

RASIO PATI SINGKONG DAN ASAM AKRILAT TERHADAP KAPASITAS ABSORBSI PADA SINTESIS KOMPOSIT POLIMER SUPERABSORBAN

Weni Fika¹⁾

Anwar Kasim¹⁾

Novelina¹⁾

Athanasia Amanda Septevani²⁾

¹⁾Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Andalas

²⁾Pusat Penelitian Kimia-LIPI, Serpong

E-mail: fk_winnie@yahoo.co.id

ABSTRACT

This study aimed to synthesize a superabsorbent polymer composite based on a natural polymer that has been made by grafting method using cassava starch as a backbone (main framework), Acrylic acid (AA) as a monomer, Ammonium persulfate (APS) as an initiator and N,N Methylene bisacrylamide (MBA) as a crosslinker. The effect of the ratio of cassava starch and acrylic acid (25 : 75; 50 : 50 and 75 : 25% weight total) has been studied based on absorption capacity. The chemical structure that occurs is analyzed using Fourier Transform Infra-red (FTIR) spectroscopy. The results of the FTIR spectrum showed that the grafting of acrylic acid to starch occurred. In the ratio of starch to acrylic acid 25 : 75% of the weight total obtained the maximum water absorption ability (absorption capacity) 224 g/g in aquades and 25 g/g in 0,9% NaCl solution.

Keywords: cassava starch, acrylic acid, grafting, absorption capacity, superabsorbent polymer composites

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensintesis komposit polimer superabsorban berbasis polimer alam yang telah dibuat dengan metode *grafting* (pencangkokan) yang menggunakan pati singkong sebagai *backbone* (kerangka utama), asam akrilat (AA) sebagai monomer, Ammonium persulfat (APS) sebagai inisiator dan N,N Metilen bisakrilamida (MBA) sebagai *crosslinker*. Pengaruh rasio pati singkong dan asam akrilat (25 : 75; 50 : 50 dan 75 : 25% berat total) telah dipelajari berdasarkan kapasitas absorpsi. Struktur kimia yang terjadi dianalisa menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infra-red* (FTIR). Hasil dari spektrum FTIR memperlihatkan bahwa terjadinya *grafting* asam akrilat terhadap pati. Pada rasio pati dengan asam akrilat 25 : 75% berat total diperoleh kemampuan menyerap air (kapasitas absorpsi) maksimum 224 g/g dalam aquades dan 25 g/g dalam larutan NaCl 0,9%.

Kata kunci: pati singkong, asam akrilat, grafting, kapasitas absorpsi, komposit polimer superabsorban

Penelitian dan pengembangan pada dasawarsa terakhir ini sangat intensif dilakukan pada penggunaan bahan biomaterial. Penggunaan biomaterial karena memiliki sifat *biodegradable*, *biocompatible*, *renewable* dan *nontoxic*. Salah satu bahan biomaterial yang dikembangkan adalah polimer superabsorban (SAP). SAP merupakan suatu jenis polimer/material *hidrofilik* yang memiliki kapasitas tinggi dalam mengabsorpsi atau menyimpan suatu cairan dengan berat yang jauh lebih besar (hingga ribuan kali) dari berat awalnya dalam waktu yang relatif singkat serta tidak melepaskannya kembali dalam kondisi yang sama (Elliott, 2004).

Polimer superabsorban telah diaplikasikan pada berbagai bidang yaitu pertanian dan hortikultura (Demetri, Scalera, Madaghiele, Sannino, & Maffezzol, 2013; Savich, Olson & Clark, 2010; Wu, Liu & Liang, 2008) produk higienis (Loo *et al.*, 2013), pembalut wanita, popok bayi sekali pakai (Besemer, Verwilligen, & Thornton, 2012), pengolahan air limbah (Li, Zhang, Simon, & Wang, 2012) penyaring logam berat (Liu *et al.*, 2013), sebagai agen pembawa obat/*drug delivery* (Singh & Sharma, 2014). Dengan banyaknya aplikasi SAP, tentu akan mendorong permintaan SAP dalam skala besar. Menurut Witono, Noordergraaf, Heeres, & Janssen (2014) pada tahun 2015 diproyeksikan permintaan global terhadap SAP meningkat mencapai 1,9 juta metrik ton. Saat ini, polimer superabsorban yang tersedia secara komersial terbuat dari polimer sintetik yang sifatnya dapat menyerap air dengan sangat baik, namun bersifat karsinogenik dan toksik yang mungkin dapat menyebabkan gangguan kesehatan terutama apabila digunakan pada *drug delivery*, pembalut wanita, maupun pada popok bayi sekali pakai.

