

APLIKASI POLIANILIN SEBAGAI BAHAN AKTIF PENDETEKSI ALKOHOL

¹⁾ Emilia Dwi Roida, ²⁾ Nugrahani Primary Putri,

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: emiliaroida16030224037@mhs.unesa.ac.id

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

Abstrak

Artikel ini berisi tentang *review* aplikasi polianilin (PANi) sebagai bahan aktif pendeteksi alkohol yang terdiri dari etanol, metanol, dan propanol. Analit-analit tersebut telah banyak digunakan sebagai bahan pewarna sintetik, bahan produksi makanan dan minuman, serta sebagai bahan pelarut obat-obatan. Dalam perkembangan industri, alkohol juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti fosil. Terkait hal tersebut, pembentukan polianilin dengan komposisinya menjadi pelet, lapisan tipis, dan membran telah menarik perhatian sebagai bahan aktif pendeteksi alkohol. Pada *review* sensitivitas sensor dapat diketahui melalui perubahan resistansi dan frekuensi akibat penambahan analit serta konsentrasi minimal dari ketiga analit yang mampu dideteksi polianilin adalah 1 ppm.

Kata Kunci: Polianilin, Etanol, Metanol, Propanol, Sensitivitas.

Abstract

This article contains review of the application of polyaniline (PANi) as an active ingredient in alcohol detection consisting of ethanol, methanol and propanol. These analytes have been widely used as synthetic dyes, food and beverage production materials, and as a drug solvent. In industrial development, alcohol can also be used as a substitute for fossil fuels. Related to this, the formation of polyaniline with its composites into pellets, thin layers, and membranes has attracted attention as an active ingredient in alcohol detection. The review of sensor sensitivity can be seen through changes in resistance and frequency due to addition of analytes and the minimum concentration of the three analytes that can be detect polyaniline is 1 ppm.

Keywords: Polyaniline, Ethanol, Methanol, Propanol, Sensitivity.

PENDAHULUAN

Menipisnya bahan bakar fosil di berbagai negara dan meningkatnya teknologi menyebabkan adanya gagasan terbaru terkait pencarian energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Dalam hal ini, alkohol alifatik telah menjadi bahan bakar alternatif sebagai pengganti bahan bakar fosil yang dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja pembakaran mesin serta lebih meningkatkan indeks antiknock dan kecepatan pembakaran, jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Capriolo & Konnov, 2020). Alkohol sebagai energi terbarukan dari jenis C1-C5, seperti etanol dan propanol untuk bahan bakar mesin telah banyak digunakan diberbagai negara (Nigam & Singh, 2011; Zou et al., 2016). Kondisi ini akan terus meningkat karena proses produksinya yang lebih sederhana dari bahan bakar fosil biasa (Han et al., 2020). Proses produksi dari alkohol sangat bervariasi tergantung dari jenis alkohol yang akan diproduksi, yakni melalui fermentasi bahan baku biomassa, limbah, dan juga dari proses produksi alternatif terbaru, seperti *Escherichia Coli* yang direkayasa secara metabolik (Sarathy et al., 2014).

Meningkatnya penggunaan alkohol sebagai bahan bakar energi mesin terbarukan dapat menimbulkan dampak pada lingkungan dan kesehatan, sebagaimana dengan sifat alami dari alkohol yang merupakan jenis zat kimia alifatik yang mudah menguap (Morozov et al., 2014). Apabila dilepaskan secara bebas, maka dapat mempengaruhi tingkat kualitas udara yang dapat menyebabkan iritasi pada pernapasan dan kerusakan pada lingkungan, seperti kerusakan pada proses fotosintesis tumbuhan. Maka diperlukan perangkat untuk mendeteksi keberadaan alkohol di lingkungan.

Karakteristik dari penginderaan suatu sensor dengan menggunakan bahan aktif dalam proses deteksi telah banyak dipelajari oleh para peneliti menggunakan teknik perubahan resistivitas atau konduktivitas sensor yang timbul dari interaksi molekul analit dengan bahan aktif pada permukaan sensor (Mahato & Adhikari, 2016). Aplikasi sensor berbasis polimer merupakan topik penelitian yang sudah banyak dilakukan oleh para peneliti. Terkait dengan hal tersebut, jenis polimer yang dipilih

merupakan jenis polimer yang memiliki tingkat konduktivitas yang baik dibanding dengan polimer biasa (Tian et al., 2017). Karena polimer konduktif merupakan polimer yang memiliki kemampuan mengikat molekul yang dideteksi sehingga dapat mempengaruhi tingkat sensitivitas sensor dalam proses penginderaan (Deb et al., 2019; Gunawan et al., 2010). Ada beberapa jenis polimer konduktif yang dapat digunakan, diantaranya poliasetilen, polipirrol, politiena dan polianilin (S. S. Liu et al., 2012; Otrisal et al., 2019). Peranan doping organik maupun anorganik di dalam polimer konduktif dapat meningkatkan sifat kelistrikan dari polimer, sehingga nilai sensitivitas dan selektivitas dapat meningkat (Yoo et al., 2015; Zhang et al., 2014). Menurut Sustkova et al (2019) polianilin merupakan jenis polimer konduktif yang telah banyak diaplikasikan sebagai sensor dan juga dikembangkan dalam beberapa aplikasi lain seperti sebagai bahan perekat konduktif, tinta, tekstil antistatik, kapasitor, dan dioda pemancar cahaya. Dalam aplikasi sebagai bahan aktif, polianilin memiliki tingkat stabilitas tinggi, yang dapat kembali (*reversible*) melalui proses reaksi redoks dan doping-dedoping selama proses produksi (Cai et al., 2014). Sehingga polianilin banyak digunakan sebagai bahan penginderaan oleh para peneliti karena kemampuan polianilin yang dapat menunjukkan keragaman struktur kimia selama proses penginderaan (Fra toddi et al., 2015).

