

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kebutuhan Hidrogel

4.1.1 Penyiapan Lembaran Gel [PVA/Borat], Karakterisasi, Uji Performa, Optimasi KCl

Pada tahap penyiapan lembaran gel [PVA/Borat] dilakukan optimasi komposisi dari PVA dan Borat (optimasi dari skripsi (Indri, 2022)). Komposisi PVA 3% dengan jumlah 20 mL dan Borat 1% dengan jumlah 5 mL. Kemudian dibuat lembaran [PVA/Borat] sesuai dengan optimasi yang sudah ada. Uji yang dilakukan pada lembaran [PVA/Borat] yaitu karakterisasi (FTIR, SEM, WCA) dan performa (*swelling ratio*, *water retention*, biodegradabilitas). Dari pengujian ini didapatkanlah data FTIR, SEM, WCA, *swelling ratio*, *water retention*, biodegradabilitas.

Dilanjutkan dengan optimasi jumlah KCl untuk lembaran [PVA/Borat-KCl]. Optimasi ini dilakukan uji dewatering atau kejenuhan KCl dalam gel [PVA/Borat]. Gel dibuat dengan mencampurkan PVA 3% dengan jumlah 20 mL dan Borat 1% dengan jumlah 5 mL dengan variasi massa KCl (Tabel 4.1). Dari pemilihan massa KCl didapatkan range optimasi gel yang ditambahkan variasi KCl mengalami fenomena mengeluarkan air dan tidak mengeluarkan air (Tabel 4.2). Pada fenomena ini didapatkan range 0 - 0,125 gram KCl tidak berair yang berarti KCl didalam gel tidak dalam keadaan jenuh. Dilanjutkan dengan pemilihan massa KCl dari range dengan fenomena tidak mengeluarkan air yaitu dengan penentuan kebutuhan persentase pupuk NPK.

Tabel 4.1. Fenomena lembaran hidrogel dengan variasi massa KCl

Kode	PVA 3%	Borat 1%	KCl (gram)	Fenomena
1	20 mL	5 mL	0	Tidak berair
2			0,250	Berair
3			0,500	Berair
4			0,750	Berair
5			1,000	Berair

6			1,250	Berair
1a			0,010	Tidak berair
1b			0,050	Tidak berair
1c			0,100	Tidak berair
1d			0,115	Tidak berair
1e			0,125	Tidak berair
1f			0,150	Berair
1g			0,175	Berair
1h			0,200	Berair

Tabel 4.2. Range optimasi massa KCl:

Range (gram KCl)	Fenomena
0 - 0,125	Tidak berair
0,150 – 1,250	Berair

Secara umum persentase pupuk NPK yaitu 15-15-15 yang berarti 15% Nitrogen, 15% Pospor, 15% K₂O. Pupuk NPK dengan nutrisi seimbang dapat meningkatkan hasil panen, meningkatkan kesuburan tanah, keserbagunaan, dan meningkatkan kesehatan tanaman (Syafuddin, *et al*, 2021). Untuk komposisi lembaran hidrogel dibuat sesuai dengan kebutuhan dari jumlah K₂O yaitu 15% dari kebutuhan pupuk NPK. Dari perhitungan tersebut didapatkan massa KCl yang dibutuhkan sebesar 0,115 gram. Maka, massa KCl yang terpilih adalah 0,115 gram. Setelah didapatkan massa KCl terpilih dilanjutkan dengan uji *release*, dan didapatkan data *release*.

4.1.2 Penyiapan Lembaran Gel [PVA/Borat/CNT], Karakterisasi, Uji Performa, Optimasi KCl

Pada tahap penyiapan lembaran gel [PVA/Borat/CNT] dilakukan optimasi jumlah CNT. Komposisi yang dipakai dari PVA dan Borat (optimasi dari skripsi (Indri, 2022)). Komposisi optimum PVA 3% dengan jumlah 20 mL dan Borat 1% dengan jumlah 5 mL dan variasi CNT (0,001%, 0,005%, 0,01%) dengan jumlah 1 mL untuk menentukan CNT terpilih dilakukan uji karakterisasi dan uji performa. Dari pengujian ini didapatkan data FTIR, data SEM, data WCA, data *swelling ratio*, data *water retention*, dan data biodegradabilitas yang mendukung pemilihan persentase CNT. Didapat persentase CNT 0,01% yang terbaik daripada variasi yang lain.

Setelah mendapatkan persentase CNT terpilih, dibuat lembaran hidrogel dengan komposisi optimum dengan mencampurkan PVA 3% dengan jumlah 20 mL, Borat 1% dengan jumlah 5 mL, massa KCl terpilih yaitu 0,115 gram dan CNT 0,01% dengan jumlah 1 mL (CNT terpilih) dan dicetak dalam cetakan. Kemudian hidrogel [PVA/Borat/CNT-KCl] diuji *release* dan didapatkan data hasil *release*.

4.1.3 Pembuatan dan Pengujian Granula CaCO₃-KCl Terlapisi [PVA/Borat/CNT]

Pada tahap pembuatan granula ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu granula CaCO₃ dan granula CaCO₃-KCl. Pada granula CaCO₃ yang dibentuk pelet dengan tekanan 20 PSi akan diuji dengan uji *release* dan akan didapatkan data dari uji *release* tersebut. Dilanjutkan dengan pembuatan granula CaCO₃-KCl yang dilapisi CNT terpilih (0,01%). Kemudian granula CaCO₃-KCl terlapisi [PVA/Borat/CNT] akan diuji *release* dan didapatkan data dari hasil uji *release* tersebut. Bagan alir penyiapan pembuatan dan pengujian granula CaCO₃-KCl (P=20) terlapisi [PVA/Borat/CNT].

