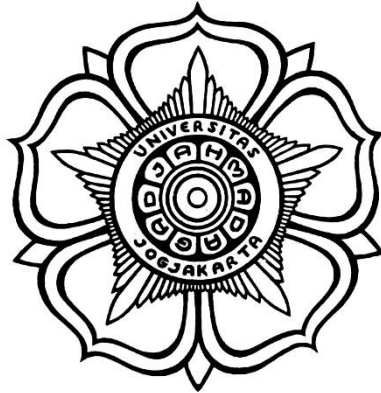


**ANALISIS KIMIA BERBASIS QUARTZ RESONATOR  
DAN APLIKASINYA**



**UNIVERSITAS GADJAH MADA**

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar  
Dalam Bidang Kimia  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar  
Universitas Gadjah Mada  
Pada Tanggal 14 Mei 2024**

**oleh  
Prof. Drs. Roto, M. Eng., Ph. D.**

Bismillahirrahmanirrahiim

Assalamu'alaikum wr. wb.  
Salam sejahtera untuk kita semua,

Yang terhormat,  
Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat;  
Rektor, Para Wakil Rektor, dan seluruh jajarannya;  
Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar;  
Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik;  
Para Pimpinan Fakultas, Pusat Studi dan Lembaga;  
Segecap sivitas akademika, khususnya para dosen dan staf  
kependidikan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Gadjah Mada;  
Para tamu undangan, handai taulan, kerabat, saudara, keluarga saya,  
dan para hadirin yang saya muliakan.

### **Pengantar**

Saya ingin mengawali pidato ini dengan mengucapkan Alhamdulillah Rabbil 'alamiin karena Allah Swt mengizinkan kita semua hadir di ruangan bersejarah ini, Balai Senat Universitas Gadjah Mada. Hari ini, 14 Mei 2024, saya diberikan kesempatan untuk menyampaikan capaian dan gagasan sebagai Guru Besar Bidang Kimia lewat pidato pengukuhan yang berjudul

#### **“Analisis Kimia Berbasis *Quartz Resonator* dan Aplikasinya”**

dalam pengukuhan Guru Besar Universitas Gadjah Mada, sebuah acara yang merupakan fase penting dari perjalanan karier akademik saya sebagai dosen bidang kimia analitik, sekaligus sebagai upaya sharing pengetahuan kepada masyarakat luas.

Selama kurang lebih 30 menit ke depan, ijinkan saya berbagi pengetahuan, capaian dan ide mengenai metode analisis kimia menggunakan *quartz resonator*, mulai dari memahami sensor, potensi aplikasi, tantangan, sampai pengembangannya.

*Hadirin yang saya muliakan,*

Kimia analitik adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari tentang identifikasi, karakterisasi, dan kuantifikasi komponen-komponen dalam suatu sampel. Dengan ilmu ini kita dapat memahami komposisi dan struktur sampel, baik itu bahan kimia murni, larutan, atau campuran. Ilmu ini penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari penelitian ilmiah bidang kimia itu sendiri, industri kimia terkait, pertanian, farmasi hingga kedokteran (He and Toh, 2006).

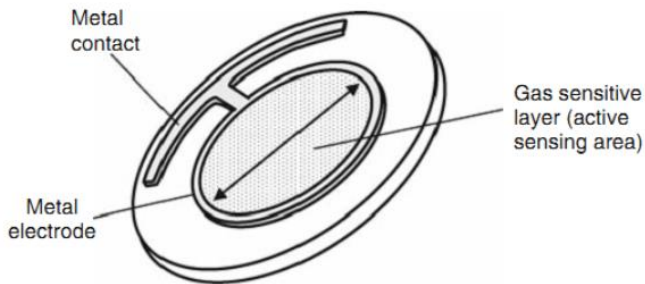
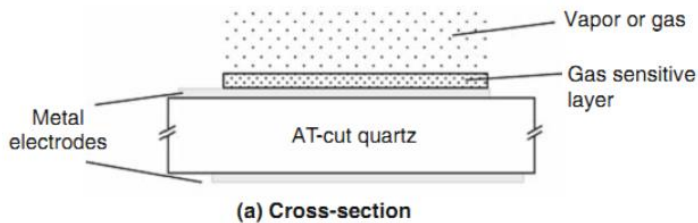
Dalam industri, kimia analitik digunakan untuk memastikan kualitas dan keamanan produk. Dengan menganalisis sampel produk, kita dapat memastikan bahwa produk tersebut memenuhi standar kualitas yang ditetapkan dan aman untuk dikonsumsi atau digunakan. Dalam bidang kedokteran, kimia analitik berperan penting dalam diagnosis penyakit. Melalui analisis sampel biologis seperti serum, urin, atau cairan tubuh lainnya, kita dapat mendeteksi adanya penyakit atau gangguan kesehatan dalam rangka merencanakan pengobatan yang sesuai. Analisis klinik sebagian besar menggunakan dasar-dasar Kimia Analitik (D'Orazio, 2003). Dengan perkembangan ilmu kimia analitik, analisis klinis tidak hanya dilakukan secara eksklusif di laboratorium kimia klinis. Pengukuran analit dalam spesimen biologis dilakukan secara rutin di berbagai lokasi, termasuk pada titik pelayanan di rumah sakit (*point-of-care*), pada layanan di luar rumah sakit, dan di rumah pasien (*home care*). Sensor bioanalitik untuk pengukuran spesimen tertentu yang cepat dan akurat sangat diperlukan untuk layanan terkait kegawat-daruratan. Disamping cepat dan akurat, analisis kimia juga harus selektif dan sensitif.

Metode analisis kimia yang bisa memberikan hasil secara cepat, akurat, selektif dan sensitif adalah *Quartz Crystal Microbalance* (disingkat QCM). Prinsip kerja QCM didasarkan pada efek piezoelektrik, yaitu pembangkitan muatan listrik pada *quartz* ketika mengalami tekanan mekanis. Dalam hal ini, cakram kristal kuarsa digunakan, yang memiliki sifat piezoelektrik. Ketika potensial listrik diterapkan pada kristal, akan dihasilkan tekanan mekanis internal, yang menyebabkan gelombang akustik merambat melalui kristal. Gelombang akustik merupakan gelombang geser (*shear wave*) yang

merambat tegak lurus terhadap permukaan kristal, dan frekuensi gelombang dipengaruhi oleh massa material yang menempel pada permukaan kristal (Qiao *et al.*, 2016). Selama lebih dari 30 tahun, QCM telah menjadi salah satu pilihan di antara banyak sensor akustik karena stabilitas dan sensitivitasnya. Penerapan pertama kristal kuarsa bukanlah sebagai sensor melainkan resonator, terutama digunakan dalam rangkaian komunikasi dan osilator, misalnya pada jam *quartz*.

*Quartz crystal microbalance* (QCM) merupakan salah satu jenis sensor berbasis gelombang akustik yang paling banyak digunakan. Pada awalnya QCM dikembangkan oleh Walter Cady (1912) untuk menstabilkan osilator elektronik yang mana pada saat itu disebut dengan *quartz crystal resonator* (QCR). Dalam penggunaan sebagai detektor, QCR lebih sering disebut sebagai *quartz crystal microbalance* (QCM), akibat respons yang dihasilkan merupakan perubahan massa pada permukaan elektroda. Meskipun banyak kristal yang memiliki sifat piezoelektrik, *quartz* memiliki kombinasi yang unik antara karakteristik mekanik, elektrik, kimia, maupun termal. Karakteristik tersebut memiliki dampak komersial yang tinggi pada penggunaan QCM.

QCM mulai mendapat perhatian sebagai piranti analitik dengan penemuan kaitan linier antara masa loading dengan respons frekuensi yang dijelaskan oleh Sauerbrey pada tahun 1959 (Sauerbrey, 1959). Alat QCM biasanya terdiri atas sebuah lapisan tipis kristal *quartz* AT-cut berbentuk lingkaran yang mana memiliki mode ketebalan *shear*. Kedua sisi dari piranti *quartz* dilapisi dengan logam yang berpola membentuk elektroda. Meskipun segala jenis logam dapat digunakan sebagai elektroda, dalam aplikasi deteksi gas, umumnya digunakan logam mulia seperti emas yang tidak mudah teroksidasi ketika terpapar udara. Penambahan bahan lapisan aktif yang sensitif terhadap gas target pada satu maupun kedua sisi dari elektroda seperti pada Gambar 1 digunakan untuk meningkatkan sensitivitas dari piranti untuk mendeteksi gas tertentu (Comini, Faglia and Sberveglieri, 2009)



Gambar 1. (a) Penampang lintang, (b) ilustrasi dari sebuah QCM dengan lapisan aktif pada salah satu elektrodanya (Comini, Faglia and Sberveglieri, 2009)

QCM mulai dikenal luas sekitar tahun 1960-an sampai 1970-an untuk monitoring ketebalan dari lapisan saat deposisi dalam vakum, dan masih digunakan untuk monitoring ketebalan secara in-situ. Metode ini sangat cocok digunakan dalam aplikasi tersebut karena dapat mendeteksi perubahan massa yang sangat kecil setara dengan ketebalan beberapa nanometer. Dalam perkembangannya QCM selanjutnya digunakan sebagai sensor gas dengan modifikasi tertentu, memanfaatkan adsorpsi dari molekul gas target pada lapisan aktif. Secara komersial QCM dipasarkan dengan frekuensi resonansi mencapai 100 MHz, namun dalam pemanfaatan sebagai sensor gas umumnya menggunakan 5–30 MHz. Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh QCM dengan frekuensi resonansi yang tinggi, ketebalan

*quartz* harus sangat kecil yang mengakibatkan *quartz* akan sangat mudah patah (Comini, Faglia and Sberveglieri, 2009).

