

PENGEMBANGAN *BIODEGRADABLE FOAM* BERBAHAN BAKU PATI

Evi Savitri Iriani¹, Titi C. Sunarti² dan Nur Richana¹

¹Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian
Jl. Tentara Pelajar 12, Bogor. 16114

²Guru Besar pada Departemen Biokimia, Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor
Email: *evi_savitri2003@yahoo.com*

ABSTRAK

Ketergantungan terhadap kemasan *styrofoam* dalam kehidupan sehari-hari sudah sangat mengkhawatirkan mengingat dampak negatif yang ditimbulkannya, baik terhadap kesehatan maupun lingkungan. Saat ini belum banyak penelitian yang dilakukan untuk mengurangi ketergantungan tersebut dengan menggantikannya dengan bahan baku yang lebih ramah lingkungan serta tidak berbahaya terhadap kesehatan. Bahan berpati adalah salah satu sumber bahan baku yang dapat dimanfaatkan sebagai substitusi *styrofoam*, namun demikian, saat ini pemanfaatan pati lebih banyak diarahkan sebagai bahan baku pembuatan bioplastik. Oleh karena itu, tulisan ini mencoba mengulas beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk menghasilkan *biodegradable foam* berbahan baku pati. Pati merupakan polimer alami yang memiliki kemampuan untuk mengembang bila dipanaskan. Kemampuan ini dapat dimanfaatkan dalam pembuatan *biodegradable foam*. Namun demikian sifat alami pati yang hidrofilik serta mudah terdegradasi harus menjadi perhatian dalam pemanfaatannya. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi kelemahan tersebut antara lain dengan modifikasi maupun dengan mencampurkan pati dengan berbagai bahan tambahan lain. Pada proses pembuatan *biodegradable foam* sendiri juga ada berbagai teknik tergantung bentuk *foam* yang diinginkan. Untuk saat ini tampaknya teknik ekstrusi dan *thermopressing* merupakan teknologi yang paling *feasible*.

Kata kunci: *biodegradable foam*, busa berbasis pati, ekstruksi, *thermopressing*

ABSTRACT. Evi Savitri Iriani, Titi C. Sunarti dan Nur Richana. 2011. **Development of raw starch-based biodegradable foam.** Dependence on styrofoam packaging in our life is very worrying because its negative impact on our health or to the environment. There has been much research conducted to reduce such dependence by substituting raw materials that are more environmentally friendly and safer to our health. Starchy materials is one of the sources of raw materials that can be used as a raw material for bioplastic or to substitute styrofoam. This paper aims at reviewing some of the research that has been done to produce biodegradable foam made from raw starch. As we know, starch is a natural polymer that has the ability to expand when they were heated. This capability can be utilized in the manufacture of biodegradable foam. However, since starch are hydrophilic and easily degraded it should be a concern in their utilization. Many efforts have been made to overcome these weaknesses, either by starch modification or by combining starch with additional ingredients. There are various techniques to produce biodegradable foam depending on the desired foam shape. For now it seems that extrusion and thermopressing technique are the most feasible technology.

Keyword : biodegradable foam, starch based foam, extrusion, thermopressing

PENDAHULUAN

Ketergantungan manusia terhadap kemasan plastik termasuk *styrofoam* dalam kehidupan sehari-hari sangat tinggi. Saat ini produksi plastik dunia diperkirakan mencapai 100 juta ton setiap tahunnya¹. Padahal bahan baku untuk pembuatan plastik dan *styrofoam* berasal dari minyak bumi yang persediaannya terbatas serta sulit terdegradasi secara alami sehingga dapat menimbulkan masalah lingkungan. Selain itu migrasi monomer dari plastik termasuk *styrofoam* ke dalam produk pangan yang

dikemas dapat menimbulkan berbagai masalah kesehatan.

