

## SEBUAH REVIEW: POLIANILIN (PANi) SEBAGAI BAHAN AKTIF PENDETEKSI ASAM

<sup>1)</sup>Rosyi Aviva Lydia Da Vega, <sup>2)</sup>Nugrahani Primary Putri

<sup>1)</sup> Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: rosyivega16030224039@mhs.unesa.ac.id

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

### Abstrak

Artikel ini berisi tentang aplikasi polianilin (PANi) sebagai bahan aktif pendeteksi asam yang terdiri dari asam kuat yaitu hidrogen klorida (HCl) dan asam lemah terdiri dari hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), asam askorbat (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>), dan asam asetat (CH<sub>3</sub>COOH). Analit tersebut merupakan senyawa yang biasa ditemui dalam kehidupan sehari-hari. Penggunaan PANi dan komposisinya dapat meningkatkan selektivitas dan sensitivitas yang baik untuk mendeteksi keberadaan senyawa asam. Pembentukan PANi dan komposisinya menjadi lapisan tipis, pelet, dan elektroda menarik perhatian sebagai bahan aktif pendeteksi asam. Berdasarkan review ini dapat diketahui bahwa semakin besar konsentrasi analit maka sensitivitas yang dihasilkan juga semakin besar. Nilai konsentrasi minimal analit HCl, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>, dan CH<sub>3</sub>COOH yang mampu dideteksi oleh PANi dan komposisinya masing – masing adalah 0,2 ppm; 0,05 ppm; 4,7 ppm; dan 1 ppm.

**Kata Kunci:** PANi, Sensitivitas, Selektivitas, Asam

### Abstract

This article contains the application of polyaniline (PANi) as an active acid detection ingredient consisting of strong acids namely hydrogen chloride (HCl) and weak acids consisting of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S), ascorbic acid (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>), and acetic acid (CH<sub>3</sub>COOH). This analyte is a compound commonly found in daily life. The use of PANi and its composites can increase selectivity and good sensitivity for acid compatibility. The formation of PANi and its composites into thin layers, pellets, and electrodes attracts attention as active ingredients for acid detection. Based on this review more analytes can be obtained, the resulting sensitivity is also greater. The minimum concentration of analytes HCl, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>, and CH<sub>3</sub>COOH that can be detected by PANi and its composites are 0.2 ppm; 0.05 ppm; 4.7 ppm; and 1 ppm.

**Keywords:** PANi, Sensitivity, Selectivity, Acid

### PENDAHULUAN

Dalam kehidupan sehari-hari tidak jarang kita berinteraksi dengan senyawa kimia. Ketersediaan sensor kimia memiliki peran penting dalam pemantauan gas atmosfer, proses industri, pengontrolan kualitas makanan, serta dalam diagnosis biomedis (Castilo-Ortega et al, 2007). Industri dalam menjalankan produksinya menghasilkan senyawa beracun dan berbahaya berupa polutan dalam bentuk gas dan cair yang dapat menyebabkan masalah parah bagi lingkungan (Luan et al, 2017). Selain itu gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh proses produksi dan gas buang kendaraan bermotor jika bercampur dengan air hujan akan membentuk asam karbonat (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) yang menyebabkan terjadinya hujan asam (Personal et al, 2019). Kegiatan lain yang juga dapat menimbulkan limbah kimia adalah pada laboratorium penelitian. Jenis bahan kimia yang umum digunakan meliputi asam, basa, bahan kimia organik maupun anorganik (Raimon, 2011). Terdapat beberapa jenis asam dan basa yang sering digunakan meliputi asam klorida, asam sulfat, asam karboksilat, asam asetat, dan

natrium hidroksida. Berbagai unsur kimia tersebut apabila dibuang secara langsung tanpa pengolahan yang efektif maka akan memengaruhi kualitas air.

Bahan kimia yang digunakan sebagai sensor harus memiliki persyaratan tertentu sesuai dengan kondisi operasi seperti kemampuan selektivitas, sensitivitas, respon kinetik, stabilitas, dan penyimpanan jangka panjang (Comini et al, 2016). Material oksida logam adalah bahan pertama yang dikembangkan sebagai sensor kimia *conductometric* (tipe transduksi berdasarkan perubahan konduktivitas listrik) berupa film tebal yang lebih stabil dibandingkan dengan sensor dari bahan kimia organik (Zappa et al, 2017). Bahan oksida logam seperti WO<sub>3</sub>, ZnO, SnO<sub>2</sub> dan TiO<sub>2</sub> menarik perhatian karena kegunaannya sebagai sensor kimia karena memiliki sifat elektronik yang baik, stabilitas termal, dan kimia yang tinggi (Balasubramani et al, 2020). Sensor berbasis oksida logam dapat dikembangkan untuk berbagai aplikasi, namun memiliki kekurangan yaitu selektivitasnya rendah, tidak dapat digunakan dalam jangka waktu panjang, suhu operasi yang relatif tinggi

sehingga membutuhkan konsumsi daya tinggi (Bachhav et al, 2015).

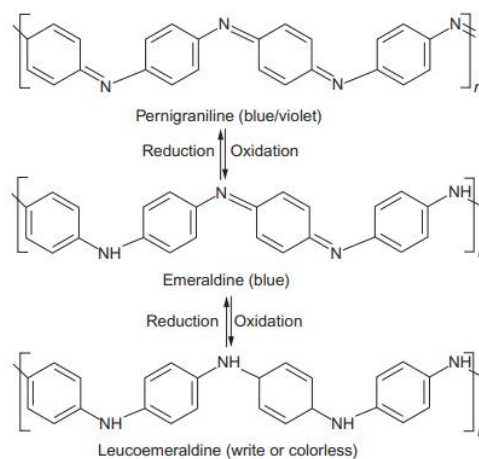
Penggunaan film konduktif berbasis polimer telah banyak dikembangkan untuk aplikasi sel surya, kapasitor, detektor polutan untuk perairan dan industri, fotovoltaik dan sensor (Sabatini et al, 2018). Sensor gas berbasis polimer konduktif telah banyak digunakan karena kemampuannya membentuk lapisan selektif sebagai tempat interaksi kimia dengan gas analit (Janata et al, 2003). Penambahan polimer pada oksida logam menghasilkan nanomaterial baru yang memiliki struktur dan morfologi yang lebih luas sehingga dapat meningkatkan sensitivitas, selektivitas, dan penyimpanan jangka panjang pada sensor (Viter et al, 2019). Mekanisme penginderaan pada polimer konduktif melibatkan adsorpsi dan desorpsi ion, perubahan volume berat, reaksi redoks, dan perubahan konformasi rantai (Yoon, 2013). Polimer konduktif mengandung  $\pi$ -elektron backbone yang bertanggung jawab terhadap sifat konduktivitas listrik, energi transisi optik, dan digunakan untuk meningkatkan selektivitas dan fleksibilitas sensor (Gupta et al, 2006). Polimer konduktif seperti polianilin (PANi), polietiofena (PTh), dan polipirol (PPy) dikembangkan sebagai lapisan aktif sensor kimia karena memiliki sensitivitas yang tinggi, dan kemampuan yang reversibel pada sifat optik dan listrik saat terpapar zat cair maupun gas (Suhail et al, 2019).

Polianilin (PANi) merupakan salah satu jenis polimer konduktif yang menarik perhatian. Berdasarkan aspek kestabilan di udara, PANi memiliki kestabilan yang baik diantara bahan polimer konduktif yang lain seperti: Poliasetilen (PA), Polidiasetilen (PdA), Poltiofen (PT) dan Poliperol (PPy) (Wibawanto, 2012). PANi menawarkan beberapa keuntungan karena mudah disintesis dengan metode kimia maupun elektrokimia, memiliki stabilitas lingkungan yang baik, serta konduktivitas listrik yang dapat disesuaikan (Seo et al, 2018). PANi memiliki kekuatan mekanik dan stabilitas kimia yang buruk maka diperlukan penggabungan dengan material lain seperti logam untuk memperbaiki kekurangan tersebut (Majunata et al, 2019). Selain material logam penambahan material lain seperti selulosa dapat memperbaiki sifat hidrofilik PANi karena selulosa memiliki sifat higroskopis yang kuat. Semakin banyak selulosa yang ditambahkan pada PANi semakin banyak pula area untuk menyerap molekul sehingga cocok diaplikasikan sebagai sensor kelembaban (Putri et al 2018). Nanokomposit PANi/SnO<sub>2</sub> (Nadaf et al, 2015) telah berhasil digunakan untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S pada suhu ruang. Gaikwad et al (2017) telah berhasil membuat sensor gas dengan selektivitas yang tinggi terhadap gas amonia pada suhu ruang dari nanokomposit PANi dengan ZnO dan GO. Selain itu nanokomposit PANi

dengan karbon juga menunjukkan sensitivitas yang baik dalam mendeteksi uap amonia, metanol, etanol, dan aseton (Lobotka et al, 2011). Dalam penerapannya sebagai biosensor *nano hybrid* PANi dengan graphen dan emas digunakan untuk mendeteksi asam urat, dopamin, dan asam askorbat (Shi et al, 2017). Nanopartikel emas ditambahkan pada sensor berbasis PANi karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, konduktivitas yang baik, serta kelarutan yang baik. Oleh karena itu dilakukan analisis selektivitas dan sensitivitas PANi sebagai bahan aktif sensor pendeteksi asam.