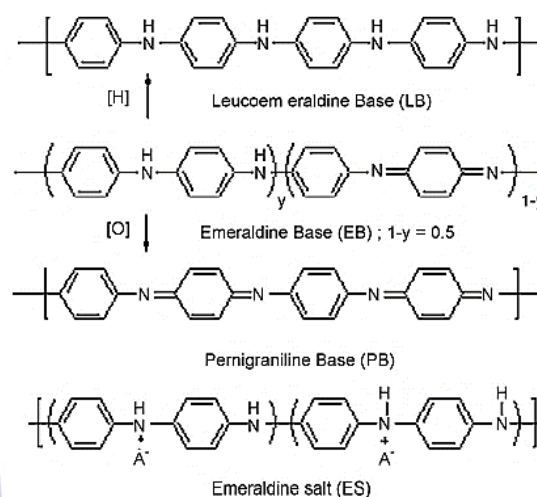
Karakterisasi polianilin sebagai bahan pendeteksi, sebelumnya telah diselidiki oleh Zhang et al (2014) dengan mengaplikasikan polianilin dan GO pada elektroda QCM (*Quartz Crystal Microbalance*) sebagai bahan pendeteksi kelembaban udara yang menunjukkan tingkat sensitivitas serta selektivitas yang baik. Aplikasi polianilin sebagai bahan aktif pendeteksi alkohol telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, dengan tingkat sensitivitas dan selektivitas berbeda berdasarkan konsentrasi analit yang diberikan serta proses polimerisasi dari polianilin. Dimitriev et al (2015) telah mengaplikasikan polianilin sebagai sensor absorbansi untuk alkohol, dengan melarutkan serbuk polianilin pada larutan DMF dan NMP kemudian dilaipiskan pada substrat kaca. Pada hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kinerja sensor semakin baik dengan melarutkan serbuk polianilin ke dalam larutan NMP dibanding dengan melarutkannya ke dalam larutan DMF. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh Mahato & Adhikari (2016) dengan membuat membran dari komposit polianilin dan PVA untuk mendeteksi empat jenis alkohol yang terdiri dari etanol, metanol, propanol, dan isopropanol. Menunjukkan hasil dengan tingkat sensitivitas yang berbeda, semakin tinggi konsentrasi alkohol yang diberikan maka semakin tinggi tingkat sensitivitas yang dihasilkan.

Oleh karena itu, pada jurnal *review* ini akan dilakukan analisis polianilin sebagai bahan aktif

pendeteksi alkohol terkait dengan sensitivitas dan selektivitasnya terhadap variasi konsentrasi alkohol.

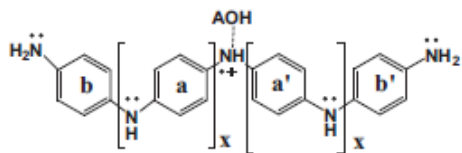
LANDASAN TEORI

Anilin merupakan senyawa turunan benzena dengan rumus kimia $C_6H_5NH_2$ dan termasuk dalam jenis polimer hidrokarbon hidrofobik karena mempunyai sifat sukar larut dalam air, dengan berat molekul 93 gr/mol, rapat massa 1,002 kg/liter, dan titik didih sebesar $183^\circ C - 186^\circ C$. Kemudian dengan tambahan oksidan dan larutan asam, anilin akan disintesis untuk menghasilkan suatu polimer yang disebut dengan polianilin.



Gambar 1. Oksidasi polianilin (Chi et al., 2009).

Berdasarkan tingkat oksidasi, polianilin dibagi menjadi tiga bentuk, diantaranya *pernigraniline* (teroksidasi penuh), *emeraldine* (teroksidasi setengah), dan *leucoemeraldine* (tereduksi penuh). Diantara tiga bagian bentuk polianilin tersebut, *emeraldine* merupakan bentuk polianilin konduktif dengan konduktivitasnya yang dapat diatur dari $10^{-10} \Omega/cm$ hingga $100 \Omega/cm$ melalui proses doping. Bentuk *leucoemeraldine* dan *pernigraniline* merupakan bentuk polianilin yang tidak dapat dibuat konduktif, karena *leucoemeraldine* dan *pernigraniline* merupakan konduktor yang buruk meskipun didoping dengan asam (Kumari et al., 2020). Bentuk polianilin *emeraldine* digolongkan menjadi dua, yaitu *emeraldine base* (EB) bersifat isolator dan *emeraldine salt* (ES) bersifat konduktor. EB dan ES merupakan bentuk polianilin yang tidak mudah larut hampir di semua pelarut organik umum karena memiliki struktur terkonjugasi. Dengan mendoping EB pada larutan asam seperti HCl, EB dapat berubah menjadi bentuk ES (Savest et al., 2018) dan kehadiran molekul asam dalam proses pendopingan dapat meningkatkan konduktivitas dari polianilin (Mousavi et al, 2016).



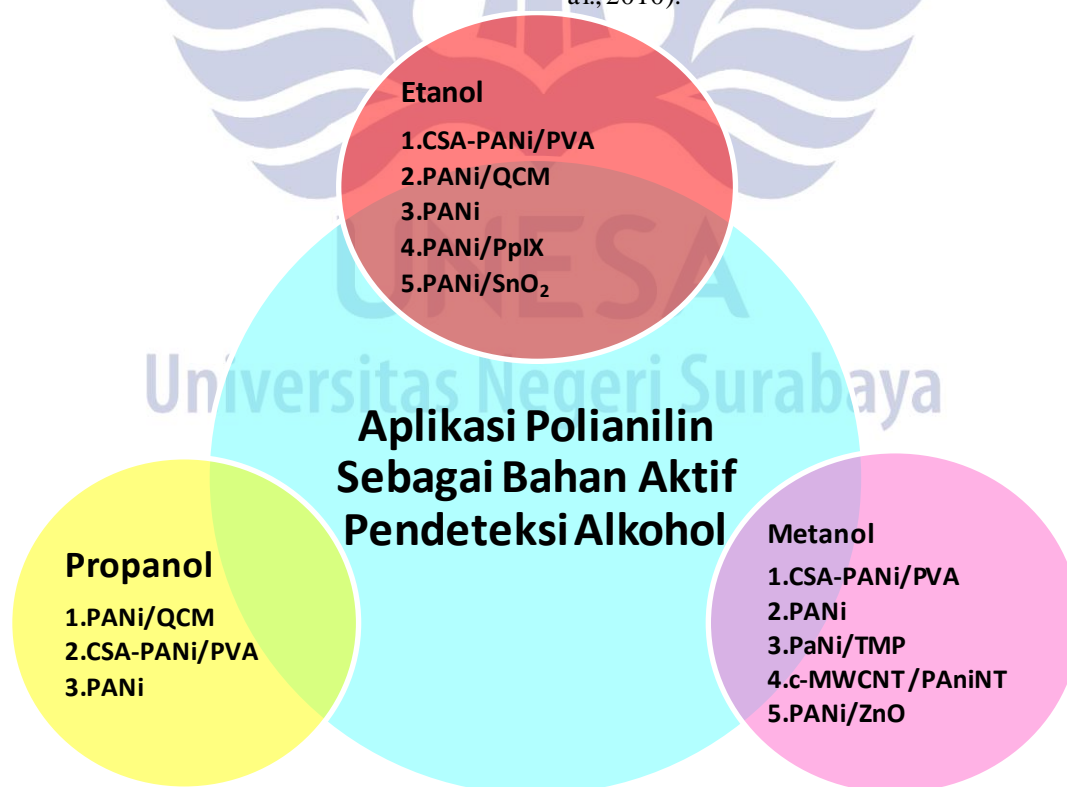
Gambar 2. Interaksi PANi-ES dengan alkohol (S. S. Liu et al., 2012)