Perubahan frekuensi resonansi ( $\Delta f$ ) dapat dikaitkan langsung dengan jumlah masa yang terdeposisi pada salah satu atau kedua elektroda dari QCM. Hubungan linier antara perubahan frekuensi resonansi dan perubahan masa deposisi di definisikan sebagai persamaan Sauerbrey (Sauerbrey, 1959). Resonansi vibrasi dari kristal kuarsa berhubungan dengan gelombang stasioner yang merambat di sepanjang kuarsa. Vibrasi terjadi ketika ketebalan kuarsa  $d$  sebanding dengan setengah panjang gelombang stasioner sesuai persamaan (1)

$$d_Q = \frac{\lambda_0}{2} \quad (1)$$

dengan kecepatan gelombang pada kristal sesuai persamaan (2)

$$v_Q = \sqrt{\frac{\mu_Q}{\rho_Q}} \quad (2)$$

dengan  $\mu_Q$  dan  $\rho_Q$  merupakan modulus geser dan densitas dari kristal *quartz*. Frekuensi resonansi dari kristal *quartz* dapat dihitung dengan persamaan (1) dan (2), menghasilkan persamaan (3)

$$f_0 = \frac{v_Q}{\lambda_0} = \frac{1}{2d_Q} \sqrt{\frac{\mu_Q}{\rho_Q}} \quad (3)$$

Lapisan aktif yang ditambahkan pada permukaan meningkatkan ketebalan kristal kuarsa dan menyebabkan panjang gelombang stasioner berubah. Oleh sebab itu deposisi lapisan tipis pada permukaan menyebabkan frekuensi resonansi berkurang. Dengan diferensiasi persamaan (3) terhadap pertambahan ketebalan kuarsa oleh lapisan tipis  $\Delta d$  maka didapat kaitan antara pertambahan ketebalan dengan perubahan frekuensi resonansi yang dinyatakan menjadi persamaan (4).

$$\Delta f = \left( -\frac{1}{2d_Q} \sqrt{\frac{\mu_Q}{\rho_Q}} \right) \Delta d = -\frac{\Delta d}{d_Q} f_0 \quad (4)$$

Dengan asumsi bahwa pendekatan perubahan ketebalan sebanding dengan perubahan massa dan menghasilkan nilai yang valid ( $\Delta m \approx \Delta d$ ), maka perubahan masa dapat dihitung dengan menggunakan densitas ( $\rho$ ) dan volume ( $V$ ), maka persamaan (4) dapat ditulis ulang menjadi

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{A\sqrt{\mu_Q\rho_Q}} \Delta m \quad (5)$$

Persamaan (5) dikenal sebagai persamaan Sauerbrey (Sauerbrey, 1959). Dengan catatan bahwa persamaan tersebut hanya berlaku ketika QCM mendeteksi analit hanya pada fase gas dan lapisan aktif pada permukaan elektroda bersifat rigid. Persamaan Sauerbrey berlaku dengan mengasumsikan bahwa masa yang terdeposisi tersebar secara merata di atas permukaan lapisan aktif, dengan amplitude *shear*-nya semakin berkurang dari pusat menuju pinggiran elektroda (Comini, Faglia and Sberveglieri, 2009).

Dengan menggunakan hipotesis Rayleigh, yang mana diasumsikan bahwa masa yang terdeposisi pada lapisan aktif tidak mempengaruhi puncak energi kinetik maupun energi potensial, sensitivitas masa ( $S_m$ ) dari QCM per unit area  $A$  dari masa yang ditambahkan dapat didefinisikan sebagai persamaan (6).

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta f / f_0}{\Delta m / A} \quad (6)$$

dimana  $f_0 \approx v_0 / 2h_0$  dengan  $v_0$  merupakan kelajuan akustik dan  $h_0$  merupakan ketebalan dari resonator tanpa beban, dan  $m_0 = \rho A h_0$  merupakan masa awal dari resonator. Nilai tersebut hanya berlaku apabila jumlah total masa yang terdeposisi kurang dari 2% dari masa awal resonator (Comini, Faglia and Sberveglieri, 2009).

QCM yang kami gunakan dalam penelitian selama ini dengan spesifikasi AT-cut 10 MHz dengan density kristal sebesar 2.684 g/cm<sup>3</sup>, shear modulus sebesar 2.947 × 10<sup>11</sup> g cm<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup>, dan luas permukaan

elektroda emas sebesar  $0.283 \text{ cm}^2$ . Dengan memasukkan nilai tersebut dalam persamaan (6) diperoleh persamaan (7).

$$\Delta f = -0.8 \times 10^{-9} \Delta m \quad (7)$$

dengan  $\Delta f$  dalam Hz dan  $\Delta m$  dalam g, atau dengan kata lain jumlah masa yang terdeposisi di atas lapisan elektroda sama dengan 1.25 ng ketika frekuensi resonansi berubah sebesar 1 Hz dalam frekuensi osilasi dari sebuah QCM dengan frekuensi dasar sebesar 10 MHz.

Jika ditinjau dari ilmu kimia analitik, QCM secara sederhana bisa dianalogikan dengan sensor gravimetri. Karena massa adalah sifat dasar suatu analit, maka massa dapat dipantau menggunakan perangkat akustik. Kemampuannya mendeteksi massa menjadikan resonator akustik sebagai transduser universal. QCM mampu mendeteksi perubahan massa yang sangat kecil, sekitar nanogram secara cepat hanya dengan menggunakan pengaturan kondisi pengukuran sederhana (Dong *et al.*, 2024). Meskipun sensor ini mayoritas digunakan untuk analisis gas, sampel larutan juga memungkinkan dengan syarat film aktif tetap bersifat rigid.

*Hadirin yang saya hormati,*

Para ahli memperkirakan terdapat 4 tantangan terbesar terkait bidang kimia di abad 21 yaitu pencemaran lingkungan, krisis energi, kesehatan dan kedokteran, dan kekurangan bahan baku, termasuk bahan baku bahan pangan. Oleh sebab itu, potensi aplikasi mengenai metode analisis ini akan difokuskan pada 4 bidang tersebut (Alanazi, Almutairi and Alodhayb, 2023).

Ketertarikan saya pada analisis menggunakan QCM sesungguhnya dimulai sejak tahun 2000, ketika melakukan penelitian mengenai interaksi antara ion dan lapisan tipis oksida logam. Penelitian tersebut saya lakukan pada saat mengambil studi Doktorat di University of New Brunswick Canada, di bawah bimbingan Prof Gilles Villemure. Diffusi anion dan kation dalam lapisan tipis oksida logam atau dalam larutan dapat diamati dengan baik menggunakan QCM. Ion yang keluar dan masuk ke dalam lapisan tipis tersebut berada pada kisaran beberapa nanogram. Pengetahuan utama yang diperoleh adalah kami bisa



memahami mekanisme reaksi yang terjadi ketika oksida logam dioksidasi atau direduksi. Anion dan kation secara simultan terdifusi di dalam film tipis oksida logam (Roto and Villemure, 2006).

### **Analisis Lingkungan**

Sekarang, devais semacam ini memiliki peran yang signifikan dan luas dalam analisis gas polutan di udara. Sistem analisis ini dapat digunakan untuk mendeteksi berbagai gas polutan seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Jin *et al.*, 2011), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) (Gomes, Nogueira and Oliveira, 2000), ozon (O<sub>3</sub>), amonia (NH<sub>3</sub>) (Roto, Rianjanu, Fatyadi, *et al.*, 2020) (Roto, Rianjanu, Fatyadi, *et al.*, 2020) dan lain-lain (Triyana *et al.*, 2019). Ketika gas-gas ini teradsorpsi atau terabsorpsi pada permukaan sensor, akan terjadi perubahan massa yang dapat diukur berdasarkan perubahan frekuensi. Mekanisme interaksi antara molekul gas dan permukaan aktif sensor didominasi oleh ikatan transien (sesaat) antar molekuler. Gaya antarmolekul yang mendominasi interaksi antar molekul gas dengan permukaan sensor adalah ikatan elektrostatis, gaya van der Waals dan ikatan hydrogen. Ikatan-ikatan tersebut dapat dibuktikan dengan spektrofotometri inframerah dan *X-ray photoelectron*.

QCM dapat digunakan sebagai bagian dari sistem pemantauan kualitas udara untuk secara kontinyu memantau konsentrasi gas polutan di lingkungan tertentu, termasuk lingkungan kerja, perkotaan dan kawasan industri. Dengan demikian, QCM memungkinkan identifikasi dan pemantauan gas polutan yang potensial berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Dengan memasang beberapa alat deteksi di beberapa lokasi yang berbeda, pola distribusi gas polutan dalam suatu wilayah dapat dianalisis. Di beberapa sudut kota modern sudah banyak dipasang sistem monitoring gas polutan, yang didasarkan pada metode konduktivitas elektronik atau ionik dan bisa jadi di masa depan menggunakan metode QCM. Penelitian dengan QCM mampu mendeteksi gas polutan dalam konsentrasi rendah. QCM dapat digunakan dalam pemantauan emisi gas polutan dari industri atau

proses manufaktur. Prinsipnya dengan memodifikasi sifat permukaan kristal kuarsa atau menggunakan lapisan aktif khusus, QCM dapat dioptimalkan untuk mendeteksi gas di udara tertentu dengan sensitivitas dan selektivitas yang lebih tinggi.