## LANDASAN TEORI

Polianilin (PANi) tersusun dari monomer anilin (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>NH<sub>2</sub>) yang merupakan senyawa turunan dari benzena dimana atom H nya diganti dengan gugus -NH<sub>2</sub>. Anilin termasuk jenis polimer hidrokarbon hidrofobik karena mempunyai sifat sukar larut dalam air. PANi memiliki gugus teroksidasi dan tereduksi terdiri dari cincin benzoid dan quinoid yang dihubungkan oleh atom hidrogen melalui ikatan amina (-NH-) dan imina (=N-). Cincin benzoid berubah menjadi cincin quinoid saat bereaksi dengan zat oksidatif, menyebabkan konduktivitas PANi meningkat. Sedangkan, cincin quinoid berubah menjadi benzoid saat bereaksi dengan zat reduktif yang menyebabkan konduktivitas PANi berkurang (Widiyanti et al, 2018).



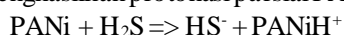
**Gambar 1.** Struktur Molekul PANi (Ucankus et al, 2018).

Berdasarkan tingkat oksidasi, PANi terdiri dari 3 bentuk yaitu *leucoemeraldine* (tereduksi penuh), *emeraldine* (setengah teroksidasi), dan *pemigraniline* (teroksidasi penuh) (Bagherzadeh et al, 2017). Bentuk *emeraldine* dibagi menjadi dua yaitu *emeraldine base* (EB) bersifat insulator dan *emeraldine salt* (ES) bersifat konduktif. Doping asam kuat terhadap PANi EB menghasilkan PANi ES dengan konduktivitas yang tinggi hingga 100

S/cm (Savest et al, 2018). *Leucoemeraldine* dan *pemigraniline* dapat menjadi konduktif ketika di doping dengan asam, namun konduktivitas yang dihasilkan lemah (Kumari et al, 2020).

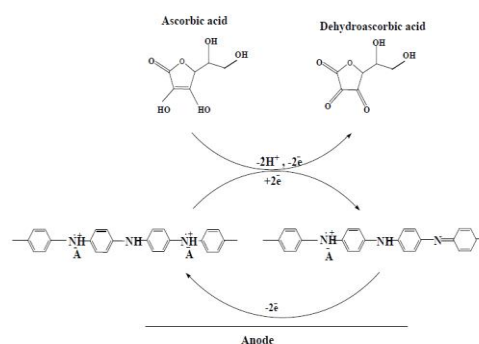
Menurut Dong et al (2016) molekul asam kuat cenderung menyebar pada rantai PANi sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listrik sedangkan molekul asam lemah dapat meningkatkan kelarutan polimer namun menghasilkan konduktivitas yang lebih rendah. Selain itu senyawa asam memiliki  $pH < 7$ ,  $pH$  merupakan jumlah konsentrasi ion hidrogen yang menyatakan sifat asam maupun basa dalam larutan (Ngafudin et al, 2017). Asam lemah memiliki  $pH \geq 3$  dan strukturnya lebih encer. Semakin tinggi nilai  $pH$  maka nilai  $pK_a$  semakin kecil dan kemampuan untuk donor proton juga semakin besar (Richter et al, 2007). Dalam aplikasinya sebagai sensor kimia terjadi interaksi antara paparan analit dan permukaan PANi yang menghasilkan reaksi reduksi dan oksidasi, *swelling*, perubahan resistansi, transfer muatan, dll (Torad et al, 2016). Sensor kimia menurut mode transduksi sinyal kimia terbagi atas *Amperometric* (sistem pengukuran arus akibat adanya reduksi dan oksidasi saat reaksi elektrokimia) (Hussain et al, 2014), *chemiresistive* atau *conductometric* (sensor yang mengukur perubahan konduktansi atau resistansi bahan aktif akibat interaksi dengan analit) (Song et al, 2013), *colorimetric* (sensor optik yang menunjukkan perubahan warna saat berinteraksi dengan analit target) (Ebradize et al, 2019), dan *piezoelectric* (sensor yang bekerja menggabungkan antara penambahan massa dengan perubahan frekuensi akibat interaksi dengan analit) (Rouhillah et al 2015). Pada penelitian yang dilakukan oleh Thomton et al (2018) nanofiber PANi yang terkena paparan uap asam kuat HCl menghasilkan perubahan warna pada nanofiber yang diidentifikasi sebagai PANi jenis *emeraldine salt*. Perubahan warna tersebut hasil dari interaksi antara molekul uap HCl dan molekul PANi karena pada penelitiannya menggunakan mode transduksi *colorimetric*. Dapat dikatakan bahwa interaksi dengan molekul asam kuat dapat menyebabkan konduktivitas PANi meningkat.

Pendopingan PANi dengan asam membentuk semikonduktor type- p, saat terjadi penginderaan dengan gas asam menghasilkan protonasi parsial PANiH<sup>+</sup>.



Sehingga konduktivitas listrik PANi berubah akibat dari interaksi antara molekul gas dan permukaan bahan aktif yang diikuti dengan transfer elektron dari atom nitrogen pada ikatan amina (Mousavi et al, 2016). Ketika terjadi transfer elektron konduktivitas pada *hole* meningkat, akibatnya dapat menghasilkan resistansi pada elemen penginderaan (Torad et al, 2016). Mekki et al (2014) pada penelitiannya menjelaskan mekanisme pendeteksian

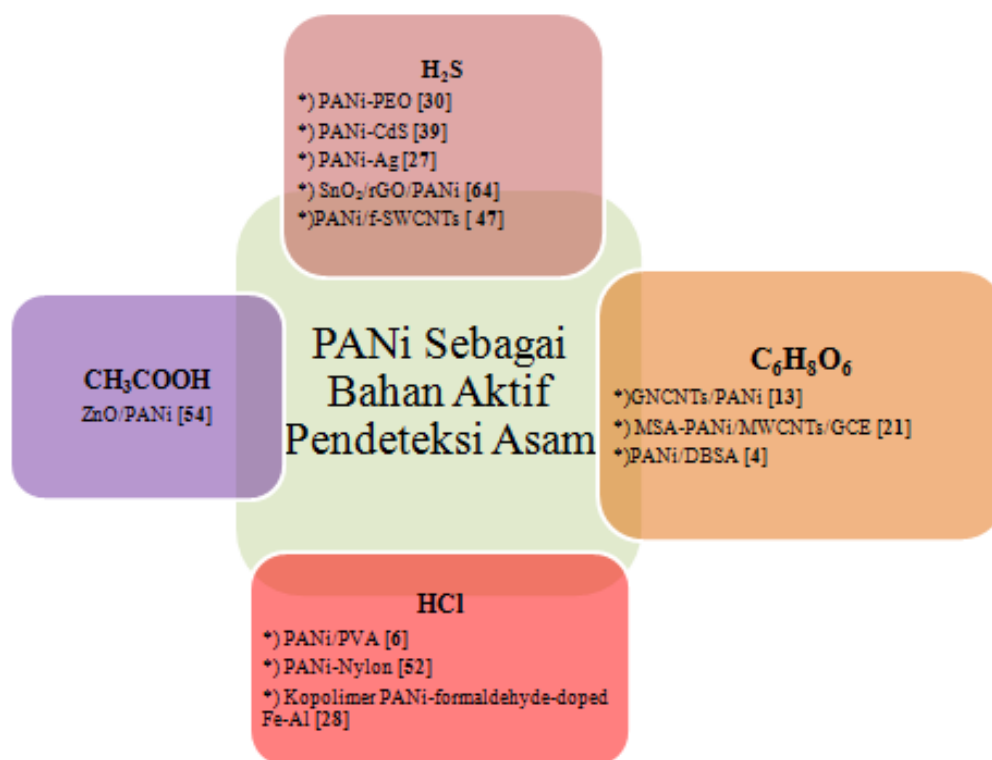
gas H<sub>2</sub>S oleh PANi. Berdasarkan persamaan reaksi kimia H<sub>2</sub>S menghasilkan ion kation H<sup>+</sup> dan anion HS<sup>-</sup>. Saat terjadi paparan gas H<sub>2</sub>S anion berperan dalam pembentukan muatan positif (N<sup>+</sup>) pada cincin PANi dan berperan sebagai proton pada lapisan. Karena kemampuan berpindah H<sup>+</sup> lebih besar daripada HS<sup>-</sup> sehingga dapat meningkatkan sedikit konduktivitas listrik PANi saat terpapar gas. Pada penelitiannya mode transduser yang digunakan dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S adalah *chemiresistive* dimana saat terjadi interaksi antara gas analit dan lapisan aktif akan menyebabkan perubahan resistansi. Seiring meningkatnya konsentrasi gas maka nilai resistansi yang dihasilkan juga akan meningkat, dimana hasil tersebut dapat digunakan untuk mengetahui nilai sensitivitas sensor. Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh Bilal et al (2019) bahwa saat PANi didoping dengan (*deodecylbenzene sulfonic acid*) DBSA. Interaksi antara rantai PANi terkonjugasi berkurang karena asam lemah DBSA memiliki anion *deodecyl* C<sub>12</sub>H<sub>25</sub> yang berperan pada interaksi non polar dengan media cair. Saat PANi tersebut digunakan untuk mendeteksi asam askorbat terjadi ikatan parsial antara H<sup>+</sup> dari asam askorbat dan N<sup>+</sup> dari PANi akibatnya meningkatkan jarak antar rantai PANi. Sehingga merubah bentuk *emeraldine salt* menjadi *pemagranniline* dan asam askorbat menjadi *dehydroascorbic acid*. Pendopingan asam lemah pada PANi menghasilkan bentuk PANi dengan konduktivitas yang rendah.



