

Sensor Gas Amonia Berbasis Polimer Konduktif Polianilina: Sebuah Review

Said Ali Akbar

Program Studi Pendidikan Kimia Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Serambi Mekkah
Jalan Teungku Imuem Lueng Bata, Batoh, Banda Aceh 23249, Indonesia

*Corresponding author: said.aliakbar@serambimekkah.ac.id

ABSTRAK

Artikel *review* ini memberikan informasi tentang aplikasi polianilina (PANI) dan komposisinya sebagai sensor gas berbahaya khususnya amonia (NH_3). Kajian yang dibahas pada artikel ini meliputi sifat gas NH_3 , material komposit, kinerja sensor, serta limit deteksi. Tinjauan sensor gas amonia berbasis polimer konduktif polianilina secara menyeluruh diambil dari referensi sepuluh tahun terakhir. Sebagai contoh, komposit polianilina dengan turunan karbon seperti *reduced Graphene Oxide* (rGO) dan *Carbon Nanotube* menunjukkan limit deteksi hingga 46 ppb dengan waktu pemulihan hanya 75 detik. Selain itu, komposit PANI dengan logam seperti Ag, Sr dan sebagainya, menunjukkan limit deteksi yang lebih besar yaitu 1 ppm, namun terdapat keunggulan dimana waktu pemulihan hanya 4 deti. Oleh sebab itu, polimer konduktif polianilina menjadi material yang sangat menjanjikan untuk mendeteksi keberadaan gas NH_3 . Terakhir, mekanisme penginderaan gas amonia terhadap material PANI juga dibahas pada tulisan ini.

Kata Kunci: Sensor Gas, Polimer, Amonia, Komposit, Polianilina

PENDAHULUAN

Saat ini sensor gas telah menarik perhatian lebih dalam bidang industri dan penelitian, hal ini disebabkan oleh udara di sekitar kita mengandung berbagai gas berbahaya yang mungkin merugikan untuk kesehatan manusia [1]. Oleh karena itu kebutuhan akan alat pendeteksi gas berbahaya pada lingkungan sekitar menjadi hal yang sangat perlu untuk direalisasikan.

Amonia dapat dihasilkan dari emisi gas dari kendaraan dan pabrik kimia [1]. Selain itu, amonia banyak digunakan pada produksi pupuk, plastik, pengolahan makanan, dan pabrik. Secara alami amonia hadir di lingkungan sekitar dari sisa bahan organik di tanah seperti bangkai, tumbuhan, dan kotoran hewan yang diurai oleh bakteri. Masalah kesehatan yang parah seperti penyakit hati dapat disebabkan oleh paparan gas amonia tinggi, selain itu efek lain juga muncul pada tubuh manusia seperti penyakit tenggorokan, mata, kulit, dan iritasi pernapasan [2]. Paparan amonia pada 100-200 ppm, pada manusia, dapat menyebabkan pengeluaran air liur yang banyak dan kehilangan nafsu makan. Karena efek yang berbahaya dari gas amonia pada manusia, penentuan batas paparan terendah dari gas amonia menarik banyak minat peneliti untuk membuat perangkat sensor.

Selama beberapa dekade terakhir, berbagai jenis sensor gas telah dikembangkan menggunakan berbagai material dan platform transduksi berbeda. Sensor gas berbasis polimer konduktif telah banyak dikembangkan untuk deteksi kuantitatif dan kualitatif gas kimia yang berbahaya terhadap lingkungan. Adapun beberapa polimer yang telah digunakan yaitu polianilina (PANI), polipirol (PPy), polithiofena (Pthiensia), dan sebagainya [4-6]. Material ini memiliki kelebihan mudah dioperasikan, material murah, stabilitas tinggi pada suhu kamar, dan mudah disiapkan [2], [6-8].

Sejauh ini perkembangan riset terhadap penggunaan PANI sebagai sensor gas amonia telah berkembang dengan sangat pesat. Meliputi variasi dopan, bentuk film, bahkan penambahan aditif membentuk komposit atau pun nanokomposit yang dapat meningkatkan sensitivitas sensor. Studi literatur ini membahas tentang perkembangan riset polimer konduktif polianilina sebagai sensor gas amonia. Kajian utama yang dibahas yaitu terkait, jenis aditif atau variasi, suhu kinerja, waktu pemulihan, serta limit deteksi gas NH_3 .

