

Efek Waktu Aktivasi Kimia Nano Zeolit-Ammonium Molibdat Sebagai Pengendali Kematangan Buah Pascapanen

The Effect Of Chemical Activation Time Of Nano-Zeolite- Ammonium Molybdate As A Control For Post-Harvest Fruit Ripening

**Vivin Jenika Putri^{1)*}, Anania Rahmah²⁾, Angga Pramana³⁾ Hanifa Ulfa
Azzahro⁴⁾**

¹⁾ Fakultas Pertanian Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 8, Rumbai,
Pekanbaru, Riau, 28265.

²⁾ Fakultas Pertanian Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 8, Rumbai,
Pekanbaru, Riau, 28265.

³⁾ Fakultas Pertanian Universitas Riau, Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru,
Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293.

⁴⁾ Fakultas Pertanian Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 8, Rumbai,
Pekanbaru, Riau, 28265.

* Penulis Korespondensi: E-mail: Vivinjenika@unilak.ac.id

ABSTRACT

Zeolite is a highly porous natural material commonly used as an ethylene absorbent for fruit. However, the ethylene adsorption capacity of nano-sized zeolite still requires further investigation, particularly regarding the chemical activation time. This study aims to determine the optimal chemical activation time for activating nano-absorbents that have previously undergone physical activation. The zeolite was ground using a planetary ball mill, then physically activated via calcination at 400°C for 4 hours. The zeolite was subsequently chemically activated using hydrochloric acid with varying treatment times of 2, 4, 6, 24, and 48 hours. The nano-zeolite was then tested for functional groups, morphology, adsorption rate, and sensitivity to ethylene. The results showed that 24-hour activation of the nano-zeolite yielded the best adsorption results and sensitivity in absorbing ethylene gas. The findings of this study indicate that nano-zeolite can be used to extend the shelf life of post-harvest products and control the ripening of agricultural products.

Keywords: Absorbent; Activation; Nanozeolite; Packaging; Post-harvest;

ABSTRAK

Zeolit merupakan material alam yang berpori tinggi dan biasa digunakan sebagai adsorben etilen pada buah. Namun kemampuan absorpsi etilen pada zeolit yang berukuran nano masih perlu dieksplorasi lebih dalam terutama waktu aktivasi kimia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui waktu aktivasi kimia terbaik dalam mengaktivasi nano adsorben yang telah diaktivasi fisik sebelumnya. Zeolit dihaluskan dengan menggunakan planetary ball milling, kemudian di aktivasi secara fisik menggunakan kalinasi pada suhu 400°C selama 4 jam. Zeolit

selanjutnya di aktivasi menggunakan asam klorida dengan variasi waktu selama 2, 4, 6, 24, dan 48 jam. Nano zeolit selanjutnya di uji gugus fungsi, morfologi, laju penyerapan dan juga sensitivitas terhadap zeolit. Hasil penelitian menunjukkan aktivasi nano zeolit selama 24 jam menunjukkan hasil penyerapan serta sensitivitas terbaik dalam menyerap gas etilen. Kemampuan yang ditemukan pada penelitian ini menunjukkan nano zeolit dapat digunakan untuk mengatur masa simpan produk pasca panen serta pengendali kematangan produk pertanian.

Kata kunci: *Absorben; Aktivasi; Kemasan; Nanozeolit; Pascapanen;*

PENDAHULUAN

Etilen merupakan hormon pematangan yang berbentuk gas memiliki peran penting dalam proses fisiologis buah klimakterik (Huang et al., 2024). Akumulasi etilen selama penyimpanan dan distribusi dapat mempercepat laju respirasi, pelunakan jaringan, serta degradasi kualitas buah, sehingga memperpendek umur simpan. Pengendalian konsentrasi etilen menjadi aspek krusial dalam mempertahankan mutu dan memperpanjang masa simpan produk hortikultura (Mane, 2016). Penyerapan gas etilen secara konvensional dapat menggunakan bahan kimia menggunakan Kalium permanganat (KMnO_4), Perak, tembaga, serta material lain yang memiliki pori seperti carbon dan zeolit (Kassem et al., 2020).

Zeolit memiliki kemampuan sebagai bahan penukar kation, katalis dan absorben (Tran et al., 2019). Kemampuan zeolit sangat tinggi sebagai bahan *absorber* untuk larutan atau gas seperti etilen. Kemampuan ini disebabkan karena zeolit ini memiliki senyawa kristalin aluminosilikat yang mengandung banyak pori dan rongga berskala molekular dengan rentang ukuran dari 3 sampai 15 Å (Wu et al., 2020). Pemanfaatan zeolit sebagai absorber dalam bentuk nano zeolit sangat dimungkinkan dilakukan aktivasi terlebih dahulu baik aktivasi secara fisika dengan pemanasan pada suhu tinggi (Wang & Zou, 2023) dan secara kimia dengan asam atau basa (Khan et al., 2021).