Secara umum material SAP adalah polimer hidrofilik yang mempunyai ikatan silang, linier atau bercabang yang mempunyai kemampuan menyerap air atau larutan dalam jumlah besar. SAP memiliki dua atau tiga sistem komponen yang terdiri atas jaringan tiga dimensi pada rantai polimer, dimana air yang diserap berada diantara celah-celah makromolekul (Ahmed, 2015). Menurut Pourjavadi, Jahromi, Seidi & Salimi (2010), bahan ini dapat disintesis dari polimer alam yang dapat larut dalam air salah satunya dengan metode *grafting* (pencangkokan). Metode *grafting* secara kimia dapat dilakukan dengan monomer seperti asam akrilat pada polisakarida yang *biodegradable* dan murah seperti kitosan, selulosa dan pati dengan menggunakan berbagai sistem penginisiasian diikuti oleh *crosslinking* dengan *crosslinker* hidrofilik (Zohuriaan-Mehr & Kabiri, 2008). Disamping *renewable* dan *biodegradable*, polisakarida mampu menggantikan sebagian dari polimer sintetik terutama monomer asam akrilat yang lebih menguntungkan pada industri dan mengurangi kerusakan lingkungan.

Pada penelitian ini, polisakarida yang digunakan dalam sintesis komposit polimer superabsorban dengan metoda *grafting* adalah pati singkong. Pati memiliki sifat kimia yang sama dengan asam akrilat yaitu hidrofilik dan afinitas yang tinggi terhadap air, selain juga murah, ketersediaan luas, fleksibel serta terbarukan (Zohuriaan-Mehr & Kabiri, 2008). Pemanfaatan pati singkong dalam dunia industri masih belum optimal, padahal produksi singkong Indonesia menurut BPS (2018) pada tahun 2015 sebesar 21,8 juta ton dan beberapa tahun sebelumnya sempat tercatat sebagai negara terbesar ketiga pengekspor singkong dunia. Sementara asam akrilat disamping tidak ramah lingkungan, harganya pun juga sangat mahal, namun peranan asam akrilat sebagai monomer pada sintesis polimer superabsorban tidak dapat digantikan, hanya dapat disubstitusi. Penelitian ini menjelaskan tentang pengaruh rasio pati dengan asam akrilat pada sintesis material baru polimer superabsorban.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pusat Penelitian Kimia LIPI, Serpong, Tangerang. Penelitian dimulai dengan sintesis polimer superabsorban (pati-g-AA) kemudian dianalisis berdasarkan kapasitas absorpsi. Kapasitas absorpsi produk di dalam aquades diukur pada semua variasi yang dilakukan, sementara itu kapasitasnya dalam garam (NaCl 0,9%) hanya dilakukan pada produk komposit polimer superabsorban (SAP) yang memiliki kapasitas absorpsi maksimum dengan waktu perendaman selama 1 hari. Selain kapasitas absorpsi, parameter lain yang dianalisis adalah gugus kimia, namun hanya dilakukan pada produk dengan kapasitas absorpsi terbaik pada komposit polimer superabsorban yang dihasilkan. Nilai yang ditampilkan adalah nilai maksimum ketika produk telah jenuh dengan air.