Dengan mengukur konsentrasi gas polutan di udara dengan QCM, kita dapat membantu dalam analisis toksisitas udara dan potensi dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Pemasangan detektor gas berbasis QCM di sekitar instalasi industri, perubahan dalam konsentrasi gas polutan dapat dipantau secara simultan, membantu industri untuk mematuhi regulasi lingkungan yang berlaku. Dalam penyediaan air bersih, QCM telah digunakan untuk memantau ion berbahaya sianida dalam air secara *on-site* pada standar air minum. Sampel air yang mengandung sianida bereaksi dengan elektroda emas pada permukaan kristal kuarsa piezoelektrik dan mengekstraksi emas dari elektroda dalam larutan. Deteksi sianida ditandai dengan pelarutan logam emas (penurunan frekuensi), yang kuantitasnya tergantung pada konsentrasi sianida, pH larutan, laju alir dan waktu.

Grup penelitian kami dalam beberapa tahun terakhir dengan metode ini telah berhasil melakukan analisis ammonia (Roto, Rianjanu, Rahmawati, *et al.*, 2020), formaldehida (Sofa *et al.*, 2023), alkohol rantai pendek (Aditya Rianjanu *et al.*, 2019) dan lain-lain dan hasilnya telah dipublikasikan di jurnal ilmiah. Penelitian bioanalitik menggunakan QCM saat ini berkolaborasi dengan peneliti dan University of Birmingham dan telah menghasilkan publikasi ilmiah berreputasi yang terbit jurnal RSC Analyst (Sofa *et al.*, 2023). Saat ini beberapa mahasiswa bimbingan saya sedang fokus melakukan analisis gas-gas rumah kaca dan gas pendingin *hydro-fluoro-carbon* (HFC/Freon). Hasil sementara menunjukkan bahwa gas-gas tersebut bisa dideteksi dengan QCM. Data akan segera dipublikasikan dalam jurnal ilmiah. Penelitian ini juga melibatkan mitra dari UK tersebut.

## **Keamanan Pangan**

Akses kontinyu dan berkelanjutan terhadap pangan yang aman dan berkualitas tidak dapat disangkal masih merupakan salah satu tantangan global paling signifikan di abad ke-21. Akses terhadap pangan yang aman dan berkualitas juga merupakan prioritas global

utama bagi industri manufaktur dan pengolahan pangan, badan pengatur, pejabat kesehatan masyarakat, dan pemangku kepentingan pangan lainnya. Analisis kimia, penilaian kelayakan, dan jaminan mutu yang rutin dan efektif terhadap produk pangan, bahan mentah, dan bahan pangan juga penting dan relevan untuk memastikan pangan berkualitas tinggi guna menjaga keamanan pangan dan kesehatan masyarakat. Jaminan akses terhadap makanan yang aman, otentik, dan berkualitas hanya dapat dicapai melalui upaya proaktif, terpadu, dan terkoordinasi dengan baik antara industri manufaktur dan pengolahan makanan, pejabat kesehatan masyarakat, dan badan pengatur. Oleh karena itu, lembaga-lembaga seperti Badan Pengawas Obat dan Makanan Amerika Serikat (FDA), Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA), Komisi Eropa, Otoritas Keamanan Pangan Eropa, Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), dan Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (FAO) bekerja sama untuk mengurangi penjualan produk palsu, makanan di bawah standar, tercemar, dan tidak aman. Lembaga-lembaga non-pemerintah juga memainkan peran penting dalam mempromosikan akses terhadap pangan yang aman bagi jutaan orang di seluruh dunia (Bwambok *et al.*, 2020).

Untuk mengatasi penyakit yang ditularkan melalui makanan, kualitas dan keamanan pangan merupakan disiplin ilmu utama yang mencakup penanganan, penyiapan, dan penyimpanan makanan. Deteksi kontaminan dalam sistem pangan merupakan perhatian utama terkait kesehatan masyarakat. Penting untuk mengembangkan sistem *immunoassay* untuk mendeteksi dan mengendalikan patogen yang ditularkan melalui makanan pada makanan yang terkontaminasi sebelum patogen tersebut masuk ke dalam rantai makanan manusia dan menyebabkan infeksi. Metode konvensional termasuk pelapisan agar, kromatografi, atau *immunoassay* merupakan metode yang tidak menarik dan memakan waktu lama untuk mendeteksi kontaminasi makanan, sedangkan biosensor adalah salah satu pilihan untuk mengatasi masalah ini. Ada peningkatan minat terhadap teknologi biosensor karena selektivitas yang tinggi, kenyamanan dan respon yang cepat. Di bidang ilmu dan teknologi pangan, teknologi biosensor untuk mendeteksi patogen yang ditularkan melalui makanan lebih menarik

bagi para peneliti saat ini. Dalam kontes ini kami memperkenalkan, *quartz resonator* (QCM), biosensor bebas label dan piezoelektrik untuk mendeteksi mikroba patogen dan racun yang ada dalam makanan. Potensi signifikansi dari tinjauan ini adalah untuk menyediakan penerapan biosensor berbasis QCM untuk mendeteksi berbagai analit dalam sistem pangan termasuk yang beracun dan tidak beracun (Singh and Verma, 2014).

Namun demikian, pemeriksaan kualitas, penilaian, dan jaminan produk pangan di sepanjang rantai distribusi dipengaruhi oleh berbagai tantangan. Artikel tinjauan ini mencakup survei literatur dan ringkasan tantangan umum dan terobosan besar dalam metode pemeriksaan kualitas dan penilaian berbagai makanan, bahan baku makanan, dan bahan-bahan.

Keamanan pangan merupakan salah satu perhatian utama dunia karena secara langsung akan berpengaruh pada masalah kesehatan. Banyak penyakit disebabkan oleh patogen yang terkait dengan makanan dan mempunyai dampak berbahaya terhadap kesehatan manusia. Oleh karena itu, analisis mikroba patogen pada bahan pangan merupakan solusi utama untuk pendeteksian dan pencegahan masalah kesehatan dan keamanan pangan. Metode yang cepat, mudah digunakan, dan sensitif untuk mendeteksi patogen yang ditularkan melalui makanan ini masih sangat dibutuhkan.

Metode konvensional untuk mendeteksi jenis patogen yang ditularkan melalui makanan ini melibatkan banyak langkah mulai kultur bakteri, pembiakan lebih lanjut, pengujian biokimia, dan pemeriksaan mikroskopis. Meskipun metode konvensional ini dapat diandalkan, namun memakan waktu, biaya dan tenaga serta kurang praktis. QCM dapat dimanfaatkan dalam analisis keamanan pangan karena kemampuannya untuk mendeteksi secara sensitif dan cepat adanya kontaminan atau zat berbahaya dalam bahan pangan. Ini memungkinkan untuk identifikasi dan tindakan pencegahan yang cepat terhadap kontaminasi yang mungkin terjadi, untuk mengurangi risiko paparan terhadap zat-zat berbahaya. QCM dapat dirancang untuk memantau proses produksi makanan secara cepat, misalnya untuk memeriksa adanya kontaminasi selama pengolahan atau penyimpanan.

Hal ini membantu menjaga kualitas dan keamanan produk pangan sepanjang rantai pasok (*supply*).

Selain analisis kontaminan fisik, QCM juga dapat digunakan untuk mendeteksi zat-zat berbahaya seperti residu pestisida, obat-obatan pada hewan, atau bahan kimia berbahaya lainnya yang mungkin masuk ke dalam bahan pangan. Metode QCM memiliki tingkat keandalan dan akurasi yang tinggi dalam mendeteksi perubahan massa, sehingga memberikan hasil analisis yang dapat diandalkan dalam mengidentifikasi kontaminan atau zat berbahaya dalam bahan pangan dengan konsentrasi sangat rendah. QCM dapat diandalkan untuk memantau kualitas bahan pangan dengan mendeteksi perubahan kimia yang terjadi selama proses penyimpanan. Hal ini membantu dalam menjaga kesegaran dan keamanan produk pangan sebelum sampai kepada konsumen.

Asesmen keselamatan pangan yang dilakukan dengan QCM dapat membantu mengurangi risiko terjadinya penyakit atau keracunan makanan yang disebabkan oleh kontaminan atau zat berbahaya yang tidak diinginkan dalam bahan pangan. Penggunaan QCM dalam analisis keselamatan pangan memainkan peran yang sangat penting dalam menjaga kualitas, keamanan, dan kelayakan konsumsi produk pangan bagi masyarakat.

Saat ini, penelitian juga sedang dilakukan untuk mengembangkan sistem sensor untuk dapat mendeteksi toksin dan kontaminan berbahaya dalam produk makanan, seperti pestisida dan residu pestisida. Sensor ini juga dapat dikembangkan untuk pemantauan kualitas air, udara, atau tanah, serta untuk mengidentifikasi sumber kontaminan yang bisa masuk ke dalam bahan pangan.

Ada peningkatan minat penelitian terhadap teknologi biosensor ini dalam analisis bahan pangan dan produk makanan. Biosensor berbasis QCM telah dicoba digunakan untuk mendeteksi mikroba patogen dan racun yang ada dalam makanan. Mikroba patogen bisa melepaskan biomarker yang spesifik dan bisa teridentifikasi oleh QCM.

Penelitian juga terus berlanjut untuk mengembangkan sensor berbasis QCM yang dapat mendeteksi senyawa kimia spesifik dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam industri farmasi, makanan dan minuman, serta pemantauan proses industri pangan. QCM dapat

digunakan untuk memantau kualitas makanan selama proses produksi, penyimpanan, dan distribusi. Misalnya, sensor QCM dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan atau pembusukan makanan sebelum adanya tindakan pencegahan yang cepat untuk menjaga kualitas produk. Beberapa jenis jamur diketahui dapat tumbuh pada produk makanan yang dapat menghasilkan toksin yang sangat beracun.