**Gambar 2.** Mekanisme Pendeteksian Asam Askorbat Oleh PANi (Bilal et al, 2019).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

PANi berbasis nanofiber dan nanokomposit menunjukkan penginderaan yang baik untuk mendeteksi analit dari asam kuat dan asam lemah diantaranya: Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S), Asam Asetat (CH<sub>3</sub>COOH), Asam Askorbat (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>), dan Hidrogen Klorida (HCl). Beberapa metode fabrikasi sensor yang digunakan adalah polimerisasi kimia, polimerisasi elektrokimia, spin coating, dll. Terdapat informasi hasil uji terhadap sensor seperti batas deteksi, rentang deteksi, sensitivitas, waktu respon dan waktu pemulihan.



Gambar 3. PANi dan Kompositnya Sebagai Pendeteksi Asam (angka menunjukkan urutan referensi)

### 1. PANi Untuk Deteksi Asam Kuat

#### • PANi untuk Mendeteksi Hidrogen Klorida (HCl)

Asam Klorida (HCl) adalah asam mineral kuat, bersifat korosif, dan tidak berwarna. Asam klorida berasal dari limbah industri dan pembakaran limbah yang mengandung plastik (Matsuguchi et al, 2015). Pada kegiatan industri asam klorida digunakan sebagai pereaksi kimia untuk memproduksi plastik dan poliuretan. Selain itu digunakan juga untuk pemrosesan hidrometallurgi, produksi hidrogen, produksi alumina dan titanium dioksida, aktivitas sumur minyak, dan sintesis *chlor dioksida* (Speight, 2017). Penggunaan HCl dalam skala besar yang tidak terkontrol dapat menimbulkan masalah pada kesehatan dan lingkungan. HCl dapat mengasamkan tanah dan air, dan merusak organisme yang lain (Tang et al, 2020). HCl dalam bentuk gas dapat merusak lapisan ozon atmosfer dan sebagai sumber dari hujan asam (Zhang et al, 2018). *American National Standard Institute* telah menetapkan konsentrasi maksimum HCl yang diperbolehkan dan batas bahaya terhadapnya sebesar 7,5 ppm dan 150 ppm. Paparan HCl dalam jangka panjang dapat menimbulkan iritasi mata, saluran pernapasan, kerusakan mukosa, bahkan kematian (Tang et al, 2020). Oleh karena itu perlu dikembangkan sensor untuk mendeteksi HCl yang memiliki sensitivitas dan selektivitas tinggi.

Banerjee et al (2014) telah mengembangkan sensor HCl dalam lingkungan berair menggunakan nanofiber

PANi yang dikuatkan dengan lapisan tipis nanokomposit polivinil alkohol (PVA). Metode sintesis yang digunakan adalah polimerisasi in-situ dalam cairan PVA dan gliserol sebagai plasticizer. Setelah dilakukan polimerisasi selama 24 jam larutan dilapiskan pada salah satu sisi *quartz crystal microbalance* (QCM) menggunakan teknik *dip coating*. QCM diuji sensitivitasnya menggunakan beberapa cairan diantaranya asam mineral (HCl), asam organik, dan garam dengan konsentrasi 10, 50, 100, 500, dan 1000 (ppm). Sensitivitas QCM diamati melalui pergeseran frekuensi akibat penambahan massa pada kristal kuarsa. Sensitivitas relatif sensor dapat diketahui melalui persamaan:

$$S = \frac{F_A - F_0}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

$F_0$  merupakan frekuensi QCM pada media cairan tanpa adanya analit, sedangkan  $F_A$  merupakan frekuensi QCM pada media cair dengan tambahan analit. QCM memiliki sensitivitas yang tinggi dalam mendeteksi HCl pada media berair. Sensitivitas relatif yang dihasilkan 0,08%; 0,2%; 0,3%; 0,31%; dan 0,34%. Sensitivitas sensor yang tinggi didukung oleh morfologi nanofiber PANi yang diperkuat lapisan tipis nanokomposit PVA menyediakan luas permukaan yang tinggi untuk berinteraksi dengan analit. Kemampuan selektivitas sensor untuk mendeteksi HCl dibandingkan dengan analit lainnya

dapat diklarifikasi bahwa respon penginderaan dari polimer konduktif secara umum karena adanya proses doping/de-doping pada polimerisasi. Derajat keasaman ( $pK_a$ ) memiliki peran penting dalam proses protonasi. Nilai  $pK_a$  gugus nitrogen pada PANi yaitu amina ( $NH^{2+}$ ) dan imin ( $NH^+$ ) memiliki nilai 2,5 dan 5,5. Maka untuk memprotonasi kedua gugus tersebut diperlukan komponen yang memiliki  $2,5 < pK_a < 5,5$ . HCl merupakan asam kuat dengan  $pK_a$  2,5 selain itu jari-jari Cl<sup>-</sup> yang berukuran  $\pm 160$  pm mudah untuk masuk ke matriks nanokomposit yang menyebabkan pergeseran frekuensi kristal kuarsa.

Thornton et al (2018) juga mengembangkan pendeteksi uap HCl dengan teknik *colorimetric* (perubahan warna) dengan *nanofiber* PANi pada matriks nylon menggunakan metode *elektrospinning* dengan batas deteksi uap HCl 0,09 ppm. Setengah bagian nanofiber PANi masuk ke dalam wadah dipaparkan secara langsung pada uap HCl sedangkan setengah bagian yang lain di tutup dan berada diluar wadah. Setelah 5 menit terjadi perubahan warna pada nanofiber, bagian yang terpapar langsung oleh uap berwarna biru yang menandakan PANi *emeraldine base* dan bagian yang tertutup berwarna hijau yang menandakan *emeraldine salt*. Sensor PANi dengan teknik *colorimetric* ini tidak dapat digunakan dalam jangka panjang. Karena sensor *colorimetric* ketika digunakan secara berulang tidak menyebabkan naiknya batas deteksi uap atau gas target. Namun pada penelitian ini batas deteksi konsentrasi gas target naik menjadi 0,16 ppm yang ditandai perubahan warna pada nanofiber lebih tebal. Hal tersebut terjadi karena berkurangnya difusi dopan anion. Saat dopan pada PANi menurun jumlah uap HCl yang digunakan untuk merubah warna pada nanofiber semakin meningkat.

Misra et al (2004) membuat sensor gas HCl yang sensitif dan memiliki respon yang cepat dari nanokomposit kopolimer PANi-fomaldehid yang didoping dengan Fe-Al menggunakan metode evaporasi tema1. Saat kopolimer PANi-fomaldehid dengan rasio berat Fe-Al (95:5) diberikan perlakuan tema1 60-360 °C menunjukkan bahwa kopolimer mengalami disosiasi dan dekomposisi jika dipanaskan lebih dari 280°C. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan lapisan tipis yang digunakan sebagai sensor efisien untuk mendeteksi gas HCl. Waktu respon yang dimiliki oleh sensor 10 s lebih cepat daripada sensor yang berasal dari oksida logam yaitu 1-2 menit. Sedang waktu pemulihan sensor adalah 5-10 (s) setelah itu sensor dapat dipakai kembali. Sensor dioperasikan pada suhu ruang sehingga waktu simpan sensor lebih lama karena suhu operasi yang tinggi menyebabkan waktu simpan sensor lebih singkat.

Misra et al (2004) membuat sensor gas HCl yang sensitif dan memiliki respon yang cepat dari nanokomposit kopolimer PANi-fomaldehid yang didoping dengan Fe-Al menggunakan metode evaporasi tema1. Saat kopolimer PANi-fomaldehid dengan rasio berat Fe-Al (95:5) diberikan perlakuan tema1 60-360 °C menunjukkan bahwa kopolimer mengalami disosiasi dan dekomposisi jika dipanaskan lebih dari 280°C. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan lapisan tipis yang digunakan sebagai sensor efisien untuk mendeteksi gas HCl. Waktu respon yang dimiliki oleh sensor 10 s lebih cepat daripada sensor yang berasal dari oksida logam yaitu 1-2 menit. Sedang waktu pemulihan sensor adalah 5-10 (s) setelah itu sensor dapat dipakai kembali. Sensor dioperasikan pada suhu ruang sehingga waktu simpan sensor lebih lama karena suhu operasi yang tinggi menyebabkan waktu simpan sensor lebih singkat.

## 2. PANi Untuk Deteksi Asam Lemah

### • PANi sebagai Pendeteksi Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ )

Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ) merupakan gas yang tidak berwarna, beracun, korosif, mudah terbakar (Phuoc et al, 2020).  $H_2S$  berasal dari produksi oleh limbah, produksi industri minyak bumi, gas alam, dan tabung batubara (Eom et al, 2019). Pada konsentrasi rendah (<10 ppm) dapat menimbulkan masalah kesehatan pada manusia. Paparan gas  $H_2S$  dapat mengakibatkan iritasi mata, gejala pemapasan, syaraf, amnesia dan jika terpapar dalam jumlah besar dapat mengakibatkan kematian (Beihe et al, 2019). Ambang batas konsentrasi  $H_2S$  yang ditetapkan oleh *American National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) adalah 100 ppm (Li et al, 2019). Sehingga diperlukan divais yang sensitif dan selektif yang mampu mendeteksi keberadaan  $H_2S$ .

