SINTESIS DAN OPTIMASI HIDROGEL BERBASIS SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE DAN CHITOSAN DENGAN METODE HIDROTERMAL

SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE AND CHITOSAN-BASED HYDROGEL USING HYDROTHERMAL METHOD

Setyono Hari Adi^{1*} dan Nani Heryani¹

¹Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Kementerian Pertanian, Jln Tentara Pelajar 1a Cimanggu, Bogor 16111

^{1*}E-mail: setyonoHari@pertanian.go.id

ARTICLE INFO

Article history

Received date:

2016-08-27

Received in revised form date:

2018-10-14

Accepted date:

2019-06-10

Available online date:

Juli 2019

Abstract

Hydrogel, as a water super absorbent polymer, has a potential to improve irrigation efficiency in agricultural land. The objective of this research was to optimize hydrogel syntheses using environmentally friendly natural polymers, including sodium carboxymethyl cellulose (NaCMC), chitosan, and citric acid. Hydrogel was synthesized using the hydrothermal method at a temperature below 100 °C and using water as the primary medium. The results of this research showed that hydrogel which was synthesized with 2% w/v of NaCMC and 5% w/w of citric acid in 10% v/v of chitosan, which was cross-linked in 80 °C for 2 hours, was able to absorb water up to 350 times of its dry weights for 30 minutes. The maximum absorption rate of the produced hydrogel was up to 55 grams per minutes and was achieved during the first 3 minutes of free absorbency test.

Keywords: Hydrogel, Polymer, Nanotechnology, Crosslinking

Kata kunci:

Hidrogel

Polimer alami

Teknologi nano

Pengaitan silang

Abstrak

Hidrogel sebagai polimer dengan kemampuan menyerap air, memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi irigasi. Tujuan penelitian ini adalah mengoptimasi sintesis dan pengujian hidrogel menggunakan material yang ramah lingkungan melalui penggunaan polimer alami, yaitu *sodium carboxymethyl cellulose* (NaCMC), *chitosan*, dan *citric acid*. Hidrogel di sintesis menggunakan metode pengaitan silang secara fisik yang dilakukan dalam media air pada suhu maksimal 100 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran antara 2% NaCMC dan 5% *citric acid* dalam larutan 10% *chitosan* yang direaksikan selama dua jam dalam oven dengan suhu 80 °C, mampu menghasilkan hidrogel dengan daya serap sampai dengan 350 kali bobot keringnya selama 30 menit. Laju penyerapan air maksimal sampai dengan 55 gram per menit dicapai dalam waktu tiga menit.

PENDAHULUAN

Teknologi nano merupakan teknologi baru yang sudah berkembang pesat di seluruh disiplin ilmu seperti di bidang energi, elektronik, dan khususnya bioteknologi yang dapat diaplikasikan di bidang pertanian. Dalam bidang pertanian, teknologi nano dapat diintegrasikan ke dalam proses pertanian mulai dari pengolahan lahan, produksi, penyimpanan, pemrosesan, pemasaran, distribusi, dan konsumsi (Sastry *et al.* 2011). Dewasa ini, implementasi teknologi nano di bidang pertanian lebih fokus pada proses pasca-panen pertanian, sementara penerapan pada tahap pengolahan lahan dan produksi hanya terbatas pada aplikasi pupuk (*slow release fertilizer*) dan pembenah tanah.

Hidrogel merupakan gel hidrofilik yang bersifat menyerap air dan mampu menyimpan air lebih dari bobot keringnya (Adi 2012). Hidrogel dapat disintesis dengan pendekatan teknologi nano dengan menggunakan polimer alami yang ramah lingkungan. Salah satu polimer alami ramah lingkungan sebagai bahan hidrogel, yaitu selulosa (Chang and Zhang 2011; Alessandro Sannino, Demitri, and Madaghiele 2009), termasuk di dalamnya adalah methyl cellulose (MC) (Aouada, Moura, and Mattoso 2011), hydroxypropyl cellulose (HPC), hydroxypropylmethyl cellulose (HPMC), dan carboxymethyl cellulose (CMC) (Nie *et al.* 2004; Pourjavadi, Barzegar, and Mahdavinia 2006). Selain itu, juga dapat disintesis dengan menggunakan chitosan dan turunannya (Chatterjee, Chatterjee, and Woo 2010; Dutta, Dutta, and Tripathi 2004; Jayakumar *et al.* 2005; C.K.S. Pillai, Willi Paul 2009; Rinaudo 2006; Yang *et al.* 2010; Zamani, Henriksson, and Taherzadeh 2010). Pada bidang pertanian, hidrogel memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan kapasitas tampung air oleh

