

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Karakteristik Struktural

1.1.1 Densitas Hidrogel

Massa jenis yang tepat memainkan peran penting dalam menentukan kekuatan dan elastisitas hidrogel. Hidrogel yang terlalu padat mungkin kehilangan fleksibilitas dan kemampuan untuk mengikuti perubahan lingkungan, sementara hidrogel yang terlalu longgar mungkin kehilangan kemampuan untuk mempertahankan bentuknya. Pada **Tabel 4.1** merupakan hasil densitas hidrogel Agar-Es pada semua variasi. Terlihat semakin besar konsentrasi cangkang telur, semakin besar densitas hidrogel. Penambahan molekul PVA menghasilkan larutan yang lebih padat membuat densitas semakin besar (Asy-Syifa et al. 2022). Densitas hidrogel sangat mempengaruhi kemampuan hidrogel untuk menyerap air dan membengkak. Hidrogel dengan densitas rendah memiliki kapasitas penyerapan air tinggi karena struktur porinya besar dan banyak ruang antar jaringan silang. Pada hasil yang didapat Hidrogel Agar-ES5 memiliki densitas yang lebih besar karena kandungan cangkang telur yang tinggi. Penambahan cangkang telur membuat densitas larutan meningkat, viskositas larutan juga dapat meningkat. Ini dapat menghambat gerakan dinamis molekul pelarut, karena mereka harus bergerak melalui medium yang lebih tebal. Ini dapat menyebabkan efek pencampuran yang lambat dan proses homogenisasi yang memakan waktu lebih lama. Densitas hidrogel yang sesuai akan dapat menyerap air secara efisien tanpa menyebabkan genangan air atau kelebihan drainase. Hidrogel dengan densitas yang tepat dapat membantu dalam menjaga porositas tanah. Hal ini penting untuk memastikan bahwa akar tanaman mendapatkan oksigen yang cukup untuk pertumbuhan yang sehat.

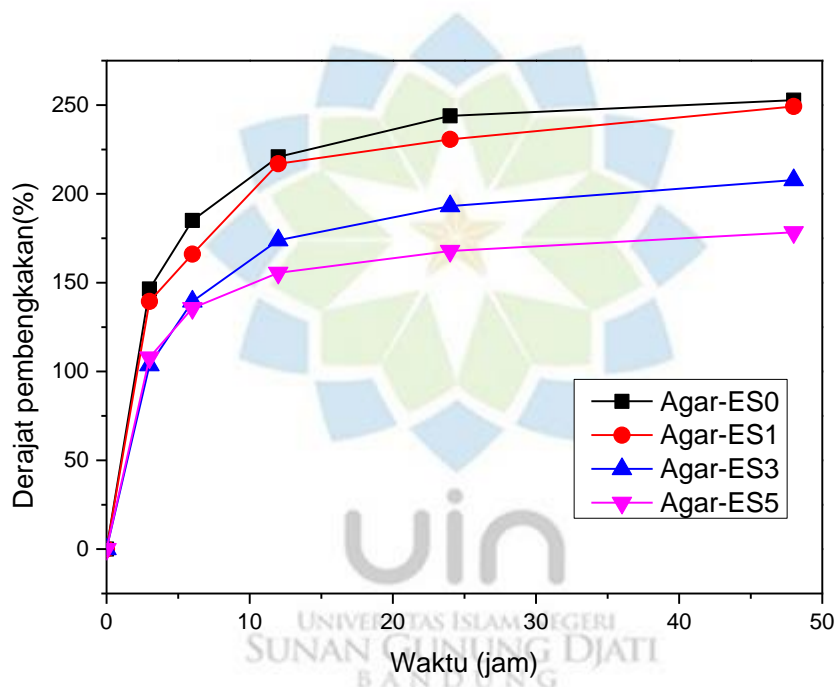
Table 1.1 Tabel Densitas Hidrogel

Sampel	Densitas
Agar-ES0	$0,95 \pm 0,065$
Agar-ES1	$0,992 \pm 0,04$
Agar-ES3	$0,997 \pm 0,068$
Agar-ES5	$1,02 \pm 0,067$

1.1.2 Derajat Pengembangan (*Degree of swelling*)

Hidrogel ditempatkan dalam air DI water (Deionized Water) selama 48 jam untuk mencapai keseimbangan pembengkakan. Sebelum uji Pembengkakan dilakukan, sampel dikeringkan terlebih dahulu sehingga massa hidrogel kontans, lalu setelah diberi air DI water rantai agarose mengendur sehingga air dapat masuk kedalam pori-pori hidrogel. Pada 12 jam pertama perendaman menunjukkan kapasitas adsorpsi yang signifikan karena hidrofilisitas permukaan pori-pori hidrogel. Setelah itu, tingkat pembengkakan umumnya tidak meningkat hingga 48 jam. **Gambar 4.1** menunjukkan grafik pembengkakan hidrogel komposit Agar-ES. Pembengkakan menunjukkan grafik menurun ketika konsentrasi cangkang telur yang ditambahkan meningkat. Penjelasan ini sejalan dengan (Ou et al. 2017), ketika kepadatan ikatan silang meningkat maka hidrogel yang terbentuk akan semakin padat dan semakin besar, porositasnya akan semakin kecil sehingga menyerap DI water lebih sedikit. Seperti yang disajikan pada **Gambar 4.1** sampel hidrogel Agar-ES0 memiliki derajat pembengkakan paling besar.yaitu $252,7 \pm 18,7 \%$. Diikuti oleh Agar-ES1 yang memiliki nilai derajat pembengkakan $249,2 \pm 20,4\%$, Agar-ES3 derajat pembengkakan $207,7 \pm 6,2 \%$ dan Agar-ES5 derajat pembengkakan $178,3 \pm 4,8 \%$ dengan waktu perendaman yang sama selama 48 jam perendaman. Pada Hidrogel Agar-AC, Penggabungan AC meningkat dan rasio pembengkakan menurun, yang dapat dikaitkan dengan AC yang tertanam dalam jaringan polimer, sehingga menyebabkan kepadatan ikatan silang yang lebih tinggi (Cao and Li 2021). Sesuai dengan teori agarose yang ada, hidrogel memiliki kemampuan

penyerapan air yang sangat baik, sehingga dapat menyediakan jumlah air yang cukup untuk tanaman. Meningkatnya konsentrasi cangkang telur juga meningkatkan kepadatan ikatan silang pada hidrogel, hal ini dapat mengakibatkan gerak polimer hidrogel terbatas dan kemampuan menyerap air akan berkurang dan cangkang telur memiliki sifat adsorpsi yang mengurangi daya serap air hidrogel. Komponen mineral seperti kalsium karbonat atau kalsium fosfat dalam cangkang telur dapat bergabung dengan hidrogel untuk menarik air, mengurangi kemampuan hidrogel untuk membengkak.