Sistem sensor ini dapat juga digunakan untuk mendeteksi alergen makanan seperti protein susu, telur, atau kacang-kacangan. Produk yang mengandung alergen dapat menyebabkan reaksi alergi yang serius pada konsumen. Sensor QCM ini dapat mengidentifikasi dengan cepat jejak alergen dalam makanan dengan tingkat deteksi yang baik, membantu produsen makanan untuk memastikan keamanan produk bagi konsumen yang sensitif terhadap alergen. Dengan desain sensor yang handal, ke depan QCM bisa menjadi metode analisis yang dapat diandalkan dalam analisis pathogen, biomarker, pestisida, residu pestisida dalam bahan pangan dan produk makanan. Saat ini negara-negara maju mengontrol sangat ketat dalam impor produk bahan pangan yang mengandung residu pestisida.

Pengujian keasaman dalam makanan juga dapat dilakukan menggunakan sensor ini. Perubahan massa kristal kuarsa dalam merespon adanya interaksi dapat diukur secara akurat, serta membantu dalam penentuan kualitas dan keamanan produk makanan. Konsentrasi asam asetat yang tinggi mengindikasikan produk makanan sudah mengalami fermentasi lebih lanjut,

Di dalam grup penelitian kami, senyawa ammonia dan turunannya berhasil dideteksi dengan sensitivitas yang tinggi. Dengan melakukan rekayasa sensor dengan polimer tertentu, ammonia dan turunannya dapat dideteksi pada orde nanogram. Senyawa ammonia dan trimetil amin misalnya dapat digunakan sebagai indikator kerusakan pada produk ikan segar dan senyawa-senyawa tersebut bisa diuji dengan metode ini. Inovasi dilakukan dengan memodifikasi sensor *quartz resonator* menggunakan asam organik. Deteksi senyawa ini sangatlah penting mengingat bau ammonia dari ikan yang sudah tidak segar akan sangat mengganggu dan tidak layak dikonsumsi. Kontribusi ini telah dipublikasikan di jurnal *American Chemical Society Applied Nanomaterials* (Roto, Rianjanu, Rahmawati, *et al.*, 2020).

Analisis gas dengan metode yang handal sering digunakan untuk mengendalikan kualitas produk dengan mengukur kadar gas tertentu dalam proses produksi. Misalnya, dalam produksi makanan atau minuman, metode ini dapat digunakan untuk memantau kadar gas karbon dioksida yang terlarut dalam minuman berkarbonasi.

Etanol merupakan produk utama fermentasi karbohidrat. Tim kami telah melakukan analisis etanol dan alkohol rantai pendek lainnya dengan QCM. Jumlah rantai karbon dan struktur alkohol dapat dibedakan dengan baik dengan metode ini. Hasil penelitian cukup signifikan dan bisa membuktikan bahwa isomer struktural bisa diidentifikasi dengan QCM. Data telah dipublikasikan di jurnal *Sensors and Actuators, A:Physical* (Rianjanu *et al.*, 2020).

Prediksi saya ke depan analisis dengan QCM akan banyak diaplikasikan dalam asesmen untuk keamanan pangan. Studi keselamatan pangan dimulai dari analisis kontaminan berbahaya seperti residu pestisida, senyawa hasil metabolisme mikroorganisme patogen seperti aflatoksin atau zat-zat kimia lainnya, sampai pada analisis perubahan struktur komponen utama bahan pangan diantaranya karbohidrat, lemak, dan protein. Perubahan kimia karbohidrat, lemak, dan protein diikuti dengan pelepasan senyawa dengan berat molekul kecil yang bisa dimonitor dengan QCM.

## **Kesehatan dan Kedokteran**

Metode analisis dengan *quartz resonator* ini juga telah digunakan sebagai sensor untuk mendeteksi biomolekul dalam sampel biologis, seperti DNA, protein, enzim dan aptamer (Dong *et al.*, 2024). Biomolekul sasaran tersebut dapat dideteksi dengan membuat *sensing pad* yang sesuai dan selektif. Diagnosis penyakit genetik, deteksi infeksi, dan keracunan dengan menggunakan alat ini secara waktu nyata (*real-time*) dapat menghasilkan data yang menjanjikan. Pemantauan interaksi antara obat dan target biologis, kinetika enzim, atau proses reaksi seluler lainnya menghasilkan informasi yang penting. Informasi yang diperoleh dari metode ini dapat membantu dalam perancangan obat, pemahaman mekanisme perkembangan penyakit, dan aplikasi biomedis lainnya. Meskipun belum sempurna, arah pengembangan analisis untuk deteksi biomarker dengan QCM cukup potensial.

Para peneliti juga mencoba metode ini untuk mendeteksi patogen seperti bakteri, virus, atau jamur dalam sampel biologis. Analisis dengan cara ini terbukti dapat memberikan hasil deteksi yang cepat dan sensitif, yang membantu dalam diagnosis infeksi. QCM juga potensial dapat digunakan untuk memantau efek toksisitas dari bahan kimia atau obat-obatan pada sel atau jaringan. Dengan memantau perubahan massa sampel biologis setelah paparan dengan bahan kimia tertentu, QCM dapat memberikan gambaran penting tentang potensi efek samping dari bahan kimia tersebut.

Salah satu aplikasi QCM dalam bidang medis adalah penggunaannya dalam diagnosis penyakit pernapasan, seperti asma dan penyakit paru lainnya. QCM dapat digunakan untuk mendeteksi biomarker spesifik dalam gas napas yang terkait dengan kondisi kesehatan tertentu. Telah difahami, pada pasien asma, terjadi perubahan pola atau konsentrasi biomarker dalam gas napas. Contoh biomarker yang dapat dideteksi melalui analisis gas napas dengan metode ini adalah nitrogen monoksida (NO). Gas nitrogen monoksida merupakan indikator peradangan pada saluran pernapasan. Peningkatan konsentrasi NO dalam gas napas dapat dikaitkan dengan peradangan pada pasien asma. Metode ini menawarkan keunggulan dalam hal non-invasif, di mana pengambilan sampel gas napas dapat dilakukan dengan mudah dan nyaman tanpa memerlukan prosedur invasif seperti pengambilan darah. Selain itu, QCM juga menawarkan kecepatan dan sensitivitas yang tinggi dalam mendeteksi perubahan konsentrasi biomarker, yang dapat membantu dalam diagnosis dini dan pemantauan perkembangan penyakit.

QCM memungkinkan pendeteksian patogen secara cepat di lokasi yang berdampak besar terhadap kesehatan masyarakat, seperti influenza, virus hepatitis B, dan bakteri yang resistan terhadap obat antibiotik. Lebih lanjut, metode ini memungkinkan untuk mendeteksi alergen makanan, patogen yang ditularkan melalui makanan seperti *Escherichia coli* dan *Salmonella typhimurium*, dan kontaminan kimia makanan, serta mikroorganisme yang ditularkan melalui air dan kontaminan lingkungan. Selain itu, studi menunjukkan bahwa QCM berpeluang besar digunakan dalam deteksi dini kanker dan skrining interaksi obat dan reseptornya.



QCM juga terbukti mampu mendeteksi molekul biomarker penyakit, seperti protein, asam nukleat, atau glikan, yang terkandung dalam sampel biologis seperti darah, urin, atau cairan serebrospinal. Ini dapat membuka pintu untuk pengembangan tes diagnostik baru yang lebih sensitif dan spesifik. Mengenali dan mengukur konsentrasi molekul biomarker dalam sampel klinik merupakan tantangan tersendiri dalam bidang medis.

Pendeteksian awal dan pemantauan perkembangan penyakit bisa menggunakan QCM. Karena QCM memiliki sensitivitas yang tinggi, instrumen tersebut dapat digunakan untuk mendeteksi biomarker penyakit pada konsentrasi yang sangat rendah dalam sampel biologis. Ini memungkinkan untuk diagnosis dini penyakit sebelum munculnya gejala klinis yang jelas, yang dapat meningkatkan prognosis dan efektivitas pengobatan. Selain deteksi awal, QCM juga dapat digunakan untuk memantau perubahan dalam konsentrasi biomarker penyakit selama perkembangan penyakit atau dalam respons terhadap pengobatan. Hal ini memungkinkan untuk evaluasi efektivitas terapi dan pemantauan dinamika penyakit dari waktu ke waktu.

Beberapa peneliti melaporkan pengembangan biosensor berbasis DNA dengan QCM, yang diterapkan untuk mendeteksi kanker paru dari sampel biopsi cair. Deteksinya, seperti kebanyakan biosensor DNA, didasarkan pada taut silang antara probe spesifik sel kanker dan sampel DNA yang telah mengalami mutasi. Sistem deteksi sel kanker ini mungkin perlu dikembangkan di UGM. Penelitian bisa dikerjakan dalam media air.

Hasil penelitian dalam grup kami sebelumnya menunjukkan bahwa senyawa prekursor obat kamfer (*camphor*), dapat dideteksi dengan metode ini. Kamfer adalah bahan dasar obat seperti antiseptic, analgesic, dan produk-produk farmasi lainnya. Untuk analisis kamfer, pengaturan suhu medium yang sesuai memungkinkan deteksi dengan akurat dan presisi. Paper dari hasil riset yang melibatkan mitra dari University of Birmingham ini saat ini statusnya under review di jurnal ilmiah.

Akhir-akhir ini QCM banyak dites untuk mendeteksi virus. Diagnosis dini agen penyebab penyakit menular seperti virus sangat penting untuk aplikasi klinis dan *point-of-care*. Virus berukuran sangat

kecil dan dapat menginfeksi semua makhluk hidup baik manusia, hewan, dan tumbuhan. Oleh karena itu, deteksi yang tepat dan akurat merupakan hal yang sangat penting. Virus biasanya hidup di sel hidup inang, tempat mereka bereplikasi. Oleh karena itu, pendeteksian mereka adalah tugas yang rumit dan menantang karena sifat kompleks dari media di mana mereka berada. Sejak ditemukannya virus pertama, yaitu virus mosaik tembakau (TMV) pada tahun 1892, sejumlah besar pengujian dan perangkat telah dikembangkan untuk berbagai jenis virus. Terutama, alat modern seperti enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) and *polymerized chain reaction* (PCR) merupakan protokol yang sangat sensitif dan selektif untuk pengenalan virus. Peralatan sekali pakai yang memiliki enzim atau DNA yang diimobilisasi menawarkan hasil yang sederhana dan cepat dengan biaya minimal. Namun, tes semacam ini lebih cocok untuk mendeteksi virus secara kualitatif di daerah terpencil.

