



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI HIDROGEL POLIAKRILAMIDA
BERPORI UNTUK PENYERAPAN DAN PELEPASAN UREA**

TESIS

**FARIDA LAILA
0806421754**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM MAGISTER KIMIA
DEPOK
2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI HIDROGEL POLIAKRILAMIDA
BERPORI UNTUK PENYERAPAN DAN PELEPASAN UREA**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister sains

**FARIDA LAILA
0806421754**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
DEPOK
2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Farida Laila

NPM : 0806421754

Tanda Tangan



Tanggal : ... 6-1-2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Farida Laila
NPM : 0806421754
Program Studi : Magister Kimia
Judul Tesis : Sintesis dan Karakterisasi Hidrogel Poliakrilamida Berpori untuk Penyerapan dan Pelepasan Urea

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Endang Asijati, MSc

Pembimbing II : Dr. Helmiyati, M.Si

Penguji : Prof. Dr. Soleh Kosela, M.Sc

Penguji : Dr. Ir. Antonius Herry Cahyana

Penguji : Dr. rer. nat. Widayanti Wibowo

Penguji : Dr. Yuni Krisyuningsih Krisnandi, M.Sc.

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 6-01-2011

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains Jurusan Kimia pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Endang Asijati, MSc, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Dr. Helmiyati, M.Si, selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam menyelesaikan tesis ini.
- (3) Prof. Dr. Zairin Junior, M.Sc, Direktur Direktorat Program Diploma IPB, yang telah mengizinkan saya melanjutkan pendidikan dan memfasilitasi keperluan penelitian saya.
- (4) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material; dan
- (5) Sahabat-sahabat di Diploma IPB dan UI yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Penulis

2010

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Farida Laila
NPM : 0806421754
Program Studi : Magister Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : FMIPA
Jenis karya : Tesis

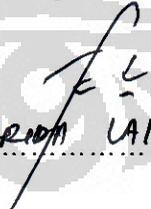
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul : *Sintesis dan Karakterisasi Hidrogel Poliakrilamida Berpori untuk Penyerapan dan Pelepasan Urea*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 06-01-2011

Yang menyatakan


(FARIDA LAICA)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Pupuk dan air adalah faktor utama penentu hasil pertanian, sehingga penggunaan sumber air dan pupuk secara efisien mutlak diperlukan. Pupuk berperan penting dalam meningkatkan produktivitas hasil komoditi pertanian. Akan tetapi penggunaan bahan-bahan agrokimia, seperti pupuk dan pestisida yang berlebihan dapat mencemari tanah, air, tanaman dan sungai atau badan air. Menurut Wu dan Liu (2008), sekitar 40-70% nitrogen yang diberikan melalui pemberian pupuk tidak diserap oleh akar tanaman dan diserap oleh lingkungan. Hal ini secara ekonomi merugikan dan menyebabkan pencemaran lingkungan (Mingyu,2005). Masalah lain adalah banyak daerah pertanian berlokasi di daerah yang mengalami kekurangan air saat musim kemarau, tetapi tidak dapat menyimpan air saat musim penghujan karena tidak tersedianya waduk atau penampungan air. Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah ini diperlukan suatu media yang selain dapat menyediakan air juga secara bersamaan dapat mengendalikan pelepasan pupuk.

Penelitian-penelitian yang dilakukan untuk mengatasi masalah penyerapan dan pelepasan pupuk adalah dengan melapisi pupuk, yaitu pupuk sebagai inti dilapisi dengan bahan-bahan inert. Pelepasan pupuk dikendalikan dengan difusi melalui pelapis. Bahan-bahan yang sering digunakan adalah bahan-bahan anorganik seperti sulfur, fosfat dan silikat serta bahan-bahan organik seperti polietilen, polivinil klorida dan poli(asam laktat) dan wax (Rui dan Liu, 2006). Akan tetapi, masalah yang dapat terjadi dengan penggunaan pupuk bersalut, diantaranya sulit untuk mengendalikan laju pelepasan pupuk yang berakibat jumlah nutrien yang dilepaskan tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman. Demikian juga dengan biaya pelapisan pupuk yang lebih tinggi dibandingkan pupuk konvensional (Zheng *et al*, 2008).

Perkembangan teknologi polimer telah berhasil mengembangkan suatu jenis hidrogel superabsorben makromolekul yang disebut Polimer superabsorben

(SAPs) yang mampu menyerap dan menahan sejumlah besar air bahkan di bawah tekanan. Teknologi ini telah di uji coba sebagai media penyimpan air pada pertanian di daerah kering atau gurun (Sannino, 2008).

Hidrogel umumnya berupa jaringan komposit dua fase yang merupakan polimer hidrofilik sintetis atau alami yang mampu berinteraksi kuat secara intra dan intermolekular dengan dirinya sendiri dan dengan air dan umumnya dikendalikan oleh struktur dan jumlah air yang berada di dalam hidrogel. Oleh karena itu, karakteristik hidrogel dilengkapi dengan kapasitas pengembangan (*swelling*), kinetika *swelling* dan kekuatan mekanis (Omidian dan Park, 2010).

Pada tahun 1998, diperkenalkan hidrogel superpori (SPHs) sebagai bentuk lain sistem polimer penyerap air. SPHs adalah polimer hidrofilik dengan struktur ikat silang yang mampu menyerap sejumlah besar air atau fluida berair 10-1000 kali massa/volume awalnya dengan waktu relatif pendek bergantung proses pembuatan dan bahan-bahan yang digunakan selama pembuatannya, sedangkan SAPs dapat menyerap air dalam satu menit sampai berjam-jam. Laju pengembangan yang cepat pada SAPs disebabkan oleh ukuran sampel SAPs yang kecil, sedangkan laju pengembangan SPHs relatif cepat dan tidak tergantung ukuran hidrogel (Omidian *et al*, 2004). Bergantung pada ukuran pori rata-rata, hidrogel berpori disebut makropori (50 μm sampai beberapa mm) atau mikropori (1-50 μm). Teknik-teknik pembentukan pori hidrogel yang dapat dilakukan antara lain *freeze-drying*, porogenasi, pembentuk mikroemulsi dan pemisahan fase. Akan tetapi, cara yang paling praktis sampai saat ini adalah dengan teknik memasukkan gas yang terbentuk dari reaksi senyawaan bikarbonat dan asam (Omidian and Park, 2010).

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan dalam penggunaan hidrogel untuk penyerapan dan pelepasan pupuk diantaranya oleh Mahdavinia *et al* (2009) yang telah mensintesis hidrogel poliakrilamida berpori dan diaplikasikan untuk pelepasan lambat KNO_3 . Sifat hidrogel yang dapat menyerap air juga telah diteliti agar dapat menyerap larutan urea konsentrasi tinggi seperti yang telah dilakukan Zheng *et al* (2008). Pupuk jenis ini lebih mudah dibuat dan lebih mudah mengontrol pelepasan pupuk sesuai kebutuhan tanaman. Umumnya hidrogel yang

sudah dipasarkan untuk pertanian berasal dari akrilamida karena dianggap dapat tetap aktif untuk jangka waktu lebih lama (Jhurry, 1997).

Urea merupakan pupuk yang paling banyak digunakan di dunia pertanian untuk meningkatkan produksi tanaman. Rendahnya efisiensi penyerapan pupuk oleh tanaman memerlukan pemberian pupuk secara terkendali untuk mencegah hilangnya bahan aktif pupuk ke lingkungan. Untuk itu diperlukan suatu media yang dapat dimanfaatkan dalam pertanian yang memiliki daya serap air dan pupuk yang besar dengan laju pengembangan yang tinggi dan dapat melepaskan pupuk secara terkendali. Hidrogel poliakrilamida diketahui mempunyai karakteristik dapat menyerap air dan pupuk secara bersamaan. Oleh karena itu perlu disintesis hidrogel yang dapat menyerap air dan urea sebesar-besarnya, stabil dan dapat melepaskan pupuk secara terkendali.

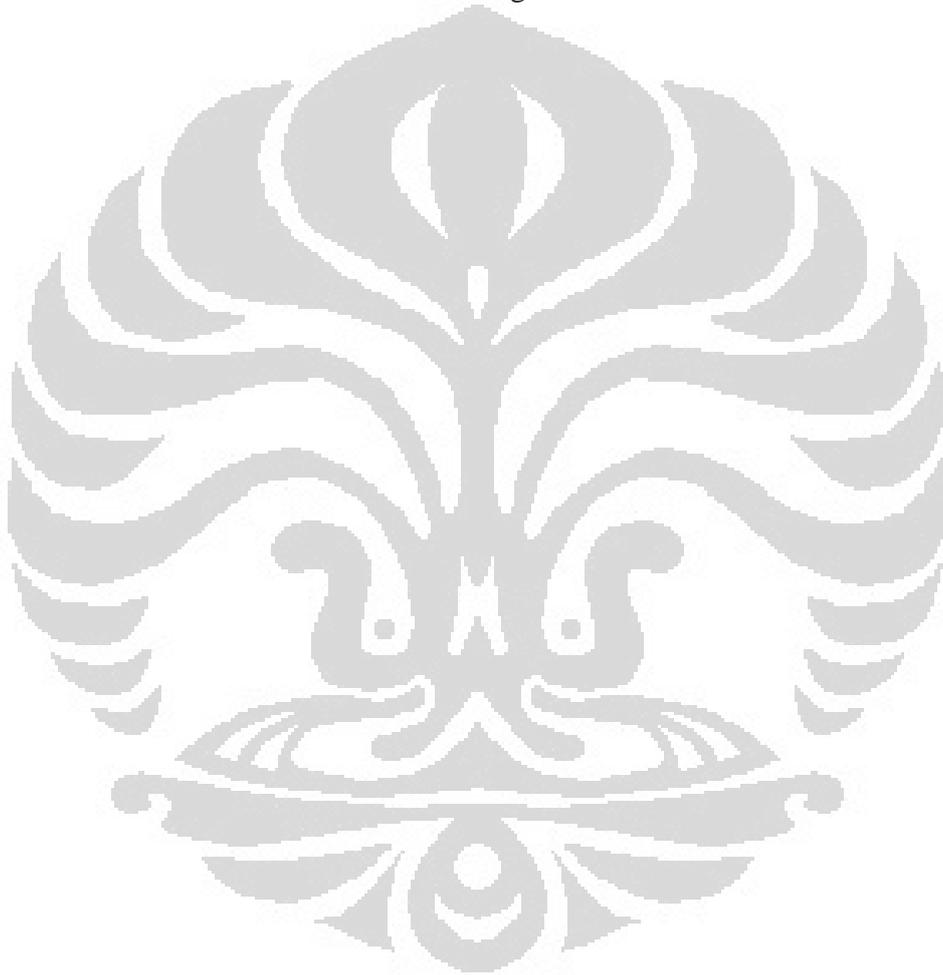
Pada penelitian ini disintesis hidrogel berpori poliakrilamida melalui polimerisasi larutan menggunakan monomer larut dalam air akrilamida. Polimerisasi berlangsung melalui radikal bebas dengan bantuan bahan pengikat silang N,N' metilen bis akrilamida serta amonium persulfat dan natrium bisulfit sebagai inisiator dan aktivator redoks. Pembentukan pori dihasilkan oleh CaCO_3 dalam matrik hidrogel yang selanjutnya direaksikan dengan asam menghasilkan gas CO_2 yang akan membentuk struktur hidrogel berpori. Pengaruh komposisi dan porositas hidrogel dipelajari terhadap penyerapan dan pelepasan urea.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan hidrogel poliakrilamida berpori yang stabil, dapat menyerap sejumlah besar urea dan air dengan cepat dan melepaskan urea dan air secara terkendali sehingga dapat digunakan sebagai media tanaman.

1.4 Hipotesis

1. Massa CaCO_3 yang ditambahkan pada proses polimerisasi poliakrilamida mempengaruhi porositas hidrogel yang terbentuk.
2. Struktur dan komposisi bahan pembentuk matrik hidrogel mempengaruhi laju dan kapasitas penyerapan urea serta pelepasan urea.
3. Laju penyerapan dan pelepasan urea dipengaruhi oleh mekanisme difusi dan konsentrasi urea dalam hidrogel.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

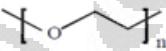
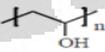
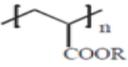
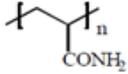
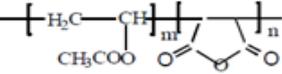
2.1 Polimer di Bidang Pertanian

Pemanfaatan polimer alami maupun sintetik di bidang pertanian telah banyak dilakukan. Polimer yang digunakan dapat digolongkan ke dalam polimer yang larut dan tidak larut dalam air membentuk gel bergantung pada tujuan pemanfaatannya (Jhuury 1997).

2.1.1. Polimer Larut dalam Air

Polimer jenis ini pertama kali dikembangkan terutama untuk membentuk agregat dan menstabilkan tanah, mencegah erosi dan meningkatkan perkolasi. Polimer yang digunakan berupa homopolimer dan kopolimer yang memiliki struktur rantai lurus seperti poli(etilen glikol), poli(vinil alkohol), poliakrilat, poliakrilamida dan poli(vinil asetat-alt-maleat anhidrida). Polimer-polimer ini memiliki struktur rantai lurus seperti diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Contoh Jenis Polimer Rantai Lurus

Nama Polimer	Rumus Struktur
Poli(etilen glikol)	
poli(vinil alkohol)	
Poliakrilat	
Poliakrilamida	
poli(vinilasetat-alt-maleat anhidrida)	

Polimer-polimer tersebut, kecuali poli(etilen glikol) disintesis melalui polimerisasi radikal bebas monomernya. Poli(etilen glikol) diturunkan dari industri petroleum sehingga mudah diperoleh dengan harga murah. Poliakrilamida adalah satu polimer yang paling banyak digunakan sebagai pengkondisi tanah atau *soil conditioner*. Beberapa tahun ini, kopolimer akrilamida/akrilat mendapat perhatian besar karena menunjukkan hasil yang paling efektif dalam meningkatkan sifat fisiko-kimia tanah. Poliakrilamida juga telah digunakan dengan dikombinasikan dengan polisakarida alami untuk tujuan mengkondisikan tanah (Jhuury, 1997).

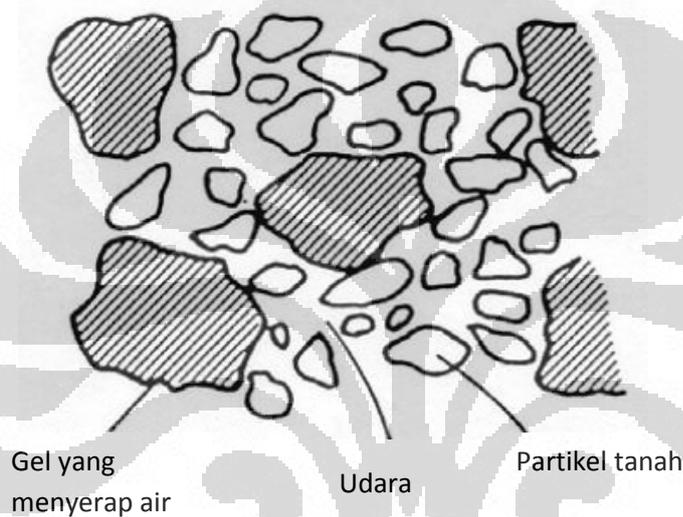
2.1.2. Polimer-Polimer Pembentuk Gel

Kelas kedua polimer yaitu berupa polimer pembentuk gel atau polimer tak larut air yang dapat menyerap air dan pertama kali diperkenalkan untuk penggunaan di bidang pertanian pada awal 1980-an. Polimer jenis ini tidak memiliki struktur rantai linear tetapi berupa rantai ikat silang membentuk jaringan tiga dimensi. Pengikatan silang terjadi ketika polimerisasi berlangsung dengan adanya sejumlah kecil senyawa divinil. Bergantung dari kondisi sintesis, jenis dan densitas ikatan kovalen yang membentuk ikat silang, polimer ini dalam air dapat menyerap sampai 1000 kali beratnya dan membentuk gel. Tiga jenis utama hidrogel yang telah dikembangkan sebagai polimer pertanian antara lain : (1) kopolimer cangkok kanji (*starch-graft*) yang diperoleh dari polimerisasi cangkok poliakrilonitril ke dalam kanji diikuti dengan saponifikasi unit akrilonitril (2) poliakrilat terikat silang dan (3) poliakrilamida terikat silang dan kopolimer akrilat-akrilamida terikat silang dengan persentase terbesar unit akrilamida. Umumnya hidrogel yang dipasarkan untuk pertanian berasal dari akrilamida karena dianggap dapat tetap aktif untuk jangka waktu lebih lama (Jhurry, 1997).

2.2 Kegunaan Polimer Hidrogel di Bidang Pertanian

Penggunaan hidrogel di bidang pertanian telah dilaporkan dapat meningkatkan jumlah kelembaban tersedia dalam zona akar sehingga memberikan waktu interval lebih lama antara irigasi. Poliakrilamida terikat silang dapat menahan air sampai 400 kali beratnya dan melepaskan 95% air yang tertahan dalam granul untuk menumbuhkan tanaman. Sannino (2008) telah mencoba

mengaplikasikan hidrogel untuk pelepasan air dan nutrisi untuk pertanian dan hortikultura pada tanah kering dan gurun. Hidrogel dalam bentuk serbuk dicampur dengan pupuk kemudian dicampurkan dengan tanah di dekat jalur tanaman. Hidrogel ternyata menyerap air dan mengembang, melepaskan air dan nutrisi serta menjaga kelembaban tanah atau substrat untuk waktu lebih lama. Hidrogel yang dimensinya meningkat setelah pengembangan akan meningkatkan porositas tanah dan menyediakan oksigenasi lebih baik ke dalam akar seperti ditunjukkan pada Gambar 1 .



Gambar 1. Pengembangan Hidrogel dalam tanah

Penggunaan polimer sebetulnya tidak mengurangi jumlah air yang digunakan oleh tanaman, kapasitas menahan air bergantung pada tekstur tanah, jenis hidrogel dan ukuran partikel (tepung atau granul), salinitas larutan tanah dan keberadaan ion-ion. Poliakrilamida terikat silang dapat menahan air sampai 400 kali beratnya dan melepaskan 95% air yang tertahan dalam granul untuk menumbuhkan tanaman. Secara umum, derajat ikat silang yang tinggi mengakibatkan bahan mempunyai kapasitas menyerap air yang relatif rendah. Selain itu, kapasitas menahan air akan menurun secara signifikan jika sumber irigasi mengandung garam terlarut yang tinggi atau yang berasal dari garam-garam pupuk. Jumlah air yang tertahan juga dipengaruhi oleh adanya ion-ion (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+}) yang ada dalam air. Kation-kation divalen ini menghasilkan interaksi kuat dengan gel polimer dan mampu menggantikan molekul-molekul air.

Hidrogel juga dianggap dapat mengurangi tercucinya pupuk (Wang dan Gregg 1989).

2.3 Pupuk Lepas lambat dan Lepas Terkendali

Teknologi pelepasan lambat dan terkendali dalam bidang pertanian termasuk pelepasan nutrien-nutrien tanaman seperti pupuk bertujuan untuk memaksimalkan efisiensi penggunaan pupuk, meminimalkan pengaruh negatif akibat kelebihan dosis dan juga memperpanjang waktu pelepasan pupuk (Zahrani, 2000). Istilah pupuk lepas lambat dibedakan dengan lepas terkendali. Pupuk lepas lambat melibatkan pelepasan nutrien yang lebih lambat daripada pupuk biasa, akan tetapi laju, jenis dan durasi pelepasan tidak dikendalikan dengan baik. Pada pupuk lepas terkendali, faktor-faktor yang mempengaruhi jenis dan durasi pelepasan pupuk diketahui dan dikendalikan. Pupuk lepas lambat dan lepas terkendali sangat dipengaruhi oleh kondisi penanganan seperti penyimpanan, transportasi dan distribusi dalam lingkungan serta kondisi tanah seperti kelembaban, pH, pembasahan dan pengeringan dan aktivitas biologi (Shaviv, 2005).

Pupuk lepas lambat dan lepas terkendali secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis (Shaviv 2005), yaitu :

- Senyawa organik-N kelarutan rendah, yang dapat dibagi menjadi senyawa yang terurai secara biologi, umumnya berupa produk kondensasi urea-aldehid, seperti urea-formaldehid (UF), dan senyawa terurai secara kimia seperti isobutiledenediurea (IBDU).
- Pupuk yang memiliki penghalang secara fisika untuk mengendalikan pelepasan. Pupuk jenis ini dapat berupa inti atau granul yang disalut oleh polimer hidrofobik atau berupa matrik dimana bahan aktif larut terdispersi ke dalam suatu rangkaian kesatuan (*continuum*) yang menghalangi larutnya pupuk. Pupuk bersalut dapat dibedakan lebih jauh menjadi pupuk yang dilapisi polimer organik baik berupa termoplastik atau resin, serta pupuk yang dilapisi bahan-bahan organik seperti sulfur atau mineral. Bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan matrik dapat dibedakan menjadi bahan

hidrofobik seperti poliolefin, karet dan sebagainya, serta polimer-polimer pembentuk gel (hidrogel) yang secara alami bersifat hidrofilik dan mengurangi larutnya pupuk yang mudah larut dikarenakan pengembangan yang tinggi. Gel berbasis matrik sampai saat ini masih dalam pengembangan (Shaviv 2005). Penelitian-penelitian yang telah dilakukan diantaranya oleh Mahdavinia et al (2009) telah mensintesis hidrogel poliakrilamida berpori dan diaplikasikan untuk pelepasan lambat KNO_3 . Sifat hidrogel yang dapat menyerap air juga telah diteliti agar dapat menyerap larutan urea konsentrasi tinggi seperti yang telah dilakukan Zheng et al (2008). Pelepasan urea dari hidrogel adalah melalui perbedaan konsentrasi antara bagian dalam dan luar hidrogel sebagai tanggapan terhadap kebutuhan nutrient oleh tanaman. Pupuk jenis ini lebih mudah dibuat dan lebih mudah mengontrol pelepasan pupuk sesuai kebutuhan tanaman.

2.4 Polimer Superabsorben (SAPs)

Hidrogel atau umumnya disebut *Superabsorbent Polymers* (SAPs) adalah jaringan polimer hidrofilik yang mampu menyerap air lebih dari seratus kali beratnya dan tidak mudah lepas meski diberi tekanan. Superabsorben telah mendapat perhatian besar pada beberapa dekade terakhir karena dapat diaplikasikan pada berbagai bidang diantaranya pada produk *hygiene*, bidang pertanian dan sistem pelepasan obat. Pada awalnya, bahan penyerap air untuk bidang pertanian disintesis melalui pencangkokan (*grafting*) monomer-monomer hidrofil pada kanji dan polisakarida-polisakarida lain. Pada dua dekade terakhir, superabsorben alami secara perlahan digantikan oleh superabsorben sintesis yang dapat digunakan dalam jangka waktu lebih lama serta memiliki kapasitas penyerapan air dan kekuatan gel yang lebih tinggi. Pada bidang kesehatan, polimer yang digunakan terutama berasal dari asam akrilat dan garamnya, sedangkan pada bidang pertanian bahan yang digunakan umumnya akrilamida (Kabiri et al 2003).