Pengembangan kemampuan zeolit ini ditingkatkan lagi dengan memperkecil ukurannya menjadi nano yang memperluas bidang serap permukaan sehingga meningkatkan daya serap material dan mempersingkat waktu penyerapan (Tirgar et al., 2018). Temuan pada penelitian Widayanti et al. (2016), nano zeolit yang diperoleh dengan metode *planetary ball milling* menghasilkan ukuran 523 nm. Perlakuan terbaik aktivasi fisik nano zeolit ini adalah pemanasan pada suhu 400 °C selama 4 jam dan perendaman dalam KOH pada konsentrasi 1

N selama 48 jam. Dengan perlakuan ini, nano zeolit mampu menyerap etilen sebesar 113 ppm etilen/ g zeolit. Meskipun mampu menyerap etilen dengan baik kemampuan absorben zeolit perlu ditingkatkan dengan penambahan amonium molibdat sebagai indikator warna

Pemanfaatan amonium molibdat sebagai indikator yang dilaporkan Warsiki *et al.* (2018), Iskandar *et al.* (2020), dan Harmaji (2017). indikator dalam bentuk film cenderung mudah rusak akibat uap air dari buah yang dikemas. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengembangkan absorben berbasis nanozeolit dalam bentuk tablet sebagai kemasan aktif dengan memvariasikan waktu aktivasi zeolit. Tujuan pada penelitian ini adalah (i) mendapatkan lama waktu perendaman aktivasi kimia nano zeolit terbaik (ii) mendapatkan laju penyerapan ammonium molibdat dalam nano zeolit yang telah diaktivasi, dan (iii) menganalisis sensitifitas indikator terhadap etilen untuk mengendalikan kematangan pada buah.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Penelitian ini menggunakan zeolit alam bayah yang berasal dari Banten yang berhasil lolos pada ayakan 80 mesh, ammonium molibdat, hidrogen peroksida (H_2O_2), Asam klorida 1N, serta bahan kimia untuk analisa.

Alat yang digunakan adalah *planetary ball-milling*, gas etilen, refraktometer, dan spektrometer UV-vis untuk mengukur konsentrasi terlarut dalam suatu larutan.

Produksi nano zeolit

Zeolit alam bayah sebanyak 50 g diperkecil ukurannya menggunakan *planetary ball milling* dengan kecepatan putar 400 rpm selama 20 menit. Hasil penghalusan selanjutnya dihaluskan dengan menggunakan ayakan 400 mesh untuk menyamakan ukuran.

Aktivasi fisik dan kimia nano zeolite

Bubuk nanozeolit diaktivasi secara fisik dan kimia. Aktivasi fisik dilakukan menggunakan metode kalsinasi pada suhu 400 °C selama 4 jam pada 25 g zeolit yang telah di perkecil ukurannya. Bubuk nano zeolit yang telah diaktivasi fisik di aktivasi kemali secara kimia dengan menggunakan larutan HCl 1 N dengan rasio 10ml/g. Waktu aktivasi kimia dilakukan selama 2, 4, 6, 24, dan 48 jam.

Nano zeolit teraktivasi kemudian dianalisa perubahan struktur kimia dengan menggunakan FTIR. Berdasarkan data FTIR tersebut akan diperoleh lama waktu perendaman yang menjadi waktu aktivasi terbaik. Nanozeolit dengan waktu aktivasi terbaik siap digunakan sebagai matriks penjerap ammonium molibdat.

Pengukuran Laju Penyerapan Ammonium Molibdat Pada Nano Zeolit

Perendaman nano zeolit kedalam larutan ammonium molibdat dilakukan selama 80 menit. Larutan nano zeolit-ammonium molibdat sebanyak 2 mL diambil setiap 5 menit sampai larutan yang tertinggal mencapai konsentrasi konstan dan disimpan pada tabung reaksi untuk selanjutnya siap dilakukan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometri UV-vis dengan panjang gelombang 420 cm^{-1} . Absorpsi ammonium molibdat yang terserap oleh nano zeolit adalah selisih dari konsentrasi larutan awal dikurangi dengan konsentrasi pada titik pengamatan. Dari data yang diperoleh selanjutnya akan disusun model absorpsi nano zeolit-ammonium molibdat serta menghitung jumlah ammonium terserap. Kinetika absorpsi menggunakan *pseudo first order* dan *pseudo second order* (Widayanti 2016) yaitu:

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

q_e dan q_t merupakan jumlah ammonium molibdat yang terabsorb (mg/g) saat kesetimbangan dan waktu ke- t (menit). Nilai k_1 merupakan laju konstan proses absorpsi (menit^{-1}) ordo 1 yang diperoleh dari plot $\log (q_e - q_t)$ dengan waktu (t) impregnasi. Jika q_e hasil observasi dengan q_e perhitungan memiliki nilai yang hampir sama maka laju absorpsi yang terjadi adalah *pseudo-first-order* (Ho & McKay 1999). Namun, jika nilai keduanya sangat berbeda, perlu dilakukan analisa *pseudo-second-order*. Model persamaan kinetik *pseudo-second-order* yang digunakan meliputi:

$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

k_2 merupakan laju konstan proses absorpsi ordo 2. Jika model *pseudo-second-order* diterima, maka plot yang digunakan merupakan plot antara t/q_t dengan waktu (menit) yang menunjukkan hubungan linear. Dari hasil data laju penyerapan akan diperoleh nano zeolit dengan kapasitas penyerapan molibdat maksimum. Selanjutnya nano zeolit-ammonium molibdat tersebut digunakan untuk eksperimen selanjutnya.

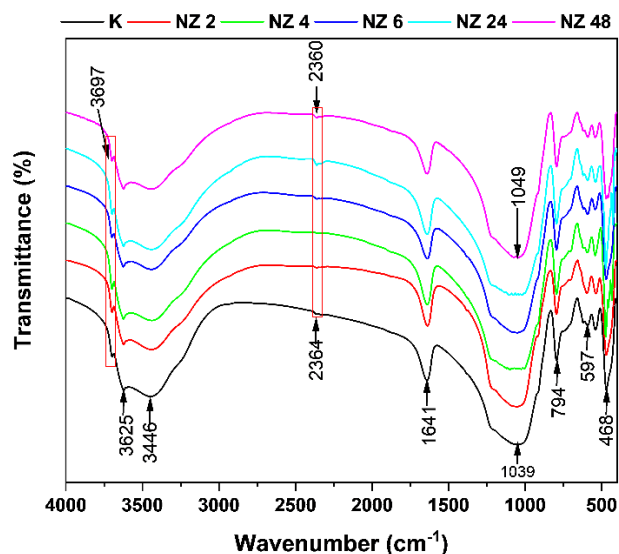
Sensitifitas Etilen Nano Zeolit-Amonium Molibdat

Sensitifitas etilen perlu dilakukan untuk mengetahui kinerja nano zeolit-ammonium molibdat terhadap etilen yang ditunjukkan dengan perubahan warna. Serbuk nano zeolit-ammonium molibdat yang telah kering dicetak berbentuk tablet dan dikemas dalam plastik LDPE secara *vacum*. Pengujian dilakukan dengan meletakkan tablet indikator kematangan dalam wadah kaca, kemudian menginjeksi gas etilen menggunakan *Tight Syringe* sehingga konsentrasi dalam wadah kaca mencapai 100, 200, 300, 400 dan 500 ppm dengan volume wadah kaca 500 mL. Kemudian wadah kaca berisi tablet indikator disimpan selama 10 hari dan perubahan warna tablet diamati dan diukur dengan menggunakan *chromameter*. Pengukuran dilakukan setiap 2 jam mulai dari jam ke-0 hingga jam ke 246 dengan dua kali ulangan. Perubahan warna label indikator selama penyimpanan karena pengaruh gas etilen direpresentasikan sebagai nilai °hue.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gugus Fungsi Nano Zeolit Teraktivasi

Aktivasi kimia nano zeolit dengan cara perendaman dalam larutan HCL 1N bertujuan untuk meningkatkan kapasitas serap nano zeolit terhadap larutan ammonium molibdat yang bersifat non polar. Dalam proses aktivasi kimia dapat dilihat secara visual yaitu terjadinya proses pelarutan oksida pengotor, dilihat berdasarkan perubahan warna larutan pada saat proses berlangsung yang awalnya bening menjadi larutan kuning. Hasil aktivasi kimia yang sudah dikalsinasi selanjutnya di analisis menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) seperti dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Spektrum FTIR nano zeolit kontrol (K), 2 jam (NZ2), 4 jam (NZ4), 6 jam (NZ6), 24 jam (NZ24) dan 48 jam (NZ48)