Penggunaan *styrofoam* sebagai wadah makanan semakin banyak ditemui, baik untuk makanan siap saji, makanan kaki lima maupun produk pangan lainnya. Alasan penggunaan *styrofoam* adalah: (1) mampu mempertahankan suhu panas maupun dingin tetapi tetap nyaman untuk dipegang, (2) tidak mudah bocor dan berubah bentuk bila digunakan untuk menyimpan cairan, (3) mampu memper-tahankan kesegaran dan keutuhan bahan yang dikemas, (4) memiliki harga murah serta (5) memiliki bobot yang

ringan². Namun demikian dibalik semua keunggulan ini tersimpan bahaya yang dapat mengancam kesehatan manusia maupun merusak lingkungan.

Beberapa penelitian menemukan adanya kandungan *dioktil ftalat* (DOP) yang digunakan sebagai bahan *plastisizer* yang bisa menimbulkan berbagai masalah kesehatan. Bahan ini terbuat dari *styrene* (vinyl benzen). World Health Organization (WHO), Environmental Protection Agency (EPA) dan beberapa lembaga lainnya malah sudah mengkategorikan *styrofoam* sebagai bahan karsinogen karena benzena merupakan suatu larutan kimia yang sulit dicerna oleh sistem pencernaan.

Gangguan kesehatan lain yang dapat disebabkan oleh pemakaian *styrofoam* antara lain *endocrine disrupter* (EDC), yaitu suatu penyakit yang mengganggu sistem endokrinologi dan reproduksi manusia. Masalah kesehatan lainnya adalah gangguan pada kelenjar tiroid yang dapat menyebabkan kelelahan, detak jantung cepat, sulit tidur, badan gemeteran, dan mudah gelisah. Saat benzena termakan, zat juga akan masuk ke sel-sel darah dan lama-lama akan merusak sumsum tulang belakang, bahkan efek selanjutnya akan timbul anemia, dan sistem imun yang berkurang².

Styrofoam juga berdampak buruk bagi lingkungan karena sifatnya yang tidak bisa terurai secara alami. Data dari EPA menyebutkan bahwa limbah hasil pembuatan *styrofoam* ditetapkan sebagai limbah berbahaya ke-5 terbesar di dunia. Bau yang timbul selama proses produksinya mampu mengganggu pernapasan dan melepaskan 57 zat berbahaya ke udara. Kemasan *styrofoam* umumnya digunakan hanya dalam waktu singkat terutama bila digunakan sebagai wadah kemasan restoran cepat saji. Namun demikian membutuhkan waktu yang sangat lama atau bahkan sama sekali tidak bisa diuraikan oleh alam sehingga akan menumpuk dalam jumlah besar dan mencemari lingkungan³.

Dampak buruk yang dapat ditimbulkan oleh penggunaan *styrofoam* sangat besar sehingga harus dilakukan upaya untuk mencari alternatif bahan pengemas lain yang lebih ramah lingkungan serta tidak berbahaya terhadap kesehatan manusia disamping melakukan kegiatan 3R yaitu *reuse*, *reduce* dan *recycle* terhadap kemasan *styrofoam* yang sudah ada. Banyak penelitian yang telah dilakukan dengan memanfaatkan berbagai sumber biologis seperti tanaman, hewan atau mikroba. Adapun bahan yang paling banyak digunakan sebagai bahan baku biopolimer adalah produk atau limbah pertanian seperti pati dan selulosa dengan alasan sifatnya yang dapat diperbaharui, tersedia melimpah dan harganya murah⁴.

Makalah ini mencoba mereview beberapa hasil-hasil penelitian mengenai pembuatan *biodegradable foam* yang telah dilakukan beberapa penulis, baik dari sisi teknologi proses, formulasi serta alternatif bahan baku yang digunakan. Diharapkan tulisan ini dapat memberikan informasi mengenai apa dan bagaimana

pembuatan *biodegradable foam* sehingga dapat memacu pengembangan produk *biodegradable foam* agar dapat menjadi kemasan pengganti *styrofoam* yang lebih ramah lingkungan serta aman bagi kesehatan.

KEMASAN STYROFOAM

Kemasan adalah wadah untuk menyimpan produk sehingga produk tersebut dapat terlindungi dari pengaruh lingkungan sekitar seperti kelembaban, mikroorganisme, bau, debu, dll. Kemasan juga untuk mempermudah proses transportasi, distribusi, penyimpanan hingga penjualan barang sampai ke konsumen. Selain itu kemasan juga menjadi sarana untuk menyampaikan komunikasi dari penjual kepada konsumen⁵.

