

Gases in Food Production and Monitoring: Recent Advances in Target Chemiresistive Gas Sensors

Deni Ardhika Badrudin¹, Siti Aliza Fahira², Titi Fania Rabani³, Annora Elfreda

Fauziyah⁴, Arti Hastuti⁵

¹Teknologi Pangan dan Gizi, Universitas Djuanda, ardikadeni9@gmail.com

²Teknologi Pangan dan Gizi, Universitas Djuanda, alizasiti43@gmail.com

³Teknologi Pangan dan Gizi, Universitas Djuanda, faniarabani400@gmail.com

⁴Teknologi Pangan dan Gizi, Universitas Djuanda, elfredafauziyah@gmail.com

⁵Teknologi Pangan dan Gizi, Universitas Djuanda, arti.hastuti@unida.ac.id

ABSTRAK

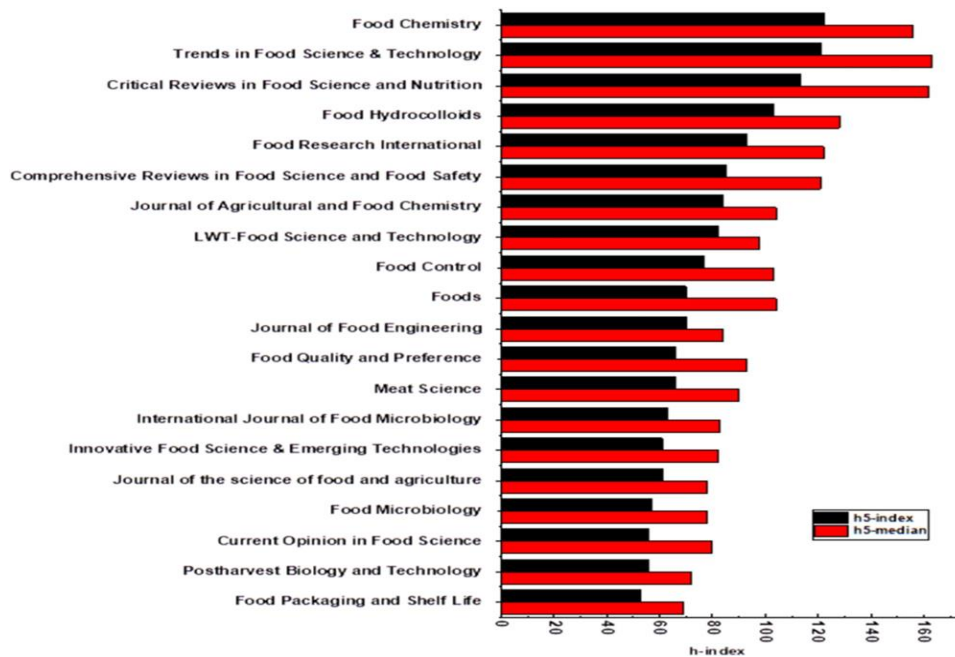
Abstrak dalam jurnal "Gases in Food Production and Monitoring: Recent Advances in Target Chemiresistive Gas Sensors" bahwa pertumbuhan populasi yang pesat telah meningkatkan permintaan untuk produksi makanan di berbagai sektor, termasuk pertanian, akuatik, dan pengolahan makanan. Gas digunakan dalam berbagai proses, mulai dari pengobatan hingga pengemasan, untuk meningkatkan kualitas dan keamanan makanan. Penulis menyoroti pentingnya sensor gas dalam teknologi makanan, terutama untuk mendeteksi gas-gas target seperti etilen, amonia, karbon dioksida, sulfur dioksida, dan etanol, yang berfungsi sebagai indikator kualitas makanan. Jurnal ini membahas kemajuan terbaru dalam pengembangan sensor gas, termasuk respons, sensitivitas, dan batas deteksi, serta menekankan minat yang lebih besar pada sensor heterostruktur yang beroperasi pada suhu rendah dan lapisan fleksibel.

Kata kunci: gas dalam makanan; kualitas makanan; karbon monoksida; etilena; oksigen; amonia; karbon dioksida; etanol; sulfur dioksida; sensor gas dalam makanan

PENDAHULUAN

Pendahuluan dalam jurnal "Gases in Food Production and Monitoring: Recent Advances in Target Chemiresistive Gas Sensors" oleh Nagih M. Shaalan dan rekan-rekan membahas peran penting gas dalam produksi makanan seiring dengan pertumbuhan populasi global yang pesat. Penulis menyoroti bahwa untuk memenuhi kebutuhan pangan yang meningkat, teknologi dalam produksi

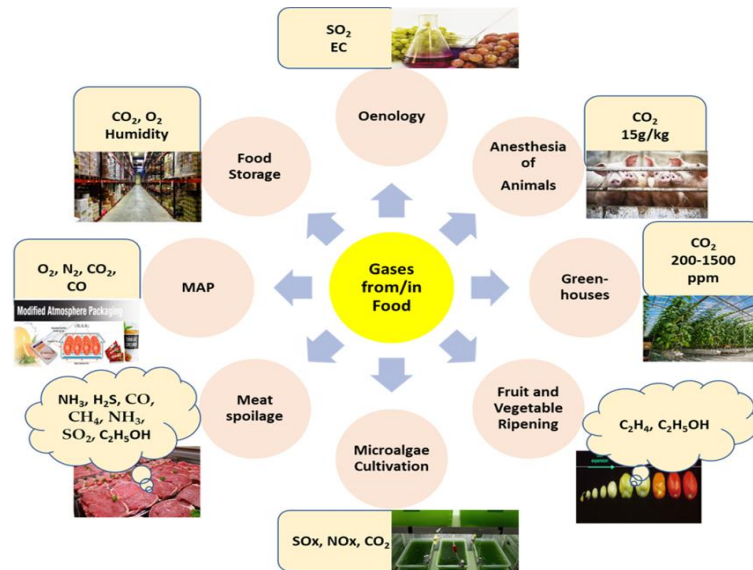
makanan, termasuk penggunaan gas, telah berkembang pesat. Gas digunakan dalam berbagai tahap pengolahan, pengawetan, dan penyimpanan makanan, serta berfungsi sebagai indikator kualitas makanan. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan untuk mendeteksi kontaminan kimia dan biologi dalam makanan, penggunaan sensor gas chemiresistive menjadi kunci dalam teknologi makanan (Cozzolino, Verona, & Rothaermel, 2018; Blanco-Rojo et al., 2019; Rico-Campà et al., 2019).