Terlepas dari berbagai teknik yang telah ada untuk mendeteksi dan menyelidiki virus menular, pengembangan biosensor cerdas dan perangkat diagnostik untuk penentuan kuantitatif virus adalah suatu keharusan. Dorongan utama dalam penelitian dan pengembangan sensor virus tersebut adalah fitur praktisnya seperti kemudahan pengoperasian, fabrikasi perangkat yang sederhana dan mudah, kemungkinan untuk mengintegrasikan antibodi sintesis atau alami, respons cepat, selektivitas tinggi dan sensitivitas silang, portabilitas, dan kemampuan miniaturisasi. Karena kelebihan inilah biosensor tidak hanya digunakan secara luas untuk pengenalan virus, namun juga telah diterapkan untuk mendeteksi mikroorganisme seperti bakteri patogen dan ragi, sel darah hidup, dan biomarker penyakit yang berbeda.

Perangkat *quartz resonator* menawarkan deteksi analit tanpa label, karena massa adalah sifat mendasar dari analit apa pun. Dengan demikian, perangkat gelombang akustik dianggap sebagai transduser peka massa atau gravimetri universal. Transduser ini adalah perangkat gelombang akustik massal seperti QCM. Biosensor yang peka terhadap massa menghasilkan pergeseran frekuensi secara langsung jika terjadi interaksi reseptor-analit dan pengenalan analit. Di antara perangkat akustik yang disebutkan di atas, sensor kimia dan sensor biokimia berbasis QCM telah diuji secara ekstensif untuk mendeteksi dan

mengukur berbagai analit mulai dari molekul kecil dan ion hingga makromolekul biologis dan spesies patogen, khususnya virus (Schirhagl *et al.*, 2017).

Penyakit *diabetes mellitus* adalah suatu kondisi kesehatan kronis yang mempengaruhi sebagian dari populasi global, termasuk individu muda dan dewasa, dengan 6% dari populasi dewasa global mengidap penyakit ini. Federasi Diabetes Internasional (IDF) memperkirakan prevalensi diabetes global akan meningkat menjadi 700 juta pada tahun 2045 (sekitar 10 persen populasi dunia), yang akan menghabiskan biaya kesehatan global sebesar USD 845 miliar. Karena pemantauan kadar glukosa darah dapat meningkatkan kesejahteraan pasien diabetes, terdapat tingginya permintaan akan alat pemantauan glukosa darah. Saat ini, *diabetes mellitus* terdeteksi melalui kadar glukosa dalam tes darah, yang dianggap sebagai prosedur invasif. Sebagian besar perangkat tes glukosa komersial didasarkan pada metode elektrokimia yang dimodifikasi enzim, dan glukosa dehidrogenase dan glukosa oksidase (GOx) biasanya digunakan karena selektivitasnya yang tinggi terhadap glukosa. Prosedur tersebut melibatkan tusukan jari atau pengambilan darah dari vena, menyebabkan ketidaknyamanan fisik, dan terkadang cedera kulit dan vena pada individu yang menjalani diagnosis. Oleh karena itu, metode non-invasif untuk deteksi diabetes melitus telah dikembangkan, dimana tingkat konsentrasi senyawa organik volatil (VOC) diukur dan dianalisis dari hembusan napas manusia, yang berkaitan erat dengan proses metabolisme yang mendasari diabetes melitus. VOC ini disebut biomarker, dan merupakan molekul biologis yang terdapat dalam darah, cairan, atau jaringan biologis, yang keberadaannya merupakan tanda proses metabolisme normal atau tidak normal. Nafas yang dihembuskan berfungsi sebagai media yang nyaman dan mudah diakses untuk pengukuran biomarker (Rodríguez-Torres *et al.*, 2023).

Di sisi lain, susunan sensor gas telah muncul sebagai teknologi yang menjanjikan untuk deteksi biomarker *diabetes mellitus* non-invasif, seperti aseton. Beberapa peneliti telah melaporkan bahwa konsentrasi aseton dalam nafas adalah 2,2–22 ppm untuk pasien diabetes tipe 1 dan 1,76–9 ppm untuk pasien diabetes tipe 2. Rangkaian sensor menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap senyawa organik

volatil (VOC), khususnya aseton, serta VOC lain yang ada dalam napas manusia seperti metanol (MeOH), etanol (EtOH), dan isopropanol (i-PrOH). Susunan sensor gas dapat mengukur tingkat konsentrasi biomarker tersebut dan membedakannya dengan cukup baik. Dalam literatur, terdapat laporan tentang berbagai jenis perangkat yang telah digunakan untuk membangun rangkaian sensor gas, terutama untuk mendeteksi VOC. Perangkat semikonduktor oksida logam (MOS), optik, gelombang akustik permukaan, dan keseimbangan *quartz resonator* (QCM) biasanya digunakan, karena dapat dikombinasikan dengan bahan film penginderaan yang berbeda. Film penginderaan adalah senyawa yang berinteraksi dengan VOC melalui mekanisme fisik-kimia, sedangkan perangkat mengubah interaksi tersebut menjadi sinyal listrik (tegangan atau arus) yang dapat diukur.

QCM menunjukkan indikasi yang baik untuk deteksi glukosa darah. Hidrogel sensitif glukosa yang dilapiskan pada chip QCM dengan ikatan silang menggunakan bantuan radiasi UV telah dikembangkan untuk deteksi diabetes mellitus (DM). Hidrogel berbasis *phenyl boronic acid* (PBA) memiliki morfologi berpori, kandungan air yang tinggi, daya regangan yang sangat baik, dan stabilitas jangka panjang, yang dapat membantu mengatasi tantangan yang ada pada sensor QCM tradisional untuk sensor glukosa. Tes awal QCM menunjukkan bahwa batas deteksi glukosa mencapai kadar terendah 0,15 mg/L dan rentang deteksi glukosa adalah 0,5–120 mg/L. Kombinasi hidrogel yang stabil dipercaya dapat mendukung sensor QCM tradisional dapat membuka jalur baru untuk aplikasi sensor QCM di bidang bioanalitik (Liu *et al.*, 2022).

Metode non-invasif dan *clinical point-of-care* dalam analisis klinik akan semakin luas diperlukan di masa yang akan datang dan perlu terus dikembangkan. Metode analisis tersebut murah, cepat, dan tidak perlu menggunakan sampel jaringan atau cairan tubuh yang banyak. Oleh sebab itu penelitian berbasis *quartz resonator* dalam diagnose penyakit menjadi sangat penting dan mendesak. Misalnya analisis RNA dengan QCM mulai dikembangkan untuk analisis klinik. Penentuan kuantitatif messenger-RNA seluler tertentu sangat penting baik dalam penelitian dasar maupun terapan, terutama dalam bidang diagnostik dan farmakologis (Tedeschi, Citti and Domenici, 2005). Deteksi Micro-

RNA, yaitu molekul RNA kecil tanpa kode yang berfungsi sebagai biomarker, dicoba untuk berbagai penyakit seperti kanker dan penyakit pembuluh darah (Park and Lee, 2019).

### **Tantangan dan peluang analisis dengan QCM ke depan**

Sesuai dengan tantangan bidang kimia di abad 21, untuk mendukung penyelesaian masalah tersebut maka metode analisis baru yang handal perlu terus dikembangkan. Sebagai sebuah metodologi, QCM dapat dikembangkan kemampuannya untuk pengukuran dalam larutan pada sebagian besar aplikasi kimia analitik dan elektrokimia karena antarmuka permukaannya yang sensitif. Teknik ini memiliki jangkauan deteksi yang luas. Pada penentuan konsentrasi rendah, ia dapat mendeteksi cakupan permukaan monolayer oleh molekul kecil atau polimer film. Pada konsentrasi tinggi, ia mampu mendeteksi massa yang jauh lebih besar terikat ke permukaan. Ini bisa berupa susunan biopolimer dan biomakromolekul yang kompleks, bahkan suatu sel utuh (Marx, 2003). Metode ini sangat besar potensinya dalam analisis biokimia, namun perlu pengujian lebih lanjut.

Meskipun analisis dengan metode ini memiliki beberapa keunggulan, seperti sensitivitas yang tinggi dan respon terhadap perubahan massa yang cepat, namun terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan dan diatasi terutama selektivitas. Metode ini cenderung kurang spesifik dalam mendeteksi gas tertentu. Ketika digunakan untuk analisis gas dalam campuran kompleks, terutama jika ada beberapa komponen gas yang memiliki tingkat konsentrasi yang serupa, metode ini bisa mengalami kesulitan untuk membedakan antara komponen-komponen tersebut. Ini menjadi area untuk penyempurnaan ke depan dengan membangun permukaan sensor yang selektif.

Isu interferensi adalah masalah yang paling mendasar dalam analisis kimia. Setiap metode rentan terhadap interferensi dari faktor-faktor lingkungan, seperti fluktuasi suhu, kelembaban, atau adanya kontaminan lain di dalam sampel. Interferensi ini dapat mengganggu akurasi dan presisi hasil analisis. Permasalahan ini membuka penelitian lebih lanjut tentang cara mengatasi interferensi tersebut. Sebagian penelitian di grup kami telah diarahkan untuk menyelesaikan masalah ini.