Granula yang dibuat dengan campuran CaCO₃-KCl dilapisi gel dan tanpa dilapisi. Dengan komposisi gel pelapis yaitu [PVA/Borat] dan [PVA/Borat/CNT] (10 mL PVA 3% : 2,5 mL Borat 1% : 0,5 mL MWCNT terpilih yaitu 0,01%). Komposisi perbandingan K₂O : CaCO₃ yaitu masing-masing 10%, 5%, 2,5% (tabel 4.3).

Tabel 4.3. Massa KCl dan CaCO₃ dengan variasi konsentrasi K₂O : CaCO₃

Konsentrasi K ₂ O : CaCO ₃	Massa KCl (gram)	Massa CaCO ₃ (gram)
10%	0,237435	1,35
5%	0,11871	1,425
2,5%	0,059379	1,4625

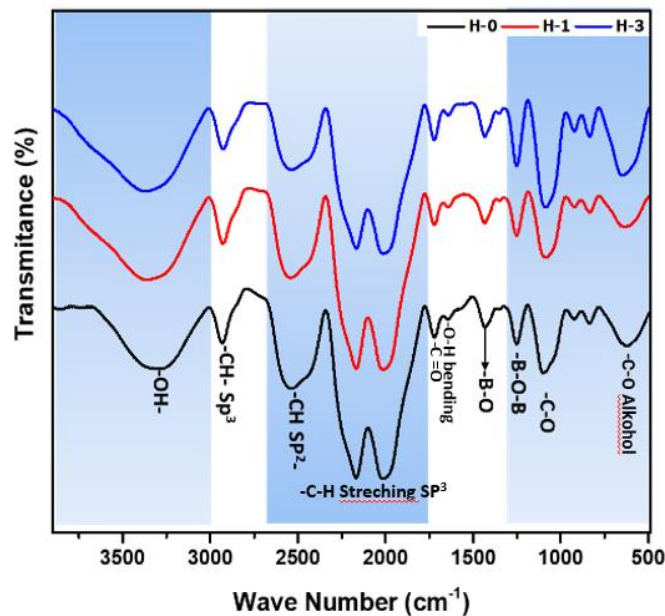
4.2 Karakteristik

Karakterisasi hidrogel bertujuan untuk mengetahui karakteristik hidrogel berupa Interaksi kimia, morfologi struktur, hidrofilisitas, dan uji *release*. Karakterisasi

membran dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR- Shimadzu), *Scanning Electron Microscope* (SEM-Hitachi S-4800), *X-ray Diffraction* (XRD-Rigaku, D-Max 2500).

4.2.1 Interaksi Kimia (FTIR)

Karakterisasi menggunakan instrumentasi FTIR dilakukan terhadap lembaran hidrogel variasi rasio [PVA/Borat] (H-0) dan [PVA/Borat/CNT] (H-1;2;3) pada rentang bilangan gelombang 3900-500 cm^{-1} . Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kimia pada level molekular, dimana intensitas dan posisi dari spektra menunjukkan adanya perubahan kimia dan formasi dari makromolekul. Hasil serapan IR yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 4.1 menunjukkan spektra FTIR dari hidrogel pada berbagai komposisi.



Gambar 4.1. Spektra FTIR hidrogel berbasis [PVA/Borat] dengan variasi MWCNT

Polivinil alkohol merupakan polimer yang bersusun atas polimer yang tersusun atas unit monomer vinil alkohol dengan gugus fungsi utama adalah hidroksil dan alkana. Gugus hidroksil (-OH) adalah gugus fungsi utama dalam polivinil alkohol, yang memberikan sifat hidrofilik yang teramati pada serapan 3297 cm^{-1} . Sementara itu, gugus alkane merupakan bagian dari rantai utama polimer yang terdiri dari karbon dan

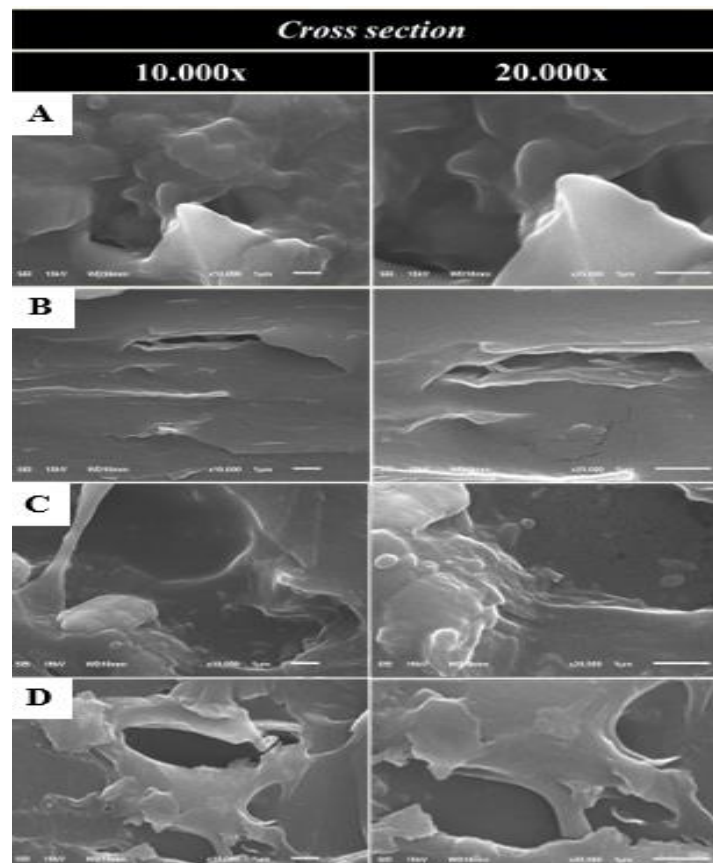
hidrogen, memberikan struktur dasar pada PVA. Lebih lanjut, karakteristik PVA ditandai oleh serapan yang terbentuk pada bilangan gelombang 2926 cm^{-1} , 1713 cm^{-1} , dan 1093 cm^{-1} yang merupakan serapan dari stretching C Sp^3 vibrasi gugus karbonil (C=O), dan stretching gugus ester atau alcohol (C-O). Teridentifikasinya serapan dari gugus karbonil disebabkan oleh proses sintesis PVA yang berasal dari polivinil alcohol yang mengandung gugus asetat. Lebih lanjut, Borat yang berperan sebagai crosslinker pada PVA teridentifikasi pada serapan 1250 cm^{-1} yang merupakan adanya bending B-O-H dari senyawa $\text{B}(\text{OH})_4^-$. Selain itu, reaksi antara PVA dan borat akan menghasilkan ikatan sterching B-O asimetri dan simetri yang diidentifikasi pada bilangan gelombang 1346 cm^{-1} dan $1134; 1003\text{ cm}^{-1}$, secara berturut-turut.