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah artikel dari berbagai publisher jurnal seperti *Science Direct*, *American Chemical Society* (ACS), *Royal Society of Chemistry* (RSC), *Wiley*, dan sebagainya. Seluruh pencarian artikel dilakukan melalui website mendeley yang terintegrasi langsung melalui aplikasi mendeley pada microsoft word, supaya memudahkan dalam pembuatan referensi.

Metode

Artikel ini disusun berdasarkan metode studi literatur menggunakan data primer dari jurnal, prosiding, maupun sumber literatur lain yang telah terpublikasi selama sepuluh tahun terakhir. Secara umum, kajian yang dibahas pada artikel ini meliputi sifat gas NH_3 , material polianilina dan turunannya, kinerja sensor, sertalimit deteksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gas Amonia (NH_3)

Amonia adalah senyawa yang terbentuk dari reaksi gas nitrogen dan hidrogen dengan formula NH_3 . Amonia adalah gas beracun yang tidak berwarna dengan aroma tajam yang khas. Amonia dapat dihasilkan dari emisi gas dari kendaraanan pabrik kimia[1]. Selain itu, amoniabanyak digunakan padaproduksi pupuk, plastik, pengolahan makanan, dan pabrik. Secara alami amonia hadir dilingkungan sekitar dari sisa bahan organik ditanah seperti bangkai, tumbuhan, dan kotoran hewan yang diurai oleh bakteri.Masalah kesehatan yang parah seperti penyakit hati dapat disebabkan oleh paparan gas amonia tinggi, selain itu efek lain juga muncul pada tubuh manusia seperti penyakit tenggorokan, mata, kulit, dan iritasi pernapasan[2]. Permasalahan ini mempengaruhi baik manusiamaupun hewan. Paparan amonia pada 100-200 ppm, pada manusia, dapat menyebabkan pengeluaran air liur yang banyak dan kehilangan nafsu makan.Karena efek yang berbahaya dari gas amonia gas pada manusia, penentuan batas paparan terendah dari gas amonia menarik banyak minat peneliti untuk membuat perangkat sensor.

Bau amonia tajam di udara dapat deteksi pada konsentrasi rendah sekitar 5 ppm. Oleh karena

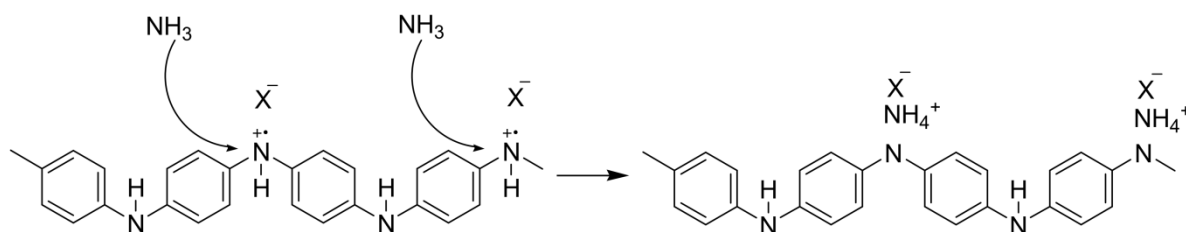
itu, keberadaan amonia diudara tanpa pengetahuan pasien sangat jarang terjadi. Konsentrasi amonia sampai 100 pm diudara memiliki toleransi hanya beberapa jam jika terpapar pada manusia. Pada konsentrasi 1700 ppm, beberapa jenis penyakit mulai muncul seperti batuk, *laryngospasm*, dan edema dari daerah *glottic*[9]. Selanjutnya, konsentrasi terpapar sebesar 2500 sampai 4500 ppm dapat berakibat fatal selamat 30 menit, dan konsentrasi diatas 5000 ppm biasanya menyebabkan pernapasan manusia menjadi lebih cepat cepat. Amonia anhidratpada konsentrasi di atas 10000 ppm cukup untuk menyebabkan kerusakan kulit. Rekomendasi *The US National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH) bahwa paparan *time-weighted average* (TWA) maksimum yang diizinkan dari amonia anhidrat untuk 8 jam per hari kerja dari 40 jam per seminggu adalah 25 ppm.*The short-term exposure limit* (STEL) atau konsentrasi di mana paparan lebih dari 15 menit berpotensi berbahaya adalah 35 ppm. Konsentrasi gas yang langsung berbahaya bagi kehidupan atau kesehatan (IDLH) adalah 500 ppm[7].