Gambar 1. Itu *h5*-indeks untuk artikel yang diterbitkan dalam lima tahun lengkap terakhir (2017–2021) dalam ilmu dan teknologi pangan

Jurnal ini menekankan perkembangan terbaru dalam sensor yang mampu mendeteksi gas-gas target seperti etilen, amonia, karbon dioksida, dan sulfur dioksida, yang tidak hanya penting dalam produksi makanan tetapi juga dalam pemantauan kualitasnya. Selain itu, penulis membahas kemajuan terbaru dalam teknologi sensor yang beroperasi pada suhu rendah dan menggunakan lapisan fleksibel, serta memberikan pandangan ke depan tentang penggunaan teknologi sensor dalam produksi dan pemantauan makanan (Shalan et al., 2022). Dengan demikian, artikel ini bertujuan untuk mengumpulkan pengetahuan berharga

bagi peneliti yang tertarik dalam bidang ilmu makanan dan pengembangan sensor.



Gambar 2. Skema gas yang digunakan dalam atau diproduksi dari operasi makanan.

METODE PENELITIAN

Metode dalam jurnal "Gases in Food Production and Monitoring: Recent Advances in Target Chemiresistive Gas Sensors" menjelaskan pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi dan mengembangkan sensor gas chemiresistive. Penulis memfokuskan penelitian pada gas-gas tertentu seperti etilen, amonia, karbon dioksida, sulfur dioksida, dan etanol, yang relevan dalam konteks produksi dan pemantauan kualitas makanan. Metode yang diterapkan mencakup pengembangan dan pengujian berbagai jenis sensor dengan bahan sensing yang berbeda, termasuk nanomaterial seperti karbon nanotube dan oksida logam, untuk meningkatkan sensitivitas dan batas deteksi gas. Selain itu, penulis melakukan analisis terhadap respons sensor terhadap variasi konsentrasi gas serta kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, untuk menilai kinerja sensor dalam situasi nyata. Melalui pengujian ini, penulis berusaha untuk mengeksplorasi keefektifan teknologi sensor terbaru dan memberikan wawasan mengenai potensi aplikasi praktis dalam industri

makanan. Penelitian ini tidak hanya berfokus pada pengembangan sensor, tetapi juga pada penerapan teknologi tersebut untuk meningkatkan keamanan dan kualitas produk makanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

2. Kemajuan Jangka Panjang dan Terbaru dalam Produksi Makanan Berbasis Gas

2.1. Gas dalam Produksi Minuman

Proses produksi minuman, terutama anggur, melibatkan penggunaan gas beracun seperti SO_2 , yang memiliki sifat antioksidan. Meskipun beracun, SO_2 penting dalam produksi anggur karena melindungi dari mikroba dan oksidasi. Gas ini bertindak sebagai penghambat perkembangan mikroorganisme, antioksidan untuk mencegah oksidasi polifenol, dan pelarut. SO_2 juga digunakan sebagai aditif makanan (E220) dalam industri makanan (Silva & Lidon, 2016; Black et al., 2022).

Oksidasi pada anggur dapat merusak sifat organoleptik dan nilai gizi, dengan fenol sebagai pemicu utama oksidasi yang menyebabkan penggelapan. SO_2 membantu mengurangi efek ini dengan menghambat oksidasi fenol dan berfungsi sebagai antimikroba. Selain anggur, SO_2 juga ditemukan dalam produk lain seperti buah kering, daging, bir, dan selai (Howe et al., 2018).

Selain itu, etil karbamat (EC), senyawa karsinogenik yang ditemukan dalam minuman beralkohol, menjadi perhatian besar dalam industri minuman (Chen et al., 2022).

2.2. Gas dalam Anestesi Hewan

Salah satu metode penyembelihan hewan menggunakan CO_2 untuk membuat hewan tidak sadar. Gas CO_2 dicampur dengan udara, nitrogen (N_2), oksigen (O_2), atau argon (Ar) untuk menyebabkan kehilangan kesadaran pada hewan setelah beberapa menit inhalasi. Konsentrasi CO_2 yang sangat tinggi, lebih dari 30%, dapat menyebabkan kejang pada hewan, jadi konsentrasi gas ini

secara bertahap ditingkatkan hingga mencapai 70% untuk menciptakan efek pingsan (Atkinson et al., 2020). Hewan biasanya melewati ruangan dengan peningkatan konsentrasi CO₂ atau dua ruangan yang berbeda tingkat CO₂-nya, dengan ruangan pertama memiliki konsentrasi rendah dan yang kedua lebih tinggi.

Konsumsi CO₂ pada hewan tergantung pada beberapa faktor, seperti berat tubuh hewan. Untuk babi, konsumsi CO₂ berkisar antara 100-500 g/babi (Jongman et al., 2021), sementara untuk ayam, konsumsi CO₂ rata-rata adalah 15 g/kg (Spizzica, 2019).