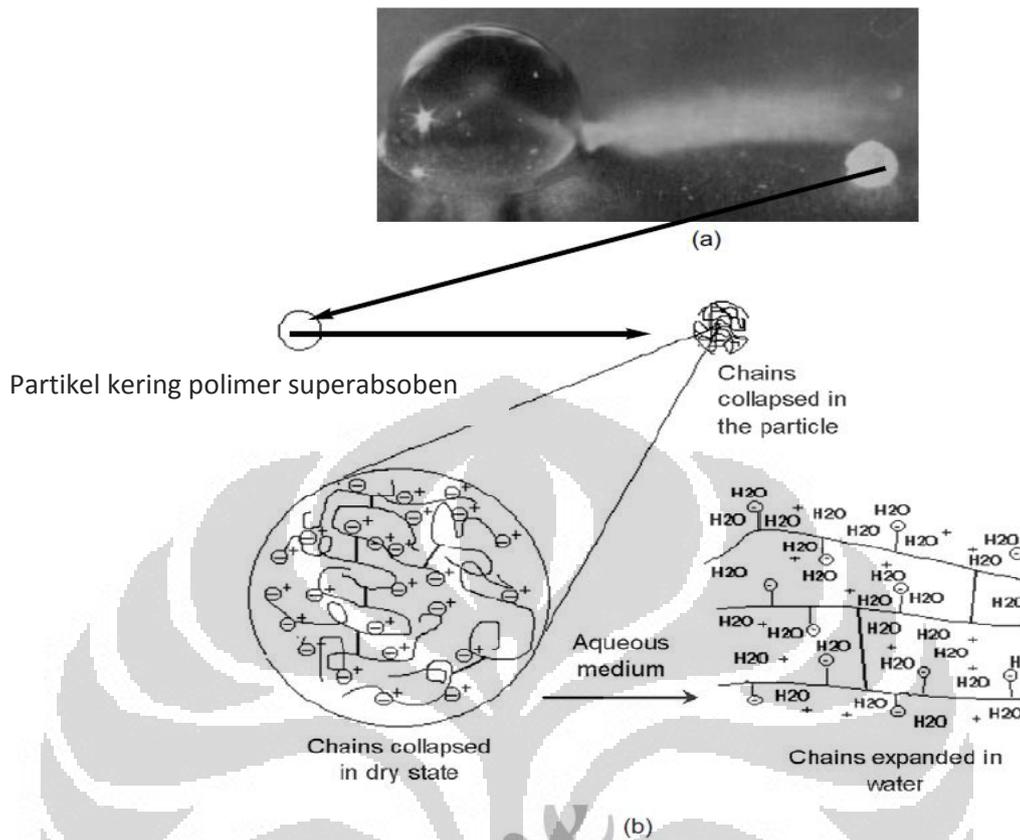
Polimer superabsorben (SAPs) mampu menyerap sejumlah besar air atau fluida 10-10000 kali berat keringnya. Laju pengembangan (*swelling*) SAPs mulai dari satu menit sampai berjam-jam bergantung pada proses pembuatan dan bahan

yang digunakan. Kecepatan pengembangan terutama disebabkan ukuran SAPs yang kecil (Omidian *et al*, 2005).

Pengembangan hidrogel ditentukan oleh keseimbangan hidrofil-liofil (HLB) hidrogel yaitu fungsi dari jumlah dan sifat gugus fungsi, gugus samping serta ion-ion. Semakin tinggi nilai HLB hidrogel, maka struktur hidrogel semakin hidrofil dan akibatnya pengembangannya juga tinggi. Saat nilai HLB hidrogel naik, afinitas terhadap molekul air meningkat dan menyebabkan kenaikan jumlah air terikat di dalam struktur hidrogel (Omidian dan Park, 2010).

Sifat hidrofilik gel meningkat dengan adanya gugus polar yang dapat bersifat non ionik (-OH, -O-, -NH₂, -CONH-, -CHO) atau ionik (-SO₃H, -COOH, -COONa, -COONH₄, -NR₂HX dan sebagainya) (Dafader *et al*, 2009). Hidrogel dapat menyerap sejumlah besar air dan larutan berair lainnya melalui solvasi molekul-molekul air pada ikatan hidrogennya tanpa melarutkan, meningkatkan entropi jaringan yang membuat hidrogel mengalami pengembangan (*swelling*) sangat besar. Faktor-faktor yang menentukan daya serap polimer adalah tekanan osmotik, pergerakan ion-ion berlawanan serta afinitas antara elektrolit polimer dan air. Sebaliknya, faktor yang dapat menekan daya serap hidrogel ditentukan oleh elastisitas gel yang dihasilkan dan struktur jaringannya (Zahuriaan *et al*, 2008).

Ilustrasi visual superabsorben hidrogel dalam bentuk kering dan setelah menyerap air diberikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi bahan polimer superabsorben (a) perbandingan visual satu partikel polimer superabsorben dan bentuk kering (kanan) dan mengembang (kiri). (b) gambar polimer superabsorben yang mengandung air (Omidian *et al*, 2004).

2.4 .1 Superabsorben Superpori (SPHs)

Pada tahun 1998, diperkenalkan hidrogel superpori (SPHs) sebagai bentuk lain sistem polimer penyerap air. SPHs adalah polimer hidrofilik dengan struktur ikat silang yang mampu menyerap sejumlah besar air atau fluida berair 10-1000 kali massa/volume awalnya dengan waktu relatif pendek bergantung proses pembuatan dan bahan-bahan yang digunakan selama pembuatannya, sedangkan SAPs dapat menyerap air dalam satu menit sampai berjam-jam. Laju pengembangan yang cepat pada SAPs disebabkan oleh ukuran sampel SAPs yang kecil, sedangkan laju pengembangan SPHs relatif cepat dan tidak tergantung ukuran hidrogel (Omidian *et al*, 2004). Secara termodinamika, hidrogel sebagai sistem dibutuhkan untuk merespon terhadap sekeliling, yaitu air atau medium berair. Pada aplikasi yang membutuhkan laju difusi yang cepat diperlukan

penambahan fase lain terhadap komposit. Hal ini dapat dicapai dengan memasukkan udara ke dalam hidrogel. Hal ini disebabkan hidrogel mengalami absorpsi atau desorpsi di dalam fluida yang mengelilinginya, sehingga tanggapan hidrogel adalah proses perpindahan massa yang ditentukan oleh difusi solven dan relaksasi rantai polimer. Udara menyediakan jalur perpindahan tambahan atau jalur difusi ke dalam struktur hidrogel yang akan mempercepat difusi atau proses perpindahan. Udara menggantikan beberapa bagian hidrogel yang bertanggung jawab terhadap sifat mekanis dan swelling hidrogel. Saat jalur difusi menjadi lebih dekat, proses perpindahan massa menjadi lebih cepat. Udara di dalam hidrogel membentuk pori pada struktur hidrogel (Omidian dan Park, 2010). Pori di dalam struktur hidrogel bertindak sebagai reservoir eksternal dengan kemampuan menahan air lebih besar. Air yang berada pada pori tidak terikat pada struktur dan dapat dengan mudah keluar dibawah tekanan. Air bebas ini juga melunakkan struktur hidrogel karena berkurangnya padatan dalam gel. Baik kapasitas pengembangan maupun laju pengembangan dipengaruhi oleh jumlah udara dalam hidrogel. Faktor penting lain adalah ukuran pori dan distribusi pori. Untuk memperoleh respon homogen oleh seluruh matrik hidrogel, pori harus monodispersi atau berukuran sama. Akan tetapi, pada teknik pemasukkan gas akan sulit dicapai. Karena reaksi *foaming* akan terjadi setelah pembentukan gel, pembentukan pori akan bergantung pada ukuran partikel CaCO_3 , dispersi CaCO_3 , dan medium reaksi.

Hidrogel berpori dibuat menggunakan beberapa teknik, seperti *freeze drying*, porogenasi, pembentukan mikroemulsi dan pemisahan fase. Baik SAPs maupun SPHs mempunyai struktur berpori, namun terdapat perbedaan seperti terlihat pada Tabel 2 (Omidian *et al*,2004).

Tabel 2. Gambaran Umum SAPs dan SPHs

	SAPs	SPHs
Monomer-monomer umum digunakan	Akrilamida, asam akrilat, garam asam akrilat termasuk natrium dan kalium akrilat	Akrilamida, asam akrilat, garam dan ester asam akrilat termasuk natrium dan sulfopropil akrilat, 2-hidroksietil metakrilat
Metode sintesis	bulk, larutan suspensi terbalik	Umumnya larutan berair
Sistem inisiasi	Termal, redoks	Umumnya redoks
Struktur pori	Acak tertutup sampai sel semiterbuka	Sel terbuka interkoneksi
Produk akhir	Partikel	Partikel, lembaran, lapisan, batang
Mekanisme absorpsi air	Difusi (tinggi), kapiler (rendah)	Difusi (rendah), kapiler (tinggi)
Ketertarikan swelling terhadap ukuran	Tergantung ukuran	Tidak tergantung ukuran
Jenis air terabsorpsi	Terikat	Bebas
Kapasitas swelling bebas	Sangat tinggi	Sangat tinggi
Mempertahankan air dibawah tekanan	Tinggi	Rendah

[Sumber Omidian *et al* 2004]

*air dalam struktur hidrogel dapat diklasifikasikan menjadi, air terikat, semiterikat dan air bebas. Air terikat tertarik kuat pada struktur hidrogel, air bebas dapat keluar dari gel dengan mudah bahkan dibawah tekanan rendah

Pembentukan pori hidrogel yang paling sederhana adalah dengan menggunakan teknik Gelembung *Gas*. Teknik ini menyebabkan terjadinya pembentukan gelembung gas yang terdispersi ke dalam polimer untuk menghasilkan struktur berpori. Gelembung gas dapat dibentuk oleh *foaming/blowing agent* melalui reaksi kimia, atau dilepaskan dari campuran gas-polimer sebelum jenuh pada tekanan tinggi. Agen pembentuk gas adalah zat yang dicampurkan ke dalam prepolimer dan menghasilkan gas ketika terurai secara kimia. Pembentuk pori yang paling umum digunakan adalah natrium bikarbonat yang mampu menghasilkan CO₂ dalam larutan sedikit asam. Sebagai contoh, natrium bikarbonat telah digunakan untuk membentuk hidrogel asam akrilat-akrilamida berpori melalui pengikatan silang asam akrilat dan akrilamida dengan N,N'-metilenbisakrilamida. Hidrogel yang dihasilkan menunjukkan struktur interkoneksi dengan ukuran pori antara 100 sampai 250 µm dan rasio *swelling* saat kesetimbangan 100% (Anabi *et al*, 2010).

Amonium bikarbonat merupakan agen pembentuk gas lain yang telah digunakan untuk menghasilkan pori di dalam hidrogel melalui penguraian menjadi CO₂ dan NH₃. Sebagai contoh, amonium bikarbonat ditambahkan selama irradiasi natrium karboksimetilselulosa dan poliakrilamida untuk menghasilkan pori. Data menunjukkan kenaikan rasio *swelling* yang besar dibandingkan dengan hidrogel

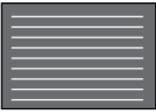
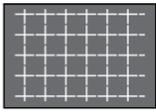
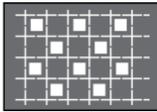
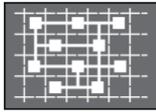
yang dibuat tanpa agen pembentuk gas. Metode ini merupakan teknik yang tidak mahal sebagai bahan pembentuk pori hidrogel. Bahan pembentuk pori yang digunakan relatif aman dan teknik ini dapat digunakan tanpa menggunakan pelarut organik dan cocok untuk aplikasi teknik jaringan (Anabi *et al*, 2010).

2.5 Laju Pengembangan (*Swelling*) Superabsorben

Kinetika dan proses absorpsi merupakan faktor penting yang perlu diketahui untuk aplikasi hidrogel. Menurut Fatima (2001), proses penyebab terjadinya pengembangan pada polimer yaitu: (1) Difusi molekul air ke dalam struktur polimer; (2) Relaksasi atau perenggangan rantai polimer yang terhidrasi dengan ekspansi struktur polimer dalam air disekitarnya. Sifat pengembangan cukup beragam bergantung proses mana yang menjadi penentu mekanisme proses. Sorpsi dan difusi pelarut ke dalam polimer telah diteliti secara luas baik dari pandangan teori maupun eksperimen. Teknik pengembangan (*swelling*) secara umum menggunakan metode untuk menentukan sejumlah koefisien seperti koefisien difusi, sorpsi dan permeabilitas. Dalam percobaan penentuan daya mengembang, polimer dengan ukuran tertentu dimasukkan ke dalam suatu pelarut, kemudian massa pelarut yang terserap polimer versus waktu di catat. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti membran pertukaran ion, sistem pelepasan terkendali, pelapisan, pembuatan microchip dan sebagainya (Katoch, 2010).

Parameter utama yang mempengaruhi laju ekspansi dan relaksasi rantai polimer pada tahap awal pengembangan adalah jenis polimer (pengaruh interaksi dalam rantai), gugus fungsi (interaksi air-polimer), pengeringan, pengikatan silang dan porositas. Salah satu bagian penting dalam mendesain hidrogel adalah dengan membuat hidrogel dengan laju swelling cepat termasuk hidrogel superpori dan generasi polimer superabsorbent yang dimodifikasi (Omidian & Park (2008). Gambaran umum struktur hidrogel yang berbeda diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Antara Beberapa Jenis Hidrogel

				
Jenis hidrogel	Non-ikatsilang	Ikat silang tak berpori	Ikat silang berpori	Ikat silang superpori
porositas	tak berpori	nanopori	makropori	makropori interkoneksi
ikatan rantai	kuat	lemah	lebih lemah	paling lemah
Difusi air	lambat	cepat	sangat cepat	ultra cepat
waktu kapasitas swelling	rendah	tinggi	tinggi	tinggi
ketahanan terhadap permeasi air	tinggi	rendah	rendah	sangat rendah
laju swelling	lambat	cepat	sangat cepat	ultra cepat

Sumber : Omidian & Park (2008)

Hidrogel yang akan digunakan untuk keperluan praktis membutuhkan selain kapasitas mengembang yang besar, juga laju pengembangan yang cepat. Berdasarkan penelitian, kinetika pengembangan absorben sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kapasitas pengembangan, ukuran partikel, luas permukaan dan komposisi polimer. Pengaruh parameter-parameter ini terhadap kapasitas pengembangan telah banyak diteliti. Misalnya, ketergantungan daya serap air polimer superabsorbent terhadap ukuran partikel diteliti oleh Omidian et al (2006). Hasil penelitian menunjukkan saat ukuran partikel lebih kecil, laju penyerapan meningkat. Hal ini dapat disebabkan kenaikan luas permukaan dengan semakin kecilnya ukuran sampel (Sadeghi 2007).

Pada studi pendahuluan mengenai laju pengembangan hidrogel, dapat digunakan model berdasarkan Voigt dengan memplot data pengembangan menjadi persamaan :

$$S_t = S_{maks}(1 - e^{-t/\tau}) \dots \dots \dots (1)$$

- Keterangan :
- S_t = Swelling pada waktu t menit (g/g)
 - S_{maks} = Swelling saat kesetimbangan (g/g)
 - τ = parameter laju (menit)

Laju pengembangan diperoleh dari harga τ . Semakin rendah harga τ , maka laju pengembangan hidrogel semakin cepat.

Proses relaksasi polimer dapat mengikuti kinetika orde satu. Proses relaksasi orde satu yang saat rantai polimer merenggang dan mengalami difusi ke dalam larutan berair mengendalikan laju pengembangan yang diberikan pada Persamaan :

$$\text{laju pengembangan} = \frac{dS}{dt} = k(S_{maks} - S(t)) \dots \dots \dots (2)$$

Pada kinetika orde satu, laju *swelling* pada setiap waktu sebanding dengan kandungan air sebelum kesetimbangan penyerapan air (S_{maks}) tercapai. S_{maks} dan $S(t)$ adalah rasio pengembangan pada tiap waktu t , dibawah kondisi eksperimen. Koefisien laju reaksi orde satu (atau relaksasi) k bergantung pada koefisien difusi rantai polimer dan ukuran partikel. Integrasi pada seluruh waktu pengembangan menghasilkan persamaan (3) :

$$S(t) = S_{maks}(1 - e^{-kt}) \dots \dots \dots (3)$$

Koefisien laju k bergantung pada panjang subrantai elastis (antara ikat silang) serta menurun dengan naiknya panjang rantai antar ikat silang (misalnya penurunan kerapatan ikat silang) dan juga menurun dengan naiknya radius partikel. Dengan mengintegrasikan persamaan antara $t=0$ sampai t dan $S=0$ sampai S , diperoleh persamaan berikut :

$$\ln \frac{S_{maks}}{S_{maks} - S} = k_1 t \dots \dots \dots (4)$$

Jika proses *swelling* superabsorbent mengikuti kinetika orde satu, plot pada variasi $\ln(S_{maks}/S_{maks}-S_t)$ sebagai fungsi waktu memberikan garis lurus.

2.6 Laju Pelepasan Bahan Aktif

Sistem pelepasan terkendali yang ideal harus mengendalikan laju dengan durasi yang diinginkan. Pada matrik polimer hidrofilik, pengembangan dan pelepasan bahan aktif dari polimer terjadi secara simultan dan berpengaruh terhadap laju pelepasan secara keseluruhan. Pelepasan bahan aktif dari matrik hidrofilik telah diketahui menunjukkan profil kebergantungan terhadap waktu. (Gohel *et al*, 2000). Mekanisme pelepasan bahan aktif dari matrik hidrofilik dapat

dipelajari menggunakan sejumlah model kinetika, diantaranya kinetika orde nol, orde satu dan model Higuchi (Shoaib, 2006).

Pelepasan dari hidrogel menggunakan model kinetika orde nol dinyatakan dengan menggunakan persamaan :

$$Q_0 - Q_t = k_0 t \dots\dots\dots(5)$$

Penataan persamaan (5) diperoleh :

$$Q_t = Q_0 + k_0 t \dots\dots\dots(6)$$

Dimana Q_t adalah jumlah urea yang larut pada waktu t , Q_0 adalah jumlah awal urea dalam larutan, dan k_0 adalah konstanta laju orde nol pelepasan yang dinyatakan dalam satuan konsentrasi/waktu. Kinetika pelepasan urea diperoleh dengan memplot Q_t terhadap waktu t .

Persamaan orde satu juga telah banyak digunakan untuk menggambarkan absorpsi dan atau pelepasan obat dan pupuk. Pelepasan dengan mengikuti kinetika orde satu dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \dots\dots\dots(7)$$

dimana k_1 adalah konstanta laju orde satu dalam satuan waktu⁻¹. Persamaan (7) dapat dinyatakan menjadi :

$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t \dots\dots\dots(8)$$

C_0 adalah konsentrasi awal bahan. Data yang diperoleh diplot antara $\ln C$ terhadap waktu t sehingga diperoleh kemiringan k .

Metode Higuchi merupakan contoh model matematik pertama yang dibuat untuk tujuan pelepasan obat dari sistem matrik diusulkan oleh Higuchi tahun 1961 (Suvakanta Dash *et al*, 2010). Model ini berdasarkan hipotesis bahwa

- (i) konsentrasi awal obat dalam matrik lebih tinggi daripada kelarutan obat,
- (ii) difusi obat hanya terjadi dalam satu dimensi, (iii) partikel-partikel obat lebih kecil daripada ketebalan sistem (iv) pengembangan matrik dan pelarutan diabaikan (v) difusivitas obat konstan.

Higuchi mencoba menghubungkan laju pelepasan obat terhadap konstanta fisik berdasarkan hukum difusi sederhana yang diberikan pada persamaan berikut :

$$Q = [D(2C - C_s)C_s t]^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

Simbol Q adalah jumlah obat yang dilepaskan per satuan waktu, C adalah konsentrasi awal obat, C_s adalah kelarutan obat dalam media matrik, dan D adalah difusifitas molekul-molekul dalam matrik bahan. Bentuk yang disederhanakan dari persamaan (9) adalah :

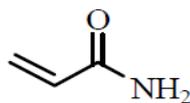
$$Q = K_H t^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

Q adalah konsentrasi dan k_H adalah konstanta pelarutan. Data yang diperoleh diplot sebagai persen pelepasan obat terhadap akar kuadrat t (Suvakanta Dash *et al*, 2010).

2.7. Sintesis Poliakrilamida

2.7.1 Monomer

Sejumlah monomer terutama akrilat dapat digunakan untuk membuat polimer superabsorben. Asam akrilat dan garamnya atau garam-garam kalium dan akrilamida banyak digunakan dalam industri pembuatan polimer superabsorben (Omidian *et al*, 2004). Monomer yang dipergunakan untuk mensintesis poliakrilamida adalah monomer akrilamida yang larut dalam air. Akrilamida (2-propenamida) adalah padatan kristalin berwarna putih dengan titik leleh 84,5 °C. Akrilamida larut dalam banyak pelarut polar termasuk aseton, etanol, asetonitril dan air tetapi tidak larut dalam pelarut non polar seperti CCl_4 . Sebanyak 215,5 gram akrilamida dapat larut dalam 100 mL air pada 30 °C. Senyawa akrilamida mempunyai mobilitas tinggi dalam tanah dan air tanah serta mudah terurai. Akrilamida mengandung dua gugus fungsi yaitu ikatan rangkap C=C dan gugus amida. Struktur akrilamida dapat dilihat pada Gambar 3 (Berihie, 2006).



Gambar 3. Struktur Akrilamida

Akrilamida merupakan monomer difungsi yang sangat menarik karena mengandung suatu ikatan rangkap dan suatu gugus amida dan dapat bersifat asam maupun basa lemah. Jika dibandingkan dengan monomer-monomer vinil lain,

akrilamida mempunyai stabilitas thermal yang baik dan tahan lama. Akrilamida hanya berubah menjadi sedikit kekuningan setelah tiga minggu penyimpanan pada 50 °C dan bahkan setelah 24 jam pada 80 °C (sedikit di bawah titik lelehnya). Sampel murninya menunjukkan sedikit atau tidak adanya pembentukan polimer (Berihie, 2006).

2.7.2 Polimerisasi Akrilamida

Poliakrilamida dapat disintesis dari monomer larutan encer akrilamida dalam air (1-10%), agen pengikat silang metilen bisakrilamida (5-20% dari akrilamida), katalis radikal bebas persulfat dan suatu amina tersier (umumnya TEMED, tetrametilendiamina) sebagai aktivator. Aktivator menyebabkan terurainya katalis untuk menghasilkan radikal bebas yang memicu polimerisasi. Senyawa-senyawa bifungsional N,N'-metilenbisakrilamida (MBA) seringkali digunakan sebagai bahan pengikat silang yang larut dalam air. Etilen glikoldimetakrilat (EDGMA), 1,1,1-trimetilpropanatriakrilat (TMPTA), dan tetraaliloksi etana (TAOE) berturut-turut merupakan bahan pembuat ikat silang dua, tiga dan empat fungsional (polifungsional) (Omidian *et al*, 2004).