Spektrum FTIR nano zeolit kontrol dan teraktivasi menunjukkan puncak lebar pada 3446 cm^{-1} , 3625 cm^{-1} , 3697 cm^{-1} berkaitan dengan adanya vibrasi OH karena terlihat tajam. Gugus OH pada Nano zeolit terlihat semakin tajam yang mengindikasikan semakin tingginya intensitas OH pada nanozeolit seiring dengan semakin lamanya proses aktivasi yang dilakukan (Azizi-Lalabadi et al., 2019; Tanirbergenova et al., 2025). Laporan oleh Onutai et al. (2023) menunjukkan serapan terjadi pada bilangan gelombang 3841 cm^{-1} , 3448.5 cm^{-1} , 3822.7 cm^{-1} , 3807.2 cm^{-1} (gugus OH). Spektrum FTIR zeolit menunjukkan puncak pada zeolit teraktivasi 24 jam 3698.21 cm^{-1} berkaitan dengan adanya vibrasi OH terlihat tajam.

Perubahan intensitas spektrum FTIR juga ditunjukkan pada rentang gelombang $2360\text{--}2364\text{ cm}^{-1}$. peningkatan intensitas spektral berkaitan dengan Luas permukaan yang semakin besar sehingga berpotensi untuk mengabsorpsi komponen kimia lainnya. Serapan gelombang intensitas pada spektrum 3697 cm^{-1} dan 2360 cm^{-1} yang tinggi akan menghasilkan kapasitas absorpsi yang lebih tinggi karena bebasnya gugus OH pada ikatan nano zeolit dan meningkatnya fraksi amorf (Dawoud et al., 2023).

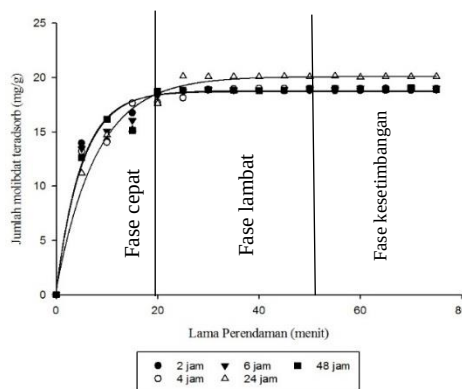
Laju penyerapan ammonium molibdat oleh nano zeolit

Penyerapan ammonium molibdat oleh nano zeolit diukur menggunakan nilai spektrofotometri UV-Vis. Pengamatan dilakukan terhadap absorbansi larutan ammonium molibdat sisa dengan interval waktu 5 menit. Proses absorpsi amonium

molibdat dalam nano zeolit mengalami tiga fase yaitu fase cepat (*fast phase of adsorption*), fase lambat dan fase kesetimbangan. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa pada fase cepat absorpsi mengalami peningkatan penyerapan ammonium yang sangat tinggi dari menit ke 0 sampai menit ke 10, kemudian melambat pada menit ke 10 sampai menit ke 25, dan selanjutnya mencapai fase kesetimbangan pada menit ke- 25 sampai menit ke- 70. Tabel 1 menunjukkan laju penyerapan ammonium molibdat oleh nano zeolit terjadi pada aktivasi 24 jam dengan nilai laju penyerapan sebesar 0.1261. Hal ini menunjukkan semakin kecil nilai laju penyerapan ammonium molibdat oleh nano zeolit maka kapasitas ammonium molibdat dalam nano zeolit semakin banyak.

Tabel 1. Laju penyerapan ammonium molibdat

Lama Aktivasi (jam)	Laju Penyerapan (g/menit)
2	0.2027
4	0.1845
6	0.1961
24	0.1261
48	0.1913



Gambar 2 Pola penyerapan nano zeolit teraktivasi

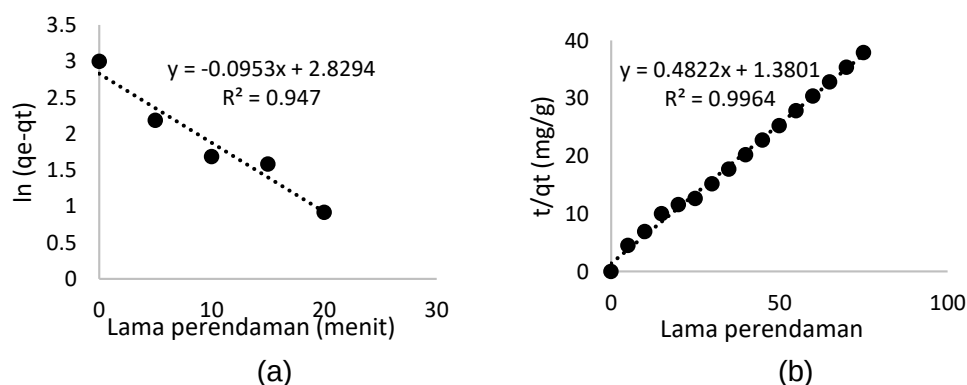
Jumlah ammonium molibdat terserap lebih banyak pada nano zeolit aktivasi 24 jam dari pada perlakuan lainnya, hal ini diduga karena aktivasi selama 24 jam menghasilkan gugus OH bebas dan fraksi amorf yang tinggi sehingga kapasitas serap semakin baik. Hasil analisa menunjukkan interval waktu 25 menit nano zeolit dapat menyerap ammonium molibdat sebanyak 20.11 (mg ammonium molibdat/g nano zeolit). Dengan demikian jumlah ammonium molibdat teradsorb pada setiap menit sebanyak 0.8044 mg/menit. Waktu perendaman 25 menit terlihat sebagai waktu kesetimbangan dan merupakan waktu optimum perendaman nano zeolit