tanah guna peningkatan efisiensi irigasi. Hidrogel memiliki potensi besar untuk diaplikasikan di lahan pertanian terutama lahan kering, tetapi aplikasi secara luas pada saat ini belum dapat dilaksanakan karena tingginya biaya produksi dan mudahnya hidrogel terdegradasi di dalam tanah, sehingga tidak terdapat peningkatan efisiensi irigasi yang signifikan (Subagio 2009).

Di Indonesia, penelitian tentang hidrogel sebagai super-absorbent masih terbatas pada tahap sintesis. Dua teknik sintesis hidrogel yang sering digunakan, yaitu: 1) teknik kombinasi kopolimerisasi cangkok (Anah *et al.* 2010) dan iradiasi sinar gamma (Erizal and Redja 2010; Erizal and Sunarni 2009; Rekso and Sunarni 2009; Tamat, Erizal, and Gunawan 2008), dengan bahan utama antara lain carboxymethyl cellulose (Anah *et al.* 2010), acrylamide (Erizal and Sunarni 2009), alginate (Erizal and Redja 2010), dan chitosan (Rekso and Sunarni 2009) dan 2) teknik iradiasi sinar gamma murni dengan menggunakan bahan Poly (Acrylamide-co-Acrylic Acid) yang dapat menghasilkan hidrogel dengan kapasitas serap sampai dengan 350 kali bobot keringnya (Erizal and Sunarni 2009). Walaupun menghasilkan hidrogel dengan kapasitas serap air tinggi, tetapi kedua teknik sintesis yang diterapkan memerlukan peralatan dan operator khusus sehingga terkendala dalam implementasi secara langsung kepada petani.

Penelitian-penelitian lain tentang hidrogel sebagai super-absorbent berbasis cellulose telah dilakukan menggunakan metode radiasi cross-linking (Liu *et al.* 2005, 2002) dan metode kimia cross-linking (A. Sannino, Maffezzoli, and Nicolais 2003; Marci *et al.* 2006). Ibrahim *et al.* (2007) menyintesis hidrogel berbasis CMC/acrylamide melalui cross-linking menggunakan electron-beam irradiation berhasil meningkatkan retensi tanah ter-

hadap air. Hidrogel sebagai super-absorbent yang mudah terurai juga telah dipelajari melalui eterifikasi (etherifying) cellulose dengan succinic anhydride yang dapat menyerap air sebanyak 400 kali berat keringnya (Yoshimura, Matsuo, and Fujioka 2006). Hasil penelitian Jardim et al. (2011) menyebutkan bahwa dengan menggunakan bahan CMC daya serap pada serbuk kertas meningkat 84 s.d. 93,75% dibandingkan kontrol. Penggunaan chitosan dan CMC yang merupakan polimer hidrofilik meningkatkan daya serap air s.d. 60% pada lapisan tanah mengandung liat (Taher A. Salah El-Din, 2012).

Tujuan penelitian ini untuk melakukan optimasi sintesis hidrogel menggunakan teknik *hydrothermal* yang sederhana dan murah dengan memanfaatkan bahan-bahan kimia yang ramah lingkungan, seperti CMC dan *chitosan*. Teknik ini menggunakan air sebagai bahan pelarut utama dan diproses dengan pemanasan pada suhu rendah (<100 °C). Dengan menggunakan teknologi yang sederhana dan bahan yang ramah lingkungan, hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan aplikabilitas hidrogel untuk pertanian. Penelitian ini bermanfaat bagi program peningkatan efisiensi penggunaan air untuk pertanian melalui aplikasi pertanian presisi.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan penelitian yang digunakan, yaitu: *Sodium salt of carboxymethyl cellulose* (NaCMC, CAS. 9004-32-4), *citric acid* (CA, CAS. 77-92-9), dan *chitosan* (produksi lokal dengan derajat deasetilasi > 75%). Peralatan yang digunakan adalah oven listrik (Memmert UNB 400) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM),

masing-masing untuk proses sintesis dan karakterisasi hidrogel.

