

PEMANFAATAN SENSOR *QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE* DENGAN LAPISAN *NANOFIBER POLYVINYL ACETATE/CITRIC ACID* UNTUK PEMANTAUAN PERUBAHAN KONSENTRASI GAS AMONIA OLEH TANAMAN *SPATHIPHYLLUM*

Khalid Saifullah*, Chotimah

Departemen Fisika, Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada

*Corresponding author: Khalid.s@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Pada penelitian ini efek tanaman *Spathiphyllum* terhadap kandungan gas amonia akan diamati dengan menggunakan sensor berbasis *quartz crystal microbalance* (QCM). QCM dilapisi dengan nanofiber polyvinyl acetate/citric acid (PVAc/CA) menggunakan metode pelapisan electrospinning agar sensitif dan selektif terhadap gas amonia. Penurunan frekuensi yang terdeteksi pada sensor untuk kadar amonia 10, 20, 30, 40, dan 50 ppm adalah berturut-turut sebesar -97,7 Hz, -155,9 Hz, -194,9 Hz, -227,8 Hz, -257,1 Hz. Hasil penelitian menunjukkan sensitivitas sensor terhadap gas amonia sebesar 4,32 Hz/ppm dengan waktu respons dan waktu pemulihan sebesar 8,67 dan 50,33 detik. Pengujian terhadap bagian tanaman menggunakan sensor QCM menghasilkan penurunan frekuensi pada sensor QCM PVAc dan PVAc/CA. Sensor QCM dengan lapisan PVAc/CA memberikan nilai respons yang lebih besar bila dibandingkan dengan lapisan PVAc. Penurunan frekuensi kemungkinan diakibatkan oleh volatile organic compound (VOC) yang dihasilkan oleh tanaman *Spathiphyllum*. Senyawa β -costol dan (Z)-linalool oxide kemungkinan berinteraksi dengan gugus hidroksil sehingga menyebabkan penurunan frekuensi sensor QCM PVAc/CA. Penurunan frekuensi per satuan luas diurutkan dari yang terbesar diakibatkan berturut-turut oleh bagian akar, batang, dan daun. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh berbagai macam VOC hasil emisi dari tanaman yang dapat mempengaruhi nilai respons sensor QCM PVAc/CA terhadap kandungan gas amonia.

Kata kunci: Sensor, QCM, PVAc/CA, ammonia, *spathiphyllum*

PENDAHULUAN

Ammonia (NH₃) merupakan gas alkali yang beracun, tidak berwarna, dan korosif dengan bau tajam yang diproduksi dalam jumlah besar karena aplikasi industrinya yang luas (Elfsmark *et al.*, 2019). Sebagian besar produksi amonia digunakan sebagai bahan baku pupuk dalam pertanian dan penggunaan lainnya sebagai prekursor untuk bahan kimia yang mengandung nitrogen seperti nitril, amina, hidrazin, dan urea (Mikami *et al.*, 2017). Dalam beberapa tahun terakhir, kandungan amonia di atmosfer terus meningkat terutama di daerah pertanian (Wei *et al.*, 2018). Mata, kulit, dan organ pernapasan manusia dapat mengalami iritasi akibat gas amonia, bahkan pada konsentrasi dibawah 50 ppm (Naderi *et al.*, 2020). Di daerah pertanian yang selama ini dikenal sebagai daerah penyangga udara bersih dengan banyak tanaman mempunyai kandungan amonia yang tinggi akibat

penggunaan pupuk untuk keperluan produksi tanaman dan pakan ternak dalam jumlah yang tinggi. Tingginya kandungan amonia di udara menandakan efisiensi penggunaan nitrogen yang rendah, yang berakibat pada peningkatan biaya produksi pertanian dan menghambat pembangunan pertanian yang berkelanjutan (Li *et al.*, 2020).

Kegiatan pemantauan kandungan gas amonia diperlukan untuk mereduksi emisi amonia yang dikeluarkan oleh tanaman dan selanjutnya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen. Beberapa metode yang biasa digunakan dalam pemantauan kandungan gas amonia di daerah pertanian diantaranya metode spektrometer, metode pemompaan, kromatografi, tabung deteksi gas dan lain sebagainya (Gong *et al.*, 2013; Min *et al.*, 2011; Ni *et al.*, 2015). Beberapa kelemahan dari metode tersebut, diantaranya biaya yang tinggi, kompleksitas tinggi, memerlukan waktu yang lama, dan pengoperasian yang dilakukan secara manual sehingga kurang mendukung pertanian modern. Oleh sebab itu, dibutuhkan metode deteksi dengan biaya yang rendah, pengoperasiannya lebih mudah, dan prosesnya cepat.

Penggunaan sensor gas dengan prinsip gravimetrik berbasis *quartz crystal microbalance* (QCM) bisa menjadi opsi yang dapat digunakan dalam pemantauan kandungan gas amonia. QCM merupakan salah satu jenis sensor gelombang akustik yang bekerja dengan prinsip perubahan massa dan dapat mendeteksi perubahan hingga skala nanogram. QCM menggunakan prinsip kerja *piezoelectric*, dimana sinyal-sinyal elektronik dihasilkan QCM akibat adanya perubahan frekuensi resonansi yang bergantung pada perubahan massa pada permukaan resonator (Julian *et al.*, 2019). Hubungan antara perubahan frekuensi resonansi dan perubahan massa dapat ditinjau menggunakan persamaan Sauerbrey (Sauerbrey, 1959). QCM memiliki keunggulan diantaranya pengoperasian yang mudah, biaya dan konsumsi daya yang rendah, kemampuan deteksi secara berkala, dan waktu deteksi yang cepat (L. Wang, 2020). Sensitivitas yang tinggi dan selektivitas yang bagus pada QCM dapat dicapai dengan pemberian lapisan sensor yang sesuai (Sanaeifar *et al.*, 2017). Perubahan frekuensi QCM akan dihasilkan akibat adanya penyerapan (adsorpsi) analit tertentu ke dalam lapisan aktif sensor.

Lapisan aktif yang ditambahkan pada elektroda QCM dapat berupa *thin film*, nanopartikel, dan *nanofiber*. Material pelapis seperti metal oksida, polimer, karbon, dan material lainnya telah digunakan sebagai bahan lapisan aktif QCM (L. Wang, 2020). Metode yang digunakan dalam pembuatan lapisan aktif diantaranya *dip coating*, *spin coating*, *drop casting*, *self-assembly monolayer* (SAM), dan *electrospinning*. Penggunaan lapisan *nanofiber* sebagai lapisan aktif dapat meningkatkan sensitivitas sensor. Lapisan *nanofiber* memiliki struktur poros atau berpori sehingga dapat meningkatkan luas permukaan pada sensor (Phuoc *et al.*, 2020). Luas permukaan pada sensor diperlukan sebagai tempat analit menempel ketika melakukan pengujian. *Electrospinning* merupakan metode pembuatan lapisan *nanofiber* yang mudah, efisien, dan memiliki reproduktifitas tinggi (Julian *et al.*, 2019).

PVAc memiliki sifat tidak berbau, tidak memiliki rasa, dan ramah lingkungan (Ulaganathan & Rajendran, 2010). PVAc juga memiliki kekuatan tarik yang tinggi, kompatibilitas yang baik, stabilitas mekanik, dan pembentukan film yang mudah (Pradeepa *et al.*, 2016). *Citric acid* (CA) merupakan asam organik lemah yang secara alami sering dijumpai pada buah jeruk (Show *et al.*, 2015). Dari ketiga grup fungsional karboksil pada CA, satu atau dua grup karboksil terserap pada permukaan partikel dan menyisakan sedikitnya satu grup karboksil yang bebas (Khan *et al.*, 2020).

Kegiatan pemantauan kandungan gas amonia di atmosfer dapat diawali dengan meneliti pengaruh tanaman terhadap kandungan gas amonia di udara. Pemantauan terhadap akar, batang, dan daun dapat memberikan gambaran terkait kontribusi pengaruh bagian tanaman terhadap gas amonia. Beberapa spesies tanaman juga diketahui memiliki kemampuan untuk menyerap *volatile organic compounds* (VOC) dari udara. Salah satu spesies tanaman tersebut adalah tanaman *Spathiphyllum*. Sensor QCM berbasis *polyvinyl acetate* (PVAc) yang telah difungsionalisasi dengan dopan asam organik memberikan sensitivitas dan selektivitas untuk analisis gas amonia di udara. Molekul amonia dapat berinteraksi dengan gugus hidroksil pada asam dimana *citric acid* (CA) memiliki tiga gugus hidroksil (Roto *et al.*, 2020). Sifat hidrofobik dari PVAc membuatnya berinteraksi lebih baik dengan materi dalam wujud gas (Triyana *et al.*, 2019). Kinerja sensor

QCM yang dilapisi *nanofiber* PVAc yang didoping dengan CA mempunyai batas deteksi sebesar 550 ppb (Roto *et al.*, 2020).

Pada penelitian ini, sensor QCM dengan lapisan *nanofiber* PVAc yang telah didoping dengan CA akan digunakan untuk melakukan pengamatan pengaruh tanaman *Spathiphyllum* dan tiap bagiannya terhadap kandungan gas amonia. Pengaruh tiap bagian tanaman terhadap nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA juga akan diamati.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu untuk membuat lapisan *nanofiber* yaitu PVAc dengan berat molekul (500.000 g/mol) yang diproduksi oleh Sigma-Aldrich. Pelarut yang digunakan yaitu *N, N-dimethyl formamide* (DMF) (C₃H₇NO) *analytical grade* dengan doping *Citric Acid* yang diproduksi oleh Merck. Bahan lain yang diperlukan untuk pengujian nilai respons sensor QCM adalah analit amonia 25% yang diproduksi oleh Merck dan tanaman *Spathiphyllum*.

Alat

Alat yang digunakan untuk sintesis larutan polimer yaitu timbangan digital, spatula, gelas beker 10 mL, *magnetic bar stirrer*, *hotplate stirrer*, dan mikropipet. Larutan yang telah dibuat dimasukkan ke dalam tabung suntik dan jarum suntik kemudian akan digunakan untuk membentuk lapisan *nanofiber* di atas permukaan QCM menggunakan perangkat *electrospinning*. Lapisan *nanofiber* dikarakterisasi menggunakan SEM JSM-6510LA LPPT UGM dan FTIR Spectrophotometer 8201PC Shimadzu Laboratorium Kimia Organik FMIPA UGM. Pengujian menggunakan dilakukan menggunakan *sensing chamber*, *Microliter Hamilton syringe*, dan personal computer yang terhubung pada mikrokontroler.

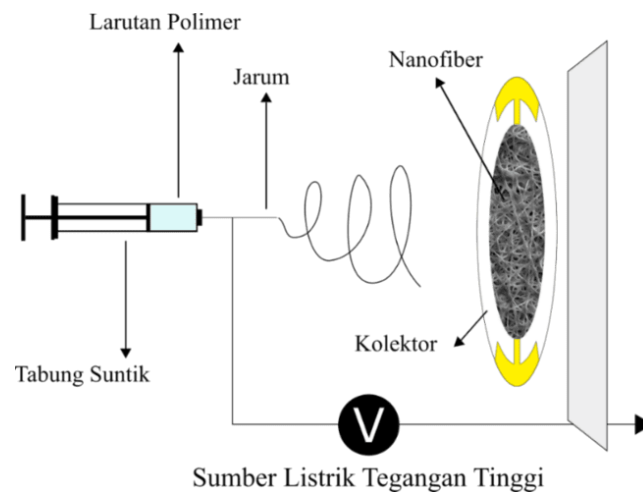
Pembuatan Larutan Polimer PVAc/CA

Larutan PVAc konsentrasi 15% (w/w) dibuat dengan cara 0,833 g serbuk PVAc dilarutkan ke dalam 5 mL larutan *dimethyl-formamide* (DMF). Keduanya dimasukkan ke dalam gelas beker kemudian diaduk menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu 60° C dan kecepatan 900 rpm. Proses pengadukan dilakukan selama 1 jam atau sampai larutan terlihat homogen. Larutan PVAc ini dibuat sebanyak 2 sampel.

Larutan polimer PVAc yang telah diaduk kemudian diberi tambahan doping CA sebanyak 0,355 g untuk memperoleh campuran *citric acid* dengan konsentrasi 6% (w/w). Setelah itu, proses pengadukan kembali dilakukan menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu 60°C dan kecepatan 900 rpm selama 1 jam atau sampai larutan terlihat homogen. Larutan yang selesai diaduk dimasukkan ke dalam tabung suntik yang akan digunakan dalam proses *electrospinning*.

Pelapisan PVAc/CA pada Permukaan QCM dengan Metode *Electrospinning*

Seperangkat alat *electrospinning* digunakan untuk membuat sampel *nanofiber* dan melapisi permukaan sensor QCM dengan *nanofiber*. Tabung suntik yang telah diisi dengan larutan polimer diletakkan dalam tempat yang tersedia pada alat *electrospinning*. Pelapisan pada QCM dilakukan pada tegangan 15 kV dan jarak *tip-to-collector* 15 cm selama 20 detik. Setelah proses pelapisan selesai, QCM diletakkan pada kotak penyimpanan dan dikeringkan di dalam desikator selama 24 jam. Skema alat pada proses pelapisan *nanofiber* dengan *electrospinning* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema proses pembentukan *nanofiber* dengan metode *electrospinning*

Karakterisasi Lapisan *Nanofiber*

Karakterisasi dilakukan pada sampel yang telah dibuat dengan metode *electrospinning* dengan kolektor *aluminium foil*. Uji FTIR dilakukan untuk mengetahui perubahan spektrum transmitansi dari *nanofiber* PVAc setelah penambahan doping CA serta menganalisis gugus fungsional dari *nanofiber* PVAc dan PVAc/CA. Uji SEM dilakukan pada sampel untuk mengetahui morfologi dari *nanofiber* PVAc dan PVAc/CA hasil *electrospinning*.