dalam larutan ammonium molibdat. Hal ini sesuai dengan pernyataan Babakhani Samani et al. (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan berat dalam mol yang dimiliki oleh suatu larutan akan menyebabkan terjadinya peningkatan kapasitas absorpsi yang dihasilkan oleh material absorber yang digunakan. Jumlah ammonium molibdat terabsorb dalam nano zeolit 24 jam dianalisa menggunakan model kinetika *pseudo first order* dan *pseudo second order* seperti terlihat pada persamaan 1 dan 2. Data jumlah ammonium molibdat terabsorb dalam nano zeolit dapat digunakan untuk mengetahui mekanisme proses absorpsi yang terjadi dan memprediksi laju absorpsi dari proses tersebut (Chung et al., 2022).

Dari data perhitungan kinetika absorpsi *pseudo first order* pada (Tabel 2) terlihat nilai q_e perhitungan (q_{e-cal}) berbeda cukup signifikan dari pada nilai q_e penelitian (q_{e-ob}). Kondisi ini menggambarkan bahwa proses absorpsi yang terjadi kurang sesuai dengan model kinetika *pseudo first order*. Hal ini terlihat juga dari nilai koefisien R^2 yang lebih rendah yaitu 0.947 dibandingkan dengan perhitungan dari model *pseudo second order* seperti (persamaan 2) sebesar 0.9964. Plot grafik model kinetika *pseudo first order* dan *pseudo second order* dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 2 Hasil perhitungan *pseudo first order* dan *Pseudo second order*

<i>Pseudo-Frist-Order</i>				<i>Pseudo-Second-Order</i>		
q_{e-ob} (mg/g)	q_{e-cal} (mg/g)	K_1	R^2	q_{e-cal} (mg/g)	K_2	R^2
20.11	18.44	2.705	0.947	20.73	0.00079	0.9964

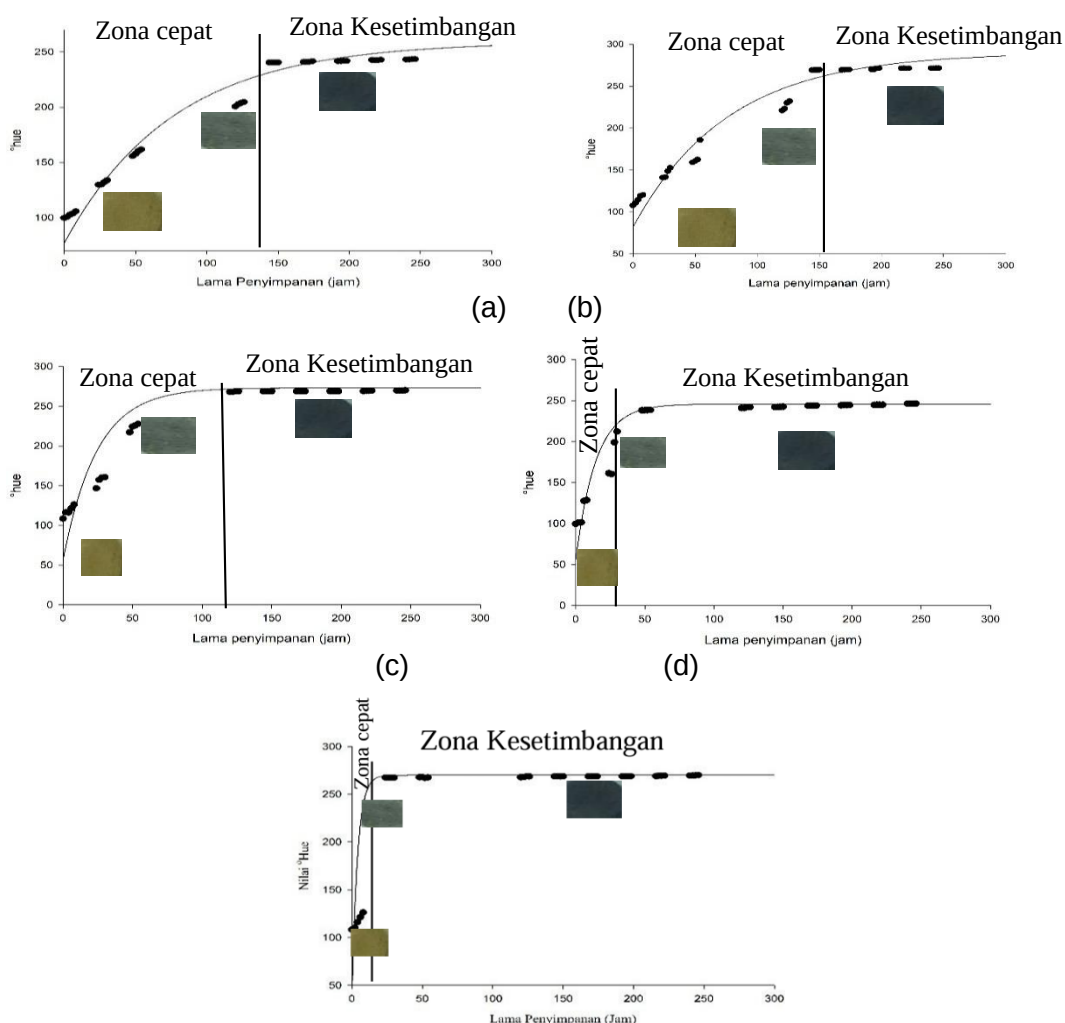
Gambar 3 (a) Plot model *pseudo first order* (b) Plot model *pseudo second order*

