

SINTESIS PATI JAGUNG TERFOSFORILASI MELALUI TEKNIK GELOMBANG MIKRO

[*Microwave-Assisted Synthesis of Phosphorylated Corn Starch*]

Atep Dian Supardan*, Suminar Setiati Achmadi dan Tun Tedja Irawadi

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor

Diterima 28 Maret 2013 / Disetujui 24 Februari 2014

ABSTRACT

Phosphorylated starch is a type of modified starches which is mostly imported. Commonly, starch to be modified must contain more than 25% of amylose. This study aimed to synthesize phosphorylated starch and evaluate its potency as a heavy metal adsorbent. Corn starch was subjected to phosphorylation through microwave-assisted reaction with a mixture of sodium dihydrogen orthophosphate and disodium hydrogen phosphate. The experiment was designed to optimize the pH, microwave radiation power, and phosphorylation time. The results showed that the maximum phosphate substitution degree was obtained at pH of 6, microwave radiation of 500 W, and a reaction time of 10 minutes. The degree of substitution ranged from 0.567 to 0.787. The physicochemical properties of the product i.e. swelling capacity, solubility, water binding capacity, and paste clarity were significantly different than that of the unmodified corn starch. The infrared spectrum showed a high peak absorption at the wavelength of 1651 cm^{-1} , indicating hydrogen bond formation of phosphoric group-water- phosphoric group. In the fingerprint area, there were two new absorption peaks at 1200 and 990 cm^{-1} , which were assigned for the P=O and C-O-P vibrations, respectively. The phosphorylated corn starch adsorbed methylene blue up to 73.3% and mercury up to 73.6%, suggesting the prospect of the microwave-assisted synthetic phosphorylated corn starch as an effective adsorbent for heavy metals.

Keywords: corn starch phosphorylation, heavy metal adsorption, microwave-assisted reaction, physicochemical properties

ABSTRAK

Pati terfosforilasi merupakan salah satu pati modifikasi yang banyak diimpor. Sumber pati yang dapat dimodifikasi harus memiliki kandungan amilosa lebih dari 25%. Penelitian bertujuan menyintesis pati terfosforilasi dan mengevaluasi potensinya sebagai adsorben logam berat. Pati jagung difosforilasi dengan menggunakan campuran $\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{-Na}_2\text{HPO}_4$ dan bantuan teknik gelombang mikro serta mengoptimasi kondisi pH, daya gelombang mikro dan waktu reaksi fosforilasi. Derajat substitusi fosfat didapat pada kisaran 0.567–0.787, dengan kondisi optimum pada pH 6 menggunakan daya 500 W selama 10 menit. Pati jagung terfosforilasi memiliki ciri fisikokimia seperti daya mengembang, kelarutan, kapasitas absorpsi air dan kejernihan yang sangat berbeda dengan pati jagung tanpa fosforilasi. Spektrum inframerah menunjukkan peningkatan serapan pada 1651 cm^{-1} , yang merujuk pada pembentukan ikatan hidrogen secara intramolekuler antara air dan gugus fosfat. Pada daerah sidik jari, terlihat puncak serapan sekitar 1200 dan 990 cm^{-1} yang menunjukkan regangan P=O dan C-O-P. Pati jagung terfosforilasi dapat menyerap biru metilena sampai 73.3% dan merkuri sampai 73.6%, hal ini menunjukkan bahwa sintesis pati jagung terfosforilasi dengan teknik gelombang mikro efektif sebagai adsorben logam berat.

Kata kunci: adsorben logam berat, pati jagung terfosforilasi, pencirian fisikokimia, teknik gelombang mikro

PENDAHULUAN

Pati merupakan salah satu polimer alami yang melimpah. Sifat mekanik pati yang rapuh dan gugus hidrofiliknya menjadi masalah tersendiri dalam penggunaan pati. Sifat fisik dan kimia pati dapat diperbaiki dengan memodifikasi pati secara kimia. Pati dimodifikasi dengan mengubah gugus fungsi secara intra- dan intermolekul pada molekul pati, melalui reaksi esterifikasi menggunakan reagen fosforilasi (Aziz *et al.* 2004). Pati terfosforilasi mempunyai sifat fisikokimia yang lebih baik dari pati alami sehingga dapat digunakan secara luas dalam industri makanan dan minuman sebagai pengental, penstabil, pengemulsi, koagulan, dan adsorben (Abbas *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2006). Pati yang digunakan sebagai pati terfosforilasi adalah pati dengan kadar amilosa tinggi. Jagung merupakan sereal

yang memiliki kandungan amilosa sebesar 27% (O'Brien dan Wang, 2009). Funami *et al.* (2008) telah meneliti kemampuan pati jagung dalam menyerap ion logam. Pati jagung yang telah difosforilasi oleh POCl_3 dapat digunakan untuk menyerap logam berat (Kim dan Lim, 1999). Selanjutnya, Guo *et al.* (2006) telah menyintesis pati jagung terfosforilasi-karbamat yang dapat digunakan untuk menyerap logam tembaga.