Pembuatan Analit

Analit yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan amonia dengan konsentrasi 25%. Penguapan larutan amonia 25% dilakukan dalam *sensing chamber* untuk memperoleh gas amonia dengan berbagai nilai konsentrasi. Gas amonia 10 ppm diperoleh dengan cara 0,085 μL larutan amonia 25% disuntikan ke dalam *sensing chamber*, kemudian diuapkan. Gas amonia 50 ppm diperoleh dengan cara 0,42 μL larutan amonia 25% disuntikan ke dalam *sensing chamber*, kemudian diuapkan. Volume larutan amonia yang disuntikkan disesuaikan ketika terdapat pot tanaman yang dimasukkan dalam *sensing chamber*.

Perhitungan yang dilakukan untuk memperoleh nilai volume amonia yang disuntikkan untuk mendapatkan beberapa konsentrasi gas yang telah dipaparkan menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$C = \frac{22,4 \cdot \rho \cdot T \cdot V_a \cdot k \cdot 10^3}{273 \cdot M \cdot V} \quad (1)$$

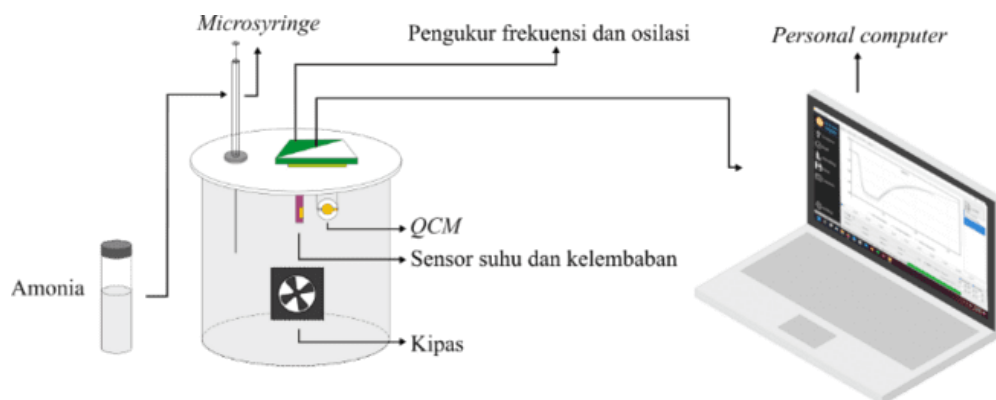
Keterangan :

C = konsentrasi analitp = densitas analit (g/mL)
 T = suhu pada chamber (K)
 V = volume sensing chamber (L)
 M = massa molekul analit (g/mol)
 V_a = volume larutan analit (μL)
 k = konsentrasi analit dalam larutan

(Wang *et al.*, 2012)

Pengujian Sensor QCM PVAc/CA

Pengujian kemampuan sensor QCM PVAc dan PVAc/CA dilakukan dengan dilakukan pengamatan terhadap respons terhadap gas amonia sebagai analit target. Beberapa parameter performa sensor yang diuji adalah sensitivitas, linearitas, waktu respons, dan waktu pemulihan. Rangkaian alat yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian alat pengujian respons sensor

Pengujian sensitivitas dan linearitas sensor dilakukan dengan cara analit dengan variasi konsentrasi 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, dan 50 ppm disuntikkan ke dalam *sensing chamber*. Analit tersebut akan dideteksi oleh sensor dan di tampilan nilai responnya. Langkah tersebut diulangi sebanyak 3 kali untuk memperoleh nilai ralat. Pengujian waktu respons dan waktu pemulihan dilakukan dengan cara analit dengan konsentrasi 50 ppm disuntikkan ke dalam *sensing chamber* kemudian diamati nilai respons yang dihasilkan. Waktu respons ditetapkan ketika sensor mencapai 90% nilai respons maksimum. Waktu pemulihan ditetapkan ketika sensor mengalami pemulihan 90% ke kondisi awal. Langkah tersebut diulangi sebanyak 3 kali untuk memperoleh nilai rata-rata.

Pengamatan Perubahan Kandungan Gas Amonia oleh Tanaman Dengan QCM

Pengamatan pengaruh tanaman terhadap kandungan gas amonia dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama, dilakukan pengamatan gas emisi tanaman dan bagiannya yang diduga mengandung amonia dengan menggunakan QCM PVAc dan PVAc/CA tanpa injeksi analit. Pengamatan terhadap perubahan nilai respons sensor akan dilakukan untuk menentukan kemampuan QCM PVAc dan PVAc/CA mendeteksi gas emisi tanaman. Ukuran dan massa dari bagian tanaman yaitu daun, batang, dan akar diukur sebelum dan sesudah dilakukan pengamatan. Tanaman atau bagian tanaman kemudian dimasukkan ke dalam *sensing chamber* untuk dilihat pengaruhnya terhadap nilai respons sensor ketika tidak diberi injeksi analit.

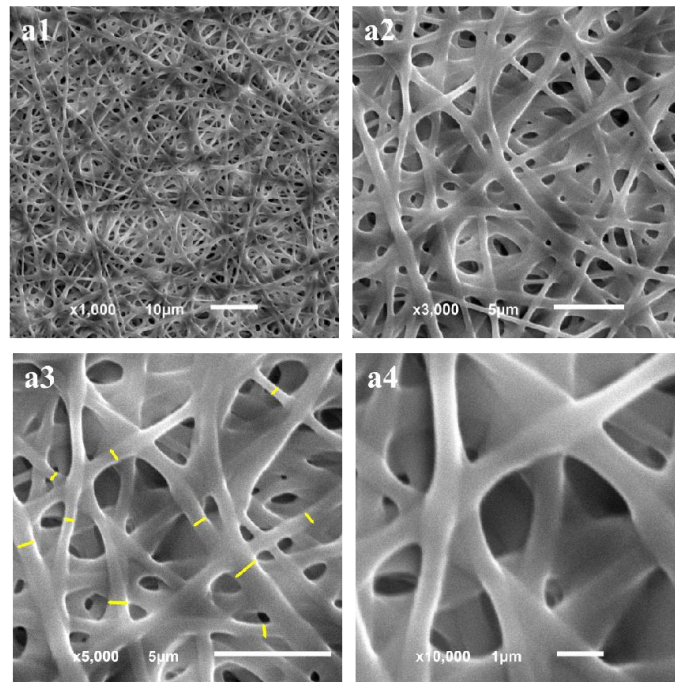
Tahap kedua, dilakukan pengamatan pengaruh tanaman dan bagiannya terhadap kandungan gas amonia dengan menggunakan QCM PVAc dan PVAc/CA. Tanaman atau bagian tanaman kemudian dimasukkan ke dalam *sensing chamber*. Injeksi analit ke dalam *sensing chamber* dilakukan untuk memperoleh variasi konsentrasi kandungan gas amonia sebesar 10-50 ppm. Pengamatan nilai respons sensor dilakukan untuk menentukan pengaruh tanaman atau bagian tanaman terhadap kandungan gas amonia di dalam *sensing chamber*. Langkah tersebut diulangi sebanyak 3 kali untuk dengan bagian tanaman yang berbeda. Hasil berupa nilai respons sensor yang diperoleh pada tahap kedua akan dibandingkan dengan hasil pengujian respons sensor QCM pada konsentrasi

amonia yang sama untuk menentukan pengaruh tanaman terhadap kandungan gas amonia. Tahap ketiga dilakukan dengan cara yang sama dengan tahap pertama, yaitu pengamatan tanpa injeksi amonia tetapi dilakukan setelah tahap kedua.

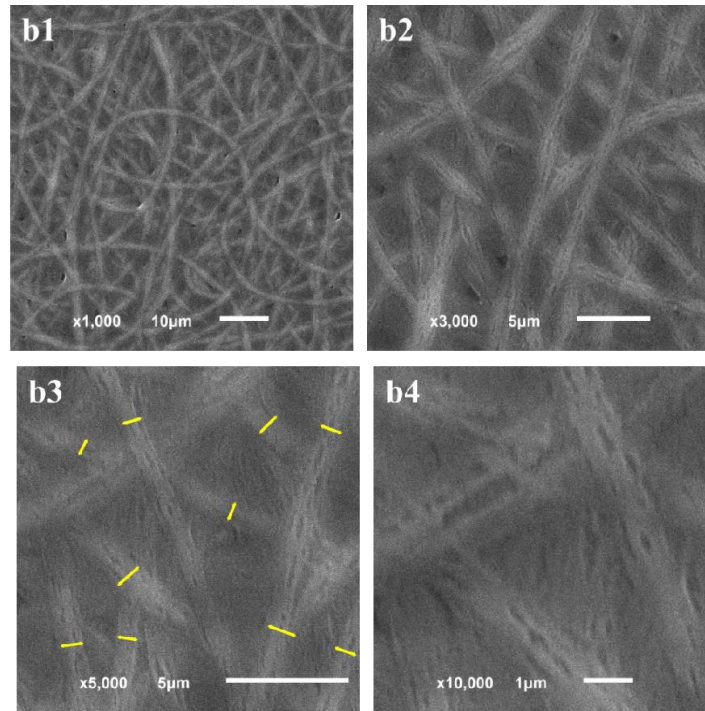
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Struktur dan Morfologi Lapisan *Nanofiber* PVAc dan PVAc/CA

Permukaan *nanofiber* PVAc pada Gambar 3 tersusun atas serat yang halus dan kontinu. Penambahan doping CA pada larutan PVAc mengakibatkan perbedaan morfologi dari *nanofiber* yang dihasilkan dibandingkan dengan *nanofiber* PVAc tanpa doping seperti yang terlihat pada Gambar 4 Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Roto *et al.*, 2020).



Gambar 3. Hasil uji SEM *nanofiber* PVAc



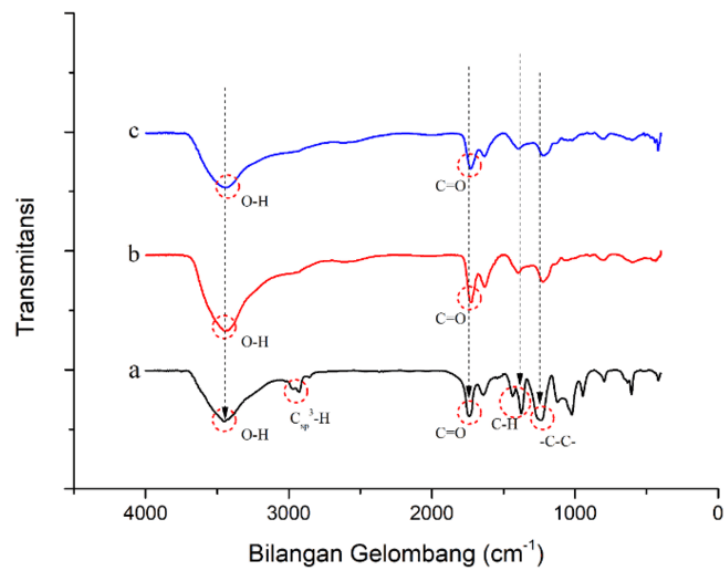
Gambar 4. Hasil uji SEM *nanofiber* PVAc/CA

Diameter fiber PVAc dan PVAc/CA yang terbentuk lebih kecil dari 1 μm atau berada pada skala nanometer. Rata-rata diameter *nanofiber* PVAc dan PVAc/CA adalah 656 dan 921 nm. Rata-rata diameter *nanofiber* PVAc/CA lebih besar dibandingkan *nanofiber* PVAc. Permukaan *nanofiber* PVAc/CA juga terlihat lebih rapat dan memiliki lebih banyak pori dibandingkan *nanofiber* PVAc. Permukaan berpori pada *nanofiber* PVAc/CA yang dihasilkan menyebabkan permukaannya lebih kasar bila dibandingkan dengan permukaan *nanofiber* PVAc. Struktur berpori pada *nanofiber* akan meningkatkan luas permukaan *nanofiber* (Phuoc *et al.*, 2020). Peningkatan luas permukaan aktif *nanofiber* yang digunakan sebagai tempat analit menempel akan meningkatkan respons sensor (Roto *et al.*, 2020).

Fiber pada *nanofiber* PVAc/CA terlihat saling menempel satu sama lain tidak seperti *nanofiber* PVAc yang fibernya terpisah. Hal tersebut diakibatkan oleh penambahan doping CA yang selain digunakan untuk meningkatkan performa sensor juga dapat berperan sebagai *crosslinking agent* untuk *nanofiber* PVAc. *Crosslinking agent* dapat meningkatkan kekuatan serta kestabilan mekanik dan temperatur dari *nanofiber* yang dihasilkan (Hulupi & Haryadi, 2019).

B. Analisis Hasil Uji FTIR

Gambar 5.a merupakan hasil pengujian terhadap *nanofiber* PVAc terdapat beberapa puncak spektrum FTIR yang dapat diamati. Sifat dari C_{sp^3} -H dari CH_3 ditunjukkan oleh puncak spektrum pada 2926 cm^{-1} dan keberadaan $C=O$ ditunjukkan oleh puncak spektrum pada 1738 cm^{-1} . Puncak lain pada bilangan gelombang 1435 dan 1376 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ikatan C-H dari CH_3 . Ikatan *vinyl* -C-C- juga teramati pada bilangan gelombang 1240 cm^{-1} . Hasil uji FTIR *nanofiber* PVAc ini sesuai dengan hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya (Roto *et al.*, 2020).



Gambar 5. Hasil uji FTIR PVAc (a), CA (b), dan PVAc/CA 6% (c)

Gambar 5.b yang merupakan hasil pengujian terhadap CA terdapat beberapa puncak spektrum FTIR yang dapat diamati. Puncak spektrum pada 1726 cm^{-1} seperti yang teramati pada *nanofiber* PVAc merupakan tanda keberadaan dari $C=O$. Puncak lain pada bilangan gelombang 3443 cm^{-1} merupakan tanda keberadaan O-H. Keberadaan O-H menunjukkan adanya gugus asam karboksil yang terdapat pada CA (Roto *et al.*, 2020).