Minimal penyerapan amonia ke dalam sirkulasi sistemik adalah jika paparan inhalasi jangka pendek (di bawah 120 detik). Namun, paparan inhalasi jangka panjang menghasilkan beberapa penyerapan ke dalam sirkulasi sistemik. Sebagian besar amonia yang dihirup akan larut dalam lendir saluran pernapasan bagian atas, dan 70% hingga 80% diekskresikan diudara yang dihembuskan[10].

Amonia yang tertelan mudah diserap ke dalam aliran darah, dan hati memainkan peran penting dalam mengeliminasi[9]. Data kuantitatif pada metabolisme amonia eksogen pada manusia tidak tersedia. Namun, penelitian pada tikus menunjukkan bahwa sebagian besar amonia eksogen berubah menjadi glutamat dan urea dalam waktu 30 menit. Amonia yang dicerna secara oral hampir seluruhnya diubah menjadi urea dihati dan diekskresikan melalui ginjal sebagai urea urin, dengan 25% diekskresikan dalam 6 jam pertama dan 72% dalam tiga hari. Namun, konsumsi oral jarang menunjukkan kenaikan sebagai penyebab tanda-tanda toksisitas sistemik.Saat ini tidak ada bukti yang menunjukkan bahwa paparan kulit terhadap amonia adalah bentuk penyerapan sistemik.

Mekanisme Interaksi Gas Amonia Terhadap Polianilina

Sensor kimia mengubah konsentrasi analit menjadi sinyal fisik lain yang dapat dideteksi, seperti variabel arus, absorbansi, maupun massa. Setelah terkena uap analit, bahan penginderaan aktif dari sensor berinteraksi dengan analit, yang menyebabkan perubahan sifat fisik bahan penginderaan. Interaksi antara analit dan bahan penginderaan beragam, sesuai dengan analit yang berbeda dan bahan aktif yang berbeda[6].

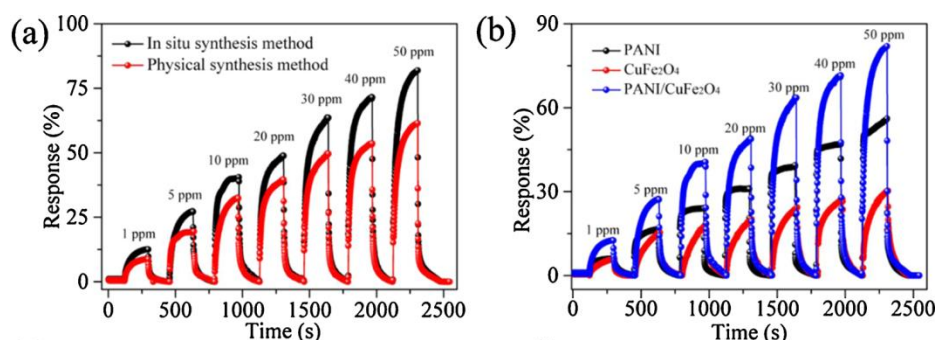


Gambar 1. Reaksi NH_3 dengan polianilina[6]

Amonia yang berada dipermukaan sensor akan merubah nilai resistansi dari material. Nilai resistansi ini dapat dianggap sebagai fungsi dari konsentrasi NH_3 yang terserap. Pada proses ini, ada beberapa parameter yang dapat diamati sebagai tujuan dari fungsi sensor yaitu waktu pemulihan, nilai resistansi saat sebelum dan sesudah terpapat NH_3 , lalu suhu kinerja sensor. Gambar 2 menunjukkan kinerja sensor

PANI adalah polimer konduktif karena keadaan dopingnya dapat dikontrol oleh reaksi asam/basa. Polimer ini banyak digunakan untuk mendeteksi gas asam dan basa. Ketika terpapar dengan gas amonia, PANI mengalami dedoping dengan deprotonasi sesuai persamaan reaksi pada Gambar 1. Proton pada gugus $-\text{NH}-$ dipindahkan ke molekul NH_3 untuk membentuk ion amonium sedangkan PANI sendiri berubah menjadi bentuk basa. Proses ini reversibel, dan pada kenyataannya, ketika gas amonia dihilangkan, ion amonium dapat terurai menjadi gas amonia dan proton[11].