Sebagai bahan aktif penginderaan, polianilin memiliki beberapa sifat yang berbeda dibanding dengan polimer lain, termasuk dalam hal sensitivitas, waktu respon, dan waktu pemulihan ketika terpapar oleh uap gas yang berbeda. Interaksi antara molekul analit dengan polianilin bersifat *reversible*, terkait dengan ukuran molekul, geometri molekul (penghalang sterik), adanya gugus fungsi, polarisasi, hidrofobisitas dan kemampuan untuk membentuk ikatan hidrogen dan sebagainya (Qi et al., 2014). Ketika polianilin terpapar oleh alkohol, maka molekul alkohol akan menyerap ke dalam sebagian besar rantai polianilin sehingga akan terjadi interaksi antara gugus $-OH$ alkohol dengan gugus $-NH$ polianilin (lihat pada gambar 2). Kemudian penetrasi dan penyerapan molekul analit ke dalam polianilin dapat menyebabkan pembengkakan pada rantai polianilin, sehingga akan menyebabkan meningkatnya jarak antar-rantai. Perubahan bentuk rantai polianilin menghasilkan pergerakan muatan listrik dalam rantai sehingga meningkatkan resistansi. Semakin kuat interaksi antara molekul analit dengan

polianilin, maka nilai resistansi akan semakin besar (Z. Li et al., 2019). Perbedaan respon dan perilaku pemulihan dari sensor berbahan polianilin terhadap suatu analit dapat disebabkan oleh beratnya molekul analit. Hal ini dikarenakan dengan berat molekul analit yang lebih rendah, maka proses adsorpsi pada permukaan polianilin akan semakin tinggi. Selain berat molekul, waktu pemulihan juga dapat dipengaruhi oleh polarisabilitas dipol listrik dari molekul, karena molekul dengan polarisasi dipol listrik yang tinggi akan mudah dipolarisasi oleh rantai utama dari polianilin yang diisi oleh molekul analit, dan karenanya dapat memperlambat proses desorpsi (Fratoddi et al., 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Alkohol merupakan suatu senyawa karbon yang mengandung atom oksigen berikatan tunggal dengan titik didih yang relatif tinggi dan keadaan struktur yang hampir sama dengan air. Semakin panjang rantai karbon yang terbentuk pada satu kelompok alkohol, maka kelarutannya dalam air akan semakin berkurang (Ayad & Torad, 2009). Selain sebagai senyawa pelarut, kegunaan alkohol sangat luas dan beragam. Komposit polianilin telah digunakan sebagai bahan aktif untuk mendeteksi alkohol. Dalam pengaplikasiannya sebagai bahan aktif sensor, komposit polianilin memiliki tingkat sensitivitas dan selektivitas yang berbeda karena dapat meningkatkan pengikatan molekul alkohol pada proses penginderaan (Gunawan et al., 2010).



Gambar 3. Urutan Pembahasan Aplikasi Polianilin Sebagai Bahan Aktif Pendeteksi Alkohol.

Polianilin untuk mendeteksi etanol

Etanol atau etil alkohol merupakan salah satu turunan dari senyawa hidroksil dengan rumus C_2H_5OH yang telah banyak diaplikasikan ke dalam berbagai jenis bidang seperti bidang industri, kesehatan, dan penelitian. Selain itu digunakan untuk bahan bakar mesin diesel ganda (Han et al., 2020) dan sebagai bahan bakar mesin pengapian (Saravanan et al., 2020). Dari aplikasi tersebut menunjukkan bahwa etanol merupakan jenis alkohol yang memiliki kandungan energi yang cukup tinggi. Berikut penelitian yang telah dilakukan peneliti terkait aplikasi polianilin sebagai bahan pendeteksi etanol.

Mahato & Adhikari (2016) telah mengembangkan membran komposit polianilin-poli vinil alkohol (PANI-PVA) dengan dopan *Camphor sulphonic acid* (CSA), *L-aspartic acid* (ASP) dan *p-toluene sulphonic acid* (PTSA) menggunakan metode polimerisasi oksidasi untuk mendeteksi uap etanol. Semakin tinggi konsentrasi etanol yang diberikan, maka tingkat sensitivitasnya juga semakin besar. CSA-PANI-PVA menunjukkan waktu respon 4,2 detik dan waktu pemulihan 4,8 detik, sedangkan untuk ASP-PANI-PVA memiliki waktu respon dan pemulihan 4,5 detik dan 4,9 detik. Jika dibandingkan dengan membran PTSA-PANI-PVA memiliki waktu respon dan pemulihan yang lebih lama, yakni 5 detik dan 6,2 detik. Berkaitan dengan konduktivitas listrik, membran polianilin CSA-PANI-PVA memiliki konduktivitas $9,30 \times 10^{-3}$ s/cm, nilai ini dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas membran polianilin PTSA-PANI-PVA dan ASP-PANI-PVA, yaitu $3,86 \times 10^{-4}$ s/cm dan $4,83 \times 10^{-4}$ s/cm.