Sensor film tipis untuk mendeteksi gas  $H_2S$  telah dikembangkan oleh Mousavi et al (2016) yaitu *nanofiber* PANi yang didoping dengan *camphorsulfonic acid-β* (HCSA) dan penambahan zat pengikat (*binder*) berupa *polyethylene oxide* (PEO) dengan metode *elektrospinning*. PEO ditambahkan untuk meningkatkan viskositas larutan sehingga dapat menghasilkan *nanofiber* yang memiliki luas permukaan yang tinggi. *Nanofiber* dengan luas permukaan yang tinggi dapat meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor. Substrat dibuat di mikroelektrik karbon konduktif pada kertas saring. Sensor diuji pada *chamber* tertutup dengan sumber tegangan 2 V dengan resistansi 800 kΩ – 6,5 MΩ dan konsumsi daya sensor yaitu 0,6 – 5 (μW). Kelembaban (RH) memengaruhi pembentukan *nanofiber*, RH 30% dan 50% dipilih untuk pembuatan *nanofiber* karena menghasilkan nanofiber yang berbentuk panjang dan kontinu. PANi yang terbentuk pada substrat merupakan semikonduktor tipe-p. Sensitivitas sensor di peroleh dari perubahan resistansi PANi-PEO saat terpapar oleh gas melalui persamaan:

$$\left(\frac{R_a - R_0}{R_0}\right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

$R_0$  merupakan resistivitas awal sebelum terpapar oleh analit sedangkan  $R_a$  adalah resistivitas setelah terpapar oleh analit. Sehingga menghasilkan sensitivitas sebesar 5%, 13,5%, dan 25% untuk konsentrasi gas  $H_2S$  1, 5, dan 10 (ppm). Selektivitas sensor diketahui melalui pengujian terhadap gas lain yaitu aseton dan nitrogen dioksida ( $NO_2$ ). Berdasarkan pengujian tersebut sensor PANi-PEO menunjukkan selektivitas yang tinggi dalam mendeteksi 1 ppm gas  $H_2S$  dibandingkan 2 gas yang lain. Stabilitas sensor dalam jangka panjang diuji selama 45 hari pada silinder tekanan rendah setelah itu diamati ada atau tidaknya perubahan sensitivitas pada sensor. Sensitivitas sensor menurun menjadi 0,7 %; 2 %; dan 4,7 % dengan konsentrasi gas  $H_2S$  1, 5, dan 10 (ppm). Sensor PANi-

PEO dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S memiliki batas kelembaban. Pengujian sensor dilakukan pada RH 0 %, 35 % dan 70 % didapatkan bahwa nilai resistansi *nanofiber* setelah terpapar gas H<sub>2</sub>S adalah 6,3; 5,4; dan 0,8 (MΩ). Pada saat RH tinggi >70% mengakibatkan berkurangnya ruang untuk interaksi antara molekul gas H<sub>2</sub>S dengan permukaan sensor, sehingga memengaruhi pendopongan molekul PANi. Pada dasarnya molekul H<sub>2</sub>S dipermukaan PANi mampu menarik molekul air yang kemudian membentuk ikatan lemah karena keduanya memiliki sifat polar. Sehingga pada permukaan sensor PANi-PEO terjadi deprotonasi yang mengakibatkan resistansi sensor meningkat. Jika gas H<sub>2</sub>S tidak terdapat pada lapisan sensor, maka kelembaban pada permukaan PANi-PEO akan kembali ke tingkat sebelumnya dan resistansi lama-kelamaan akan menurun.

Raut et al (2012) membuat nanokomposit PANi-CdS untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S. Proses pembuatan nanokomposit yaitu dengan membuat terlebih dahulu nanokristal CdS (50 wt%) yang berasal *cadmium acetate* (Cd(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) dengan metode sol gel dan serbuk PANi yang dibuat menggunakan sintesis polimerisasi kimia oksidatif. Kemudian kedua bahan tersebut dilarutkan dengan *m-cresol* untuk membuat larutan yang homogen. Dalam aplikasinya sebagai sensor, PANi-CdS ditumbuhkan pada substrat kaca melalui metode *spin coating*. Penambahan CdS pada PANi menghasilkan struktur film sangat berpori dengan jaringan yang saling terhubung dan luas permukaan yang tinggi memungkinkan terjadinya proses pendopongan dengan cepat. Sensitivitas sensor PANi-CdS diketahui melalui perubahan resistansi ketika terpapar gas pada suhu ruang. Pengukuran resistansi menggunakan elektroda perak yang diendapkan pada film PANi-CdS. PANi-CdS ditempatkan pada wadah kedap udara 250 cc dan sejumlah konsentrasi gas disuntikkan pada wadah untuk memantau respon sensor terhadap masing-masing gas. Film PANi-CdS menunjukkan selektivitas tinggi dalam mendeteksi 20 ppm gas H<sub>2</sub>S dibandingkan dengan 100 ppm CH<sub>3</sub>-OH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>-OH, NO<sub>2</sub>, dan NH<sub>3</sub>. Pemantauan respon film sensor PANi-CdS dengan konsentrasi gas H<sub>2</sub>S 20, 40, 60, 80, dan 100 (ppm) menunjukkan peningkatan resistansi pada sensor seiring dengan meningkatnya nilai konsentrasi paparan gas. Sensitivitas yang dihasilkan meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi gas H<sub>2</sub>S yaitu 14 %, 29 %, 40 %, 45 %, dan 48 %. Ketika gas menguap pada permukaan PANi-CdS resistansi akan menurun secara bertahap. Peningkatan respon sensor yang cepat disebabkan tersedianya zat reaktif pada lapisan sensor serta luas permukaan yang tinggi memungkinkan terjadinya adsorpsi gas. Namun laju peningkatan sensitivitas sensor melambat pada konsentrasi gas H<sub>2</sub>S yang lebih tinggi. Hal tersebut dapat

disebabkan berkurangnya luas permukaan pada film sensor PANi-CdS untuk mengadsorpsi gas. Waktu respon sensor untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S dengan konsentrasi 20-100 (ppm) adalah 71 s - 41 s, sedangkan waktu pemulihan sensor adalah 345 s - 518 s. Kestabilan sensor PANi-CdS diuji selama 30 hari, pada mulanya sensor menunjukkan kestabilan 45 % kemudian setelah 15 hari menurun menjadi 35%.

Mekki et al (2014) membuat sensor gas H<sub>2</sub>S dengan photo polimerisasi PANi dengan penambahan AgNO<sub>3</sub> pada substrat *polietilena terephthalate* (BOPET) yang dimodifikasi dengan *(3-aminopropyl) trimethoxysilane* (APTMS) menghasilkan film PANi-Ag. Modifikasi permukaan BOPET dengan APTMS untuk meningkatkan adhesi PANi-Ag sehingga terbentuk struktur nano-brush dengan luas permukaan yang besar. Pengukuran pengideraan gas dengan memasang elektroda emas (Au) yang diendapkan secara termal pada film. Elektroda emas dipilih karena tidak bereaksi dengan gas uji. Film sensor PANi-Ag ditempatkan pada chamber stainless steel anti bocor yang kemudian elektroda dihubungkan dengan sumber listrik. Gas diukur dengan menerapkan tegangan sebesar 1 V. Gas H<sub>2</sub>S merupakan asam lemah yang tidak dapat melakukan proses pendopongan kepada PANi secara penuh. Keberadaan AgNO<sub>3</sub> pada pembuatan film PANi-Ag meningkatkan kinerja sensor dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S. Sensor PANi-Ag dengan konsentrasi AgNO<sub>3</sub> 2M menghasilkan selektivitas yang tinggi terhadap gas 10 ppm H<sub>2</sub>S dibandingkan dengan gas yang lain seperti NO<sub>2</sub>, NO, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>H<sub>3</sub>OH, dan CO. Konsentrasi penambahan AgNO<sub>3</sub> yang tinggi dalam pembuatan film PANi-Ag menyebabkan kinerja sensor kurang reaktif. Hal tersebut diakibatkan matriks PANi berkurang karena banyaknya molekul Ag yang tertanam pada matriks. Sehingga interaksi gas dengan permukaan juga berkurang. Sensitivitas sensor diketahui melalui perubahan arus listrik yang ditunjukkan oleh persamaan:

$$S (\%) = \left( \frac{I_g - I_a}{I_a} \right) \times 100\% \quad (3)$$

I<sub>g</sub> merupakan arus listrik setelah paparan gas sedangkan I<sub>a</sub> arus listrik sebelum sensor terpapar gas. PANi-Ag menghasilkan sensitivitas 15 %, 73 %, 100 %, 150 %, 263 % terhadap paparan variasi konsentrasi gas H<sub>2</sub>S 1, 5, 10, 15, dan 25 (ppm). Untuk mengetahui perbandingan respon PANi-Ag pada substrat yang berbeda dibuatlah film PANi-Ag pada BOPET dan BOPET modifikasi APTMS. Kemudian dihasilkan film PANi-Ag pada substrat BOPET menunjukkan respon atau sensitivitas sebesar 67 % pada 10 ppm terhadap paparan gas H<sub>2</sub>S. Sedangkan untuk film PANi-Ag pada substrat BOPET modifikasi APTMS menunjukkan sensitivitas sebesar 100 % ketika terpapar gas 10 ppm. Interaksi antara film PANi-Ag dan gas H<sub>2</sub>S dapat dijelaskan melalui reaksi

disosiasi  $H_2S$  yang menghasilkan kation berupa  $H^+$  dan anion  $HS^-$ . Anion berperan dalam pembentukan muatan positif ( $N^+$ ) pada cincin PANi dan berperan sebagai proton pada lapisan. Karena kemampuan berpindah  $H^+$  lebih besar daripada  $HS^-$  sehingga dapat meningkatkan konduktansi saat terpapar gas.

