

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan efisiensi penggunaan pupuk merupakan salah satu tantangan utama dalam pertanian modern yang berkelanjutan. Aplikasi pupuk anorganik secara berlebihan terbukti menimbulkan dampak negatif, termasuk pencemaran air akibat pencucian nutrisi, emisi gas rumah kaca, serta degradasi kualitas tanah (Gregorich *et al.*, 2015; Shaviv *et al.*, 2003). Prasad *et al.* (2017), melaporkan bahwa lebih dari 95% mikronutrien, 50–90% fosfor, dan 80–90% kalium dari pupuk hilang ke lingkungan sebelum dapat diserap tanaman, yang menunjukkan rendahnya efisiensi pemanfaatan pupuk oleh tanaman. Hal ini menyebabkan pemborosan dan kerusakan ekosistem secara jangka panjang.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan ini adalah pengembangan *Slow/Controlled Release Fertilizer* (S/CRF), yaitu sistem pupuk yang mampu melepaskan nutrisi secara bertahap dan terkendali sesuai dengan fase kebutuhan tanaman. Teknologi ini dapat mengurangi frekuensi pemupukan, menurunkan kehilangan nutrisi akibat pencucian, dan meningkatkan efisiensi serapan akar tanaman (Azeem *et al.*, 2014; Trenkel, 2013). Salah satu material utama yang umum digunakan sebagai komponen pelapis dalam sistem S/CRF adalah hidrogel. Hidrogel adalah jaringan polimer hidrofilik tiga dimensi yang mampu menyerap dan menahan air dalam jumlah besar, serta melepaskan pupuk melalui mekanisme difusi terkendali.

Sistem hidrogel berbasis polivinil alkohol (PVA) dan borat merupakan salah satu formulasi yang banyak dikembangkan karena membentuk ikatan silang kompleksasi diol yang stabil, fleksibel, dan tahan terhadap pelarutan langsung. Namun, sistem PVA/borat murni memiliki keterbatasan, terutama dalam hal kapasitas penyerapan air dan biodegradabilitasnya (Guo *et al.*, 2017). Oleh karena

itu, penambahan alginat, sebuah polisakarida alami dari rumput laut coklat telah digunakan sebagai komponen tambahan untuk meningkatkan kapasitas *swelling*, fleksibilitas, serta degradasi biologis dari sistem hidrogel tersebut (El-Zaim & Heggors, 2001; Zhang *et al.*, 2022). Kombinasi antara PVA, borat, dan alginat menghasilkan sistem hidrogel yang memiliki kapasitas retensi air tinggi, struktur fleksibel, serta kemampuan pengendalian pelepasan nutrisi yang efektif, menjadikannya kandidat yang kuat untuk aplikasi S/CRF dalam sistem pertanian tropis.

Penelitian sebelumnya oleh (Idauli, 2024) telah berhasil membuat formulasi hidrogel PVA/B/A untuk aplikasi S/CRF melalui tahap optimasi. Optimasi ini mencakup evaluasi parameter agrokimia seperti *swelling ratio*, *water retention*, dan *water contact angle*, serta karakterisasi lanjutan melalui SEM dan FTIR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan alginat meningkatkan *swelling ratio* hidrogel secara signifikan, memperpanjang *water retention*, dan meningkatkan nilai *water contact angle* yang mengindikasikan penurunan hidrofilisitas permukaan namun tetap mendukung kinerja difusi lambat. Karakterisasi FTIR dan SEM mengkonfirmasi adanya ikatan silang antara PVA, borat, dan alginat, serta pembentukan morfologi lembaran yang efektif dalam melapisi permukaan granula KCl-kalsit. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa proses pelapisan granule oleh hidrogel PVA/B/A yang dikembangkan berhasil memperlambat laju pelepasan KCl secara signifikan dalam media uji air.

Untuk meningkatkan kinerja S/CRF, ditambahkan material *biochar* pada sistem S/CRF. *Biochar* adalah bahan karbon padat hasil pirolisis biomassa pada suhu tinggi dalam kondisi terbatas oksigen. Salah satu karakteristik utama *biochar* adalah struktur berporinya yang kompleks, yang memberikan luas permukaan spesifik tinggi dan volume pori besar, sehingga memungkinkan adsorpsi air dan nutrisi secara efektif (Lehmann & Joseph, 2015). Karakteristik ini menjadikan *biochar* ideal sebagai pembawa atau penyimpan hara dalam sistem pupuk. Selain itu, kemampuan kapasitas tukar kation *biochar* juga mendukung interaksi

elektrostatik dengan ion nutrisi seperti K^+ , sehingga melepaskannya secara lambat ke dalam tanah sesuai kebutuhan tanaman.