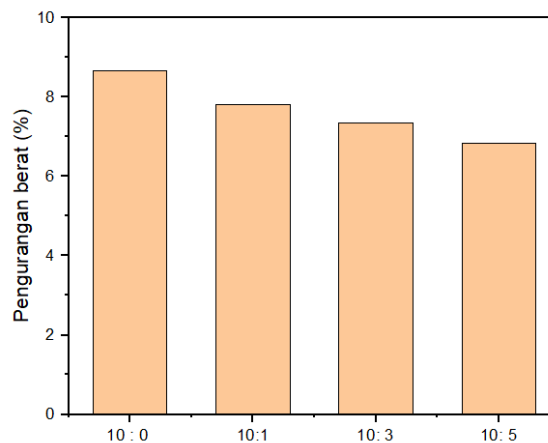


Gambar 1.1 Derajat Swelling komposit hidrogel agarose Cangkang Telur

1.1.3 Pengurangan berat

Hidrogel setelah direndam air DI water (*Deionized Water*) selama 48 jam lalu dikeringkan kembali selama 5 hari Sebelum uji pengurangan berat dilakukan. **Gambar 4.2** menunjukkan pengurangan berat hidrogel dikarenakan pengeringan. Hidrogel mengalami pengurangan berat yang signifikan menunjukkan bahwa struktur polimer dalam hidrogel terdegradasi, kehilangan integritas dan kekuatannya. Dengan kata lain, pengurangan berat ini menunjukkan fraksi gel yang

tersisa setelah dilarutkan sebelumnya pada DI water. Sesuai dengan jurnal (Luthfianti et al. 2022), selama uji tingkat pembengkakan, rantai polimer mengembang karena larutan DI water memasuki jaringan hidrogel selama proses pembengkakan, sehingga memungkinkan senyawa bioaktif untuk meninggalkan jaringan hidrogel. Hidrogel Agar-ES5 memiliki susut bobot terendah, sebesar $6,8 \pm 0,2$ %. Dengan demikian Agar-ES5 mampu mempertahankan strukturnya dengan baik. Semakin bertambahnya kandungan cangkang telur maka semakin berkurang bobot pengurangan berat dari hidrogel. Pada Agar-ES0 pengurangan beratnya sebesar $8,6 \pm 0,7$ % disusul dengan Agar-ES1 sebesar $7,8 \pm 0,4$ % dan Agar-ES3 sebesar $7,3 \pm 0,7$ %. Hasil ini sama seperti hidrogel Agar-AC yang dimana grafik pengurangan berat menurun seiring meningkatnya konsentrasi (Cao and Li 2021). Struktur hidrogel yang lebih padat dengan lebih banyak cangkang telur membatasi difusi bahan tambahan atau zat aktif keluar dari hidrogel. Ini mengurangi laju pengurangan berat badan karena bahan tambahan dilepaskan lebih lambat dan terkendali.



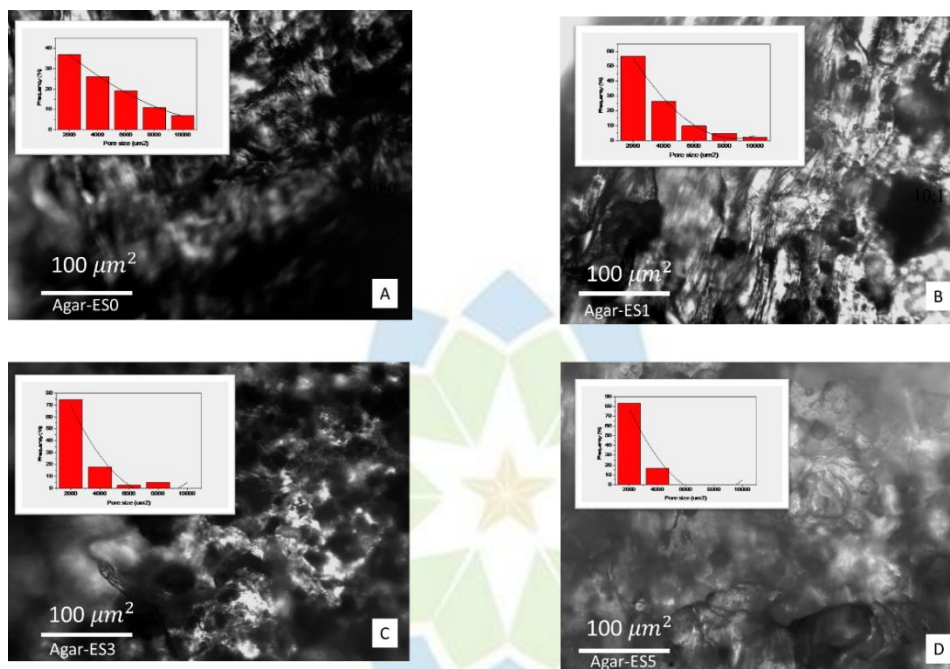
Gambar 1.2 Pengurangan berat komposit hidrogel agarose Cangkang Telur

1.1.4 Distribusi Ukuran Pori

Karakteristik pori hidrogel, seperti struktur pori dan ukuran pori dapat mempengaruhi sifat-sifat seperti kapasitas serap air, laju pengembangan, mekanis kekuatan. Pada jurnal Hidrogel Agar-AC (Cao and Li 2021), hidrogel Agar-AC0 menunjukkan morfologi yang halus, sedangkan setelah penambahan AC,

permukaan hidrogel komposit Agar-AC menunjukkan permukaan yang kasar, yang berarti AC berhasil tertanam dalam jaringan hidrogel dan AC tersebar merata di permukaan. Hidrogel Agar-ES menghasilkan gambar dengan pori yang terlihat tidak begitu besar, tetapi semakin bertambahnya cangkang telur porinya semakin tertutup. Dalam hasil Pembengkakan didapat semakin banyak kandungan cangkang telur maka penyerapan air dalam hidrogel semakin berkurang, sehingga sejalan dengan hasil distribusi ukuran pori semakin banyak kandungan cangkang telur maka pori semakin tidak merata sehingga membuat penyerapan air semakin lambat. **Gambar 4.3** menunjukkan hasil mikroskop optik dan kurva distribusi pori. Persentase pori ukuran tertentu relative terhadap jumlah pori yang dihitung adalah persentase frekuensi dan distribusi ukuran pori masing-masing hidrogel ditentukan dengan menyesuaikan fungsi Gaussian non linier untuk mendapatkan ukuran pori rata-rata. (Nafisah et al. 2024). Hidrogel Agar-ES0 menunjukkan kurva dengan distribusi ukuran beragam dan beraturan dengan distribusi sebagai berikut: 0-2000 μm^2 (36,9 %), 2000-4000 μm^2 (26%), 4000-6000 μm^2 (19%) 6000-8000 μm^2 (10,9%), 8000-10000 μm^2 (6,8%) dengan Ukuran pori rata-rata hidrogel $3568,3 \pm 2372,1 \mu\text{m}^2$. Pada Agar-ES3 menunjukkan kurva dengan distribusi ukuran beragam dan beraturan dengan distribusi sebagai berikut: 0-2000 μm^2 (74,3 %), 2000-4000 μm^2 (17,9%), 4000-6000 μm^2 (2,5%), 6000-8000 μm^2 (5,1%), dengan Ukuran pori rata-rata hidrogel $2284,2 \pm 1954,2 \mu\text{m}^2$. Sementara Agar-ES5 menghasilkan ukuran pori yang lebih terbatas dengan distribusi sebagai berikut: 0-2000 μm^2 (83,3 %), 2000-4000 μm^2 (16,6%) dengan Ukuran pori rata-rata hidrogel $1276,76 \pm 860,66 \mu\text{m}^2$. Terlihat ukuran pori rata-rata menurun seiring dengan penurunan meningkatnya kadar Cangkang Telur. Ukuran pori yang kecil menyebabkan kapasitas penyerapan yang lebih rendah (Nafisah et al. 2024) , hal ini dibuktikan dengan hasil tes pembengkakan. Pada hidrogel komposit Agar-ES1 menghasilkan ukuran pori yang lebih merata dan beragam dengan distribusi sebagai berikut: 0-2000 μm^2 (56,8%), 2000-4000 μm^2 (26,4%), 4000-6000 μm^2 (9,8%) 6000-8000 μm^2 (4,9%), 8000-10000 μm^2 (1,9%) dengan Ukuran pori rata-rata hidrogel $2284,28 \pm 1954,20 \mu\text{m}^2$. Hasil yang didapat memperlihatkan pori-pori besar yang terhubung secara internal untuk memastikan transportasi air dan

nutrisi lain di dalam gel untuk merangsang perkecambahan biji dan mendorong pertumbuhan tanaman.