Zhang et al (2019) telah membuat sensor  $H_2S$  fleksibel dan sensitif yang berasal dari nanokomposit  $SnO_2/rGO/PANi$  menggunakan metode polimerisasi in-situ. Selanjutnya lapisan tipis dibentuk  $SnO_2/rGO/PANi$  pada substrat *flexible polyethylene terephthalate* (PET) dengan elektroda interdigital Au/Cu (IDEs). Lapisan tipis lain seperti  $SnO_2$ ,  $SnO_2/PANi$ , dan  $SnO_2/rGO$  disiapkan sebagai pembanding terhadap respon  $SnO_2/rGO/PANi$  dalam mendeteksi gas  $H_2S$ . Sensor  $SnO_2/rGO/PANi$  menunjukkan selektivitas yang tinggi dalam mendeteksi gas  $H_2S$  pada konsentrasi 1 ppm dan 5 ppm dibandingkan gas yang lain seperti  $NH_3$ ,  $CH_3CH_2OH$ ,  $NO_2$ , dan  $CH_3COCH_3$ . Respon atau sensitivitas sensor ditentukan dari persamaan (2). Sensor diuji terhadap paparan gas  $H_2S$  dengan konsentrasi 0,05 ppm, 0,1 ppm, 0,2 ppm, 0,5 ppm, 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm, dan 10 ppm. Sensitivitas  $SnO_2/rGO/PANi$  yang dihasilkan adalah 3,18 %; 8,34 %; 24,07%; 32,16%; 44,91%; 60,11%; 76,25%; dan 91,11%. Artinya sensor memiliki sensitivitas yang baik karena mampu mendeteksi gas  $H_2S$  dalam konsentrasi yang kecil. Pada konsentrasi 2 ppm dan 5 ppm gas  $H_2S$  waktu respon  $SnO_2/rGO/PANi$  adalah 82 s dan 78 s, sedangkan waktu pemulihan sensor 80s dan 88s.  $SnO_2/rGO/PANi$  memungkinkan penggunaan jangka panjang, karena menunjukkan stabilitas yang baik saat digunakan secara berulang pada konsentrasi gas  $H_2S$  0,2 ppm, 1 ppm, dan 5 ppm.  $SnO_2/rGO/PANi$  yang terbentuk memiliki struktur *nano-brush* sehingga meningkatkan sifat penginderaan terhadap gas  $H_2S$ . Struktur  $SnO_2$ , yang berbentuk *hollow sphere* memudahkan difusi  $H_2S$  untuk terperangkap pada lapisan sensor.

Suha'il et al (2019) melakukan penginderaan gas  $H_2S$  menggunakan nanokomposit PANi yang ditambahkan dopan 0,01 wt% (*functionalized SWCNT*) f-SWNCT. Nanokomposit tersebut selanjutnya dibuat lapisan tipis pada substrat *indium thin oxide* (ITO) dengan metode elektrokimia dengan pelat titanium sebagai elektroda kerja dan ITO sebagai elektroda referensi. Penambahan dopan f-SWNCT bertujuan untuk meningkatkan ukuran butir pada sampel dan luas permukaan lapisan aktif sebagai tempat adsorpsi gas. Tingkat kekasaran nanokomposit PANi/f-SWCNT lebih tinggi serta luas permukaan yang terbuka yang memungkinkan terjadinya interaksi antara gas dengan permukaan dibandingkan dengan PANi murni. Berdasarkan pengukuran efek hall PANi/f-SWNCT teridentifikasi sebagai semikonduktor tipe-p dengan pembawa muatan. PANi/f-SWNCT

dilaporkan memiliki sensitivitas maksimal ketika beroperasi pada suhu 50°C dan menurun ketika suhu operasi ditingkatkan. Hal tersebut terjadi karena berkurangnya interaksi pada permukaan lapisan dan gas target saat suhu >50°C. PANi/f-SWNCT memiliki waktu respon dan pemulihan lebih cepat dibandingkan dengan PANi murni.

- **PANi Untuk Mendeteksi Asam Askorbat ( $C_6H_8O_6$ )**

Asam askorbat (AA) atau dikenal dengan vitamin C terdapat pada buah, sayur dan sistem biologis. AA berupa kristal putih atau kuning dengan rasa asam. Saat berada dalam keadaan kering memiliki sifat stabil di udara, namun cepat teroksidasi pada larutan (Paty et al, 2018). Dalam industri farmasi AA digunakan sebagai *anti aging*, untuk melindungi kulit dari sinar UV serta untuk merangsang kolagen. Pada industri makanan AA digunakan sebagai antioksidan dan pengawet (Milakin et al, 2013). AA memiliki sifat reduktif dan mudah dioksidasi menjadi asam hidrosorbat. Penambahan AA yang berlebihan mengakibatkan penurunan rasa dan aroma pada makanan (Pisoschi et al, 2014). *Recommended Dietary Allowances* (RDA) menetapkan batas konsumsi AA untuk orang dewasa pria 90 mg/hari dan wanita 75 mg/hari (Skrovankova et al, 2015). Penggunaan AA yang berlebihan dapat mengakibatkan penyakit seperti kudis, kanker, flu, dan gangguan pencernaan (Wei et al, 2019). Dalam industri biologis dan agroindustri penginderaan terhadap AA penting dilakukan untuk bahan obat-obatan, minuman, dan sayuran.

Fang et al (2015) mengembangkan sensor untuk mendeteksi AA menggunakan material PANi yang disiapkan secara in-situ pada substrat *carbon nanotubes* (CNTs) dengan metode polimerisasi elektrokimia, dimana sebelumnya CNTs disiapkan secara in-situ pada permukaan elektroda graphite (GE) (menghasilkan GSCNTs) dengan teknik *catalytic chemical vapor deposition* (CCVD). Sehingga menghasilkan komposit GSCNTs/PANi. Pada saat dilakukan pengujian untuk mengetahui performa elektroda menunjukkan bahwa penambahan CNT menghasilkan laju elektron yang baik serta luas permukaan spesifik yang tinggi. Sehingga dapat meningkatkan kinerja elektrokimia elektroda. Selanjutnya untuk mengetahui respon GSCNTs/PANi terhadap AA maka dilakukan pengujian secara elektrokimia. Ketika GSCNTs/PANi diuji pada larutan AA dengan penambahan larutan buffer dengan pH 6,0 terdapat kenaikan puncak oksidasi yaitu  $8,5 \times 10^{-2}$  mA pada tegangan 0,38 V. Hal tersebut menunjukkan bahwa aktivitas elektrokatalitik GSCNTs/PANi menunjukkan respon yang baik terhadap AA. Campuran larutan AA dengan buffer pH 6,0 dipilih karena seiring meningkatnya pH > 6,0 mengakibatkan puncak arus oksidasi menurun dan tegangan puncak bergeser pada

potensial yang negatif. Selain itu *scan rate* juga memengaruhi respon GSCNTs/PANi pada larutan AA. Semakin meningkatnya *scan rate* mengakibatkan tegangan puncak oksidasi bergeser pada potensial yang lebih positif. Berdasarkan hal tersebut dapat dikatakan bahwa respon elektrokimia antara GSCNTs/PANi dan AA termasuk dalam proses difusi. Semakin meningkatnya konsentrasi AA menghasilkan respon GSCNTs/PANi juga semakin meningkat yang diketahui melalui meningkatnya puncak arus oksidasi yang semakin meningkat secara linier. GSCNTs/PANi juga efisien digunakan untuk mendeteksi AA karena menghasilkan persentase *recovery* 97,4 % - 101,2 % dengan variasi penambahan konsentrasi AA. Stabilitas dari GSCNTs/PANi dalam mendeteksi AA selama 90 hari menghasilkan stabilitas arus listrik 92 %. Serta sifat elektroaktif dari GSCNTs/PANi terhadap AA tidak berkurang setelah pemindaian selama 30 kali.

Liu et al (2013) mengembangkan material nanokomposit dengan memodifikasi permukaan *glassy carbon electrode* (GCE) untuk mendeteksi AA yang berasal dari PANi dan *multiwalled carbon nanotubes* (MWCNTs), yang di dopan *mercaptopropionic acid* (MSA) menggunakan metode polimerisasi elektrokimia. Saat mendeteksi AA 0, 5, 10, dan 20 (mM) dalam larutan pH 7,0 puncak anodik yang berada pada tegangan 0,2 V. Semakin tinggi konsentrasi AA maka puncak arus anodik semakin tinggi dan puncak katodik semakin naik. Hal tersebut merupakan karakteristik dari sifat elektrokatalitik (Chatti et al, 2001). Setelah dilakukan pengujian selama 2 minggu MSA-PANi/MWCNTs/GCE menunjukkan stabilitas sebesar 92,7 % terhadap 1 mM AA. MSA-PANi/MWCNTs/GCE menunjukkan selektivitas yang baik dalam mendeteksi AA dalam cairan lain seperti asam urat, dopamin, glukosa, glisin, dan 4-*acetamidophend*. Sensor juga diuji untuk mendeteksi AA dari larutan vitamin C 0,79 g g<sup>-1</sup> dan jus jeruk 75 mg L<sup>-1</sup>. Berdasarkan pengujian tersebut sensor mampu mendeteksi vitamin C dan jus jeruk 0,75 g g<sup>-1</sup> dan 71 mg L<sup>-1</sup>.