Hasil perhitungan kinetika *pseudo second order* pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai q_e perhitungan (q_{e-cal}) dengan nilai q_e penelitian (q_{e-ob}) lebih mendekati kondisi aktual dari proses absorpsi yang terjadi. Hal ini dilihat dari nilai koefisien korelasi

yang lebih tinggi dibandingkan dengan koefisien korelasi model kinetika *pseudo first order*. Dengan demikian proses penyerapan ammonium molibdat ke dalam nano zeolit dapat mengikuti model kinetika *pseudo second order*.

Sensitifitas Tablet Indikator Terhadap Gas Etilen

Sensitifitas tablet indikator terhadap gas etilen bertujuan untuk melihat kinerja indikator terhadap adanya gas etilen. Perubahan warna indikator dilihat dalam nilai °hue, dari hasil terbaik nano zeolit teraktivasi 24 jam dan perendaman ammonium molibdat 25 menit. Sensitifitas tablet indikator terhadap etilen dan perubahan warna yang terjadi di plot pada Gambar 4 selama penyimpanan 246 jam dengan menggunakan beberapa konsentrasi gas etilen, yaitu 100, 200, 300, 400 dan 500 ppm. Laju Perubahan warna tablet indikator lebih lanjut dapat dilihat pada Tabel 3, semakin tinggi konsentrasi etilen maka laju perubahan warna semakin meningkat.



(e)
Gambar 4 Grafik Perubahan nilai °Hue (a) 100ppm (b) 200ppm (c) 300ppm (d) 400ppm
(e) 500ppm

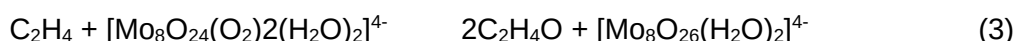
Tabel 3 Laju perubahan warna	
Konsentrasi Etilen (ppm)	Laju Perubahan Warna (°Hue/jam)
100	0.0130
200	0.0131
300	0.0413
400	0.0692
500	0.2531

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi gas etilen maka indikator akan semakin cepat mengalami perubahan warna, hal ini dilihat dari tingginya nilai °hue yang dicapai dan nilai laju perubahan warna yang meningkat seiring tingginya konsentasi gas etilen. Grafik juga menunjukkan bahwa seluruh indikator dengan perlakuan berbagai konsentrasi gas etilen memiliki zona cepat dan zona kesetimbangan. Zona cepat merupakan zona yang terjadi kenaikan nilai °hue selama rentang waktu tertentu dan zona kesetimbangan merupakan zona dimana label tidak mengalami lagi kenaikan nilai °hue. Pada konsentrasi gas etilen 100 ppm waktu puncak pada zona cepat terjadi pada jam ke-144, konsentrasi 200 ppm terjadi pada jam ke-144, konsentrasi 300 ppm terjadi pada jam ke-120, konsentrasi 400 ppm terjadi pada jam ke-48, dan konsentrasi 500 ppm terjadi pada jam ke-24. Dari data sensitifitas tablet terhadap beberapa konsentrasi etilen diketahui warna tablet indikator berubah seiring meningkatnya konsentrasi gas etilen dan perubahan warna tablet dapat dilihat pada Gambar 5.