Cara Kerja

Sintesis hidrogel dengan metode hidrotermal

Sintesis hidrogel dilaksanakan dengan menerapkan modifikasi dan optimasi metode yang dikembangkan oleh Alessandro Sannino, Demitri, and Madaghiele (2009); Alessandro Sannino, Ambrosio, and Nicolais (2012). Hidrogel disintesis melalui proses kombinasi atom dan molekul secara kimiawi (Hornyak et al. 2008) melalui metode polimerisasi radikal bebas (Kunzler 2003). Proses pengaitan silang secara hidrotermal dilakukan dengan menggunakan oven listrik (Memmert UNB 400) dengan kombinasi suhu, yaitu: 80 dan 100 °C, dan waktu pemanasan, yaitu: 2, 3, dan 6 jam, sebagai variable penelitian. *sodium salt of carboxymethyl cellulose* (NaCMC, CAS. 9004-32-4) digunakan sebagai bahan utama hidrogel, dengan *citric acid* (CA, CAS. 77-92-9) sebagai material pengait silang dan *deionized water* sebagai pelarut utama. Lebih lanjut, *chitosan* diintroduksi sebagai polimer sekunder dalam sintesis hidrogel. Pengujian pengaruh *chitosan* (Ch) terhadap daya serap hidrogel yang dihasilkan dilakukan pada empat konsentrasi larutan 1% v/v Ch yang berbeda, meliputi 10%, 30%, 50%, dan 100% v/v terhadap volume air yang digunakan.

Uji daya serap

Daya serap hidrogel yang dihasilkan diuji menggunakan metode uji kapasitas serap bebas (*free absorbency test*) dengan metode kantung teh (*tea bag method*), menggunakan persamaan:

$$a = (W_t - W_0) / W_0 \quad (1)$$

dengan W_t adalah berat hidrogel pada waktu t , dan W_0 adalah berat kering hidrogel. Lebih lanjut, rasio laju penyerapan air (*swelling rate test*) dihitung berdasarkan profil waktu pembengkakan (*swelling-time profile*), menggunakan persamaan:

$$s = a / t \quad (2)$$

dengan s adalah laju serap air (gram/menit), a adalah kemampuan serap hidrogel pada waktu t per gram hidrogel, dan t adalah waktu penyerapan (menit).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis morfologi menggunakan SEM dengan pembesaran 2.000 kali terhadap sampel hidrogel disintesis menggunakan larutan 2% w/v NaCMC dan 5% w/w CA terhadap berat NaCMC dengan lama proses pengaitan silang dua jam pada suhu 80 °C disajikan pada Gambar 1. Lebih lanjut, hidrogel sebelum dan sesudah proses perendaman dalam air dan grafik hasil uji daya serap hidrogel dengan menggunakan metode kantung teh disajikan pada Gambar 2.

Gambar 1. Permukaan hidrogel dari NaCMC + CA hasil analisis SEM

Berdasarkan uji daya serap, hidrogel dari bahan NaCMC mampu menyerap air sampai dengan 100 kali bobot kerin-gnya dalam waktu 15 menit, dengan laju

penyerapan air rata-rata adalah 7,6 g/ menit. Walaupun memiliki daya serap yang tinggi, hidrogel yang dihasilkan hanya dapat bertahan dalam air sampai dengan satu minggu. Setelah itu, hidrogel yang terendam sudah tidak dapat disaring lagi dengan menggunakan saringan nylon berukuran 300 mesh. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya bahwa penggunaan NaCMC sebagai bahan dasar hidrogel dapat menghasilkan material dengan daya serap air yang relatif tinggi (100-200 kali bobot kering), tetapi mempunyai struktur fisik yang lemah sehingga diperlukan modifikasi prosedur dan introduksi bahan kimia ramah lingkungan baru untuk meningkatkan performan dan daya tahan hidrogel (Alessandro Sannino, Demitri, and Madaghiele 2009; Alessandro Sannino, Ambrosio, and Nicolais 2012; Pourjavadi, Barzegar, and Mahdavinia 2006).

Gambar 2. Hidrogel sebelum (A dan C) dan sesudah (B dan D) direndam dalam air

Gambar 3. Hasil uji daya serap hidrogel dari NaCMC + CA

Chitosan pada sintesis hidrogel

Hasil uji serap pada Gambar 4 menunjukkan bahwa penambahan larutan 1% w/v Ch pada larutan 2% v/v NaCMC dengan rasio 1 (Ch) berbanding 9 (NaCMC) meningkatkan daya dan laju penyerapan hidrogel. Hidrogel dari NaCMC/Ch memiliki daya serap sampai dengan 350 kali bobot keringnya dalam waktu 30 menit, dengan laju penyerapan rata-rata sampai dengan 34 g/menit. Hasil signifikan dari uji coba ini adalah kemampuan hidrogel dari NaCMC/Ch untuk menyerap air sampai 170 kali dari bobot keringnya dalam waktu hanya tiga menit, dengan laju penyerapan sampai dengan 56 g/menit.