Efek dari Penambahan MWCNT pada hidrogel [PVA/Borat] menyebabkan perubahan intensitas serapan IR pada bilangan gelombang 3300 cm^{-1} menjadi lebih lebar yang berasal vibrasi ulur gugus hidroksil, Kehadiran CNT (Carbon Nanotubes) dapat menyebabkan terbentuknya ikatan hidrogen intermolekuler antara kelompok hidroksil pada matriks polimer dan kelompok fungsional di permukaan CNT. Interaksi ini memperkuat ikatan O-H, yang mengakibatkan puncak penyerapan yang lebih intens di spektrum inframerah. Selain itu, interaksi antara matriks polimer dan CNT dapat meningkatkan integritas struktural keseluruhan dari bahan komposit. Interaksi yang ditingkatkan ini dapat menghasilkan struktur yang lebih teratur, yang pada gilirannya dapat menghasilkan sinyal getaran O-H yang lebih kuat. Penurunan intensitas serapan juga terjadi pada daerah $2521\text{-}2533$ yang mengindikasikan adanya karbonil Sp^2 (Venkatesh *et al.*, 2021). Kenaikan gugus hidroksil yang signifikan setelah penambahan MWCNT dapat meningkatkan kemampuan afinitas polimer air yang menyebabkan peningkatan *swelling ratio* pada hidrogel. Lebih lanjut, perubahan intensitas serapan yang signifikan termatai pada daerah panjang gelombang $1200\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan daerah serapan gugus B-OH yang tumpang tindih dengan C-O. oleh karena itu, interkasi antar matriks [PVA/Borat/CNT] diprediskikan terjadi melalui jembatan B-OH, dimana borat berfungsi maksimal sebagai crosslinker. Selain itu, munculnya perubahan bilangan gelombang dan intensitas puncak tersebut

mengindikasikan adanya interaksi antara MWCNT dengan matriks [PVA/Borat], serta keberhasilan penyisipan MWCNT ke dalam matriks [PVA/Borat].

4.2.2 Morfologi SEM

Pengukuran SEM dilakukan untuk mengetahui struktur morfologi hidrogel [PVA/Borat] sebelum dan setelah penyisipan MWCNT. Morfologi komposit hidrogel pada penampang cross section dan surface disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Morfologi hidrogel berbasis [PVA/Borat] dengan variasi MWCNT pada penampang melintang (A) H-0, (B) H-1, (C) H-2, (D) H-3 yang diukur pada perbesaran 10000x dan 20000x

Berdasarkan Gambar 4.2 pada bagian *cross section*, hidrogel [PVA/Borat] pada dasarnya sudah memiliki ruangan kosong berbentuk macrovoid asimetris untuk sebagai tempat penyimpanan pupuk. Macrovoid yang terbentuk tidak terlalu besar jika

dibandingkan dengan hidrogel yang telah dimodifikasi oleh MWCNT. Macrovoid pada hidrogel terbentuk ketika kompleks [PVA/Borat] mengalami cross-linking yang lebih lanjut sehingga membentuk jaringan polimer tiga dimensi yang mampu menyerap dan menahan air dalam jumlah besar. Selama proses cross-linking ini, air yang terjebak dalam struktur hidrogel berfungsi sebagai media yang mencegah keruntuhan total dari jaringan polimer. Secara mekanisme, Ketika PVA dilarutkan dalam air dan dicampur dengan borat, terjadi interaksi antara gugus hidroksil pada rantai PVA dengan ion borat, membentuk kompleks [PVA/Borat] melalui ikatan hidrogen atau pembentukan ikatan borat yang lebih kuat. Kompleks ini dapat membentuk struktur silang (*cross-linking*) yang mengubah sifat fisik dari PVA, menghasilkan gel yang lebih kental dan kokoh. Terdapat berbagai macam factor yang mempengaruhi proses pembentukan pori pada hidrogel, yaitu konsentrasi matriks, kecepatan pembekuan dan pengeringan, pemisahan fase, suhu, serta aditif atau agen pembentuk pori.