PANI/ CuFe_2O_4 yang digunakan sebagai penginderaan gas NH_3 [12]. Respon sensor naik seiring dengan meningkatnya konsentrasi amonia. Respon sensor PANI dengan komposit CuFe_2O_4 menunjukkan meningkat 10% pada konsentrasi amonia sebesar 5 ppm dibandingkan hanya material PANI saja, selain itu waktu pemulihan diperoleh sebesar 54 detik.



Gambar 2. (a) Respons PANI/ CuFe_2O_4 yang dibuat dengan polimerisasi in-situ dan sintesis fisik terhadap NH_3 pada suhu 20°C . (b) Respon PANI, CuFe_2O_4 dan sensor PANI/ CuFe_2O_4 terpolimerisasi in-situ terhadap NH_3 pada 20°C [12].

Perkembangan sensor gas amonia berbasis polianilina

Ada begitu banyak upaya dalam meningkatkan kinerja sensor berbasis polimer konduktif Polianilina, seperti meningkatkan sifat fisik dan

listrik dari polimer melalui modifikasi strukturnya serta penggunaan dopan yang ditambahkan ke dalamnya. Memodifikasi struktur polimer konduktif memainkan peran yang sangat penting dalam mengembangkan sensor gas NH_3 , di mana

struktur yang dikembangkan secara signifikan dapat meningkatkan sifat material penginderaan seperti memfasilitasi transfer elektron atau proton,

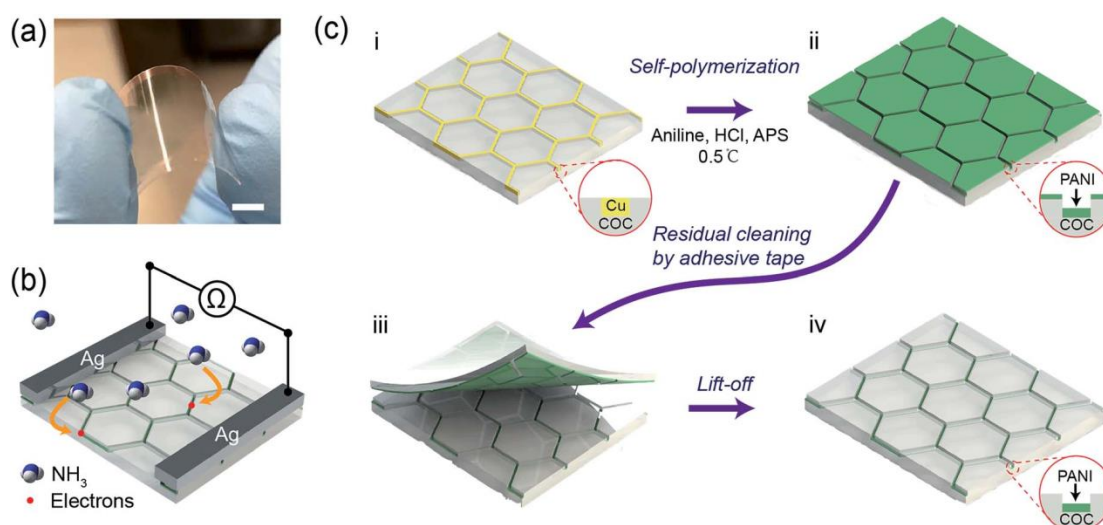
serta memastikan interaksi yang lebih baik antara film penginderaan dan gas analit[7].

Tabel 1. Ringkasan sensor gas NH₃ berbasis komposit polianilina.