Shinen et al (2014) mengaplikasikan sensor piezoelektrik berbahan polianilin yang dilapiskan pada elektroda QCM dengan menggunakan metode *spin coating*. Ketebalan Lapisan tipis polianilin yang diperoleh adalah 70, 93, 118 dan 176 nm, kemudian digunakan untuk mendeteksi beberapa jenis alkohol, diantaranya etanol, propanol, heksana dan benzena. Ketika analit dipaparkan pada lapisan tipis polianilin menunjukkan bahwa tingkat sensitivitas dari lapisan semakin meningkat seiring meningkatnya konsentrasi analit yang diberikan. Peningkatan resistivitas sensor pada paparan analit, dikarenakan adanya interaksi ikatan -H antara gugus-molekul -OH alkohol dengan atom nitrogen dari polianilin (Choudhury, 2009). Paparan 4000 ppm etanol pada lapisan tipis polianilin dengan ketebalan 93 nm menunjukkan tingkat sensitivitas yang tinggi mencapai 600% dibanding dengan lapisan tipis polianilin yang memiliki ketebalan 118 nm dan 176 nm, tingkat sensitivitasnya mencapai 125% dan 100%. Hal ini dapat disebabkan karena pada ketebalan rendah dari

pembentukan lapisan tipis dapat meningkatkan proses penyerapan polianilin terhadap uap analit.

Qi et al (2014) membuat lapisan tipis polianilin pada selebar kain dengan menggunakan metode elektrokimia. Kain non-anyaman tersebut dipotong dengan ukuran 5 cm x 5 cm. Kemudian masing-masing direndam ke dalam larutan yang mengandung 0,2 M anilin dan 0,2 M H_2SO_4 selama 10 menit pada suhu kamar sebelum polimerisasi. Sampel dikeluarkan dan dipindahkan ke dalam cairan berisi 20 ml APS 0,1 M untuk proses polimerisasi terakhir sebelum dikeringkan dalam ruang vakum selama 24 jam. Sampel yang telah dibuat digunakan untuk mengindera enam jenis analit berbeda, diantaranya amonia, aseton, triklorometana, etilasetat, etanol, dan toluene. Dalam hasil penelitian menunjukkan bahwa respon sampel untuk uap analit berbeda berdasarkan dengan variasi konsentrasi yang diberikan. Analit dengan konsentrasi yang tinggi memiliki respon waktu yang cepat dan sensitivitas yang rendah. Dalam mendeteksi etanol sensor memiliki sensitivitas yang tinggi dibandingkan dengan mendeteksi amoniak. Hal tersebut terjadi karena amoniak dapat mengurangi jumlah polaron pembawa muatan dalam rantai polianilin, sehingga menyebabkan polianilin menjadi kurang konduktif.

Joula zadeh & Navarchian (2015) membuat lapisan tipis polianilin pada substrat kaca dengan menggunakan metode *surface polymerization*. Lapisan tipis yang terbentuk diberi paparan etanol, dalam konsentrasi 3 ppm, 5 ppm, 9 ppm, 12 ppm, 15 ppm, 18 ppm, dan 22 ppm. Pada hasil paparan lapisan tipis polianilin diperoleh waktu respon untuk etanol sekitar 80 detik, sedangkan untuk waktu pemulihan diperlukan waktu sekitar 15 detik. Selama pengukuran, dilaporkan bahwa waktu respon dan pemulihan hampir tidak berubah.

Z. Li et al (2019) membuat lapisan tipis dari nanokomposit polianilin/*protoporphyrin* (PANI/PpIX) dengan mencampurkan H_2SO_4 5 M pada *interdigitated gold electrodes* (IDE) dengan metode *drop coating* untuk mendeteksi etanol dengan konsentrasi 1000 ppm dan suhu operasi 25°C. Lapisan tipis PANI / PpIX untuk mendeteksi etanol menunjukkan sensitivitas 2,741% dan waktu respon 2 - 4 detik.

Varade Ps et al (2017) telah mengembangkan penelitian terkait nanokomposit polianilin-Timah (IV) oksida (PANI/ SnO_2) yang disintesis dengan metode polimerisasi *in-situ*. Selanjutnya lapisan tipis PANI/ SnO_2 dibentuk dengan metode *drop casting* pada *interdigital transducer* (IDT). Uji sensitivitas sensor PANI/ SnO_2 dilakukan dengan memaparkan etanol, metanol, aseton dan toluene pada suhu kamar dalam variasi konsentrasi masing-masing 200-1000 ppm. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat resistansi PANI/ SnO_2 yang mendapat paparan dari seluruh analit dengan konsentrasi

200 ppm mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh tingkat konduktivitas dari lapisan tipis yang dibentuk lebih tinggi dari molekul analit yang diserap, sehingga memerlukan waktu lebih banyak untuk terdesorpsi. Diantara ke empat jenis analit etanol memiliki sensitivitas yang tinggi yaitu 50,68%. Waktu respon dan pemulihan yang dihasilkan adalah 60 detik dan 30 detik.

Polianilin untuk mendeteksi metanol

Metanol merupakan salah satu jenis alkohol yang memiliki rumus kimia CH_3OH dan merupakan bahan baku organik dasar dan banyak digunakan di berbagai jenis bidang seperti bidang industri, pertanian, manufaktur dan penelitian (Y. Liu et al., 2020; Yang & Jackson, 2012). Meningkatnya kebutuhan energi global mendorong pengembangan bahan bakar terbarukan. Metanol dan turunannya menjadi fokus utama dalam penelitian energi, karena dapat digunakan sebagai bahan bakar cair baru (Zou et al., 2016). Sebagai bahan bakar terbarukan metanol memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan bahan bakar fosil, diantaranya memiliki kinerja daya yang baik, tingkat pembakaran dan efisiensi termal yang tinggi (Chen et al., 2019; J. Li et al., 2018). Berikut penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti terkait aplikasi polianilin sebagai bahan pendeteksi metanol.

Mahato & Adhikari (2016) telah mengembangkan membran komposit polianilin-poli vinil alkohol (PANI-PVA) dengan dopan *Camphor sulphonie acid* (CSA), *L-aspartic acid* (ASP) dan *p-toluene sulphonie acid* (PTSA) menggunakan metode polimerisasi oksidasi untuk mendeteksi uap metanol. Membran tersebut diberi paparan metanol dengan konsentrasi yang berbeda yakni 1 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm dan 200 ppm. Ketika metanol dengan konsentrasi 200 ppm dipaparkan pada ketiga permukaan membran menunjukkan waktu respon yang berbeda 3,3 detik, 3,5 detik, dan 4,1 detik. Sedangkan waktu pemulihan yang dihasilkan adalah 3,7 detik, 4,2 detik, dan 5,4 detik.