Pada Gambar 5.c yang merupakan hasil pengujian terhadap *nanofiber* PVAc/CA 6% dapat diamati bahwa spektrum yang dihasilkan dipengaruhi oleh spektrum PVAc dan CA. Pengaruh spektrum tersebut mengindikasikan bahwa *nanofiber* PVAc/CA memiliki sifat yang mirip dengan PVAc dan CA. Hasil pengujian menunjukkan gugus fungsi yang dihasilkan *nanofiber* PVAc dan CA

juga dimiliki oleh *nanofiber* PVAc/CA. Gugus fungsi tersebut yang akan bereaksi dengan analit berupa gas amonia. Hasil spektrum FTIR yang telah ditampilkan mengonfirmasi bahwa pembentukan lapisan *nanofiber* PVAc dengan doping CA telah berhasil dilakukan.

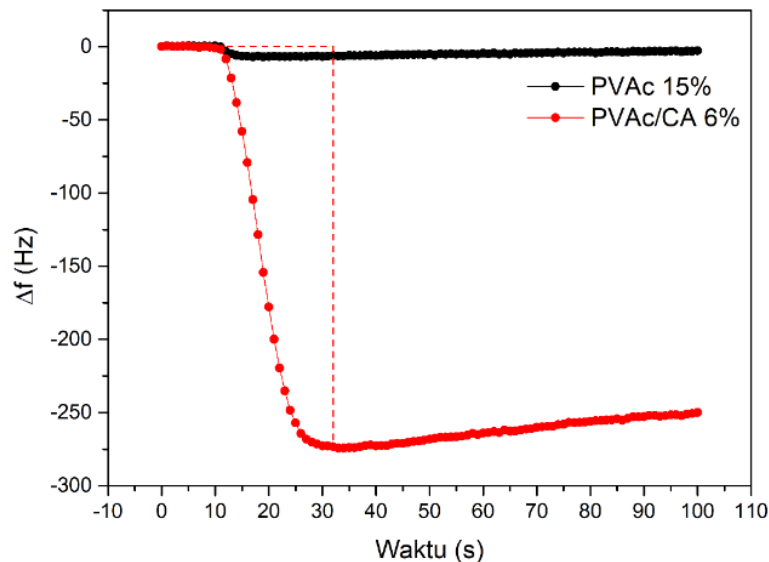
C. Performa Sensor setelah Pelapisan *Nanofiber* PVAc dan PVAc/CA

Sensor QCM yang telah dilapisi dengan *nanofiber* menggunakan metode *electrospinning* dengan durasi pelapisan 20 detik dan jarak *tip-to-collector* 15 cm diukur perubahan frekuensi resonansinya. Data penurunan frekuensi resonansi sensor setelah pelapisan *nanofiber* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penurunan frekuensi resonansi sensor QCM setelah proses pelapisan *nanofiber*

Sensor	Penurunan Frekuensi Resonansi (Hz)
PVAc	8.826
PVAc/CA 6%	4.381

Hasil pengujian antara sensor dengan *nanofiber* PVAc dengan *nanofiber* PVAc/CA akan dibandingkan dan dianalisis. Parameter performa dari sensor yang akan diamati pada pembahasan ini adalah respons sensor, sensitivitas sensor, waktu respons sensor, dan waktu pemulihan sensor.



Gambar 6. Perubahan frekuensi sensor QCM PVAc dan PVAc/CA ketika diberikan gas amonia 50 ppm

Pengujian respons sensor QCM terhadap gas amonia dilakukan dengan

penyuntikan amonia cair sebesar 50 ppm ke dalam *sensing chamber* pada detik ke-10 setelah nilai respons QCM sudah stabil. Durasi pengujian respons sensor adalah 100 detik. Nilai respons yang dihasilkan oleh sensor QCM dapat diamati pada Gambar 6.

Sensor QCM yang dikenai oleh gas amonia memberikan respons berupa penurunan frekuensi seperti yang terlihat pada Gambar 6. Penurunan frekuensi tersebut diakibatkan oleh molekul gas amonia yang tertarik dan kemudian menempel pada permukaan *nanofiber* PVAc dan PVAc/CA. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan massa sensor dan membuat frekuensi resonansi QCM menurun sesuai dengan persamaan Sauerbrey. Nilai perubahan frekuensi resonansi yang diberikan oleh QCM PVAc tanpa doping CA hanya sebesar 6,8 Hz sementara nilai perubahan frekuensi resonansi yang diberikan oleh QCM PVAc dengan doping CA jauh lebih tinggi yaitu sebesar 274,3 Hz. Berdasarkan hasil pengujian ini, penambahan doping CA pada PVAc dapat meningkatkan nilai respons sensor QCM hingga 40,3 kali lebih tinggi dibandingkan dengan nilai respons sensor QCM tanpa penambahan doping ketika pada kandungan gas amonia 50 ppm.

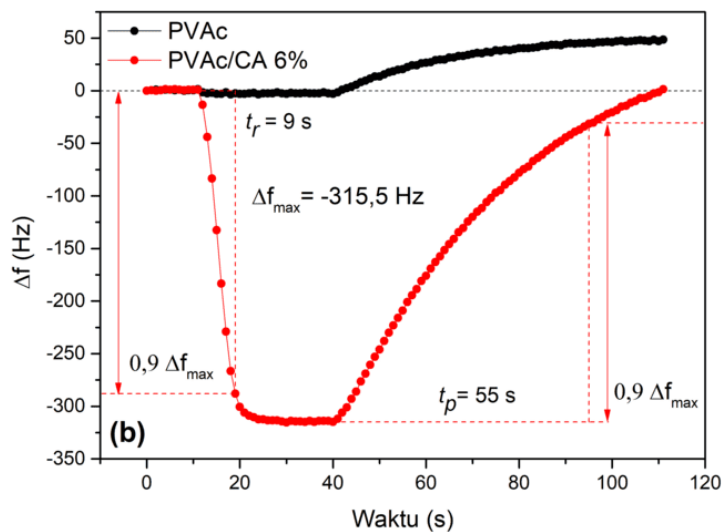
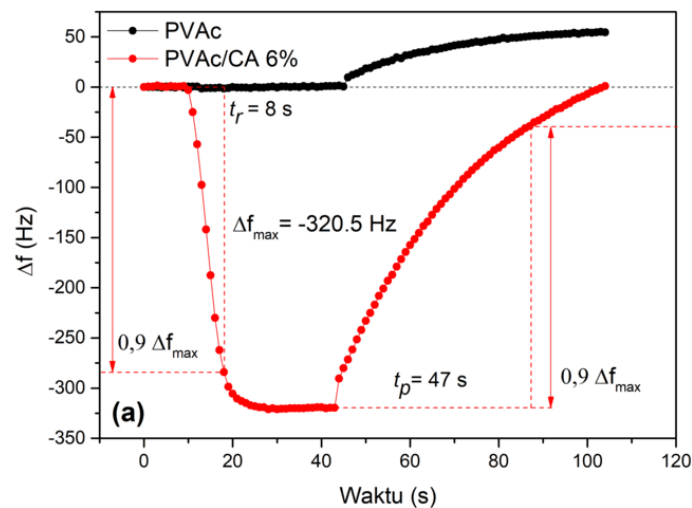
Peningkatan nilai respons sensor yang diakibatkan oleh penambahan doping CA sudah sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Roto *et al.*, 2020). Sifat CA yang merupakan asam organik dapat menarik molekul gas amonia yang bersifat basa ke permukaan QCM. Hal tersebut tidak terjadi pada sensor QCM yang tidak diberi doping CA. Molekul gas amonia juga dapat berinteraksi dengan gugus karboksil melalui interaksi intermolekular asam-basa Lewis yang reversibel (Jia *et al.*, 2016). Gugus karboksil yang terdapat pada CA meningkatkan kemungkinan terjadinya ikatan gas amonia pada permukaan sensor. Oleh karena itu penambahan doping CA dapat meningkatkan jumlah molekul gas amonia yang menempel pada permukaan sensor sehingga terjadi peningkatan nilai respons sensor.

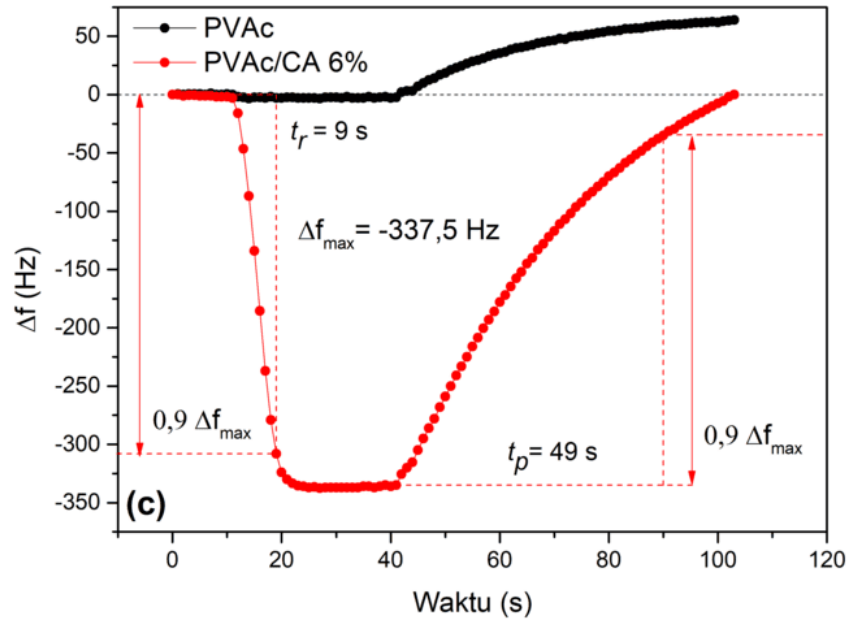
D. Waktu Respons dan Pemulihan Sensor

Waktu respons dan waktu pemulihan didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh sensor untuk mencapai 90% nilai maksimum pada saat merespons dan mengalami pemulihan ke kondisi awal (Triyana *et al.*, 2019). Nilai respons yang dihasilkan oleh sensor dapat diamati pada Gambar 7. Dapat dilihat bahwa QCM

PVAc/CA memiliki waktu respons dan pemulihan rata-rata sebesar 8,67 dan 50,33 detik. Sementara QCM PVAc memberikan nilai respons yang sangat kecil dan tidak dilakukan perhitungan terhadap waktu respons dan pemulihan.

Terlihat pada Gambar 7, pada waktu pemulihan, QCM PVAc mencapai nilai positif dimana hal tersebut menandakan adanya analit/zat selain amonia yang terlepas dari permukaan sensor sesuai dengan persamaan Sauerbrey. Waktu respons dan pemulihan sensor QCM PVAc pada penelitian yang dilakukan oleh Roto dkk. (2020) adalah 40 dan 77 detik. Sementara untuk sensor QCM PVAc/CA memiliki waktu respons dan waktu pemulihan sebesar 31 dan 124 detik. Sensor QCM dengan *nanofiber* PVAc/CA yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki peningkatan waktu respons hingga 4,6 kali lebih cepat bila dibandingkan dengan sensor QCM PVAc pada referensi.





Gambar 7. Hasil uji waktu respons dan pemulihan ke-1(a), ke-2(b), dan ke-3(c) sensor QCM dengan konsentrasi amonia 50 ppm

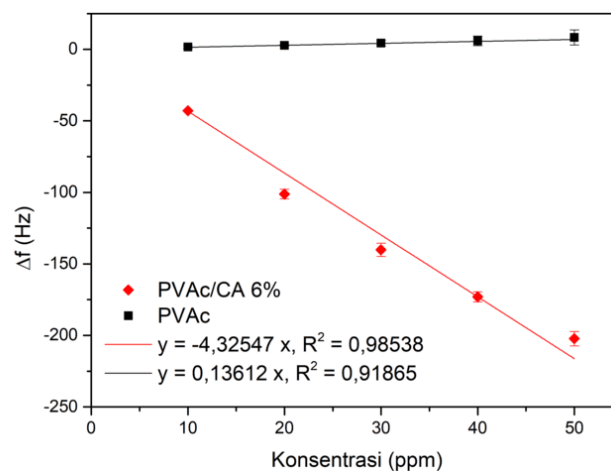
Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor QCM PVAc/CA bisa memberikan respons yang relatif cepat terhadap keberadaan amonia. Penambahan doping CA juga dapat meningkatkan kecepatan waktu respons sensor QCM bila dibandingkan dengan waktu respons sensor tanpa pemberian doping CA untuk deteksi amonia (Roto *et al.*, 2020).

E. Sensitivitas Sensor

Grafik nilai respons yang dihasilkan sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian sensitivitas dapat dilihat pada Gambar 8. Hasil pengujian menunjukkan respons sensor QCM dengan lapisan *nanofiber* PVAc/CA memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan konsentrasi gas amonia yang diinjeksikan. Peningkatan nilai konsentrasi gas amonia yang diinjeksikan mengakibatkan jumlah molekul gas yang tertangkap dan menempel pada permukaan sensor meningkat sehingga massa permukaan sensor meningkat dan terjadi penurunan frekuensi resonansi.

Nilai sensitivitas sensor diperoleh melalui gradien garis (*slope*) yang terbentuk pada grafik antara nilai respons sensor dan konsentrasi gas amonia. Nilai sensitivitas QCM PVAc/CA memiliki sensitivitas sebesar 4,32 Hz/ppm. Nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan nilai sensitivitas QCM PVAc. Dapat terlihat pada grafik bahwa frekuensi resonansi QCM PVAc cenderung naik ketika terjadi

peningkatan konsentrasi amonia. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan QCM PVAc yang masih melepas debu/zat lain yang terdapat pada permukaannya waktu pengujian berlangsung sehingga terjadi pengurangan massa permukaan dan menyebabkan peningkatan nilai frekuensi resonansi. *Error bar* pada grafik tersebut adalah perhitungan nilai standar deviasi dari hasil pengukuran sebanyak 3 kali pengulangan ($n=3$). Pengulangan yang dilakukan memberikan respons yang cenderung sama pada 3 kali pengulangan sehingga ralat yang dihasilkan relatif kecil. Nilai respons tersebut menunjukkan bahwa bahwa sensor yang dihasilkan memiliki reipitabilitas yang baik.