No	Material penginderaan	Limit deteksi	Waktu pemulihan	Suhu (°C)	Referensi
1	PANI/SWCNT/HDPE	1-100ppm	200 detik	Ruangan	[5]
2	PANI-rGO	5-50 ppm	4 menit	Ruangan	[4]
3	PANI-CeO ₂	25-50 ppm	57,6 detik	Ruangan	[13]
4	PANI-RGO	100 ppb-100ppm	36-18 detik	Ruangan	[14]
5	PANI-CNTs	4-30 ppm	18-46 detik	Ruangan	[15]
6	PANI-Ag	5-100 ppm	3-5 menit	Ruangan	[16]
7	PANI-graphene	1-20 ppm	50-23 detik	Ruangan	[17]
8	Posfat-PANI-rGO	1 ppm	100 detik	Ruangan	[18]
9	PANI/MWCNT	200 ppb	30 detik	Ruangan	[19]
10	PANI-CNT	4 ppm	420-1045 detik	Ruangan	[8]
11	PANI/MWCNT	50-100 ppm	45-47 detik	Ruangan	[20]
12	PANI-GO	1-25 ppm	150-400 detik	Ruangan	[21]
13	PANI/MoS ₂ /SnO ₂	200 ppb	21-130 detik	Ruangan	[22]
14	PANI/SnO ₂	1-7 ppm	40 detik	20°C	[23]
15	PANI-Sr	0,013 ppm	42 detik	Ruangan	[24]
16	PANI/MXene	1 ppm	9 detik	Ruangan	[25]
17	PANI-rGO	46 ppb	75 detik	Ruangan	[26]

Sensor gas amonia berdasarkan film fleksibel polianilin pada pembusukanmakanan kaya proteinditemukan memiliki respon linier yang cepat ($t = 40$ detik),sensor ini stabil terhadap gas amonia dalam rentang konsentrasi 50-150 ppm di bawah kondisi operasi suhu kamar. Sensor ini juga diklaim dapat bekerja pada variasi kelembaban lingkungan[27]. Selanjutnya, polimer PANI berstrukturnano hierarkis yang disusun dalam mikromesh (Gambar 3), menunjukkan

sensitivitas kimia yang sangat baik terhadap gas amonia. Penginderaan sensor kinerja tinggi pada gas mmonia dengan konsentrasi dari 2,5 ppb hingga 100 ppm. Selanjutnya, tidak ada penurunan yang signifikan dalam kinerja penginderaan setelah 1000 siklus pemulihan [28]. Lebih lanjut, sensor PANI berbasis koloid menunjukkan respons yang baik terhadap konsentrasi amonia dalam kisaran ratusan ppb hingga puluhan ppm[29].



Gambar 3. Ilustrasi skema pembuatan mikromesh PANI heksagonal melalui polimerisasi anilin *in situ* pada templat mikromesh Cu[28].

Komposit polianilin (PANI) berbasis karbon menghasilkan peningkatan sensitivitas terhadap gas amonia, hal ini sebagai hasil dari kombinasi PANI semikonduktif tipe-p dan bahan nano semikonduktif tipe-n. Paparan gas amonia terhadap komposit menyebabkan dedoping simultan PANI dan peningkatan kedalaman lapisan pada heterojungsi. Fenomena ini memperbesar perubahan respons listrik komposit untuk meningkatkan sensitivitas. Saat ini jenis karbon sebagai komposit PANI yang telah banyak dikembangkan adalah *reduced Graphene Oxide* (rGO) dan *Carbon Nanotube*.

Komposit PANI berdasarkan nanotube karbon dan film polianilin diuji sebagai sensor gas amonia

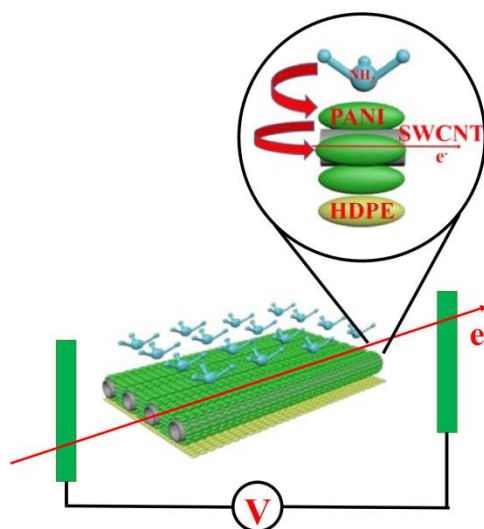
pada tiga pendekatan doping yang berbeda (asam sulfat, asam kampersulfonat, dan m-kresol). Sensitivitas tinggi polianilin terhadap amonia dikombinasikan dengan stabilitas karbon nanotube meningkatkan reproduktifitas sensor jika dibandingkan dengan polianilin biasa. Sensor yang dopingnya dilakukan dengan asam kampersulfonat, memberikan respon sensor terbaik untuk gas amonia (418%) jika dibandingkan dengan sensor lainnya (Tabel 2). Pengoperasian perangkat dalam konsentrasi amonia yang rendah menunjukkan proses adsorpsi yang kuat dengan batas deteksi 4 ppm[8].