Paulraj et al (2016) membuat lapisan tipis polianilin pada substrat kaca dengan menggunakan metode *dip-coating*. Proses pembuatannya terlebih dahulu dibuat dengan mencampurkan etilenadiamin dan nanopartikel polianilin dari 0,2 M, 0,25 M, dan 0,3 M anilin. Kemudian lapisan tipis yang terbentuk digunakan untuk mendeteksi amonia, trimetilamina, metanol, xilena, aetaldehida, monoetilamin, isopropanol, benzil alkohol dan formaldehida dengan konsentrasi 100 ppm. Dari hasil penginderaan tersebut diperoleh angka sensitivitas tertinggi yaitu metanol yang menunjukkan sensitivitas 1169% pada lapisan tipis polianilin dengan konsentrasi anilin 0,25 M, 255% untuk anilin 0,2 M, dan 86% untuk 0,3 M anilin. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan memaparkan metanol pada lapisan tipis dengan variasi

konsentrasi sebesar 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm, dan 100 ppm, serta 500 ppm. Bersamaan dengan paparan tersebut, tingkat resistansinya juga diukur. Hasil uji pengukuran variasi konsentrasi analit menunjukkan sensitivitas polianilin pada sampel 0,3 M anilin yang menurun hingga 50%, namun mengalami peningkatan tajam hingga 78% pada sampel 0,25 M anilin. Hal ini dapat terjadi karena kaitannya dengan hasil uji spektrum UV-Vis yang telah dilakukan sebelumnya. Dalam hasil uji spektrum UV-Vis dijelaskan bahwa pada konsentrasi yang lebih tinggi dari lapisan tipis polianilin akan menyebabkan peningkatan jumlah radikal bebas dalam rantai polimer, sehingga menyebabkan resistansinya tinggi dan akan mengurangi tingkat sensitivitas pada paparan analit.

Joulazadeh & Navarchian (2015) membuat lapisan tipis polianilin pada substrat kaca dengan menggunakan metode *surface polymerization*. Kemudian digunakan untuk mendeteksi metanol, dengan waktu respon dan waktu pemulihan, yakni 80 detik dan 15 detik. Saat mendeteksi metanol nilai sensitivitas yang diperoleh adalah 1,5% pada konsentrasi 3 ppm, 2% pada konsentrasi 5 ppm, 2,5% pada konsentrasi 9 ppm, 3% pada konsentrasi 12 ppm, 3,25% pada konsentrasi 15 ppm, 4% pada konsentrasi 18 ppm, dan 4,5% pada konsentrasi 22 ppm.

Khan et al (2013) telah mengembangkan penelitian terkait nanokomposit polianilin - *titanium (IV) molybdophosphate* (PANI-TMP) dibuat dengan metode sol-gel yang dibentuk menjadi pelet. Hasil uji resistivitas PANI-TMP dalam mendeteksi metanol pada suhu 25°C, menunjukkan *reversible* yang tinggi. Sebagaimana yang diketahui bahwa polianilin merupakan semikonduktor tipe-p apabila terjadi paparan gas yang mendonasikan elektron ke polianilin maka akan dapat menyebabkan penurunan konduktivitas. Resistivitas yang dapat direproduksi dari sensor dapat dikaitkan dengan adsorpsi dan desorpsi uap analit dengan interaksi metanol terhadap nitrogen imin dari polianilin. Muatan positif terjadi secara efektif pada nitrogen imin dan dapat dikurangi dengan mengubah nitrogen imina menjadi amina yaitu melalui konversi struktur benzenoid. Dengan demikian fragmen polimer yang dibebankan akan dapat mengurangi jumlah kation bergerak dan meningkatkan resistivitas. Sensitivitas yang dihasilkan yaitu 19,52% dengan konsentrasi 10 ppm.

Bora et al (2017) membuat sensor metanol berbasis nanokomposit c-MWCNT/PAniNT (*carboxylated multi-walled carbon nanotube/polyaniline nanotube composite*) dengan metode polimerisasi oksidasi *in-situ* untuk membentuk pelet. Uji penginderaan metanol dilakukan pada suhu 25°C dengan variasi konsentrasi sebesar 50 ppm, 100 ppm, 150 ppm, 200 ppm, 250 ppm, 300 ppm dan 500 ppm. Kemampuan c-MWCNT/PAniNT untuk mendeteksi metanol maksimal sebesar 250 ppm. Penambahan c-MWCNT pada PAniNT menghasilkan

diameter pori yang lebih kecil dibandingkan dengan PANiNT murni.

Sáaedi et al (2019) membuat lapisan tipis polianilin dengan metode *drop coating* di atas lapisan tipis ZnO yang lebih dulu telah diendapkan pada *interdigitated gold electrodes* (IDE) di bawah pengaruh medan magnet yang berbeda dengan kerapatan *magnetic field* (MF) 0,0 T, 0,3 T, dan 0,5 T, menghasilkan ZnO/PANi 0,5 T, ZnO/PANi 0,0 T, dan ZnO/PANi 0,3 T. Sensitivitas dapat diketahui melalui perubahan nilai resistivitas yang dapat diketahui melalui persamaan:

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

R adalah ketahanan jenuh dari bahan penginderaan pada konsentrasi analit dan R_0 adalah resistensi di udara.

Variasi konsentrasi metanol yang digunakan 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm, dan 100 ppm. Pada konsentrasi metanol 100 ppm, lapisan ZnO menunjukkan respon sebesar 8%. Nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan lapisan ZnO/PANi 0,0 T dan lapisan ZnO/PANi 0,3 T yang masing-masing memiliki respon 9% dan 13%, sedangkan ZnO/PANi 0,5 T merupakan lapisan yang memiliki respon terbaik dari lainnya, yakni 21%. Waktu respon dari lapisan ZnO/PANi 0,5 T menunjukkan durasi waktu yang singkat dibandingkan lapisan tipis lainnya, sedangkan waktu pemulihan lebih lambat yang diakibatkan karena penambahan ZnO (Das & Sarkar, 2017).