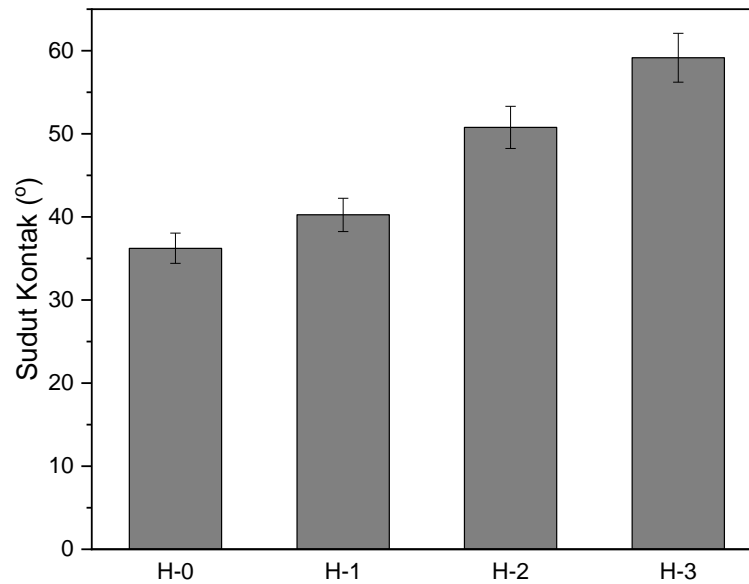
MWCNT digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan karakteristik hidrogel [PVA/Borat]. MWCNT dengan bentuk 3-dimensinya dapat mempengaruhi fleksibilitas rantai polimer dan cara polimer tersebut mengatur struktur, yang juga mempengaruhi pembentukan pori. Lebih lanjut, ketersebaran MWCNT dalam matriks PVA dapat memperkuat ikatan fisik di antara molekul-molekul PVA dan meningkatkan resistensi terhadap deformasi. Pada H-2 dan H-3 macrovoid yang terbentuk memiliki struktur yang terkoneksi satu sama lain yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan kompatibilitas hidrogel PVA. Pada H-1 tidak teramati adanya pori yang terkoneksi satu sama lain serta ukuran pori yang mengecil, hal ini dapat disebabkan oleh interaksi antar matriks yang lebih kuat melalui interaksi van der Waals atau ikatan hidrogen yang dapat memperkuat struktur hidrogel sehingga mengurangi laju pembentukan macrovoid. Selain itu, Penambahan MWCNT dapat meningkatkan viskositas larutan hidrogel [PVA/Borat] sebelum gelasi. Viskositas yang lebih tinggi menghambat pergerakan molekul air dan pembentukan void besar selama proses pembekuan atau pengeringan, yang mengakibatkan pengecilan atau hilangnya macrovoid. Lebih lanjut, Interaksi antara MWCNT dan rantai polimer PVA dapat menyebabkan perubahan dalam

konfigurasi dan mobilitas rantai polimer. Ini dapat menyebabkan pembentukan struktur jaringan polimer yang lebih padat dan teratur, yang pada gilirannya mengurangi ruang kosong atau macrovoid dalam struktur hidrogel.

4.2.3 Hidrofilisitas

Hidrofilisitas merupakan parameter yang diuji pada hidrogel untuk mengetahui sifat hidrasi dari hidrogel tersebut. Pengukuran hidrofilisitas dilakukan dengan cara mengukur sudut kontak hidrogel dengan tetesan air. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan melalui Gambar 4.3.

Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa hidrogel [PVA/Borat] bersifat sangat hidrofilik karena memiliki sudut kontak sebesar $36,23^\circ$. PVA yang memiliki gugus hidroksil menyebabkan hidrogel tersebut menjadi hidrofilik. Namun seiring bertambahnya penambahan MWCNT dapat meningkatkan sudut kontak dimana untuk H-1 ($40,24^\circ$), H-2 ($50,79^\circ$) dan H-3 ($59,15^\circ$) yang berarti bahwa hidrogel tersebut mengalami penurunan hidrofilisitas. Hal ini dikarenakan oleh adanya penyisipan MWCNT yang bersifat hidrofobik sehingga semakin bertambahnya interaksi hidrofobik pada hidrogel tersebut (Jang dkk., 2016). Hidrogel yang bersifat hidrofilik dapat menyerap dan menahan air dalam jumlah besar, sehingga bermanfaat untuk pupuk *slow release* karena memastikan pupuk tetap lembab dan aktif dalam jangka waktu lama, sehingga memberikan pasokan nutrisi yang stabil bagi tanaman (Hou dkk., 2023). Namun material yang sangat hidrofilik akan menyebabkan proses *release* menjadi lebih cepat sehingga penyisipan MWCNT dapat mengontrol sifat hidrofilisitas-hidrofobisitas dari hidrogel yang diharapkan memiliki kemampuan *slow release*.



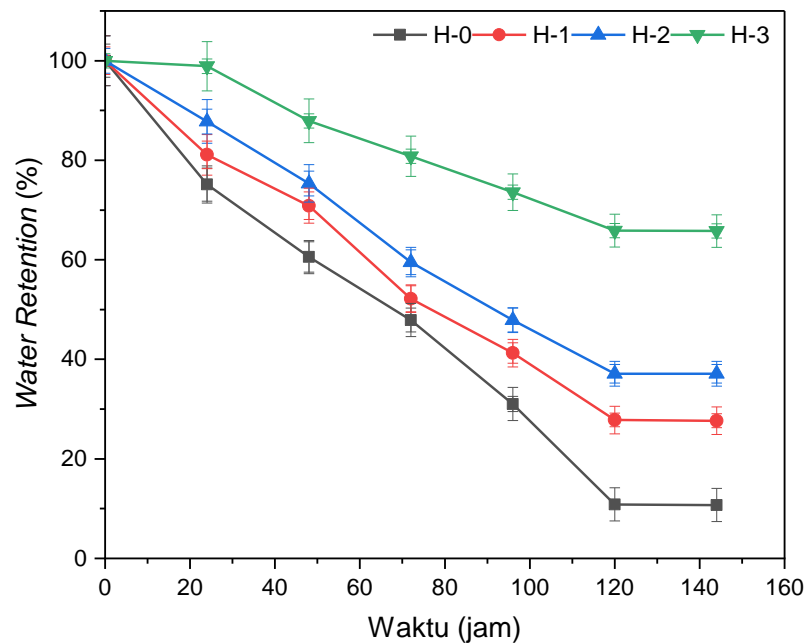
Gambar 4.3 Nilai WCA hidrogel [PVA/Borat] sebelum dan setelah penyisipan MWCNT