Tabel 2. Karakteristik sensor, respons, waktu respons (T_{res}) dan waktu pemulihan (T_{pem}) pada 1000 ppm gas amonia pada suhu kamar[8].

No	Agen Redoping	Respons (%)	$T_{respons}$ (detik)	$T_{pemulihan}$ (detik)
1	H ₂ SO ₄	243,64 ± 24	121 ± 04	420 ± 20
2	HCSA	418,16 ± 44	167 ± 12	379 ± 25
3	HCSA + <i>m-cresol</i>	8,48 ± 0,6	267 ± 13	1045 ± 50

Gambar4. Mengilustrasikan mekanisme interaksi antara NH₃ dengan film komposit polianilina (PANI), komposit terdiri dari campuran PANI dengan *single-walled carbon nanotube* (SWCNT) pada film *high-density polyethylene* (HDPE) [2]. Amonia teradsorpsi pada permukaan PANI, respons penyerapan ini meningkat akibat pengaruh dari SWCNT. Elektron yang diberikan dari molekul NH₃ yang teradsorpsi berpindah

dengan mudah dari PANI ke SWCNT karena penghalang energi yang lebih rendah antara PANI dan SWCNT. Selain itu film HDPE yang menginduksi matriks PANI/SWCNT supaya tertata dengan baik, dan dengan demikian elektron berpindah lebih cepat di sepanjang rantai PANI. Sensor ini bekerja pada suhu ruangan dengan limit deteksi 1-100 ppm.



Gambar 4. Ilustrasi dari mekanisme sensor gas NH₃ pada film PANI/SWCNT/HDPE [2]

Modifikasi bentuk komposit dari SWCNT menjadi jadi MWCNT sangat berpengaruh terhadap nilai parameter sensor. Komposit PANI dengan *Multiwall Carbon Nanotubes* (MWCNT) telah dilakukan penginderaan terhadap amonia dengan konsentrasi 20-100 ppm pada suhu kamar[19]. Diamati bahwa respon penginderaan dari MWCNT dilapisi PANI ditingkatkan dari MWCNT dan PANI. Sensor ini memiliki kemampuan untuk mendeteksi amonia dengan sensitivitas tinggi (92% untuk 100 ppm), selektivitas respon cepat yang sangat baik (9 detik), dan waktu pemulihan (30 detik). Batas deteksi sensor ini ditemukan 200 ppb.

Nanokomposit polianilin (PANI)*reduced graphene oxide* (P-rGO) yang difungsikan dengan fosfat menunjukkan limit deteksi rendah terhadap NH_3 sebesar 1 ppm, serta stabilitas dan selektivitas yang baik[18]. Selain itu *nanosheet* PANI-RGO memiliki keunggulan efisiensi biaya, ramah lingkungan, pemulihan yang baik, selektivitas yang baik, dan dapat disintesis dalam skala besar. Selain itu, sensor menunjukkan kinerja penginderaan yang sangat baik terhadap NH_3 , Penelitian yang telah dilakukan didapat batas deteksi sebesar 46 ppb, dan respons pemulihan sekitar 75 detik[26].

Selain kompit terhadap karbon dan turunannya, PANI juga dapat ditingkatkan sensitivitasnya menggunakan komposit logam atau senyawa logam [6]. Sensor PANI-Sr menunjukkan selektivitas yang luar biasa dan sensitivitas yang sangat baik terhadap amonia (respon 498% hingga 100 ppm) dengan batas deteksi 0,013 ppm, dan waktu respons/pemulihan yang cepat (1 detik /42 detik) menuju 50 ppm pada suhu kamar. Sensor PANI-Sr juga menunjukkan reproduktifitas yang baik selama lima siklus[24].