Polianilin untuk mendeteksi propanol

Propanol merupakan salah satu jenis alkohol yang tidak memiliki warna dengan rumus kimia $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, dapat diproduksi secara alami pada tingkat rendah selama proses fermentasi, dan banyak digunakan sebagai pelarut dalam industri farmasi (Sadeghi-kaji et al., 2020). Dibandingkan dengan etanol dan metanol, propanol tidak banyak diaplikasikan sebagai bahan bakar terbarukan, karena alkohol ini memiliki kandungan energi yang rendah dan bersifat higroskopis dan korosif (Man et al., 2014). Berikut penelitian yang telah dilakukan terkait aplikasi polianilin sebagai bahan pendeteksi propanol.

Joulazadeh & Navarchian (2015) membuat lapisan tipis polianilin pada substrat kaca dengan menggunakan metode *surface polymerization* untuk mendeteksi propanol. Nilai sensitivitas lapisan tipis dalam mendeteksi propanol cenderung lebih tinggi dibandingkan saat mendeteksi etanol dan metanol, yakni 5% untuk konsentrasi 3 ppm, 5,20% untuk konsentrasi 5 ppm, 5,5% untuk konsentrasi 9 ppm, dan 6% untuk konsentrasi 12 ppm. Hal ini dapat disebabkan karena laju desorpsi propanol lebih rendah dan ukuran molekulnya yang lebih

besar dari metanol dan etanol (Athawale & Kulkarni, 2000).

Mahato & Adhikari (2016) membuat sensor propanol dari polianilin yang didoping dengan CSA melalui metode polimerisasi oksidasi dengan penambahan PVA menghasilkan membran CSA-PANI-PVA. Pada konsentrasi 200 ppm propanol CSA-PANI-PVA menghasilkan sensitivitas sebesar 25%. Waktu respon dan pemulihan CSA-PANI-PVA adalah 6 detik dan 6,3 detik.

Shinen et al (2014) mengaplikasikan sensor berbasis lapisan tipis polianilin pada elektroda QCM dengan metode *spin-coating* untuk mendeteksi uap propanol, dengan variasi ketebalan lapisan antara lain 93 nm, 118 nm, dan 176 nm. Pemaparan 1000 ppm propanol pada tiga variasi ketebalan lapisan menunjukkan bahwa tingkat sensitivitas yang tinggi dicapai pada variasi ketebalan 93 nm dengan nilai sensitivitas sebesar 700%, kemudian 118 nm dengan nilai 500%, dan 70 nm dengan nilai 350%. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai ketebalan tidak dapat dipastikan bahwa nilai sensitivitas semakin besar atau sebaliknya.

Tabel 1. Perbandingan parameter hasil penginderaan etanol

Material	Metode Fabrikasi	Anali Pemandangan	Suhu Operasi (°C)	Limit Detection (ppm)	Sensitivitas (%)	t _{res} (s)	t _{rec} (s)	Detection Range	Referensi
CSA-PANI-PVA	Polimerisasi Oksidasi	Metanol, iso-propanol, dan propanol.	25	1	40	4,2	4,8	1-200 ppm	(Mahato & Adhikari (2016))
PANi/QCM	<i>Spin Coating</i> pada elektroda QCM.	Propanol, heksana, dan benzene.	25	100	600	-	-	100-4000 ppm	Shinen et al (2014)
PANi	Elektrokimia pada selambran kain	Amonia, aseton, triklorometana, etil asetat, dan toluene.	25	1	0,65	30	60	1-32 ppm	Qi et al (2014)
PANi	<i>Surface polymeritation</i> pada substrat kaca.	Metanol, propanol, dan butanol.	25	3	5	80	15	3-22 ppm	Joulazadeh & Navarchian, (2015)
PANi-PpXI	<i>Drop Coating</i> pada <i>interdigitated gold electrodes</i> (IDE). dengan metode drop coating	Trimetila min, trietila min, dan etil asetat.	25	-	2,741	2-4	2-4	1000 ppm	Z. Li et al (2019)
PANi/SnO ₂	<i>Drop Casting</i> pada struktur <i>interdigital transducer</i> (IDT) yang dibuat dalam film tembaga pada epoksi kaca.	Metanol, aseton, dan toluene.	25	200	50,68	60	30	200-1000 ppm	Varade Ps et al (2017)

Tabel 2. Perbandingan parameter hasil penginderaan metanol

Material	Metode Fabrikasi	Analit Pemandangan	Suhu Operasi (°C)	Limit Detection (ppm)	Sensitivitas (%)	t _{res} (s)	t _{rec} (s)	Detection Range	Referensi
CSA-PANI-PVA	Polimerisasi Oksidasi	Etanol, iso-propanol, dan propanol	25	1	49	3,3	3,7	1-200 ppm	Mahato & Adhikari (2016)
PANi (0,25 M anilin)	<i>Dip-coating</i> pada substrat kaca.	Amonia, trimetila mina, xilena,	25	10	78	10	14	10-100 ppm	Paulraj et al (2016)

Material	Metode Fabrikasi	Analit Pemandang	Suhu Operasi (°C)	Limit Detection (ppm)	Sensitivitas (%)	t_{res} (s)	t_{rec} (s)	Detection Range	Referensi
		asetaldehid, monoetilamin, iso-propanol, benzyl-alkohol, dan formaldehid.							
PANi	<i>Surface polymeritation</i> pada substrat kaca.	Etanol, propanol, dan butano.	25	3	4,5	80	15	3-22 ppm	Joulazadeh & Navarchian, (2015)
PANI-TMP	Sol-gel	Etanol dan 1-propanol.	25	10	19,52	20	10	10-80 ppm	Khan et al (2013)
c-MWCNT /PANiNT	Polimerisasi oksidasi in-situ	-	25	50	3	150	180	50-500 ppm	Bora et al (2017)
ZnO-PANi	<i>Drop-Coating</i> di atas lapisan tipis ZnO yang lebih dulu telah diendapkan pada <i>interdigitated gold electrodes</i> (IDE) di bawah pengaruh medan magnet yang berbeda dengan kerapatan <i>magnetic field</i> (MF) 0,0 T, 0,3 T, dan 0,5 T.	-	25	5	27	18,2	5,1	5-200 ppm	(Sáaedi et al., 2019)