4.3 Uji Kinerja

4.3.1 *Water retention*

Water retention dalam hidrogel untuk aplikasi *slow release* sangat penting untuk menjaga kestabilan lingkungan yang memungkinkan pelepasan nutrisi terkontrol. Hasil pengukuran *water retention* ditunjukkan dengan Gambar 4.4. Hidrogel dapat menyerap dan menahan air melalui ikatan hidrogen antara gugus hidrofilik dalam jaringan polimer dan molekul air. Penyerapan ini didorong oleh sifat hidrofilik dari monomer yang digunakan untuk mensintesis hidrogel (Rabat dkk., 2016). Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa H-0 memiliki kemampuan retensi terhadap air yang rendah karena gugus hidroksil pada PVA yang banyak menyebabkan hidrogel tersebut bersifat hidrofilik sehingga tidak mampu menahan air dengan baik namun setelah penambahan MWCNT kemampuan *water retention* hidrogel meningkat, hal ini diakibatkan sifat MWCNT yang hidrofobik sehingga menjadikan hidrogel mampu mempertahankan air dengan baik. Air yang diserap dalam hidrogel dapat diklasifikasikan menjadi air terikat, air setengah terikat, dan air bebas. Air yang terikat akan terikat erat dalam jaringan polimer, sedangkan air yang setengah terikat

akan terikat secara longgar. Air bebas mempunyai mobilitas yang tinggi dan mudah hilang (Rabat dkk., 2016). Pada jam 120 ke 140 perubahan water retention tidak signifikan. *Water retention* yang tidak berubah secara signifikan dari waktu ke waktu menunjukkan bahwa hidrogel masih mempertahankan integritas strukturalnya dan kemampuannya untuk menyerap serta menahan air. Namun, seperti yang dicatat dalam penelitian, hidrogel dapat mengalami degradasi seiring waktu akibat faktor-faktor seperti perubahan tekanan osmotik ionik, yang menyebabkan penurunan bertahap dalam kapasitas penyerapannya terhadap air (Sarhan dkk., 2024).



Gambar 4.4. *Water retention* hidrogel [PVA/Borat] sebelum dan setelah penyisipan MWCNT

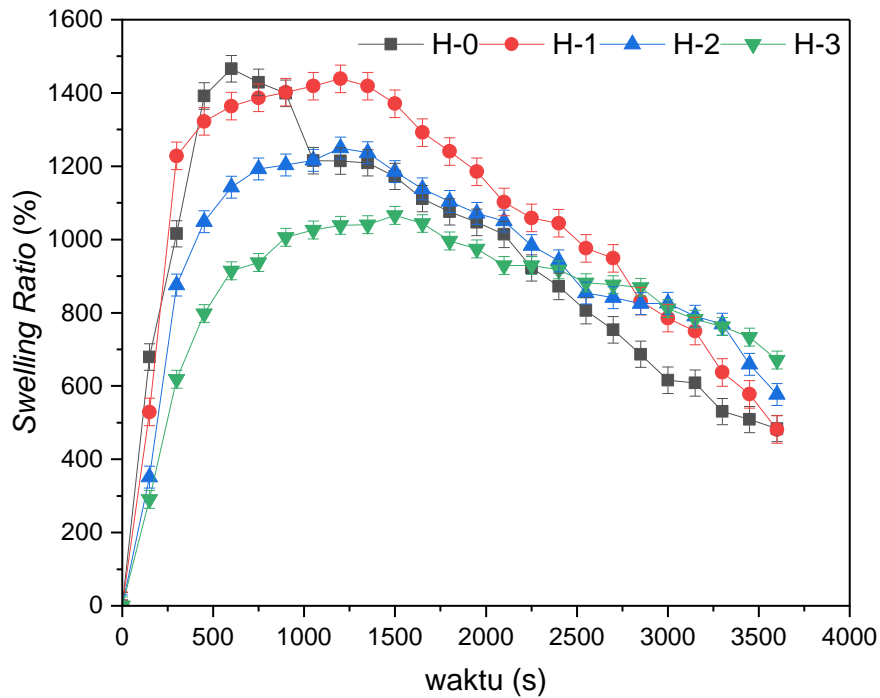
4.3.2 *Swelling ratio*

Swelling ratio merupakan data yang menunjukkan bahwa hidrogel menyerap lebih banyak air dan mengembang lebih besar. Sifat ini sangat penting untuk aplikasi seperti pemberian obat yang terkontrol, retensi air dalam sistem pertanian, dan

penggunaan lain yang mengutamakan pemeliharaan lingkungan yang stabil dan konsisten (Marican dkk., 2020).

Swelling ratio dilakukan dalam uji performa lembaran hidrogel [PVA/Borat] dan [PVA/Borat/CNT] (gambar 4.5). Hasil pengukuran *swelling ratio*. Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa H-0 dapat mengembang dengan cepat karena sifat hidrofilisitas hidrogel namun kemudian meluruh di detik 600 dengan kemampuan mengembang maksimal di 1465%. Hal ini menunjukkan bahwa hidrogel [PVA/Borat] memiliki kemampuan *water uptake* yang tinggi namun memiliki sifat mekanik yang rendah karena hidrogel mengalami abrasi. Penambahan MWCNT pada hidrogel dapat meningkatkan sifat mekanik dari hidrogel karena MWCNT yang memiliki struktur yang terkontrol menyebabkan hidrogel menjadi lebih terstruktur sehingga menyebabkan hidrogel tidak mudah mengalami abrasi.