KESIMPULAN

Polianilina (PANI) merupakan material yang sangat menjanjikan sebagai sensor gas amonia. Selain harga material yang murah, PANI memiliki keunggulan lain seperti mudah dipreparasi, stabilitas pada suhu kamar, ramah lingkungan, serta sifat konduktivitasnya mudah diatur. PANI dapat diatur stabilitas dan sensitivitasnya dengan menambahkan aditif kompositif seperti karbon dan turunnya, jenis dopan asam yang digunakan, serta logam dan senyawa logam.

REFERENSI

- [1] M. Insausti, R. Timmis, R. Kinnersley, and M. C. Rufino, "Advances in sensing ammonia from agricultural sources," *Science of the Total Environment*, vol. 706, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135124.
- [2] H. Shen *et al.*, "Intense Warming Will Significantly Increase Cropland Ammonia Volatilization Threatening Food Security and Ecosystem Health," *One Earth*, vol. 3, no. 1, 2020, doi: 10.1016/j.oneear.2020.06.015.
- [3] W. Wu, B. Wei, G. Li, L. Chen, J. Wang, and J. Ma, "Study on ammonia gas high temperature corrosion coupled erosion wear characteristics of circulating fluidized bed boiler," *Engineering Failure Analysis*, vol. 132, p. 105896, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105896>.
- [4] X. Huang *et al.*, "Reduced graphene oxide-polyaniline hybrid: Preparation, characterization and its applications for ammonia gas sensing," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, no. 42, pp. 22488–22495, 2012, doi: 10.1039/C2JM34340A.
- [5] T. Jiang, P. Wan, Z. Ren, and S. Yan, "Anisotropic Polyaniline/SWCNT Composite Films Prepared by in Situ Electropolymerization on Highly Oriented Polyethylene for High-Efficiency Ammonia Sensor," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 11, no. 41, pp. 38169–38176, Oct. 2019, doi: 10.1021/acsami.9b13336.
- [6] H. Bai and G. Shi, "Gas sensors based on conducting polymers," *Sensors*, vol. 7, no. 3, 2007. doi: 10.3390/s7030267.
- [7] D. Kwak, Y. Lei, and R. Maric, "Ammonia gas sensors: A comprehensive review," *Talanta*, vol. 204, 2019. doi: 10.1016/j.talanta.2019.06.034.
- [8] M. Eising, C. E. Cava, R. V. Salvatierra, A. J. G. Zarbin, and L. S. Roman, "Doping effect on self-assembled films of polyaniline and carbon nanotube applied as ammonia gas sensor," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 245, pp. 25–33, 2017, doi: 10.1016/j.snb.2017.01.132.