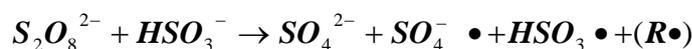
Akrilamida berpolimerisasi dengan cepat dalam bentuk radikal bebas melalui induksi radikal bebas polimerisasi akrilamida yang diikuti oleh mekanisme proses polimerisasi klasik vinil melibatkan inisiasi, propagasi dan terminasi. Mekanisme dasar melibatkan polimerisasi radikal bebas akrilamida diberikan pada Gambar 4.



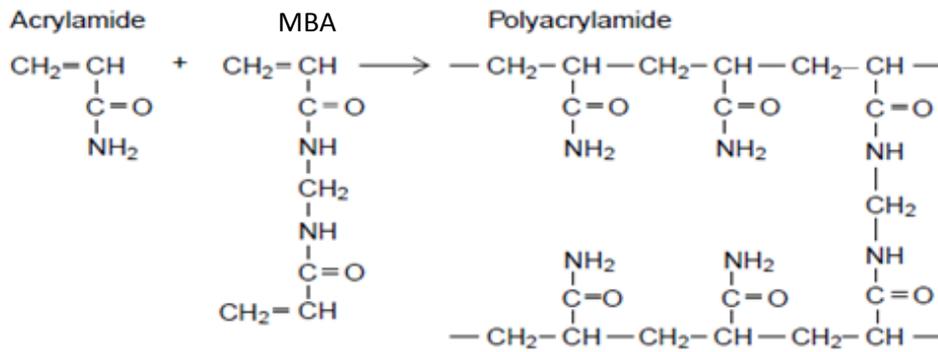
Gambar 4. Mekanisme Polimerisasi radikal bebas Akrilamida

Reaksi polimerisasi poliakrilamida terikat silang yang terjadi adalah :

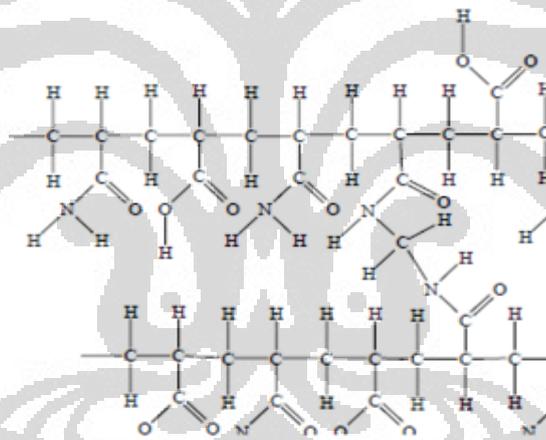
1. Radikal bebas dihasilkan dari reaksi redoks :



2. Pengikatan silang akrilamida dan MBA :



Ketika dua rantai yang terpisah terbentuk dan masing-masing bergabung dengan ujung berlawanan dari bisakrilamida yang sama, maka kedua rantai menjadi terikat dan terbentuk jaringan dengan kerapatan ikat silang yang bergantung pada rasio bisakrilamida terhadap akrilamida (Calvert 2000). Struktur poliakrilamida ikat silang diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur kimia gel poliakrilamida.

2.8. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Polimerisasi Akrilamida

2.8.1. Kemurnian Pereaksi-Pereaksi pembentuk Gel

Pereaksi-pereaksi pembentuk gel antara lain monomer, akrilamida dan bis akrilamida serta inisiator. Akrilamida adalah komponen yang paling banyak dalam larutan monomer. Akibatnya, akrilamida dapat menjadi sumber utama dari pengotor. Pengotor-pengotor dalam monomer akrilamida adalah :

1. Asam akrilat. Asam akrilat adalah produk deamidasi akrilamida. Asam akrilat akan berkopolimerisasi dengan akrilamida dan bis, menghasilkan sifat tukar ion pada gel yang dihasilkan. Hal ini dapat menyebabkan perubahan pH lokal

di dalam gel. Dalam akrilamida, asam akrilat harus dibawah 0,001 % (w/w) yang dapat ditentukan dengan titrasi langsung dan didukung dengan pengukuran konduktivitas dan pH.

2. Poliakrilamida linear. Kontaminan dengan sifat katalitik dapat menyebabkan terjadinya autopolimerisasi selama produksi, proses atau penyimpanan akrilamid murni. Hal ini menghasilkan poliakrilamida linear dalam monomer kering. Poliakrilamida linear akan mempengaruhi polimerisasi karena bertindak sebagai suatu inti polimerisasi. Pengaruh yang paling penting adalah hilangnya reproduibilitas dalam porositas gel. Poliakrilamida linear yang dideteksi harus < 0,005 % (w/w) .
3. Pengotor Ionik. Pengotor ionik dapat menjadi inhibitor dan akselerator polimerisasi. Disamping asam akrilat, pengotor ionik yang paling umum adalah logam seperti tembaga yang dapat menghambat polimerisasi gel. Pengotor ionik terdeteksi secara tidak langsung melalui pengaruhnya terhadap polimerisasi kimia dan fotokimia dan melalui pengukuran konduktivitas larutan monomer.

2.8.2 Konsentrasi Monomer

Pada hidrogel yang terdiri atas akrilamida (AM) dan N',N-metilenbis akrilamida atau MBA, konsentrasi monomer pada prakteknya berkisar antara 3%T - 30%T. Persen T menyatakan total larutan monomer (akrilamida dan MBA). Semakin tinggi konsentrasi monomer, semakin cepat polimerisasi terjadi. Persen T (%T) dinyatakan sebagai massa total akrilamida (AM) dan pengikat silang (MBA) sebagai persen volume total larutan V_{sol} (b/v) (Calvert 2008) :

$$\%T = \frac{m_{Am} + m_{BIS} (g)}{V_{sol} (mL)} \times 100$$

Konsentrasi relatif pengikat silang MBA (b/b) sebagai fraksi %T dinyatakan sebagai %C, dengan rumus perhitungan :

$$\%C = \frac{m_{BIS} (g)}{m_{Am} + m_{BIS} (g)} \times 100$$

2.8.3 Jenis dan Konsentrasi Inisiator

Inisiator merupakan penentu polimerisasi. Laju polimerisasi tergantung pada konsentrasi inisiator, demikian juga sifat-sifat gel yang dihasilkan. Kalium persulfat dan amonium persulfat merupakan inisiator termal yang larut dalam air yang umum digunakan dalam polimerisasi (Omidian *et al*, 2004). Radikal Amonium persulfat mengkonversi monomer akrilamida menjadi radikal bebas yang bereaksi dengan monomer-monomer tidak aktif untuk memulai reaksi polimerisasi rantai. Selanjutnya, rantai polimer secara acak berikatan silang dengan MBA menghasilkan gel dengan porositas karakteristik yang bergantung pada kondisi polimerisasi dan konsentrasi monomer (Menter, 2000).

Peningkatan konsentrasi inisiator (misalnya amonium persulfat dan N,N,N',N'-tetrametilendiamin (TEMED)) menyebabkan penurunan panjang rata-rata rantai polimer dan menaikkan turbiditas gel serta menurunkan elastisitas gel. Pada kasus khusus, inisiator berlebih dapat menghasilkan larutan gel yang sama sekali tidak berpolimerisasi. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya rantai polimer yang sangat pendek sehingga tidak terjadi pembentukan gelatin dan polimer tetap berada dalam larutan. Satu satunya indikasi bahwa reaksi telah terjadi adalah peningkatan viskositas (Menter 2000).

2.8.4. Suhu

Kontrol suhu berperan penting pada polimerisasi akrilamida. Suhu mempunyai efek langsung terhadap laju pembentukan gel. Reaksi polimerisasi juga bersifat eksotermik. Akibatnya, panas yang dihasilkan memacu reaksi lebih cepat, sehingga gelatin biasanya terjadi sangat cepat saat polimerisasi dimulai. Temperatur juga mempengaruhi sifat gel, sebagai contoh, polimerisasi pada 0–4°C menghasilkan gel yang keruh, berpori, gel tidak elastik dan reproduibilitas sulit tercapai. Sifat ini dapat diakibatkan kenaikan ikatan hidrogen monomer pada temperatur rendah. Gel yang diperoleh pada polimerisasi dengan temperature 25°C lebih transparan, kurang berpori dan lebih elastis. Akan tetapi, jika temperatur polimerisasi terlalu tinggi, akan terbentuk polimer rantai rendah dan gel yang dihasilkan tidak elastis. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kenaikan terminasi rantai polimer pada temperatur tinggi (Menter 2008).

2.8.5 Oksigen

Pembentukan gel poliakrilamida terjadi melalui polimerisasi radikal bebas. Oleh karena itu reaksi polimerisasi dapat dihambat oleh setiap unsur atau senyawa yang dapat bertindak sebagai penangkap radikal bebas. Oksigen merupakan salah satu inhibitor. Adanya oksigen di udara, terlarut dalam larutan gel atau diadsorpsi pada permukaan plastik, karet dan sebagainya akan menghambat dan bahkan dapat mencegah polimerisasi akrilamida. Oleh karena itu, salah satu langkah penting dalam preparasi gel poliakrilamida adalah dengan “*degassing*” larutan gel menggunakan gas inert seperti helium, argon atau nitrogen (Menter 2008).



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini disintesis hidrogel poliakrilamida berpori melalui polimerisasi larutan menggunakan monomer akrilamida yang larut dalam air melalui polimerisasi radikal bebas dengan agen pengikat silang N,N'-metilen bis akrilamida serta amonium persulfat sebagai inisiator dan natrium bisulfit sebagai aktivator redoks. Pembentukan pori dihasilkan melalui penambahan CaCO_3 yang selanjutnya bereaksi dengan asam dalam matrik hidrogel menghasilkan gas CO_2 yang akan membentuk struktur hidrogel berpori. Karakterisasi hidrogel yang dihasilkan dilakukan dengan melihat morfologi permukaan hidrogel menggunakan SEM, porositas berdasarkan pengukuran densitas, penentuan laju pengembangan hidrogel serta laju penyerapan larutan urea dan pelepasan urea ke dalam air. Parameter-parameter yang dipelajari adalah pengaruh penambahan CaCO_3 , konsentrasi monomer akrilamida, bahan pengikat silang dan inisiator terhadap penyerapan dan pelepasan air dan urea sehingga diperoleh komposisi bahan pembentuk hidrogel berpori yang sesuai sebagai media pelepasan pupuk urea secara terkendali.

3.2 Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah akrilamida (AM, Merck Co), urea (Merck Co.), amonium persulfat (APS, Merck Co.), natrium bisulfit (NBS, Merck Co), CaCO_3 (Merck Co), N,N'-metilen bisakrilamida (MBA, Sigma Erlich), HCl 10%, etanol teknis, pereaksi Erlich (p-dimetilamino benzaldehida), HCl pekat.

3.2.2. Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah labu gelas dilengkapi pengaduk mekanis dan gas inlet dan seperangkat alat gelas. Instrumen yang

digunakan adalah SEM JSM 5000, oven, neraca analitik dan Spektrofotometer Sinar Tampak *Genesis*.

3.3. Prosedur Kerja

3.3.1 Pembuatan Hidrogel Poliakrilamida Berpori

Pembuatan hidrogel poliakrilamida berpori dilakukan berdasarkan penelitian Mahdavinia *et al* (2009). Monomer yang digunakan adalah larutan akrilamida AM 30% w/v dalam air, pengikat silang MBA 1% w/v dalam air yang dihilangkan oksigennya dengan mengalirkan gas nitrogen sebelum digunakan, ammonium persulfat APS 2,5% w/v dalam air dan natrium bisulfit NBS 5% w/v. Polimerisasi dilakukan dalam labu gelas yang dilengkapi pengaduk mekanis dan aliran gas N₂. Komposisi reaktan polimerisasi diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Reaktan Polimerisasi Poliakrilamida Berpori

Kode	AM (mol/L)	MBA (mol/L) x10 ⁻³	CaCO ₃ (g)	APS (mol/L) x10 ⁻³	NBS (mol/L) x10 ⁻³
G 1.1	0,70	8,0	3,0	5,5	12
G 1.2	1,05	8,0	3,0	5,5	12
G 1.3	1,55	8,0	3,0	5,5	12
G 2.1	1,05	16,25	3,0	5,5	12
G 2.2	1,05	4,75	3,0	5,5	12
G 2.3	1,05	8,0	1,5	5,5	12
G 3.1	1,05	8,0	6,0	5,5	12
G 3.2	1,05	8,0	3,0	3,25	12
G 3.3	1,05	8,0	3,0	8,75	12
G0	1,05	8,0	0,0	5,5	12

Keterangan : perbandingan volume AM, MBA, APS dan NBS diberikan pada Lampiran 1

Pembuatan hidrogel secara umum, monomer akrilamida dialiri gas nitrogen selama lima menit, kemudian ditambahkan sejumlah MBA sambil diaduk dibawah gas nitrogen. Selanjutnya sejumlah CaCO₃ padatan serbuk ditambahkan ke dalam campuran larutan dan diaduk selama 10 menit 200 rpm. Setelah itu ditambahkan amonium persulfat (APS) dan natrium bisulfit (NBS) yang dilarutkan dalam 2 mL aquades) sebagai inisiator. Volume larutan dibuat 40 mL. Larutan diaduk sampai terbentuk gel. Kemudian reaksi dibiarkan sampai 60 menit

dibawah atmosfer N₂. Hidrogel yang terbentuk kemudian dipotong-potong (2x2x2 mm). partikel-partikel CaCO₃ dalam hidrogel dilarutkan dengan menambahkan HCl 10% dan direndam selama 24 jam pada temperatur kamar. Untuk menghilangkan CaCl₂ dan substrat lain yang tertinggal, hidrogel kemudian direndam dalam sejumlah besar akuades selama beberapa hari dengan mengganti aquades setiap hari sampai sampai bebas Cl⁻ dan Ca²⁺ (di uji dengan Ag⁺ dan CO₃²⁻). Hidrogel kemudian dituangkan ke dalam etanol untuk menghilangkan airnya dan direndam selama 24 jam. Produk kemudian dicuci dengan etanol baru (2x50 mL) dan dikeringkan dalam oven 50 °C sampai bobot konstan.

3.3.2 Karakterisasi Hidrogel

3.3.2.1 Morfologi Hidrogel

Morfologi permukaan hidrogel ditentukan menggunakan SEM JSM 5000 *Scanning Electron Microscopies* dengan tegangan operasi 20kV. Permukaan hidrogel yang ditentukan adalah untuk hidrogel yang masih mengandung CaCO₃ dan permukaan hidrogel setelah penambahan asam.

3.3.2.2. Pengukuran densitas Hidrogel (ASTM D792)

Porositas hidrogel ditentukan berdasarkan densitas Hidrogel. Densitas hidrogel diukur menggunakan piknometer. Sebanyak 1,0 gram hidrogel kering ditempatkan dalam piknometer yang telah diketahui massanya kemudian ditimbang. Setelah itu, piknometer berisi sampel ditambahkan aseton sebagai non solven dan ditimbang untuk menentukan densitas sampel.

3.3.2.3. Penentuan *Swelling* Hidrogel (Mahdavinia *et al* , 2009)

Air berdifusi ke dalam jaringan hidrogel ketika direndam dalam air dan memasuki ruang kosong antar rantai akibat perbedaan tekanan osmotik. Untuk mempelajari swelling hidrogel, sebanyak 0,1 gram hidrogel direndam dalam 100 mL larutan urea 10% selama 24 jam. Hidrogel kemudian dibiarkan diatas saringan selama lima menit untuk menghilangkan cairan di permukaan hidrogel dan ditimbang. Derajat Swelling dihitung dengan persamaan :

$$St = \frac{W_s - W_d}{W_d} \dots\dots\dots(1)$$

W_s dan W_d berturut-turut adalah massa sampel berisi larutan dan massa sampel kering. Laju pengembangan hidrogel ditentukan dengan menimbang produk yang telah mengembang pada waktu-waktu tertentu setelah dibiarkan diatas saringan selama lima menit untuk memisahkan air yang tidak diserap. Derajat *swelling* hidrogel dihitung menggunakan Persamaan 1.

3.3.2.4. Penyerapan Urea (Zheng 2009)

Sebanyak beberapa gram hidrogel direndam dalam larutan urea 10 % w/v selama 24 jam pada temperatur kamar dan ditimbang kembali massa hidrogel setelah mengembang. Konsentrasi urea dalam filtrat diukur menggunakan spektrofotometer Sinar tampak berdasarkan pembentukan senyawa kompleks berwarna kuning urea dan p-dimetilamino benzaldehida pada panjang gelombang 430 nm. Massa urea yang diserap dapat dihitung berdasarkan selisih massa urea pada ;arutan awal dan massa urea dalam filtrat.

3.3.2.5 Pelepasan Urea

Pelepasan urea dilakukan dengan melalui metode statis menggunakan hidrogel yang telah direndam dalam larutan urea 10% selama 24 jam. Sampel ditempatkan diatas saringan kawat yang diletakkan dalam 100 mL akuades. Pengaduk magnetik dinyalakan dan pada interval waktu 5 menit sampai 30 menit, 60 menit dan 24 jam dengan memipet 2,0 mL larutan dan diukur konsentrasi urea yang dilepaskan dalam akuades menggunakan Spektrofotometer sinar tampak. Massa urea di dalam akuades dibandingkan dengan massa urea dalam gel awal untuk menghasilkan persen urea yang dilepaskan oleh hidrogel.

3.3.2.6 Penentuan urea Metode Erlich

Penentuan urea Metode Erlich diadaptasi dari *A Rapid Method for the Determination of Urea in Blood and Urine* (Levine *et al*,1961) yang telah digunakan dalam penentuan urea dalam air oleh Zheng (2008). Pereaksi yang digunakan adalah pereaksi Erlich yang dibuat dengan cara melarutkan sebanyak 5,0 g p-dimetilamino benzaldehid dalam 20 mL HCl pekat,

kemudian ditambahkan 80 mL akuades. Pereaksi ini disimpan dalam botol gelap dan dapat stabil selama 1 bulan.

Dibuat deret larutan standar urea yang mengandung 0 ; 0,1 ; 0,2; 0,3 ;0,4 ; 0,5 ; 0,6 % b/v dalam labu takar 25 mL dengan menambahkan 1,0 mL pereaksi Erlich sehingga terbentuk kompleks urea p-dimetilamino benzaldehid yang berwarna kuning. Larutan urea standar diukur menggunakan spektrofotometer sinar tampak pada 430 nm. Absorbans diplot terhadap konsentrasi dan diperoleh kurva linear mengikuti Hukum Beer. Reaksi yang terjadi adalah :



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

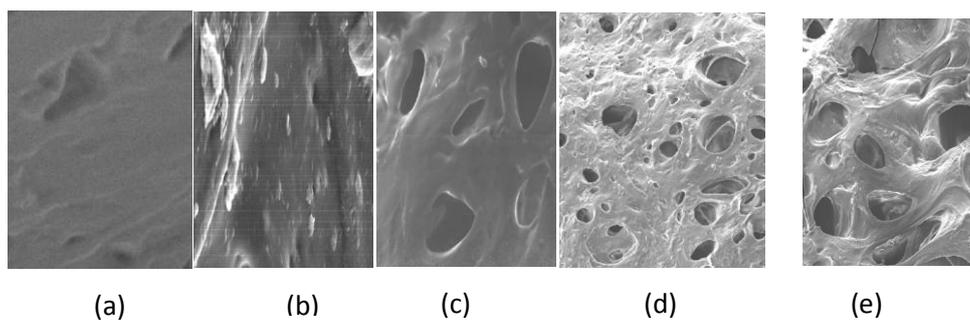
4.1. Sintesis dan Karakterisasi Poliakrilamida Berpori

Penelitian dilakukan untuk menghasilkan suatu hidrogel poliakrilamida terikat silang yang berpori melalui polimerisasi larutan dengan menggunakan inisiator amonium persulfat dan aktivator natrium bisulfit. Proses yang terjadi pada pembuatan hidrogel berpori adalah polimerisasi pengikatan silang (pembentukan gel) dan pembentukan gelembung pori (*foaming*). Inisiator amonium persulfat dan natrium bisulfit dipilih karena menurut penelitian Orakdogen (2008) yang membandingkan sistem inisiator amonium persulfat-N,N,N',N'-tetrametilendiamin (TEMED) dan amonium persulfat-natrium bisulfit, ternyata sistem yang terakhir menghasilkan struktur polimer yang lebih homogen.

Pada penelitian ini digunakan CaCO_3 padatan sebagai pembentuk pori dengan harapan akan menghasilkan ukuran pori yang lebih besar sehingga mempunyai pengembangan (*swelling*) dan kapasitas penyerapan yang tinggi. Polimerisasi dilakukan dengan mencampurkan monomer akrilamida, N,N'-metilen bisakrilamid (MBA) sebagai pengikat silang dan CaCO_3 . Proses Polimerisasi terjadi setelah penambahan inisiator dan aktivator pada suhu ruang.

Saat pembentukan radikal-radikal inisiator mencapai titik tertentu, polimerisasi berlangsung dengan cepat dan menghasilkan campuran reaksi yang lebih kental. Pada penelitian ini proses polimerisasi dibatasi sampai pembentukan gel dan dibiarkan selama satu jam sehingga diperoleh gel yang lebih padat. Hidrogel yang mengandung partikel CaCO_3 berbentuk kenyal sehingga dapat mencegah hilangnya gas CO_2 . Netralisasi CaCO_3 oleh asam menyebabkan terbentuknya pori pada hidrogel. Setelah partikel-partikel CaCO_3 hilang, pori-pori yang terbentuk terlihat dengan jelas. Pori-pori tidak terlihat pada hidrogel yang tidak ditambahkan CaCO_3 .

Mikrograf SEM pada hidrogel poliakrilamida yang mengandung partikel CaCO_3 dan setelah perlakuan asam diberikan pada Gambar 6.



(TYPE JSM-5000, MAG X750,ACCV 20kV)

Gambar 6 . Morfologi hidrogel (a) poliakrilamida tanpa penambahan CaCO_3 , (b) Polieakrilamida mengandung CaCO_3 , (c), (d), (e) poliakrilamida berpori yang dihasilkan dengan penambahan CaCO_3 berturut-turut 1,5; 3,0 dan 6,0 g

Partikel-partikel CaCO_3 yang terdispersi dalam hidrogel Poliakrilamida dapat dilihat pada Gambar (b). Setelah penambahan HCl, partikel-partikel CaCO_3 menghilang dan terbentuk pori-pori yang terlihat pada Gambar (c), (d) dan (e). Semakin banyak CaCO_3 yang ditambahkan, pori-pori yang dihasilkan semakin banyak walaupun bentuk dan ukuran pori beragam. Hasil ini menunjukkan bahwa hidrogel berpori berhasil dibuat melalui metode ini.