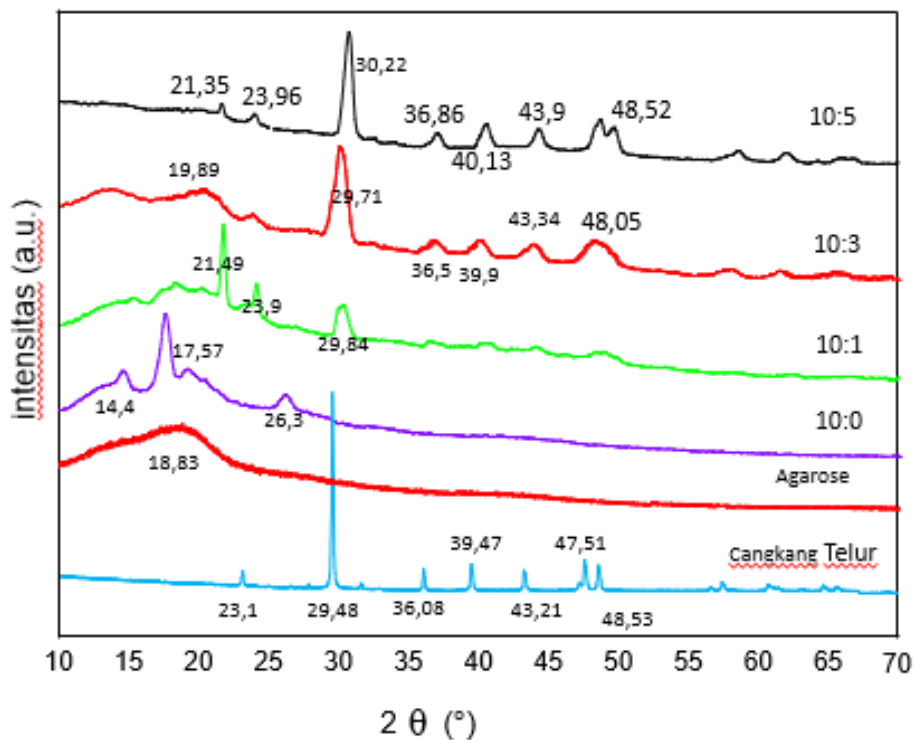


1.1.5 XRD (X-Ray Diffraction)

Pada **Gambar 4.4** menunjukkan Pola difraksi dari cangkang telur, Agarose dan komposit cangkang telur dengan agarose. Puncak yang dihasilkan oleh cangkang telur adalah pada sudut 2θ yaitu : $23,1^\circ$, $29,48^\circ$, $36,08^\circ$, $39,47^\circ$, $43,21^\circ$, $47,51^\circ$, $48,55^\circ$. Puncak difraksi paling intens terdeteksi pada nilai 2θ yaitu : $22,8^\circ$, $29,5^\circ$, $47,6^\circ$, $48,5^\circ$, dan $61,5^\circ$ terindeks CaCO_3 , dengan puncak yang didapat pada nilai 2θ adalah $29,48^\circ$ dan Puncak difraksi yang diidentifikasi pada $36,1^\circ$, $42,8^\circ$, $57,6^\circ$, $60,8^\circ$, $66,0^\circ$, $77,1^\circ$, dan $83,7^\circ$ adalah Ca(OH)_2 dengan puncak yang didapat pada nilai 2θ adalah $36,08^\circ$. Puncak pada $31,6^\circ$, $39,5^\circ$, $56,5^\circ$, $64,6^\circ$, dan $81,5^\circ$ adalah CaO dengan puncak yang didapat pada nilai 2θ adalah $39,47^\circ$ (Kerru et al. 2020). Komposisi utama dari cangkang telur adalah kalsit, yaitu bentuk kristalin dari 94% kalsium karbonat, 1% kalsium fosfor, 4% zat-zat organik dan 1% magnesium karbonat (Adquisiciones et al. 2019, Hal. 13). Pada hasil XRD tidak dapat

mendeteksi semua unsur tersebut, karena magnesium karbonat dan unsur lain hanya memiliki kandungan persen yang rendah pada cangkang telur maka xrd tidak dapat mendeteksi unsur tersebut. XRD kurang sensitif terhadap unsur-unsur yang ada dalam konsentrasi rendah, terutama jika unsur-unsur tersebut tidak membentuk fase kristal yang berbeda. Data XRD menunjukkan bahwa tingkat kristalinitas CaCO_3 dan CaO yang tinggi terdapat pada material cangkang. Untuk hasil Agarose memiliki puncak pada sudut $18,82^\circ$ hingga $19,3^\circ$ dimana menurut (Saeedi Garakani et al. 2020) agarose yang memiliki puncak $18,4^\circ$ adalah semi-matriks kristal. Hasil agarose ini mengacu pada pola difraksi yang menunjukkan adanya struktur kristal yang terbentuk, tetapi dengan tingkat kristalinitas yang tidak sepenuhnya terorganisir atau "semi-teratur". Pola XRD Agar-ES0 memiliki puncak pada sudut $14,4^\circ$; $17,5^\circ$ dan $26,3^\circ$ mempunyai struktur amorf seperti Agar-AC (Cao and Li 2021) pola XRD Agar-AC0 menunjukkan dua puncak difraksi luas pada $13,5^\circ$ dan $20,1^\circ$, yang menunjukkan struktur amorf gel dan tidak ada puncak lain yang muncul. Tetapi terdapat puncak pada sudut 26° yang berarti terdapat puncak kristal yang dihasilkan pada Agar-ES0. Hal ini dikarenakan, uji XRD ini menggunakan sampel yang sudah di *dry-freeze* terlebih dahulu. *Dry-freeze* ini mempengaruhi struktur kristal suatu material. Perlakuan *dry-freeze* menghasilkan ketidakteraturan yang nyata pada struktur gel pati karena pembekuan air dan sublimasi kristal es. Tujuan dari pekerjaan ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana *dry-freeze* mempengaruhi struktur kristal dan teratur jarak pendek, kekompakan struktural, ukuran agregat yang disusun Kembali (Chi et al. 2020). Penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa perlakuan *dry-freeze* mengubah morfologi pati dan mengganggu heliks ganda serta struktur kristal (Larder et al., 2018; Wang et al., 2016). Proses *dry-freeze* menyebabkan hidrogel mengalami tekanan termal dan mekanis. Tekanan ini dapat merusak rantai polimer dan mengganggu domain kristal, yang menyebabkan penurunan kristalinitas keseluruhan atau perubahan sifat daerah kristal. Kehilangan air mengubah ikatan hidrogen dan interaksi molekuler lainnya dalam hidrogel agarosa. Perubahan dalam interaksi ini karena kehilangan air dapat menyebabkan penurunan kristalinitas dan modifikasi integritas struktural hidrogel. Terdapat pergeseran seiring dengan penambahan cangkang telur,

Konsentrasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan kristalinitas material (Nomura, Kugo, and Erata 2020). Intensitas yang tinggi menunjukkan keteraturan atom penyusun lapisan tipis juga tinggi. (Khoirunisa and Ariswan 2017) mengakibatkan perubahan parameter kisi dan pergeseran puncak XRD. Pola XRD Agar-ES lainnya memiliki puncak seperti cangkang telur dikarenakan adanya cangkang telur dalam hidrogel dapat menyebabkan interaksi antara bahan pembentuk hidrogel (agarose) dengan unsur mineral (CaCO_3) pada cangkang telur. Kalsium karbonat (CaCO_3) dapat mempercepat proses pembentukan kristal. Akibatnya, struktur hidrogel dapat mengandung lebih banyak kristal atau memiliki kristal yang lebih besar, yang menghasilkan peningkatan intensitas puncak difraksi dalam pola XRD. Dengan didapatnya puncak CaO dan Ca(OH)_2 menunjukkan bahwa cangkang telur mendapatkan perlakuan pemanasan pada suhu tinggi. senyawa mayoritas yang terbentuk adalah CaCO_3 meskipun di suhu 800°C sudah mulai terbentuk CaO (Sihombing 2017).