2.3. Gas dalam Rumah Kaca

CO₂ telah digunakan di rumah kaca komersial selama lebih dari 40 tahun untuk meningkatkan hasil tanaman, karena CO₂ berperan penting dalam fotosintesis. Peningkatan konsentrasi CO₂ dua hingga tiga kali lipat dapat mempercepat pertumbuhan, meningkatkan hasil panen, dan memperbaiki kualitas tanaman seperti batang yang lebih kuat dan ketahanan terhadap penyakit. Konsentrasi CO₂ yang ideal di rumah kaca berkisar antara 200 hingga 1500 ppm, tergantung pada jenis tanaman. Untuk menjaga kadar CO₂ optimal, rumah kaca memerlukan pemantauan yang cermat menggunakan sensor CO₂ dengan teknologi analisis gas inframerah (IRGA), yang dikendalikan oleh sistem komputer untuk memastikan kadar CO₂ tetap dalam batas yang diinginkan (Santhanam & Ahamed, 2018).

2.4. Gas dalam Kemasan Atmosfer Termodifikasi

Modified Atmospheric Packaging (MAP) adalah metode pengemasan makanan yang menggunakan campuran gas untuk memperpanjang masa simpan tanpa mengubah sifat makanan. Gas seperti nitrogen (N₂), karbon dioksida (CO₂), argon (Ar), dan terkadang karbon monoksida (CO) digunakan, tergantung pada jenis makanan. Proses ini mengurangi kadar oksigen dalam

kemasan, yang membantu menjaga kesegaran dan mencegah pembusukan tanpa bahan pengawet (Qu et al., 2022; Li et al., 2022).

Sebagai contoh, daging membutuhkan oksigen tinggi (70-80%) untuk menjaga warna dan kesegarannya, sementara makanan laut memerlukan oksigen rendah dan CO₂ tinggi untuk mencegah pembusukan. Produk makanan yang dimasak lebih baik diawetkan dengan CO₂ minimal 30%, yang juga berfungsi sebagai insektisida. Pada daging mentah, oksigen menjaga warna merah segar, tetapi terlalu banyak oksigen dapat membuat daging berubah coklat, menandakan pembusukan. Pada makanan nabati, keseimbangan oksigen dan CO₂ penting untuk menjaga kesegaran. Karbon monoksida (CO) kadang digunakan untuk memberi warna merah pada daging, meskipun CO sangat berbahaya karena tidak berwarna, tidak berbau, dan sangat beracun (McNulty et al., 2022).

2.5. Gas dalam Budidaya Mikroalga

Pemilihan mikroalga untuk budidaya bergantung pada kemampuan alga tersebut untuk tumbuh dengan baik dan tahan terhadap gas buang (flue gas), seperti CO₂, SO_x, dan NO_x. Selain itu, mikroalga juga harus mampu bertahan pada suhu tinggi yang sering ada pada gas buang. Tiga mode utama dalam budidaya mikroalga adalah:

- Autotrofik: Menggunakan senyawa mineral dan cahaya sebagai sumber energi.
- Heterotrofik: Menggunakan senyawa organik seperti glukosa.
- Mixotrofik: Gabungan antara autotrofik dan heterotrofik.

Pada budidaya mikroalga, kontrol terhadap pencahayaan, distribusi gas, dan kualitas udara sangat penting untuk memastikan transfer CO₂ yang optimal. Mikroalga menyerap CO₂ untuk berkembang dan mendukung metabolisme. Pada beberapa spesies, penyerapan CO₂ paling optimal saat kadar CO₂ rendah, dan semakin tinggi kadar CO₂, semakin besar produksi lipid dan asam oleh

mikroalga.

Faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas biofiksasi CO₂ oleh mikroalga termasuk jenis strain, sistem budidaya, suhu, konsentrasi CO₂, dan laju pertumbuhannya. Gas buang harus dianalisis sebelum digunakan, karena beberapa gas buang memiliki kadar SO_x, CO₂, dan NO_x yang tinggi. Strain mikroalga yang tahan terhadap gas beracun dapat mengurangi biaya pengolahan gas.

Konsentrasi gas yang ideal untuk strain mikroalga adalah:

- CO₂: 30-70%
- SO_x: 30-100 ppm
- NO_x: 50-100 ppm

Strain yang lebih toleran terhadap gas beracun meningkatkan peluang keberhasilan budidaya dan mengurangi biaya pengolahan gas.

2.6. Gas dalam Kerusakan Daging

Kerusakan daging terjadi karena perubahan metabolik yang mempengaruhi sifat organoleptiknya, menjadikannya tidak layak konsumsi. Proses ini dipicu oleh kondisi seperti kelembaban tinggi, rendahnya kadar oksigen, dan suhu rendah, yang mendukung pertumbuhan mikroba. Ketika mikroba berkembang pada daging, unggas, dan ikan, mereka menghasilkan senyawa nitrogen volatil seperti H₂S dan NH₃, yang menyebabkan bau tajam (Nastiti dan Bintoro, 2022).

Setelah pemotongan, sirkulasi darah dan sistem pernapasan hewan terhenti, memicu proses glikolisis anaerob yang menurunkan pH daging. Proses ini juga menyebabkan autolisis protein, menghasilkan asam amino yang membuat daging lebih rentan terhadap kerusakan mikroba. Senyawa volatil seperti H₂S dan NH₃ terbentuk dan digunakan sebagai indikator utama kesegaran daging selama penyimpanan (Zhang dan Lim, 2018; Edita et al., 2018;

Matindoust et al., 2021).

2.7. Gas dalam Pematangan Buah dan Sayuran

Pemantauan buah dan sayuran setelah panen sangat penting untuk menjaga kesegarannya. Salah satu metode yang digunakan adalah mengurangi kadar oksigen dan menambah nitrogen untuk memperlambat pematangan dan memperpanjang umur simpan produk. Namun, kadar CO₂ yang terlalu tinggi dapat merusak buah dan sayuran. Jika kadar oksigen terlalu rendah, proses respirasi bisa berubah menjadi fermentasi, yang menghasilkan senyawa volatil seperti etanol, yang dapat digunakan untuk memantau fermentasi tersebut (Krupa dan Tomala, 2021).