Reaksi fosforilasi pati biasanya dilakukan pada suhu 140-160°C selama 3 jam (Passauer *et al.* 2010) sehingga dapat menyebabkan reaksi samping. Teknik gelombang mikro dapat digunakan dalam sintesis pati terfosforilasi pada kondisi reaksi kering menggantikan metode konvensional yang memerlukan pelarut, suhu tinggi, dan waktu reaksi yang lama (Jyothi *et al.* 2008). Gelombang mikro dapat digunakan untuk menyintesis pati terfosforilasi dengan cepat, tidak memerlukan pelarut, meningkatkan rendemen, dan tidak mengubah struktur pati yang dimodifikasi (Lewandowicz, 2000). Gelombang mikro telah digunakan untuk membuat pati asetat dengan waktu

*Penulis Korespondensi:
E-mail: adsnadsn@gmail.com

pemanasan hanya 4–7 menit (Shogren dan Biswas, 2006). Rivero *et al.* (2009) telah memodifikasi tapioka dengan oktenil suksinat anhidrida dalam gelombang mikro selama 7 menit menghasilkan derajat substitusi sebesar 0.045. Maneesriraj *et al.* (1998) telah melakukan sintesis pati terfosforilasi dengan mencampurkan pati singkong dengan natrium heksametafosfat lalu dipanaskan dalam gelombang mikro, tetapi derajat substitusi fosfat (DSP) yang dihasilkan masih rendah, berkisar 0.0037-0.0068. Teknik gelombang mikro dapat meningkatkan nilai derajat substitusi sampai 2.93 dalam pembuatan pati asetat (Diop *et al.* 2011). Hingga saat ini, belum ada kajian mengenai sintesis dan pencirian pati jagung terfosforilasi (PJT) dengan teknik gelombang mikro. Penelitian ini bertujuan menyintesis PJT dengan teknik gelombang mikro untuk mendapatkan nilai DSP tinggi yaitu >0.12 (Passauer *et al.* 2010), serta mengevaluasi perubahan ciri fisikokimia.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan ialah pati jagung yang berasal dari Maizenaku yang dapat diperoleh dengan mudah di supermarket.

Fosforilasi pati jagung (Jyothi *et al.* 2008 dengan modifikasi)

Sebanyak 10 g pati jagung (PJ) dimasukkan ke dalam gelas piala dan ditambah 5 mL larutan HCl (Merck) (pH 4, 5, dan 6). Selanjutnya, campuran ditambah Na_2HPO_4 (Merck) - NaH_2PO_4 (Merck) dan diaduk sampai homogen. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam oven Microwave (Sharp MW71C) (daya 500 dan 800 W) selama 3, 5, 7, dan 10 menit. Campuran kemudian didinginkan dan disimpan dalam plastik kedap udara. Modifikasi metode dilakukan pada kisaran daya gelombang mikro dan sintesis dilakukan sebanyak 2 ulangan.

Penentuan DSP (Igura dan Okazaki, 2010 dengan modifikasi)

Sebanyak 2 mg PJT dicampurkan dengan 160 mg KBr (Merck), kemudian dibuat pelet tipis. Spektrum PJT direkam menggunakan spektrofotometer inframerah (Tensor 37 Bruker) pada rentang bilangan gelombang 4000-400 cm^{-1} . Modifikasi metode dilakukan pada penggunaan bilangan gelombang untuk penentuan nilai DSP yang dihitung berdasarkan nisbah serapan relatif regangan C-O-P menggunakan persamaan:

$$\text{Derajat substitusi fosfat (DSP)} = \frac{\frac{A_{1200 \text{ cm}^{-1}}}{A_{1325 \text{ cm}^{-1}}}}{\frac{A_{990 \text{ cm}^{-1}}}{A_{1325 \text{ cm}^{-1}}}}$$

Pencirian fisikokimia

Pencirian fisikokimia dilakukan pada PJT yang memiliki nilai DSP optimum sebanyak tiga kali ulangan meliputi kadar air, nilai pH, dan daya mengembang yang dilakukan berdasarkan metode Wanrosli *et al.* (2011). Selain itu dilakukan uji kelarutan, kejernihan, dan kapasitas absorpsi air yang dilakukan berdasar-

kan metode Stahl *et al.* (2007), kepadatan total yang dilakukan berdasarkan metode Houssou dan Ayernor (2002), evaluasi PJT sebagai adsorben Biru Metilena yang dilakukan berdasarkan metode Ozmen *et al.* (2008) dan evaluasi PJT sebagai adsorben Hg(II) (Merck) yang dilakukan berdasarkan metode Amitava (2010).