Sebanyak 10 gram (berat total pati dan asam akrilat) diperlakukan. Pati (25%, 50% dan 75% dari berat total) dan air 44 ml dimasukkan ke dalam labu berleher 3 berukuran 250 ml yang disertai *magnetic stirrer*, termometer dan aliran gas nitrogen. Kemudian dipanaskan pada temperatur 90°C sambil dialiri gas nitrogen selama 30 menit, lalu suhu diturunkan hingga 60-65°C. Sebanyak 0,5% berat total amonium persulfat/APS dimasukkan pada campuran reaksi, dan dibiarkan selama 15 menit untuk menghasilkan radikal bebas. Setelah itu dimasukkan sejumlah asam akrilat/AA (75%, 50% dan 25% dari berat total) yang sudah dinetralkan dengan NaOH 40%, dan N,N Metilen bisakrilamida/MBA (*crosslinker*) 0,05% dari berat total. Kemudian dilanjutkan pengadukan diiringi dengan kenaikan temperatur reaktor hingga 70°C dan dipertahankan selama 1 jam, produk menjadi gel dan tidak dapat diaduk lagi. Kemudian produk didinginkan pada suhu kamar, didiamkan selama 1 hari dan diperoleh polimer super absorban. Lalu produk dicuci dengan etanol 50% sebanyak 3 kali, kemudian dikeringkan pada temperatur 60°C hingga beratnya konstan.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan berupa polimer alam yaitu pati singkong komersial dengan merek Tjap Orang Tani diproduksi Sumber Mas, Bogor, aquades, gas nitrogen. Bahan kimia yang digunakan asam akrilat (AA) sebagai monomer sintesis, amonium persulfat (APS), N,N Metilen bisakrilamida (MBA) masing-masing *pro analysis* diperoleh dari Sigma-Aldrich, NaOH (Merck) dan etanol teknis diperoleh dari P.D Bratacho. Alat yang digunakan yaitu labu leher tiga, *stirrer*, kondensor, termometer, alat kaca, oven, instrument Spektrofotometer *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) Shimadzu Prestige-21.

Pengukuran Kapasitas Absorpsi (Nakason, Wohmang, Kaesaman, & Kiatkamjornwong, 2010)

Polimer superabsorban yang dihasilkan diuji kapasitas absorpsi. Kapasitas absorpsi adalah ukuran kemampuan polimer dalam menyerap aquades dan larutan garam (NaCl) 0,9%, Nilai yang ditampilkan adalah nilai maksimum ketika produk telah jenuh dengan air. Kapasitas absorpsi sangat menentukan aplikasi dari produk polimer superabsorban yang dihasilkan. Sebanyak 0,1 gram komposit polimer superabsorban direndam dalam 200 ml air destilasi pada suhu kamar selama 24 jam untuk mencapai kesetimbangan pengembangan. Sampel yang telah mengembang kemudian dipisahkan dari air yang tidak terserap dengan cara disaring menggunakan kertas saring teknis, dan ditimbang. Kapasitas absorpsi ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Q = kapasitas absorpsi (g/g)
- m1 = bobot sampel kering sebelum direndam (g)
- m2 = bobot setelah sampel mengembang (g)

Analisis FTIR





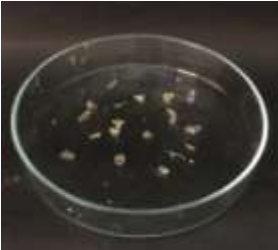

Analisis mengenai gugus-gugus kimia dilakukan untuk mengetahui mekanisme dan keberlangsungan reaksi polimerisasi komposit polimer superabsorban. Gugus-gugus kimia yang merupakan hasil interpretasi bilangan gelombang dari pati sebelum dan sesudah proses *grafting* diuji menggunakan pellet KBr dengan alat Spektrofotometer *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) dengan jangkauan bilangan gelombang 450-4000 cm^{-1} , sehingga dapat diperkirakan mekanisme reaksi yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kapasitas Absorpsi Komposit SAP dalam Aquades