Gambar 1.4 Pola XRD hidrogel Cangkang telur dan agarose.

Table 1.2 Puncak kristal Pola XRD hidrogel Cangkang telur dan agarose

Senyawa	Puncak kristal yang didapat	Puncak kristal referensi
Ca(OH) ₂	36,08	36,1°, 42,8°, 57,6°, 60,8°, 66,0°, 77,1°, dan 83,7°
CaCO ₃	29,48° ; 47,51° ; 48,5°	22,8°, 29,5°, 47,6°, 48,5°, dan 61,5°
CaO	39,47°	31,6°; 39,5°; 56,5°; 64,6°, dan 81,5°
Agarose	18,83°	18,4°

Untuk menentukan ukuran nano Kristal, dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Scherrer, diketahui k merupakan konstanta yang nilainya bervariasi, namun pada penelitian ini nilai k adalah 0,9. Sedangkan λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan yaitu 1,5406 Å, merupakan panjang gelombang Cu sebagai sumber sinar – X, Θ adalah sudut Bragg, dan B adalah FWHM (full width half maximum) yang dipilih. Harga FWHM berbanding terbalik dengan ukuran kristal, jika harga FWHM semakin kecil maka ukuran kristal akan semakin besar. Pada **Tabel 4.3** menunjukkan ukuran kristalit yang didapat dari perhitungan persamaan Scherrer. Berdasarkan persamaan Scherrer dapat diketahui ukuran kristal CaO yang terbentuk adalah 51,39 nm (Ulfa, Putra, and Simpen 2019) hasil yang didapat ukuran kristal pada cangkang telur adalah 49,6 nm atau 496,4 Å. Ukuran kristalit yang sangat kecil pada agarose sebesar 4,09 Å atau 0,4 nm menunjukkan bahwa material ini memiliki tatanan kristalin yang sangat terbatas, yang konsisten dengan sifatnya yang amorf. Atom atau molekul dalam material amorf tersebar secara acak, yang berbeda dengan material kristalin yang memiliki struktur periodik yang teratur. Pada sampel Agar-ES0, Agar-ES1, Agar-ES3 dan Agar-ES5 memiliki nilai ukuran kristalit masing-masing sebesar 10,4 nm, 14,2 nm,

7,87 nm, dan 12,4 nm. Hal ini dikarenakan pada hasil tersebut ketika sampel sudah diberikan DI water dan dikompositkan dengan cangkang telur dan agarose, DI water dapat membuat campuran yang lebih homogen yang dapat mempengaruhi ukuran kristalit. Pada Agar-ES3 sepertinya saat proses pencampuran, larutan belum tercampur secara merata. Material dengan kristalit yang lebih besar akan lebih stabil sifat termal karena tatanan kristal yang lebih baik dapat menahan suhu tinggi lebih efektif dan membuat material lebih kuat. Dengan menyesuaikan ukuran kristalit, sifat-sifat material dapat dioptimalkan untuk aplikasi tertentu.

Table 1.3 Ukuran kristalit dari persamaan Scherrer

Sampel	Puncak Kristal (2θ)	FWHM	Ukuran Kristalit (nm)
cangkang telur	29,45699	0,16545	49,6
Agarose	16,80328	19,6066	0,409
Agar-ES0	17,48019	0,77233	10,4
Agar-ES1	29,9558	0,5758	14,2
Agar-ES3	29,8101	1,04393	7,87
Agar-ES5	30,16422	0,66308	12,4

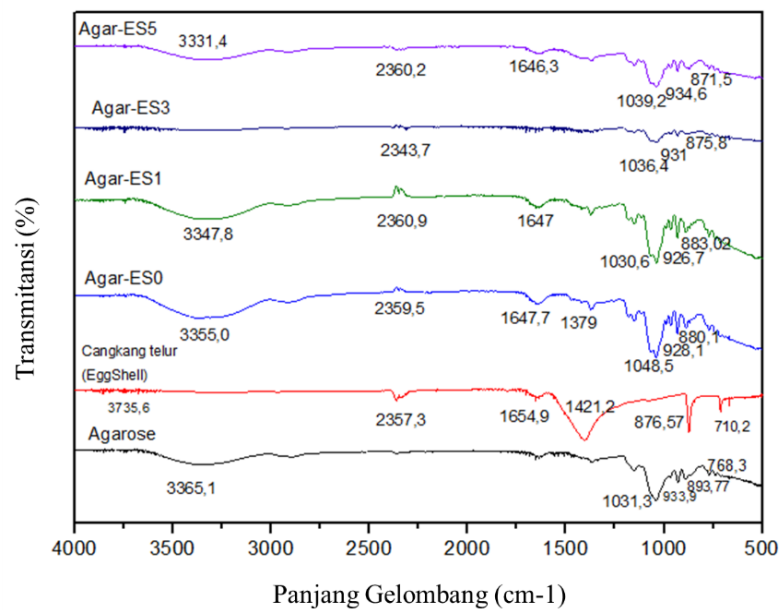
1.1.6 FTIR (*Fourier Transform Inframerah*)

Pada **Gambar 4.5** Menunjukkan puncak serapan FTIR hidrogel Agar-ES. Puncak serapan FTIR bubuk cangkang telur ayam terjadi pada rentang bilangan gelombang sekitar 712 cm^{-1} sampai 1411 cm^{-1} . Pada rentang tersebut termasuk penyerapan pita CO_3^{2-} dalam CaCO_3 (Naemchan et al. 2008). Ada dua puncak yang dapat diamati pada 710 cm^{-1} dan 876 cm^{-1} , yang masing-masing berhubungan dengan deformasi dalam bidang dan deformasi luar bidang, yang menunjukkan kalsium karbonat (CaCO_3). Puncak intens partikel cangkang telur teramati pada 1421 cm^{-1} , hal ini dapat dikaitkan kuat dengan keberadaan mineral karbonat di dalam matriks cangkang telur. Pada puncak yang dihasilkan oleh cangkang telur adalah 1654 cm^{-1} . Pita pada sekitar 1799 cm^{-1} dan 1645 cm^{-1} masing-masing berhubungan dengan regangan gugus C=O dan karbonil (amida) (Tizo et al. 2018). Karbon dioksida memiliki dua puncak serapan utama dalam rentang $2300\text{-}2400\text{ cm}^{-1}$, yang disebabkan oleh getaran peregangan asimetris molekul CO_2 . Pita lemah

pada 2360 cm^{-1} disebabkan oleh ikatan $\text{C}=\text{O}$ dari karbonat (Pandey et al. 2021), dan puncak yang dihasilkan cangkang telur adalah 2357 cm^{-1} . Pada pita serapan 3735 cm^{-1} diindikasikan gugus OH yang merupakan karakteristik dari CaO, sehingga kemunculan gugus OH tersebut menunjukkan adanya kecocokan puncak antara ketiga sampel. Akan tetapi, kemunculan gugus OH tersebut tidak dapat begitu saja memastikan bahwa sampel yang dianalisis benar-benar merupakan kalsium oksida (CaO) (Sihombing 2017). Spektrum FTIR cangkang telur akan menunjukkan pita serapan yang sesuai dengan gugus fungsi yang ada dalam senyawa utama seperti kalsium karbonat. Unsur-unsur seperti magnesium, fosfor, kalium, zink, besi, dan mangan tidak terdeteksi secara langsung karena FTIR tidak sensitif terhadap unsur individual. Molekul dengan ikatan simetris seperti magnesium (Mg), fosfor (P), kalium (K), seng (Zn), besi (Fe), dan mangan (Mn), tidak menyerap dalam inframerah karena peregangan ikatan tidak mengubah momen dipol molekul (Gan 2020).