Analisis statistik

Data penentuan nilai DSP optimum diolah dengan metode respons permukaan pada taraf nyata 5.00% menggunakan bantuan program Minitab 14.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kenampakan dan tekstur PJT

Pati jagung yang digunakan berupa serbuk putih halus, dicampurkan dengan HCl dan NaH_2PO_4 - Na_2HPO_4 membentuk pasta, tetapi setelah dikenai gelombang mikro berubah menjadi kering. Hal ini mengindikasikan telah terjadi reaksi taut silang fosfat pada kondisi basah (Fang *et al.* 2008) dan reaksi fosforilasi pada kondisi kering (Deetae *et al.* 2008). Panas yang timbul akibat gelombang mikro membuat air yang terdapat dalam campuran baik yang ditambahkan maupun hasil esterifikasi menguap sehingga PJT membentuk granul kecil yang kasar (Gambar 1). Jika PJT digerus menghasilkan serbuk yang lebih padat dibandingkan PJ. Gelombang mikro meningkatkan pergerakan getaran air yang dapat menghancurkan susunan kristal lamelar amilopektin dan memecahkan granul PJ menjadi lebih rapat sebagaimana dilaporkan oleh Palav dan Seetharaman (2007).



Gambar 1. Pati jagung (kiri) dan PJT (kanan)

DSP PJT

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan serapan relatif C-O-P spektrum inframerah diperoleh nilai DSP maksimum 0.787 pada kondisi pH 6, daya gelombang mikro 500 W selama 10 menit. Hal ini menunjukkan bahwa DSP yang dihasilkan tinggi karena menurut Stahl *et al.* (2007) DSP tinggi melebihi 0.12. Nilai ini lebih tinggi daripada yang telah dilakukan Jyothi *et al.* (2008) yang menghasilkan DSP 0.017-0.084. Na_2HPO_4 - NaH_2PO_4 menunjukkan sumber reagen fosfat yang lebih baik dibandingkan dengan natrium heksametafosfat (Maneesriraj *et al.* 1998), POCl_3 (Yoneya *et al.* 2003), epiklorohidrin (Ackar *et al.* 2010), trinitrium tripolifosfat (TNTPP) (Błaszczak *et al.* 2010), dan trinitrium trimetafosfat (TNTMP) (Sang *et al.* 2010). Campuran Na_2HPO_4 - NaH_2PO_4 juga dapat

menghasilkan DSP tinggi pada suasana asam maupun basa (Stahl *et al.* 2007) dan dapat membantu menyebarkan gelombang mikro dalam proses fosforilasi PJ sehingga tumbukan lebih kuat (Ryynanen, 1995).

Pengaruh daya, waktu dan pH pada reaksi fosforilasi

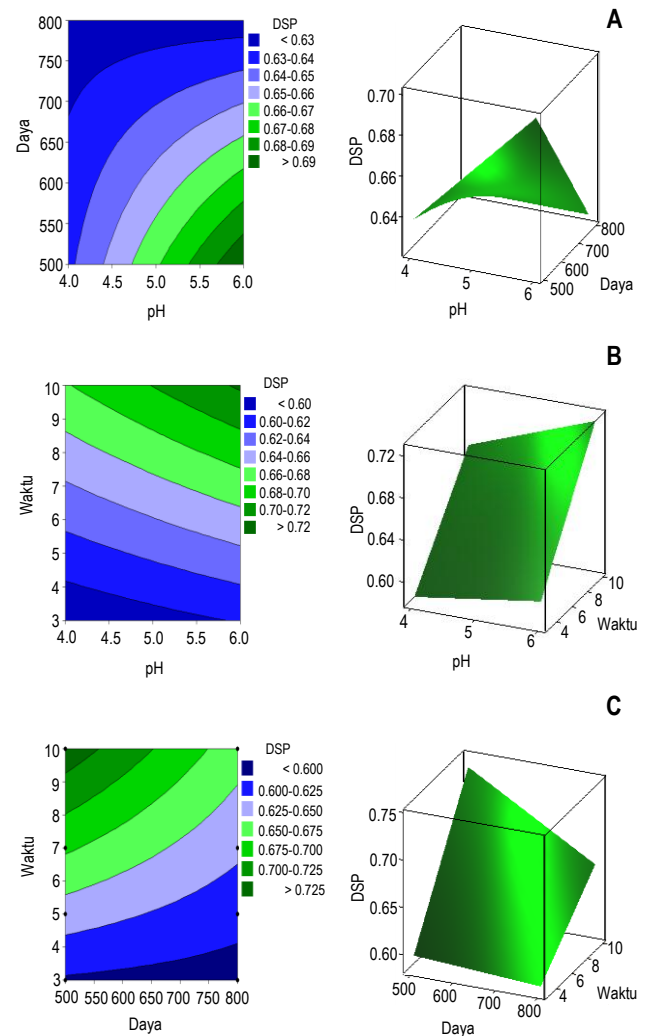
Pada daya 500 W dihasilkan DSP maksimum karena gelombang mikro yang diberikan dapat menguapkan air tanpa merusak hasil esterifikasi (Luo *et al.* 2009). Peningkatan daya menjadi 800 W menyebabkan penurunan DSP PJT dibandingkan daya 500 W. Pemberian daya gelombang mikro lebih dari 800 W dapat menghanguskan PJT dan memutuskan ikatan ester fosfat yang terbentuk. Teknik gelombang mikro digunakan untuk memberikan energi maksimum melalui tumbukan (Deetae *et al.* 2008), menguapkan air yang dihasilkan, dan menghindari kemungkinan hidrolisis ikatan ester yang terbentuk dan menjadikan gugus fosfat sehingga menjadi lebih reaktif terhadap pati dibandingkan pemanasan konvensional.