Gas etilena (C₂H₄) yang diproduksi oleh buah berfungsi sebagai hormon pematangan. Kadar C₂H₄ meningkat saat buah matang dan menurun saat membusuk. Beberapa buah, seperti apel McIntosh, menghasilkan C₂H₄ dalam jumlah besar, sehingga harus dipanen sebelum gas ini meningkat terlalu tinggi. Buah seperti persik dan plum sangat sensitif terhadap C₂H₄ dan cepat matang setelah dipanen, sementara beberapa buah bisa disimpan lebih lama jika produksi C₂H₄ ditekan. Atmosfer terkendali dengan konsentrasi C₂H₄ antara 0,001 hingga 10 ppm terbukti efektif untuk memperpanjang umur simpan buah, dan gas ini juga digunakan untuk mempercepat pematangan buah yang belum matang.

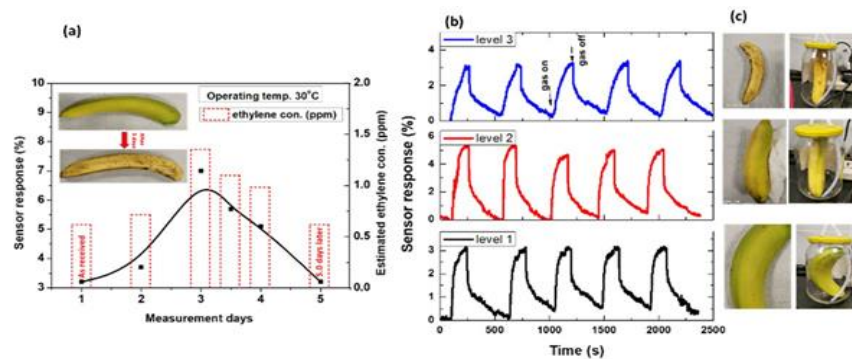
3. Kemajuan Terbaru dalam Penginderaan Gas Target

3.1. Kemajuan Terbaru dalam Sensor Gas C₂H₄

Pengukuran persentase C₂H₄ pada buah cukup rumit dan mahal, karena memerlukan peralatan laboratorium canggih. Namun, kontrol tingkat C₂H₄ sangat penting dalam rantai distribusi buah untuk mengontrol pematangan dan mengevaluasi kualitas buah di pasar. Penelitian terbaru fokus pada deteksi pematangan untuk menghindari limbah makanan dengan mengendalikan C₂H₄.

Contohnya, pada buah pisang, produksi C_2H_4 meningkat setelah hari ke-15 penyimpanan, mencapai puncaknya pada hari ke-18, kemudian menurun. Pada tahap pematangan maksimal, kadar C_2H_4 bisa mencapai 1,5 ppm/kg. Oleh karena itu, deteksi awal dengan kadar di bawah 0,5 ppm sangat penting untuk mengontrol pematangan buah.

Sensor gas C_2H_4 berbasis MWCNT yang diinduksi cacat dikembangkan untuk mendeteksi kadar C_2H_4 pada buah pisang. Sensor ini diuji pada suhu kamar dengan konsentrasi C_2H_4 antara 130 hingga 10 ppm, dan dapat memantau kematangan buah pada berbagai tahap dengan akurasi dan keandalan yang baik. Sensor ini berhasil mendeteksi C_2H_4 yang dilepaskan oleh pisang dan menunjukkan respons sesuai dengan tingkat kematangan yang diamati.



Gambar 3.(A) Respon sensor dari satu buah pisang sebagai fungsi dari hari pematangan, mendeteksi pematangan pisang selama lima hari;B) Sinyal sensor berulang (lima siklus) untuk (C) pisang yang berbeda pada tingkat kematangan yang berbeda. Gambar diadaptasi dengan izin dari [21].

Tabel 1. Kimia resistif C_2H_4 sensor yang dilaporkan dalam literatur

Materials	Operating Temp. (°C)	C_2H_4 Concentration	Response %	Limit of Detection	Ref.
Defective-CNTs	RT	300 ppb	~2.7	130 ppb	[15,21]
TiO ₂ -WO ₃	250	100 ppm	1.2	8.0 ppm	[60]

Pd-SnO ₂	250	100 ppm	11.1	50 ppb	[61]
PANI/MWCNTs/SnO ₂	RT	100 ppm	1.2	10 ppm	[62]
Pd/rGO/ α -Fe ₂ O ₃	250	1000 ppm	160	10 ppb	[63]
SnO ₂	375	2.5 ppm	15	—	[64]
Cr ₂ O ₃ -SnO ₂	350	2.5 ppm	17	—	
β -MnO ₂	250	25 ppm	10.0	10 ppm	[65]
ZnO-Ag _{0.6}	RT	30 ppm	5.6	—	[66]

3.2. Kemajuan Terbaru dalam Sensor Gas NH₃

Amonia (NH₃) adalah polutan utama yang dihasilkan dari sektor pertanian, terutama dari ekskresi hewan ternak dan pembusukan daging serta ikan. Keberadaannya perlu dipantau di tempat penyimpanan produk pangan, seperti di toko dan gudang. Deteksi NH₃ penting untuk memantau pembusukan, karena konsentrasi NH₃ yang tinggi (>15 ppm) atau waktu paparan yang lama (>120 menit) menunjukkan kerusakan produk, meskipun deteksi NH₃ setelah penyimpanan beku bisa lebih sulit.

Berbagai sensor NH₃ telah dikembangkan, seperti sensor berbasis polyaniline/SrGe₄O₉ yang menunjukkan respons signifikan pada suhu ruang (25°C) dan kelembaban 60%, serta sensor berbasis organic field-effect transistors (OFETs) yang memiliki batas deteksi sangat rendah (<1 ppm). Selain itu, nanopartikel CeO₂ juga digunakan untuk mendeteksi NH₃ dengan respons yang cepat. Sensor-sensor ini memiliki keunggulan dalam fleksibilitas, stabilitas, dan selektivitas terhadap NH₃.