Puncak serapan FTIR agarose menunjukkan pada puncak 3365 cm^{-1} dapat dikaitkan dengan getaran regangan -OH sedangkan puncak yang diamati pada 1031 cm^{-1} disebabkan oleh getaran lentur -OH. Muncul pita serapan pada 893 cm^{-1} dan 768 cm^{-1} dan menurut (Wang et al. 2018), pita pada rentang $880,15$ dan $743,97\text{ cm}^{-1}$ disebabkan oleh pembengkokan kerangka 3, 6- anhydro- β -galaktosa. Spektrum FTIR Agar-ES0 menunjukkan puncak serapan 3355 cm^{-1} , hasil puncak ini disebabkan oleh peregangan getaran -OH yang memiliki puncak serapan antara 3600 dan 3200 cm^{-1} (Cao and Li 2021). Dimana pada puncak agarose murni terdapat pada puncak serapan 3365 cm^{-1} , saat ditambahkan DI water pada Agar-ES0 terjadi pergeseran puncak dan terjadi peregangan getaran (-OH) yang mana molekul air dapat membentuk ikatan hidrogen yang lebih kuat sehingga terjadi pergeseran puncak serapan ke frekuensi yang lebih rendah. Terjadi pergeseran puncak pada Agar-ES1, Agar-ES3, dan Agar-ES5. Agar-ES5 menunjukkan pergeseran atau perubahan intensitas yang signifikan dibandingkan dengan agarose murni, menunjukkan interaksi yang kuat antara agarose dan cangkang telur pada konsentrasi ini. Saat agarose dicampur dengan cangkang telur, interaksi kimia seperti ikatan hidrogen atau interaksi ionik dapat terjadi antara gugus fungsi agarose

dan komponen dalam cangkang telur. Interaksi ini dapat mengubah frekuensi getaran molekul, menyebabkan pergeseran puncak penyerapan. Agarose memiliki banyak gugus hidroksil (-OH) yang mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul lain. Cangkang telur, yang sebagian besar terdiri dari kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat berinteraksi dengan gugus hidroksil dan menyebabkan pergeseran frekuensi getaran mereka. Pada puncak agarose sebesar 3365 cm^{-1} , puncak ini juga bergeser pada puncak serapan Agar-ES0 adalah 3355 cm^{-1} bergeser menjadi 3331 cm^{-1} pada variasi Agar-ES5, hal ini juga menunjukkan bahwa tidak terjadi modifikasi kimia selama proses sintesis hidrogel komposit agarose dengan cangkang telur karena pergeseran puncak serapannya kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa Cangkang telur tertanam dengan baik di jaringan agarose.



Gambar 1.5 Spektrum FTIR hidrogel Agarose-cangkang telur, agarose dan cangkang telur

Table 1.4 Gugus fungsi FTIR hidrogel Agarose-cangkang telur, agarose dan cangkang telur

Panjang Gelombang (cm^{-1})	Gugus fungsi
Cangkang telur	
3735,6	Gugus OH (CaO)

2357,3	ikatan C=O dari karbonat
1654,9	regangan gugus C=O dan karbonil (amida)
1421,2	karbonat
876,5	(CaCO ₃)
710,2	(CaCO ₃)
Agarose	
3365,1	getaran regangan -OH
1031,3	getaran lentur -OH
893,77 dan 768,3	Pembengkokan kerangka 3, 6- anydro-β-galaktosa

1.1.7 Hubungan Analisis XRD dengan FTIR

Ketika dua material dicampur, hidrogel komposit agarose dengan cangkang telur, interaksi kimia antara komponen-komponen ini dapat menyebabkan perubahan dalam pola difraksi XRD dan spektrum FTIR. Pada hasil FTIR didapatkan Ada dua puncak yang dapat diamati pada 710 cm^{-1} dan 876 cm^{-1} , yang masing-masing berhubungan dengan deformasi dalam bidang dan deformasi luar bidang, yang menunjukkan kalsium karbonat (CaCO₃). Dan hasil XRD adalah Puncak difraksi paling intens terdeteksi pada nilai 2θ yaitu : $22,8^\circ$, $29,5^\circ$, $47,6^\circ$, $48,5^\circ$, dan $61,5^\circ$ terindeks CaCO₃, dengan puncak yang didapat pada nilai 2θ adalah $29,48^\circ$. FTIR menunjukkan keberadaan karbonat, yang konsisten dengan keberadaan CaCO₃ yang ditunjukkan oleh puncak difraksi XRD.

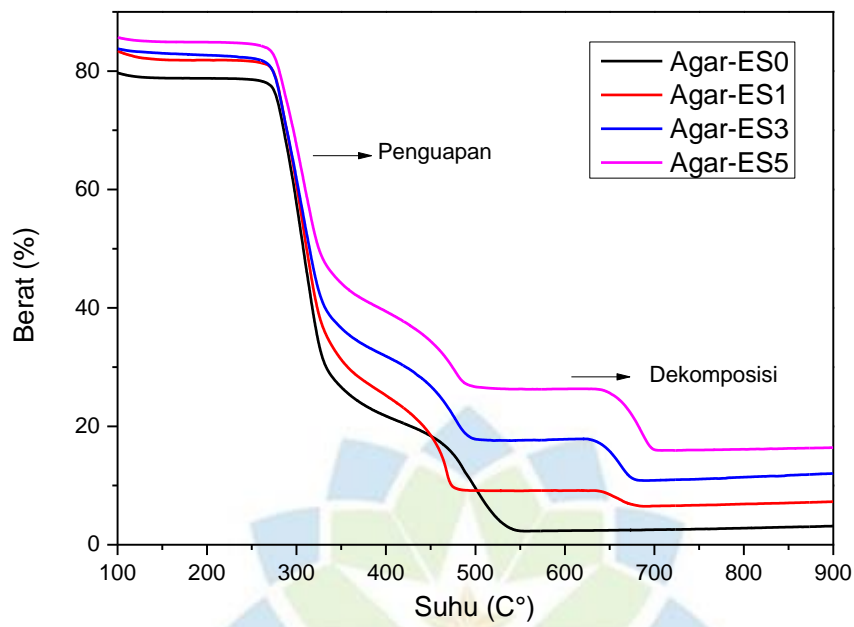
1.1.8 TG/DTG

Gambar 4.6a menyajikan TGA kurva Agar Cangkang telur variasi Agar-ES0, Agar-ES1, Agar-ES3 dan Agar-ES5 diuji dalam atmosfer nitrogen pada laju pemanasan $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$. Pada variasi Agar-ES0, terjadi penurunan 3 kali, penurunan pertama pada suhu 102°C ke 279°C dengan pengurangan berat sebesar 1,69%, penurunan berat ini disebabkan oleh penguapan air yang teradsorpsi atau terikat secara fisik pada permukaan agarose. Menurut (Guastaferrero et al. 2021) hasil