Tabel 3. Perbandingan parameter hasil penginderaan propanol

Material	Metode Fabrikasi	Analit Pemandang	Suhu Operasi (°C)	Limit Detection (ppm)	Sensitivitas (%)	t_{res} (s)	t_{rec} (s)	Detection Range	Referensi
PANi	<i>Surface polymeritation</i> pada substrat kaca.	Etanol, Metanol, dan butanol.	25	3	6	60	12	3-12 ppm	Joulazadeh & Navarchian, (2015)
CSA-PANI-PVA	Polimerisasi Oksidasi	Etanol, metanol, dan iso-propanol	25	1	25	6	6,3	1-200 ppm	Mahato & Adhikari (2016)

Material	Metode Fabrikasi	Analit Pemandang	Suhu Operasi (°C)	Limit Detection (ppm)	Sensitivitas (%)	t _{res} (s)	t _{rec} (s)	Detection Range	Referensi
PANi/QCM	Spin Coating pada elektroda QCM.	Etanol, heksana, dan benzena	25	50	700	-	-	50-1000 ppm	Shinen et al (2014)

Tingkat sensitivitas sensor berbasis polianilin untuk mendeteksi alkohol telah dirangkum dalam tabel 1, 2, dan 3 di atas, yang mendeteksi tiga jenis alkohol, diantaranya etanol, metanol, dan propanol. Berdasarkan hasil sensitivitasnya material polianilin pada substrat QCM cocok digunakan sebagai kandidat etanol sebesar 600% pada konsentrasi 4000 ppm. Kemudian pada metanol material yang cocok digunakan sebagai kandidat penginderaan adalah polianilin dengan konsentrasi anilin 0,25 M pada substrat kaca dan sensitivitas yang dihasilkan adalah 78% saat konsentrasi 100 ppm. Lapisan tipis polianilin pada substrat QCM cocok sebagai kandidat material untuk mendeteksi propanol 1000 ppm dengan sensitivitas 700%.

KESIMPULAN

Berdasarkan review di atas aplikasi polianilin sebagai bahan aktif pendeteksi alkohol, menghasilkan tingkat sensitivitas dan selektivitas yang dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya jenis komposit dan doping yang digunakan pada polianilin, serta variasi konsentrasi analit yang berbeda. Karena masing-masing komposit yang digunakan memiliki karakteristik yang berbeda. Kemudian dalam pembuatan sensor berbasis polianilin juga ada beberapa variasi bentuk yang dapat digunakan, diantaranya bentuk pelet, lapisan tipis, dan membran. Pada review sensitivitas sensor dapat diketahui melalui perubahan resistansi dan frekuensi akibat penambahan analit serta konsentrasi minimal dari ketiga analit yang mampu dideteksi polianilin adalah 1 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- Athawale, A. A., & Kulkarni, M. V. (2000). Polyaniline and its substituted derivatives as sensor for aliphatic alcohols. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 67(1), 173–177. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00394-4](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00394-4)
- Bairi, V. G., Bourdo, S. E., Sacre, N., Nair, D., Berry, B. C., Biris, A. S., & Viswanathan, T. (2015). Ammonia gas sensing behavior of tanninsulfonic acid doped polyaniline-TiO₂ composite. *Sensors (Switzerland)*, 15(10), 26415–26429. <https://doi.org/10.3390/s151026415>
- Bora, A., Mohan, K., Pegu, D., Gohain, C. B., & Dolui, S. K. (2017). A room temperature methanol vapor sensor based on highly conducting carboxylated multi-walled carbon nanotube/polyaniline nanotube composite. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 253, 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.023>
- Cai, Q., Xu, B., Ye, L., Di, Z., Zhang, J., Jin, Q., Zhao, J., Xue, J., & Chen, X. (2014). Immobilization of biomolecules on cysteamine-modified polyaniline film for highly sensitive biosensing. *Talanta*, 120, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.11.013>
- Capriolo, G., & Konnov, A. A. (2020). Combustion of propanol isomers: Experimental and kinetic modeling study. *Combustion and Flame*, 218, 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.05.012>
- Cavallo, P., Frontera, E., Acevedo, D. F., Olejnik, R., Slobodian, P., Saha, P., & Barbero, C. A. (2016). Functionalized polyanilines made by nucleophilic addition reaction, applied in gas sensors field. *Synthetic Metals*, 215, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.02.013>