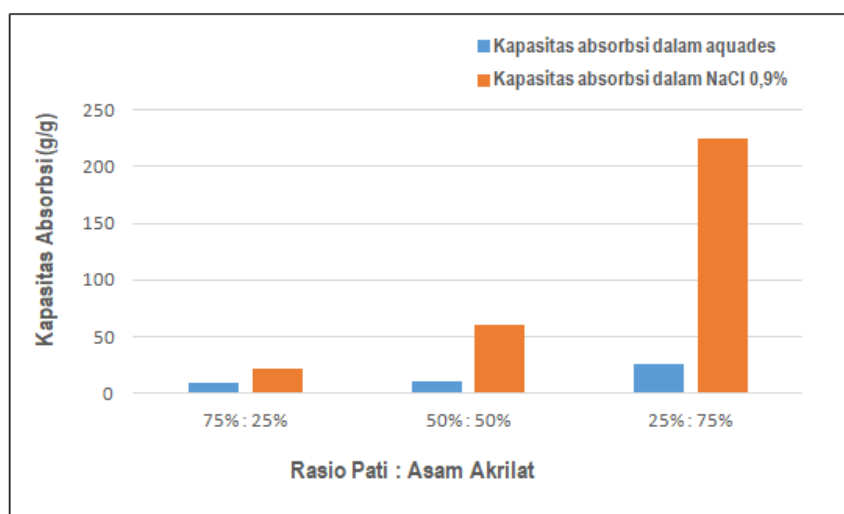
Polimer ini dibuat dalam beberapa variabel dan masing-masing variabel yang divariasikan dianalisis berdasarkan kapasitas absorpsi. Produk sebelum dan setelah jenuh disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kapasitas Absorpsi Sebelum Perendaman dan Setelah Perendaman

Produk (Pati : AA)	Sebelum Perendaman	Setelah Perendaman
75 : 25		
50 : 50		
25 : 75		

Sintesis komposit polimer superabsorban (SAP) dilakukan dengan variasi perbandingan pati singkong dengan asam akrilat. Perbandingan massa pati terhadap asam akrilat merupakan satu variabel penting untuk dianalisis karena bertujuan menentukan perbandingan yang optimum terhadap pati sebagai rantai utama (*backbone*) dan monomer asam akrilat sebagai cabang (*grafted chain*) dalam polimer superabsorban. Untuk menentukan perbandingan yang optimum dilakukan 3 variasi percobaan dengan perbandingan pati terhadap asam akrilat yaitu (75% : 25%, 50% : 50% dan 25% : 75%) terhadap berat total.

Parameter yang dijadikan tolok ukur analisis adalah kapasitas absorpsi yang hasilnya disajikan dalam Gambar 1. Kapasitas absorpsi komposit polimer superabsorban diukur dengan merendam produk dalam aquades dengan waktu perendaman selama 1 hari (24 jam). Parameter ini diukur pada kondisi ambient tanpa pengadukan. Nilai yang ditampilkan adalah nilai maksimum ketika produk telah jenuh dengan air.



Gambar 1. Variasi rasio pati dengan asam akrilat terhadap kapasitas absorpsi dalam aquades dan larutan NaCl 0,9% pada komposit polimer superabsorban

Dari pengujian yang dilakukan dapat diketahui bahwa kapasitas absorpsi komposit polimer superabsorban maksimum pada satu kondisi. Kapasitas absorpsi meningkat dengan meningkatnya massa monomer asam akrilat (Gambar 1). Kapasitas absorpsi komposit polimer superabsorban dari rasio pati dan asam akrilat dalam aquades berturut-turut 21 g/g untuk 75 : 25 % berat total; 60 g/g untuk 50 : 50% berat total dan 224 g/g untuk 25 : 75% berat total. Kapasitas absorpsi maksimum tercapai ketika komposit polimer superabsorban disintesis dengan perbandingan pati dengan asam akrilat yaitu 25 : 75 yaitu 224 g air/gram produk. Hal ini diindikasikan karena dengan meningkatnya massa monomer asam akrilat maka akan meningkat pula berat molekul dan efisiensi *grafting* dari produk sehingga dengan jumlah monomer lebih banyak akan lebih besar kapasitas absorpsi daripada produk dengan jumlah monomer yang lebih sedikit (Kulkarni, Kalwale, Rane, & Abitha, 2014). Disamping itu, Zhang *et al.* (2014) juga menambahkan bahwa dengan adanya sejumlah gugus hidrofilik yang bereaksi dengan monomer dapat meningkatkan kapasitas absorpsi pada satu kondisi.