Nilai DSP maksimum dicapai pada saat pH campuran 6. Adapun pH campuran 4 dan 5 dapat menghidrolisis ikatan glikosida. Meskipun pH 4 dan 5 tidak berpengaruh langsung terhadap DSP, pemberian gelombang mikro dapat meningkatkan getaran asam untuk bertumbukan, memotong ikatan hidrogen dan memudahkan ion fosfat bereaksi dengan gugus -OH pati bebas (Shogren, 2003). Pada pH campuran 6 protonasi fosfat untuk reaksi fosforilasi lebih mudah terjadi dibandingkan dengan reaksi hidrolisis ikatan glikosida. Hal ini senada dengan temuan Blaszcak *et al.* (2010), yang menyatakan bahwa reaksi fosforilasi dapat menghasilkan DSP maksimum pada kisaran pH 6-6.5.

Fosforilasi PJ dengan bantuan gelombang mikro memerlukan waktu 10 menit. Hal ini lebih cepat daripada yang dilakukan oleh Blaszcak *et al.* (2011) yaitu 2 jam untuk fosforilasi pati pada kondisi basa dan 45 menit jika dilakukan pada kondisi asam. Bahkan Sang *et al.* (2007) memerlukan waktu 3 jam untuk fosforilasi pati pada pH 11.5 dan suhu 45°C. Waktu reaksi lebih dari 10 menit menunjukkan penurunan nilai DSP. Hal ini disebabkan setelah 10 menit campuran mendapatkan energi gelombang mikro yang berlebihan yang dapat memutuskan ikatan ester fosfat yang terbentuk dan menghanguskan campuran (Luo *et al.* 2009).

Berdasarkan metode permukaan respons, faktor pH, daya gelombang mikro dan waktu mempengaruhi keragaman nilai DSP fosforilasi PJ sebesar 72.6%. Ketiga faktor tersebut mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap DSP, semakin kecil nilai *p* maka semakin kuat pengaruhnya. Daya gelombang mikro ($p=0.004$) memiliki pengaruh yang lebih kuat terhadap DSP PJT dibandingkan pH ($p=0.014$) dan waktu reaksi ($p=0.038$). Hal ini membuktikan bahwa teknik gelombang mikro sangat membantu proses fosforilasi dibandingkan dengan pH campuran dan lamanya waktu reaksi. Ketiga faktor tersebut dapat berinteraksi secara sinergis maupun antagonis dalam mempengaruhi nilai DSP. DSP secara kuat dipengaruhi oleh interaksi daya gelombang mikro-waktu ($p=0.005$) dibandingkan interaksi pH-daya ($p=0.006$) dan pH-waktu ($p=0.358$) (Gambar 2). Hal ini sejalan dengan nilai DSP maksimum yang dihasilkan oleh pengaruh interaksi daya-waktu yaitu ± 0.725 sedangkan interaksi pH-daya memiliki nilai DSP PJT yang lebih kecil

± 0.030 dibandingkan dengan DSP PJT akibat pengaruh interaksi sinergis pH-waktu yaitu sebesar 0.720. Model permukaan respon sintesis PJT dengan bantuan gelombang mikro dapat dituliskan sebagai berikut $DSP = [(0.152432) + (0.069564 \text{ pH}) + (0.000585 \text{ daya}) + (0.027477 \text{ waktu}) - (0.000103 \text{ pH} \times \text{daya}) + (0.001926 \text{ pH} \times \text{waktu}) - (0.000033 \text{ daya} \times \text{waktu})]$. Jika model ini diuji pada kondisi maksimum sintesis PJT, yaitu pH 6, daya 500 W dan waktu 10 menit menghasilkan DSP sebesar 0.778 lebih kecil dibandingkan dengan DSP optimum penelitian PJT yaitu 0.787.



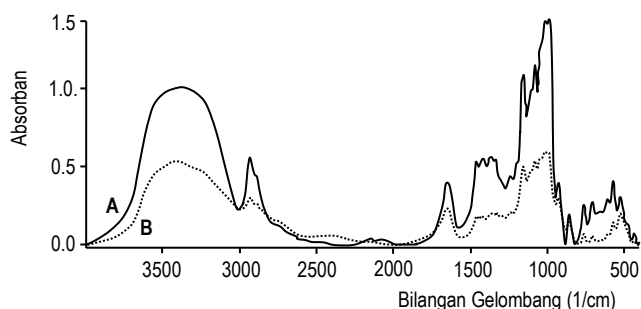
Gambar 2. Kontur dan grafik (A) interaksi pH-daya terhadap nilai DSP, (B) interaksi pH-waktu terhadap nilai DSP dan (C) interaksi daya-waktu terhadap nilai DSP