Hidrogel yang disintesis dengan hanya menggunakan NaCMC bersifat mudah hancur, meskipun secara umum tidak terlarut dalam air. Sannino *et al.* (2009, 2012) menyebutkan bahwa lemahnya struktur hidrogel yang disintesis salah satunya disebabkan oleh terjadinya *self-crosslinking* pada gugus *hidroxy*l aktif yang tidak stabil pada NaCMC. Selain dapat meningkatkan daya dan laju penyerapan hidrogel (Gambar 4), penambahan polimer kationik *chitosan* (Ch) kemungkinan juga mengurangi terjadinya *self-crosslinking* sehingga memperkuat struktur fisik hidrogel yang disintesis (tidak mudah larut).

Gambar 4. Hasil uji serap hidrogel dari NaCMC/Ch + CA

Pengaruh konsentrasi prekursor, lama reaksi, dan suhu reaksi terhadap performa daya serap hidrogel

Pengaruh konsentrasi prekursor terhadap performa hidrogel

Hasil uji pengaruh perbedaan persentase konsentrasi Ch dalam volume pelarut (10, 30, 50, dan 100%) terhadap performa daya serap hidrogel yang disintesis disajikan pada Gambar 5. Hasil uji serap menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi larutan Ch ke dalam reaksi menurunkan kemampuan serap hidrogel yang disintesis dengan menggunakan konsentrasi NaCMC, CA, suhu reaksi, dan lama reaksi sintesis yang sama (masing-masing 2% w/v, 5% w/w, 80°C, dan dua jam). Berdasarkan hasil analisis morfologi permukaan hidrogel dengan menggunakan SEM diketahui bahwa peningkatan konsentrasi Ch dalam larutan NaCMC/Ch meningkatkan terjadinya ikatan ionik antara NaCMC dan *chitosan*. Hasil dari reaksi ionik ini adalah material yang tidak berpori dan kemungkinan memiliki daya serap air rendah.

Pada larutan NaCMC/Ch dengan kadar Ch 10% v/v, reaksi pengaitan silang menghasilkan material dengan permukaan berpori dengan diameter pori ~100 nm dan terdistribusi dengan merata (Gambar 6 A dan B). Peningkatan konsentrasi larutan Ch sampai dengan 50% menunjukkan berkurangnya distribusi permukaan berpori (Gambar 6 E dan F). Adanya ikatan ionik antara NaCMC dan *chitosan* mengganggu proses pengaitan silang oleh *citric acid* sehingga menghalangi terbentuknya struktur tiga dimensi yang berfungsi sebagai kontainer air dalam proses penyerapan.

Gambar 5. Perbandingan hasil uji serap hidrogel dari NaCMC/Ch dengan perbedaan konsentrasi Ch dalam larutan masing-masing 10%, 30%, 50%, dan 100% v/v

Peningkatan konsentrasi *chitosan* dalam larutan NaCMC/Ch terbukti menurunkan daya serap hidrogel. Akan tetapi tingginya konsentrasi *chitosan* juga berkorelasi positif dengan daya tahan hidrogel. Hidrogel dengan konsentrasi *chitosan* tinggi mampu mempertahankan bentuknya dalam proses uji serap, sedangkan hidrogel dengan konsentrasi *chitosan* rendah sangat mudah berubah bentuk dan memiliki tendensi untuk teraglomerasi.

Pengaruh lama reaksi terhadap performa hidrogel

Pada Gambar 7 disajikan bahwa hasil uji pengaruh lama reaksi pengaitan silang (2, 3, dan 6 jam) terhadap performa hidrogel yang disintesis dengan konsentrasi prekursor dan suhu yang sama (80 °C). Pada Gambar 7 diketahui bahwa lama reaksi pengaitan silang berkorelasi negatif dengan performa hidrogel. Semakin lama reaksi pengaitan silang, performa hidrogel semakin menurun. Dari hasil analisis morfologi dengan SEM pada sampel hidrogel dengan lama reaksi pengaitan berbeda (Gambar 8), diketahui bahwa semakin lama proses pengaitan silang, hidrogel yang dihasilkan semakin banyak mengandung gumpalan-gumpalan yang menyebabkan permukaannya semakin bertekstur.