Bilal et al (2019) mengembangkan sensor untuk mendeteksi AA berbasis elektroda yang ditumbuhkan pada *Au-disc* (lempengan emas) dengan material PANi yang di doping dengan *sulfuric acid* (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dan *dodecyl benzene sulphonic acid* (DBSA) menggunakan teknik polimerisasi elektrokimia. Doping DBSA pada PANi menghasilkan morfologi seperti butir, padat, dan berpori. Sehingga dapat memudahkan dalam interaksi dengan analit. DBSA terdiri dari kelompok anion *deodecyl* C<sub>12</sub>H<sub>25</sub> yang berperan pada interaksi non polar dengan media berair menyebabkan interaksi antara rantai PANi terkonjugasi berkurang. Pada saat PANi berinteraksi dengan AA, ikatan parsial antara H<sup>+</sup> dari AA dan N<sup>+</sup> dari

PANi muncul akibatnya meningkatkan jarak antar rantai pada PANi. Sehingga *emeraldine salt* berubah menjadi *pemagraneline* dan AA di oksidasi menjadi *dehydroascorbic acid*. Nilai larutan pH memengaruhi puncak anodik yang terbentuk, semakin tinggi pH maka puncak arus anodik menurun dan semakin bergeser pada tegangan yang lebih negatif. Selain itu variasi *scan rate* juga memengaruhi puncak arus anodik, pada penelitian menggunakan *scan rate* 10 – 110 mV.s<sup>-1</sup>. Semakin besar nilai *scan rate* maka puncak arus anodik semakin meningkat dan bergeser pada tegangan yang lebih positif. Hal tersebut menunjukkan bahwa elektroda menyediakan luas permukaan yang tinggi saat berinteraksi dengan analit. Elektroda mampu mendeteksi 14 s setelah terpapar oleh AA, hal tersebut menunjukkan bahwa elektroda memiliki respon yang positif. Elektroda juga memiliki selektivitas yang tinggi terhadap AA. ketika dilakukan pengujian dengan analit lain yaitu dopamin, asam urat, dan glukosa, respon arus listrik.

#### • PANi untuk mendeteksi Asam Asetat (CH<sub>3</sub>COOH)

Asam asetat (CH<sub>3</sub>COOH) adalah senyawa yang tak berwarna, berbau menyengat, memiliki rasa asam yang tajam, dan larut dalam di dalam air, alkohol, gliserol, dan eter (Hardoyo, 2007). CH<sub>3</sub>COOH mengandung molekul yang bersifat iritan dan korosif. Selain itu, digunakan sebagai bahan untuk pembuatan obat, pestisida, vinil asetat, selulosa asetat, dan asetat anhidra (Mu et al, 2019). Pada proses industri menghasilkan gas buang CH<sub>3</sub>COOH sangat tinggi, sehingga dapat menyebabkan korosi pada pipa. Menurut Utomo (2012) CH<sub>3</sub>COOH dalam bentuk gas yang larut dalam air mampu merusak saluran nafas bagian atas. Pada konsentrasi tertentu CH<sub>3</sub>COOH ditemukan pada troposfer yang dapat menyebabkan masalah pada lingkungan (Cavalotti et al, 2019). Selain itu keberadaannya dapat digunakan sebagai parameter kualitas daging, buah, dan obat-obatan (Han, 2020). Oleh karena itu, diperlukan sensor pendeteksi CH<sub>3</sub>COOH dalam konsentrasi rendah yang memiliki sensitivitas yang baik.

Turemis et al (2020) membuat nanokomposit untuk mendeteksi asam asetat dari nanorod ZnO yang disintesis dalam bentuk bubuk kemudian ditambahkan pada PANi menggunakan metode polimerisasi kimia. Nanokomposit selanjutnya diendapkan pada substrat kaca menggunakan teknik drop casting. ZnO ditambahkan karena memiliki luas permukaan yang tinggi dan merupakan semikonduktor yang baik dalam penginderaan. Interaksi antara PANi dan asam asetat melibatkan proses adsorpsi fisik dan kemisorpsi disertai dengan fotooksidasi asam asetat oleh ZnO-PANi oksidasi PANi. ZnO/PANi menunjukkan hasil yang sensitif terhadap asam asetat karena dipengaruhi oleh morfologi berpori sehingga memberikan banyak area untuk berinteraksi dengan analit.



ZnO/PANI memiliki selektivitas yang baik dalam mendeteksi asam asetat, karena pada saat digunakan untuk mendeteksi uap etanol tidak terjadi perubahan sinyal. ZnO/PANI juga mampu mendeteksi asam asetat pada konsentrasi 1-10 ppm dengan waktu respon 30 s - 50 s dan waktu pemulihan 215 s – 360 s. Stabilitas ZnO/PANI diperoleh 85% yang diuji menggunakan gas asam asetat 5 ppm selama 40 hari pada suhu ruang. Berdasarkan nilai stabilitas tersebut menandakan bahwa nanokomposit ZnO/PANI dapat digunakan secara berulang.

Tabel 1 Parameter Hasil Uji Untuk Deteksi Asam (HCl dan H<sub>2</sub>S)

Material	Metode Fabrikasi	Tipe Sensor	Analit Pemanding	Detection Limit	Detection Range (ppm)	Suhu Operasi	Sensitivitas (%)	T <sub>res</sub>	T <sub>rec</sub>	Referensi
PANI/PVA	Dip coating dengan substrat QCM	Piezoelectric	HClO <sub>4</sub> , FeCl <sub>3</sub> , LiCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , sodium nitrat, HNO <sub>3</sub> , dan CH <sub>3</sub> COOH	10 ppm	10-1000	RT	0,34 (1000 ppm)	1,88s (10 ppm); 1,40s (1000 ppm)	3-5 (min)	Banerjee et al (2014)
PANI-Nylon	Polimerisasi oksidatif kimia dengan substrat nylon	Colorimetric	-	0,09 ppm	-	RT	-	5 min	-	Thornton et al (2018)
Kopolimer PANi-folmaldehyde-doped Fe-Al	Evaporasi Termal dengan substrat kaca	Conductometric	-	0,2 ppm	0,2-20	RT	800 (20 ppm)	10s	5-10 (min)	Misra et al (2004)
PANI-PEO	Elektrospinning dengan substrat kertas saring pada mikroelektrik karbon konduktif	Chemiresistive	Aseton dan nitrogen dioksida (NO <sub>2</sub> )	1 ppm	1-10	RT	25 (10 ppm)	120s	250s	Mousavi et al (2016)
PANI-CdS	Spin coating dengan substrat kaca	Chemiresistive	CH <sub>3</sub> -OH, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -OH, NO <sub>2</sub> , dan NH <sub>3</sub>	20 ppm	20-100	RT	48 (100 ppm)	71s-41s	345s-518s	Raut et al (2012)
PANI-Ag	Photo polimerisasi in-situ dengan substrat BOPET	Amperometric	NO <sub>2</sub> , NO, NH <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> H <sub>3</sub> OH, dan CO	1 ppm	1-25	RT	263 (25 ppm)	360s	-	Mekki et al (2014)
SnO <sub>2</sub> /rGO/PANI	Polimerisasi in-situ dengan substrat polyethylene terephthalate (PET)	Chemiresistive	NH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH, NO <sub>2</sub> , dan CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	0,05 ppm	0,05 -10	RT	91,11 (10 ppm)	80s- 82s	78s- 88s	Zhanget al (2019)
PANI/f-SWCNTs	Polimerisasi Elektrokimia dengan substrat pada indium thin oxide (ITO)	Chemiresistive	-	30 %	-	50°C	60	38s	40s	Suhail et al (2019)

\*RT: Room Temperature

Tabel 2 Parameter Hasil Uji Untuk Deteksi Asam Askorbat (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>)

Material	Metode Fabrikasi	Tipe Sensor	Analit Pemanding	Linear Detection	Detection Limit	Referensi
GSCNTs/PANI	Polimerisasi elektrokimia dengan substrat graphite electrode (GE)	Amperometric	-	$1.0 \times 10^{-6} - 4.5 \times 10^{-4}$ (molL <sup>-1</sup> )	$1.0 \times 10^{-7}$ molL <sup>-1</sup>	Fang et al, 2015
MSA-PANI/MWCNT/GCE	Polimerisasi elektrokimia dengan substrat glassy	Amperometric	Vitamin C tablet dan jus jeruk	20 - 29.6 (mM)	0.6 μM	Liu et al, 2013

Material	Metode Fabrikasi	Tipe Sensor	Analit Pemandang	Linear Detection	Detection Limit	Referensi
	<i>carbon electrode (GCE)</i>					
PANi/ DBSA	Polimerisasi elektrokimia dengan substrat <i>Au-disc</i>	<i>Amperometric</i>	-	0.05–0.5 (mM)	0.0267 $\mu\text{molL}^{-1}$	Bilal et al, 2019