4.2 Pengaruh Komposisi Hidrogel terhadap Pengembangan dan Pelepasan Urea

Menurut penelitian Debnath (2009), hidrogel akrilamida memiliki distribusi pengikatan silang yang tidak homogen. Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme polimerisasi lebih banyak dilakukan dengan meneliti sifat-sifat fisiknya. Pada penelitian ini dilakukan studi pendahuluan dengan mencoba memvariasi jumlah CaCO_3 , akrilamida, pengikat silang, dan inisiator. Sampel disintesis dengan mengubah komposisi salah satu parameter, sedangkan parameter lain dibuat tetap sehingga diharapkan diperoleh komposisi optimum yang memiliki daya serap urea yang tinggi dan juga pelepasan urea secara bertahap dan stabil dari jaringan hidrogel. Komposisi optimum produk hidrogel ditentukan dengan membandingkan porositas, daya serap, laju pengembangan, kapasitas penyerapan urea dan pelepasan urea oleh hidrogel pada masing-masing parameter.

Porositas hidrogel ditentukan dengan pengukuran densitas. Walaupun pori-pori pada dasarnya adalah kantung udara dan secara teoritis tidak mempengaruhi sifat pengembangan, baik pengembangan dan sifat mekanis hidrogel dipengaruhi oleh komponen udara dalam gel. Daya serap urea ditentukan dengan mengukur pengembangan (*swelling*) pada waktu-waktu berbeda untuk satu set kondisi percobaan. Data Pengembangan hidrogel pada waktu-waktu tertentu diberikan pada Lampiran 3. Semua percobaan dilakukan dengan tiga kali ulangan untuk mengatasi variasi ketidakteraturan pori pada masing-masing sampel. Kapasitas penyerapan hidrogel ditentukan dengan membandingkan massa urea yang diserap setelah kesetimbangan tercapai terhadap massa hidrogel kering.

Pelepasan urea ditentukan secara statis di dalam akuades. Sistem pelepasan pupuk harus mampu mengendalikan jumlah pupuk yang hilang setiap waktu berlalu. Berdasarkan tujuan penggunaan hidrogel ini sebagai pengendali pelepasan pupuk, yang harus diperhatikan adalah saat air berdifusi ke dalam jaringan, pupuk yang ada dalam gel juga keluar perlahan dan memberi nutrisi ke dalam akar tanaman dalam jangka waktu lebih lama. Sebagai tambahan, jumlah permeasi dapat dikendalikan dengan merubah struktur jaringan. Dikarenakan interaksi antara pupuk dan jaringan polimer cukup lemah, jumlah pupuk yang dilepas akan lebih tinggi daripada pupuk bersalut yang menahan pupuk melalui proses adsorpsi.

4.2. 1 Pengaruh Penambahan CaCO_3

Data yang digunakan untuk mempelajari pengaruh CaCO_3 terhadap porositas, daya serap larutan urea, kinetika pengembangan dan pelepasan urea di dalam akuades adalah sampel G0 yaitu hidrogel tanpa penambahan CaCO_3 serta hidrogel kering yang disintesis dengan penambahan CaCO_3 berturut-turut 1,5; 3,0 dan 6,0 gram pada G 2.3; G 1.2 dan G 3.1.

4.2.1.1 Porositas Hidrogel

Secara fisik, hidrogel kering yang dihasilkan tanpa penambahan CaCO_3 sangat keras, transparan dan pori-pori tidak terlihat. Sedangkan semakin banyak CaCO_3 yang ditambahkan, hidrogel kering semakin ringan, pori-pori semakin merata dan semakin rapuh. Pada hidrogel yang dihasilkan setelah polimerisasi

sebelum ditambahkan asam, semakin banyak CaCO_3 yang terdispersi dalam hidrogel, struktur hidrogel semakin keras.

Porositas hidrogel ditentukan dengan pengukuran densitas hidrogel kering menggunakan piknometer. Hasil pengukuran densitas diberikan pada Tabel 5. Data lengkap diberikan pada Lampiran 2.

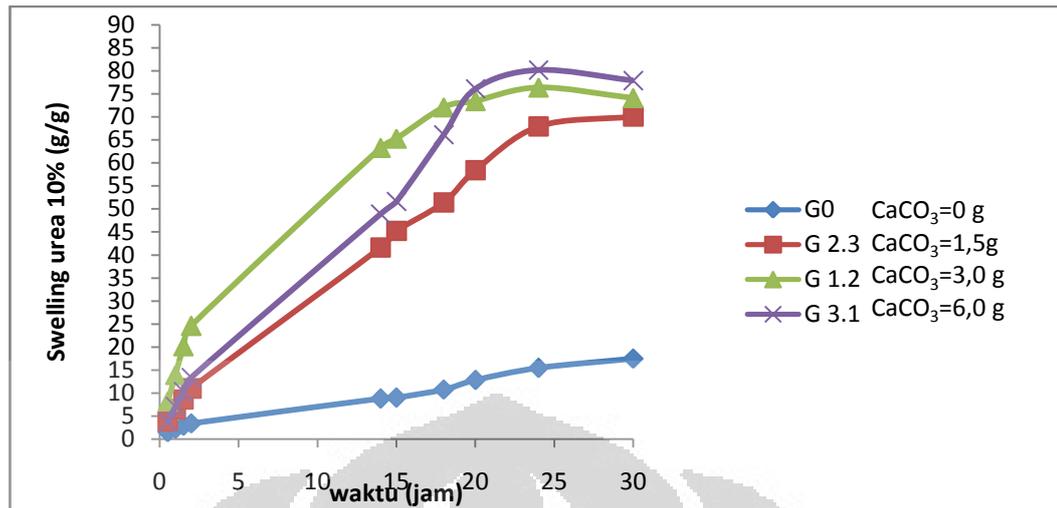
Tabel 5. Densitas Hidrogel Kering dengan Variasi CaCO_3

Jumlah CaCO_3	Densitas (g/cm^3)
0,0	1,88
1,5	0,68
3,0	0,47
6,0	0,43

Dari Tabel 5 terlihat, kenaikan jumlah CaCO_3 sangat berpengaruh terhadap kerapatan hidrogel. Penurunan densitas disebabkan semakin tingginya porositas hidrogel. Semakin banyak CaCO_3 yang digunakan untuk mensintesis hidrogel, pori yang dihasilkan makin banyak/besar yang ditandai dengan semakin rendahnya densitas. Sintesis hidrogel dengan mendispersikan CaCO_3 ke dalam matrik hidrogel sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel CaCO_3 , lama dan kecepatan pengadukan. Pada penelitian ini, kondisi reaksi dibuat sama yaitu CaCO_3 berbentuk serbuk, kecepatan pengadukan 200 rpm dan waktu pengadukan 10 menit. Ternyata dengan kondisi reaksi tersebut porositas yang dihasilkan pada hidrogel dengan penambahan CaCO_3 6,0 gram sedikit lebih rendah hidrogel yang ditambahkan CaCO_3 3,0 gram.

4.2.1.2 Penyerapan Larutan Urea

Pengaruh jumlah CaCO_3 terhadap daya serap urea hidrogel diberikan pada Gambar 7. Data lengkap diberikan pada Lampiran 3.



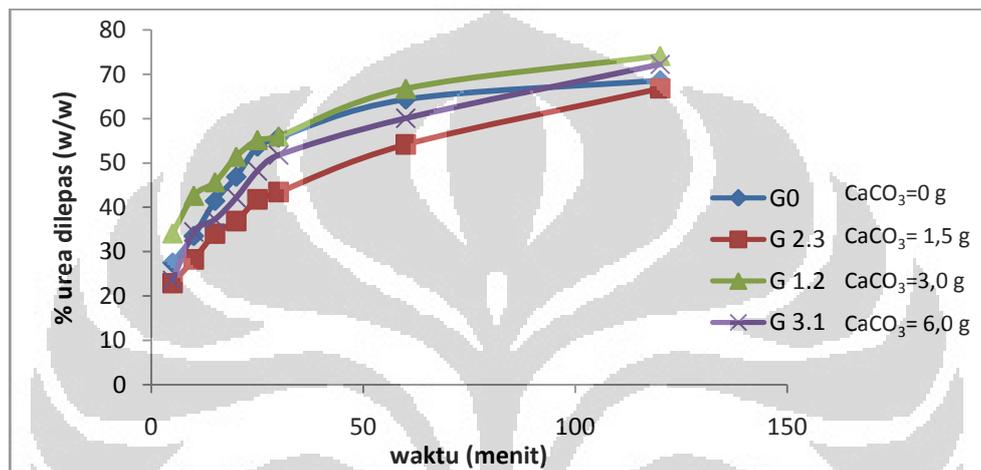
Gambar 7. Hubungan Pengembangan Hidrogel terhadap waktu dengan pengaruh Jumlah CaCO₃

Pada Gambar 7 terlihat, daya serap larutan urea semakin meningkat dengan semakin banyaknya penambahan jumlah CaCO₃. Perbedaan pengembangan cukup besar jika dibandingkan dengan hidrogel yang disintesis tanpa penambahan CaCO₃. Kenaikan laju penyerapan urea disebabkan semakin luasnya permukaan jaringan dengan semakin banyaknya pori pada hidrogel. Semakin banyak CaCO₃ yang digunakan, semakin besar pengembangan hidrogel. Akan tetapi, dengan semakin banyaknya pori menyebabkan hidrogel berisi urea (mengembang) lebih lunak dan mudah pecah.

Pada contoh yang tidak menggunakan CaCO₃ dihasilkan hidrogel yang jumlah porinya sedikit. Pada hidrogel ini laju pengembangannya lambat karena saat kontak dengan air, bagian terluar lapisan kering partikel granul dilembabkan terlebih dahulu, sehingga dihasilkan dua fase sebagian mengembang dan sebagian lagi berupa polimer kering. Difusi air berlanjut melalui lapisan yang mengembang ke bagian yang lebih dalam, akibatnya laju pengembangan menjadi lambat. Sedangkan pada hidrogel berpori, pori-pori dihasilkan di permukaan dan dalam polimer yang meningkatkan laju penyerapan air melalui gaya kapiler. Hidrogel yang berpori banyak dapat mengembang dengan cepat tanpa bergantung pada ukuran dan hal ini disebabkan oleh struktur pori dan interkoneksinya.

4.2.1.3. Pelepasan Urea

Jumlah urea yang terikat di dalam matrik hidrogel sebelum direndam dalam akuades ditentukan sebagai massa awal. Konsentrasi urea dalam akuades pada waktu-waktu tertentu diukur dan dibandingkan dengan persen urea yang berada dalam akuades terhadap massa urea dalam hidrogel. Pengaruh porositas hidrogel terhadap perilaku pelepasan urea diberikan pada Gambar 8. Data dan contoh perhitungan pelepasan urea diberikan pada Lampiran 7.



Gambar 8 . Hubungan Pelepasan Urea terhadap Waktu dengan Variasi CaCO₃

keterangan : pelepasan urea setelah 24 jam : G0=96,62%; G2.3=86,52%; G 1.2=84,92% ; G 3.1=84,61%

Hasil yang diperoleh menunjukkan pelepasan urea bergantung pada porositas. Pada 30 menit pertama jumlah urea yang dilepaskan pada hidrogel dengan penambahan CaCO₃, 3,0 dan 6,0 gram ternyata hampir seragam yaitu sekitar 50%, hanya hidrogel dengan CaCO₃ 1,5 g yang pelepasannya 40 %. Kenaikkan pelepasan urea kemudian berlangsung lebih cepat pada hidrogel dengan CaCO₃ paling banyak. Hal ini disebabkan lebih banyaknya pori-pori dalam hidrogel sehingga memudahkan difusi urea. Pemilihan pelepasan urea dan air yang sesuai sebenarnya bergantung pada kebutuhan jenis tanaman tertentu. Pada penelitian ini kondisi yang dipilih adalah hidrogel yang melepaskan urea paling lambat, secara bertahap dan stabil untuk menunjukkan bahwa air dan urea yang lepas ke lingkungan dapat dikendalikan. Pada hidrogel dengan variasi CaCO₃, kestabilan pelepasan adalah pada hidrogel dengan CaCO₃ 1,5 gram dan tanpa penambahan CaCO₃. Akan tetapi, karena yang diharapkan adalah hidrogel yang

daya serap urea lebih banyak dan pelepasannya lebih stabil, maka konsentrasi optimum yang dipilih adalah pada jumlah CaCO_3 1,5 gram.

4.2.2 Pengaruh Konsentrasi Akrilamida

Sampel produk hidrogel kering yang disintesis dengan perbandingan konsentrasi akrilamida 0,70 ; 1,05 ; dan 1,55 M yaitu pada kode sampel berturut-turut G 1.1 ; G 1.2 ; dan G 1.3 digunakan untuk mempelajari pengaruh monomer akrilamida terhadap porositas, daya serap larutan urea, kinetika pengembangan dan pelepasan urea di dalam akuades.

4.2.2.1. Porositas Hidrogel

Porositas hidrogel dengan variasi monomer akrilamida ditentukan melalui pengukuran densitas. Data hasil pengukuran densitas diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Densitas Hidrogel Poliakrilamida dengan Variasi Akrilamida

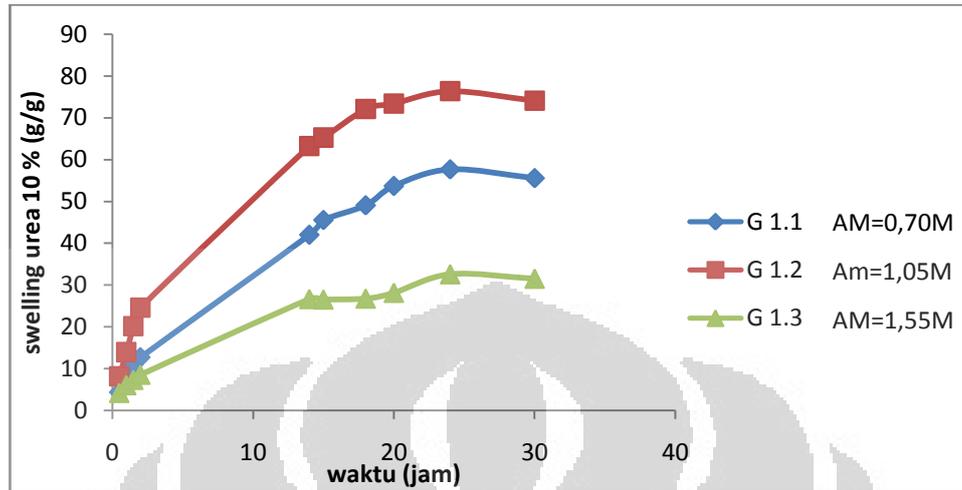
Akrilamida (mol/L)	Densitas
0,70	0,39
1,05	0,47
1,55	0,97

Pada Tabel 6 terlihat semakin tinggi konsentrasi akrilamida, maka semakin tinggi densitas hidrogel kering. Hal ini disebabkan dengan semakin banyak akrilamida, maka rantai poliakrilamida yang terbentuk semakin panjang sehingga menghalangi pembentukan pori oleh CO_2 . Akibatnya porositasnya menjadi lebih rendah.

4.2.2.2. Penyerapan Urea

Pada seluruh sampel produk terlihat perilaku pengembangan ditandai dengan laju pengembangan yang cukup cepat pada waktu-waktu awal proses dan diukur sebagai gram larutan urea yang diserap per satuan waktu. Selama pengukuran *swelling*, homogenitas pori juga dapat dievaluasi. Gel berbentuk keruh pada saat kering dan menjadi transparan saat mengembang. Transisi dari keruh menjadi transparan adalah suatu indikasi homogenitas pori dan morfologi.

Daya serap larutan urea ke dalam hidrogel terhadap waktu dengan variasi konsentrasi monomer diberikan pada Gambar 9.

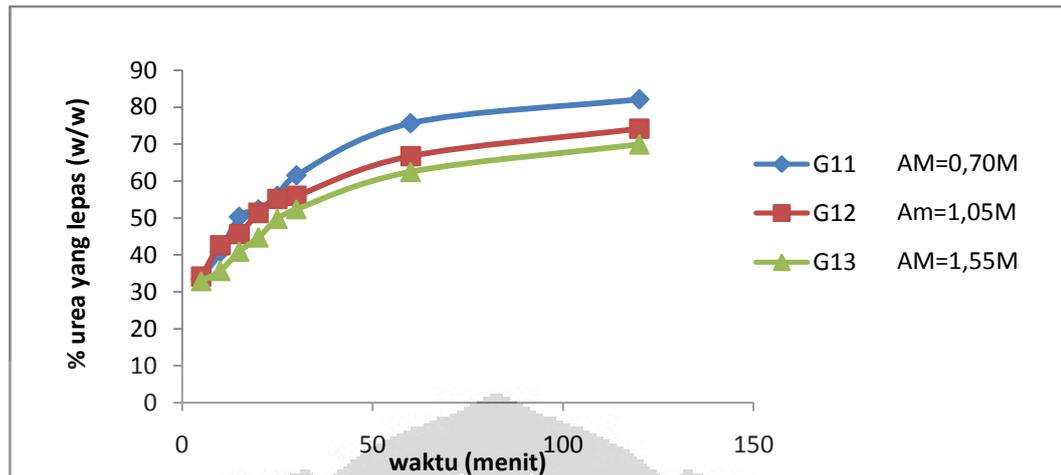


Gambar 9. Hubungan Pengembangan Hidrogel terhadap Waktu dengan Pengaruh Akrilamida

Pada Gambar 9 terlihat kecenderungan penyerapan urea meningkat dengan naiknya konsentrasi akrilamida. Kenaikan *swelling* maksimum yang besar terjadi dari 57,66 sampai 76,38 g/g saat konsentrasi akrilamida naik dari 0,70 sampai 1,05 M. Hal ini kemungkinan disebabkan konsentrasi akrilamida yang lebih tinggi menyebabkan pembentukan rantai pada tahap awal polimerisasi semakin panjang yang berdampak pada kenaikan rata-rata panjang rantai antar titik ikat silang, akibatnya kapasitas penyerapan meningkat. Namun, pada konsentrasi akrilamida yang lebih tinggi laju penyerapan urea menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan semakin banyaknya rantai polimer yang terbentuk sehingga menghalangi pembentukan pori hidrogel, akibatnya penyerapan larutan urea menurun. Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa konsentrasi akrilamida 1,05 M adalah konsentrasi optimum untuk sintesis akrilamida.

4.2.2.3. Pelepasan Urea

Pelepasan urea dari jaringan hidrogel ke dalam akuades dengan variasi akrilamida diberikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kurva Pelepasan Urea terhadap waktu dengan Variasi Akrilamida

Keterangan : *Persen urea yang dilepas maksimum setelah 24 jam :*

G 1.1=90,9%, G1.2=84.9 % dan G 1.3= 88,2 %

Pada Gambar 10 terlihat semakin tinggi konsentrasi akrilamida, semakin rendah laju pelepasan urea dalam air. Laju pelepasan yang cepat sampai 30 menit pertama terjadi pada semua hidrogel dikarenakan lepasnya urea yang berada pada permukaan matrik hidrogel. Akan tetapi, setelah 24 jam konsentrasi urea yang dilepaskan paling rendah adalah pada konsentrasi Akrilamida 1,05 M.

Peningkatan konsentrasi akrilamida menyebabkan proses pelepasan urea menjadi lebih lambat dalam periode waktu lebih lama. Akan tetapi, karena pelepasan terkendali harus memperhatikan pengembangan hidrogel yang lebih besar untuk memperoleh gel yang optimal dan kestabilan pelepasan pupuk jika dilihat dari % urea yang dilepaskan setelah 24 jam, konsentrasi akrilamida 1,05M dipilih sebagai konsentrasi optimum.

4.2.3 Pengaruh Kadar MBA

Sampel produk hidrogel kering yang disintesis dengan perbandingan konsentrasi pengikat silang MBA $4,75 \times 10^{-3}$; $8,0 \times 10^{-3}$ dan $16,25 \times 10^{-3}$ M pada kode sampel berturut-turut G 2.2, G 1.2 dan G 2.1 digunakan untuk mempelajari pengaruh MBA terhadap porositas, daya serap larutan urea, kinetika pengembangan dan pelepasan urea di dalam akuades.

4.2.3.1 Porositas Hidrogel

Pada hidrogel kering yang disintesis dengan memvariasi konsentrasi pengikat silang terdapat perbedaan secara visual. Hidrogel dengan konsentrasi pengikat silang paling rendah cukup rapuh dan memiliki pori-pori merata. Sedangkan semakin tinggi konsentrasi pengikat silang yang ditambahkan, hidrogel yang dihasilkan semakin keras dan semakin sedikit pori-pori yang terlihat. Porositas hidrogel kering pada konsentrasi pengikat silang yang berbeda ditentukan berdasarkan densitas hidrogel. Data penentuan densitas diberikan pada Tabel 7.

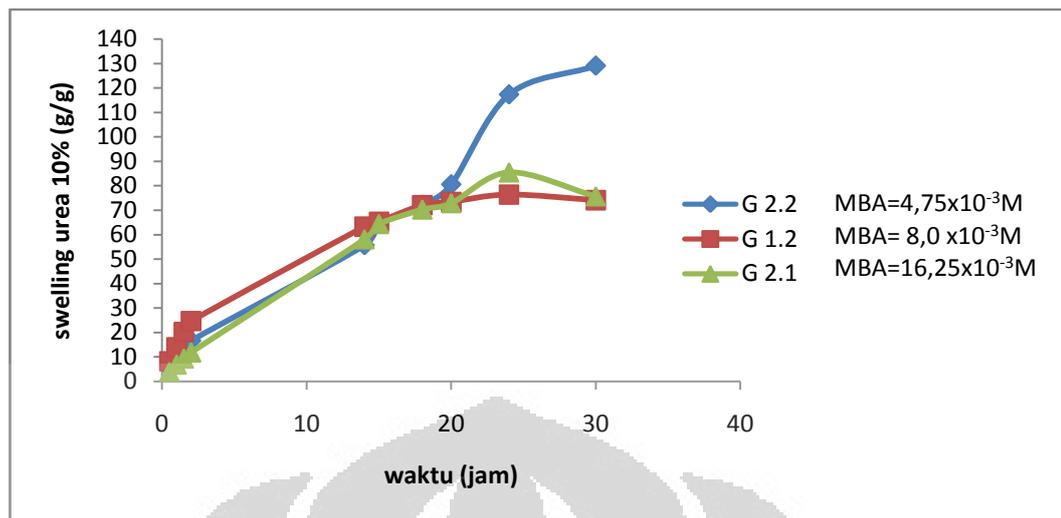
Tabel 7. Densitas hidrogel Kering dengan Variasi Pengikat Silang MBA

MBA (mol/L) $\times 10^{-3}$	Densitas (g/cm ³)
4,75	0,39
8,0	0,47
16,25	0,57

Dari Tabel 7 terlihat, semakin tinggi konsentrasi MBA, densitas yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini dapat dilihat dari struktur pori hidrogel yang dihasilkan dengan menaikkan konsentrasi MBA. Jumlah pori yang dihasilkan semakin sedikit dan hidrogel kering menjadi lebih keras, sehingga densitasnya lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh banyaknya ikat silang dalam polimer yang menekan masuknya gas CO₂ ke dalam matrik hidrogel, sehingga mengurangi terbentuknya pori. Pada hidrogel yang berisi air, pori-pori membuat hidrogel menyerap air lebih banyak, akan tetapi hidrogel menjadi lebih lunak dan mudah pecah.