Gambar 6. Permukaan hidrogel dari NaCMC/Ch dengan konsentrasi Ch dalam larutan masing-masing 10% (A dan B), 30% (C dan D), dan 50% (E dan F)

Berdasarkan uji coba terkait lama proses pengaitan silang pada hidrogel berbasis NaCMC oleh Sannino *et al.* (2009), diketahui bahwa lama proses pengaitan silang berbanding lurus dengan besarnya kemungkinan terjadinya *self-crosslinking* yang berakibat pada turunnya daya serap hidrogel.

Pengaruh suhu reaksi terhadap performa hidrogel

Dalam proses pengaitan silang, suhu reaksi berpengaruh terhadap seberapa cepat proses pengaitan silang itu terjadi. Perbandingan hasil uji serap pada suhu 80 dan 100 °C disajikan pada Gambar 9. Semakin tinggi suhu reaksi akan menurunkan performa hidrogel. Tercatat dengan waktu reaksi yang sama, peningkatan suhu reaksi dari 80 °C menjadi 100 °C akan menurunkan daya serap hidrogel sampai dengan 50%. Penentuan lama reaksi dan suhu reaksi diperlukan dalam menghasilkan hidrogel dengan daya serap optimal.

Gambar 7. Perbandingan hasil uji serap hidrogel dari NaCMC/Ch dengan perbedaan lama reaksi masing-masing dua, tiga, dan enam jam

Gambar 8. Permukaan hidrogel dari NaCMC/Ch dengan perbedaan lama reaksi masing-masing dua jam (A) dan empat jam (B)

Gambar 9. Perbandingan hasil uji serap hidrogel dari NaCMC/Ch dengan perbedaan suhu reaksi masing-masing 80 dan 100 °C

Berdasarkan studi pengaruh konsentrasi, lama reaksi, dan suhu reaksi terhadap performa hidrogel, diketahui bahwa hidrogel dengan daya serap dan laju serap tertinggi dihasilkan dari proses reaksi 2% w/w NaCMC dalam larutan 10% v/v larutan 1% w/v Ch yang dicampur dengan 5% w/w CA terhadap NaCMC, dan dikaitsilangkan di dalam oven pada suhu 80 °C selama dua jam. Lama sintesis selama dua jam merupakan waktu sintesis

optimum hidrogel berbasis NaCMC, sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya oleh Sannino *et al.* (2009). Lebih lanjut, penambahan larutan 1% v/v *chitosan* kurang dari 10% dari volume pelarut (air) tidak menunjukkan peningkatan daya serap dibandingkan dengan metode sintesis acuan oleh Sannino *et al.* (2009). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan 1% v/v *chitosan* pada sintesis hidrogel berbasis NaCMC menghasilkan hidrogel dengan daya serap sampai dengan 350 kali bobot keringnya dalam waktu 30 menit, dengan laju penyerapan air rata-rata 34 g/menit. Laju penyerapan air maksimal sampai dengan 55 gram per menit dicapai dalam waktu sampai dengan tiga menit.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini telah menunjukkan metode optimasi daya serap hidrogel berbasis NaCMC dengan penambahan polimer kationik *chitosan* (Ch) sebagai penguat struktur hidrogel. Penambahan Ch pada sintesis hidrogel berbasis NaCMC meningkatkan daya serap hidrogel tiga kali lipat dari hidrogel yang disintesis dengan hanya menggunakan NaCMC sebagai prekursor. Hidrogel dengan daya serap sampai dengan 350 kali bobot keringnya dapat disintesis dengan menggunakan bahan yang ramah lingkungan, yaitu NaCMC (bahan pengental makanan), *chitosan* (dibuat dari kulit udang dan bersifat anti bakteri), dan *citric acid* (secara umum terdapat pada buah jeruk). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hidrogel dapat disintesis melalui prosedur yang mudah, murah, dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para teknisi Balai Penelitian Agroklimat

dan Hidrologi yang secara langsung terlibat dalam kegiatan penelitian ini. Lebih lanjut, ucapan terima kasih kepada Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian RI yang telah memberikan dukungan peralatan dan dana penelitian