Beberapa percobaan analisis dengan QCM memerlukan perlakuan sampel yang cermat, terutama jika sampelnya dalam bentuk cair atau gas. Proses persiapan sampel yang tepat dapat menyebabkan hasil yang akurat atau konsisten. QCM memang masih memiliki keterbatasan dalam jangkauan konsentrasi gas yang dapat dideteksi. Beberapa desain sensor QCM mungkin tidak dapat mendeteksi konsentrasi gas yang sangat rendah atau sangat tinggi. Terkait hal ini kami sudah melakukan beberapa pengendalian, misalnya melakukan pengaturan suhu untuk mengkonversi cairan menjadi uap, seperti dalam penelitian deteksi safrol yang telah dipublikasikan belum lama ini (Rianjanu *et al.*, 2018) (Triyana *et al.*, 2019) (A. Rianjanu *et al.*, 2019).

Peneliti memerlukan kalibrasi yang cermat dan teratur untuk memastikan akurasi hasil analisis dengan QCM. Perubahan sensitivitas sensor dapat terjadi dari waktu ke waktu, yang memerlukan kalibrasi ulang. Meskipun teknologi QCM semakin tersedia dan terjangkau, namun masih perlu ada perawatan, kalibrasi, dan penggantian atau konstruksi sensor baru. Ini dapat menjadi faktor kendala terutama untuk aplikasi yang memerlukan penggunaan sensor dalam skala besar atau jangka panjang. Memahami kelemahan ini, penting untuk mengoptimalkan penggunaan QCM dalam analisis gas dan memastikan hasil yang akurat dan konsisten. Dalam beberapa kasus, penggunaan kombinasi QCM dengan metode analisis lainnya dapat membantu mengatasi beberapa kelemahan ini.

Elektroda QCM asli hampir tidak sensitif terhadap analit, sehingga sangat membatasi penggunaan sensor QCM secara luas. Untuk meningkatkan selektivitas dan sensitivitas deteksi, permukaan elektroda QCM dapat dimodifikasi dengan berbagai jenis bahan, yang memungkinkan elektroda memiliki sifat spesifik dalam menyerap target yang sesuai. Oleh karena itu, para peneliti perlu merancang bahan yang efektif dan tepat sasaran daripada melakukan pengujian langsung seperti instrumen komersial lainnya, yang masih menjadi tantangan signifikan bagi sensor QCM dalam aplikasi nyata. Secara teoritis, materi apa pun dapat dimodifikasi pada sensor QCM sebagai materi sensitif. Polimer, biomaterial dan nanomaterial telah dilaporkan sebagai bahan modifikasi yang umum, relatif maju dan menjanjikan berdasarkan sensor QCM. Oleh sebab itu penyempurnaan permukaan

sensor masih perlu terus dikembangkan misalnya menggunakan nanofiber.

Metode ini memang masih memiliki keterbatasan dalam kisaran konsentrasi atau berat molekul senyawa yang dapat dideteksi dengan sensitivitas yang memadai. Senyawa dengan berat molekul tinggi hampir tidak mungkin dideteksi dengan metode *quartz resonator* karena fase gas diperoleh pada temperatur yang tinggi. Sensor QCM juga memerlukan perawatan secara berkala yang teratur untuk memastikan kinerjanya tetap optimal dan memiliki waktu operasi yang lama. Pembersihan, kalibrasi, dan penyiapan permukaan aktif sensor yang tepat waktu diperlukan untuk meminimalkan risiko kesalahan dalam analisis. Ini semua bisa menjadi tantangan bagi para peneliti dalam mendeteksi sampel dengan konsentrasi analit yang sangat rendah dan persen perolehan kembali (% *recovery*) yang tinggi.

Saya secara pribadi atau sebagai anggota tim peneliti bidang *quartz resonator* membuka kesempatan jika ada diantara audiens yang tertarik untuk berkolaborasi dalam penelitian menggunakan QCM ini di bidang-bidang yang sudah saya rinci di atas atau bahkan mungkin bidang lain yang belum tercakup.

*Para hadirin yang saya hormati,*

Pada kesempatan ini, izinkan saya secara khusus mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang berperan sangat besar dalam perjalanan karier saya hingga sampai pada capaian jabatan fungsional ini.

Ucapan dan penghargaan tertinggi saya sampaikan kepada Kemendikbud yang telah memberikan amanah gelar guru besar dalam bidang Kimia kepada saya. Ucapan terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada Majelis Wali Amanat, Pimpinan Universitas (Rektor dan Para Wakil Rektor), Dewan Guru Besar, dan Senat Akademik Universitas Gadjah Mada. Saya yakin bahwa Bapak dan Ibu adalah para pelopor dan inspirator yang sangat profesional dalam membentuk *knowledge society* di UGM yang signifikan dalam membentuk masyarakat Indonesia yang berilmu dan berbudaya.

Ucapan terima kasih saya sampaikan tiada tara untuk Bapak dan Ibu Guru di SDN Wero, SMP Panca Marga Bhakti 5 Purwodadi, dan SMA Panca Marga Bhakti 1 Kutoarjo, Purworejo. Mereka telah mendidik dan memberikan landasan yang kokoh dalam membentuk karakter dan dasar-dasar pengetahuan yang kuat untuk pendidikan yang lebih lanjut.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Almarhum Ir. Sayid Ahmad sebagai pembimbing skripsi saya dan Prof. Koji Suzuki dari Keio University Japan yang menjadi pembimbing magister saya. Beliau berdua telah memberikan landasan yang kuat kepada saya dalam bidang Kimia Analitik dan Kimia Bioanalitik dan terapannya. Kemudian, kepada Prof Gilles Villemure dari University of New Brunswick Canada pembimbing doktoral saya, yang merupakan mentor utama dalam desain penelitian dan penulisan ilmiah yang baik, untuk menghasilkan karya ilmiah yang berreputasi. Ada satu pesan penting dari beliau yaitu publikasi harus mampu menjelaskan fenomena alam penting dalam bidang minat kita yang masih belum berhasil diungkap dengan gamblang oleh peneliti-peneliti sebelumnya.

Dukungan dari rekan-rekan sejawat sangat saya apresiasi khususnya Prof. Endang Tri Wahyuni dimana pada saat proses pengusulan guru besar saya menjabat sebagai Kepala Laboratorium Kimia Analitik yang mendukung penuh tanpa batas. Kemudian Prof. Mudasir, Prof. Nurul Hidayat Aprilita, Dr. Agus Kuncaka, Dr. Dwi Siswanta, Dr. Adhitasari Suratman, Dr. Suherman, dan Dr. Taufik Abdillah, serta rekan-rekan tenaga kependidikan dimana saya mendapat kritik yang membangun, saran dan masukan dalam berbagai kesempatan dalam berkegiatan di Lab Kimia Analitik.

Selanjutnya, terima kasih yang tulus saya sampaikan pula pada pimpinan dan anggota senat FMIPA yang memberi dukungan proses kenaikan pangkat saya. Terima kasih untuk Prof. Triyono Dekan Periode 2016–2021, yang memproses usulan kenaikan pangkat saya. Terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada Dekan FMIPA UGM Prof. Kuwat Triyana yang memberikan kesempatan kepada saya untuk mengabdikan sebagai Wakil Dekan bidang Pendidikan, Pengajaran dan Kemahasiswaan 2021-2026 serta menjadi anggota tim promotor



bagi banyak mahasiswa doktoral bidang fisika, diantaranya Prof. Agus Supriyanto, Dr. Aditya Rianjanu, dll.

Selanjutnya ucapan terima kasih saya sampaikan kepada jajaran Wakil Dekan, Prof. Reza Pulungan, Dr. Wiwit Suryanto dan Dr. Fajar Adi Kusumo, yang terus saling membantu dalam melaksanakan tugas-tugas sebagai pimpinan fakultas, sehingga semuanya berjalan lancar.

Secara tulus saya sampaikan pula ucapan terima kasih kepada pada pimpinan dan anggota senat FMIPA yang memberi dukungan proses kenaikan pangkat saya.

Kemudian, saya persembahkan capaian ini untuk Departemen Kimia, tempat berkarya para guru dan mentor saya selama ini. Terima kasih telah membuka jalan bagi saya untuk menimba ilmu dan mengabdikan di departemen kimia terbaik di Indonesia. Demikian pula bimbingan dan arahan yang tak pernah henti dari mentor dan para rekan sejawat.

Tak lupa pula terima kasih saya sampaikan kepada tenaga kependidikan dan teknisi laboratorium di lingkungan Departemen Kimia yang selalu siap siaga dalam membantu dan melancarkan tugas saya sebagai Ketua Program Studi Magister Kimia 2015-2020 dan Ketua Departemen Kimia 2020-2021. Ucapan terima kasih yang sangat besar saya sampaikan khusus kepada Prof. Indriana Kartini yang mendampingi saya dalam melaksanakan tugas sebagai Sekretaris Program Magister Kimia 2015-2020 dan Dr. Winarto Haryadi yang menjadi Sekretaris Departemen Kimia 2020-2021.

Terima kasih yang tak terhingga saya persembahkan pada orang-orang terkasih yang jasanya tak akan bisa saya balas dengan apapun, yaitu kedua orang tua Almarhum Bapak Narto Utomo dan Ibu Minten. Dengan kasih sayang beliau yang tidak pernah redup saya belajar banyak hal, khususnya agar selalu menjadi orang yang bermanfaat dan tidak takabur. Kemudian adik-adik saya Kasih, Tursih, Turni, dan Cicik dan Melik yang banyak memberikan dukungan semangat.

Saya juga ingin mengucapkan terma kasih secara khusus kepada isteri saya tercinta Rina Eryanti, S.Ag. yang telah menjadi bagian dari kehidupan saya dan selalu memberikan dukungan dan do'a dalam pengembangan karier saya. Kemudian kepada ketiga anak-anak saya dr.