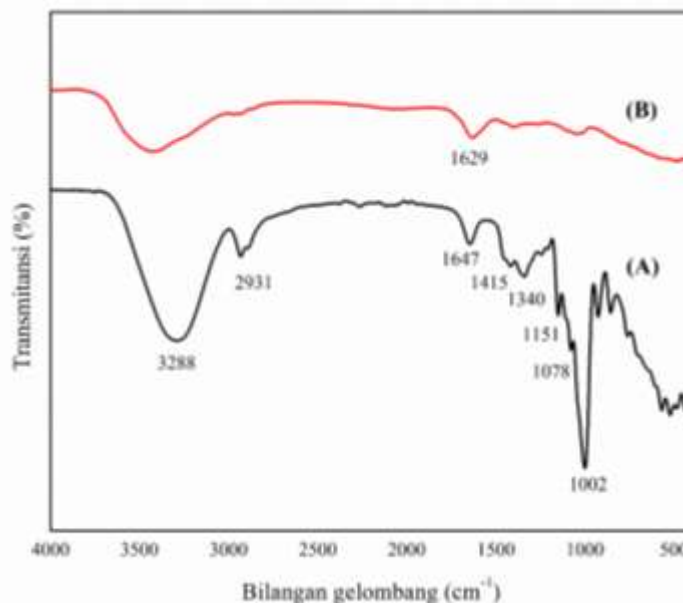
Kapasitas Absorpsi Komposit SAP dalam NaCl 0,9%

Dalam aplikasinya selain penyerapan terhadap aquades, ion-ion garam juga mempengaruhi daya serap dari SAP. Larutan garam (NaCl) merupakan salah satu jenis garam yang umumnya dipakai untuk pengujian kemampuan daya serap SAP terhadap air. Kapasitas absorpsi meningkat dengan meningkatnya monomer asam akrilat (Gambar 1). Kapasitas absorpsi komposit polimer superabsorban dari rasio pati dan asam akrilat dalam larutan NaCl 0,9% berturut-turut 9 g/g untuk 75 : 25 % berat total; 10 g/g untuk 50 : 50% berat total dan 26 g/g untuk 25 : 75% berat total.

Pada Gambar 1 terlihat, kapasitas absorpsi SAP menurun drastis pada larutan garam dibandingkan kapasitas absorpsi SAP dalam air. Pada konsentrasi NaCl 0,9% kapasitas absorpsi cenderung menurun dengan meningkatnya jumlah pati. Hal ini diakibatkan oleh terjadinya deformasi struktur SAP ketika bertemu dengan ion-ion garam. Pada larutan garam struktur SAP akan mengkerut seperti benang kusut sehingga ruang-ruang kosong sebagai tempat terserapnya air di dalam polimer tersingkirkan oleh rantai polimer yang saling tumpang tindih. Kondisi inilah yang menyebabkan air sulit melakukan penetrasi ke dalam polimer sehingga absorpsi polimer pun menjadi lebih kecil (Pope, 2007). Jika SAP direndam dalam air, maka akan terjadi tekanan osmosis maksimum dan SAP akan mengembang, tetapi jika SAP direndam dalam larutan NaCl, maka akan terjadi tekanan osmosis rendah karena adanya ion-ion Na^+ dan Cl^- (Li, Zhang & Wang, 2007).

Uji Gugus Fungsi Hasil Analisis dengan FTIR

Spektrum FTIR gugus fungsi komposit polimer SAP dengan kapasitas absorpsi terbaik yaitu perbandingan pati dan asam akrilat (25% : 75%) dibandingkan dengan spektrum pati singkong disajikan pada Gambar 3. Gambar 3 (A) memperlihatkan spektrum dari pati singkong menunjukkan bilangan gelombang 3288 cm^{-1} yang mengindikasikan peregangan -OH, bilangan gelombang 2931 cm^{-1} adalah peregangan C-H dan 3 puncak serapan kuat pada daerah sidik jari 1151 , 1078 dan 1002 cm^{-1} merupakan indikasi adanya vibrasi peregangan C-O-C.