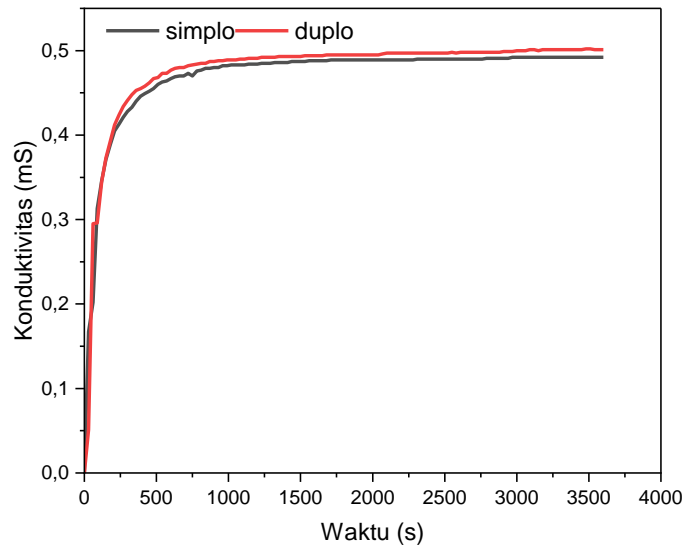
Namun karena sifat hidrofobiknya, penambahan MWCNT terhadap hidrogel menyebabkan kemampuan *water uptake* nya yang rendah (Swikker dkk., 2022). Dimana untuk H-1 mulai meluruh pada detik 1350 dengan kemampuan mengembang maksimal di 1438%, H-2 mulai meluruh pada detik 1350 dengan kemampuan mengembang maksimal di 1237% dan H-3 mulai meluruh di detik 1650 dengan kemampuan mengembang maksimal 1065%. *Swelling ratio* untuk H-3 menjadi yang paling tinggi di detik 3500 dengan nilai *swelling ratio* 733%. H-3 yang cenderung dapat mempertahankan nilai *swelling ratio* nya membuktikan bahwa H-3 memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan hidrogel lainnya.



Gambar 4.5. *Swelling ratio* hidrogel [PVA/Borat] sebelum dan setelah penyisipan MWCNT

4.3.3 *Release behavior*

Release behavior diukur melalui uji *release* KCl pada media aqua-DM dengan melihat perubahan konduktivitas larutan. Hasil uji *release* [PVA/Borat-KCl] ditunjukkan oleh gambar 4.6. dimana setelah dua kali uji hasil menunjukkan bahwa hidrogel tersebut tidak memiliki kemampuan *slow release* terbukti dengan konduktivitas larutan yang sudah tinggi di awal waktu pengujian.



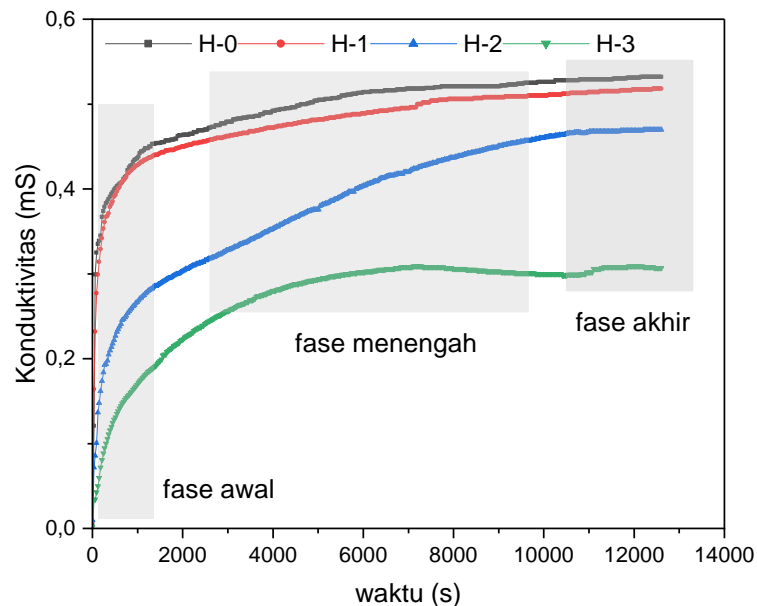
Gambar 4. 6. Uji *release* KCl pada hidrogel [PVA/Borat]

Hasil pengukuran uji *release* [PVA/Borat-KCl] dengan [PVA/Borat/CNT-KCl] ditunjukkan oleh gambar 4.7. Meningkatnya konduktivitas larutan mengindikasikan semakin banyak ion terlarut dalam larutan sehingga dapat dilihat bahwa pada [PVA/Borat], hidrogel mengalami perubahan konduktivitas yang signifikan di detik-detik awal. Pada proses permeasi terjadi dua proses yaitu proses yang terjadi di dalam hidrogel adalah difusi sedangkan proses ketika molekul KCl atau permeal keluar dari hidrogel disebut desorpsi. Pada umumnya selama proses permeasi terjadi 3 fase yaitu fase awal, fase menengah dan fase akhir. Perubahan konduktivitas yang signifikan di awal proses terjadi akibat membran yang baru dipasang pada tabung selongsong baru saja kontak dengan media, konsentrasi KCl yang digunakan cukup tinggi sehingga jumlah ion dalam larutan pun banyak dan juga pada membran masih terdapat pori yang kosong sehingga hidrogel secara cepat menyerap KCl (Khaleghi dkk., 2020). Selain itu hal ini mengindikasikan bahwa hidrogel [PVA/Borat] tidak memiliki kemampuan *slow release*. Hal ini berhubungan dengan *swelling ratio* dari [PVA/Borat] dimana hidrogelnya yang mengalami abrasi di waktu yang singkat sehingga menyebabkan *releasenya* menjadi cepat karena hidrogelnya pecah. Di lain sisi, penambahan MWCNT meningkatkan kemampuan *slow release* hidrogel akibat

sifat mekanik hidrogel yang semakin baik sehingga hidrogel memiliki *water retention* yang baik sehingga lebih mampu mengontrol pelepasan secara lambat (Penyan & Jasim, 2024).

Pada fase menengah, sebagian besar pori membran mulai terisi oleh beberapa ion K^+ dan Cl^- atau molekul KCl yang ditandai dengan adanya perubahan nilai konduktivitas yang kurang signifikan. Tentunya pada fase ini jarak yang ditempuh KCl ketika melewati membran tidak sama karena ketidakseragaman pori membran, ukuran molekul dan ion akan melalui membran, serta polaritas membran dan permeat. Sehingga proses permeasi pun bergantung pada jumlah molekul atau ion pada permukaan membran hidrogel yang kontak langsung dengan media aquades (Khairunnisa, 2019).