Thoriq Muthohari, Thoha Haq, S. Kom., dan Nadim Jameel yang selalu menjadi penyemangat dalam setiap langkah saya. Terima kasih untuk doa dan kasih sayang yang kalian iklaskan untuk mendukung Papa dalam perjalanan karier yang penuh tantangan. Mudah-mudahan momen pidato ini menginspirasi langkah kalian untuk menuju kesuksesan di masa mendatang.

Semoga Allah Swt selalu melimpahkan kesehatan dan bimbingan kepada kita semua dalam berkarya dalam rangka membangun masyarakat Indonesia yang lebih baik dan berperan penting di dunia.

Demikianlah pidato yang bisa saya sampaikan, mohon maaf atas segala kesalahan dan kekurangan.

Terima kasih

Wassalamu'alaikum wr wb

## Referensi

- Alanazi, N., Almutairi, M. and Alodhayb, A.N. (2023) *A Review of Quartz Crystal Microbalance for Chemical and Biological Sensing Applications, Sensing and Imaging*. Springer US. doi:10.1007/s11220-023-00413-w.
- Bwambok, D.K. *et al.* (2020) ‘Qcm sensor arrays, electroanalytical techniques and nir spectroscopy coupled to multivariate analysis for quality assessment of food products, raw materials, ingredients and foodborne pathogen detection: Challenges and breakthroughs†’, *Sensors (Switzerland)*, 20(23), pp. 1–42. doi:10.3390/s20236982.
- Comini, E., Faglia, G. and Sberveglieri, G. (2009) ‘Solid State Gas Sensing’, in. New York: Springer. doi:10.1007/978-0-387-09665-0.
- D’Orazio, P. (2003) ‘Biosensors in clinical chemistry’, *Clinica Chimica Acta*, 334(1–2), pp. 41–69. doi:10.1016/S0009-8981(03)00241-9.
- Dong, H. *et al.* (2024) ‘Unleashing the potential of QCM: A comprehensive review of aptamer-based QCM sensing analysis’, *Microchemical Journal*, 200(266), p. 110344. doi:10.1016/j.microc.2024.110344.
- Gomes, M.T.S.R., Nogueira, P.S.T. and Oliveira, J.A.B.P. (2000) ‘Quantification of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>S with a single coated piezoelectric quartz crystal’, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 68(1), pp. 218–222. doi:10.1016/S0925-4005(00)00432-9.
- He, L. and Toh, C.S. (2006) ‘Recent advances in analytical chemistry - A material approach’, *Analytica Chimica Acta*, 556(1), pp. 1–15. doi:10.1016/j.aca.2005.08.042.
- Jin, Y. *et al.* (2011) ‘Gravimetric analysis of CO<sub>2</sub> adsorption on activated carbon at various pressures and temperatures using piezoelectric microcantilevers’, *Analytical Chemistry*, 83(18), pp. 7194–7197. doi:10.1021/ac201786n.
- Liu, N. *et al.* (2022) ‘Flexible hydrogel non-enzymatic QCM sensor for continuous glucose monitoring’, *Biosensors and Bioelectronics: X*, 10(January), p. 100110. doi:10.1016/j.biosx.2022.100110.

- Marx, K.A. (2003) 'Quartz crystal microbalance: A useful tool for studying thin polymer films and complex biomolecular systems at the solution - Surface interface', *Biomacromolecules*, 4(5), pp. 1099–1120. doi:10.1021/bm020116i.
- Park, H.J. and Lee, S.S. (2019) 'QCM sensing of miR-21 by formation of microRNA-DNA hybrid duplexes and intercalation on surface-functionalized pyrene', *Analyst*, 144(23), pp. 6936–6943. doi:10.1039/c9an01645g.
- Qiao, X. *et al.* (2016) 'Progresses on the theory and application of quartz crystal microbalance', *Applied Physics Reviews*, 3(3). doi:10.1063/1.4963312.
- Rianjanu, A. *et al.* (2018) 'Polyacrylonitrile nanofiber-based quartz crystal microbalance for sensitive detection of safrole', *Sensors (Switzerland)*, 18(4). doi:10.3390/s18041150.
- Rianjanu, Aditya *et al.* (2019) 'A study of quartz crystal microbalance modified with polyvinyl acetate nanofiber to differentiate short-chain alcohol isomers', *Sensing and Bio-Sensing Research*, 25(May), p. 100294. doi:10.1016/j.sbsr.2019.100294.
- Rianjanu, A. *et al.* (2019) 'An enhanced safrole sensing performance of a polyacrylonitrile nanofiber-based-QCM sensor by overlaying with chitosan', *Sains Malaysiana*, 48(9). doi:10.17576/jsm-2019-4809-25.
- Rianjanu, A. *et al.* (2020) 'Electrospun polyvinyl acetate nanofiber modified quartz crystal microbalance for detection of primary alcohol vapor', *Sensors and Actuators, A: Physical*, 301, p. 111742. doi:10.1016/j.sna.2019.111742.
- Rodríguez-Torres, M. *et al.* (2023) 'Acetone Detection and Classification as Biomarker of Diabetes Mellitus Using a Quartz Crystal Microbalance Gas Sensor Array', *Sensors*, 23(24). doi:10.3390/s23249823.
- Roto, R., Rianjanu, A., Fatyadi, I.A., *et al.* (2020) 'Enhanced sensitivity and selectivity of ammonia sensing by QCM modified with boric acid-doped PVAc nanofiber', *Sensors and Actuators, A: Physical*, 304, p. 111902. doi:10.1016/j.sna.2020.111902.
- Roto, R., Rianjanu, A., Rahmawati, A., *et al.* (2020) 'Quartz Crystal Microbalances Functionalized with Citric Acid-Doped Polyvinyl

- Acetate Nanofibers for Ammonia Sensing', *ACS Applied Nano Materials*, 3(6), pp. 5687–5697. doi:10.1021/acsanm.0c00896.
- Roto, R. and Villemure, G. (2006) 'Mass transport in thin films of [Fe(CN)<sub>6</sub>]<sup>4-</sup> exchanged Ni-Al layered double hydroxide monitored with an electrochemical quartz crystal microbalance', *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 588(1), pp. 140–146. doi:10.1016/j.jelechem.2005.12.014.
- Sauerbrey, G. (1959) 'Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung', *Zeitschrift für Physik*, 155(2), pp. 206–222. doi:10.1007/BF01337937.
- Schirhagl, R. *et al.* (2017) 'Gravimetric Viral Diagnostics: QCM Based Biosensors for Early Detection of Viruses', *Chemosensors*, 5(1), p. 7. doi:10.3390/chemosensors5010007.
- Singh, A. and Verma, N. (2014) 'Quartz Crystal Microbalance Based Approach for Food Quality', *Current Biotechnology*, 3(2), pp. 127–132. doi:10.2174/2211550102666131125155622.
- Sofa, S.A. *et al.* (2023) 'Formaldehyde gas sensors based on a quartz crystal microbalance modified with aniline-doped polyvinyl acetate nanofibers', *Analyst*, 149(4), pp. 1262–1270. doi:10.1039/d3an01856c.
- Tedeschi, L., Citti, L. and Domenici, C. (2005) 'An integrated approach for the design and synthesis of oligonucleotide probes and their interfacing to a QCM-based RNA biosensor', *Biosensors and Bioelectronics*, 20(11), pp. 2376–2385. doi:10.1016/j.bios.2004.12.013.
- Triyana, K. *et al.* (2019) 'A highly sensitive saffrole sensor based on polyvinyl acetate (PVAc) nanofiber-coated QCM', *Scientific Reports*, 9(1), p. 15407. doi:10.1038/s41598-019-51851-0.

## Curriculum Vitae



### Data Diri

Nama : Prof. Drs. Roto, M. Eng., Ph.D.

TTL : Purworejo, 17 November 1967

NIP : 196711171993031020

### Keluarga

Isteri : Rina Eryanti, S. Ag.

Anak : dr. Thoriq M Muthohari

Thoha I haq, S. Kom

Nadim F Jameel

Fera Agrineta, S. P. (menantu)

Ayden B Narendra (cucu)

### Riwayat Pendidikan

2000 – 2005 : Program Studi Doktorat Kimia University New Brunswick Canada

1996 – 1998 : Program Studi Magister Kimia Terapan Keio University Japan

1986 – 1991 : Program Studi Sarjana Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

1983 – 1986 : SMA Panca Marga Bhakti 1 Kutoarjo Purworejo Jawa Tengah

1980 – 1983 : SMP Panca Marga Bhakti 5 Purwodadi Purworejo Jawa Tengah

1974 – 1980 : SD Negeri Wero Ngombol Purworejo Jawa Tengah

### **Riwayat Pekerjaan**

2021 – sekarang : Wakil Dekan Bidang Pendidikan, Pengajaran dan Kemahasiswaan

2022 – sekarang : Wakil Direktur Akreditasi Lembaga Akreditasi Sains Alam dan Ilmu Formal (LAMSAMA)

2018 – sekarang : Asesor Internasional Royal Society of Chemistry London England

2018 – sekarang : Asesor Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi

2017 – sekarang : Reviewer penelitian di lingkungan Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat, Dikti