- [9] M. P. Diana, W. S. Roekmijati, and W. U. Suyud, "Why it is often underestimated: Historical Study of Ammonia Gas Exposure Impacts towards Human Health," in *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 73, doi: 10.1051/e3sconf/20187306003.
- [10] R. T. Xu *et al.*, "Half-Century Ammonia Emissions From Agricultural Systems in Southern Asia: Magnitude, Spatiotemporal Patterns, and Implications for Human Health," *GeoHealth*, vol. 2, no. 1, 2018, doi: 10.1002/2017GH000098.
- [11] S. A. Akbar, A. Mardhiah, N. Saidi, and D. Lelifajri, "The effect of graphite composition on polyaniline film performance for formalin gas sensor," *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, vol. 34, no. 3, 2021, doi: 10.4314/bcse.v34i3.14.
- [12] X. Wang, L. Gong, D. Zhang, X. Fan, Y. Jin, and L. Guo, "Room temperature ammonia gas sensor based on polyaniline/copper ferrite binary nanocomposites," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 322, p. 128615, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128615>.
- [13] L. Wang *et al.*, "Enhanced Sensitivity and Stability of Room-Temperature NH₃ Sensors Using Core-Shell CeO₂ Nanoparticles@Cross-linked PANI with p-n Heterojunctions," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 6, no. 16, pp. 14131–14140, Aug. 2014, doi: 10.1021/am503286h.
- [14] Y. Guo *et al.*, "Hierarchical graphene-polyaniline nanocomposite films for high-performance flexible electronic gas sensors," *Nanoscale*, vol. 8, no. 23, pp. 12073–12080, 2016, doi: 10.1039/C6NR02540D.
- [15] M. Eising, C. E. Cava, R. V. Salvatierra, A. J. G. Zarbin, and L. S. Roman, "Doping effect on self-assembled films of polyaniline and carbon nanotube applied as ammonia gas sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 245, pp. 25–33, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.132>.
- [16] S. Bai *et al.*, "Transparent conducting films of hierarchically nanostructured polyaniline networks on flexible substrates for high-performance gas sensors," *Small*, vol. 11, no. 3, 2015, doi: 10.1002/smll.201401865.
- [17] Z. Wu *et al.*, "Enhanced sensitivity of ammonia sensor using graphene/polyaniline nanocomposite," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 178, 2013, doi: 10.1016/j.snb.2013.01.014.
- [18] N. R. Tanguy, B. Wiltshire, M. Arjmand, M. H. Zarifi, and N. Yan, "Highly Sensitive and Contactless Ammonia Detection Based on Nanocomposites of Phosphate-Functionalized Reduced Graphene Oxide/Polyaniline Immobilized on Microstrip Resonators," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.1021/acsmi.9b21063.
- [19] D. Maity and R. T. R. Kumar, "Polyaniline Anchored MWCNTs on Fabric for High Performance Wearable Ammonia Sensor," *ACS Sensors*, vol. 3, no. 9, 2018, doi: 10.1021/acssensors.8b00589.
- [20] J. Ma *et al.*, "Multi-walled carbon nanotubes/polyaniline on the ethylenediamine modified polyethylene terephthalate fibers for a flexible room temperature ammonia gas sensor with high responses," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 334, May 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129677.
- [21] A. Javadian-Saraf, E. Hosseini, B. D. Wiltshire, M. H. Zarifi, and M. Arjmand, "Graphene oxide/polyaniline-based microwave split-ring resonator: A versatile platform towards ammonia sensing," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 418, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126283.
- [22] A. Liu *et al.*, "The gas sensor utilizing polyaniline/ MoS₂ nanosheets/ SnO₂ nanotubes for the room temperature detection of ammonia," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 332, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129444.
- [23] Q. Feng, H. Zhang, Y. Shi, X. Yu, and G. Lan, "Preparation and gas sensing properties of PANI/SnO₂ hybrid material," *Polymers*, vol. 13, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/polym13091360.
- [24] S. Benhouhou, A. Mekki, M. Ayat, and N. Gabouze, "Facile Preparation of PANI-Sr Composite Flexible Thin Film for Ammonia Sensing at Very Low Concentration," *Macromolecular Research*, vol. 29, no. 4, pp. 267–279, Apr. 2021, doi: 10.1007/s13233-021-9034-3.

-
- [25] X. Wang *et al.*, "In situ polymerized polyaniline/MXene (V2C) as building blocks of supercapacitor and ammonia sensor self-powered by electromagnetic-triboelectric hybrid generator," *Nano Energy*, vol. 88, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106242.
- [26] J. Chang *et al.*, "Polyaniline-Reduced Graphene Oxide Nanosheets for Room Temperature NH₃ Detection," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 4, no. 5, pp. 5263–5272, May 2021, doi: 10.1021/acsnm.1c00633.
- [27] S. Matindoust, A. Farzi, M. Baghaei Nejad, M. H. Shahrokh Abadi, Z. Zou, and L. R. Zheng, "Ammonia gas sensor based on flexible polyaniline films for rapid detection of spoilage in protein-rich foods," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, no. 11, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-6471-z.
- [28] J. Cai, C. Zhang, A. Khan, C. Liang, and W. di Li, "Highly transparent and flexible polyaniline mesh sensor for chemiresistive sensing of ammonia gas," *RSC Advances*, vol. 8, no. 10, pp. 5312–5320, 2018, doi: 10.1039/c7ra13516e.
- [29] T. Syrový *et al.*, "Gravure-printed ammonia sensor based on organic polyaniline colloids," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 225, pp. 510–516, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.snb.2015.11.062.