- Chen, Q., Gu, Y., Tang, Z., & Sun, Y. (2019). Comparative environmental and economic performance of solar energy integrated methanol production systems in China. *Energy Conversion and Management*, 187(December 2018), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.013>
- Chi, K. W., Hwang, H. Y., Park, J. Y., & Lee, C. W. (2009). Effective dehydrogenative oxidation of amines and alcohols via radical mechanism by nanoporous polyaniline catalysis. *Synthetic Metals*, 159(1–2), 26–28. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2008.07.009>
- Choudhury, A. (2009). Polyaniline/silver nanocomposites: Dielectric properties and ethanol vapour sensitivity. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 138(1), 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.01.019>
- Das, M., & Sarkar, D. (2017). One-pot synthesis of zinc oxide - polyaniline nanocomposite for fabrication of efficient room temperature ammonia gas sensor. *Ceramics International*, 43(14), 11123–11131. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.159>
- Deb, K., Debnath, A., Bera, A., Sarkar, K., Debnath, A., & Saha, B. (2019). Polyaniline encapsulated graphite: A sensitive system for resistive detection of methanol. *Surfaces and Interfaces*, 16(May), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.05.011>
- Dimitriev, O. P., Kopylov, O. N., & Tracz, A. (2015). Mechanisms of polyaniline film formation via solution casting: Intra-chain contraction versus inter-chain association. *European Polymer Journal*, 66, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.02.011>
- El-Bakary, A. A., El-Dakrory, S. A., Attalla, S. M., Hasanein, N. A., & Malek, H. A. (2010). Ranitidine as an alcohol dehydrogenase inhibitor in acute methanol toxicity in rats. *Human and Experimental Toxicology*, 29(2), 93–101. <https://doi.org/10.1177/0960327109353777>
- Fratoddi, I., Venditti, I., Cametti, C., & Russo, M. V. (2015). Chemiresistive polyaniline-based gas sensors: A mini review. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 220, 534–548. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.05.107>
- Gunawan, B., Rivai, M., & Juwono, H. (2010). Pengujian Karakteristik Komposit Polimer-Karbon Sebagai Bahan Sensor Gas. *Eprint*.
- Han, J., Somers, L. M. T., Cracknell, R., Joedicke, A., Wardle, R., & Mohan, V. R. R. (2020). Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine. *Fuel*, 275(March), 117867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
- Joulazadeh, M., & Navarchian, A. H. (2015). Alcohol sensibility of one-dimensional polyaniline and polypyrrole nanostructures. *IEEE Sensors Journal*, 15(3), 1697–1704. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360915>
- Khan, A. A., Baig, U., & Khalid, M. (2013). Electrically conductive polyaniline-titanium(IV)molybdophosphate cation exchange nanocomposite: Synthesis, characterization and alcohol vapour sensing properties. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(4), 1226–1233. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.12.022>
- 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>
- Li, J., Ma, X., Liu, H., & Zhang, X. (2018). Life cycle assessment and economic analysis of methanol production from coke oven gas compared with coal and natural gas routes. *Journal of Cleaner Production*, 185, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.100>
- Li, Z., Zhou, X., Shi, J., Zou, X., Huang, X., & Tahir, H. E. (2019). Preparation of conducting polyaniline/protoporphyrin composites and their application for sensing VOCs. *Food Chemistry*, 276(May 2018), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.029>
- Liu, S. S., Bian, L. J., Luan, F., Sun, M. T., & Liu, X. X. (2012). Theoretical study on polyaniline gas sensors: Examinations of response mechanism for alcohol. *Synthetic Metals*, 162(9–10), 862–867. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2012.03.015>
- Liu, Y., Li, G., Chen, Z., Shen, Y., & Zhang, H. (2020). Comprehensive analysis of environmental impacts and energy consumption of biomass-to-methanol and coal-to-methanol via life cycle assessment. *Energy*, 117961. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117961>
- Mahato, M., & Adhikari, B. (2016). Vapor phase sensing response of doped polyaniline-poly (vinyl alcohol) composite membrane to different aliphatic alcohols. *Synthetic Metals*, 220, 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.06.020>
- Matatagui, D., Fontecha, J., Fernández, M. J., Oliver, M. J., Hernando-García, J., Sánchez-Rojas, J. L., Gràcia, I., Cané, C., Santos, J. P., & Horrillo, M. C. (2013). Comparison of two types of acoustic biosensors to detect immunoreactions: Love-wave sensor working in dynamic mode and QCM working in static mode. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 189, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.02.003>
- Morozov, G., Breus, V., Nekludov, S., & Breus, I. (2014). Sorption of volatile organic compounds and their mixtures on montmorillonite at different humidity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and*

- Engineering Aspects*, 454(1), 159–171.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.104>
- Nassar, M. A., Ward, A. A., & Baseer, R. A. (2013). Synthesis and characterization of polyaniline nanocomposites. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 66(9), 39–46.
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68.
<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.01.003>
- Paulraj, R., Mani, G. K., Nallathambi, L., & Rayappan, J. B. B. (2016). A room temperature methanol vapour sensor based on polyaniline nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(8), 8315–8321.
<https://doi.org/10.1166/jnn.2016.11769>
- Ps, V., Sa, G., & Ad, S. (2017). *Synthesis and Characterization of Polyaniline-SnO₂ Composite for Volatile Organic Compounds (VOCs) Detection*. 63628, 117–122.
- Qi, J., Xu, X., Liu, X., & Lau, K. T. (2014). Fabrication of textile based conductometric polyaniline gas sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 202, 732–740.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.05.138>
- Sáaedi, A., Shabani, P., & Yousefi, R. (2019). High performance of methanol gas sensing of ZnO/PANI nanocomposites synthesized under different magnetic field. *Journal of Alloys and Compounds*, 802, 335–344.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.088>
- Sadeghi-kaji, S., Shareghi, B., Saboury, A. A., & Farhadian, S. (2020). Investigating the interaction of porcine pancreatic elastase and propanol: A spectroscopy and molecular simulation study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 687–691.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.119>
- Sarathy, S. M., Oßwald, P., Hansen, N., & Kohse-Höinghaus, K. (2014). Alcohol combustion chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*, 44, 40–102.
<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.04.003>
- Saravanan, P., Kumar, N. M., Ettappan, M., Dhanagopal, R., & Vishnupriyan, J. (2020). Effect of exhaust gas re-circulation on performance, emission and combustion characteristics of ethanol-fueled diesel engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 20, 100643.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100643>
- 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>
- Shinen, M. H., Essa, F. O., & Naji, A. S. (2014). Study the Sensitivity of Quartz Crystal Microbalance (QCM) Sensor Coated with Different Thickness of Polyaniline for Determination Vapors of Ether, Chloroform, Carbon tetrachloride and Ethyl acetate. *Chemistry and Materials Research*, 6(3), 7–12.
- Sustkova, H., Posta, A., & Voves, J. (2019). Polyaniline emeraldine salt as an ammonia gas sensor - Comparison of quantum-based simulation with experiment. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 114(April), 113621.
<https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.113621>
- Talwar, V., Singh, O., & Singh, R. C. (2014). ZnO assisted polyaniline nanofibers and its application as ammonia gas sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 191, 276–282.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.09.106>
- Tanguy, N. R., Thompson, M., & Yan, N. (2018). A review on advances in application of polyaniline for ammonia detection. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 257, 1044–1064.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.11.008>
- Tian, Y., Qu, K., & Zeng, X. (2017). Investigation into the ring-substituted polyanilines and their application for the detection and adsorption of sulfur dioxide. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 249, 423–430.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.057>
- Yang, C. J., & Jackson, R. B. (2012). China's growing methanol economy and its implications for energy and the environment. *Energy Policy*, 41, 878–884.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.037>
- Yoo, R., Kim, J., Song, M. J., Lee, W., & Noh, J. S. (2015). Nano-composite sensors composed of single-walled carbon nanotubes and polyaniline for the detection of a nerve agent simulant gas. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 209, 444–448.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.137>
- Zhang, H. Di, Tang, C. C., Long, Y. Z., Zhang, J. C., Huang, R., Li, J. J., & Gu, C. Z. (2014). High-sensitivity gas sensors based on arranged polyaniline/PMMA composite fibers. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 219, 123–127.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.005>
- Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., & Xiong, B. (2016). Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B*, 3(1), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>