Selain itu, ada pengembangan sensor wearable yang dapat digunakan untuk memantau kualitas produk pangan secara real-time di pasar atau tempat penyimpanan daging. Sensor fleksibel berbasis material dua dimensi dapat

digunakan pada pakaian pekerja industri pangan untuk deteksi dini pembusukan, memberikan solusi inovatif untuk pengawasan kualitas pangan secara lebih efektif.

Tabel 2. Kemiresistif NH₃ terbaru sensor yang dilaporkan dalam literatur.

Materials	Operating Temp. (°C)	NH ₃ Concentration	Response %	Limit of Detection	Ref.
PANI/SrGe ₄ O ₂	RT	200 ppb	16.0	250 ppt	[68]
DPPT-TT-based	RT	2 ppm	~8.0	500 ppb	[69,70]
OFETs-based sensors		21 ppb	~22	2.17 ppb	
CeO ₂	RT	500 ppm	25	500 ppb	[71]
PANI/GO/PANI/ZnO	RT	100 ppm	38.3	23 ppm	[72]
MXene/rGO	RT	100 ppm	7.0	—	[73]
Carbon doped-TiO ₂	RT	100 ppm	18	—	[75]
Black phosphorus (BP)	RT	100 ppm	1.2	100 ppb	[76]
Ce-TiO ₂	RT	20 ppm	23.9	140 ppb	[77]
TiO ₂ Nanospheres	250	300 ppm	2.1	—	[78]
N-TiO ₂	RT	3 ppm	1.2	1.0 ppm	[79]
TiO ₂ /Ti ₃ C ₂ T _x	RT	10 ppm	1.03	500 ppb	[80]

3.3. Kemajuan Terbaru dalam Sensor Gas SO₂

Sulfit (SO₂) dalam minuman perlu dikontrol karena dapat mempengaruhi rasa, menghambat fermentasi malolaktik, dan menimbulkan risiko kesehatan jika kadarnya terlalu tinggi. Regulasi mewajibkan pencantuman kadar SO₂ pada label jika lebih dari 10 ppm, sementara batas pajanan udara yang direkomendasikan adalah 2 ppm selama 10 jam atau 5 ppm dalam waktu 5 menit. Untuk mendeteksi SO₂, berbagai sensor dengan keandalan tinggi telah

dikembangkan. Salah satunya adalah sensor SAC-Ni/H-SnO₂ (Liu et al, 2022), yang sangat sensitif terhadap 20 ppm SO₂ namun beroperasi pada suhu tinggi 250°C. Sensor lain, ZCNb nanohybrids (Shinde et al, 2022), menunjukkan respons tinggi pada suhu 150°C dengan berbasis material hibrida. Sensor MEMS berbasis NiO/SnO₂ (Hsiao, 2022) juga menunjukkan performa yang lebih baik pada suhu tinggi, yakni 250°C, dengan respons 20% pada 400 ppb SO₂. Sementara itu, sensor Au/La₂O₃-NPs/ZnO/MEMS (Hsueh, 2021) lebih responsif pada suhu 260°C. Sensor berbasis La_{0.6}Ca_{0.4}FeO₃ (Aranthady, 2021) memiliki performa terbaik pada suhu 120°C dan selektivitas tinggi terhadap SO₂. Di sisi lain, sensor berbasis MWCNT/MoS₂ (Jha, 2022) bekerja pada suhu ruang dengan respons rendah pada konsentrasi SO₂ dan batas deteksi 500 ppb. Sensor UiO-66-NH₂/MWCNT (Zhai et al, 2022), yang fleksibel dan efektif pada suhu ruang, juga menunjukkan respons stabil terhadap SO₂. Secara keseluruhan, penelitian terus berkembang untuk menciptakan sensor SO₂ yang lebih sensitif, selektif, dan beroperasi pada suhu yang lebih rendah.

Tabel 3. SO kemiresistif terbaru sensor yang dilaporkan dalam literatur.

Materials	Operating Temp. (°C)	SO ₂ Concentration	Response %	Limit of Detection	Ref.
SAC-Ni/H-SnO ₂	250	20 ppm	48	100 ppb	[83]
ZCNb nanohybrids	150	100 ppm	61.5	100 ppb	[84]
MWCNT/MoS ₂	RT	1.0 ppm	1.9	500 ppb	[88]
NiO/SnO ₂	250	2.0 ppm	30	400 ppb	[85]
La _{0.6} Ca _{0.4} FeO ₃ thin film	160	3.0 ppm	7.6	-	[87]
Au/La ₂ O ₃ -NPs/ZnO	260	1.0 ppm	44	100 ppb	[86]
PAN@UiO-66-NH ₂	RT	100 ppm	225	1.0 ppm	[89]
Ni-MOF/-OH-SWNTs	RT	1.5 ppm	28	1.0 ppm	[90]
PVF/TiO ₂ nanocomposites	150	600 ppm	83	50 ppm	[91]

3.4. Kemajuan Terbaru dalam Sensor Gas CO₂

Karbon dioksida (CO₂) banyak digunakan dalam industri pangan, terutama untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman di rumah kaca dan mengawetkan makanan. CO₂ disuntikkan pada konsentrasi 200–1500 ppm untuk tanaman, karena konsentrasi yang lebih tinggi bisa menghambat pertumbuhannya. Oleh karena itu, penting untuk memiliki sensor CO₂ yang sensitif dalam rentang tersebut.

Berbagai sensor CO₂ telah dikembangkan, seperti sensor berbasis *p*-Si/MoO₃ nanohybrid yang sangat sensitif pada 150 ppm CO₂ dan memiliki waktu respons cepat. Sensor berbasis komposit polimer dengan MWCNTs juga sensitif dalam rentang 500–5000 ppm. Material hibrida seperti SnO₂ dan reduced graphene oxide (rGO) menawarkan deteksi yang baik dengan batas deteksi rendah (5 ppm), serta respons yang cepat.