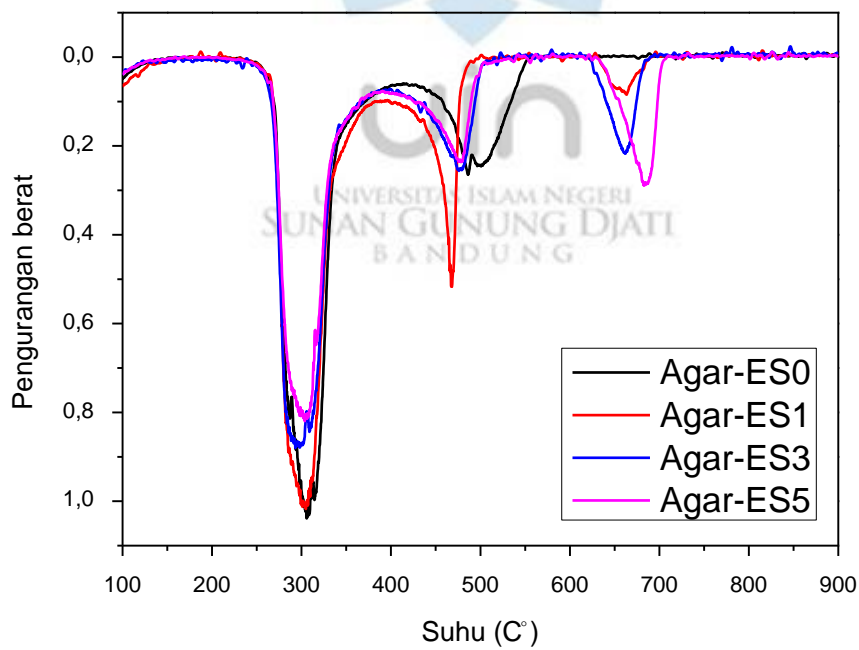
TGA agarose sesuai dengan hasil yang didapat, yaitu terjadi penurunan berat badan pertama, yang terdeteksi pada suhu 100 °C, menunjukkan bahwa air yang diserap secara fisik terikat secara longgar pada permukaan agarose. Penurunan kedua 279°C ke 337°C pengurangan berat sebesar 51,9% dan penurunan ketiga 337°C ke 600°C pengurangan berat sebesar 23,6%, penurunan ini terjadi karena ada proses dekomposisi. Dekomposisi termal dari agarose terjadi ketika molekul-molekul kompleks dalam struktur agarose mulai terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana akibat pemanasan pada suhu tinggi. Pada suhu 600°C ke 900°C sudah tidak terjadi pengurangan berat kembali. Residu bubuk agarose pada akhir pengukuran adalah sekitar 0%, yang menunjukkan tidak adanya senyawa anorganik dalam sampel dengan fraksi pengotor yang kecil. Material organik dalam agarose telah terurai sepenuhnya menjadi gas atau telah mengalami sublimasi (berubah langsung dari padat ke gas) tanpa meninggalkan residu. Pada variasi Agar-ES1, terjadi penurunan 4 kali, penurunan pertama pada suhu 101°C ke 270°C dengan pengurangan berat sebesar 2%, penurunan berat ini disebabkan oleh penguapan air yang teradsorpsi atau terikat secara fisik pada permukaan agarose. Penurunan kedua 270°C ke 359°C pengurangan berat sebesar 52,5% dan penurunan ketiga 359°C ke 477°C pengurangan berat sebesar 19,3%, penurunan ini disebabkan dekomposisi bahan organik seperti protein dan lemak, menghasilkan pelepasan senyawa volatil seperti CO dan CO₂. Penurunan keempat 447°C ke 900°C pengurangan berat 3% ini disebabkan oleh hilangnya kalsium karbonat dari cangkang telur ayam (Naemchan et al. 2008). Dekomposisi termal dari cangkang telur pada suhu 450°C – 625°C akan diperoleh senyawa CaCO₃ dengan suhu maksimum 650°C, sedangkan pada rentang suhu 650°C – 1000°C senyawa CaCO₃ akan terdekomposisi menjadi CaO dengan suhu maksimum 850°C (Muhammad and Sapta dewi 2023). Proses ini adalah hasil dari dekomposisi karbonat yang terkandung dalam cangkang telur, terutama kalsium karbonat, yang menghasilkan oksida kalsium (CaO), karbon dioksida (CO₂), dan air (H₂O) pada suhu yang lebih tinggi. Kalsium karbonat (CaCO₃) akan terurai menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO₂) ketika dipanaskan, ketika oksigen masuk terjadi proses oksidasi yang menghasilkan karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O). Oksidasi merupakan perubahan kimia dan

sangat signifikan pada suhu yang lebih tinggi, menyebabkan penurunan massa yang lebih besar. Dan variasi hidrogel Agar-ES3 dan Agar-ES5 menunjukkan penurunan berat yang serupa dan memiliki residu bubuk variasi Agar-ES1, Agar-ES3 dan Agar-ES5 yaitu sebesar 3%, 7% dan 11,04% pada akhir pengukuran yang menunjukkan adanya senyawa anorganik dalam sampel dengan fraksi pengotor yang kecil.

Disajikan pada **Gambar 4.6b** Hidrogel dengan variasi Agar-ES5 memiliki T_{max} (suhu laju kehilangan massa maksimum) sebesar $306\text{ }^{\circ}\text{C}$, lebih tinggi dari variasi 10;0 sebesar $305\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hidrogel Agar-AC pada Agar-AC0 mulai terurai pada $254\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan suhu degradasi Agar-AC5 ditunda hingga $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cao and Li 2021). Penggunaan Cangkang telur memperlambat laju dekomposisi hidrogel. Cangkang telur memiliki struktur berpori, porositas ini dapat menahan atau memperlambat pergerakan zat kimia, termasuk pelarut dan reagen yang terlibat dalam dekomposisi hidrogel. Hasilnya, laju dekomposisi hidrogel dapat menjadi lebih lambat karena proses difusi menjadi terhambat. Cangkang telur mengandung kalsium karbonat, yang dapat berinteraksi dengan komponen hidrogel, seperti polimer, dan membentuk ikatan atau mengubah sifat-sifat kimianya. Terdapat interaksi antara Cangkang telur dan agarose, yang konsisten dengan data FTIR. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan Cangkang Telur meningkatkan stabilitas termal hidrogel komposit cangkang telur.



(a)



(b)

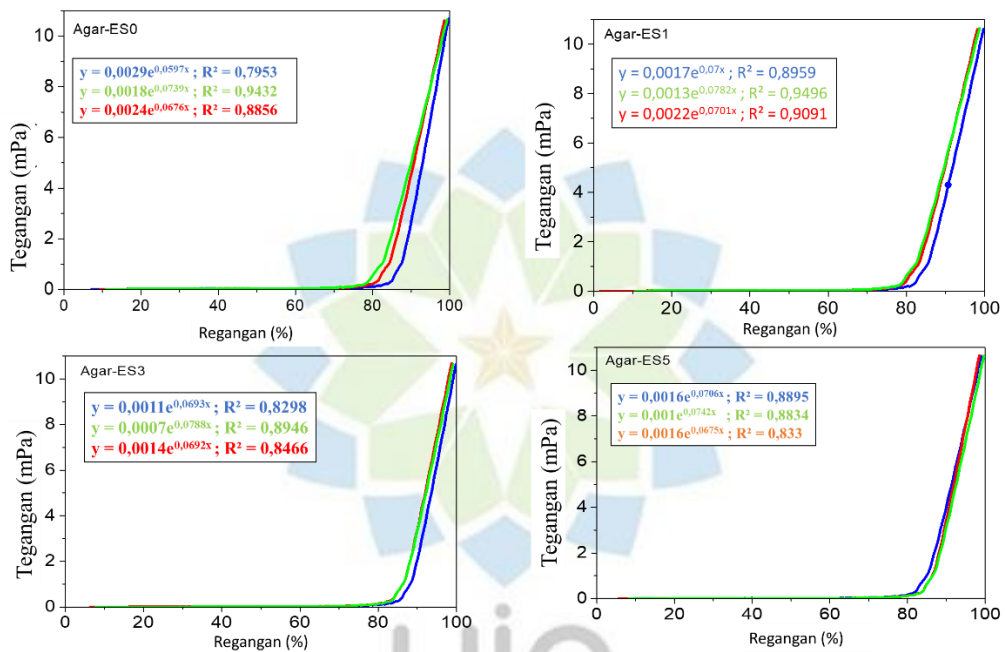
Gambar 1.6 (a) Kurva TGA dan (b) Kurva DTG hidrogel Agarose-Cangkang telur