Gambar 8. Respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA 6% terhadap berbagai variasi konsentrasi gas amonia

F. Mekanisme Sensor QCM PVAc/CA dalam Mendeteksi Gas Amonia

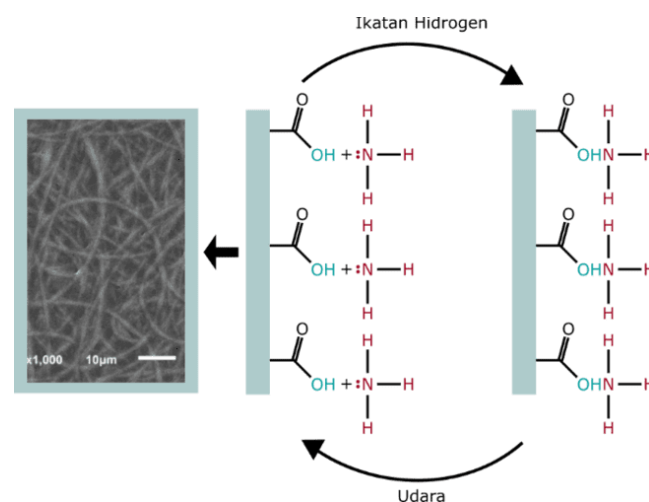
Sensitivitas yang tinggi dan waktu respons serta pemulihan yang cepat pada sensor QCM PVAc/CA bisa disebabkan oleh 2 kemungkinan. Kemungkinan yang pertama struktur berpori dan rapat pada *nanofiber* PVAc/CA meningkatkan luas permukaan sensor sehingga lebih banyak ruang yang tersedia untuk tempat menempel dan mengikat gas amonia. Kemungkinan yang kedua penambahan CA yang memiliki gugus karboksil yang bisa berinteraksi dengan amonia membentuk ikatan hidrogen.

Hasil uji SEM menunjukkan bahwa struktur QCM PVAc/CA lebih rapat dan berpori bila dibandingkan dengan *nanofiber* PVAc. Struktur berpori pada *nanofiber* akan meningkatkan luas permukaan *nanofiber*. Peningkatan luas tersebut akan menghasilkan lebih banyak ruang untuk molekul gas amonia untuk menempel pada permukaan *nanofiber* sehingga menimbulkan respons berupa penurunan

frekuensi resonansi akibat penambahan massa sesuai dengan persamaan Sauerbrey.

Penambahan CA yang merupakan asam Lewis meningkatkan reaksi terhadap amonia yang merupakan basa Lewis. Gugus karboksil pada *nanofiber* PVAc/CA dan molekul gas amonia juga memiliki kemungkinan berinteraksi sehingga terbentuk ikatan hidrogen. Semakin banyak jumlah gugus yang karboksil yang ada pada *nanofiber* maka semakin banyak gas analit yang bisa tertarik pada permukaan sensor (Roto *et al.*, 2020). Kemungkinan interaksi antara gugus karboksil pada *nanofiber* PVAc/CA dengan molekul gas amonia dapat dilihat pada Gambar 9. Atom nitrogen yang terdapat pada amonia memiliki pasangan elektron bebas. Pasangan elektron bebas tersebut kemungkinan berinteraksi dan membentuk ikatan hidrogen dengan gugus karboksil yang terdapat pada permukaan *nanofiber* PVAc/CA (Roto *et al.*, 2020).

Kemungkinan terbentuknya ikatan hidrogen akibat interaksi antara gugus hidroksil pada *nanofiber* PVAc/CA dan molekul gas amonia menyebabkan molekul gas menempel pada permukaan QCM. Interaksi tersebut terjadi di seluruh permukaan *nanofiber* PVAc/CA, proses ini disebut dengan adsorpsi. Molekul gas amonia yang menempel pada permukaan sensor akan meningkatkan massa permukaan sesor. Peningkatan massa permukaan sensor QCM akan menyebabkan penurunan frekuensi resonansi sensor.



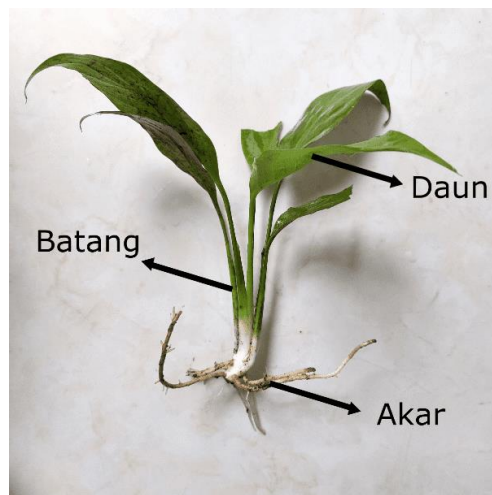
Gambar 9. Skema adsorpsi dan diadsorpsi dan interaksi antara gugus karboksil PVAc/CA dengan molekul gas amonia

Pada saat *sensing chamber* dibuka dan permukaan sensor QCM PVAc/CA terpapar udara, maka ikatan antara gugus hidroksil dan molekul gas amonia pada permukaan sensor akan terlepas. Hal tersebut dikarenakan ikatan hidrogen

termasuk ke dalam ikatan yang lemah dan mudah terlepas. Proses pelepasan tersebut disebut diadsorpsi. Skema adsorpsi dan diadsorpsi dapat diamati pada Gambar 9 Kedua proses tersebut dapat diulangi dan terjadi secara terus menerus seperti pada pengulangan pengujian sebelumnya.

G. Pengamatan Pengaruh Tanaman *Spathiphyllum* terhadap Kandungan Gas Amonia

Pengamatan pengaruh tanaman *Spathiphyllum* terhadap kandungan gas amonia dilakukan terhadap bagian-bagian tanaman dan tanaman secara utuh. Bagian-bagian tanaman yang digunakan untuk pengujian dapat dilihat pada Gambar 10. Bagian tanaman tersebut dipotong dari tubuh tanaman sesaat sebelum dilakukan pengujian. Hal tersebut dilakukan agar kandungan zat dan aktivitas sel pada bagian tanaman tidak hilang seluruhnya.



Gambar 10. Bagian tanaman *Spathiphyllum*

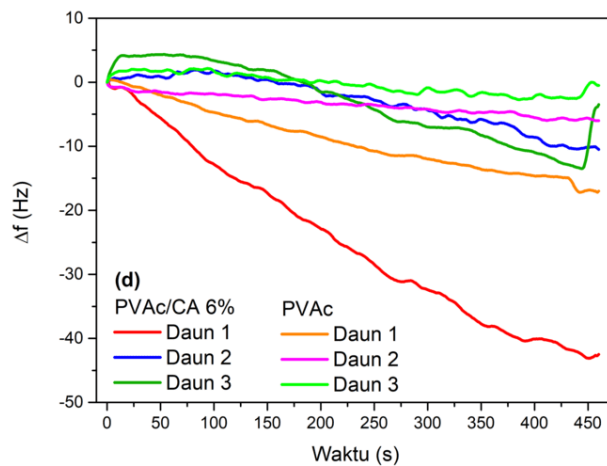
H. Pengamatan Pengaruh Daun *Spathiphyllum*

Luas dari daun dihitung dengan menggunakan program ImageJ. Massa dari tiap daun diukur menggunakan timbangan elektronik sebelum dan setelah tiap tahap. m_0 adalah massa bagian tanaman sebelum pengujian, m_a adalah massa bagian tanaman setelah pengujian, dan Δm adalah perbedaan massa bagian tanaman sebelum dan setelah pengujian. Untuk setiap tahap sensor QCM dimasukkan ke ruang asam dan ditunggu hingga responsnya stabil kembali sebelum dilanjutkan ke pengujian tahap berikutnya. Adapun data massa dan luas daun dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data massa dan luas daun

Daun	Luas (mm ²)	Massa (mg)								
		Tahap 1			Tahap 2			Tahap 3		
		m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm
Daun 1	520,3	134	131	3	128	128	0*	128	128	0*
Daun 2	800,3	145	143	2	141	120	1	140	140	0*
Daun 3	966,3	179	176	3	176	173	3	169	167	2

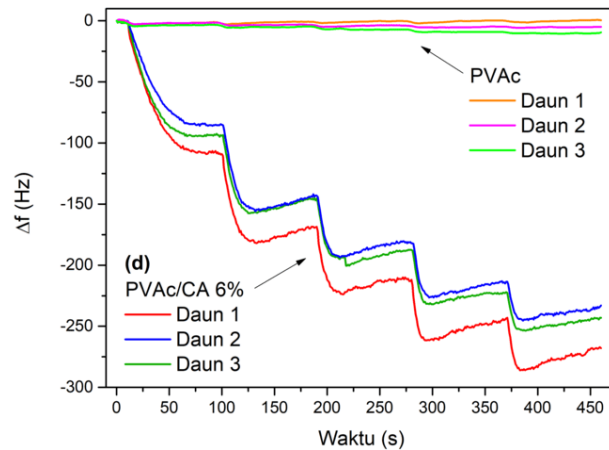
Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 1 dapat dilihat pada Gambar 11. Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan daun di dalam *sensing chamber*. Daun kemungkinan mengeluarkan emisi berupa VOC melalui stomata dan penguapan dari tangkai daun. VOC tersebut direspons oleh kedua sensor tetapi sensor QCM PVAc/CA memberikan respons yang lebih besar.



Gambar 11. Nilai respons sensor pengujian tahap 1 terhadap daun

Nilai respons yang dihasilkan pada pengujian daun 1 jauh lebih besar dibandingkan pengujian daun 2 dan 3 meskipun memiliki massa dan luas yang paling kecil. Penurunan massa dari daun 1 dan 3 juga sama yaitu sebesar 3 mg. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh tangkai pada daun 1 yang mengandung lebih banyak jenis VOC tertentu yang mempengaruhi respons sensor dibandingkan daun 2 dan 3. Peningkatan nilai frekuensi resonansi pada awal pengujian daun 2 dan daun 3 dapat diakibatkan oleh QCM yang masih belum stabil sementara peningkatan frekuensi resonansi yang tinggi secara cepat pada daun 3 kemungkinan disebabkan oleh adanya getaran dari luar *sensing chamber*.

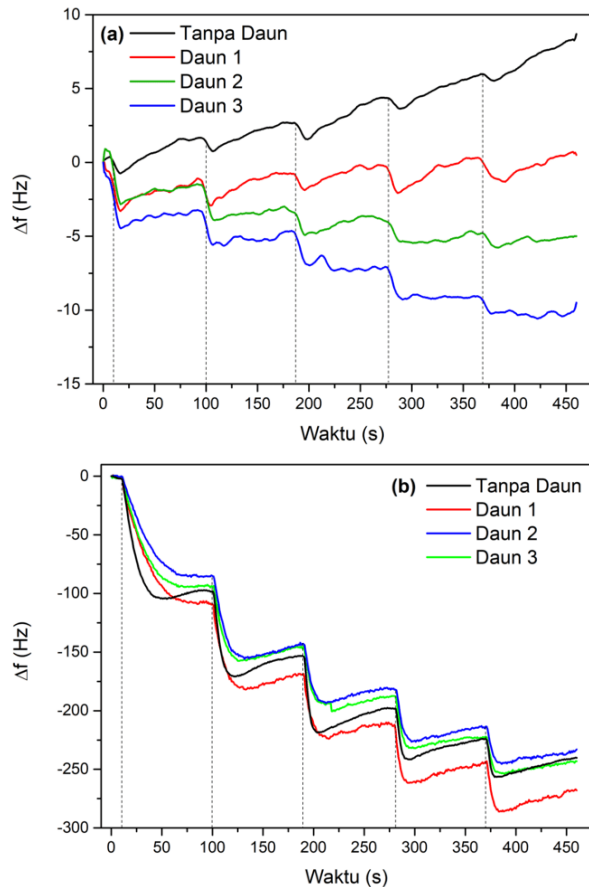
Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 2 dapat dilihat pada Gambar 12. Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan daun dan amonia yang diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*.



Gambar 12. Nilai respons sensor pengujian tahap 2 terhadap daun 1

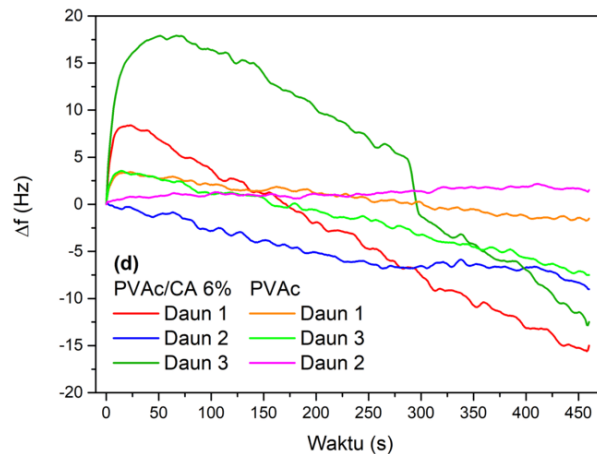
Penurunan frekuensi sensor QCM PVAc/CA lebih besar dibandingkan penurunan frekuensi sensor QCM PVAc. Nilai respons dihasilkan pada pengujian daun 1 lebih besar dibandingkan pengujian daun 2 dan 3 sama seperti hasil pengujian pada tahap 1. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh tangkai pada daun 1 yang mengandung lebih banyak jenis VOC tertentu yang mempengaruhi respons sensor dibandingkan daun 2 dan 3. Nilai respons yang dihasilkan pada pengujian daun 3 lebih besar daripada daun 2. Penurunan massa daun 2 dan 3 berbeda namun nilai respons yang diberikan tidak berbeda jauh. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan perbedaan komposisi VOC yang diemisikan atau injeksi amonia yang tidak sepenuhnya menguap di dalam *sensing chamber*.