DAFTAR ACUAN

- Adi, Setyono Hari. 2012. "Teknologi Nano Untuk Pertanian: Aplikasi Hidrogel Untuk Efisiensi Irigasi." *Jurnal Sumberdaya Lahan* 6 (1): 1–8.
- Anah, Lik, Nuri Astrini, Suharto, Asep Nurhikmat, dan Agus Haryono. 2010. "Studi Awal Sintesa Carboxy Methyl Cellulose-Graft-Poly(Acrylic Acid)/ Monmorilonit Superabsorben Polimer Hidro Gel Komposit Melalui Proses Kopolimerisasi Cangkok." *Berita Selulosa* 45 (1): 8.
- Aouada, Fauze Ahmad, Márcia Regina de Moura, dan Luiz Henrique Capparelli Mattoso. 2011. "Biodegradable Hydrogel as Delivery Vehicle for the Controlled Release of Pesticide." In *Pesticides - Formulations, Effects, Fate*, 808. Intech. <http://cdn.intechweb.org/pdfs/13006.pdf>.
- C.K.S. Pillai, Willi Paul, Chandra P. Sharma. 2009. "Chitin and Chitosan Polymers-Chemistry, Solubility and Fiber Formation." *Progress in Polymer Science* 34 (7): 641–78.
- Chang, Chunyu, dan Lina Zhang. 2011. "Cellulose-Based Hydrogels: Present Status and Application Prospects." *Carbohydrate Polymers* 84 (1): 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.023>.
- Chatterjee, Sudipta, Tania Chatterjee, dan Seung H. Woo. 2010. "A New Type of Chitosan Hydrogel Sorbent Generated by Anionic Surfactant Gelation." *Bioresource Technology* 101 (11): 3853–58. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.089>.
- Dutta, Pradip Kumar, Joydeep Dutta, dan V.S Tripathi. 2004. "Chitin and Chitosan: Chemistry, Properties and Application." *Journal of Scientific and Industrial Research* 63 (12): 20–31.
- Erizal, dan I Wayan Redja. 2010. "Sintesis Hidrogel Superabsorben Polietilen Oksida-Alginat Dengan Teknik Radiasi Gamma Dan Karakterisasinya." *Jurnal Ilmu Kefarmasian Indonesia* 8 (1): 8.
- Erizal, dan Anik Sunarni. 2009. "Sintesis Hidrogel Superabsorbent Poli(Akridamida-Ko-Asam Akrilat) Dengan Teknik Iradiasi Dan Karakterisasinya." *Jurnal Sains Materi Indonesia* 11 (1): 7.
- Hornyak, Gabor L., Joydeep Dutta, Harry F. Tibbals, dan Anil K. Rao. 2008. *Introduction to Nanoscience. Nano Today*. Vol. 3. CRC Press. [https://doi.org/10.1016/S1748-0132\(08\)70046-X](https://doi.org/10.1016/S1748-0132(08)70046-X).
- Ibrahim, Sayeda M., Kariman M. El Salmawi, dan A. H. Zahran. 2007. "Synthesis of Crosslinked Superabsorbent Carboxymethyl Cellulose/Acrylamide Hydrogels through Electron-Beam Irradiation." *Journal of Applied Polymer Science* 104 (3): 2003–8. <https://doi.org/10.1002/app.25916>.
- Jardim, Carolina M, Larisse A R Batalha, Rubens C de Oliveira, dan Jorge L Colodette. 2011. "Impacts of the Carboxymethylcellulose Adsorption onto Eucalyptus Bleached Fibers and Their Effects on Paper Properties." In *5th International Colloquium on Eucalyptus Pulp*. Porto Seguro, Bahia, Brazil.
- Jayakumar, R., M. Prabakaran, R.L. Reis, dan J.F. Mano. 2005. "Graft Copolymerized Chitosan-Present Status and Applications." *Carbohydrate Polymers* 62 (2): 142–58. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.017>.
- Kunzler, Jay Friedrich. 2003. *Hidrogels Encyclopedia of Polymer Science*. Jon Wiley and Sons, Inc.