1.1.9 UJI MEKANIK

Gambar 4.7 Menunjukkan grafik tegangan terhadap regangan yang berbentuk eksponensial menunjukkan kuat tekan yang semakin tinggi pada tegangan tinggi. Nilai rata-rata dilakukan dengan tiga kali pengukuran pada setiap variasi sampel. Nilai R^2 dari fitting eksponensial yang didapatkan adalah kurang lebih 0,8 sampai 0,9, ini dapat menjelaskan sifat viskoelektrik hidrogel (Luthfianti et al. 2022) dimana hidrogel masih belum rusak ketika regangannya sekitar 90%. Pada **Table 4.5** Modulus young didapatkan dari pembagian tegangan dengan regangan lalu dirata-ratakan pada pengukuran berulang setiap sampel. Agar-ES0, Agar-ES1, Agar-ES3 dan Agar-ES5 memiliki nilai modulus young berurutan yaitu, 58,7 ; 60,7 ; 72,6 dan 73,3 mPa. Dari data tersebut dapat dilihat semakin bertambahnya cangkang telur maka semakin tinggi nilai modulus youngnya. Partikel-partikel cangkang telur menempati ruang dalam hidrogel, sehingga membatasi pergerakan rantai polimer agarose dan menciptakan hambatan fisik yang mengurangi deformabilitas makromolekul. Hal ini sejalan dengan penelitian (Cao and Li 2021) mengenai Hidrogel Agar-AC yang menunjukkan kuat tekan maksimum meningkat dengan meningkatnya kandungan AC di dalamnya hidrogel komposit karena AC meningkatkan sifat tegangan antara agarose dengan AC dalam hidrogel. Tegangan maksimum hidrogel merupakan tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh hidrogel. Tegangan maksimum didapat dari gaya atau beban yang didapat dari pengujian lalu dibagi dengan luas permukaan penampang hidrogel pada pengukuran berulang setiap sampel. Tegangan maksimum setiap variasi memiliki nilai 10,6 mPa yang berarti pada besar tegangan tersebut hidrogel sudah tidak dapat menahan beban lagi dan hancur.

Table 1.5 Modulus young dan tegangan maksimum hidrogel

Sampel	Modulus young (mPa)	Tegangan maksimum (mPa)
Agar-ES0	58,7 ± 3,3	10,64 ± 0,03
Agar-ES1	60,7 ± 3,9	10,62 ± 0,01
Agar-ES3	72,6 ± 0,4	10,65 ± 0,02
Agar-ES5	73,3 ± 4,2	10,64 ± 0,01



Gambar 1.7 kurva regangan-tekanan tekan

1.1.10 pH

Pada **Tabel 4.6** didapat hasil uji pH untuk setiap variasi hidrogel Agar-ES, dari data yang didapat semakin meningkatnya kadar Cangkang telur maka semakin tinggi nilai pH yang didapat. Penambahan cangkang telur ke dalam hidrogel agarose akan meningkatkan pH hidrogel karena sifat basa dari kalsium karbonat yang terdapat dalam cangkang telur. Pada Agar-ES0 dan Agar-ES1 dengan pH 7,4 dan 7,9 adalah kandungan pH yang pas untuk tanaman. Pada pH sekitar 7-8, kebanyakan nutrisi esensial untuk tanaman seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) tersedia dalam jumlah optimal. Mikroorganisme tanah yang bermanfaat, seperti bakteri pengikat nitrogen dan mikroorganisme yang membantu dekomposisi bahan organik, paling aktif pada pH netral hingga sedikit basa. Ini membantu dalam

menjaga kesehatan dan kesuburan tanah. Peningkatan nilai pH menyebabkan peningkatan ketersediaan hara-hara makro yang dibutuhkan oleh tanaman. (Kurniawan 2020).

Table 1.6 Data pH komposit hidrogel agarose Cangkang Telur

Sampel	pH
Cangkang Telur	11.77 + 0.06
agarose	4.70 + 0
Agar-ES0	7,435 ± 0,07
Agar-ES1	7,9375 ± 0,04
Agar-ES3	8,1925 ± 0,06
Agar-ES5	8,19 ± 0,12

1.2 Tahap Uji Media Tanam

Pada **Table 4.7** menunjukkan hasil perkecambahan biji hidrogel setiap variasi Agar-ES selama 12 hari. Terlihat pada hidrogel Agar-ES1 dalam waktu 4 hari biji sudah mulai berkecambah dan berkembang dengan baik seiring bertambahnya hari. Sama dengan Agar-ES3 dan Agar-ES5 mulai berkecambah dengan lebat tetapi hasil batang yang dihasilkan tidak sesegar Agar-ES1, sedangkan benih pada permukaan Agar-ES0 berkecambah lebih lambat dibandingkan benih yang lain. Terlihat jelas pada **Tabel 4.8** pada akhir penanaman rata-rata tinggi tanaman, pertumbuhan tanaman pada komposit Agar-ES1 ini lebih baik dan lebih tinggi dibanding dengan variasi Agar-ES yang lainnya. Ditunjukkan dengan grafik pertumbuhan **Gambar 4.8** menunjukkan hasil uji perkecambahan biji hidrogel komposit Agar-ES. Benih pada permukaan Agar-ES1 berkecambah dalam waktu 4 hari dan terus tumbuh dengan baik pada hari-hari berikutnya, sedangkan benih pada permukaan Agar-ES0 berkecambah lebih lambat dibandingkan benih pada Agar-ES1 dan hidrogel komposit agarose lainnya. Hasil ini membuktikan jika penambahan cangkang telur dapat bermanfaat untuk perkecambahan biji, tetapi semakin banyak cangkang telur pertumbuhannya semakin turun. Hal ini karena pH pada cangkang telur juga mempengaruhi tanaman. (Astiningsih, 2014) mengatakan bahwa tanaman butuh zat hara pada dosis yang bagus untuk mendukung

pertumbuhannya. pengaplikasian unsur hara pada dosis yang cukup mampu menaikkan genetik tanaman, seperti bentuk, ukuran, dan berat organ. pengaruh penggunaan cangkang telur berlebihan untuk Keseimbangan Nutrisi tanaman. Tingginya kandungan Ca yang terdapat pada cangkang telur mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai pH tanah. Peningkatan nilai pH menyebabkan peningkatan ketersediaan hara makro yang dibutuhkan tanaman.



Table 1.7 Gambar Perkecambahan Hidrogel Agar-ES







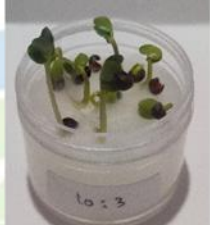
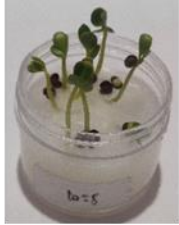