Perbandingan respons antara QCM PVAc dan PVAc/CA pada tahap pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 13. Pengaruh dari daun dapat dilihat dengan membandingkan nilai respons sensor dengan dan tanpa kehadiran daun. Pengaruh daun 1 membuat nilai respons QCM PVAc/CA lebih besar bila dibandingkan nilai respons tanpa daun. Nilai respons pengujian daun 2 dan 3 yang lebih rendah dibandingkan nilai respons tanpa daun kemungkinan diakibatkan oleh injeksi amonia yang tidak sempurna. Larutan amonia tidak bisa sepenuhnya keluar dari *syringe* karena volumenya yang sangat kecil.



Gambar 13. Perbandingan nilai respons QCM PVAc (a) dan PVAc/CA (b) untuk pengujian tahap 2 pada daun

Peningkatan nilai frekuensi resonansi pada sensor QCM PVAc kemungkinan diakibatkan oleh permukaan *nanofiber* PVAc yang tidak dapat mengikat gas amonia dan VOC yang dihasilkan oleh daun. Pengaruh daun dapat terlihat pada QCM PVAc dimana penurunan frekuensinya lebih besar bila dibandingkan dengan penurunan frekuensi tanpa kehadiran daun.



Gambar 14. Nilai respons sensor pengujian tahap 3 terhadap daun

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 3 dapat dilihat pada Gambar 14 Peningkatan nilai frekuensi resonansi pada awal pengujian dapat diakibatkan oleh QCM yang masih belum stabil atau pengaruh getaran dari luar *sensing chamber*. Pengujian pada daun 3 memberikan penurunan frekuensi yang lebih besar dibandingkan daun 1 dan 2 sebanding dengan perubahan massanya. Nilai respons yang diberikan oleh daun 1 tidak sebesar pada pengujian tahap 1. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan oleh kandungan VOC dalam daun 1 yang sudah berkurang setelah melalui 2 tahap pengujian seperti kedua daun lainnya.

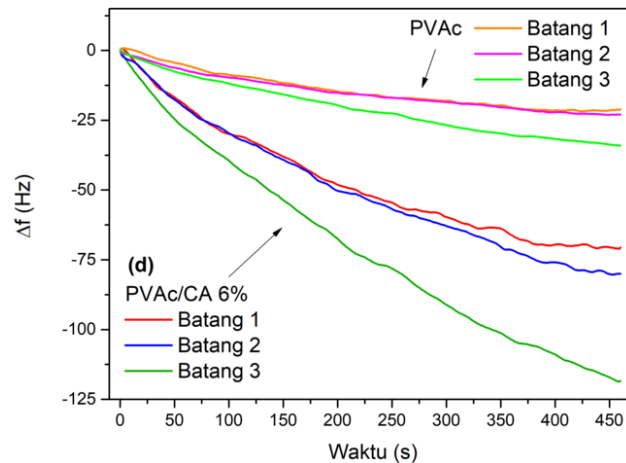
I. Pengamatan pengaruh batang *Spathiphyllum*

Massa dari tiap batang diukur menggunakan timbangan elektronik sebelum dan setelah tiap tahap. Untuk setiap tahap sensor QCM dimasukkan ke ruang asam dan ditunggu hingga responsnya stabil kembali sebelum dilanjutkan ke pengujian tahap berikutnya. Data massa batang dapat dilihat pada Tabel 3 Batang 2 memiliki diameter 3,09 mm dan panjang 9,82 mm.

Tabel 3. Data massa batang

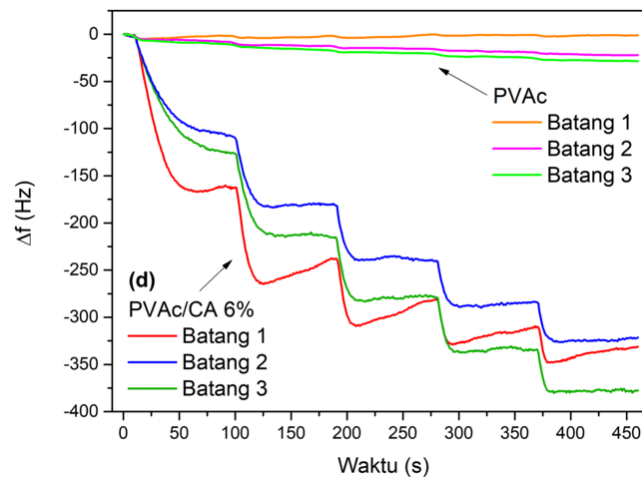
Batang	Massa (mg)								
	Tahap 1			Tahap 2			Tahap 3		
	m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm
Batang 1	32	30	2	28	27	1	27	25	2
Batang 2	97	91	6	90	86	4	83	80	3
Batang 3	200	195	5	193	191	2	189	183	6

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 1 dapat dilihat pada Gambar 15 Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan batang di dalam *sensing chamber*. Batang seperti daun pada pengujian sebelumnya kemungkinan mengeluarkan emisi berupa VOC. VOC tersebut direspon oleh kedua sensor tetapi sensor QCM PVAc/CA memberikan respons yang lebih besar. Nilai respons yang diberikan pada pengujian tahap 1 untuk batang lebih besar dibandingkan nilai respons yang diperoleh pada pengujian tahap 1 terhadap daun.



Gambar 15. Nilai respons sensor pengujian tahap 1 terhadap batang 1

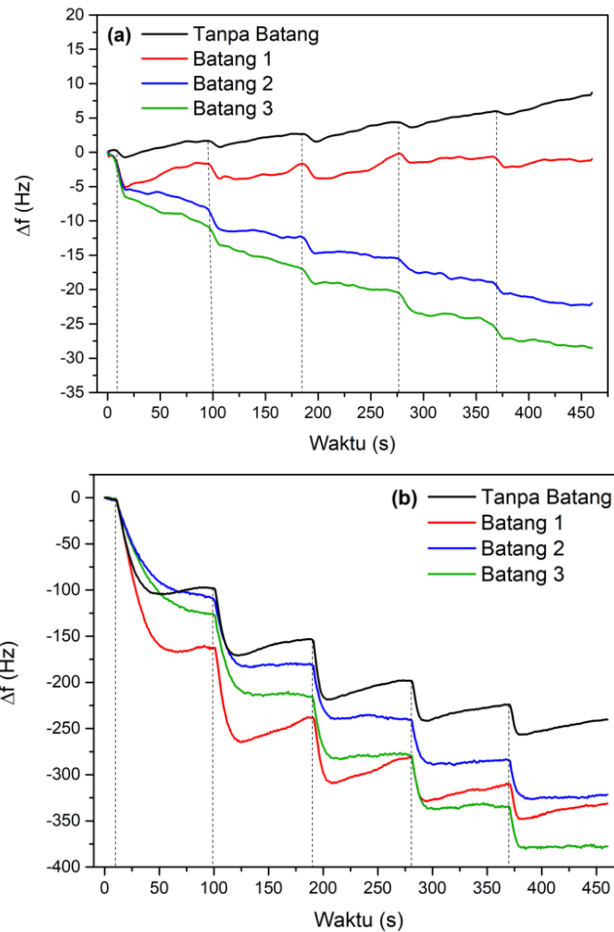
Pengujian batang 3 memberikan nilai respons yang lebih besar dibandingkan pengujian batang 1 dan 2. Massa dari batang 3 sendiri jauh lebih berat dari batang 2 dan 1 meskipun penurunan massa batang 3 lebih rendah dibandingkan batang 2 pada pengujian ini. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh komposisi VOC yang dikeluarkan oleh batang 3 memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan batang 2. Nilai respons yang diperoleh pada pengujian ketiga batang hampir sama meskipun nilai massa dan penurunannya berbeda.



Gambar 16. Nilai respons sensor pengujian tahap 2 terhadap batang

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 2 dapat dilihat pada Gambar 16. Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan batang dan amonia yang diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*. Injeksi amonia dilakukan secara bertahap sama seperti pada pengukuran nilai sensitivitas sensor. Penurunan frekuensi pada sensor QCM

PVAc/CA lebih besar dibandingkan sensor QCM PVAc. Nilai respons yang diberikan pada pengujian tahap 2 untuk batang lebih besar dibandingkan nilai respons yang diperoleh pada pengujian tahap 2 terhadap daun.

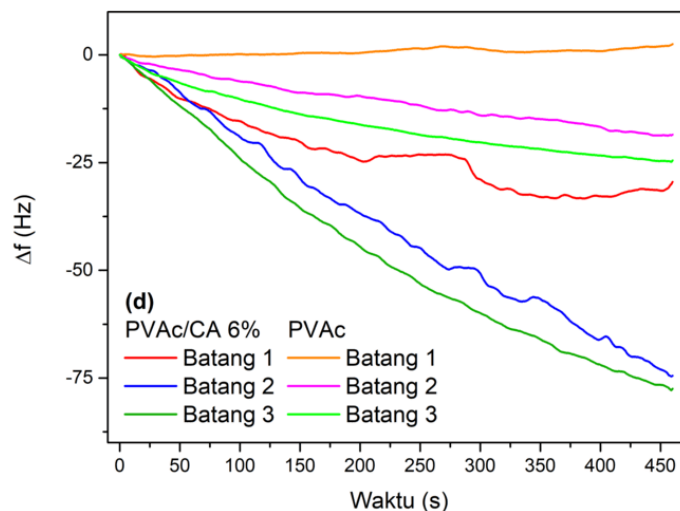


Gambar 17. Perbandingan nilai respons QCM PVAc (a) dan PVAc/CA (b) untuk pengujian tahap 2 pada batang

Perbandingan respons antara QCM PVAc dan PVAc/CA pada tahap pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 17. Pengaruh batang dapat dilihat dengan membandingkan nilai respons sensor dengan dan tanpa kehadiran batang. Nilai respons QCM PVAc/CA yang dihasilkan pada pengujian batang 1 lebih besar dibandingkan pengujian batang 2 dan 3 sampai pada detik ke 280. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh jumlah amonia yang berhasil menguap ketika larutan diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*. Penurunan saat injeksi pertama pada detik ke-10 pengujian batang 1 lebih besar dibandingkan batang 2 dan 3. Pada hasil nilai respons QCM PVAc dapat dilihat bahwa respons paling besar diperoleh pada pengujian batang 3. Hal tersebut sesuai dengan pengujian tahap 1. Kemungkinan

nilai respons pengujian batang 2 dan 3 yang lebih rendah dibandingkan nilai respons batang 1 diakibatkan oleh injeksi amonia yang tidak sempurna. Larutan amonia tidak bisa sepenuhnya keluar dari *syringe* karena volumenya yang sangat kecil. Sementara kandungan VOC yang diemisikan oleh batang 2 dan 3 kemungkinan lebih tinggi dari batang 1 bila dilihat dari respons sensor QCM PVAc yang lebih besar.

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 3 dapat dilihat pada Gambar 18. Pengujian tahap 3 dilakukan tanpa injeksi amonia dan memiliki durasi yang sama dengan pengujian tahap 1. Penurunan frekuensi pada sensor QCM PVAc/CA lebih besar dibandingkan sensor QCM PVAc seperti pada pengujian tahap 1. Dapat diamati bahwa nilai respons yang diberikan batang 3 lebih besar dibandingkan batang 2 dan 1. Respons yang dihasilkan pada pengujian tahap 3 secara garis besar lebih kecil dibandingkan pada tahap 1. Kemungkinan VOC yang diemisikan oleh tiap batang sudah berkurang setelah melalui tahap pengujian sebelumnya.



Gambar 18. Nilai respons sensor pengujian tahap 3 terhadap batang 1

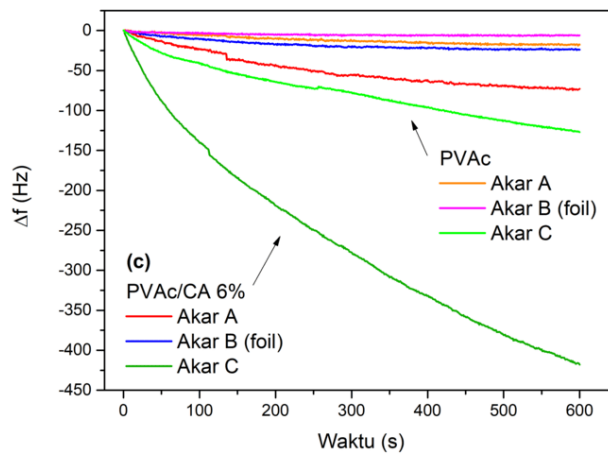
J. Pengamatan pengaruh akar *Spathiphyllum*

Massa dari tiap akar diukur menggunakan timbangan elektronik sebelum dan setelah tiap tahap. Data massa akar dapat dilihat pada Tabel 4 Akar 2 memiliki diameter 2,07 mm dan panjang 28,82 mm. Dua pengamatan juga dilakukan terkait pengaruh penutupan bagian akar dengan *aluminium foil* terhadap nilai respons dan pengujian dengan injeksi amonia menggunakan akar yang sama secara berulang.