Fosforilasi PJ lebih mudah terjadi pada fraksi amilosa dibandingkan amilopektin. Teknik gelombang mikro menjadikan fosforilasi dapat terjadi pada keduanya karena selain membantu mereaksikan ion fosfat dengan gugus hidroksil pati melalui tumbukan, gelombang mikro juga dapat memotong struktur amilopektin dan menjadikannya lebih mudah bereaksi dengan ion fosfat (Palav dan Seetharaman, 2007). Dengan demikian, fosforilasi pati dapat diperkirakan melalui panjangnya rantai amilopektin (Blennow *et al.* 2000). Pati memiliki gugus -OH

bebas dengan posisi ekuatorial pada C2, C3, dan C6 (Leszczyński, 2004). Posisi gugus -OH pada C3 dan C6 memiliki kemungkinan untuk bereaksi dengan ion fosfat lebih tinggi karena kedudukannya yang terbuka, namun jika struktur tiga dimensi amilosa dipertimbangkan, maka reaksi dengan ion fosfat lebih mudah terjadi terhadap gugus -OH pada C3 yang mengarah ke luar dibandingkan dengan gugus -OH pada C6 yang mengarah ke dalam di sepanjang sumbu rantai terpilin (helix) amilosa (Blennow *et al.* 2000).

Spektrum inframerah PJT

Spektrum inframerah PJT menunjukkan peningkatan puncak serapan dibandingkan spektrum inframerah PJ (Gambar 3), yaitu pada bilangan gelombang 3409 cm^{-1} (regangan O-H), 2933 cm^{-1} (regangan C-H), dan 1158 cm^{-1} (regangan C-O). Gambar 3 tidak memperlihatkan peningkatan serapan yang signifikan pada 2360 cm^{-1} yang menunjukkan taut silang fosfat pada pati (Wanrosli *et al.* 2011). Serapan pada 1651 cm^{-1} menunjukkan pembentukan ikatan hidrogen secara intra-molekuler antara air dan gugus fosfat pada PJT (Liu *et al.* 2012). Pada daerah sidik jari spektrum inframerah PJT, puncak serapan berada di sekitar bilangan gelombang 1325 (regangan C-H), 1200 (P=O), dan 990 cm^{-1} (C-O-P) merujuk pada ikatan fosfat pada pati monoester fosfat (Zhang dan Wang, 2009). Hal ini diperkuat oleh penelitian Passauer *et al.* (2010) pada pati terfosforilasi TNTPP-TNTMP yang memiliki puncak serapan yang sama.



Gambar 3. Spektrum inframerah PJT (A) dan PJ (B)

Kadar air PJT

PJT memiliki kandungan air 12.7% lebih besar dibandingkan dengan PJ, yaitu 7.7%. Peningkatan air pada PJT disebabkan adanya penambahan HCl. Jika PJ ditambah dengan HCl tanpa diberikan gelombang mikro, maka kandungan airnya mencapai 33.5%. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang mikro dapat menguapkan air (Palav dan Seetharaman, 2006) dan ikut mengendalikan ketersediaan air selama proses reaksi fosforilasi, sehingga fosforilasi PJ dalam suasana asam dapat terjadi dalam waktu lebih singkat (Deetae *et al.* 2008).

Nilai pH PJT

PJT mempunyai pH 6.33. Nilai ini lebih rendah daripada pH PJ, yaitu 6.67. Penurunan nilai pH PJT dikarenakan penambahan HCl. Pada kondisi ini, ion fosfat mengalami protonasi dan bereaksi dengan cepat dengan gugus -OH pati. Berdasarkan hasil tersebut, untuk mendapatkan DSP tinggi maka

fosforilasi PJ perlu dilakukan pada kondisi pH netral. Hal ini berbeda sekali dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan pada kondisi basa (Stahl *et al.* 2007). Fosforilasi pati dalam kondisi basa dapat menyebabkan warna pati menjadi kekuning-kuningan (Manoi dan Rizvi, 2010) dan muatan negatif dari ion fosfat bertolak dengan gugus -OH pada pati, sehingga dapat menurunkan DSP (Lim dan Seib, 1993).

Daya mengembang dan kapasitas absorpsi air PJT

Daya mengembang PJT sebesar 35.4% lebih kecil dibandingkan dengan PJ, yaitu 67.3%. Campuran air, asam, PJ, dan fosfat menyerap gelombang mikro dan memposisikan diri. Perubahan orientasi ini menyebabkan tumbukan, menimbulkan panas, dan merusak ikatan hidrogen (Palav dan Seetharaman, 2006). Granula PJT hancur dan menjadi lebih rapat sehingga proses penyerapan air menjadi lebih sulit (Palav dan Seetharaman, 2007). Hal ini mengakibatkan kapasitas absorpsi PJT sebesar 430.00 mg/g lebih kecil daripada kapasitas absorpsi PJ, yaitu 673.33 mg/g. Hasil ini jelas berbeda jika sintesis dilakukan pada kondisi basah dan pH basa. NaOH dapat merusak dan menghidrolisis bagian amorf dari granula pati sehingga granula pati menjadi terstabilkan oleh ikatan hidrogen yang terbentuk, yang menyebabkan pertambahan daya mengembang granul pati (Karim *et al.* 2008).