Sensor berbasis polyaniline/SnO₂ nanocomposite (PSN) menunjukkan kinerja yang baik pada konsentrasi tinggi, sedangkan sensor berbasis MWCNTs dan polypyrrolytic polymer (PPY) menunjukkan respons yang cepat pada 1000 ppm CO₂. Sensor-sensor ini bekerja dengan cara mendeteksi interaksi antara CO₂ dan spesies oksigen reaktif di permukaan sensor.

Tabel 4. Kemirisan CO₂ terbaru sensor yang dilaporkan dalam literatur.

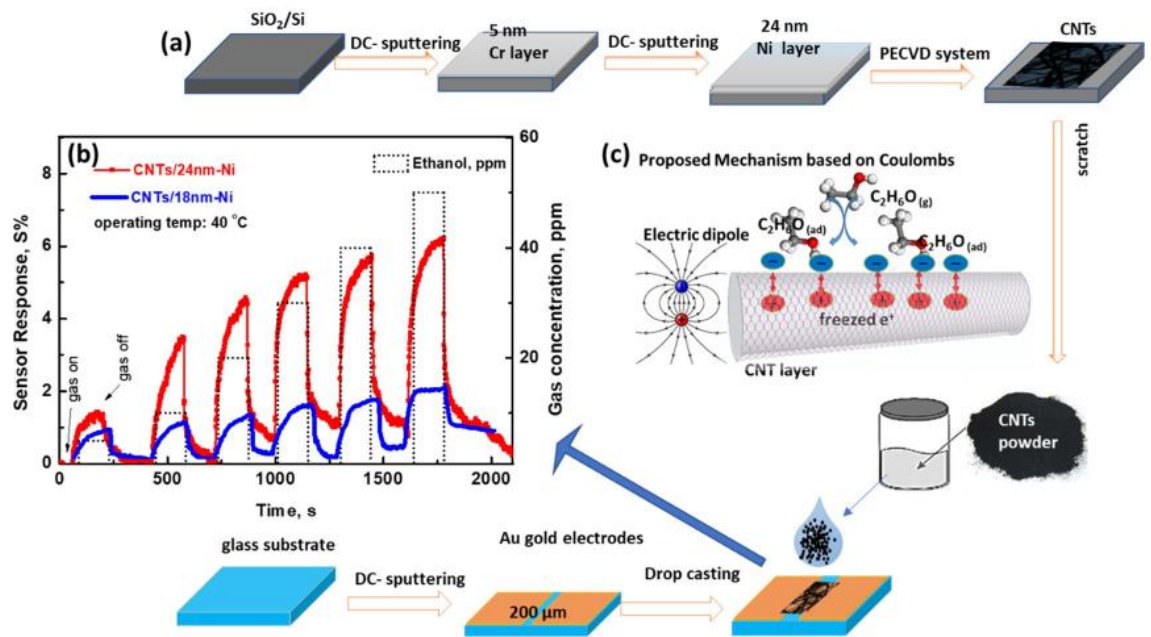
Materials	Operating Temp. (°C)	CO ₂ Concentration	Response %	Limit of Detection	Ref .
<i>p</i> -Si/MoO ₃	250	150 ppm	12.0	50 ppm	[92]
Sulfonated polyether ether ketone	RT	5000 ppm	47	500 ppm	[93]
CuO/rGO hybrid	RT	500 ppm	450	–	[95]
SnO ₂ -rGO Hybrid	RT	500 ppm	4.5	10 ppm	[96]
rGO/NiO(8)-In ₂ O ₃	RT	50 ppm	40	5 ppm	[97]
PANI-SnO ₂ -UV	RT	5000 ppm	47.4	3000 ppm	[98]

G-LaNiSbWO ₄ -PPy	RT	1800 ppm	120	400 ppm	[99]
MWCNT/PPY	RT	1000 ppm	7.2	250 ppm	[100]
PDDA- MWCNTs	RT	20 ppm	4.0	—	[102]
Au/PAni nanocomposites	RT	4000 ppm	2.0	—	[103]

3.5. Kemajuan Terbaru dalam Sensor Gas C₂H₅OH

C₂H₅OH dihasilkan melalui fermentasi gula buah oleh ragi dan berfungsi sebagai indikator pembusukan pada buah dan sayuran. Satish Babu berhasil menghasilkan etanol dari sayuran kaya pati yang rusak, seperti kentang liar dan ubi jalar. Buah yang belum matang tidak menghasilkan C₂H₅OH, sementara yang matang dan terlalu matang mengandung etanol dalam jumlah yang bervariasi. Untuk deteksi pembusukan, sensor C₂H₅OH penting, dan sensor berbasis karbon nanotubes (CNT) yang sangat cacat dapat mendeteksi C₂H₅OH dengan sensitivitas tinggi pada suhu kamar.

Beberapa sensor lain yang dikembangkan menggunakan bahan seperti ZnO nanospheres dan komposit In₂O₃/Cr₂O₃ menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi etanol, dengan keunggulan selektivitas, stabilitas, dan respons cepat. Sensor berbasis MoO₂-Ni-graphene menunjukkan peningkatan respons yang signifikan, sementara sensor self-powered dari Ag/ZnO nanowires menawarkan potensi besar dalam aplikasi praktis. Terakhir, sensor fleksibel TiO₂@2DTiC yang sensitif terhadap etanol juga dikembangkan untuk pemantauan lingkungan di industri penyimpanan makanan.



Gambar 4.(A) Skema sintesis CNT dan fabrikasi perangkat penginderaan; (B) sinyal sebagai fungsi waktu pada konsentrasi gas yang berbeda untuk sensor yang disiapkan oleh lapisan katalis Ni berukuran 18 dan 24 nm; dan (C) bahasa C₂H₅Mekanisme penginderaan OH. Gambar direproduksi dengan izin dari.