Tabel 3. Data massa akar

Akar	Massa (mg)								
	Tahap 1			Tahap 2			Tahap 3		
	m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm	m_0	m_a	Δm
Akar A	41	37	4	-	-	-	-	-	-
Akar B (foil)	71	65	6	-	-	-	-	-	-
Akar C	160	140	20	-	-	-	-	-	-
Akar 1 I1	-	-	-	254	240	14	-	-	-
Akar 1 I2	-	-	-	234	223	11	-	-	-
Akar 1 I3	-	-	-	217	207	10	-	-	-
Akar 2	115	113	2	108	103	5	80	76	4
Akar 3	264	253	11	253	243	10	242	237	5

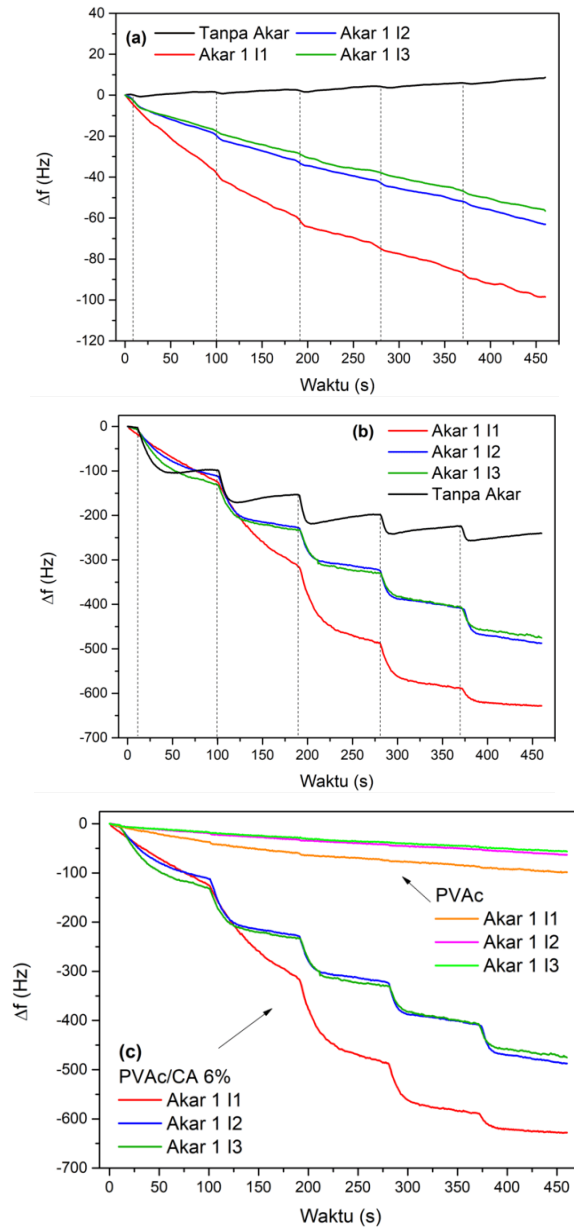
Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA serta perbandingannya untuk pengujian pengaruh *aluminium foil* terhadap nilai respons dapat dilihat pada Gambar 19. Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan akar di dalam *sensing chamber*.



Gambar 19. Nilai respons QCM untuk pengamatan pengaruh *aluminium foil* terhadap akar

Sensor QCM PVAc/CA memberikan respons yang lebih besar bila dibandingkan dengan sensor QCM PVAc seperti pada hasil pengujian daun dan batang. Penutupan kedua ujung akar B menggunakan *aluminium foil* menyebabkan hasil nilai respons yang dihasilkan pada pengujian jauh lebih rendah dibandingkan akar A dan C. Meskipun penurunan massa dari akar B lebih tinggi dibandingkan

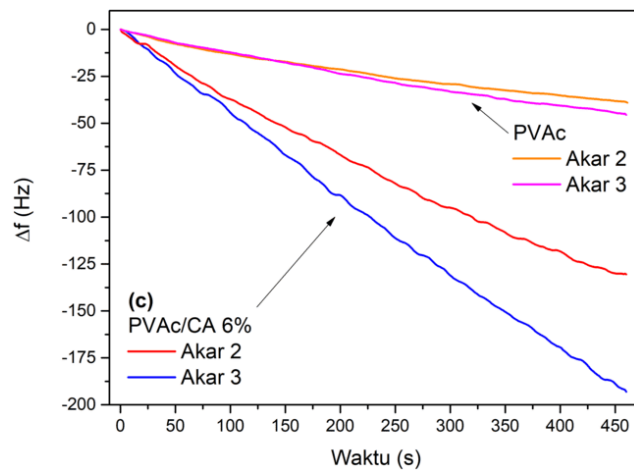
penurunan massa akar A, nilai respons hasil pengujiannya masih lebih rendah. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan oleh penutupan celah pada permukaan akar yang biasa digunakan sebagai saluran pertukaran gas. Akar C memberikan nilai respons yang paling besar sesuai dengan massa dan penurunannya.



Gambar 20. Nilai respons QCM PVAc (a), PVAc/CA (b), dan perbandingannya (c) untuk pengamatan injeksi berulang terhadap akar 1

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA serta perbandingannya untuk pengujian injeksi secara berulang terhadap akar yang sama terhadap nilai respons dapat dilihat pada Gambar 20. Kedua sensor mengalami penurunan

frekuensi resonansi akibat keberadaan akar di dalam *sensing chamber*. Sensor QCM PVAc/CA memberikan respons yang lebih besar bila dibandingkan dengan sensor QCM PVAc seperti pada hasil pengujian daun dan batang. Hasil pengujian pada injeksi pertama memberikan nilai respons yang terbesar sementara injeksi kedua sedikit lebih besar bila dibandingkan dengan injeksi ketiga. Pada injeksi pertama, kandungan VOC pada akar belum berkurang sebelum dilakukan pengujian sehingga respons yang diberikan paling besar. Hal tersebut dapat dilihat dari massa akar dan penurunannya dari tiap injeksi pada Tabel 4 Pengujian injeksi amonia dengan akar memberikan nilai respons yang jauh lebih besar bila dibandingkan pengujian tanpa akar. Nilai respons yang diberikan juga lebih besar bila dibandingkan dengan nilai respons pengujian terhadap daun dan batang.



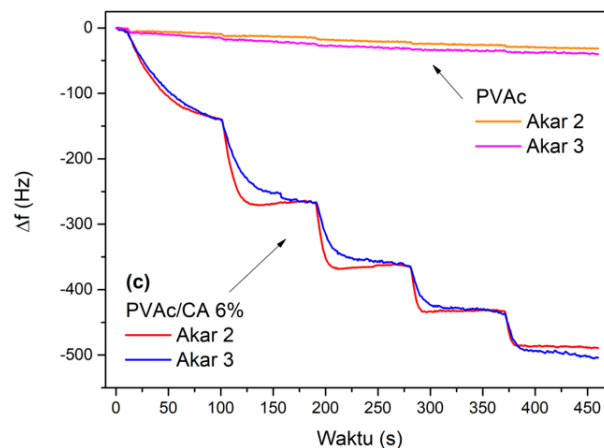
Gambar 21. Nilai respons sensor pengujian tahap 1 terhadap akar 2 dan 3

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan tiga tahap seperti pada pengujian sebelumnya terhadap dua akar yang berbeda. Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 1 dapat dilihat pada Gambar 21 Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan akar di dalam *sensing chamber*. Nilai respons yang diberikan pada pengujian tahap 1 untuk akar lebih besar dibandingkan nilai respons yang diperoleh pada pengujian tahap 1 terhadap daun dan batang. Akar kemungkinan memiliki kandungan VOC yang lebih tinggi dibandingkan kandungan VOC pada daun dan batang. Kedua sensor sama-sama mengalami penurunan frekuensi resonansi, tetapi penurunan frekuensi resonansi yang lebih besar terjadi pada sensor QCM PVAc/CA.

Pengujian akar 3 memberikan nilai respons yang sedikit lebih besar bila

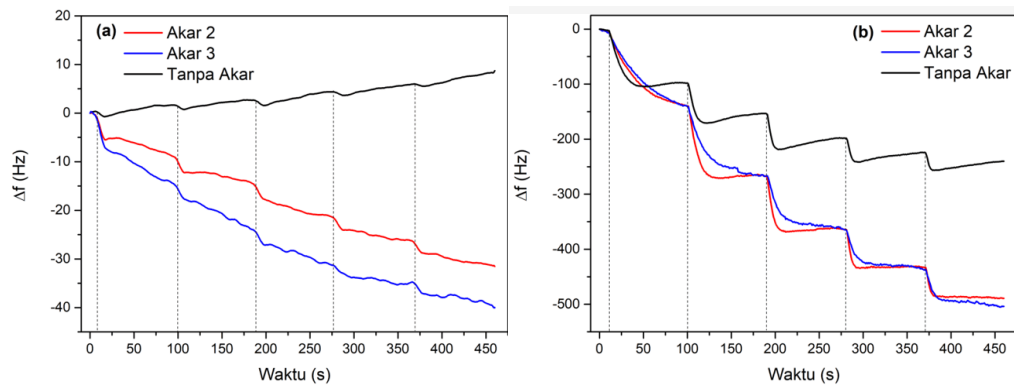
dibandingkan pada pengujian akar 2. Massa dari akar 3 dan penurunannya pada tahap pengujian ini lebih besar dari akar 2. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh komposisi VOC yang dikeluarkan oleh akar 2 memberikan pengaruh yang lebih besar bila dibandingkan akar 3.

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 2 dapat dilihat pada Gambar 22. Kedua sensor mengalami penurunan frekuensi resonansi akibat keberadaan akar dan amonia yang diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*. Injeksi amonia dilakukan secara bertahap sama seperti pada pengukuran nilai sensitivitas sensor. Penurunan frekuensi pada sensor QCM PVAc/CA lebih besar dibandingkan sensor QCM PVAc. Nilai respons yang diberikan pada pengujian tahap 2 untuk akar lebih besar bila dibandingkan nilai respons yang diperoleh pada pengujian tahap 2 terhadap daun dan batang.

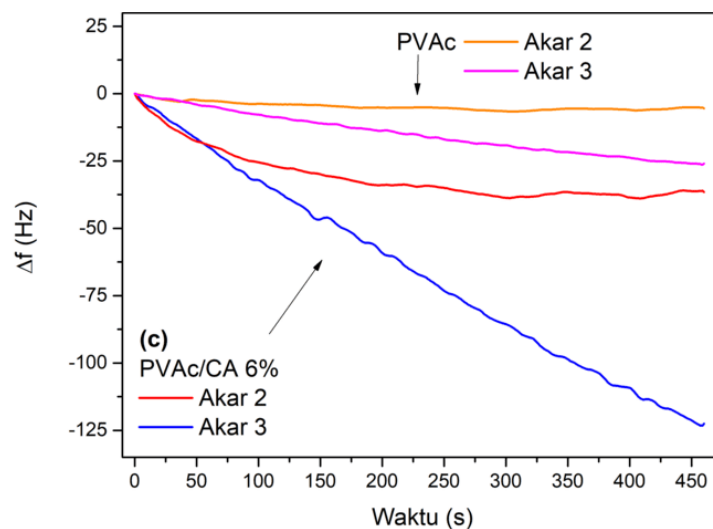


Gambar 22. Nilai respons sensor pengujian tahap 2 terhadap akar 2 dan 3

Perbandingan respons antara QCM PVAc dan PVAc/CA pada tahap pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 23. Pengujian akar 3 memberikan nilai respons yang sedikit lebih besar bila dibandingkan pada pengujian akar 2. Massa dari akar 3 dan penurunannya pada tahap pengujian ini lebih besar dari akar 2. Hal tersebut mungkin dipengaruhi oleh komposisi VOC yang dikeluarkan oleh akar 2 memberikan pengaruh yang lebih besar bila dibandingkan akar 3 dan penguapan yang tidak sempurna dari larutan amonia yang diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*.



Gambar 23. Perbandingan nilai respons QCM PVAc (a) dan PVAc/CA (b) untuk pengujian tahap 2 pada akar



Gambar 24. Nilai respons sensor pengujian tahap 3 terhadap akar 2 dan 3

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA untuk pengujian tahap 3 dapat dilihat pada Gambar 24. Penurunan frekuensi pada sensor QCM PVAc/CA lebih besar dibandingkan sensor QCM PVAc seperti pada pengujian tahap 1. Nilai respons yang dihasilkan pada pengujian tahap 3 lebih rendah dari pengujian tahap 1. Hal tersebut bisa diakibatkan kandungan VOC dari kedua akar yang sudah berkurang setelah melalui dua tahap pengujian sebelumnya. Dapat diamati bahwa nilai respons yang diberikan akar 3 lebih besar bila dibandingkan akar 2. Massa akar 3 dan penurunannya hampir sama dengan akar 2. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan oleh perbedaan komposisi VOC pada kedua akar.

Nilai respons yang diberikan pada pengujian terhadap akar tanaman secara keseluruhan lebih besar bila dibandingkan hasil pengujian terhadap daun dan batang. Hal tersebut bisa diakibatkan oleh fungsi akar yang menyerap zat nutrisi dari tanah dan sebagai tempat penyimpanan makanan untuk tanaman.

K. Perbandingan pengaruh bagian tanaman *Spathiphyllum*

Rata-rata hasil pengujian tanpa injeksi amonia dibandingkan untuk melihat bagian tanaman dengan pengaruh yang paling signifikan pada nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA. Untuk bagian daun dan batang, hasil pengujian yang digunakan adalah hasil pengujian tahap 1. Untuk bagian akar, hasil pengujian yang digunakan adalah pengujian tahap 1 untuk akar 2 dan 3 serta pengujian pengaruh foil untuk akar A dan C. Perbandingan dilakukan terhadap luas dan massa dari bagian tanaman. Batang dan akar diasumsikan silindris dengan massa jenis yang sama. Dimensi dari batang dan akar yang tidak dilakukan pengukuran secara langsung diperoleh dengan menggunakan prinsip kesebandingan antara massa jenis dengan massa bagian tanaman.

Tabel 4. Rata-rata penurunan frekuensi bagian tanaman per satuan luas

Bagian Tanaman	Penurunan Frekuensi Sensor (Hz/cm ²)	
	PVAc	PVAc/CA
Daun	0,68	1,64
Batang	27,38	93,44
Akar	28,69	103,65

Perbandingan rata-rata penurunan frekuensi yang dihasilkan terhadap luas bagian tanaman dapat dilihat pada Tabel 5. Daun memiliki rata-rata penurunan frekuensi per satuan luas paling kecil terhadap nilai respons sensor. Batang dan akar mengakibatkan penurunan frekuensi rata-rata per satuan luas yang jauh lebih besar bila dibandingkan dengan daun. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan kandungan zat yang tersimpan dalam batang dan akar jauh lebih banyak bila dibandingkan dengan daun.