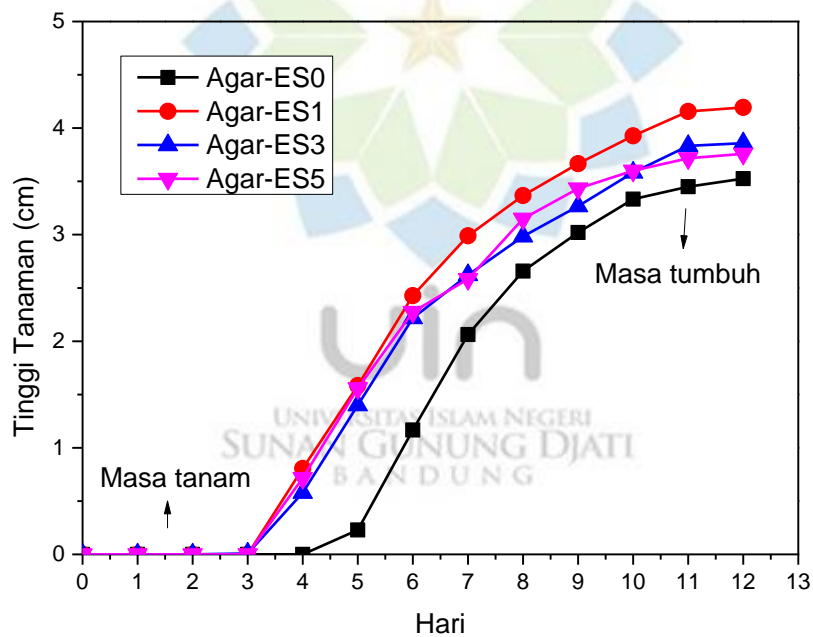
Day/var	Agar-ES0	Agar-ES1	Agar-ES3	Agar-ES5
Hari ke-1	 A clear petri dish labeled '10:0' containing a white agar surface with several dark seeds scattered on top.	 A clear petri dish labeled '10:1' containing a white agar surface with several dark seeds scattered on top.	 A clear petri dish labeled '10:3' containing a white agar surface with several dark seeds scattered on top.	 A clear petri dish labeled '10:5' containing a white agar surface with several dark seeds scattered on top.
Hari ke-4	 A clear petri dish labeled '10:0' containing a white agar surface with several dark seeds scattered on top.	 A clear petri dish labeled '10:1' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:3' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:5' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.
Hari ke-8	 A clear petri dish labeled '10:0' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:1' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:3' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:5' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.
Hari ke-12	 A clear petri dish labeled '10:0' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:1' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:3' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.	 A clear petri dish labeled '10:5' containing a white agar surface with several dark seeds and small green sprouts emerging from them.

Table 1.8 Data rata-rata pertumbuhan bibit brokoli sampai hari ke-12

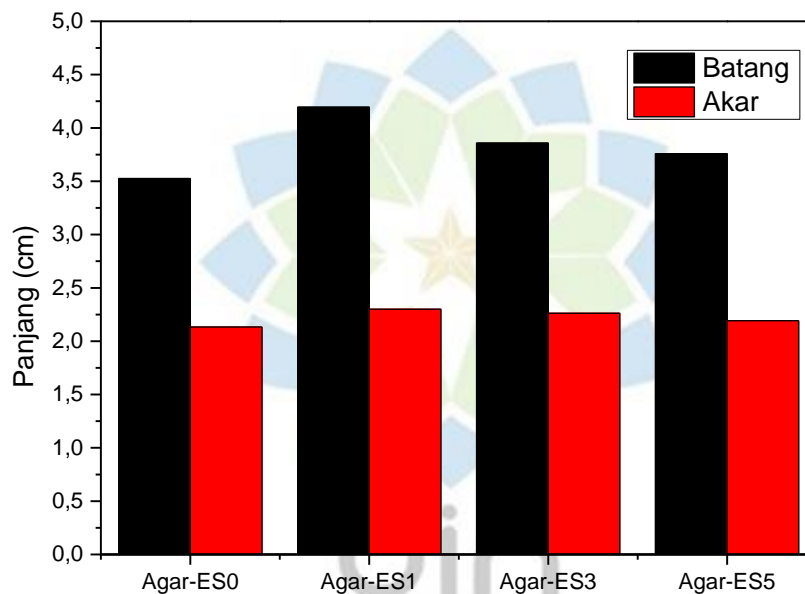
Hari	Agar-ES0	Agar-ES1	Agar-ES3	Agar-ES5
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0,008333	0
4	0	0,805556	0,579167	0,716667
5	0,229167	1,583333	1,4	1,558333
6	1,166667	2,427778	2,216667	2,275
7	2,0625	2,988889	2,620833	2,583333
8	2,658333	3,366667	2,983333	3,15
9	3,020833	3,666667	3,266667	3,433333
10	3,333333	3,927778	3,583333	3,6
11	3,45	4,155556	3,833333	3,716667
12	3,525	4,194444	3,858333	3,758333



Gambar 1.8 Grafik Pertumbuhan setiap hari

Pada **Gambar 4.9** dapat mengetahui pengaruh konsentrasi cangkang telur yang berbeda pada panjang akar dan panjang batang tanaman. Hasil pada gambar menunjukkan bahwa variasi Agar-ES1 memiliki panjang akar dan panjang batang yang lebih dominan dari variasi lain, terjadi penurunan panjang pada variasi Agar-

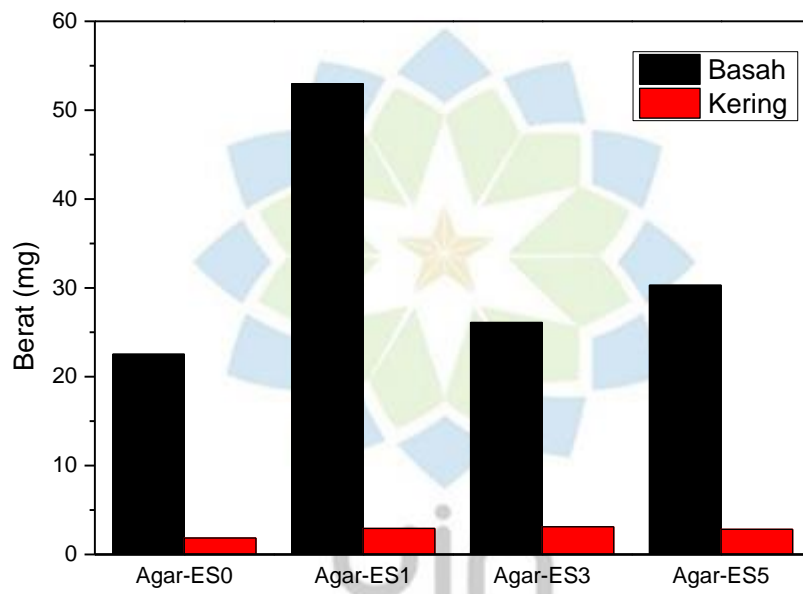
ES3. Hal ini juga dikarenakan Kandungan utama dalam cangkang telur adalah kalsium karbonat, yang dapat meningkatkan pH tanah jika digunakan dalam jumlah yang berlebihan. Peningkatan pH tanah dapat mengganggu keseimbangan nutrisi tanaman dan menghambat pertumbuhan tanaman tertentu yang membutuhkan lingkungan tanah yang lebih asam. Menurut (Kotouki, Perisha, and Lestari 2023), Brokoli ditanam pada tanah yang banyak mengandung humus, gembur, porous dengan pH antara 6-7 akan mencapai pertumbuhan optimum.



Gambar 1.9 Panjang akar dan batang bibit pada Hidrogel Agar-ES

Pada saat yang sama, **Gambar 4.10** menunjukkan berat segar dan berat kering tanaman setiap variasi hidrogel Agar-ES untuk melihat perbedaan dalam tingkat pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Pada hasil yang didapat bobot segar dan kering, yang mencerminkan pertumbuhan tanaman di hidrogel Agar-ES1, secara signifikan lebih tinggi dibanding dengan variasi hidrogel Agar-ES yang lainnya. Pada hasil tumbuhan di Agar-ES1 memiliki ukuran yang lebih besar dan segar dibanding dengan tanaman lain yang terlihat lebih kecil batangnya dan daun yang layu. Pada karakterisasi yang sudah dilakukan, hidrogel Agar-ES1 memiliki sifat mekanik yang baik, struktur pori yang merata untuk menyerap air dan teruji pada

uji pembengkakan dan penurunan berat memiliki hasil yang optimum sehingga memiliki kemampuan untuk menyimpan dan melepaskan air yang baik. Hasil panen yang didapat batang dan akar pada Agar-ES1 memiliki bentuk batang yang lebih segar dan daun yang belum layu dengan akar yang panjang. Hasil ini menunjukkan bahwa cangkang telur tertanam baik pada matriks polimer dalam hidrogel, yang bermanfaat untuk mendorong perkecambahan biji dan pertumbuhan tanaman.



Gambar 1.10 Berat bibit basah dan kering pada Hidrogel Agar-ES