Tabel 5. Kimia resistif C terbaru 2H₅Sensor OH dilaporkan dalam literatur.

Sensor	Operating Temp. (°C)	C ₂ H ₅ OH Concentration	Response %	Limit of Detection	Ref.
MWCNTs	RT	50 ppm	8.8	5 ppm	[107]
ZnO microspheres	250	100 ppm	58.4	1.17 ppb	[108]
CeO ₂ /ZnSnO ₃	200	100 ppm	219	0.5 ppm	[110]
In ₂ O ₃ /Cr ₂ O ₃	RT	50 ppm	15.6	5 ppm	[109]
MoO ₂ -Ni-Graphene	RT	1000 ppm	105	15 ppm	[111]
Ag/ZnO nano-generator	RT	800 ppm	88	10 ppm	[112]
TiO ₂ @2D-TiC	RT	60 ppm	390	10 ppm	[113]
PEG/MWCNTs	RT	50 ppm	2.9	-	[114]

Au-CNFs	RT	100 ppm	6.3	50 ppm	[115]
High-density CNTs	RT	50 ppm	0.18	–	[116]

4. Perspektif Masa Depan

Sensor gas berbahaya menjadi sangat penting dalam produksi dan pengendalian makanan. Peneliti baru-baru ini fokus pada pengembangan sensor gas berkinerja tinggi dengan menggunakan berbagai material sensor. Pemahaman tentang aplikasi dan kesesuaian lingkungan tempat sensor akan digunakan sangat berkontribusi dalam mengoptimalkan desain sensor tersebut. Prospek penggunaan teknologi sensor dalam produksi dan pemantauan makanan meliputi: (1) pengembangan sensor sederhana yang beroperasi pada suhu rendah, idealnya pada suhu kamar (RT), untuk menghemat energi dan memperpanjang masa pakai material sensor; (2) pembuatan sensor yang dapat diintegrasikan ke dalam pakaian yang dikenakan oleh pekerja di toko daging dan ikan untuk memantau kondisi makanan secara waktu nyata; (3) identifikasi kandidat yang dapat mengurangi kompleksitas rangkaian, memungkinkan integrasi ke dalam perangkat portabel dengan baterai energi rendah; dan (4) desain sensor presisi tinggi untuk memantau kualitas dan umur simpan makanan yang disimpan, khususnya gas C_2H_4 , untuk mengelola stok strategis buah dan sayuran. Sensor chemiresistif dikenal karena mudah dibuat, murah, dan mudah diintegrasikan. Lapisan sensor yang paling cocok untuk lingkungan ini biasanya melibatkan kombinasi polimer, material nanokarbon, dan oksida. Peneliti bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas, selektivitas, batas deteksi, dan suhu operasional sensor dengan bereksperimen dengan campuran nanomaterial baru yang menunjukkan bentuk yang bervariasi. Meskipun kemajuan telah dicapai, tantangan masih ada dalam pengembangan sensor semacam itu. Laporan ini memberikan wawasan tentang penggunaan gas dalam produksi, pengolahan, dan pemantauan makanan, yang memberikan kontribusi

berharga bagi komunitas sensor.

MANFAAT: Penggunaan gas dalam produksi dan pemantauan makanan, serta kemajuan terbaru dalam sensor gas chemiresistif. Salah satu manfaat utama yang diidentifikasi adalah kemampuan sensor untuk mendeteksi gas seperti etilena, amonia, dan karbon dioksida, yang sangat penting dalam menjaga kualitas makanan dan mengurangi pemborosan. Sensor ini membantu dalam memantau kondisi penyimpanan dan kematangan buah, sayuran, dan produk makanan lainnya, sehingga meningkatkan efisiensi produksi dan memperpanjang umur simpan produk.

KELEMAHAN: Banyak sensor yang masih beroperasi pada suhu tinggi, yang dapat meningkatkan biaya energi dan mempengaruhi umur sensor. Selain itu, tantangan dalam mencapai sensitivitas dan selektivitas yang tinggi untuk konsentrasi gas yang rendah juga diakui, yang dapat membatasi efektivitas sensor dalam aplikasi nyata. Terakhir, meskipun ada kemajuan dalam teknologi sensor, masih terdapat kebutuhan untuk pengembangan lebih lanjut agar sensor dapat diintegrasikan dengan baik dalam proses produksi makanan dan pemantauan kualitas secara real-time.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sensor gas memiliki peran krusial dalam industri pangan, terutama dalam mendeteksi gas yang digunakan dalam produksi dan penyimpanan makanan. Kemajuan dalam nanoteknologi telah meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor gas, memungkinkan pemantauan kualitas makanan dengan lebih efektif. Namun, tantangan seperti suhu kerja tinggi dan keterbatasan dalam lingkungan industri masih perlu diatasi. Pengembangan sensor fleksibel dan teknologi IoT dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi pemantauan pangan di masa depan.