Tabel 5. Rata-rata penurunan frekuensi bagian tanaman per satuan massa

Bagian Tanaman	Penurunan Frekuensi Sensor (Hz/mg)	
	PVAc	PVAc/CA
Daun	0,057	0,136
Batang	0,354	1,207
Akar	0,433	1,565

Perbandingan rata-rata penurunan frekuensi yang dihasilkan terhadap massa bagian tanaman dapat dilihat pada Tabel 3.6. Daun mengakibatkan penurunan frekuensi per satuan massa jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan batang dan akar. Akar mengakibatkan rata-rata penurunan frekuensi per satuan massa yang paling besar meski nilainya tidak jauh berbeda dari batang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa akar *Spathiphyllum* memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap pembacaan sensor QCM PVAc dan PVAc/CA.

L. Pengamatan pengaruh tanaman *Spathiphyllum*

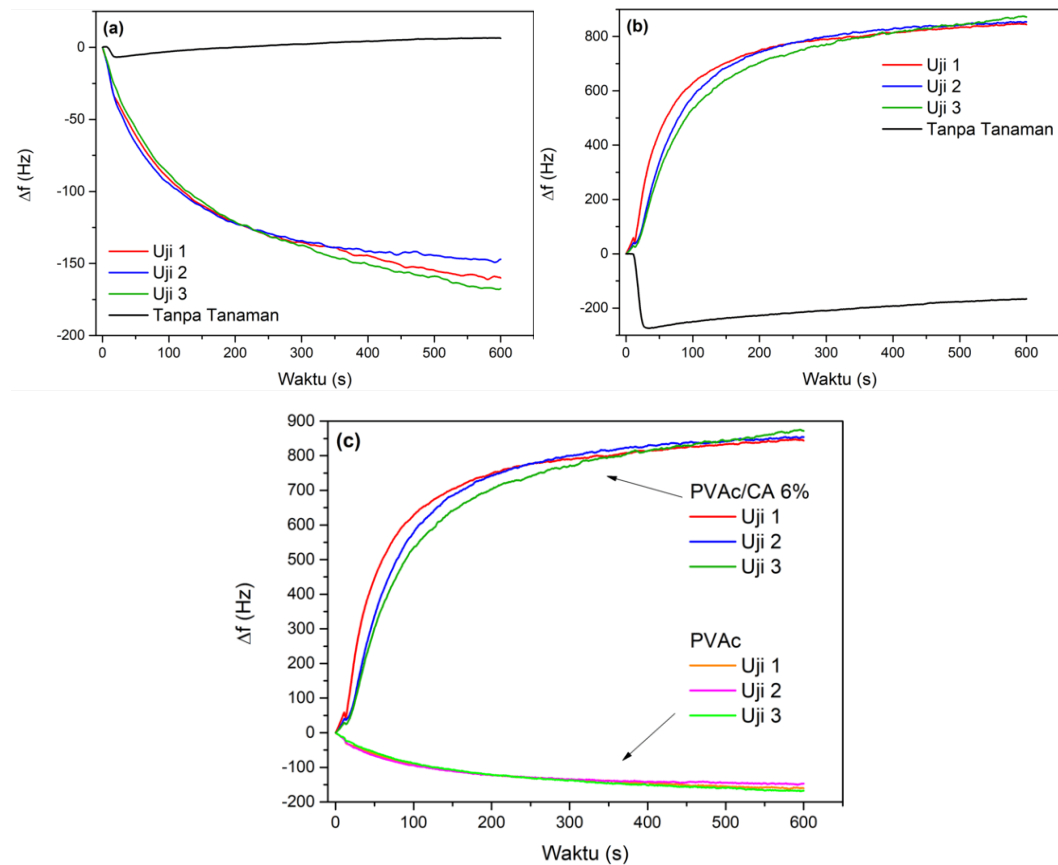
Pengamatan pengaruh tanaman *Spathiphyllum* dilakukan pada dua kondisi yang berbeda. Kondisi yang pertama adalah kondisi tanah terbuka dimana tanah pada pot dibuka sehingga tanah berpengaruh pada nilai respons sensor. Kondisi yang kedua adalah kondisi tanah tertutup dimana tanah pada pot ditutup dengan rapat menggunakan *aluminium foil* sehingga tanah tidak berpengaruh pada nilai respons sensor.

Pada pengujian pengaruh tanaman dilakukan injeksi gas amonia sebesar 50 ppm secara langsung. Hal ini dikarenakan injeksi secara bertahap pada pengujian sebelumnya bisa mempengaruhi nilai respons sensor akibat penguapan yang tidak sempurna karena larutan amonia yang tidak sepenuhnya keluar dari *syringe*. Hasil dari pengujian pengaruh tanaman akan dibandingkan dengan hasil nilai respons sensor ketika diinjeksi gas amonia sebesar 50 ppm. Tanaman *Spathiphyllum* yang digunakan dalam pengamatan ini terdiri atas 7 daun dan batang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25.



Gambar 25. Tanaman *Spathiphyllum*

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA serta perbandingannya untuk pengujian pengaruh tanaman pada kondisi tanah terbuka dapat dilihat pada Gambar 26. Gas amonia sebesar 50 ppm diinjeksikan secara langsung ke dalam *sensing chamber* pada detik ke-10 setelah respons QCM stabil. Dapat dilihat bahwa sensor QCM PVAc terus mengalami penurunan frekuensi resonansi setelah dilakukan injeksi sementara frekuensi resonansi QCM PVAc/CA terus mengalami kenaikan. Sensor QCM PVAc/CA pada pengujian sebelumnya selalu mengalami penurunan frekuensi resonansi ketika dilakukan injeksi amonia ke dalam *sensing chamber*. Kenaikan frekuensi resonansi diakibatkan oleh adanya pengurangan massa pada permukaan sensor.

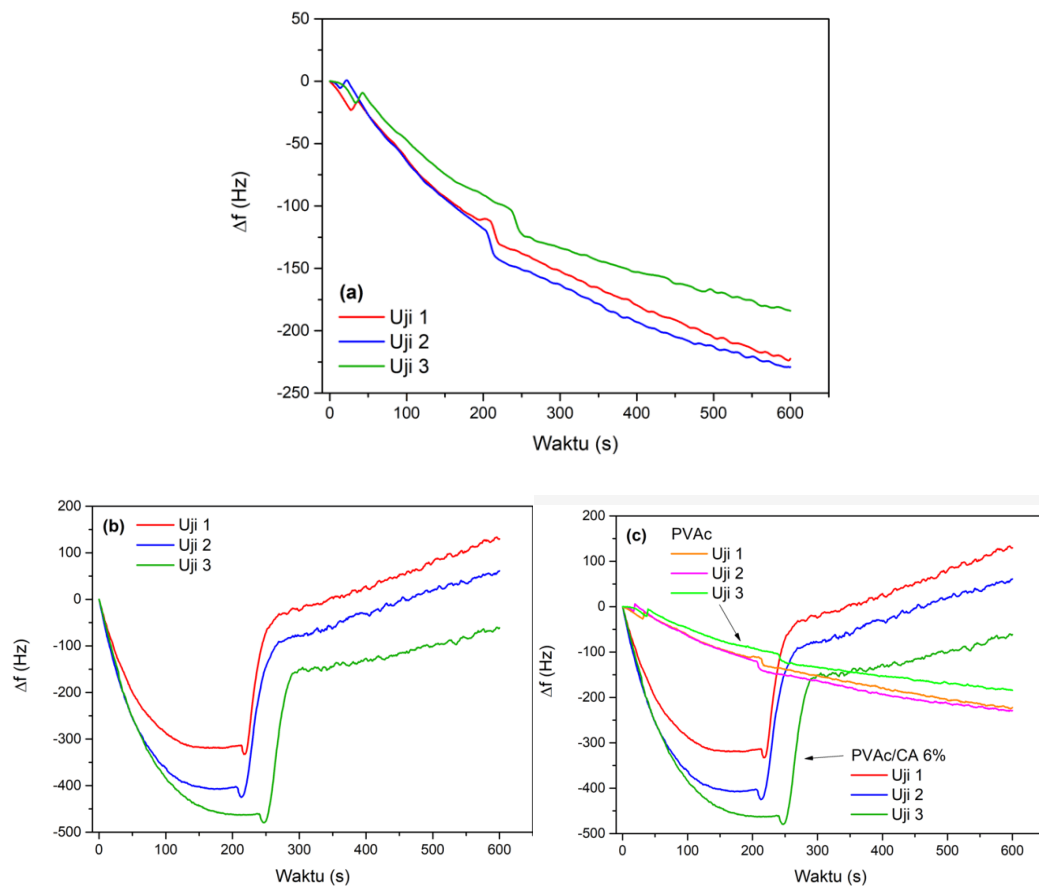


Gambar 26. Nilai respons sensor QCM PVAc (a), PVAc/CA 3 (b), dan perbandingannya (c) pada pengujian tanah terbuka dengan injeksi pada detik ke-10

Pengujian dengan injeksi ketika respons sensor mulai mengalami saturasi dilakukan untuk memastikan efek tanah terhadap nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA. Nilai respons kedua sensor dan perbandingannya untuk pengujian pengaruh tanaman pada kondisi tanah terbuka dengan injeksi pada saat saturasi

dapat dilihat pada Gambar 27. Pada saat amonia diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*, sensor QCM PVAc/CA sempat mengalami penurunan frekuensi resonansi, tetapi frekuensi resonansinya kemudian naik tajam seperti hasil pengujian pada Gambar 26.

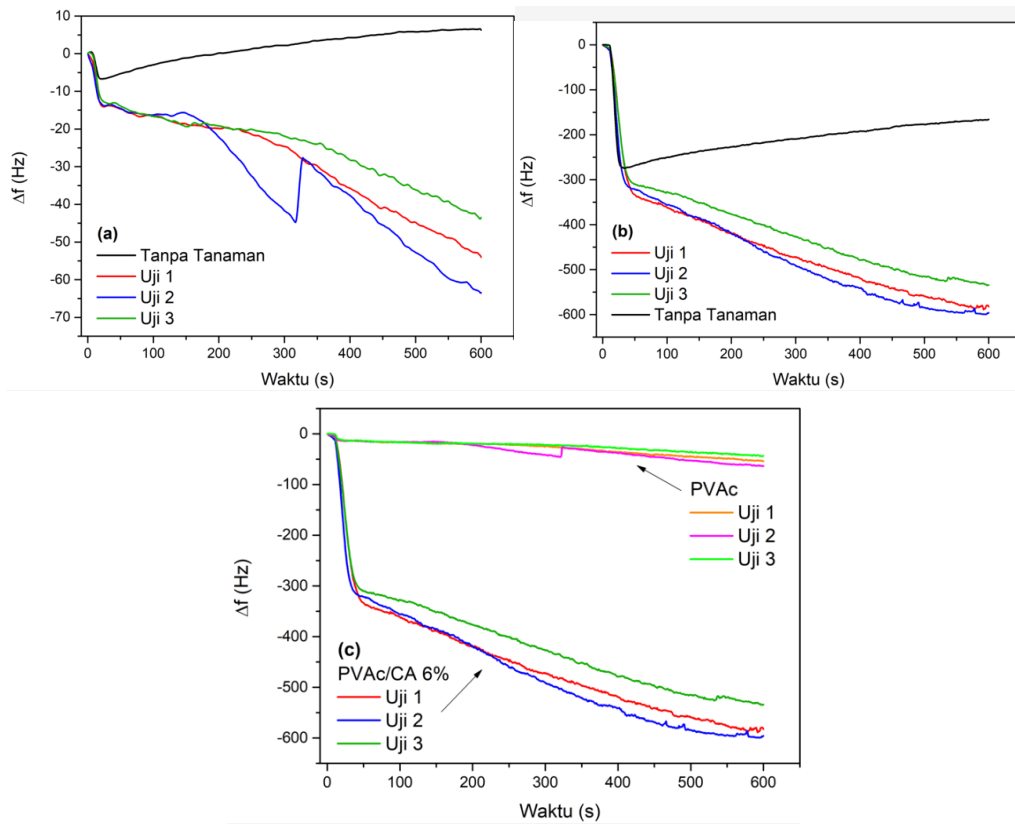
Tanah diduga mengeluarkan VOC yang melekat pada gugus hidroksil pada sensor PVAc/CA yang memiliki ikatan lemah. Pada saat gas amonia menyentuh permukaan sensor, molekul VOC dari tanah yang lebih berat dari molekul tanah kemungkinan melepas ikatannya dengan gugus hidroksil. Molekul amonia kemudian berikatan dengan gugus hidroksil dengan ikatan hidrogen, sehingga perbedaan massa antara VOC dan amonia menyebabkan peningkatan frekuensi resonansi. Hal tersebut tidak terjadi pada sensor QCM PVAc dikarenakan tidak adanya gugus hidroksil pada PVAc.