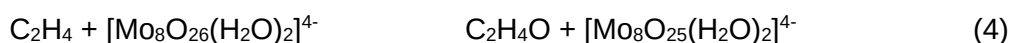


Gambar 5 (a) Tablet indikator kontrol (b) Tablet indikator terpapar gas etilen

Warna tablet indikator nano zeolit-ammonium molibdat yang belum terpapar gas etilen adalah warna kuning, sedangkan tablet indikator yang sudah terpapar gas etilen berwarna biru. Reaksi oksidasi etilen oleh molibdenum berperan dalam perubahan warna indikator tersebut. Menurut Warsiki et al., (2020) pencampuran ammonium molibdat dalam H_2O_2 akan menghasilkan peroximolibdat, selanjutnya peroximolibdat ini akan terdekomposisi setelah terkena etilen, dapat dilihat pada (persamaan 3).



Kemudian dilanjutkan dengan *partial reduction* dari molibdenum (VI) yang menghasilkan warna biru. Reaksi *partial reduction* dari molibdenum (VI) dapat dilihat pada Persamaan 4.



Reaksi reduksi pada molibdenum ini menghasilkan perubahan warna biru pada tablet saat terpapar gas etilen. Berdasarkan hasil penelitian ini, tablet indikator sensitif etilen dapat digunakan sebagai media informasi tingkat kematangan buah klimaterik.

Penyerapan gas etilen dari lingkungan penyimpanan mengurangi konsentrasi etilen di sekitar buah, sehingga memperlambat proses pematangan (Karuniasari & Purbasari, 2022; Wang & Zou, 2023). Kemampuan penyerapan etilen pada penelitian ini dapat mengatur kematangan buah selama proses penyimpanan karena mampu menyerap dan memperangkap etilen pada tabel nano zeolit pada tbuah klimaterik. Selain itu terjadinya perubahan warna pada tablet membantu konsumen hingga penjual mengetahui kondisi kematangan buah klimaterik tersebut (Pelegriani et al., 2021). Hal ini menunjukkan tablet nanozeolite berpotensi sebagai kemasan aktif dan cerdas jika di kombinasikan dengan ammonium molibdat, meskipun perlu kajian lebih menyeluruh terkait proses pengecilan ukuran zeolit.

KESIMPULAN

Aktivasi kimia nanozeolit selama 24 jam meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap ammonium molibdat melalui peningkatan jumlah situs aktif dan afinitas permukaan. Proses adsorpsi berlangsung dengan laju 0,8044 mg/menit dan

mengikuti model kinetika pseudo orde dua, yang menunjukkan dominasi mekanisme kemisorpsi. Pengaplikasian nanozeolit sebagai kemasan aktif berbentuk tablet, material ini menunjukkan sensitivitas yang baik terhadap etilen, ditandai dengan perubahan warna indikator yang semakin cepat seiring peningkatan konsentrasi gas. Temuan ini menegaskan potensi nanozeolit teraktivasi sebagai material fungsional untuk sistem kemasan aktif berbasis indikator dalam memantau kualitas produk.