- Liu, Pengfei, Jing Peng, Jiuqiang Li, dan Jilan Wu. 2005. "Radiation Cross-linking of CMC-Na at Low Dose and Its Application as Substitute for Hydrogel." *Radiation Physics and Chemistry* 72 (5): 635–38. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.03.090>.
- Liu, Pengfei, Maolin Zhai, Jiuqiang Li, Jing Peng, dan Jilan Wu. 2002. "Radiation Preparation and Swelling Behavior of Sodium Carboxymethyl Cellulose Hydrogels." *Radiation Physics and Chemistry* 63 (3–6): 525–28. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00649-1](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00649-1).
- Marci, Giuseppe, Giuseppe Mele, Leonardo Palmisano, Piero Pulito, dan Alessandro Sannino. 2006. "Environmentally Sustainable Production of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels." *Green Chemistry* 8 (5): 439–44. <https://doi.org/10.1039/b515247j>.
- Nie, Huarong, Mingzhu Liu, Falu Zhan, dan Mingyu Guo. 2004. "Factors on the Preparation of Carboxymethyl-cellulose Hydrogel and Its Degradation Behavior in Soil." *Carbohydrate Polymers* 58 (2): 185–89. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.035>.
- Pourjavadi, a., Sh Barzegar, dan G. R. Mahdavinia. 2006. "MBA-Cross-linked Na-Alg/CMC as a Smart Full-Polysaccharide Superabsorbent Hydrogels." *Carbohydrate Polymers* 66 (3): 386–95. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.03.013>.
- Rekso, Gatot Trimulyadi, dan Anik Sunarni. 2009. "Karakteristik Hidrogel Polivinil Alkohol-Khitosan Hasil Iradiasi Sinar Gamma." *Jurnal Sains Materi Indonesia* 10 (3): 5.
- Rinaudo, Marguerite. 2006. "Chitin and Chitosan: Properties and Applications." *Progress in Polymer Science* 31 (7): 603–32.
- Sannino, A., A. Maffezzoli, dan L. Nicolais. 2003. "Introduction of Molecular Spacers between the Crosslinks of a Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogel: Effects on the Equilibrium Sorption Properties." *Journal of Applied Polymer Science* 90 (1): 168–74. <https://doi.org/10.1002/app.12625>.
- Sannino, Alessandro, Luigi Ambrosio, dan Luigi Nicolais. 2012. Polymer hydrogels and methods of preparation thereof. 12/703, issued 2012.
- Sannino, Alessandro, Christian Demitri, dan Marta Madaghiele. 2009. "Biodegradable Cellulose-Based Hydrogels: Design and Applications." *Materials* 2: 353–73.
- Sastry, R Kalpana, H. B. Rashmi, N. H. Rao, R. Kalpana Sastry, H. B. Rashmi, dan N. H. Rao. 2011. "Nanotechnology for Enhancing Food Security in India." *Food Policy* 36 (3): 391–400.
- Subagio, Heru Agus. 2009. "Pengaruh Kandungan Hidrogel Dan Jadwal Irigasi Pada Pembibitan Tanaman Jarak Pagar." Institut Pertanian Bogor.
- Taher A. Salah El-Din. 2012. "Preparation and Characterization of Water-Absorbing Composite Membrane for Medical Applications." *African Journal of Biotechnology* 11 (66). <https://doi.org/10.5897/AJB12.707>.
- Tamat, Swasono R., Erizal, dan Chairil Gunawan. 2008. "Sintesis Hidrogel Poli(N-Vinil-2-Pirolidon-Asam Tartrat) Secara Iradiasi Gamma Dan Karakterisasinya." *Jurnal Ilmu Ke-farmasian Indonesia* 6 (1): 8.
- Yang, Chao, Ling Xu, Ying Zhou, Xiangmei Zhang, Xin Huang, Min Wang, Ye Han, Maolin Zhai, Shicheng Wei, dan Jiuqiang Li. 2010. "A Green Fabrication Approach of Gelatin/CM-Chitosan Hybrid Hydrogel for Wound Healing." *Carbohydrate Polymers* 82 (4): 1297–1305. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.013>.

- Yoshimura, Toshio, Kaori Matsuo, dan Rumiko Fujioka. 2006. "Novel Biodegradable Superabsorbent Hydrogels Derived from Cotton Cellulose and Succinic Anhydride: Synthesis and Characterization." *Journal of Applied Polymer Science* 99 (6): 3251–56. <https://doi.org/10.1002/app.22794>.
- Zamani, Akram, Dag Henriksson, dan Mohammad J. Taherzadeh. 2010. "A New Foaming Technique for Production of Superabsorbents from Carboxymethyl Chitosan." *Carbohydrate Polymers* 80 (4): 1091–1101. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.029>.