2020 – 2021 : Ketua Departemen Kimia FMIPA UGM

2015 – 2020 : Ketua Program Studi Magister Kimia FMIPA UGM

2013 – 2015 : Sekretraris Program Pascasarjana Kimia FMIPA UGM

1991 – sekarang : Dosen pada Departemen Kimia FMIPA UGM

### **Keanggotaan Asosiasi**

2013 – sekarang : Royal Society of Chemistry United Kingdom

2005 – sekarang : Himpunan Kimia Indonesia

### **Publikasi Ilmiah Terseleksi dalam dalam 3 Tahun Terakhir**

1. SA Sofa, R Roto, R Aflaha, TA Natsir, NA Humairah, A Kusumaatmaja, K Triyana, R Gupta, 2024, Formaldehyde gas sensors based on a quartz crystal microbalance modified with aniline-doped polyvinyl acetate nanofibers, *Analyst* 149 (4), 1262-1270
2. KO Kombo, N Ihsan, TS Syahputra, SN Hidayat, M Puspita, R Roto, K Triyana, 2024, Enhancing Classification Rate of Electronic Nose System and Piecewise Feature Extraction Method to Classify Black Tea with Superior Quality, *Scientific African*, e02153

3. ND Effendhy, R Roto, D Siswanta, 2024, Advancing fluoride (F<sup>-</sup>) detection: Exploring the potential of digital color analysis with a novel thiourea receptor, *Microchemical Journal* 197, 109819
4. EZ Alharissa, Y Efhiliana, R Roto, M Mudasir, ET Wahyuni, 2024, Efficient removal of Cr (VI) contaminant using recoverable silica from volcanic ash as natural adsorbent: Synthesis and activity in the mechanism and kinetic adsorption, *Heliyon* 10 (2) e23273
5. L Destiarti, R Riyanto, R Roto, M Mudasir, 2024, Facile synthesis of reduced graphene oxide using *Caesalpinia sappan* L. extract as green reducing agent, *Next Materials* 2, 100134
6. L Destiarti, BN Huda, R Riyanto, R Roto, M Mudasir, 2023, Challenges of Using Natural Extracts as Green Reducing Agents in the Synthesis of rGO: A Brief Review, *Results in Chemistry*, 101270
7. R Aflaha, NLI Sari, L Katriani, AH As' ari, A Kusumaatmaja, A Rianjanu, R Roto, H S Wasisto, K Triyana 2023, Maltodextrin-overlaid polyvinyl acetate nanofibers for highly sensitive and selective room-temperature ammonia sensors, *Microchemical Journal*, 193, 109237
8. R Aflaha, L Katriani, AH As' ari, NLI Sari, A Kusumaatmaja, A Rianjanu, R Roto, K Triyana, 2023, Enhanced trimethylamine gas sensor sensitivity based on quartz crystal microbalance using nanofibers overlaid with maltodextrin, *MRS Communications* 13 (4), 664-672
9. L Destiarti, R Riyanto, R Roto, M Mudasir, 2023, Electrolyte effect in electrochemical exfoliation of graphite, *Materials Chemistry and Physics* 302, 127713
10. LA Putri, I Rahman, M Puspita, SN Hidayat, AB Dharmawan, A Rianjanu, ... 2023, Rapid analysis of meat floss origin using a supervised machine learning-based electronic nose towards food authentication, *npj Science of Food* 7 (1), 31
11. NA Humairah, I Nurijal, SA Sofa, A Chaerunnisa, R Roto, A Kusumaatmaja, E H Sujiono, K Triyana, 2023, Molecularly imprinted polyvinyl acetate doped with boric acid for sensitivity and selectivity of ammonia sensing by QCM, *Biosensors and Bioelectronics: X* 13, 100320



12. R Aflaha, H Afiyanti, ZN Azizah, H Khoirudin, A Rianjanu, A Kusumaatmaja, R Roto, K Triyana, 2023, Improving ammonia sensing performance of quartz crystal microbalance (QCM) coated with nanofibers and polyaniline (PANi) overlay, *Biosensors and Bioelectronics: X* 13, 100300
13. MR Tamara, D Lelono, R Roto, K Triyana, 2023, All-solid-state astringent taste sensor using polypyrrole-carbon black composite as ion-electron transducer, *Sensors and Actuators A: Physical* 351, 114170
14. IM Janah, R Roto, K Konishi, D Siswanta, 2022, EDTA-capped silver nanoparticles as a probe for highly sensitive and selective colorimetric sensing of creatinine and optimization using response surface methodology-Box Behnken Design, *Talanta Open* 6, 100170
15. MB Thohir, R Roto, S Suherman, 2022, A Sol-gel Membrane Utilized Cellulose Paper Doped with  $\alpha$ -fural Dioxime for Colorimetric Determination of Nickel, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 109 (6), 1183-1189
16. M Mudasir, R Roto, Y Kuboki, P Begum, 2022, Coal Fly/Bottom Ash, Hydroxylapatite, and Hydrotalcite: Design of Materials and Technologies for Environmental Remediation, 461-505
17. JA Putri, A Suratman, R Roto, 2022, Adsorption of Coomassie Brilliant Blue by Alginate-Chitosan Nanoparticles, *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials* 34, 63-72
18. K Mauludi, N Nuryono, R Roto, MID Mardjan, ES Kunarti, 2022, Effect Of Gold Modification On The Properties And Photoactivity Of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  In The Degradation Of Nitrobenzene, *Rasayan Journal of Chemistry* 15 (2), 1225-1233
19. R E Y Adu, R Roto, A Kuncaka, 2022, Pembentukan Ester Borat Terkatalisis Asam untuk Analisis Boron Secara Spektrofotometri, *Jurnal Kimia*, 182-188
20. E Yanuar, K Umam, W Sarwana, I Huda, D Wijaya, R Roto, M Mudasir, 2022, Preparation and *Vibrio* sp Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Mediated by *Chromolaena odorata* Leaf Extract using Different Temperatures, *Asian Journal of Biology* 14 (1), 25-37

21. I M Janah, R Roto, D Siswanta, 2022, Effect of ascorbic acid concentration on the stability of tartrate-capped silver nanoparticles, *Indonesian Journal of Chemistry* 22 (3), 857-866
22. S Murniasih, SJ Santosa, R Roto, 2022, Assessment of Multi-Nutrients and Heavy Metals in Inorganic Fertilizers Widely Used by Indonesian Farmers Using NAA, *Indonesian Journal of Chemistry* 22 (3), 666-682
23. D Agustiningsih, M Sofyana, S Budiharjo, SA Febriana, H Nurokhmanti, S Suhartini, D Y Priyambodo, D A A Nugrahaningsih, R Roto, R A Wibowo, 2021, Reaction Times among Batik Workers: the influence of gender and occupational lead exposure, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (23), 12605
24. R Dwiyanca, R Roto, ET Wahyuni, 2021, Remazol Black Decontamination Study Using a Novel One-Pot Synthesized S and Co Co-Doped TiO<sub>2</sub> Photocatalyst, *Photochem* 1 (3), 488-504
25. R Dwiyanca, R Roto, KP Suwondo, ET Wahyuni, 2021, Enhanced photocatalytic degradation of Remazol Black under visible light illumination through S doped TiO<sub>2</sub> (S-TiO<sub>2</sub>) nanoparticles: Operational factors and kinetic study, *Global Nest*, 23, No 2, 323-332
26. R E Y Adu, R Roto, A Kuncaka, 2021, A Simple Analyte Volatilization in Polytetrafluoroethylene (PTFE) Vessel for Spectrophotometric Determination of Boron, *Jurnal Akademika Kimia* 10 (2), 98-104
27. Y Yusbarina, R Roto, K Triyana, 2021, Hydroxyl Functionalized Graphene As A Superior Anode Material For Electrochemical Oxidation Of Methylene Blue, *Rasayan Journal of Chemistry* 14 (2), 1140-1147
28. I M Janah, R Roto, D Siswanta, 2021, Very Stable EDTA-Stabilized Colloidal Silver Nanoparticles: The Role of Synthesis Parameters, *Journal of Photopolymer Science and Technology* 34 (6), 587-595
29. R E Y Adu, R Roto, A Kuncaka, 2021, Spectrophotometric Determination Of Boron In Food Products By Ester Borate Distillation Into Curcumin, *Jurnal Kimia*, 15 (1), 67-73

### **Pembicara/Kuliah Tamu Internasional dalam 3 Tahun Terakhir**

- 2023 (Des) : Invited Speaker, Universiti Teknologi Petronas, Perak Malaysia
- 2023 (Des) : Invited Speaker, Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu Malaysia
- 2023 (Nov) : Invited Speaker, International Conference of the Indonesian Chemical Society, Jambi
- 2022 (Okt) : Keynote Speaker, International Conference of Young Chemists (ICYC), Electrospinning and Functionality of Polymer to Improve Sensitivity and Selectivity of Ammonia Sensing by QCM, Penang, Malaysia
- 2022 (Mar) : Invited Lecture PARE Spring School 2022, Hokkaido University, Japan
- 2021 (Agu) : Invited Lecture Hokkaido University Summer Institute, Hokkaido University, Japan

### **Buku dan Book Chapter**

1. Coal Fly/Bottom Ash, Hydroxylapatite, and Hydrotalcite: Design of Materials and Technologies for Environmental Remediation, 2022, 461-505
2. Surface Modification of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  as Magnetic Adsorbents for Recovery of Precious Metals, 2018, Intech Open
3. Panduan Tracer Study, 2012, Kantor Jaminan Mutu Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

### **Paten/HKI**

1. Pembuatan gas metana dan etilena dari gas  $\text{CO}_2$  menggunakan metode fotoreduksi terkatalis  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  dengan penambahan logam besi dan seng, 2019, Paten No IDP000064992
2. Metode untuk Konversi Sampah Plastik Menjadi Humus, 2019, Paten No IDS000002570

### **Penghargaan**

- 2021 : Satya Lencana Karya Satya 20 tahun, Presiden RI
- 2020 : Insan UGM Berprestasi 2020, Kategori Publikasi Ilmiah Bidang Sains

2008 : Satya Lencana Karya Satya 10 tahun, Presiden RI

2003 : Boards of Governors Merit Awards, University New Brunswick  
Canada