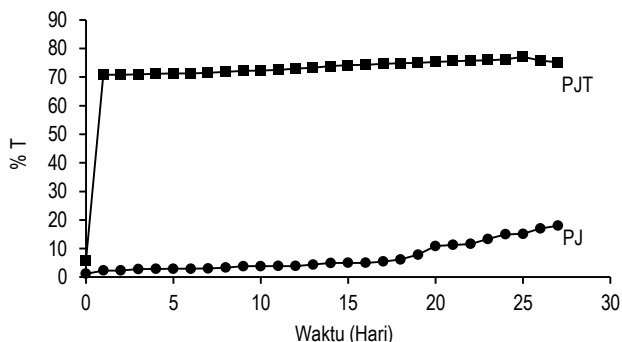
Kepadatan total dan kelarutan PJT

Kepadatan total PJT lebih tinggi (0.747 g/mL) dibandingkan kepadatan total PJ (0.506 g/mL). Gelombang mikro dapat menembus sampai tingkat molekuler PJ sehingga tumbukan air, ion fosfat dan PJ dapat menyebabkan hancurnya sisi amorf granul pati. Gugus fosfat dalam PJT mengakibatkan tertariknya struktur tiga dimensi pati sehingga granula menjadi lebih padat daripada granula PJ sebagai kondisi awal (Palav dan Seetharaman, 2007). Hal ini menjadikan PJT lebih mudah larut dalam air dibandingkan PJ. Kelarutan PJT lebih besar (1.32%) dibandingkan dengan kelarutan PJ asalnya (0.07%). Peningkatan nilai kelarutan PJT disebabkan oleh gugus fosfat mampu berikatan hidrogen secara intramolekuler dengan molekul air, sehingga kelarutan PJT meningkat sejalan dengan hasil penelitian Sang *et al.* (2010).

Kejernihan PJT

Larutan PJT memiliki kejernihan yang lebih tinggi dibandingkan dengan PJ (Gambar 4). Kejernihan larutan PJT meningkat tajam pada hari pertama, yaitu dari 5.9% menjadi 70.8% sedangkan peningkatannya pada hari berikutnya tidak terlalu signifikan akibat dari kesetimbangan gaya tolak-menolak antar molekul PJT telah tercapai. Hal tersebut jelas berbeda dari kejernihan larutan PJ yang hanya mencapai 17.9%. Peningkatan kejernihan PJT disebabkan oleh gugus fosfat pada PJT yang memposisikan diri dalam struktur tiga dimensi PJT sehingga antar rantai amilosa maupun amilopektin menjadi lebih teratur (Stahl *et al.* 2007). Gugus fosfat yang terikat antar rantai pati mereduksi interaksi kelarutan amilosa di dalam air (Lim dan Seib, 1993) sehingga fosfat yang terikat menstabilkan struktur tiga dimensi PJT (Anwar *et al.* 2006) dan menaikkan kejernihan (Landerito dan Wang, 2005). Oleh sebab itu, larutan

PJT sampai jam ke-27 masih mengalami peningkatan turbiditas sampai kesetimbangan tercapai (Singh *et al.* 2004).



Gambar 4. Hubungan persentase transmitansi dan waktu terhadap kejernihan PJT dan PJ

PJT sebagai adsorben biru metilena dan $[Hg^{2+}]$

PJT dapat menyerap biru metilena sampai 73.3% lebih tinggi 47.3% dibandingkan dengan PJ asalnya. Hal ini lebih baik jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Fang *et al.* (2008), pati terfosforilasi hanya mampu menyerap biru metilena sebesar 70.3%. PJT memiliki gugus fosfat yang dapat digunakan sebagai adsorben logam berat ataupun zat warna (Delval *et al.* 2005). Hal ini dibuktikan dengan kemampuan PJT dalam menyerap logam $[Hg^{2+}]$ sebesar 73.6% dan nilai ini lebih tinggi 35.3% dibandingkan dengan PJ. Pada penelitian ini PJT dihasilkan dari proses fosforilasi PJ melalui radiasi dengan gelombang mikro selama 10 menit, yang membuktikan bahwa gelombang mikro efektif dalam pembuatan adsorben (Foo dan Hameed, 2012).