Gambar 2. Spektrum FTIR (A). Pati dan (B). Komposit SAP dengan perbandingan Pati : Asam Akrilat (25% : 75%)

Menurut Creswell, Runquist, & Campbell (2005), pita serapan tajam pada daerah bilangan gelombang 1647 cm^{-1} mengindikasikan adanya gugus aldehida (C=O) yang pada dasarnya merupakan rantai linear molekul glukosa yang berulang yang menyusun pati singkong.

Spektrum FTIR dari SAP Gambar 3 (B) memperlihatkan bentuk spektrum yang berbeda dengan pati. Vibrasi peregangan ikatan C=O bergeser dari 1647 menjadi 1629 cm^{-1} dan daerah sidik jari spektrum pati menjadi tidak terlalu tampak pada spektrum FTIR SAP. Hal ini menunjukkan bahwa campuran monomer asam akrilat lebih dominan dibandingkan dengan *backbone* (kerangka utama) pati singkong. Selain itu pada bilangan gelombang 1415 dan 1340 cm^{-1} yang mengindikasikan peregangan ikatan C-OH dari pati menghilang setelah reaksi dengan natrium akrilat, atau intensitas spektrum secara keseluruhan mengecil setelah terbentuknya komposit SAP, hal ini menandakan bahwa natrium akrilat telah dicangkokkan ke pati singkong. Hal serupa juga telah dilaporkan oleh Li et al. (2007); Zhang, Wang, & Wang (2006); Spagnol et al. (2012) dan Zhou, Fu, Zhang & Zhan (2013). Fenomena bilangan gelombang ini juga menegaskan bahwa asam akrilat yang telah dinetralkan dengan NaOH (Natrium akrilat) telah dicangkokkan pada *backbone* pati memiliki pengaruh terhadap lingkungan kimia di sekitar -COOH dan kelompok COO- dan terhadap kapasitas absorpsi dari polimer superabsorban (Spagnol et al., 2012).

SIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dibuat polimer superabsorban berbasis pati. Peningkatan jumlah monomer meningkatkan kemampuan kapasitas absorpsi dari produk komposit polimer superabsorban. Kapasitas absorpsi maksimum diperoleh pada kondisi rasio pati dengan asam akrilat 25% : 75% terhadap berat total dengan netralisasi NaOH 40%, APS 0,5% berat total, MBA 0,05% berat total pada suhu 70°C yaitu 224 g/g dalam aquades dan menurun menjadi 26 g/g dalam larutan NaCl 0,9%.

REFERENSI

- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6 (2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>.
- Besemer, A. ., Verwilligen, A. M. Y. W., & Thornton, J. (2012). Hygienic absorbent with odour control. (US Patent Office, Pat. No. 8,129,581).
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2018) diakses dari <https://www.bps.go.id/>, diakses pada tanggal 28 Juli 2019 pada jam 20.00 WIB.
- Cresswell C.J, Runquist O.A, & Campbell M. (2005). *Analisis spektrum senyawa organik*. Padmawinata K, Soediro I, Penerjemah; Bandung: Penerbit ITB. Terjemahan dari: Spectrum Analysis of Organic Compound. An Introductory Programmed Text.
- Demitri, C., Scalera, F., Madaghiele, M., Sannino, A., & Maffezzoli, A. (2013). Potential of cellulose-based superabsorbent hydrogels as water reservoir in agriculture. *International Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/435073>.
- Elliott, M. (2004). Superabsorbent polymers. *Product development scientist for SAP*. BASF AG, Ludwigshafen, Germany.
- Kulkarni, P., Kalwale, L., Rane, A., & Abitha, V. K. (2014). Synthesis and characterization of poly (acrylic acid)/starch/bentonite superabsorbent polymer composite. *Research and Reviews on Polymer*, 5(3), 96–101.