4.2.3.2. Penyerapan Urea

Agen pengikat silang berperan penting dalam pembentukan struktur tiga dimensi secara permanen yang mencegah larutnya rantai polimer hidrofil dalam lingkungan berair serta merupakan faktor yang secara langsung mempengaruhi pengembangan hidrogel. Pengembangan hidrogel dalam larutan urea sebagai fungsi konsentrasi pengikat silang N,N'-metilen bisakrilamida (MBA) diberikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Hubungan Pengembangan larutan Urea terhadap Waktu dengan variasi MBA

Pada Gambar 11 terlihat, pada waktu-waktu awal laju penyerapan larutan urea semakin tinggi dengan naiknya konsentrasi MBA dari $4,74 \times 10^{-3}$ sampai $8,0 \times 10^{-3}$ M, tetapi dengan konsentrasi MBA yang lebih tinggi ternyata menurunkan laju penyerapan urea. Hal ini disebabkan jumlah pengikat silang menentukan kerapatan jaringan hidrogel. Pada konsentrasi MBA di bawah $16,25 \times 10^{-3}$ M, penyerapan larutan urea naik dengan naiknya ikatan silang sehingga jumlah larutan yang menempati matrik ikat silang meningkat. Akan tetapi, semakin tingginya konsentrasi pengikat silang, menghasilkan pembentukan lebih banyak cabang pada jaringan dan mengurangi pembentukan pori oleh gas CO_2 yang akhirnya menurunkan jumlah air yang berdifusi, akibatnya laju pengembangan menurun. Kenaikan jumlah pengikat silang mengakibatkan terbentuknya jaringan yang lebih kuat, tetapi kurang fleksibel yang terlihat dari turunnya laju pengembangan pada tahap awal. Akan tetapi setelah 24 jam penyerapan maksimum terjadi pada hidrogel dengan konsentrasi paling rendah sedangkan pada konsentrasi $8,0 \times 10^{-3}$ M dan $16,25 \times 10^{-3}$ M relatif sama. Hal ini kemungkinan disebabkan pada MBA yang paling rendah, jumlah ikat silang dalam matrik hidrogel menyebabkan tidak terhalangnya difusi sehingga lebih banyak dapat mengembang dan meregangkan rantai polimer. Sedangkan penyebab relatif samanya pengembangan setelah setimbang karena pada tahap awal penyebab cepatnya laju penyerapan dikarenakan porositas pada hidrogel

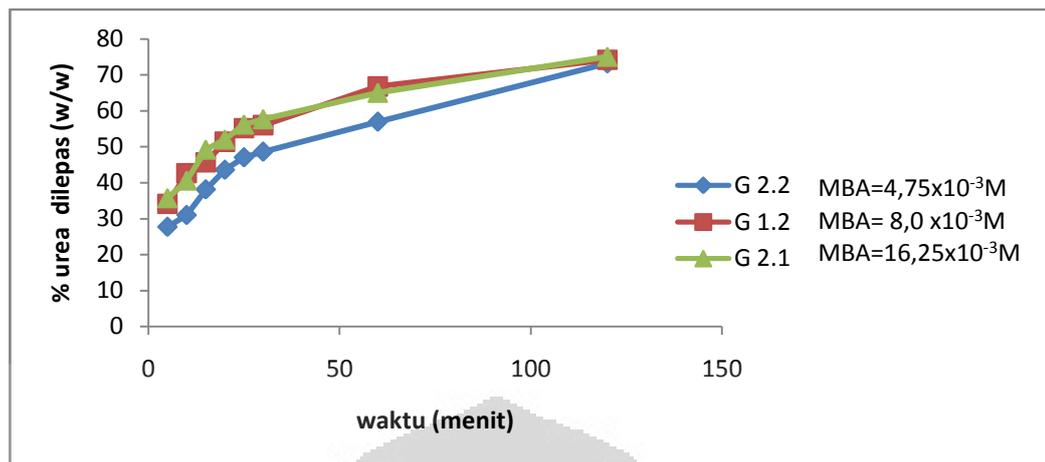
dengan MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M lebih besar sehingga larutan lebih cepat berdifusi daripada peregangan rantai, sedangkan setelah waktu lebih lama, hidrogel dengan konsentrasi lebih tinggi mulai mengalami peregangan rantai sehingga larutan dapat tertahan diantara ikat silang.

Dari hasil yang diperoleh ternyata semakin rendah konsentrasi pengikat silang, semakin cepat dicapai kesetimbangan pengembangan hidrogel. Hanya dengan sedikit kenaikan konsentrasi pengikat silang, pengembangan hidrogel menjadi jauh lebih lama. jumlah pengikat silang yang tinggi menghasilkan pembentukan jaringan tambahan dan menurunkan ruang untuk menahan air, sehingga dengan naiknya jumlah pengikat silang, kerapatan polimer menjadi lebih besar, akibatnya ruang antar jaringan semakin kecil dan semakin sedikit air yang masuk ke dalam hidrogel. Dari parameter laju yang diperoleh terlihat, dengan hanya perbedaan kecil konsentrasi pengikat silang yang digunakan, dihasilkan pengaruh yang besar terhadap laju penyerapan air.

Empat gaya yang mempengaruhi kapasitas *swelling* hidrogel adalah (1) interaksi polimer-solven, (2) interaksi elastis yang sebanding dengan massa molekul rata-rata antar dua ikat silang rantai, tekanan osmotik akibat perbedaan efek kapilaritas dan pergerakan ion antara gel dan fase larutan, serta tolakan elektrostatis antara gugus ionik yang berada pada rantai makromolekul. Tolakan elektrostatis umumnya diabaikan dibandingkan ketiga proses lain. Saat pengikat silang naik, energi bebas pencampuran, tolakan elektrostatis dan kandungan ionik tetap. Hanya interaksi elastis jaringan meningkat akibat pembentukan ikat silang yang semakin banyak (Kabiri 2004).

4.2.3.3. Pelepasan Urea

Kurva pelepasan urea dengan variasi konsentrasi pengikat silang MBA terhadap waktu diberikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Hubungan persen urea dilepas terhadap waktu dengan Variasi MBA
 keterangan : pelepasan urea setelah 24 jam : G2.2=78,4%; 1.2=84,92%; G 2.1=84,81%

Pada Gambar 7 terlihat semakin tinggi konsentrasi agen pengikat silang MBA, semakin rendah laju pelepasan urea dalam air. Hasil ini menunjukkan bahwa pelepasan urea sangat tergantung pada konsentrasi agen pengikat silang. Pada hidrogel dengan konsentrasi MBA paling rendah, laju pelepasan pada 30 menit pertama paling lambat yaitu kurang dari 50%. Sedangkan pada konsentrasi MBA $8,0 \times 10^{-3}$ dan $16,25 \times 10^{-3}$ M laju pelepasan hampir sama. Hal ini dikarenakan lepasnya urea yang berada pada permukaan matrik hidrogel. Saat jumlah pengikat silang menurun, proses pelepasan pupuk menjadi lebih lambat dalam periode waktu lebih lama. Berdasarkan data pengembangan Hidrogel, MBA $4,75 \times 10^{-3}$ M memiliki kapasitas penyerapan yang paling tinggi tetapi pelepasan urea terjadi secara bertahap dan setelah 24 jam pelepasannya paling rendah yaitu 78,4%, sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi hidrogel yang paling optimum untuk pelepasan urea berdasarkan perbandingan MBA adalah $4,75 \times 10^{-3}$ M.

4.2.4 Pengaruh Inisiator

Dalam polimerisasi radikal bebas, inisiator sangat mempengaruhi laju polimerisasi dan massa molekul polimer yang dihasilkan. Sedangkan dalam polimerisasi pengikatan silang, inisiator juga mempengaruhi derajat ikat silang dan massa molekul antar dua titik ikat silang. Hubungan antara konsentrasi inisiator terhadap porositas, pengembangan dan pelepasan larutan urea dipelajari dengan memvariasi konsentrasi amonium persulfat dari $3,25 \times 10^{-3}$; $5,5 \times 10^{-3}$ dan $8,75 \times 10^{-3}$ M dengan Kode sampel G 3.2; G 1.2 dan G 3.3.

4.2.4.1 Porositas Hidrogel

Pada pengamatan visual hidrogel kering dengan variasi inisiator yang dihasilkan, produk dengan konsentrasi inisiator rendah lebih rapuh dan mengandung banyak pori. Sedangkan produk dengan inisiator paling tinggi menjadi lebih kaku dan pori-pori yang dihasilkan tidak merata. Pengaruh konsentrasi inisiator terhadap porositas hidrogel ditentukan dengan pengukuran densitas. Data pengukuran densitas diberikan pada Tabel 8.

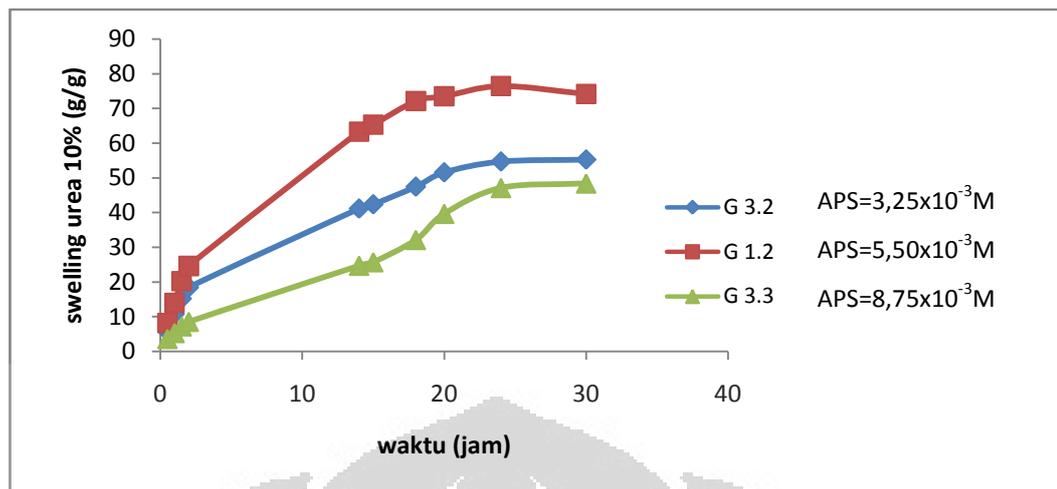
Tabel 8. Densitas hidrogel Kering dengan Variasi Konsentrasi Inisiator

Inisiator (mol/L) x10 ⁻³	Densitas (g/cm ³)
3,25	0,64
5,50	0,47
8,75	0,74

Pada Tabel 8 terlihat densitas yang paling rendah dihasilkan oleh hidrogel dengan inisiator 5,50 x10⁻³ M. Hal ini disebabkan polimerisasi berjalan lambat dan menyebabkan sedikitnya pengikatan silang pada polimer, sehingga menyebabkan banyaknya CO₂ yang dihasilkan mengisi ruang matrik polimer dan membentuk pori dan akibatnya porositas hidrogel besar atau densitas hidrogel turun. Sedangkan semakin tinggi konsentrasi inisiator menyebabkan laju polimerisasi berlangsung cepat dan terbentuk ikat silang lebih banyak dan akibatnya struktur polimer lebih padat dan semakin sedikit CO₂ yang membentuk pori hidrogel.

4.2.4.2. Penyerapan Urea

Hubungan Pengaruh konsentrasi inisiator terhadap penyerapan larutan urea diberikan dalam Gambar 13.

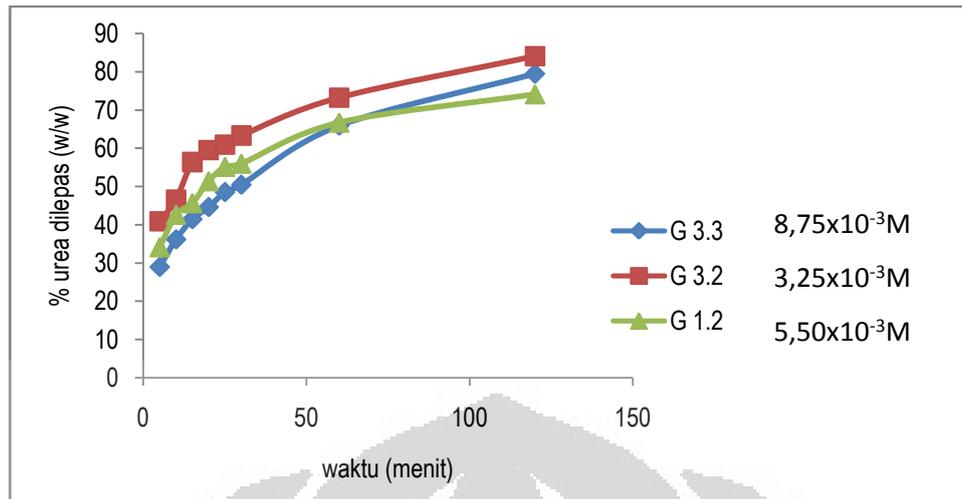


Gambar 13. Hubungan Daya Serap larutan Urea (g/g) dengan variasi inisiator amonium persulfat terhadap waktu

Pada Gambar 13 terlihat, terjadi kenaikan penyerapan larutan urea pada hidrogel dengan konsentrasi $3,25 \times 10^{-3}$ sampai $5,50 \times 10^{-3}$ M dan penurunan pada konsentrasi inisiator yang paling tinggi. Hal ini disebabkan pada konsentrasi inisiator lebih rendah dari $5,50 \times 10^{-3}$ M, reaksi polimerisasi terjadi lebih lambat sehingga jaringan polimer yang terbentuk lebih sedikit dan akibatnya penyerapan larutan urea lebih rendah. Sedangkan pada konsentrasi inisiator yang lebih tinggi menyebabkan polimerisasi berlangsung lebih cepat sehingga radikal yang terbentuk semakin banyak dan memicu polimerisasi yang digunakan untuk perpanjangan rantai dan pengikatan silang, akibatnya kerapatan ikat silang naik dan menurunkan daya serap larutan urea. Hal ini menunjukkan walaupun pada awal waktu penyerapan hidrogel dengan konsentrasi inisiator paling rendah berlangsung cepat, akan tetapi kemungkinan terbentuknya ikat silang lebih rendah sehingga hidrogel lebih cepat mengembang. Pada hidrogel dengan inisiator $5,5 \times 10^{-3}$ M, laju penyerapan urea yang dihasilkan paling tinggi, sehingga dapat disimpulkan bahwa konsentrasi optimum inisiator untuk sintesis hidrogel poliakrilamida ini adalah $5,5 \times 10^{-3}$ M.

4.2.4.3. Pelepasan Urea

Hubungan antara pelepasan urea terhadap waktu dengan variasi konsentrasi amonium persulfat diberikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Kurva Hubungan Pelepasan Urea terhadap waktu dengan variasi Inisator amonium persulfat

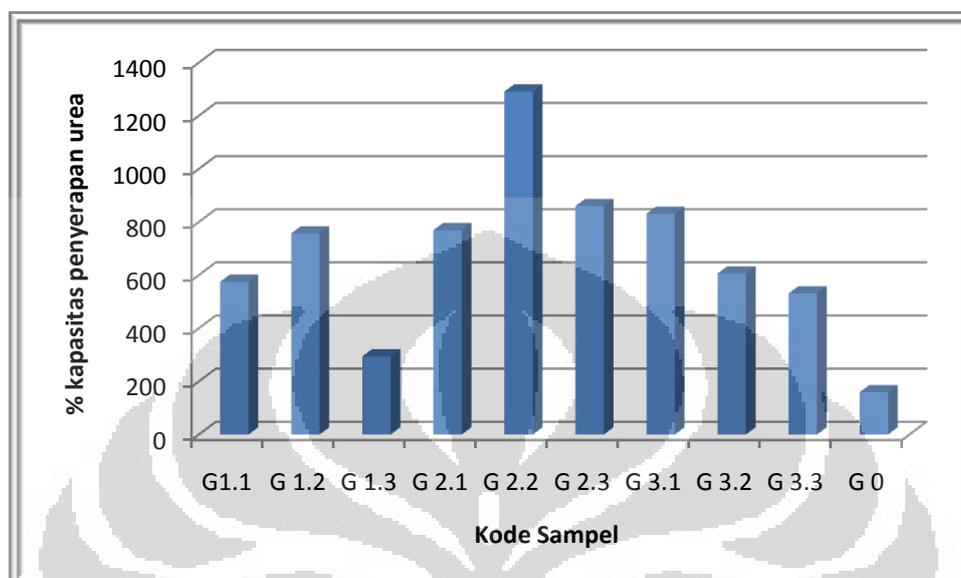
keterangan : pelepasan urea setelah 24 jam : G3.3=93,72%; G3.2=84,61%
G 1.2=84,92%

Pada Gambar 14 terlihat pelepasan urea paling rendah pada 30 menit pertama adalah pada konsentrasi inisiator paling tinggi yaitu 50,45%. Hal ini berhubungan dengan panjang rantai dan jumlah ikat silang dalam polimer. Dengan semakin banyaknya ikat silang menyebabkan kerapatan hidrogel naik, akibatnya proses difusi berjalan lebih lambat. Akan tetapi kemudian laju pelepasan naik dengan cepat. Hal ini berhubungan dengan mulai terjadinya peregangan rantai polimer yang memudahkan larutan yang tertahan dalam matrik hidrogel untuk keluar. Pada hidrogel dengan konsentrasi APS paling rendah, pelepasan urea cukup cepat dengan lepasnya sekitar 63,36 % urea setelah 30 menit. Hal ini disebabkan tingginya porositas sehingga memudahkan proses difusi. Pelepasan yang paling stabil terjadi pada hidrogel dengan konsentrasi $5,50 \times 10^{-3}$ M. sehingga dapat disimpulkan konsentrasi optimum pelepasan urea dengan variasi inisiator adalah $5,50 \times 10^{-3}$ M.

4.3. Kapasitas Penyerapan Larutan Urea

Pada penelitian ini ditentukan kapasitas penyerapan urea ke dalam produk hidrogel poliakrilamida berpori. Hidrogel yang direndam dalam larutan urea 10 % dan ditimbang sampai mencapai kesetimbangan diukur kapasitasnya dengan membandingkan massa urea dalam gel dengan massa kering hidrogel. Perbandingan

ukuran hidrogel setelah kesetimbangan pada masing-masing variasi parameter diberikan dalam Lampiran 5. Kurva perbandingan kapasitas penyerapan urea diberikan Gambar 15.



Gambar 15 . Perbandingan kapasitas penyerapan urea ke dalam hidrogel pada berbagai variasi parameter

Pada Gambar 15 terlihat kapasitas penyerapan urea paling tinggi adalah pada G 2.2 yaitu 1291 % dengan variasi parameter Akrilamida 1,05 M; MBA $4,75 \times 10^{-3}$ M, CaCO_3 3,0 g dan inisiator amonium persulfat $5,5 \times 10^{-3}$ M . Sedangkan yang paling rendah adalah pada hidrogel tanpa penambahan CaCO_3 yaitu 159 % . Maka dapat disimpulkan bahwa untuk satu gram hidrogel kering maksimum dapat diserap sebanyak 12,9 g urea, sedangkan tanpa penambahan CaCO_3 dapat diserap sekitar 1,6 gram urea. Hal ini menunjukkan kenaikan yang sangat tinggi dengan penggunaan CaCO_3 sebagai pembentuk pori.

Faktor-faktor yang sangat mempengaruhi kapasitas penyerapan adalah konsentrasi pengikat silang dan porositas hidrogel. Konsentrasi pengikat silang yang rendah dan tingginya porositas menyebabkan mudahnya difusi air dan urea ke dalam hidrogel. Jika dibandingkan dengan hidrogel yang tanpa penambahan CaCO_3 .

Berdasarkan hasil penelitian ini, kalsium karbonat berhasil digunakan sebagai bahan pembentuk hidrogel berpori. Hasil yang diperoleh ini akan bergantung pada kondisi reaksi seperti waktu dan kecepatan pengadukan, karena

homogenitas pori yang dihasilkan akan bergantung pada dispersi CaCO_3 di dalam polimer yang terbentuk. Dengan menggunakan bahan berupa CaCO_3 yang mudah diperoleh dan relatif murah serta mudah dilakukan, metode ini dapat diaplikasikan baik skala laboratorium maupun skala besar.

4.4. Kinetika Pengembangan Hidrogel

Ketika hidrogel kering dimasukkan ke dalam solven, maka solven akan berdifusi ke dalam matrik polimer yang menyebabkan pengembangan polimer. Proses difusi ini melibatkan perpindahan air ke dalam ruang antar rantai makromolekul. Pada aplikasi hidrogel sebagai pengendali pelepasan pupuk, perlu ditentukan kinetika pengembangan hidrogel. Terdapat sejumlah teori mengenai kinetika pengembangan (*swelling*), beberapa diantaranya menyatakan bahwa kinetika pengembangan dapat berupa kinetika orde satu (Sadeghi dan Koutchakzadeh, 2007). Pada proses pengembangan, proses yang terjadi adalah secara fisika. Agar molekul-molekul dapat keluar melalui matrik polimer, maka pertama harus dilarutkan ke dalam polimer dan kemudian secara fisika bergerak melalui difusi.

4.4.1 Laju Pengembangan Hidrogel

Laju pengembangan hidrogel dalam larutan urea secara kuantitatif pada setiap parameter dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$S_t = S_\infty (1 - e^{-t/\tau}) \dots \dots \dots (4)$$

Parameter S_t dan S_∞ menyatakan *Swelling* pada waktu t menit (g/g) dan saat kesetimbangan ; τ menyatakan parameter laju (menit).

Dengan memplot $\ln \left(1 - \frac{S_t}{S_\infty} \right)$ terhadap waktu (t), diperoleh kemiringan $\frac{-1}{\tau}$,

sehingga diperoleh ‘parameter laju’ τ (waktu untuk yang diperlukan untuk mencapai 60% *swelling* saat $S\tau$ (menit). Semakin rendah parameter laju pengembangan hidrogel, semakin cepat *swelling* hidrogel terjadi (Sadeghi dan Koutchakzadeh, 2007).

Pada penelitian ini, dibandingkan pengaruh penambahan CaCO_3 , akrilamida, MBA dan inisiator terhadap parameter laju pengembangan masing-masing hidrogel.