KESIMPULAN

PJT yang dihasilkan melalui reaksi fosforilasi PJ dengan bantuan gelombang mikro pada kondisi pH 6, daya gelombang mikro 500 W selama 10 menit memiliki DSP 0.787. Hasil pencirian fisikokimia meliputi daya mengembang, kelarutan, kapasitas absorpsi air, dan kejernihan menunjukkan perbedaan ciri PJT yang nyata dari ciri PJ sebagai bahan baku PJT tersebut. Berdasarkan kapasitas penyerapan biru metilena sebesar 73.3% dan merkuri sebesar 73.6% yang dimiliki PJT, maka teknik gelombang mikro dinilai efektif untuk digunakan dalam menyintesis PJT sebagai adsorben logam berat dan zat warna.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas KA, Khalil SK, Hussin ASM. 2010. Modified starches and their usages in selected food products: a review study. *J Agr Sci* 2: 90-100. DOI: 10.5539/jas.v2n2p90.
Ackar D, Babic' J, Šubaric' D, Kopjar M, Milicevic B. 2010. Isolation of starch from two wheat varieties and their modification with epichlorohydrin. *Carbohydr Polym* 81: 76-82. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.01.058.

Amitava S. 2010. Exploitation of Activated Carbon Material for the Sorption of Mercury. [Dissertation]. Chennai. Department of chemistry. Indian Institute of Technology Madras.
Anwar E, Yusmarlina D, Rahmat H, Kosasih. 2006. Phosphorylation of pregelatinized maranta starch (*Maranta arundinaceae* L.) as theophyllin tablet matrix controlled release. *Majalah Farmasi Indonesia* 17: 37-44.
Aziz A, Daik R, Daud NIN, Yamin BM. 2004. Hydroxypropylation and acetylation of sago starch. *Malays J Chem* 6: 48-54.
Błaszczak W, Bidzin'ka E, Dyrek K, Fornal J, Michale M, Wenda E. 2011. Effect of phosphorylation and pretreatment with high hydrostatic pressure on radical processes in maize starches with different amylose contents. *Carbohydr Polym* 85: 86-96. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.01.055.
Błaszczak W, Bidzinska E, Dyrek K, Fornal J, Wenda E. 2010. EPR study of the influence of high hydrostatic pressure on the formation of radicals in phosphorylated potato starch. *Carbohydr Polym* 82: 1256-1263. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.07.006.
Blennow A, Engelsen SB, Munck L, Moller BL. 2000. Starch molecular structure and phosphorylation investigated by a combined chromatographic and chemometric approach. *Carbohydr Polym* 41: 163-174. DOI: 10.1016/S0144-8617(99)00082-X.
Deetae P, Shobsngob S, Varayanond W, Chinachoti P, Naivikul O, Varavinit S. 2008. Preparation, pasting properties and freeze-thaw stability of dual modified crosslink-phosphorylated rice starch. *Carbohydr Polym* 73: 351-358. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.12.004.
Delval F, Crini G, Bertini S, Filiatre C, Torri G. 2005. Preparation, characterization and sorption properties of crosslinked starch-based exchangers. *Carbohydr Polym* 60: 67-75. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.11.025.
Diop CIK, Li HL, Xie BJ, Shi J. 2011. Effects of acetic acid/acetic anhydride ratios on the properties of corn starch acetates. *Food Chem* 126: 1662-1669. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.050.
Fang Y, Wang LJ, Li D, Li BZ, Bhandari B, Chen XD, Mao ZH. 2008. Preparation of crosslinked starch microspheres and their drug loading and releasing properties. *Carbohydr Polym* 74: 379-384. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.03.005.
Foo KY, Hameed BH. 2012. Microwave-assisted regeneration of activated carbon. *Bioresour Technol* 119: 234-240. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.061.
Funami T, Noda S, Hiroe M, Asai I, Ikeda S, Nishinari K. 2008. Functions of iota-carrageenan on the gelatinization and retrogradation behaviors of corn starch in the presence or absence of various salts. *Food Hydrocolloid* 22: 1273-1282. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2007.09.008.
Guo L, Zhang SF, Ju BZ, Yang JZ. 2006. Study on adsorption of Cu(II) by water-insoluble starch phosphate carbamate. *Carbohydr Polym* 63: 487-492. DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.10.006.
Houssou P, Ayernor GS. 2002. Appropriate processing and food functional properties of maize flour. *Afr J Sci Technol* 3: 126-131.