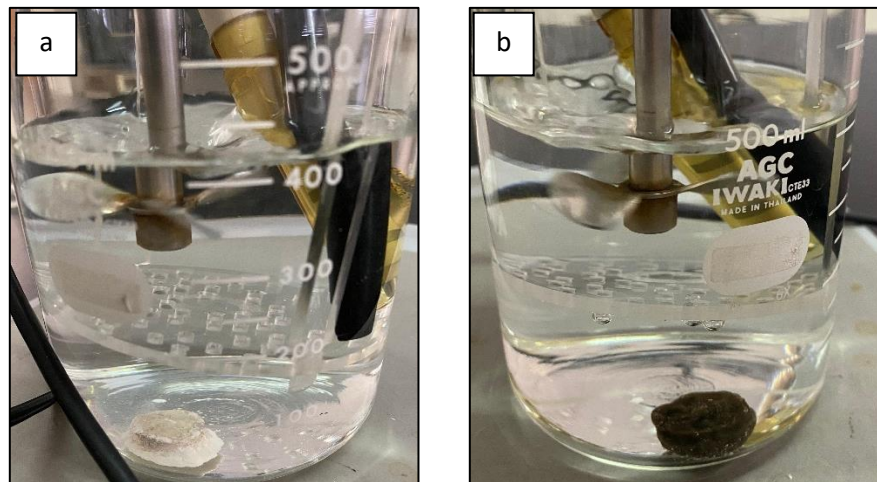
Pada fase akhir menunjukkan pori membran sudah terisi penuh oleh KCl sehingga perpindahan KCl ke media menjadi lebih lambat, sehingga menyebabkan nilai konduktivitas yang relatif konstan. Pada fase akhir ini, nilai konduktivitas tidak menunjukkan kuantitas KCl yang diinjeksikan melainkan kuantitas KCl yang keluar melalui membran.



Gambar 4. 7. Grafik *Release behavior* hidrogel [PVA/Borat-KCl] dan variasi [PVA/Borat/CNT-KCl]

MWCNT dapat mengubah luas permukaan dan distribusi ukuran pori dalam hidrogel, yang mempengaruhi laju difusi nutrisi. Pori-pori yang lebih kecil dapat memperlambat pelepasan nutrisi, sedangkan pori-pori yang lebih besar dapat mempercepat pelepasan nutrisi. Distribusi ukuran pori yang terkontrol ini membantu mencapai pelepasan yang lebih berkelanjutan (Takada, 2020). Dapat dilihat dari fotografer SEM yang telah dibahas sebelumnya bahwa penambahan MWCNT dapat memperkecil pori sehingga kemampuan slow release hidrogel meningkat seiring bertambahnya MWCNT. Hidrogel yang lebih tebal akan memiliki rasio pembengkakannya yang lebih rendah dan permeabilitasnya yang berkurang sehingga cenderung memiliki laju pelepasan yang lebih lambat (Wu dkk., 2020).

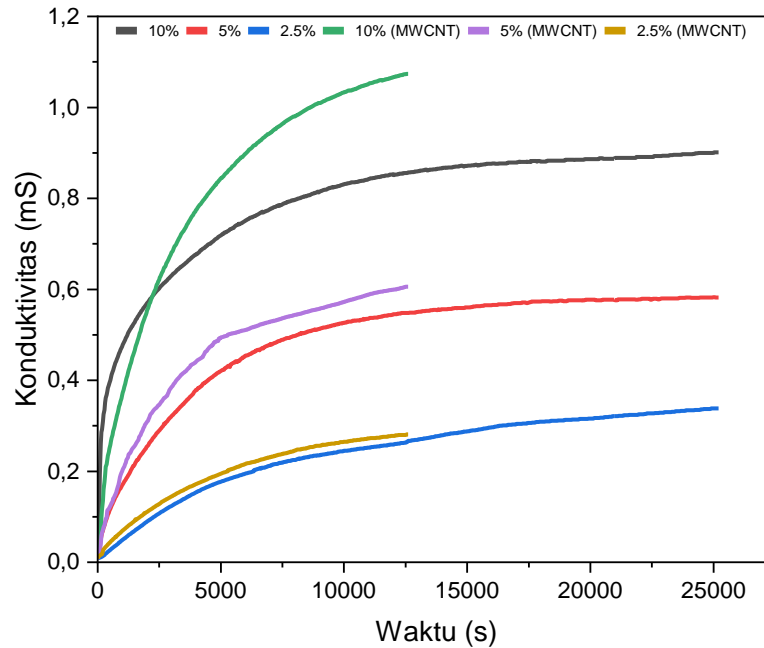
Selain pada hidrogel lembaran, uji *release* juga dilakukan pada hidrogel granula [PVA/Borat/CaCO₃-KCl] dan [PVA/Borat/CNT/CaCO₃-KCl] (gambar 4.8).



Gambar 4.8. Uji *release* granula: (a) [PVA/Borat/CaCO₃-KCl]; (b) [PVA/Borat/CNT/CaCO₃-KCl]

Hasil uji ditunjukkan oleh gambar 4.9. Hasil menunjukkan bahwa penambahan MWCNT sebanyak 0,01% kedalam hidrogel dapat meningkatkan kemampuan *release* CaCO₃-KCl, dimana pada hidrogel tanpa MWCNT menunjukkan konduktivitas yang

tinggi di awal sewaktu pengujian dibandingkan setelah ditambah MWCNT. Selain itu hidrogel [PVA/Borat] mulai luruh di detik 1000 berbeda dengan hidrogel yang telah ditambahkan MWCNT yang tidak meluruh hingga detik 25200. Baik hidrogel berbentuk lembaran maupun berbentuk granula menunjukkan performa yang hampir mirip dimana konduktivitas maksimum larutan berada di 0,2 mS.