4.4.1.1 Pengaruh Penambahan CaCO_3

Kurva hubungan $\ln\left(1 - \frac{St}{S_{\infty}}\right)$ terhadap waktu (t) dengan parameter pengaruh penambahan CaCO_3 diberikan pada Lampiran 5.

Dari kemiringan kurva diperoleh parameter laju agar hidrogel dapat mengembang sampai 60% dengan penambahan CaCO_3 1,5 ; 3,0 dan 6,0 g berturut-turut adalah 17,24 ; 5,38 dan 11,1 jam. Berdasarkan data yang diperoleh, laju pengembangan yang paling cepat pada penelitian ini adalah pada hidrogel dengan CaCO_3 3,0 gram. Pada hidrogel dengan penambahan CaCO_3 6,0 gram, walaupun porositasnya lebih tinggi, waktu yang dibutuhkan agar 60% hidrogel mengembang lebih lama karena hidrogel masih dapat menampung larutan urea lebih banyak setelah dimulainya peregangan rantai.

4.4.1.2 Pengaruh Konsentrasi Akrilamida

Kurva hubungan $\ln\left(1 - \frac{St}{S_{maks}}\right)$ terhadap waktu (t) dengan parameter pengaruh variasi akrilamida diberikan pada Lampiran 5.

Dari kemiringan kurva diperoleh parameter laju untuk hidrogel mengembang sampai 60% dengan konsentrasi akrilamida 0,70 ; 1,05 dan 1,55 M berturut-turut adalah 8,5 ; 5,4 dan 9,17 jam. Berdasarkan data yang diperoleh, ternyata laju penyerapan larutan urea yang paling cepat adalah pada hidrogel dengan konsentrasi akrilamida 1,05 M.

4.4.1.3. Pengaruh Konsentrasi Agen Pengikat

Kurva penentuan kinetika laju pengembangan hidrogel dengan cara menentukan Parameter laju yang diperoleh dengan memplot $\ln\left(1 - \frac{St}{S_{\infty}}\right)$ terhadap waktu (t) dengan variasi MBA dapat dilihat pada Lampiran 5. Dari kurva diperoleh parameter laju dengan variasi konsentrasi MBA $2,74 \times 10^{-3}$; $8,0 \times 10^{-3}$ dan $16,25 \times 10^{-3}$ M berturut-turut adalah 15,87 ; 5,38 dan 14,9 jam. Berarti

dibutuhkan waktu tersebut sampai 60% hidrogel mengembang. Dari hasil yang diperoleh ternyata pengembangan paling cepat terjadi pada hidrogel dengan konsentrasi $8,0 \times 10^{-3}$. Pada konsentrasi MBA yang paling rendah karena porositasnya tinggi setelah 15 jam hidrogel masih dapat menyerap larutan dan belum tercapai pengembangan 60%. Konsentrasi pengikat silang yang tinggi menghasilkan pembentukan jaringan tambahan dan menurunkan ruang untuk menahan air. sehingga kerapatan polimer menjadi lebih besar dan akibatnya ruang antar jaringan semakin kecil dan semakin sedikit air yang masuk ke dalam hidrogel. Dari parameter laju yang diperoleh terlihat, dengan hanya perbedaan kecil konsentrasi pengikat silang yang, dihasilkan pengaruh yang besar terhadap laju penyerapan air.

4.4.1.4. Pengaruh Inisiator

Parameter laju yang diperoleh dengan memplot $\ln\left(1 - \frac{St}{S_{\infty}}\right)$ terhadap waktu (t), pada beberapa variasi inisiator ammonium persulfat $3,25 \times 10^{-3}$; $5,5 \times 10^{-3}$; dan $8,75 \times 10^{-3}$ M berturut-turut adalah 5,02; 12,6; dan 15,87 jam. Hal ini menunjukkan semakin tinggi konsentrasi inisiator, maka laju pengembangan akan semakin lambat. Walaupun pada awal waktu penyerapan hidrogel dengan konsentrasi inisiator paling rendah berlangsung cepat, akan tetapi kemungkinan terbentuknya ikat silang lebih rendah sehingga hidrogel lebih cepat mengembang.

4.4.2. Kinetika Pengembangan Hidrogel Orde satu

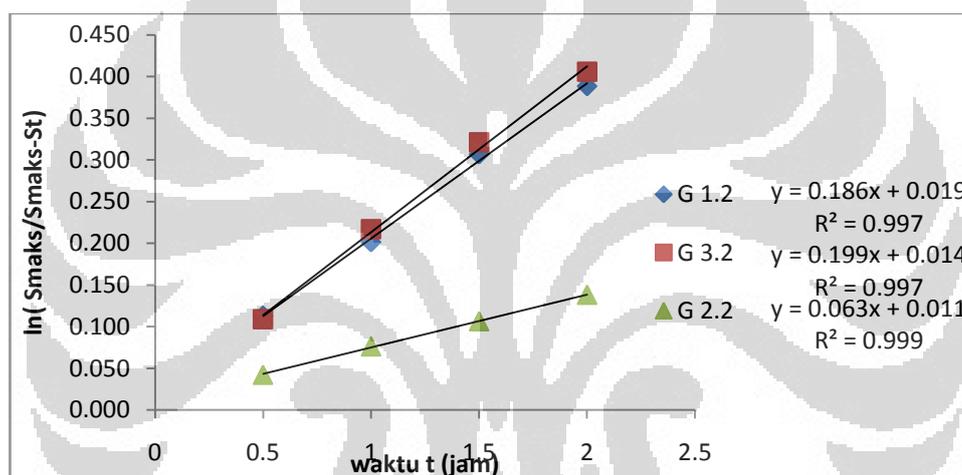
Pada penelitian ini ditentukan hukum laju pengembangan hidrogel menggunakan kinetika orde satu. Pengembangan dapat dinyatakan seperti pada persamaan :

$$\frac{dS}{dt} = k(S_{maks} - S)$$

Simbol S menyatakan pengembangan (*swelling*) dalam hidrogel pada waktu t dan K adalah konstanta. Dengan mengintegrasikan persamaan antara $t=0$ sampai t dan $S=0$ sampai S, diperoleh persamaan berikut :

$$\ln \frac{S_{maks}}{S_{maks} - S} = k_1 t$$

Jika proses *swelling* superabsorben mengikuti kinetika orde satu, plot pada variasi $\ln(S_{maks}/S_{maks}-S_t)$ sebagai fungsi waktu memberikan garis lurus. Data yang digunakan pada penentuan hukum laju adalah berdasarkan parameter laju kondisi optimum dengan laju pengembangan tercepat dengan variasi CaCO_3 , MBA dan akrilamida yaitu pada Kode G 1.2 ((AM 1,05 M; MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M ; CaCO_3 3,0 g; APS $5,5 \times 10^{-3}$ M) serta pada kondisi optimum untuk variasi inisiator ammonium persulfat yaitu G 3.2 dengan komposisi AM 1,05 M; MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M ; CaCO_3 3,0 g; APS $3,25 \times 10^{-3}$ M dan berdasarkan kapasitas penyerapan urea tertinggi yaitu G 2.2 dengan komposisi (AM 1,05 M; MBA $4,75 \times 10^{-3}$ M ; CaCO_3 3,0 g; APS $5,5 \times 10^{-3}$ M). Kurva Kinetika Pengembangan Hidrogel diberikan pada Gambar 16.



Gambar 16. Model Kinetika Orde Satu Pengembangan Hidrogel Poli akrilamida

Hasil plot data *swelling* untuk keseluruhan sampel hidrogel yang masukkan pada persamaan kinetika orde satu diberikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Data Persamaan Kinetika Pengembangan Hidrogel

Kode	Persamaan linear	r^2
G 1.2	$Y=0,186x + 0,019$	0,997
G 3.2	$Y=0,199x + 0,014$	0,997
G 2.2	$Y=0,063x + 0,011$	0,999

Berdasarkan data yang diperoleh, dihasilkan kurva yang linear dan koefisien korelasi yang yang tinggi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa laju pengembangan hidrogel poli akrilamida berpori pada penelitian ini mengikuti kinetika orde satu.

4.5 Kinetika Pelepasan Urea dalam Air

Pada sistem pelepasan pupuk secara terkendali diperlukan persamaan kinetika untuk memperkirakan laju pelepasan urea pada satu set kondisi/konsentrasi tertentu, memperkirakan mekanisme pelepasan urea dan melihat kebergantungan konsentrasi urea terhadap laju pelepasan. Laju pelepasan optimum urea ke dalam akuades dari hidrogel dengan variasi akrilamida, pengikat silang MBA, penambahan CaCO_3 dan inisiator dicocokkan dengan laju teoritis dengan asumsi mengikuti kinetika orde nol, orde satu dan model Higuchi. Laju orde nol menggambarkan sistem dimana laju pelepasan pupuk tidak bergantung konsentrasinya. Laju orde satu menggambarkan sistem dimana laju pelepasan bergantung konsentrasi. Sedangkan metode Higuchi menggambarkan pelepasan pupuk dari matrik tak larut merupakan suatu proses bergantung akar kuadrat waktu yang dikendalikan oleh difusi hidrogel. Semakin lama waktu pelepasan urea, semakin panjang jarak difusi urea yang keluar dari matrik hidrogel.

Pelepasan urea dari hidrogel menggunakan model kinetika orde nol dinyatakan dengan menggunakan persamaan :

$$Q_t = Q_0 + k_0 t$$

Simbol Q_t adalah jumlah urea yang larut pada waktu t , Q_0 adalah jumlah awal urea dalam larutan, dan k_0 adalah konstanta laju orde nol pelepasan yang dinyatakan dalam satuan konsentrasi/waktu. Kinetika pelepasan urea diperoleh dengan memplot Q_t terhadap waktu t .

Pelepasan urea dengan mengikuti kinetika orde satu dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t$$

k_1 adalah konstanta laju orde satu dalam satuan waktu⁻¹. C_0 adalah konsentrasi awal larutan urea. Data yang diperoleh diplot antara $\ln C$ terhadap waktu t sehingga diperoleh kemiringan k .

Pada persamaan Higuchi digunakan bentuk yang disederhanakan, yaitu :

$$Q = k_H t^{1/2}$$

Q adalah konsentrasi dan k_H adalah konstanta pelarutan. Data yang diperoleh diplot sebagai persen pelepasan urea terhadap akar kuadrat t .

Pada penentuan model persamaan kinetika, dipelajari pada komposisi pelepasan urea terhadap pengaruh akrilamida dan inisiator APS yaitu pada kode sampel G 1.2 dengan komposisi (AM 1,05 M; MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M ; CaCO₃ 3,0 g; APS $5,5 \times 10^{-3}$ M) , kondisi optimum terhadap pengaruh MBA (G 2.2) dengan komposisi (AM 1,05 M; MBA $4,75 \times 10^{-3}$ M ; CaCO₃ 3,0 g; APS $5,5 \times 10^{-3}$ M) serta kondisi optimum pengaruh CaCO₃ (G 2.3) dengan komposisi (AM 1,05 M; MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M ; CaCO₃ 1,5 g; APS $5,5 \times 10^{-3}$ M) . Kurva hubungan ketiga persamaan kinetika diberikan pada Lampiran 6. Persamaan yang diperoleh diberikan pada Tabel 10. Koefisien korelasi kuadrat (r^2) dari kurva yang diperoleh dari model-model persamaan yang berbeda dibandingkan dan nilai r^2 yang paling tinggi dinyatakan sebagai model yang paling tepat digunakan sebagai persamaan matematik pelepasan urea.

Tabel 10. Model Persamaan Kinetika Pelepasan Urea

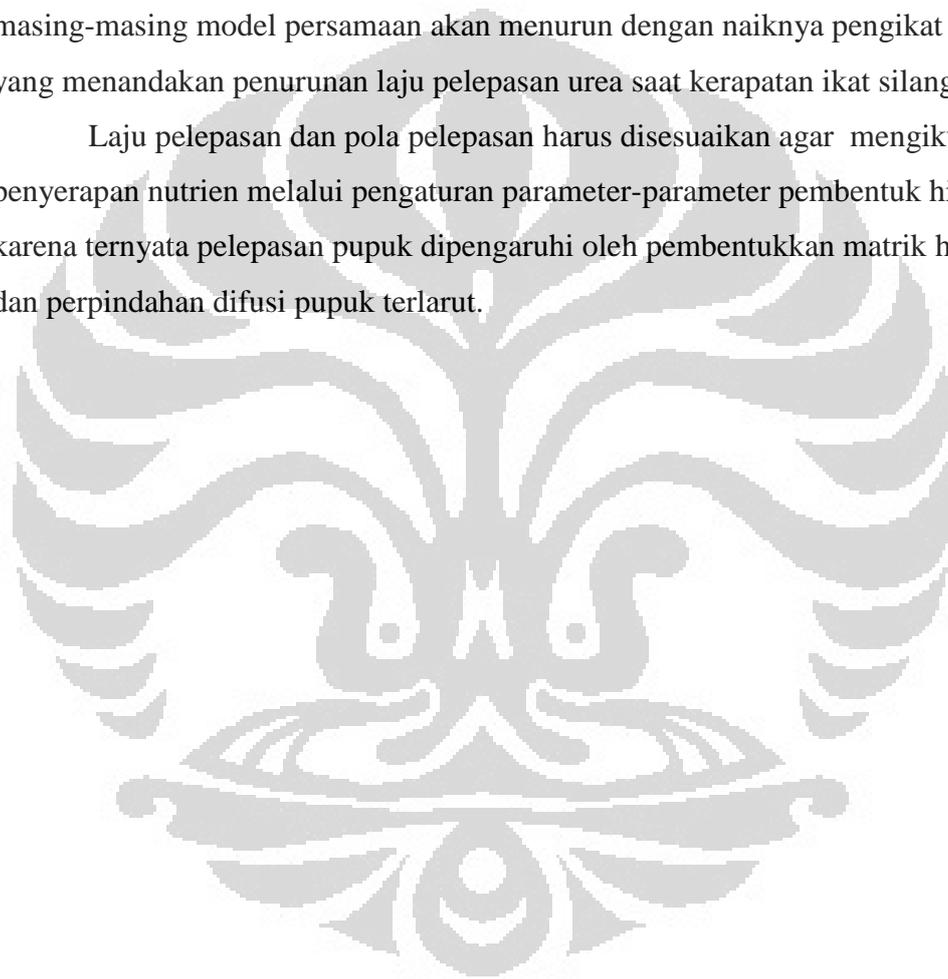
Kode	Model Persamaan					
	Orde nol	r^2	orde satu	r^2	Metode Higuchi	r^2
	$Q_t = Q_0 + K_0 t$		$\ln Q_t = \ln Q_0 + k_1 t$		$Q = K_H \times t^{1/2}$	
G 2.2	$Q_t = 0.903t + 23.51$	0.966	$\ln Q_t = 0.024t + 3.230$	0.948	$Q = 7.071t^{1/2} + 10.78$	0.976
G 2.3	$Q_t = 0.835t + 19.93$	0.967	$\ln Q_t = 0.025t + 3.072$	0.947	$Q = 6.554t^{1/2} + 8.085$	0.993
G 1.2	$Q_t = 0.873t + 32,21$	0.946	$\ln Q_t = 0.019t + 3.509$	0.915	$Q = 6,918t^{1/2} + 19,56$	0.980

Berdasarkan Plot data yang dihasilkan terhadap model kinetika orde nol, orde satu dan Higuchi secara keseluruhan memberikan hubungan linear. Nilai r^2 orde nol seluruhnya lebih tinggi daripada orde satu. Linearitas tertinggi diperoleh dari plot menggunakan persamaan Higuchi diikuti dengan orde-0 dan orde -1 yang menandakan bahwa pelepasan urea dari matrik hidrogel poliakrilamida berpori merupakan proses yang bergantung pada akar kuadrat waktu berdasarkan difusi Fickian. Akan tetapi, pelepasan urea juga ternyata sangat mendekati kinetika orde -0 yang menandakan bahwa konsentrasi hampir tidak mempengaruhi pelepasan urea.

Laju pelepasan urea yang paling lambat dilihat dari konstanta pelepasan paling rendah yang ditunjukkan oleh hidrogel dengan derajat ikat silang paling tinggi dan porositas rendah. Akan tetapi, memiliki kapasitas penyerapan urea tidak terlalu tinggi.

Berdasarkan metode Higuchi, pada konsentrasi MBA rendah dan pori-pori hidrogel tinggi menyebabkan ketahanan difusi hidrogel rendah sehingga urea lebih mudah meninggalkan jaringan. Molekul-molekul urea pada permukaan hidrogel dapat langsung larut dalam akuades dan secara simultan molekul-molekul yang berada lebih dalam secara bertahap keluar dari matrik hidrogel akibat gradien konsentrasi. Saat jumlah pengikat silang naik, ketahanan perpindahan naik dan laju pelepasan pupuk lebih lambat. Kemiringan pada masing-masing model persamaan akan menurun dengan naiknya pengikat silang yang menandakan penurunan laju pelepasan urea saat kerapatan ikat silang naik.

Laju pelepasan dan pola pelepasan harus disesuaikan agar mengikuti pola penyerapan nutrisi melalui pengaturan parameter-parameter pembentuk hidrogel karena ternyata pelepasan pupuk dipengaruhi oleh pembentukan matrik hidrogel dan perpindahan difusi pupuk terlarut.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Hidrogel poliakrilamida berpori berhasil disintesis melalui polimerisasi larutan inisiator redoks penambahan CaCO_3 sebagai pembentuk pori. Semakin banyak CaCO_3 yang ditambahkan, porositas hidrogel semakin besar.
2. Kapasitas penyerapan urea tertinggi diperoleh pada komposisi Akrilamida 1,05 M, MBA $4,75 \times 10^{-3}$ M, CaCO_3 3,0 g dan inisiator ammonium persulfat $5,5 \times 10^{-3}$ M dengan kapasitas penyerapan urea yang dihasilkan 1291 %. Artinya setiap gram hidrogel kering mampu menahan 12,9 gram urea. Laju pengembangan hidrogel dalam larutan urea mengikuti kinetika orde satu dengan laju pengembangan tercepat diperoleh pada hidrogel dengan komposisi akrilamida 1,05 M; MBA $8,0 \times 10^{-3}$ M ; CaCO_3 3,0 g; amonium persulfat $5,5 \times 10^{-3}$ M dan CaCO_3 3,0 gram.
3. Urea dilepaskan dari hidrogel secara bertahap dan stabil. Kinetika pelepasan urea dari hidrogel ke dalam air mengikuti persamaan Higuchi yang menandakan bahwa pelepasan urea dari matrik hidrogel merupakan proses yang bergantung pada akar kuadrat waktu berdasarkan difusi dan orde nol atau pelepasan urea hampir tidak dipengaruhi oleh konsentrasi. Pemilihan komposisi hidrogel disesuaikan dengan laju pelepasan yang diinginkan dan disesuaikan dengan kebutuhan tanaman.

5.2 Saran

Penelitian ini masih memerlukan banyak pengembangan jika akan diaplikasikan pada lahan pertanian. Diantaranya perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut mengenai sifat mekanis hidrogel, elastisitas, sensitivitas hidrogel terhadap pH, suhu, sinar ultraviolet serta pengaruh ion-ion lain yang dapat mempengaruhi kualitas hidrogel saat diaplikasikan ke dalam tanah yang kondisinya lebih kompleks.

DAFTAR REFERENSI

- Akelah, Ahmed. (1990). *Applications of Functionalized Polymer in Agriculture*. Journal of Islamic Academy of Sciences 3:1, 49-61, Department of Chemistry, Tanta University, Tanta, Mesir.
- Anabi, Nasim et al. (2010). *Controlling the Porosity and Microarchitecture of Hydrogels for Tissue Engineering*. Tissue Engineering: part B. Volume 16, Number 4.
[DOI: 10.1089/ten.teb.2009.0639](https://doi.org/10.1089/ten.teb.2009.0639)
- Atefeh, H. Abolfazl Barati, Ebrahim Vasheghani Frahani, and Ali Afraz. (2009). *Synthesis and Analysis of Swelling and Controlled Release Behaviour of Anionic sIPN Acrylamide based Hydrogels*. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Bajpai, Sunil Kumar and Seema Dubey (2003). *Synthesis and Swelling Kinetics of a pH-sensitive Terpolymeric Hydrogel System*. Department of Chemistry, Government Autonomous Science College Jabalpur (M.P.) 482001, India
- Calvert, Paul. (2000). *Electroactive Polymer Gels*. University of Arizona. AS.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Second Edition. Brunel University Uxbridge. Oxford.
- Dafader, N.C et al. (2009). *Synthesis of Superabsorbent Acrylamide/Kappa-carrageenan Blend Hydrogel by Gamma Radiation*. Malaysian Polymer Journal, Vol. 4, No.2, p 37-45, Nuclear and Radiation Chemistry Division, Institute of Nuclear Science and Technology, Bangladesh Atomic Energy Commission, Dhaka, Bangladesh.
- Fatima, Rosa., Joao Bordado and Miguel Casquilho. (2001). *Kinetic of Water Absorbency in AA/AMPS Copolymers. Applications of Diffusion-Relaxation Model*. Instituto Superior Technico, Ave. Rovisco Pais, IST. Lisboa, Portugal.
- Guo, Mingyu at al. (2005). *Preparation and Properties of a Slow Release membrane-Encapsulated Urea fertilizer with Superabsorbent and Moisture Preservation*. Department of Chemistry, Lanzhou University. Lanzhou. People's Republic of China.
- Hekmat, Atefeh et al. (2009). *Synthesis and Analysis of Swelling and Control Release Behaviour of Anionic sIPN Acrylamide based Hydrogels*. World Academy of Science, Engineering and Technology 56. Iran

- Jhurry, D. (1997). *Agricultural Polymers*. University of Mauritius. Food and Agricultural Research Council, Réduit, Mauritius. AMAS.
- Kabiri, Koroush and M. Jalal Zohuriaan-Mehr. (2009). *Superabsorbent Hydrogels from Concentrated Solution Terpolymerization*. Superabsorbent Hydrogel Section, Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965/115, Tehran, I.R. Iran. Iranian Polymer Journal.
- Kiatkamjornwong, Suda. (2007). *Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites*. Department of Imaging and Printing Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University. Bangkok. Thailand..
- Levine, Jacob, Raul Leon, and Frederick Sfeigmann. (1960). *A Rapid Method for the Determination of Urea in Blood and Urine*. Atlas Powder Company. New York.
- Mahdavinia, G.R. et al.(2009). *Synthesis of Porous poly(acrylamide) hydrogels Using Calcium Carbonate and its Application for Slow Release of Potassium Nitrate*. eXPRESS Polymer Letters Vol.3.No.5. pp 279-285. Iran.
DOI: [10.3144/expresspolymlett.2009.35](https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.35)
- Menter, Paul.(2000).*Acrylamide Polymerization-A Practical Approach*. Bio-Rad laboratories. Alfred Nobel Drive, Hercules. California. AS.
- Omidian, H., Jose G. Rocca, Kinam Park, (2004). *Advances in superporous hydrogels*. Departments of Pharmaceutics and Biomedical Engineering West Lafayette, Indiana, 47907-2091, United States
Journal of Control. Release 102: 3–12 www.elsevier.com/locate/jconrel
- Omidian, H and K. Park. (2008). *Swelling agents and devices in oral drug delivery*. Nova Southeastern University, College of Pharmacy, Department of Pharmaceutical Sciences, Fort Lauderdale, Florida 33328, United States. Purdue University, School of Pharmacy, Departments of Pharmaceutics and Biomedical Engineering, West Lafayette, Indiana 47907, United States.
- Omidian, H. and Kinam Park, (2010). *Fast-Responsive Macroporous Hydrogels*. Departments of Pharmaceutics and Biomedical Engineering West Lafayette, Indiana, 47907-2091, United States
Journal of Control Release 102: 3–12.
- Rui, Liang dan Mingzhu Liu. (2006). *Preparation and Properties of Coated Nitrogen Fertilizer with Slow Release and Water Retention*. Department of Chemistry and Stage Key Laboratory of Applied Organic Chemistry, Lanzhou University, Lanzhou. People's Republic of China..