- Igura M, Okazaki M. 2010. Cadmium sorption characteristics of phosphorylated sago starch-extraction residue. *J Hazard Mater* 178: 686-692. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.142.
- Jyothi AN, Sajeev MS, Moorthy SN, Sreekumar J, Rajasekharan KN. 2008. Microwave-assisted synthesis of cassava starch phosphates and their characterization. *J Root Crops* 34: 34-42.
- Karim AA, Nadiha MZ, Chen FK, Phuah YP, Chui YM, Fazilah A. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch. *Food Hydrocolloids* 22: 1044-1053. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2007.05.011.
- Kim BS, Lim ST. 1999. Removal of heavy metal ions from water by cross-linked carboxymethyl corn starch. *Carbohydr Polym* 39: 217-223. DOI: 10.1016/S0144-8617(99)00011-9.
- Landerito NA, Wang YJ. 2005. Preparation and properties of starch phosphates using waxy, common, and high-amylose corn starches. II reactive extrusion method. *Cereal Chem* 82: 271-276. DOI: 10.1094/CC-82-0271.
- Leszczyński W. 2004. Resistant starch-classification, structure, production. *Pol J Food Nutr Sci* 13: 37-50.
- Lewandowicz G, Fornal J, Walkowski A, Maczynski M, Urbaniak G, Szyman'ska G. 2000. Starch esters obtained by microwave radiation-structure and functionality. *Ind Crop Prod* 11: 249-257. DOI: 10.1016/S0926-6690(99)00065-5.
- Lim S, Seib PA. 1993. Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphates. *Cereal Chem* 70: 137-144.
- Liu J, Chen J, Dong N, Ming J, Zhao G. 2012. Determination of degree of substitution of carboxymethyl starch by Fourier transform mid-infrared spectroscopy coupled with partial least squares. *Food Chem* 132: 2224-2230. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.12.072.
- Luo FL, Huang Q, Fu X, Zhang LX, Yu SJ. 2009. Preparation and characterisation of crosslinked waxy potato starch. *Food Chem* 115: 563-568. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.12.052.
- Maneesriraj M, Phetkoa S, Narkrugs W. 1998. Starch phosphate production by microwave technique. *Kasetsart J Nat Sci* 32: 234-241.
- Manoi K, Rizvi SSH. 2010. Physico-chemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion. *Carbohydr Polym* 81: 687-694. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.03.042.
- O'Brien S, Wang YJ. 2009. Effects of shear and pH on starch phosphates prepared by reactive extrusion as a sustained release agent. *Carbohydr Polym* 77: 464-471. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.01.014.
- Ozmen EY, Sezgin M, Yilmaz A, Yilmaz M. 2008. Synthesis of β -cyclodextrin and starch based polymers for sorption of azo dyes from aqueous solutions. *Bioresource Technol* 99: 526-531. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.023.
- Palav T, Seetharaman K. 2006. Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating. *Carbohydr Polym* 65: 364-370. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.01.024.
- Palav T, Seetharaman K. 2007. Impact of microwave heating on the physico-chemical properties of a starch-water model system. *Carbohydr Polym* 67: 596-604. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.07.006.
- Passauer L, Bender H, Fischer S. 2010. Synthesis and characterisation of starch phosphate. *Carbohydr Polym* 82: 809-814. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.05.050.
- Rivero IE, Balsamo V, Müller AJ. 2009. Gelombang mikro-assisted modification of starch for compatibilizing LLDPE/starch blends. *Carbohydr Polym* 75: 343-350. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.08.012.
- Ryynanen S. 1995. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles. *Food Eng* 26: 409-429. DOI: 10.1016/0260-8774(94)00063-F.
- Sang Y, Prakash O, Seib PA. 2007. Characterization of phosphorylated cross-linked resistant starch by ^{31}P nuclear magnetic resonance (^{31}P NMR) spectroscopy. *Carbohydr Polym* 67: 201-212. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.05.009.
- Sang Y, Seib PA, Herrera AI, Prakash O, Shi YC. 2010. Effects of alkaline treatment on the structure of phosphorylated wheat starch and its digestibility. *Food Chem* 118: 323-327. DOI: 10.1016/j.foodchem.2009.04.121.
- Shogren RL, Biswas A. 2006. Preparation of water-soluble and water-swelling starch acetates using microwave heating. *Carbohydr Polym* 64: 16-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.10.018.
- Shogren RL. 2003. Rapid preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction. *Carbohydr Polym* 52: 319-326. DOI: 10.1016/S0144-8617(02)00305-3.
- Singh N, Sandhu KS, Kaur M. 2004. Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Food Eng* 63: 441-449. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2003.09.003.
- Stahl JA, Lobato LP, Bochi VC, Kubota EH, Gutkoski LC, Emanuelli T. 2007. Physico-chemical properties of Pinhao (*Araucaria angustifolia*, Bert O. Ktze) starch phosphate. *LWT-Food Sci Technol* 40: 1206-1214. DOI: 10.1016/j.lwt.2006.07.015.
- Wanrosli WD, Rohaizu R, Ghazali A. 2011. Synthesis and characterization of cellulose phosphate from oil palm empty fruit bunches microcrystalline cellulose. *Carbohydr Polym* 84: 262-267. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.11.032.
- Yoneya T, Ishibashi K, Hironaka K, Yamamoto K. 2003. Influence of cross-linked potato starch treated with POCl_3 on DSC, rheological properties and granule size. *Carbohydr Polym* 53: 447-457. DOI: 10.1016/S0144-8617(03)00143-7.
- Zhang J, Li A, Wang A. 2006. Study on superabsorbent composite. VI. Preparation, characterization and swelling behaviors of starch phosphate-graft-acrylamide/attapulgit superabsorbent composite. *Carbohydr Polym* 65: 150-158. DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.12.035.
- Zhang J, Wang ZW. 2009. Optimization of reaction conditions for resistant *Canna edulis* Ker starch phosphorylation and its structural characterization. *Ind Crops Prod* 30: 105-113. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.02.006.