DAFTAR PUSTAKA

- Azizi-Lalabadi, M., Ehsani, A., Alizadeh-Sani, M., Khezerlou, A., Mirzanajafi-Zanjani, M., Divband, B., Zolfaghari, H., & Bagheri, V. (2019). Nanoparticles and zeolites: Antibacterial effects and their mechanism against pathogens. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 20(13), 1074–1086. <https://doi.org/10.2174/1573397115666190708120040>
- Babakhani Samani, M. H., Toghraie, D., Mehmandoust, B., Niknejadi, M., & Fazilati, M. A. (2024). Investigating the effect of absorbent material and heat flux in natural gas sweetening process using molecular dynamics simulation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61(August), 105081. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105081>
- Chung, K., Park, D., Kim, K. M., & Lee, C. H. (2022). Adsorption equilibria and kinetics of ethane and ethylene on zeolite 13X pellets. *Microporous and Mesoporous Materials*, 343(June), 112199. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2022.112199>
- Dawoud, M. M. A., Hegazi, M. M., Saleh, H. M., & El Helew, W. K. (2023). Removal of stable and radio isotopes from wastewater by using modified microcrystalline cellulose based on Taguchi L16. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 20(2), 1289–1300. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04073-3>
- DD, H. (2017). *Label cerdas pendeteksi kematangan buah klimaterik berbahan PVA (polivinil alkohol)*. IPB University.
- Huang, W., Tan, C., & Guo, H. (2024). Ethylene in fruits: beyond ripening control. *Horticulture Research*, 11(10). <https://doi.org/10.1093/hr/uhae229>
- Iskandar, A., Yuliasih, I., & Warsiki, E. (2020). Performance Improvement of Fruit Ripeness Smart Label Based On Ammonium Molibdat Color Indicators. *Indonesian Food Science and Technology Journal*, 3(2), 48–57. <https://doi.org/10.22437/iftj.v3i2.10178>
- Karuniasari, D., & Purbasari, D. (2022). Phisycal Quality Analysis of Red Guava (*Psidium guajava* L.) Using Edible Coating of Carrageenan and Glycerol. *Protech Biosystems Journal*, 2(1), 14. <https://doi.org/10.31764/protech.v2i1.9476>
- Kassem, I., Kassab, Z., Khoulood, M., Sehaqui, H., Bouhfid, R., Jacquemin, J., Qaiss, A. E. K., & El Achaby, M. (2020). Phosphoric acid-mediated green preparation of regenerated cellulose spheres and their use for all-cellulose cross-linked superabsorbent hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.136>

- Khan, M. Z. H., Islam, M. R., Nahar, N., Al-mamun, M. R., Khan, M. A. S., & Matin, M. A. (2021). Synthesis and characterization of nanozeolite based composite fertilizer for sustainable release and use efficiency of nutrients. *Heliyon*, 7(1), e06091. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06091>
- Mane, K. A. (2016). A Review on Active Packaging: An Innovation in Food Packaging. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(3), 544–549. <https://doi.org/10.22161/ijeab/1.3.34>
- Onutai, S., Sato, J., & Osugi, T. (2023). Possible pathway of zeolite formation through alkali activation chemistry of metakaolin for geopolymer–zeolite composite materials: ATR-FTIR study. *Journal of Solid State Chemistry*, 319(December 2022), 123808. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123808>
- Pelegri, B. L., Fernandes, F. M. B., Fernandes, T., de Oliveira, J. H., Rosseto, H. C., Junior, A. G. O., Reis, A. V., Castalani, E. V., Sobral, F. N. C., Shirabayashi, W. V. I., Benyahia, L., Chassenieux, C., & de Souza Lima, M. M. (2021). Novel green strategy to improve the hydrophobicity of cellulose nanocrystals and the interfacial elasticity of Pickering emulsions. *Cellulose*, 28(10), 6201–6238. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03904-9>
- Tanirbergenova, S., Tugelbayeva, D., Zhylybayeva, N., Aitugan, A., Tazhu, K., Moldazhanova, G., & Mansurov, Z. (2025). Effect of Acid Treatment on the Structure of Natural Zeolite from the Shankhanai Deposit. *Processes*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/pr13092896>
- Tirgar, A., Han, D., & Steckl, A. J. (2018). Absorption of Ethylene on Membranes Containing Potassium Permanganate Loaded into Alumina-Nanoparticle-Incorporated Alumina/Carbon Nanofibers [Research-article]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(22), 5635–5643. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05037>
- Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K., & Lee, S. S. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B*, 165(December 2018), 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084>
- Wang, X., & Zou, H. (2023). *Effect of Thermal Activation Temperature of Nanoscale Phosphate and Silicate on the Morphological Transformation Characteristics of Cd in Heavy Metal Contaminated Soils*. May 2020.
- Warsiki, E., Iskandar, A., & Ghiyas, H. M. (2020). Theoretical calculation and experimental validation of ammonium molybdate concentration for fruit ripeness indicator label. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 472(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/472/1/012017>
- Warsiki, E., & Rofifah, N. (2018). Dragon fruit freshness detector based on methyl red colour indicator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 209(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012016>
- Widayanti, S. M., Syamsu, K., Warsiki, E., & Yuliani, S. (2016). *Effect of natural Bayah zeolite particle size reduction to physico-chemical properties and absorption against potassium permanganate (KMnO₄)*. 030029. <https://doi.org/10.1063/1.4941495>
- Wu, Z., Liu, J., Chen, J., Pirzadeh, S. A., Li, Y., Cai, H., & Liu, G. (2020). Effects of fermentation on standardized ileal digestibility of amino acids and apparent metabolizable energy in rapeseed meal fed to broiler chickens. *Animals*, 10(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ani10101774>

a.