- Sadeghi, M and G. Koutchakzadeh.(2007). *Swelling kinetics study of hydrolyzed carboxymethylcellulose-poly(sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogel with salt-sensitivity properties*. Department of Chemistry, Science Faculty, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak,Iran
- Shaviv, A. (2005). *Controlled Release Fertilizers*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers Frankfurt, Germany, 28-30 June 2005. Israel Institute of Technology. Israel.
- Shoaib, M. Harris, et al. (2006). *Evaluation of Drug Release Kinetics from Ibuprofen Matrix Tablet using HPMC*. Department of Pharmaceutics, Faculty of Pharmacy, University of Karachi. Pakistan.
- Suvakanta, Dash et al. (2010). *Kinetic Modeling on Drug Release from Controlled Drug Delivery Systems*. Girijananda Chowdhury Institute of Pharmaceutical Science. Acta Poloniae Pharmaceutica and Drug Research, Vol. 67 No. 3 pp. 217 ISSN 0001-6837. India.
- Tong, Zheng et al. (2009). *Superabsorbent Hydrogels as Carriers for the Controlled-Release of Urea: Experiments and a Mathematical Model Describing the Release Rate*. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin. China..
- Wang, Y.T. and L.L. Gregg. 1990. *Hydrophilic polymers-Their responses to soil amendments and effect on properties of a soilless potting mix*. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 115:943-948.
- Zahrani, S.M. (2000). *Utilization of Polyethylene and Paraffin Waxes as Controlled Delivery Systems for Different Fertilizers.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(2) pp. 367-371. (USA).
- Zohuriaan-Mehr, Muhammad and Kourosh Kabiri. (2008). *Superabsorbent Polymer Materials: A Review*. Iran Polymer and Petrochemical Institute., Teheran Iran.

LAMPIRAN



Lampiran 1 Perbandingan Komposisi Reaktan sintesis Poliakrilamida Berpori

Kode	AM 30 % (w/v) (mL)	AM (g)	MBA 1 % (w/v) (mL)	MBA (g)	CaCO ₃ (g)	APS 2,5% (w/v) (mL)	APS (g)	NBS 5% (w/v) (mL)	NBS (g)
G 1.1	6,7	2,0	5,0	0,05	3,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 1.2	10,0	3,0	5,0	0,05	3,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 1.3	14,7	4,4	5,0	0,05	3,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 2.1	10,0	3,0	10,0	0,10	3,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 2.2	10,0	3,0	3,0	0,03	3,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 2.3	10,0	3,0	5,0	0,05	1,5	2,0	0,05	1,0	0,05
G 3.1	10,0	3,0	5,0	0,05	6,0	2,0	0,05	1,0	0,05
G 3.2	10,0	3,0	5,0	0,05	3,0	1,2	0,03	1,0	0,05
G 3.3	10,0	3,0	5,0	0,05	3,0	3,2	0,08	1,0	0,05
G0	10,0	3,0	5,0	0,05	0,0	2,0	0,05	1,0	0,05

Volume Larutan = 40 mL

Lampiran 2 . Data Densitas Hidrogel

kode	Massa piknometer (g)	Massa pikno+cth (g)	Massa cth (g)	Massa pikno+cth+aseton (g)	Massa cth+aseton (g)	Massa aseton (g)	Densitas aseton(g/mL)	V cth (mL)	Densitas (g/mL)
G1.1	16.3017	16.7792	0.4775	23.028	6.7263	7.694	0.7851	1.233	0.3874
G 1.2	16.3017	16.5417	0.2400	23.597	7.2953	7.694	0.7851	0.508	0.4726
G 1.3	16.3017	16.8626	0.5609	23.5407	7.239	7.694	0.7851	0.580	0.9678
G 2.1	16.3017	16.9591	0.6574	23.0905	6.7888	7.694	0.7851	1.153	0.5702
G 2.2	16.3017	16.7824	0.4807	23.0294	6.7277	7.694	0.7851	1.231	0.3906
G 2.3	16.3017	16.7033	0.4016	23.5299	7.2282	7.694	0.7851	0.593	0.6769
G 3.1	16.3017	16.7616	0.4599	23.1462	6.8445	7.694	0.7851	1.082	0.4250
G 3.2	16.3017	17.048	0.7463	23.0834	6.7817	7.694	0.7851	1.162	0.6422
G. 3.3	16.3017	16.5187	0.2170	23.7653	7.4636	7.694	0.7851	0.293	0.7394
G0	16.3017	16.899	0.4499	23.8080	7.5063	7.694	0.7851	0.239	1.8818

Contoh Perhitungan :

1. Penentuan Densitas akuades

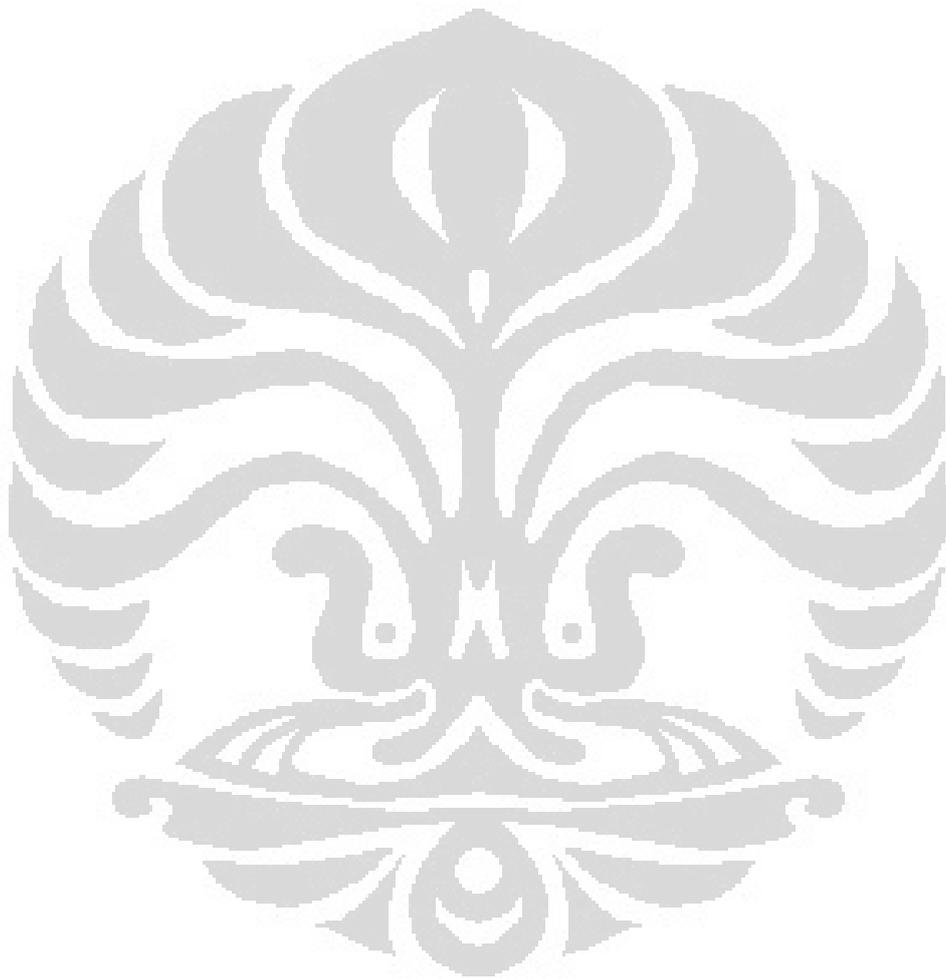
- Massa piknometer kosong = 16,2705 g
- Massa piknometer+akuades = 26,0950 g
- Massa akuades = 9.800 g
- Volume akuades = 10,00 mL
- Densitas akuades = $\frac{9.8000g}{10,0mL} = 0.9800g / mL$

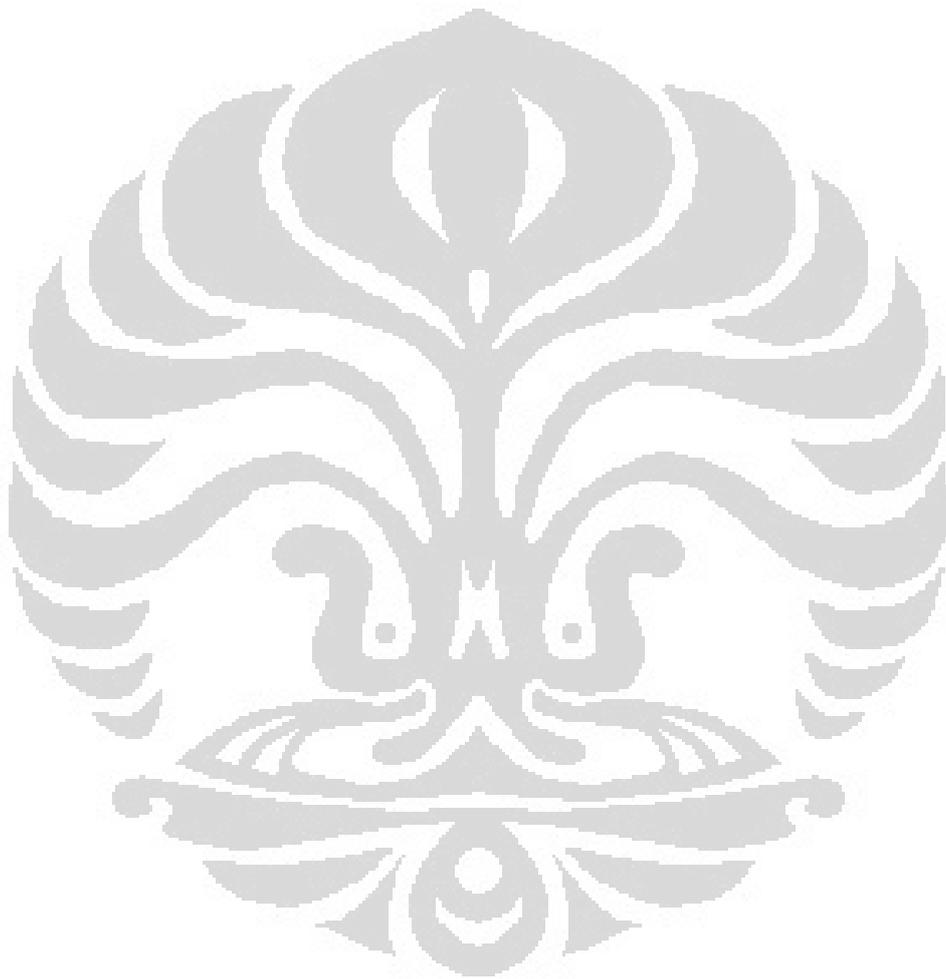
2. Penentuan Densitas Aseton

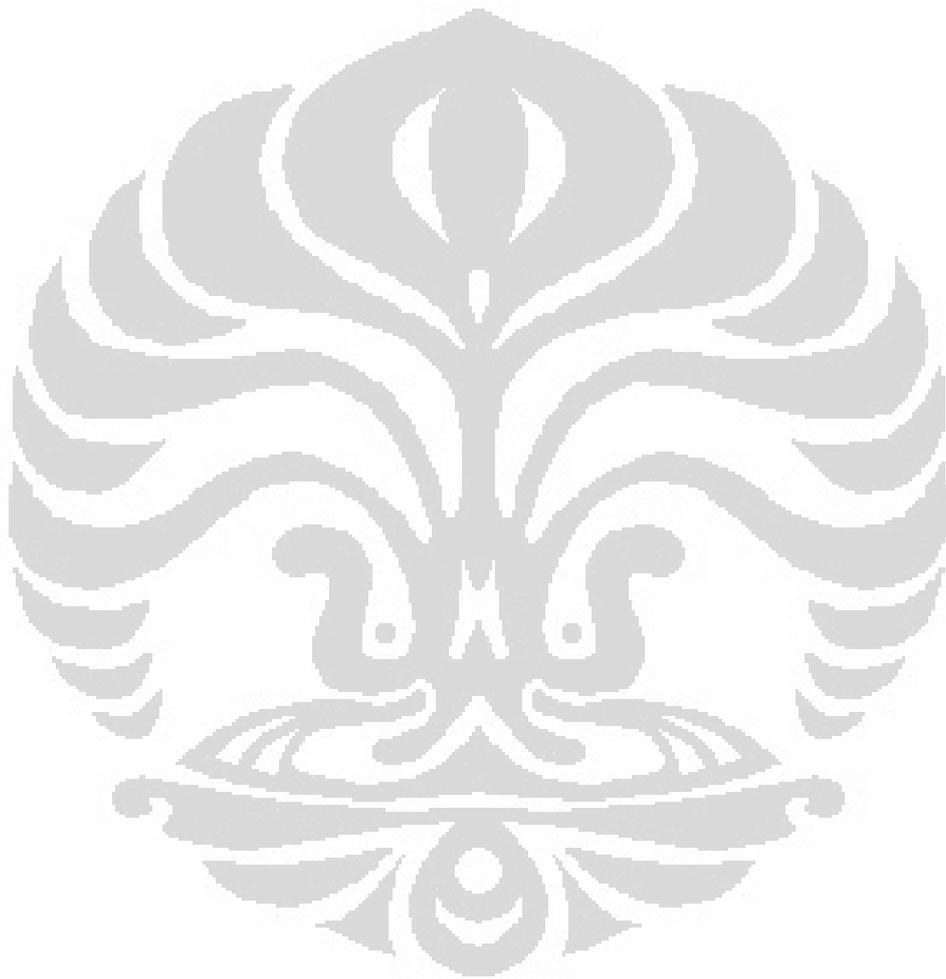
- Massa aseton + piknometer = 24.0517 g
- Massa aseton = 7.7812 g
- Densitas aseton = $\frac{m \text{ aseton}}{m \text{ H}_2\text{O}} \times \rho \text{ air} = \frac{7.7812g}{9.800g} \times 0.9800 = 0.77812g / mL$

3. Penentuan densitas Sampel kering :

- Massa piknometer+sampel = 16,5419 g
- Massa sampel = (16,5419-16,2705)= 0,2714 g
- Massapiknometer+sampel+aseton = 23,7390 g
- Massa sampel+Aseton = (23,7390-16,2705) = 7,4685 g
- Volume sampel = $\frac{\text{massa aseton yang dipindahkan}}{\rho \text{ aseton}} = \frac{7,7812 - 7,4685g}{0,77812g / mL} = 0,4019mL$
- Densitas sampel = $\frac{\text{massa sampel}}{V_{\text{sampel}}} = \frac{0,2714g}{0,4019mL} = 0,6753g / mL$







Contoh Perhitungan Persen Kapasitas Urea .

Hidrogel kering ditimbang dan direndam dalam 50,0 mL larutan urea 10% sampai tercapai kesetimbangan (tidak terjadi lagi kenaikan massa hidrogel)

- Massa hidrogel kering : 0,1627 g
- Massa hidrogel kering+ urea 10% setelah kesetimbangan : 9,4137 g
- Massa larutan urea 10% dalam hidrogel : $(9,4137-0,1627)= 9,2510$ g
- Densitas filtrate : 1,0065 g/mL
- Volume larutan urea dalam hidrogel : $9,2510 \text{ g}/1,0065\text{g.mL}^{-1}=9,19$ mL
- volume filtrat (yang tidak terserap hidrogel) (Volume awal-volume larutan urea dalam hidrogel) : $50,0 - 9,19 = 40,81$ mL
- 1,0 mL Filtrat dipipet+pereaksi dan diencerkan dalam labu 25 mL, diukur Absorbansnya. Absorbans yang diperoleh : 1,791
- Konsentrasi filtrat (regresi Linear) : 0,401 %
- Konsentrasi filtrat : $0,401 \times 25 = 10,01$ %

Jadi, Massa urea dalam filtrat :

$$\frac{V \text{ filtrat}}{100} \times \text{konsentrasi filtrat} : \frac{40,81}{100} \times 10,01 = 4,081\text{g}$$

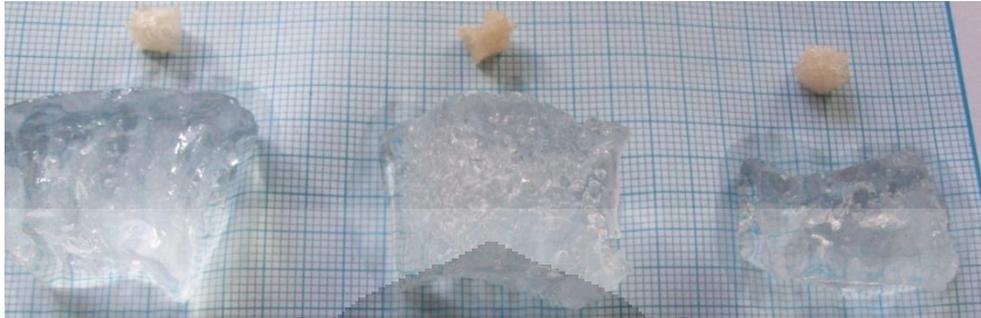
- Massa urea dalam 50 mL larutan : 5,0 g
- Massa urea dalam hidrogel = massa urea awal – massa urea dalam filtrat : $5,0 - 4,081 = 0,914$ g

Jadi, % kapasitas urea :

$$\frac{\text{massa urea yang diserap}}{\text{massa hidrogel kering}} \times 100\% : \frac{0,914 \text{ g}}{0,1627 \text{ g}} \times 100\% = 562 \%$$

Lampiran 5. Perbandingan Hidrogel poliakrilamida berpori kering dan yang mengandung larutan urea

1. Variasi akrilamida



(a) 0,70 M

(b) 1,05 M

(c) 1,55 M

2. Variasi MBA



(a) $4,75 \times 10^{-3} M$

(b) $8,0 \times 10^{-3} M$

(c) $16,25 \times 10^{-3} M$

3. Variasi $CaCO_3$



(a) 0,0 g

(b) 1,5 g

(c) 3,0 g

(d) 6,0 g

4. Variasi Inisiator



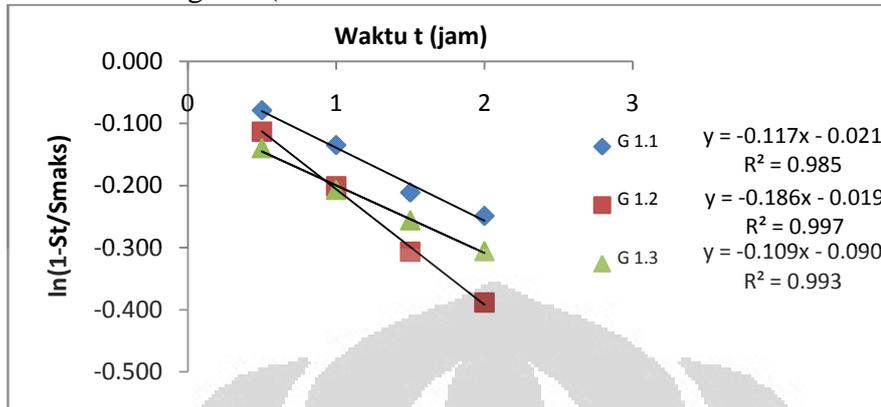
(a) $3,25 \times 10^{-3} M$

(b) $5,5 \times 10^{-3} M$

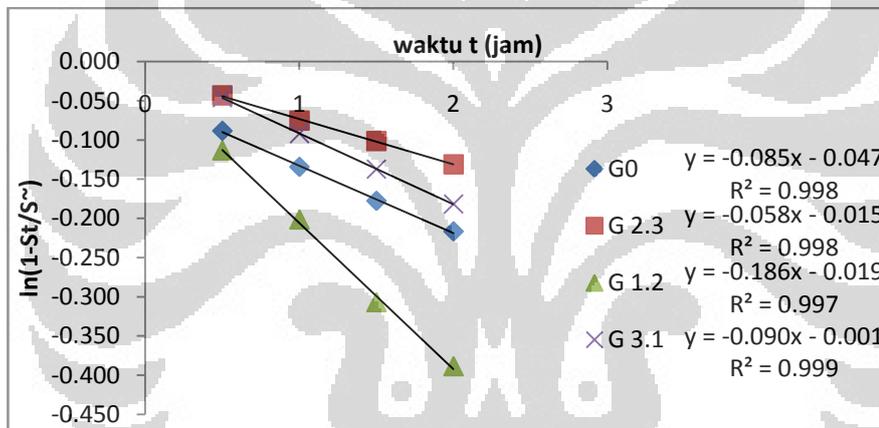
(c) $8,75 \times 10^{-3} M$

Lampiran 6. Kurva Kinetika Pengembangan Hidrogel

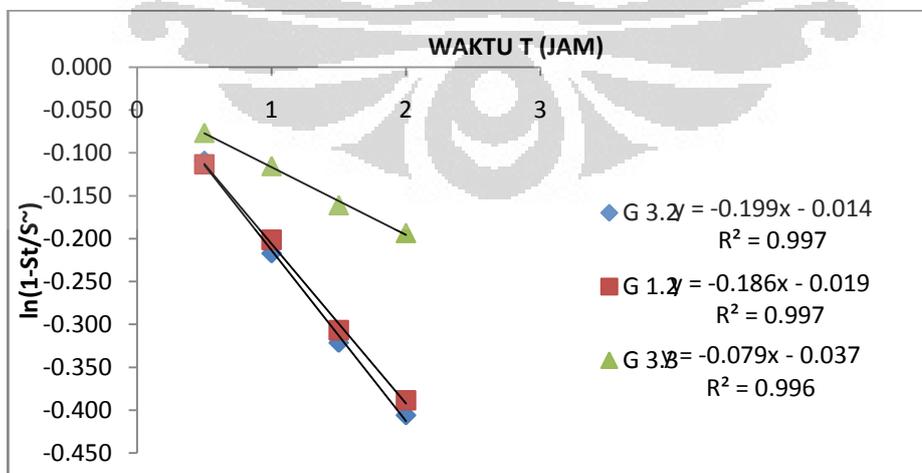
1. Hubungan $\ln(1-S_r/S_{maks})$ vs t variasi Akrilamida