Gambar 27. Nilai respons sensor QCM PVAc (a), PVAc/CA 3 (b), dan perbandingannya (c) pada pengujian tanah terbuka dengan injeksi pada saat saturasi

Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA serta perbandingannya

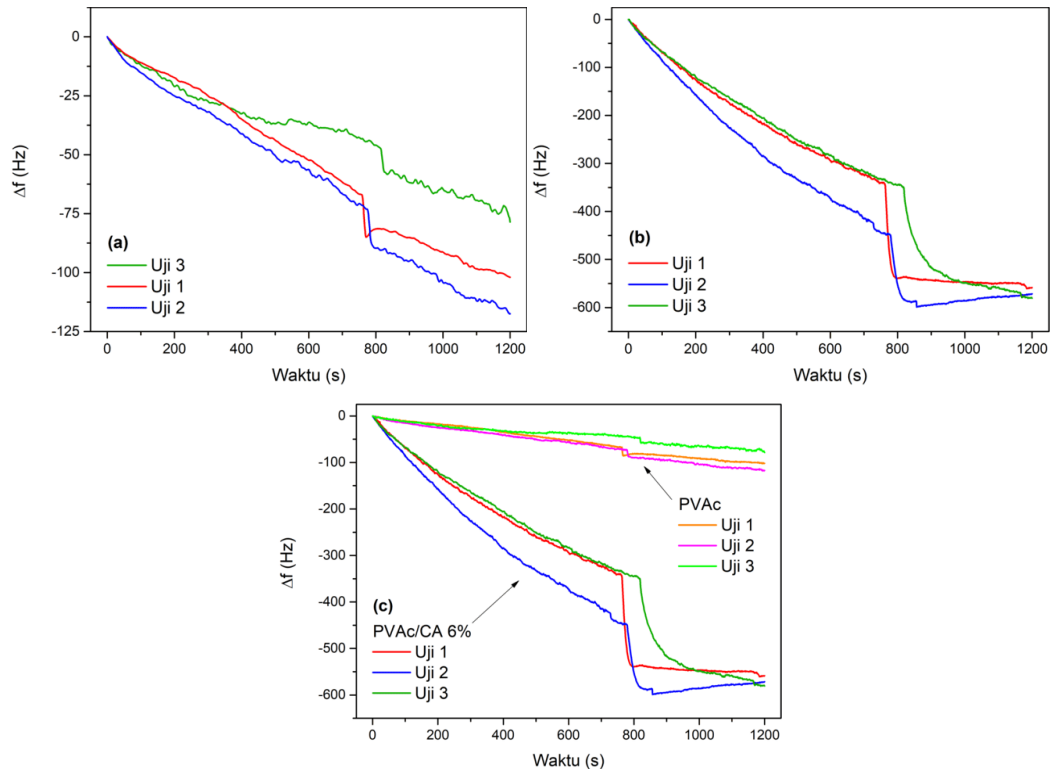
untuk pengujian pengaruh tanaman pada kondisi tanah tertutup dapat dilihat pada Gambar 28. Gas amonia sebesar 50 ppm diinjeksikan secara langsung ke dalam *sensing chamber* pada detik ke-10 setelah respons QCM stabil. Dapat dilihat bahwa kedua sensor terus mengalami penurunan frekuensi resonansi setelah dilakukan injeksi. Peningkatan frekuensi pada sensor QCM PVAc pada pengujian kedua kemungkinan disebabkan oleh getaran dari luar *sensing chamber*. Pada pengujian ini frekuensi resonansi QCM PVAc/CA tidak mengalami kenaikan ketika dilakukan injeksi seperti pada pengujian dengan kondisi tanah terbuka.



Gambar 28. Nilai respons sensor QCM PVAc (a), PVAc/CA 3 (b), dan perbandingannya (c) pada pengujian tanah tertutup dengan injeksi pada detik ke-10

Pengujian dengan injeksi ketika respons sensor mulai mengalami saturasi dilakukan untuk memastikan efek tanah terhadap peningkatan frekuensi resonansi pada sensor QCM PVAc/CA. Nilai respons sensor QCM PVAc dan PVAc/CA serta perbandingannya untuk pengujian pengaruh tanaman pada kondisi tanah terbuka dengan injeksi pada saat saturasi dapat dilihat pada Gambar 29. Pada saat

amonia diinjeksikan ke dalam *sensing chamber*, kedua sensor QCM PVAc/CA tetap mengalami penurunan frekuensi. Respons tersebut berbeda ketika dilakukan pada kondisi tanah terbuka. Sehingga dapat dikatakan bahwa terdapat zat yang diemisikan oleh tanah yang bisa mempengaruhi pembacaan sensor QCM PVAc/CA terhadap amonia.



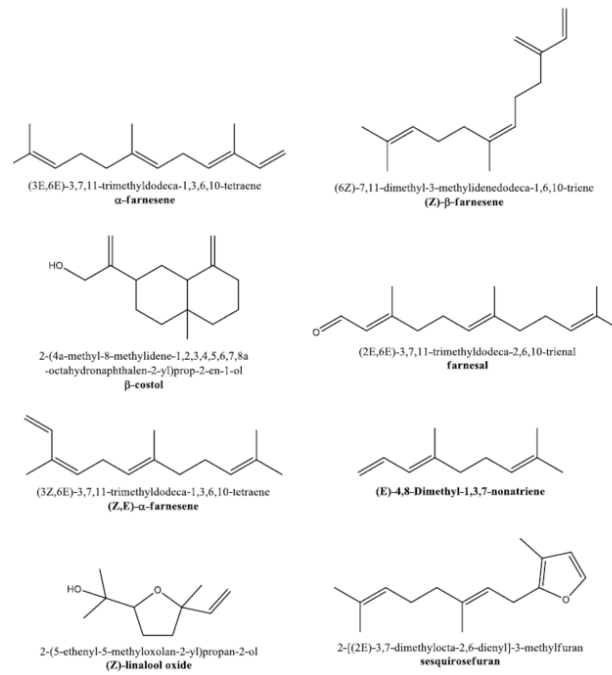
Gambar 29. Nilai respons sensor QCM PVAc (a), PVAc/CA 3 (b), dan perbandingannya (c) pada pengujian tanah tertutup dengan injeksi pada saat saturasi

Nilai respons pada pengujian dengan kondisi tanah tertutup lebih besar dibandingkan pengujian terhadap batang dan daun. Hal tersebut tentunya disebabkan oleh jumlah daun dan batang yang lebih banyak meskipun tidak dilakukan pemotongan yang membuka bagian dalam daun dan batangnya. Akar tidak berkontribusi secara langsung pada pengujian ini dikarenakan tanah yang ditutup rapat dengan menggunakan *aluminium foil*.

M. VOC emisi tanaman *Spathiphyllum*

Tanaman *Spathiphyllum* juga dapat mengemisikan sebanyak 23 jenis VOC dari bagian tanamannya (Roviello *et al.*, 2022). Beberapa VOC yang diemisikan oleh tanaman *Spathiphyllum* dapat dilihat pada Gambar 30. α -farnesene merupakan VOC yang paling banyak diemisikan oleh tanaman *Spathiphyllum*.

Terdapat beberapa VOC yang diemisikan oleh tanaman *Spathiphyllum* yang memiliki gugus hidroksil seperti β -costol dan (*Z*)-linalool oxide. β -costol sendiri dapat membentuk ikatan hidrogen (Roviello *et al.*, 2022). Kemungkinan ikatan hidrogen tersebutlah yang kemungkinan mempengaruhi pembacaan sensor QCM.



Gambar 30. VOC utama yang diemisikan oleh tanaman *Spathiphyllum* (Roviello *et al.*, 2022)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh maka dapat disimpulkan bahwa sensor QCM PVAc dan PVAc/CA memberikan respons berupa penurunan frekuensi terhadap gas yang diemisikan oleh tanaman *Spathiphyllum* dan bagiannya tanpa adanya injeksi amonia. Sensor QCM dengan lapisan PVAc/CA memberikan nilai respons yang lebih besar bila dibandingkan dengan lapisan PVAc. Tanaman *Spathiphyllum* dan bagiannya memberikan pengaruh pada pembacaan kandungan gas amonia menggunakan QCM PVAc/CA akibat emisi berbagai VOC dari bagian tanaman. Penurunan frekuensi per satuan luas diurutkan dari yang terbesar diakibatkan berturut-turut oleh bagian akar, batang, dan daun.

DAFTAR PUSTAKA

- Elfsmark, L., Ågren, L., Akfur, C., Wigenstam, E., Bergström, U., & Jonasson, S. (2019). Comparisons of Acute Inflammatory Responses of Nose-Only Inhalation and Intratracheal Instillation of Ammonia in Rats. *Inhalation Toxicology*, 31(3), 107–118. <https://doi.org/10.1080/08958378.2019.1606367>
- Gong, W., Zhang, Y., Huang, X., & Luan, S. (2013). High-Resolution Measurement of Ammonia Emissions from Fertilization of Vegetable and Rice Crops in the Pearl River Delta Region, China. *Atmospheric Environment*, 65, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.027>
- Hulupi, M., & Haryadi, H. (2019). Synthesis and Characterization of Electrospinning PVA Nanofiber-Crosslinked by Glutaraldehyde. *Materials Today: Proceedings*, 13, 199–204. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.214>
- Jia, Y., Yu, H., Zhang, Y., Dong, F., & Li, Z. (2016). Cellulose Acetate Nanofibers Coated Layer-by-Layer with Polyethylenimine and Graphene Oxide on A Quartz Crystal Microbalance for Use as a Highly Sensitive Ammonia Sensor Yongtang. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 148, 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.09.007>
- Julian, T., Rianjanu, A., Hidayat, S. N., Kusumaatmaja, A., Roto, R., & Triyana, K. (2019). Quartz Crystal Microbalance Coated with PEDOT-PSS/PVA Nanofiber for a High-Performance Humidity Sensor. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 8(2), 243–250. <https://doi.org/10.5194/jsss-8-243-2019>
- Khan, S., Shah, Z. H., Riaz, S., Ahmad, N., Islam, S., Raza, M. A., & Naseem, S. (2020). Antimicrobial Activity of Citric Acid Functionalized Iron Oxide Nanoparticles–Superparamagnetic Effect. *Ceramics International*, 46(8), 10942–10951. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.109>
- Li, X., Xu, J., Jiang, Y., He, Z., Liu, B., Xie, H., Li, H., Li, Z., Wang, Y., & Tai, H. (2020). Toward Agricultural Ammonia Volatilization Monitoring: A Flexible Polyaniline/Ti3C2Tx Hybrid Sensitive Films Based Gas Sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 316 (April). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128144>
- Mikami, Y., Yoneda, H., Tatsukami, Y., Aoki, W., & Ueda, M. (2017). Ammonia Production from Amino Acid-Based Biomass-Like Sources by Engineered Escherichia Coli. In *AMB Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0385-2>
- Min, J., Zhao, X., Shi, W. M., Xing, G. X., & Zhu, Z. L. (2011). Nitrogen Balance and Loss in a Greenhouse Vegetable System in Southeastern China. *Pedosphere*, 21(4), 464–472. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60148-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60148-3)
- Naderi, H., Hajati, S., Ghaedi, M., Dashtian, K., & Sabzehmeidani, M. M. (2020). Sensitive, Selective and Rapid Ammonia-Sensing by Gold Nanoparticle-Sensitized V2O5/Cuwo4 Heterojunctions for Exhaled Breath Analysis. *Applied Surface Science*, 501 (October 2019), 144270. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144270>
- Ni, K., Köster, J. R., Seidel, A., & Pacholski, A. (2015). Field Measurement of Ammonia

- Emissions After Nitrogen Fertilization-A Comparison Between Micrometeorological and Chamber Methods. *European Journal of Agronomy*, 71, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.004>
- Phuoc, P. H., Hung, C. M., van Toan, N., van Duy, N., Hoa, N. D., & van Hieu, N. (2020). One-Step Fabrication of SnO₂ Porous Nanofiber Gas Sensors for Sub-Ppm H₂S Detection. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 303, 111722. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111722>
- Pradeepa, P., Sowmya, G., Edwinraj, S., Fareetha Begum, G., & Ramesh Prabhu, M. (2016). Influence of Al₂O₃ on The Structure and Electrochemical Properties of Pvc / PMMA Based Blend Composite Polymer Electrolytes. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 2187–2196. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.125>
- Roto, R., Rianjanu, A., Rahmawati, A., Fatyadi, I. A., Yulianto, N., Majid, N., Syamsu, I., Wasisto, H. S., & Triyana, K. (2020). Quartz Crystal Microbalances Functionalized with Citric Acid-Doped Polyvinyl Acetate Nanofibers for Ammonia Sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 3(6), 5687–5697. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00896>
- Roviello, V., Scognamiglio, P. L., Caruso, U., Vicidomini, C., & Roviello, G. N. (2022). Evaluating in Silico the Potential Health and Environmental Benefits of Houseplant Volatile Organic Compounds for an Emerging ‘Indoor Forest Bathing’ Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010273>
- Sanaeifar, A., ZakiDizaji, H., Jafari, A., & Guardia, M. de la. (2017). Early Detection of Contamination and Defect in Foodstuffs by Electronic Nose: A Review. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 97, 257–271. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.014>
- Sauerbrey, G. (1959). Verwendung Von Schwingquarzen Zur Wägung Dünner Schichten und Zur Mikrowägung. *Zeitschrift Für Physik*, 155(2), 206–222. <https://doi.org/10.1007/BF01337937>
- Show, P. L., Oladele, K. O., Siew, Q. Y., Aziz Zakry, F. A., Lan, J. C. W., & Ling, T. C. (2015). Overview of Citric Acid Production from *Aspergillus Niger*. *Frontiers In Life Science*, 8(3), 271–283. <https://doi.org/10.1080/21553769.2015.1033653>
- Triyana, K., Rianjanu, A., Nugroho, D. B., As’ari, A. H., Kusumaatmaja, A., Roto, R., Suryana, R., & Wasisto, H. S. (2019). A Highly Sensitive Safrole Sensor Based On Polyvinyl Acetate (Pvac) Nanofiber-Coated QCM. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51851-0>
- Ulaganathan, M., & Rajendran, S. (2010). Preparation and Characterizations Of Pvc/P(Vdf-HFP)-Based Polymer Blend Electrolytes. *Ionics*, 16(6), 515–521. <https://doi.org/10.1007/s11581-009-0415-4>
- Wang, L. (2020). Metal-Organic Frameworks For QCM-Based Gas Sensors: A review. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 307, 111984. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111984>
- Wang, X., Cui, F., Lin, J., Ding, B., Yu, J., & Al-Deyab, S. S. (2012). Functionalized

Nanoporous TiO₂ Fibers on Quartz Crystal Microbalance Platform for Formaldehyde Sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 171–172, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.05.050>

Wei, S., Bai, Z. H., Chadwick, D., Hou, Y., Qin, W., Zhao, Z. Q., Jiang, R. F., & Ma, L. (2018). Greenhouse Gas and Ammonia Emissions and Mitigation Options From Livestock Production In Peri-Urban Agriculture: Beijing – A Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 178, 515–525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.257>