Pada tabel 1 merupakan informasi hasil pengujian PANi dan komposisinya untuk mendeteksi HCl dan H<sub>2</sub>S. Berdasarkan sensitivitasnya material kopolimer PANi-folma dehyde doping Fe-Al cocok sebagai kandidat material sensitif pendeteksi HCl dikarenakan sensitivitasnya tinggi dalam mendeteksi pada konsentrasi rendah yaitu 20 ppm dengan sensitivitas 800 %. Berdasarkan pemaparan diatas secara keseluruhan respon atau sensitivitas sensor terhadap paparan gas H<sub>2</sub>S dapat diketahui melalui perubahan resistansi maupun perubahan arus listrik pada sensor. Semakin tinggi nilai konsentrasi gas H<sub>2</sub>S yang dideteksi maka nilai resistansi maupun arus listriknya juga semakin meningkat. Secara keseluruhan semua material yang telah disebutkan diatas memiliki selektivitas yang tinggi dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S. Namun, jika ditinjau dari beberapa komposit PANi diatas nilai sensitivitas sensor paling tinggi diperoleh dari nanokomposit PANi-Ag yaitu memiliki sensitivitas sebesar 263 % ketika terpapar 25 ppm gas H<sub>2</sub>S. Pada tabel 2 menyajikan informasi hasil pengujian PANi dan komposisinya untuk mendeteksi C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>. Berdasarkan pemaparan tersebut PANi dan komposisinya yang cocok digunakan sebagai kandidat material sensitif untuk mendeteksi keberadaan AA adalah PANi/DBSA karena mampu mendeteksi AA dengan konsentrasi yang rendah yaitu 0.0267  $\mu\text{mol L}^{-1}$  (4,7 ppm). Luas permukaan yang tinggi pada divais penginderaan menyediakan area aktif yang memungkinkan terjadinya adsorpsi molekul gas (Hung et al 2017). Selain itu morfologi komposit PANi yang berpori juga memudahkan difusi gas pada bahan aktif. Menguap atau keluarnya analit dari permukaan bahan aktif dinamakan dengan proses desorpsi yang dapat diketahui melalui nilai parameter pengujian kembali seperti semula sesuai dengan mode transduksi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan review di atas dapat diketahui terdapat beberapa tipe sensor yang dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan senyawa asam baik dalam bentuk gas dan bentuk cair atau larutan. Tipe-tipe sensor tersebut memberikan informasi bagaimana interaksi antara analit dengan permukaan bahan aktif. Misalnya pada tipe sensor *chemiresistive*, dimana prinsip kerja sensor jenis ini berdasarkan perubahan resistansi akibat adanya interaksi antara molekul analit dan molekul pada bahan aktif. Perubahan resistansi tersebut kemudian digunakan untuk mengetahui sensitivitas sensor. Selain itu dengan mengkomposisikan PANi dengan *metal oxide*, polimer, dan carbon dapat menambah sensitivitas dari PANi sebagai bahan aktif sensor pendeteksi asam. Penambahan material tersebut dapat meningkatkan luas permukaan serta memiliki struktur berpori sehingga memudahkan analit dalam bentuk gas maupun larutan untuk berinteraksi dengan permukaan bahan aktif. PANi

sebagai bahan aktif pendeteksi asam dapat dibuat menjadi beberapa bentuk seperti lapisan tipis, pellet, dan elektroda. Selektivitas dan sensitivitas yang dihasilkan tergantung pada jenis komposit yang digunakan pada PANi karena setiap komposit memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Baik perubahan warna, arus, konduktivitas, serta resistivitas menunjukkan adanya proses doping/dedoping pada PANi akibat interaksi dengan analit. Nilai konsentrasi minimal analit HCl, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>, CH<sub>3</sub>COOH yang mampu dideteksi oleh PANi dan komposisinya adalah 0,2 ppm; 0,05 ppm; 0.0267  $\mu\text{molL}^{-1}$  (4,7 ppm); dan 1 ppm.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bagherzadeh, R., Gorji, M., Sorayani Bafgi, M. S., & Saveh-Shemshaki, N. (2017). Electrospun conductive nanofibers for electronics. In *Electrospun Nanofibers*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00018-0>
2. Bachhav, S. G., & Patil, D. R. (2015). Study of Polypyrrole-Coated MWCNT Nanocomposites for Ammonia Sensing at Room Temperature. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 03(10), 30–44. <https://doi.org/10.4236/msce.2015.310005>
3. Balasubramani, V., Chandrleka, S., Rao, T. S., Sasikumar, R., Kuppusamy, M. R., & Sridhar, T. M. (2020). Review—Recent Advances in Electrochemical Impedance Spectroscopy Based Toxic Gas Sensors Using Semiconducting Metal Oxides. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(3), 037572. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab77a0>
4. Bilal, S., Akbar, A., & Shah, A. U. H. A. (2019). Highly selective and reproducible electrochemical sensing of ascorbic acid through a conductive polymer coated electrode. *Polymers*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/polym11081346>
5. Berhe Gebreegziabher, T., Wang, S., & Nam, H. (2019). Adsorption of H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> and TMA from indoor air using porous composites activated carbon: Isotherm and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103234. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103234>

6. Banerjee, S., Konwar, D., & Kumar, A. (2014). Polyaniline nanofiber reinforced nanocomposite based highly sensitive piezoelectric sensors for selective detection of hydrochloric acid: Analysis of response mechanism. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *190*, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.08.062>
7. Cavallotti, C., Pelucchi, M., & Frassoldati, A. (2019). Analysis of acetic acid gas phase reactivity: Rate constant estimation and kinetic simulations. *Proceedings of the Combustion Institute*, *37*(1), 539–546. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.137>
8. Comini, E. (2016). Metal oxide nanowire chemical sensors: innovation and quality of life. *Materials Today*, *19*(10), 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2016.05.016>
9. Dong, X., Zhang, X., Wu, X., Cui, H., & Chen, D. (2016). Investigation of gas-sensing property of acid-deposited polyaniline thin-film sensors for detecting H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub>. *Sensors (Switzerland)*, *16*(11). <https://doi.org/10.3390/s16111889>
10. Ebralidze, I. I., Laschuk, N. O., Poisson, J., & Zenkina, O. V. (2019). Cobrimetric Sensors and Sensor Arrays. In *Nanomaterials Design for Sensing Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814505-0.00001-1>
11. Eom, N. S. A., Cho, H. B., Lim, H. R., Kim, B. S., & Choa, Y. H. (2019). Facile tilted sputtering process (TSP) for enhanced H<sub>2</sub>S gas response over selectively loading Pt nanoparticles on SnO<sub>2</sub> thin films. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *300*(August), 127009. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127009>
12. Fang, Y., Jiang, Q., Deng, M., Tian, Y., Wen, Q., & Wang, M. (2015). Preparation in-situ of carbon nanotubes/polyaniline modified electrode and application for ascorbic acid detection. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *755*, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.07.039>
13. Gaikwad, G., Patil, P., Patil, D., & Naik, J. (2017). Synthesis and evaluation of gas sensing properties of PANI based graphene oxide nanocomposites. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, *218*, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.01.008>
14. Gupta, N., Shama, S., Mir, I. A., & Kumar, D. (2006). Advances in sensors based on conducting polymers. *Journal of Scientific and Industrial Research*, *65*(7), 549–557.
15. Han, D. (2020). Sol-gel autocombustion synthesis of zinc oxide foam decorated with holes and its use as acetic acid gas sensor at sub-ppm level. *Ceramics International*, *46*(3), 3304–3310. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.036>
16. Hardoyo, Tjahjono, A. E., Primarini, D., Hartono, & Musa. (2007). Kondisi Optimum Fermentasi Asam Asetat Menggunakan Acetobacter Aceti B166. *J. Sains MIPA*, *13*(1), 17–20. <http://jurnal.fmipa.unila.ac.id/index.php/sains/article/viewFile/276/pdf>
17. Hussain, C. M., & Keçili, R. (2020). Electrochemical techniques for environmental analysis. *Modern Environmental Analysis Techniques for Pollutants*, 199–222. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816934-6.00008-4>
18. Janata, J., & Josowicz, M. (2003). Conducting polymers in electronic chemical sensors. *Nature Materials*, *2*(1), 19–24. <https://doi.org/10.1038/nmat768>
19. Kumari Jangid, N., Jadoun, S., & Kaur, N. (2020). A review on high-throughput synthesis, deposition of thin films and properties of polyaniline. *European Polymer Journal*, *125*, 109485. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109485>
20. Liu, Y., Su, Z., Zhang, Y., Chen, L., Gu, T., Huang, S., Liu, Y., Sun, L., Xie, Q., & Yao, S. (2013). Amperometric determination of ascorbic acid using multiwalled carbon nanotube-thiolated polyaniline composite modified glassy carbon electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *709*, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2013.09.027>
21. Li, Z., Yan, S., Sun, M., Li, H., Wu, Z., Wang, J., Shen, W., & Fu, Y. Q. (2019). Significantly enhanced temperature-dependent selectivity for NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S detection based on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-cubes prepared by CTAB assisted solvothermal process. *Journal of Alloys and Compounds*, *816*, 152518. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152518>
22. Lobotka, P., Kunzo, P., Kovacova, E., Vavra, I., Krizanova, Z., Smatko, V., Stejskal, J., Konyushenko, E. N., Omastova, M., Spitalsky, Z., Micusik, M., & Kuupa, I. (2011). Thin polyaniline and polyaniline/carbon nanocomposite films for gas sensing. *Thin Solid Films*, *519*(12), 4123–4127. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.177>
23. Luan, M., Jing, G., Piao, Y., Liu, D., & Jin, L. (2017). Treatment of refractory organic pollutants in industrial wastewater by wet air oxidation. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, S769–S776. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.12.003>
24. Manjunatha, S., Machappa, T., Ravikiran, Y. T., Chethan, B., & Sunilkumar, A. (2019). Polyaniline based stable humidity sensor operable at room temperature. *Physica B: Condensed Matter*, *561*(March), 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.02.063>
25. Matsuguchi, M., Takaoka, K., & Kai, H. (2015). HCl gas adsorption/desorption properties of poly(N-isopropylacrylamide) brushes grafted onto quartz resonator for gas-sensing applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *208*, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.137>
26. Mekki, A., Joshi, N., Singh, A., Salmi, Z., Jha, P., Decorse, P., Lau-Tuong, S., Mahmoud, R., Chehimi, M. M., Aswal, D. K., & Gupta, S. K. (2014). H<sub>2</sub>S sensing using in situ photo-polymerized polyaniline-silver nanocomposite films