- Li, A., Zhang, J., & Wang, A. (2007). Utilization of starch and clay for the preparation of superabsorbent composite. *Bioresource Technology*, 98(2), 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.026>.
- Li, D., Zhang, X., Simon, G. P., & Wang, H. (2012). Forward osmosis desalination using polymer hydrogels as a draw agent: Influence of draw agent, feed solution and membrane on process performance. *Water Research*, 47(1), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.049>.
- Liu, D., Li, Z., Li, W., Zhong, Z., Xu, J., Ren, J., & Ma, Z. (2013). Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution by soy protein hollow microspheres. *Journal Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 11036–11044. <https://doi.org/10.1021/ie401092f>.
- Loo, S., Fane, A. G., Lim, T., Krantz, W. B., Liang, Y., Liu, X., & Hu, X. (2013). Superabsorbent cryogels decorated with silver nanoparticles as a novel water technology for point-of-use disinfection. *Journal Environmental Science & Technology*, 47, 9363–9371. <https://doi.org/10.1021/es401219s>.
- Nakason, C., Wohmang, T., Kaesaman, A., & Kiatkamjornwong, S. (2010). Preparation of cassava starch-graft-polyacrylamide superabsorbents and associated composites by reactive blending. *Carbohydrate Polymers*, 81(2), 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.02.030>.
- Pope, G. A. (2007). *Overview of chemical EOR, center for petroleum and geosystems engineering*. The University of Texas pada Austin Casper EOR Workshop.
- Pourjavadi, A., Jahromi E. P., Seidi, F., & Salimi, H. (2010). Synthesis and swelling behavior of Acrylatedstarch-g-Poly (Acrylic Acid) and Acrylatedstarch-g-Poly (Acrylamide) Hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 79(4), 933–940. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.021>.
- Savich, M. H., Olson, G. S., & Clark, E. W. (2010). Superabsorbent polymer suspension for use in agriculture. (*EP Patent Office*, Pat. No. 2,170,042).
- Singh, B., & Sharma, V. (2014). Influence of polymer network parameters of tragacanth gum-based pH responsive hydrogels on drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 101(1), 928–940. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.022>.
- Spagnol, C., Rodrigues, F. H. A., Pereira, A. G. B., Fajardo, A. R., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2012). Superabsorbent hydrogel nanocomposites based on Starch-g-Poly (Sodium Acrylate) matrix filled with cellulose nanowhiskers. *Cellulose*, 19(4), 1225–1237. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9711-7>.
- Witono, J. R., Noordergraaf, I. W., Heeres, H. J., & Janssen, L. P. B. M. (2014). Water absorption, retention and the swelling characteristics of cassava starch grafted with polyacrylic acid. *Carbohydrate Polymers*, 103(1), 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.056>.
- Wu, L., Liu, M., & Liang, R. (2008). Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresource Technology*, 99, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.027>.
- Zhang, J., Wang, L., & Wang, A. (2006). Preparation and swelling behavior of fast-swelling superabsorbent hydrogels based on Starch- g -Poly (acrylic acid- co -sodium acrylate). *Macromolecular Materials and Engineering*, 291(6), 612–620. <https://doi.org/10.1002/mame.200500387>.

- Zhang, M., Cheng, Z., Zhao, T., Liu, M., Hu, M., & Li, J. (2014). Synthesis, characterization, and swelling behaviors of salt-sensitive maize bran-poly(acrylic acid) superabsorbent hydrogel. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(35), 8867–8874. <https://doi.org/10.1021/jf5021279>.
- Zhou, Y., Fu, S., Zhang, L., & Zhan, H. (2013). Superabsorbent nanocomposite hydrogels made of carboxylated cellulose nanofibrils and CMC-g-P (AA-co-AM). *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.088>.
- Zohuriaan-Mehr, M. J., & Kabiri, K. (2008). Superabsorbent polymer materials: A review. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 17(6), 451–477.