Secara lingkungan, *biochar* memiliki stabilitas kimia tinggi, yang berarti material ini tidak mudah terdegradasi, sehingga mampu mempertahankan fungsinya dalam tanah dalam jangka panjang. Hal ini berbeda dengan material organik biasa yang cepat terurai. Selain itu, keberadaan *biochar* dalam tanah mampu meningkatkan aerasi, pH tanah, aktivitas mikroba, dan retensi air, serta mengurangi pencucian nutrisi, terutama pada tanah bertekstur kasar. Studi-studi terdahulu telah menunjukkan bahwa integrasi *biochar* ke dalam sistem pupuk dapat meningkatkan kapasitas retensi air dan pengikatan nutrisi (Lehmann & Rondon, 2006; Liu *et al.*, 2017; Widowati *et al.*, 2014). *Biochar* juga dapat digunakan sebagai strategi mitigasi perubahan iklim, karena bersifat karbon-negatif, yaitu menyimpan karbon secara jangka panjang di dalam tanah (Ali *et al.*, 2025; Gutiérrez *et al.*, 2022; Ighalo *et al.*, 2025; S. Khan *et al.*, 2024). Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan *biochar* bukan hanya sebagai bahan pengisi pasif, melainkan sebagai komponen aktif yang mendukung sistem pengelolaan hara secara efisien dan berkelanjutan.

Biochar yang digunakan pada penelitian ini berasal dari sekam padi, limbah biomassa pertanian yang sangat melimpah di Indonesia. Menurut data FAO, diperkirakan sekitar 150 juta metrik ton sekam padi dihasilkan setiap tahun secara global, berdasarkan produksi gabah dunia sebesar 750 juta metrik ton (FAO, 2021). Sekam padi memiliki kandungan silika dan karbon tinggi, dan melalui proses pirolisis, dapat diubah menjadi *biochar* dengan struktur berpori dan luas permukaan tinggi (Tsai *et al.*, 2006). Karakteristik ini menjadikan *biochar* sekam padi ideal sebagai matriks penyimpanan pupuk dalam formulasi S/CRF.

Kondisi pirolisis yang digunakan untuk mendapatkan *biochar* berbahan sekam padi cukup variatif baik dari suhu, laju, dan waktu pirolisis. Penelitian yang dilakukan Zhang *et al.* (2017) menunjukkan bahwa parameter luas permukaan, total volume pori, dan rerata diameter pori *biochar* yang dihasilkan bergantung kepada

kondisi pirolisis. Untuk pirolisis sekam padi dengan kondisi suhu 400 °C, laju pemanasan 10 °C/menit, selama 1 jam memberikan nilai luas permukaan sebesar 17,92 m²/g, total volume pori sebesar 0,063 cc/g, dan rerata diameter pori sebesar 33,43 nm (Zhang *et al.*, 2017).

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa *biochar* memiliki karakteristik, yakni mampu menyerap sekaligus melepaskan kembali unsur hara yang dikandungnya. Misalnya, penelitian oleh T. An *et al.* (2021) berhasil menunjukkan bahwa *biochar* yang diproses melalui impregnasi dan enkapsulasi mampu melepas fosfat (PO₄³⁻) secara bertahap hingga 53,5% setelah 30 hari, sedangkan *biochar* yang hanya diimpregnasi melepas fosfat hingga 76%. Selanjutnya, Khajavi-Shojaei *et al.* (2023) melaporkan bahwa *biochar* yang diproses melalui impregnasi dan granulasi mampu melepaskan nitrat sebesar 886,4 ppm setelah 24 hari serta ammonium sebesar 1395,5 ppm setelah 28 hari. Cen *et al.* (2021) juga memperlihatkan bahwa *biochar* hasil impregnasi, granulasi, dan enkapsulasi dapat melepaskan nitrogen hingga 70% dalam 12 hari di air dan 25 hari di tanah. Penelitian lain oleh Sepúlveda-Cadavid *et al.* (2021) memperkuat temuan tersebut, dengan menunjukkan pelepasan fosfor sebesar 40% dalam 5 hari dari *biochar* jerami jagung yang terimpregnasi. Bahkan, Kim *et al.* (2014) melaporkan bahwa *biochar switchgrass* yang digranulasi dapat melepaskan kalium dan nitrogen masing-masing hingga 78,87% dan 73,78% dalam 18 hari. Temuan-temuan tersebut secara konsisten membuktikan bahwa *biochar* tidak hanya berfungsi sebagai adsorben nutrisi, tetapi juga dapat berperan sebagai medium pelepasan hara secara bertahap, sehingga relevan untuk pengembangan pupuk pelepasan terkendali. Proses enkapsulasi yang kompleks dan mahal secara signifikan membatasi penggunaan S/CRF berlapis dalam pertanian. Setelah melepaskan nutrisi, umumnya bahan pelapis tetap berada di tanah akibat degradabilitas yang buruk yang dapat menimbulkan ancaman lingkungan. Maka, perlu dikembangkan S/CRF dengan bahan pelapis yang ramah lingkungan, *biodegradable*, dan murah (C. Wang *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, fokus penelitian ini diarahkan pada pengembangan sistem granula yang dimodifikasi dengan penambahan *biochar* sebagai inti aktif. Dalam sistem ini, *biochar* sekam padi terlebih dahulu disisipi KCl melalui metode impregnasi dan di konversi menjadi bentuk granula. Granula *biochar*-KCl yang dihasilkan kemudian dilapisi dengan hidrogel PVA/B/A, membentuk sistem granula berstruktur inti-lapisan (*core-shell*). Lapisan hidrogel berfungsi sebagai pengatur pelepasan ion kalium melalui difusi, sementara *biochar* di dalam inti granula berperan dalam menyerap dan menahan larutan pupuk, sehingga memperlambat pelepasan dari sisi internal. Sistem ini diharapkan mampu memberikan pengendalian pelepasan ganda (internal dan eksternal) yang belum banyak dikembangkan dalam penelitian sebelumnya, memberikan efisiensi pelepasan nutrisi yang lebih baik, meningkatkan efisiensi agronomis, dan mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, rumusan masalah penelitian yang akan dilakukan yaitu:

1. Bagaimana karakteristik fisikokimia *biochar* sekam padi yang dipirolisis pada suhu 400°C?
2. Bagaimana karakteristik fisikokimia hidrogel PVA/B/A?
3. Bagaimana karakteristik fisikokimia granula S/CRF yang terbuat dari campuran *biochar* sekam padi, hidrogel PVA/B/A, dan KCl?
4. Bagaimana performa agrokimia granula S/CRF yang terbuat dari campuran *biochar* sekam padi, hidrogel PVA/B/A, dan KCl?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah disampaikan, tujuan penelitian yang akan dilakukan yaitu:

1. Mengetahui karakteristik fisikokimia *biochar* sekam padi yang dipirolisis pada suhu 400 °C.
2. Mengonfirmasi karakteristik fisikokimia hidrogel PVA/B/A yang akan digunakan sebagai pelapis.
3. Mengetahui karakteristik fisikokimia granula S/CRF, yang meliputi (BC-A-G), (BC-A-GE), (BCI-A-G), dan (BCI-A-GE).
4. Mengetahui performa agrokimia granula S/CRF, yang meliputi (BC-A-GE), (BCI₂₄-A-GE), dan (BCI₄₈-A-GE).

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian yang berjudul “Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Performa *Biochar* Terlapisi Hidrogel PVA/Borat/Alginat Sebagai S/CRF Tersisipi KCl” diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengembangkan material alternatif untuk pertanian, terutama untuk meningkatkan efisiensi pemupukan tanaman.
2. Meningkatkan pemahaman tentang pentingnya makronutrien dan mikronutrien untuk tanaman.
3. Membantu mencegah pencemaran lingkungan dengan membuat *Slow/Controlled Release Fertilizer* dengan menggunakan bahan yang bersifat *biodegradable*.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pupuk lepas terkendali berbasis *biochar*-KCl terlapisi hidrogel PVA/Borat/Alginat, di mana digunakan sekam padi sebagai bahan baku pembuatan *biochar* dan kalium klorida (KCl) sebagai sumber nutrisi utama. S/CRF diformulasikan dalam bentuk granula *biochar*-KCl yang kemudian dilapisi dengan hidrogel PVA/B/A untuk pelepasan nutrisi secara terkendali.

Ruang lingkup penelitian mencakup dua aspek utama, yaitu pengujian karakteristik material dan pengujian performa agrokimia. Pengujian karakteristik material terbagi menjadi tiga yaitu; karakteristik *biochar*, hidrogel, dan granula S/CRF. Pengujian karakteristik *biochar* meliputi analisis komposisi unsur pada *biochar* menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), analisis luas permukaan dan porositas *biochar* menggunakan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET), analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infra-red* (FTIR), serta analisis struktur mikro dan morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengujian karakteristik hidrogel dan granula S/CRF meliputi analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infra-red* (FTIR) dan biodegradabilitas untuk menilai tingkat degradasi granula S/CRF di lingkungan tanah.

Selanjutnya, pengujian performa agrokimia dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas granula S/CRF sebagai sistem pelepasan nutrisi terkendali. Parameter yang diuji meliputi *swelling ratio* untuk mengukur kapasitas pembengkakan, *water absorbance* untuk mengukur kapasitas penyerapan/penampungan air, *water retention* untuk mengetahui kemampuan mempertahankan air, dan *release behavior* untuk mengevaluasi profil pelepasan KCl dalam media air dan tanah dalam jangka waktu tertentu.

Penelitian ini dibatasi pada pengujian laboratorium untuk karakterisasi material dan performa agrokimia granula S/CRF. Penelitian tidak mencakup uji biologis langsung pada tanaman atau pengujian di lapangan sebenarnya. Selain itu, hidrogel PVA/B/A yang digunakan pada penelitian ini telah di optimasi dengan berbagai parameter agrokimia (*swelling ratio*, *water retention*, dan *water contact angle*) dan di karakterisasi (SEM dan FTIR) merujuk pada penelitian sebelumnya, sehingga tidak dilakukan pada penelitian ini. Dengan fokus ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem pupuk lepas terkendali yang efisien dan ramah lingkungan.