- on flexible substrates. *Organic Electronics*, 15(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.10.012>
27. Misra, S. C. K., Mathur, P., Yadav, M., Tiwari, M. K., Garg, S. C., & Tripathi, P. (2004). Preparation and characterization of vacuum deposited semiconducting nanocrystalline polymeric thin film sensors for detection of HCl. *Polymer*, 45(25), 8623–8628. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.10.010>
  28. Milakin, K. A., Korovin, A. N., Moroz, E. V., Levon, K., Guiseppi-Elie, A., & Sergeev, V. G. (2013). Polyaniline-Based Sensor Material for Potentiometric Determination of Ascorbic Acid. *Electroanalysis*, 25(5), 1323–1330. <https://doi.org/10.1002/elan.201300023>
  29. Mousavi, S., Kang, K., Park, J., & Park, I. (2016). A room temperature hydrogen sulfide gas sensor based on electrospun polyaniline-polyethylene oxide nanofibers directly written on flexible substrates. *RSC Advances*, 6(106), 104131–104138. <https://doi.org/10.1039/c6ra20710c>
  30. Mu, M., Cheng, J., Dai, C., Liu, N., Lei, Z., Ding, Y., & Lu, J. (2019). Removal of gaseous acetic acid using ionic liquid [EMIM][BF<sub>4</sub>]. *Green Energy and Environment*, 4(2), 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.01.004>
  31. Nadaf, L. I., & Venkatesh, K. S. (2015). Polyaniline-Copper Oxide Nano-Composites: Synthesis and Characterization. *Material Science Research India*, 12(2), 108–111. <https://doi.org/10.13005/msri/120204>
  32. Ngafifuddin, M., Sunamo, S., & Susilo, S. (2017). PENERAPAN RANCANG BANGUN pH METER BERBASIS ARDUINO PADA MESIN PENCUCI FILM RADIOGRAFI SINAR-X. *Jurnal Sains Dasar*, 6(1), 66. <https://doi.org/10.21831/jsd.v6i1.14081>
  33. Pathy, K. (2018). Process for Preparation of Vitamin C and Method for Determination of Vitamin C in Tablets. *Surgery & Case Studies: Open Access Journal*, 1(3). <https://doi.org/10.32474/scsoaj.2018.01.000114>
  34. Personal, M., & Archive, R. (2019). *Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern*. 91622.
  35. Putri, N. P., Kusumawati, D. H., Widiyanti, N., & Munasir. (2018). Synthesis of polyaniline/cellulose composite as humidity sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, 997(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/997/1/012009>
  36. Phuoc, P. H., Hung, C. M., Van Toan, N., Van Duy, N., Hoa, N. D., & Van Hieu, N. (2020). One-step fabrication of SnO<sub>2</sub> porous nanofiber gas sensors for sub-ppm H<sub>2</sub>S detection. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 303, 111722. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111722>
  37. Pisoschi, A. M., Pop, A., Serban, A. I., & Fafaneata, C. (2014). Electrochemical methods for ascorbic acid determination. *Electrochimica Acta*, 121, 443–460. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.127>
  38. Raut, B. T., Chougule, M. A., Nalage, S. R., Dalavi, D. S., Mali, S., Patil, P. S., & Patil, V. B. (2012). CSA doped polyaniline/CdS organic-inorganic nanohybrid: Physical and gas sensing properties. *Ceramics International*, 38(7), 5501–5506. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.03.064>
  39. Raimon. (2011). Studi Pengolahan Air Limbah Laboratorium Secara Terpadu (Koagulasi, Filtrasi, Adsorpsi Dan Pertukaran Ion) Dengan Sistem Batch. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 22, 18–27.
  40. Richter, D. de B., Oh, N. H., Fimmen, R., & Jackson, J. (2007). The Rhizosphere and Soil Formation. *The Rhizosphere*, 179–200. <https://doi.org/10.1016/B978-012088775-0/50010-0>
  41. Rouhillah, Rivai, M., & Sardjono, T. A. (2015). Karakterisasi Frekuensi Harmonisa Sensor Quartz Crystal Microbalance Sebagai Identifikasi Gas. *Prosiding SENTIA*, 7, 3–8.
  42. Sabatini, V., Pifferi, V., Checchia, S., Rebecani, S., Farina, H., Ortenzi, M. A., & Fakiola, L. (2018). A combined XRD, solvatochromic, and cyclic voltammetric study of poly (3,4-Ethylenedioxythiophene) doped with sulfonated polyarylethersulfones: Towards new conducting polymers. *Polymers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/polym10070770>
  43. Savest, N., Plamus, T., Kütt, K., Kallavus, U., Viirsalu, M., Tarasova, E., Vassiljeva, V., Krasnou, I., & Krumme, A. (2018). Electrospun conductive mats from PANi-ionic liquid blends. *Journal of Electrostatics*, 96(September), 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.09.007>
  44. Seo, C. U., Yoon, Y., Kim, D. H., Choi, S. Y., Park, W. K., Yoo, J. S., Baek, B., Kwon, S. Bin, Yang, C. M., Song, Y. H., Yoon, D. H., & Yang, W. S. (2018). Fabrication of polyaniline-carbon nano composite for application in sensitive flexible acid sensor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 64, 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.03.031>
  45. Shi, L., Wang, Z., Gou, G., Chen, X., Yang, G., & Liu, W. (2017). Simultaneous Determination of Ascorbic Acid, Dopamine and Uric Acid Based on Graphene/Polyaniline/Glod Nanohybrids. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(3), 2540–2551. <https://doi.org/10.20964/2017.03.42>
  46. Suhail, M. H., Abdullah, O. G., & Kadhim, G. A. (2019). Hydrogen sulfide sensors based on PANI/f-SWCNT polymer nanocomposite thin films prepared by electrochemical polymerization. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4(1), 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2018.11.006>
  47. Song, E., & Choi, J.-W. (2013). Conducting Polyaniline Nanowire and Its Applications in Chemiresistive Sensing. *Nanomaterials*, 3(3), 498–523. <https://doi.org/10.3390/nano3030498>
  48. Speight, J. G. (2017). Industrial Inorganic Chemistry. In *Environmental Inorganic Chemistry*

- for *Engineers* (Issue Chapter 2). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-849891-0.00003-5>
49. Tang, Y., Li, D., Ao, D., Guo, Y., Faheem, M. B., Khan, B., Zu, X., & Li, S. (2020). Highly sensitive surface acoustic wave HCl gas sensors based on hydroxyl-rich sol-gel AlOxOHy films. *Materials Chemistry and Physics*, 239(March 2019), 122026. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122026>
  50. Tang, Y., Xu, X., Du, H., Zhu, H., Li, D., Ao, D., Guo, Y., Fu, Y. Q., & Zu, X. (2020). Cellulose nano-crystals as a sensitive and selective layer for high performance surface acoustic wave HCl gas sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 301, 111792. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111792>
  51. Thornton, B. T. E., Harrison, A., Pham, A. L., Castano, C. E., & Tang, C. (2018). Polyaniline-Functionalized Nanofibers for Colorimetric Detection of HCl Vapor. *ACS Omega*, 3(3), 3587–3591. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00054>
  52. Torad, Nagy L; Ayad, M. M. (2016). Gas Sensors Based on Conducting Polymers. *Intech, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
  53. Turemis, M., Zappi, D., Giardi, M. T., Basile, G., Ramanaviciene, A., Kapralovs, A., Ramanavicius, A., & Viter, R. (2020). ZnO/polyaniline composite based photoluminescence sensor for the determination of acetic acid vapor. *Talanta*, 211(December 2019), 120658. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120658>
  54. Ucanus, G., Ercan, M., Uzunoglu, D., & Culha, M. (2018). Methods for preparation of nanocomposites in environmental remediation. In *New Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811033-1.00001-9>
  55. Utomo, S. (2012). Bahan Berbahaya Dan Beracun (B-3) Dan Keberadaannya Di Dalam Limbah. *Konversi*, 1(1), 37–46.
  56. Viter, R., & Iatsunskyi, I. (2019). Metal Oxide Nanostructures in Sensing. In *Nanomaterials Design for Sensing Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814505-0.00002-3>
  57. Wei, Y., Zhang, D., Fang, Y., Wang, H., Liu, Y., Xu, Z., Wang, S., & Guo, Y. (2019). Detection of Ascorbic Acid Using Green Synthesized Carbon Quantum Dots. *Journal of Sensors*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9869682>
  58. Wibawanto, R. H., & Daminto, D. (2012). Elektropolimerisasi Film Polianilin dengan Metode Galvanostatik dan Pengukuran Laju Pertumbuhannya. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 8(1), 120104. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v8i1.859>
  59. WIDIYANTI, N., & PRIMARY PUTRI, N. (2018). Sintesis Polianilin Dengan Metode Interfasial Menggunakan Variasi Larutan Dalam Fasa Organik. *Inovasi Fisika Indonesia*, 7(02), 71–73.
  60. Yoon, H. (2013). Current Trends in Sensors Based on Conducting Polymer Nanomaterials. *Nanomaterials*, 3(3), 524–549. <https://doi.org/10.3390/nano3030524>
  61. Zappa, D., Bertuna, A., Comini, E., Kaur, N., Poli, N., Sberveglieri, V., & Sberveglieri, G. (2017). *Metal oxide nanostructures: Preparation, characterization and functional applications as chemical sensors*. *Metal oxide nanostructures: preparation, characterization and functional applications as chemical sensors*. June. <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.122>
  62. Zhang, Y., Li, S., Pan, G., Yang, H., Qile, M., Chen, J., Song, Q., & Yan, D. (2018). Stretchable nanofibrous membranes for colorimetric/fluorometric HCl sensing: Highly sensitive charge-transfer excited state. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 254, 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.040>
  63. Zhang, D., Wu, Z., & Zong, X. (2019). Flexible and highly sensitive H<sub>2</sub>S gas sensor based on in-situ polymerized SnO<sub>2</sub>/rGO/PANI ternary nanocomposite with application in halitosis diagnosis. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 289(March), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.05>