu respons. Dengan demikian, sensor berbasis PANI menunjukkan kemampuan merespons dengan cepat, sehingga berpotensi untuk dikembangkan pada variasi volume yang berbeda dan menjadikan PANI sebagai salah satu material unggul dalam aplikasi sensor aroma.

Tabel 2. Perbandingan penelitian sensor gas

Bahan	Metode sintesis	Aroma	Konsentrasi	Sensitivitas	Waktu respon (s)	Waktu pemulihan (s)	Ref.
PANI film	Elektrodposisi	Benzena	2 ppm	6,48%	34,187	30,56	[18]
PANI film	Elektrodposisi	HCl	1 ppm	7,82%	42,6	32,4	[14]
		CH ₃ COOH		5,11%	29,7	21,9	
PANI film	Elektrodposisi	Methanol	5 ppm	1,2%	84	15	[19]
PANI film	Polimerisasi in situ	Apel	40 ppm	9 %	640	-	[25]
		Stroberi		8,4 %	180	-	
		Anggur		112 %	660	-	
PANI film	LBL in situ	Apel	1 ppm	7,2 mV.ppm ⁻¹	68	14,66	[13]
		Stroberi		8,5 mV.ppm ⁻¹	67,30	14,66	
		Anggur		8,2 mV.ppm ⁻¹	61,66	12,66	
PANI film	Elektrodposisi	Kunyit	0,5 ml	7,64%	152	130	This work

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diperoleh bahwa lapisan tipis PANI yang disintesis menggunakan metode elektrodposisi menunjukkan performa yang baik dalam mendeteksi aroma *essential oil* kunyit. sensor berbasis PANI juga menunjukkan repeatabilitas yang baik sebagai sensor aroma sebagaimana ditunjukkan oleh pola perubahan resistansi yang konsisten selama tiga siklus pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan tipis PANI memiliki potensi yang kuat untuk dikembangkan sebagai material sensor aroma.

B. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat dikembangkan lagi dengan menambah variasi volume *essential oil* untuk eksplorasi lebih lanjut performa PANI dalam mendeteksi aroma kunyit. hal ini penting guna