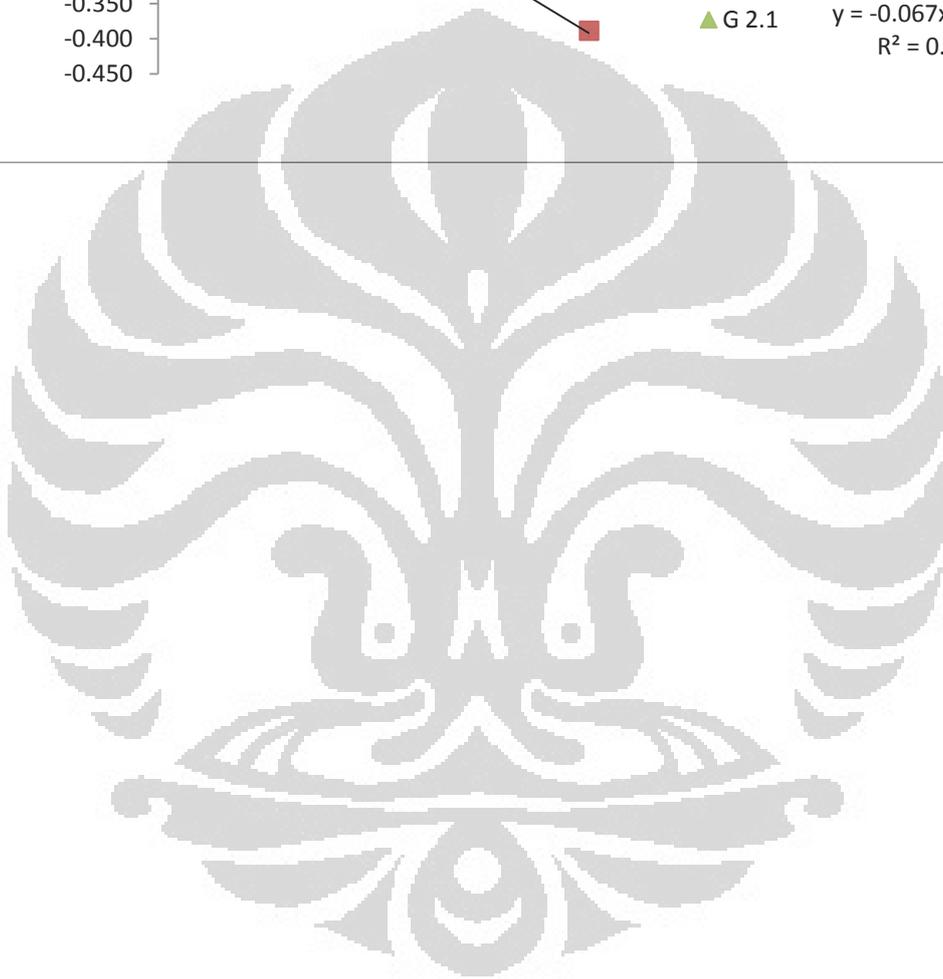
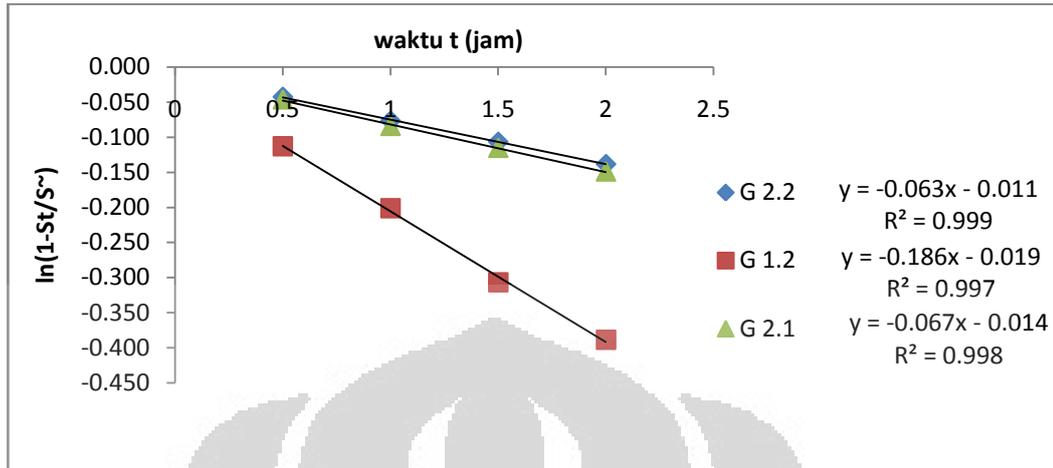
2. Hubungan $\ln(1-S_r/S_{maks})$ vs t variasi $CaCO_3$



3. Hubungan $\ln(1-S_r/S_{maks})$ vs t variasi APS



4. Hubungan $\ln(1-S_r/S_{maks})$ vs t variasi MBA



Lampiran 7. Data Pelepasan Urea dalam Akuades

1. Kode G 1.1

Massa urea dalam hidrogel = 0,85 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (%w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.088	0.0228	0.0057	100	50	0.284	33.470
10	0.113	0.0283	0.0071	98	49	0.347	40.793
15	0.146	0.0356	0.0089	96	48	0.428	50.295
20	0.156	0.0378	0.0095	94	47	0.445	52.314
25	0.172	0.0414	0.0103	92	46	0.476	56.002
30	0.195	0.0465	0.0116	90	45	0.523	61.538
60	0.249	0.0585	0.0146	88	44	0.643	75.672
120	0.278	0.0649	0.0162	86	43	0.698	82.088
24j	0.317	0.0736	0.0184	84	42	0.772	90.866

2. Kode G 1.2

Massa urea dalam hidrogel = 1,362 g

Waktu	Absorbans	konsentrasi (%w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.153	0.0372	0.0093	100	50	0.465	34.121
10	0.199	0.0474	0.0118	98	49	0.580	42.616
15	0.219	0.0518	0.0130	96	48	0.622	45.655
20	0.254	0.0596	0.0149	94	47	0.700	51.402
25	0.28	0.0654	0.0163	92	46	0.752	55.178
30	0.291	0.0678	0.0169	90	45	0.763	55.994
60	0.358	0.0827	0.0207	88	44	0.909	66.754
120	0.409	0.0940	0.0235	86	43	1.010	74.166
24 jam	0.482	0.1102	0.0275	84	42	1.157	84.925

3. Kode G 1.3

Massa urea dalam hidrogel = 0,889 g

Waktu	Absorbans	konsentrasi (%w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.091	0.0234	0.0059	100	50	0.293	32.94
10	0.102	0.0259	0.0065	98	49	0.317	35.64
15	0.122	0.0303	0.0076	96	48	0.364	40.90
20	0.138	0.0339	0.0085	94	47	0.398	44.74
25	0.159	0.0385	0.0096	92	46	0.443	49.82
30	0.172	0.0414	0.0103	90	45	0.466	52.38
60	0.213	0.0505	0.0126	88	44	0.555	62.47
120	0.246	0.0578	0.0145	86	43	0.621	69.90
24 jam	0.322	0.0747	0.0187	84	42	0.784	88.19

G 2.1

Massa : 1.015g

Waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.116	0.0290	0.0072	100	50	0.362	35.68
10	0.137	0.0336	0.0084	98	49	0.412	40.59
15	0.173	0.0416	0.0104	96	48	0.499	49.20
20	0.188	0.0449	0.0112	94	47	0.528	52.03
25	0.209	0.0496	0.0124	92	46	0.570	56.20
30	0.22	0.0520	0.0130	90	45	0.585	57.68
60	0.256	0.0600	0.0150	88	44	0.660	65.05
120	0.305	0.0709	0.0177	86	43	0.762	75.09
24JAM	0.355	0.0820	0.0205	84	42	0.861	84.81

G 22

Massa urea dalam gel : 1,918 g

Waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.177	0.0425	0.0106	100	50	0.531	27.70
10	0.204	0.0485	0.0121	98	49	0.594	30.97
15	0.26	0.0609	0.0152	96	48	0.731	38.11
20	0.306	0.0711	0.0178	94	47	0.836	43.57
25	0.339	0.0784	0.0196	92	46	0.902	47.03
30	0.359	0.0829	0.0207	90	45	0.932	48.61
60	0.433	0.0993	0.0248	88	44	1.092	56.94
120	0.574	0.1306	0.0326	86	43	1.404	73.18
24 jam	0.631	0.1432	0.0358	84	42	1.504	78.40

G 23

Massa urea 1,17 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.082	0.0214	0.0054	100	50	0.268	22.89
10	0.107	0.0270	0.0067	98	49	0.330	28.24
15	0.135	0.0332	0.0083	96	48	0.398	34.04
20	0.151	0.0367	0.0092	94	47	0.432	36.89
25	0.177	0.0425	0.0106	92	46	0.489	41.78
30	0.189	0.0452	0.0113	90	45	0.508	43.43
60	0.245	0.0576	0.0144	88	44	0.633	54.14
120	0.313	0.0727	0.0182	86	43	0.781	66.77
24 jam	0.42	0.0964	0.0241	84	42	1.012	86.52

G 31 Massa urea : 1,290 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (%w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.095	0.0243	0.0061	100	50	0.304	23.56
10	0.149	0.0363	0.0091	98	49	0.445	34.46
15	0.166	0.0401	0.0100	96	48	0.481	37.27
20	0.194	0.0463	0.0116	94	47	0.544	42.15
25	0.229	0.0540	0.0135	92	46	0.621	48.17
30	0.253	0.0594	0.0148	90	45	0.668	51.77
60	0.303	0.0705	0.0176	88	44	0.775	60.08
120	0.376	0.0866	0.0217	86	43	0.931	72.20
24 jam	0.454	0.1039	0.0260	84	42	1.091	84.61

G 32 Massa urea 0,668 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.084	0.0219	0.0055	100	50	0.273	40.93
10	0.1	0.0254	0.0064	98	49	0.311	46.62
15	0.127	0.0314	0.0079	96	48	0.377	56.43
20	0.138	0.0339	0.0085	94	47	0.398	59.54
25	0.145	0.0354	0.0089	92	46	0.407	60.95
30	0.155	0.0376	0.0094	90	45	0.423	63.36
60	0.186	0.0445	0.0111	88	44	0.489	73.28
120	0.221	0.0523	0.0131	86	43	0.562	84.11
24 jam	0.232	0.0547	0.0137	84	42	0.574	85.98

G 33 Massa urea 0,839 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.073	0.0194	0.0049	100	50	0.243	28.95
10	0.097	0.0248	0.0062	98	49	0.303	36.15
15	0.116	0.0290	0.0072	96	48	0.348	41.44
20	0.129	0.0319	0.0080	94	47	0.374	44.61
25	0.145	0.0354	0.0089	92	46	0.407	48.53
30	0.155	0.0376	0.0094	90	45	0.423	50.45
60	0.212	0.0503	0.0126	88	44	0.553	65.90
120	0.265	0.0620	0.0155	86	43	0.667	79.47
24jam	0.323	0.0749	0.0187	84	42	0.786	93.72

G0 Massa urea 0,621 g

waktu	Absorbans	konsentrasi (% w/v)	massa urea (g)	V larutan (mL)	faktor pengenceran	massa urea dalam larutan	% urea dilepas
5	0.047	0.0137	0.0034	100	50	0.171	27.51
10	0.062	0.0170	0.0042	98	49	0.208	33.52
15	0.082	0.0214	0.0054	96	48	0.257	41.41
20	0.097	0.0248	0.0062	94	47	0.291	46.84
25	0.116	0.0290	0.0072	92	46	0.333	53.65
30	0.124	0.0307	0.0077	90	45	0.346	55.70
60	0.149	0.0363	0.0091	88	44	0.399	64.28
120	0.164	0.0396	0.0099	86	43	0.426	68.58
24 jam	0.243	0.0571	0.0143	84	42	0.600	96.62

Contoh perhitungan Pelepasan Urea dalam air

Hidrogel yang mengandung beberapa g tertentu urea direndam ke dalam 100 mL akuades setelah menit-menit tertentu dipipet 2,0 mL filtrat ke dalam labu 25 mL + pereaksi dan diukur absorbansnya.

% urea yang dilepas dihitung dari selisih massa urea dalam larutan dan massa urea dalam hidrogel x 100.

contoh :

- Massa urea dalam hidrogel : 0,85 g
- Absorbans larutan setelah 5menit dalam 100 mL akuades : 0,088
- Konsentrasi urea (regresi linear) (%C) : 0,0228 %
- Jadi, massa urea yang terlarut dalam 100 mL akuades

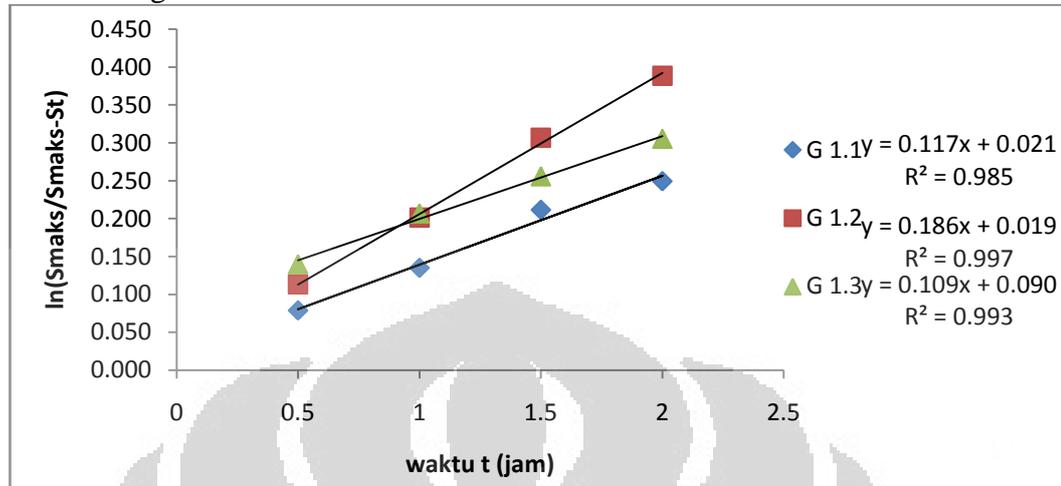
$$= \% C x \frac{V_{labu}}{V_{larutan}} x \text{Faktor pengenceran} = 0,0228 x \frac{25}{100} x 50 = 0,284 \text{ g}$$

Jadi, persen urea yang terlarut dalam akuades =

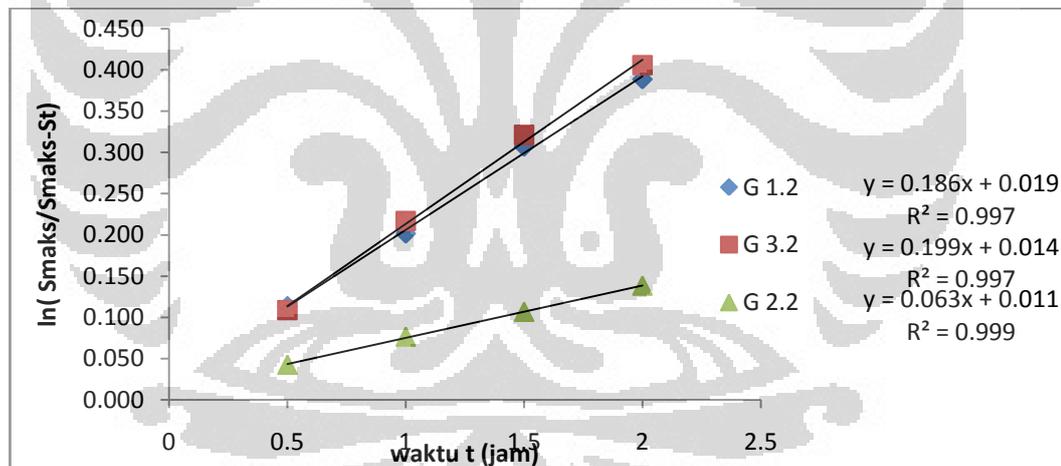
$$\frac{\text{massa urea yang larut dalam akuades}}{\text{massa urea awal dalam hidrogel}} \times 100 = \frac{0,284 \text{ g}}{0,85 \text{ g}} \times 100 = 33,47 \%$$

Kurva Kinetika pengembangan Hidrogel Orde-1

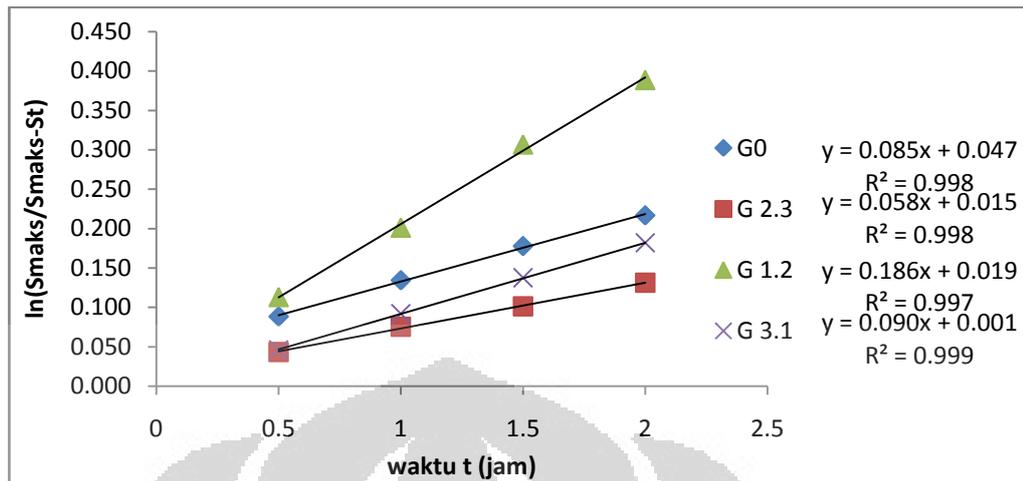
1. Pengaruh Akrilamida



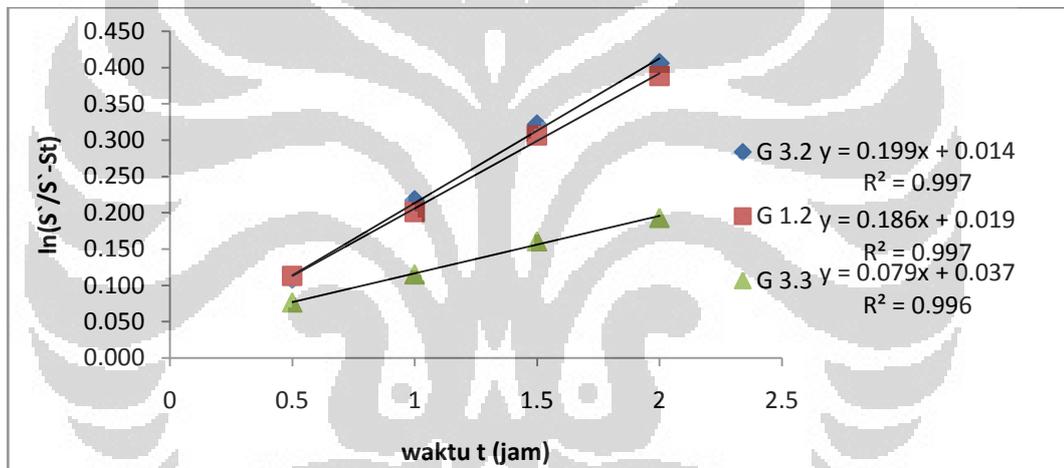
2. Pengaruh MBA



3. Pengaruh CaCO₃



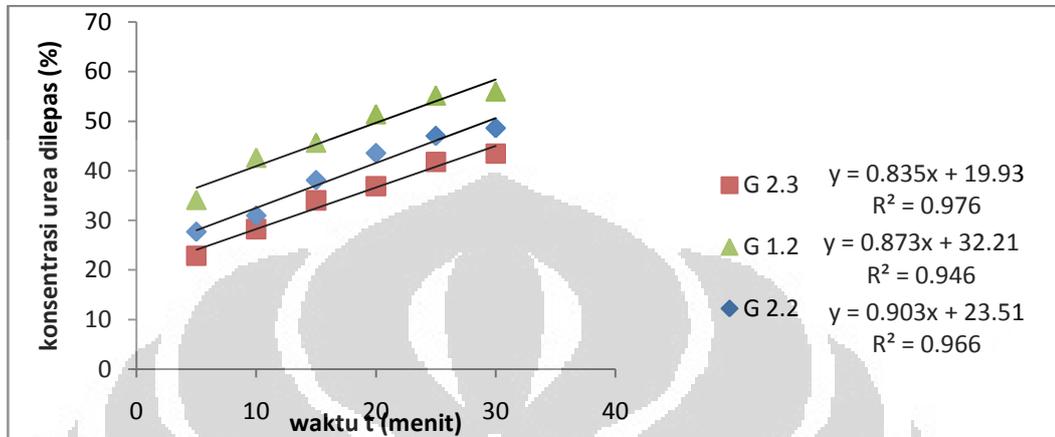
4. Pengaruh Inisiator



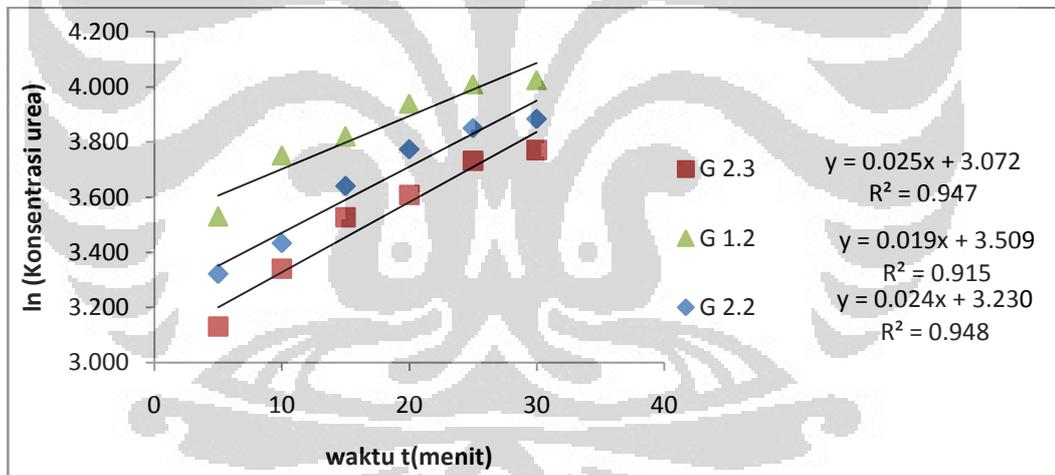
Lampiran 8.

Lampiran 9. Kinetika Pelepasan Urea

1. Kinetika Orde Nol . Hubungan % urea dilepas vs waktu



2. Kinetika pelepasan Urea Orde-1



3. Kinetika Metode Higuchi