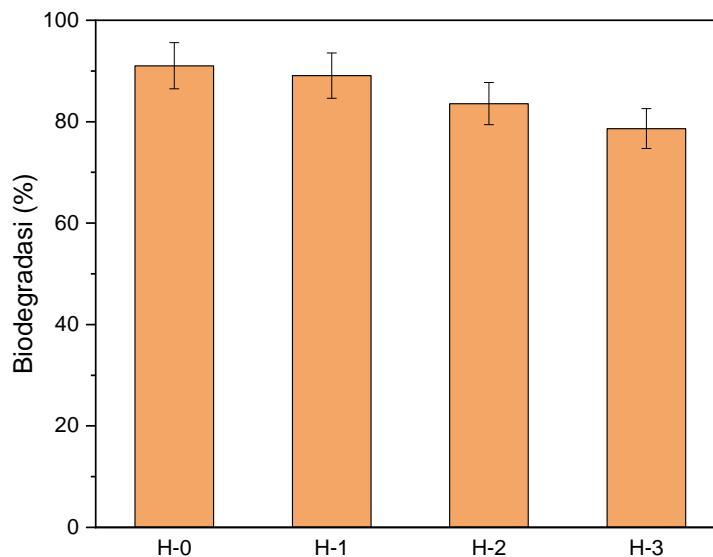


Gambar 4.9. Grafik uji *release* CaCO₃-KCl pada hidrogel [PVA/Borat] dan [PVA/Borat/CNT] pada berbagai konsentrasi CaCO₃-KCl

4.3.4 Biodegradasi

Kemampuan suatu hidrogel dapat terdegradasi merupakan salah satu parameter penting yang perlu diamati. Suatu hidrogel yang berperan sebagai fertilizer harus mudah terdegradasi agar memastikan hidrogel tidak bertahan lama di lingkungan, sehingga mengurangi risiko dampak ekologis jangka panjang. Hal ini sangat penting untuk aplikasi pertanian yang tujuannya adalah meminimalkan kontaminasi lingkungan dan mendorong praktik berkelanjutan (Chamorro dkk., 2024; Tariq dkk., 2023). Selain itu, hidrogel yang dapat terurai dapat melepaskan nutrisi secara terkendali, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi. Ketika hidrogel

terdegradasi, ia melepaskan nutrisi, yang kemudian tersedia bagi tanaman, sehingga mengurangi kebutuhan pemupukan (Jumpapaeng dkk., 2023). Degradasi pupuk hidrogel yang mudah dapat membantu menjaga kesehatan tanah dengan mencegah penumpukan bahan yang tidak dapat terurai secara alami. Hal ini penting untuk kesuburan dan struktur tanah dalam jangka panjang, karena memungkinkan terjadinya proses alami tanah tanpa campur tangan material asing (Turioni dkk., 2021). Uji biodegradasi ini dilakukan melibatkan mikroorganisme yang disebut juga dengan metode bioremediasi. Bioremediasi untuk pupuk hidrogel melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk menguraikan hidrogel atau bahan kimia yang terkandung di dalamnya. Hasil uji biodegradasi hidrogel ditunjukkan oleh gambar 4.10.



Gambar 4.10. Hasil biodegradasi hidrogel oleh lumpur aktif selama 45 hari

Pada grafik terlihat bahwa H-0 lebih mudah terdegradasi (91%) oleh lumpur aktif dibandingkan dengan hidrogel lainnya. Hal ini dikarenakan penambahan MWCNT kedalam hidrogel meningkatkan kestabilan mekanik dari hidrogel sehingga cenderung lebih sulit terurai. Hal ini karena kestabilan mekanik yang lebih tinggi berkorelasi dengan struktur jaringan yang lebih kuat dan padat, yang dapat menahan proses degradasi seperti hidrolisis, pemecahan enzimatik, dan aktivitas mikroba. Hidrogel yang lebih kuat mungkin memerlukan lebih banyak energi atau waktu untuk

terjadinya proses degradasi, sehingga kurang rentan terhadap biodegradasi dibandingkan dengan hidrogel yang lebih lemah dengan struktur yang kurang kuat. Lumpur aktif akan menghidrolisis PVA menjadi monomer-monomernya. Seiring bertambahnya kandungan MWCNT maka hidrogel menjadi lebih sulit terdegradasi dimana untuk H-1 terdegradasi 89%; H-2 terdegradasi 83% dan H-3 terdegradasi 78%. Parameter biodegradasi ini akan mempengaruhi kinerja slow release pada pupuk hidrogel. Dimana apabila material hidrogel mudah terdegradasi oleh lumpur aktif, maka proses slow release akan sulit dicapai karena material hidrogel sudah mengalami degradasi sebelum nutrisi pada pupuk dilepaskan seluruhnya. Namun material yang sulit didegradasi pun akan mempengaruhi faktor lingkungan. Sehingga material pupuk hidrogel yang baik adalah material yang dapat terdegradasi pada waktu yang optimal. Penurunan biodegradasi setelah penambahan MWCNT menunjukkan bahwa pupuk hidrogel dapat melalui proses slow release sebelum hidrogel terdegradasi. Fotograf hidrogel sebelum dan sesudah pengolesan lumpur aktif. Hidrogel mengalami perubahan setelah pengolesan lumpur aktif yang diakibatkan degradasi, dimana H-0, H-1 dan H-2 hidrogelnya berubah menjadi lebih mengkerut sedangkan untuk H-3 tidak berubah secara signifikan baik sebelum maupun sesudah pengolesan lumpur aktif. Dan semua hidrogel yang dioleskan lumpur aktif memiliki bercak dipermukaan lembaran gel hal ini menunjukkan adanya perubahan sebelum dan sesudah pengolesan lumpur aktif.