memastikan konsistensi performa sensor dan mengevaluasi sejauh mana repeatabilitas dan sensitivitas PANI dalam mendeteksi aroma kunyit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Chulkin and M. Łapkowski, "An Insight into Ionic Conductivity of Polyaniline Thin Films," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 2877, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122877.
- [2] M. Limbitot, S. Kalyane, N. Sharanappa, and B. D. Malipatil, "Electrical & dielectric studies of magnesium oxide doped Polyaniline nanocomposites influenced by ammonium dichromate," vol. 5, no. 6, pp. 758–765, 2018.
- [3] B. C. Rossignatti, A. P. Vieira, M. S. Barbosa, G. Abeg, H. Jos, and P. Dias, "Thin Films of Polyaniline-Based Nanocomposites with CeO₂ and WO₃ Metal Oxides Applied to the Impedimetric and Capacitive Transducer Stages in Chemical Sensors," 2023.
- [4] L. Thanh-Hai, K. Yukyung, and Y. Hyeonseok, "Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers," *Polymers (Basel)*, vol. 9, no. 4, p. 150, 2017, doi: 10.3390/polym9040150.
- [5] L. N. Maulida and N. Primary Putri, "Karakteristik Komposit PANi/ZnO Sebagai Bahan Dasar Sensor Gas," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 11, pp. 38–43, 2020.
- [6] H. Kumar, A. Boora, and A. Yadav, "Results in Chemistry electronics , heat resistance and anticorrosive material," *Results Chem.*, vol. 2, p. 100046, 2020, doi: 10.1016/j.rechem.2020.100046.
- [7] I. Sa'diyah and N. P. Putri, "The Effects of Potentiostat Scan Rate Variation on Impedance Value, Topography, and Morphology of the Polyaniline Thin Film," *JPSE (Journal Phys. Sci. Eng.)*, vol. 6, no. 2, pp. 46–54, 2021, doi: 10.17977/um024v6i22021p046.
- [8] N. R. M. Aras and M. Irwan, "Sintesis polianilin (PANi) dengan metode polimerisasi interfisial sebagai bahan dasar pembuatan sensor gas amonia (NH₃)," *J. Tek. Mesin Indones.*, vol. 19, no. 1, pp. 33–41, 2024, doi: 10.36289/jtmi.v19i1.561.
- [9] N. Widiyanti and N. Primary Putri, "Sintesis Polianilin Dengan Metode Interfasial Menggunakan Variasi Larutan Dalam Fasa Organik," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 7, no. 02, pp. 71–73, 2018.
- [10] R. Bagherzadeh, M. Gorji, M. S. Sorayani Bafgi, and N. Saveh-Shemshaki, *Electrospun conductive nanofibers for electronics*. Elsevier Ltd., 2017. doi: 10.1016/B978-0-08-100907-9.00018-0.
- [11] A. Basith, N. Sholichah, V. Rahayu, Ardimas, and U. M. Fadhli, "Sintesis Komposit Nano PANi/Fe₃O₄ Konduktif berbasis Pasir Alam," *Indones. Phys. Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 58–66, 2021, doi: <https://doi.org/10.29303/ipr.v4i2.94>.
- [12] G. Liao, Q. Li, and Z. Xu, "The chemical modification of polyaniline with enhanced properties: A review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 126, pp. 35–43, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.10.018.
- [13] A. M. Graboski *et al.*, "Aroma detection using a gas sensor array with different polyaniline films," *Anal. Methods*, vol. 11, no. 5, pp. 654–660, 2019, doi: 10.1039/c8ay02389a.
- [14] F. R. Pratiwi and N. P. Putri, "PERFORMA LAPISAN TIPIS POLIANILIN SEBAGAI BAHAN FUNGSIONAL PENGINDERAAN GAS CH₃ COOH," vol. 12, pp. 100–105, 2023.
- [15] N. P. Putri, E. Suaebah, L. Rohmawati, D. J. D. H. Santjojo, M. Masrurroh, and S. P. Sakti, "Implications of the Electrodeposition Scan Rate on the Morphology of Polyaniline Layer and the Impedance of a QCM Sensor," *Trends Sci.*, vol. 20, no. 3, p. 6411, Jan. 2023, doi: 10.48048/tis.2023.6411.
- [16] F. Dirgantari and N. P. Putri, "Karakteristik Elektrokimia Lapisan Tipis PANi Dengan Variasi Scan Rate Elektrodeposisi," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 12, no. 2, pp. 103–108, Jul. 2023, doi: 10.26740/ifi.v12n2.p103-108.
- [17] I. S. AL-Faris and N. P. Putri, "Sintesis dan Karakterisasi Komposit PANi/ZnO Sebagai Sensor Gas Metanol," *J. Fis. Unand*, vol. 11, no. 3, pp. 393–400, Jul. 2022, doi: 10.25077/jfu.11.3.393-400.2022.
- [18] P. R. Ariyanti and N. P. Putri, "KARAKTERISTIK LAPISAN TIPIS POLIANILIN SEBAGAI BAHAN AKTIF SENSOR GAS BENZENE," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 13, no. 1, pp. 21–26, Aug. 2023, doi: 10.26740/ifi.v13n1.p21-26.

- [19] A. Y. Komariyah and N. P. Putri, "Fabrication of Polyaniline Thin Film Using Electrodeposition Method as Alcohol Sensor," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 18, no. 2, p. 36, 2022, doi: 10.12962/j24604682.v18i2.12812.
- [20] X. Dong, X. Zhang, X. Wu, H. Cui, and D. Chen, "Investigation of Gas-Sensing Property of Acid-Deposited Polyaniline Thin-Film Sensors for Detecting H₂S and SO₂," *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1889, Nov. 2016, doi: 10.3390/s16111889.
- [21] A. Korent *et al.*, "Facile Fabrication of an Ammonia-Gas Sensor Using Electrochemically Synthesised Polyaniline on Commercial Screen-Printed Three-Electrode Systems," *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 169, Dec. 2020, doi: 10.3390/s21010169
- [22] M. Zhang, A. Nautiyal, H. Du, Z. Wei, X. Zhang, and R. Wang, "Electropolymerization of polyaniline as high-performance binder free electrodes for flexible supercapacitor," *Electrochim. Acta*, vol. 376, p. 138037, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.electacta.2021.138037.
- [23] J. Kim, J. Byeon, S. Kang, and J. Kim, "A high sensitivity acetone gas sensor based on polyaniline-hydroxypropyl methylcellulose core-shell-shaped nanoparticles," *Nanoscale Adv.*, vol. 4, pp. 5312-5319, 2022, doi: 10.1039/d2na00647b.
- [24] R. AVIVA LYDIA DA VEGA and N. PRIMARY PUTRI, "Sebuah Review: Polianilin (PANi) Sebagai Bahan Aktif Pendeteksi Asam," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 9, no. 2, pp. 105-118, 2020, doi: 10.26740/ifi.v9n2.p105-118.
- [25] L. Tiggemann *et al.*, "Electronic nose system based on polyaniline films sensor array with different dopants for discrimination of artificial aromas," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 43, no. August, pp. 112-116, 2017, doi: 10.1016/j.ifset.2017.08.003.