REFERENSI

- Atkinson, S., Algers, B., Pallisera, J., Velarde, A., & Lionch, P. (2020). Animal Welfare and Meat Quality Assessment in Gas Stunning during Commercial Slaughter of Pigs Using Acute Hypercapnia (90% CO₂ in Air). *Animals*, 12, 2440.
- Aranthady, C.; Jangid, T.; Gupta, K.; Mishra, A.K.; Kaushik, S.D.; Siruguri, V.; Rao, G.M.; Shanbhag, G.V.; Sundaram, N.G. Selective SO₂ detection at low concentration by Ca substituted LaFeO₃ chemiresistive gas sensor: A comparative study of LaFeO₃ pellet vs thin film. *Sens. Actuators B Chem.* 2021, 329, 129211.
- Black, C., Chu, A., Thomas, G., Routledge, A., & Duhme-Klair, A. K. (2022). Synthesis and antimicrobial activity of an SO₂-releasing siderophore conjugate. *J. Inorg. Biochem.*, 234, 111875.
- Blanco-Rojo, R.; Sandoval-Insausti, H.; López-García, E.; Graciani, A.; Ordovás, J.M.; Banegas, J.R.; Rodríguez-Artalejo, F.; Guallar-Castillón, P. Consumption of Ultra-Processed Foods and Mortality: A National Prospective Cohort in Spain. *Mayo Clin. Proc.* 2019, 94, 2178–2188.
- BMJ, S. (2019). Association between consumption of ultra-processed foods and all cause mortality: SUN prospective cohort. *Rico-Campa, A.; Martinez-Gonzalez, M.A.; Alvarez-Alvarez, I.; Mendonca, R.D.; de la Fuente-Arrillaga, C.; Gomez-Donoso, C.; Bes-Rastollo, M.*, 365, 1949.
- Cozzolino, A.; Verona, G.; Rothaermel, F.T. (2018). Unpacking the Disruption Process: New Technology, Business Models, and Incumbent Adaptation. *J. Manag. Stud.* 2018, 55, 1166–1202.
- Chen, Y., Zeng, W., Fang, F., Yu, S., & Zhou, J. (2022). Elimination of ethyl carbamate in fermented foods. *Food Biosci.*, 47, 101725.

- Howe, P., Worobo, R., & Sacks, G. (2018). Conventional Measurements of Sulfur Dioxide (SO₂) in Red Wine Overestimate SO₂ Antimicrobial Activity. *Am. J. Enol. Vitic*, 69, 210-220.
- Hsiao, Y.-J.; Shi, Z.-H.; Nagarjuna, Y.; Huang, Z.-Y.; Lai, T.-Y.; Wu, S. Double-Layered NiO/SnO₂ Sensor for Improved SO₂ Gas Sensing with MEMS Microheater Device. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2022, 11, 57002.
- Hsueh, T.-J.; Lee, S.-H. A La₂O₃ Nanoparticle SO₂ Gas Sensor that Uses a ZnO Thin Film and Au Adsorption. *J. Electrochem. Soc.* 2021, 168, 77507.
- Jongman, E., Woodhouse, R., Rice, M., & Rault, J. (2021). Pre-slaughter factors linked to variation in responses to carbon dioxide gas stunning in pig abattoirs. *Animal*, 15, 100134.
- Jha, R.K.; Nanda, A.; Bhat, N. Sub-ppm sulfur dioxide detection using MoS₂ modified multi-wall carbon nanotubes at room temperature. *Nano Sel.* 2022, 3, 98–107.
- Krupa, T.; Tomala, K. Effect of oxygen and carbon dioxide concentration on the quality of minikiwi fruits after storage. *Agronomy* 2021, 11, 2251.
- Liu, L.; Zhou, P.; Su, X.; Liu, Y.; Sun, Y.; Yang, H.; Fu, H.; Qu, X.; Liu, S.; Zheng, S. Synergistic Ni single atoms and oxygen vacancies on SnO₂ nanorods toward promoting SO₂ gas sensing. *Sens. Actuators B Chem.* 2022, 351, 130983.
- McNulty, R.; Kuchi, N.; Xu, E.; Gunja, N. Food-induced methemoglobinemia: A systematic review. *J. Food Sci.* 2022, 87, 1423–1448.
- Nastiti, P.W.; Bintoro, N. Classification of Freshness Levels and Prediction of Changes in Evolution of NH₃ and H₂S Gases from Chicken Meat during Storage at Room Temperature. *J. Agric. Eng.* 2022, 11, 90–98.
- Proc, M. C. (2019). Consumption of Ultra-Processed Foods and Mortality: A National Prospective Cohort in Spain. *Blanco-Rojo, R.; Sandoval-Insausti, H.; Lopez-Garcia, E.; Gracia, A.; Ordovas, J.M.; Banegas, J.R.; Rodriguez-Artalejo, F.; Guallar-Castillon, P.*, 94, 2178-2188.

- Qu, P.; Zhang, M.; Fan, K.; Guo, Z. Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2022, 62, 51–65.
- Shinde, R.B.; Padalkar, N.S.; Sadavar, S.V.; Kale, S.B.; Magdum, V.V.; Chitare, Y.M.; Kulkarni, S.P.; Patil, U.M.; Parale, V.G.; Park, H.H.; et al. 2D–2D lattice engineering route for intimately coupled nanohybrids of layered double hydroxide and potassium hexaniobate: Chemiresistive SO₂ sensor. *J. Hazard. Mater.* 2022, 432, 128734.
- Shalan, N., & Hamad, D. (2022). Low-Temperature Hydrogen Sensor Based on Sputtered Tin Dioxide Nanostructures through Slow Deposition Rate. *Appl. Surf. Sci.*, 598, 153857.
- Silva, M., & Lidon, F. (2016). Food preservatives-An overview on applications and side effects. *Emirates J. Food Agric*, 26, 366-373.
- Spizzica, A. (2019). Anesthesia of pigs and poultry before slaughter In *Gases in Agro-Food Processes*; Cashon, R., Girardon, P., Voilley, A., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA. *Animal production*, 127-151.
- Stud., J. M. (2018). Unpacking the Disruption Process: New Technology, Business Models, and Incumbent Adaptation. *Cozzolino, A.; Verona, G.; Rothaermel, F.T.*, 55, 1166-1202.
- Santhanam, N.N.; Ahamed, K.S.V. Greenhouse Gas Sensors Fabricated with New Materials for Climatic Usage: A Review. *ChemEngineering* 2018, 2, 38.
- Zhang, Y.; Lim, L.T. Colorimetric array indicator for NH₃ and CO₂ detection. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, 255, 3216–3226.
- Zhai, Z.; Zhang, X.; Wang, J.; Li, H.; Sun, Y.; Hao, X.; Qin, Y.; Niu, B.; Li, C. Washable and flexible gas sensor based on UiO-66-NH₂ nanofibers membrane for highly detecting SO₂. *Chem. Eng. J.* 2022, 428, 131720.