Salah satu jenis kemasan yang penggunaannya paling banyak dalam kehidupan adalah plastik. Plastik memiliki sifat fleksibel, mudah dibentuk, tidak tembus air, ringan dan murah. Plastik sendiri terdiri dari beberapa macam jenis diantaranya yang sering digunakan yaitu polietilen (PE), polipropilen (PP), poli vinil klorida (PVC), poli stiren (PS), dan polietilen teret talat (PET).

Styrofoam atau yang dikenal di Indonesia dengan gabus sebenarnya masih tergolong keluarga plastik. *Styrofoam* yang sebenarnya merupakan nama dagang dari polistiren. Pada awalnya *styrofoam* digunakan sebagai bahan pelindung dan penahan getaran barang yang *fragile* seperti elektronik karena memiliki sifat fisik dan mekanis yang baik. *Styrofoam* juga memiliki kemampuan menahan panas dan dingin yang baik sehingga digunakan sebagai *insulator*. Kemampuan menahan suhu yang baik tersebut mendorong penggunaan *styrofoam* sebagai bahan pengemas makanan dan minuman.

Bahan dasar pembuatan *styrofoam* adalah polistiren suatu jenis plastik yang sangat ringan, kaku, tembus cahaya dan murah tetapi cepat rapuh. Karena kelemahannya tersebut, polistiren dicampur dengan beberapa bahan tambahan seperti *plastisizer* yaitu dioktil ftalat (DOP), dan *blowing agent* berupa gas klorofluorokarbon⁶.

Umumnya kemasan *styrofoam* hanya digunakan sekali pakai, selanjutnya dibuang hingga sering menimbulkan tumpukan sampah yang menumpuk karena *styrofoam* tidak bisa didegradasi. Pembakaran limbah *styrofoam* bukannya mengurangi limbah tetapi dapat menimbulkan masalah lain karena hasil pembakaran menimbulkan CO₂ dalam jumlah besar bahkan menghasilkan dioksin yang bersifat karsinogenik dan dapat menjadi pemicu terjadinya pemanasan global³.

Kemasan *styrofoam* sebenarnya tidak cocok digunakan untuk produk makanan atau minuman karena bahan kimia yang terkandung dalam *styrofoam* akan berpindah atau migrasi ke dalam makanan atau minuman tersebut. Perpindahan ini akan semakin

cepat jika kadar lemak dari makanan atau minuman makin tinggi. Selain itu, makanan atau minuman yang mengandung alkohol atau asam (seperti lemon tea) juga dapat mempercepat laju migrasi monomer dari *styrofoam* tersebut. Penelitian lainnya juga membuktikan, bahwa semakin panas suatu makanan, semakin cepat pula migrasi bahan kimia *styrofoam* ke dalam makanan ⁷.

Styrene dapat menyebabkan anemia, gangguan sitogenetik serta efek karsinogenik ⁸. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa *styrene* juga berpengaruh terhadap ketidakseimbangan hormon yang berakibat pada timbulnya masalah reproduksi termasuk tingkat kesuburan serta dapat mempengaruhi kualitas ASI dari ibu menyusui ⁹.

Dioktil phtalat (DOP) yang ditambahkan mengandung benzena yang merupakan bahan kimia yang sulit dicerna oleh sistem pencernaan manusia. Benzena juga tidak bisa dikeluarkan melalui feses atau urin. Akibatnya zat ini semakin lama semakin menumpuk dan terbalut lemak. Hal tersebut bisa memicu munculnya penyakit kanker. Hasil penelitian aditif plastik *dibutil phtalat* (DBP) dan DOP pada PVC termigrasi cukup banyak ke dalam minyak zaitun, minyak jagung, minyak biji kapas dan minyak kedelai. Pada suhu 3°C selama 60 hari kontak jumlah aditif DBP dan DOP yang termigrasi berkisar 155-189bmg ¹⁰.

Konsumsi DOP pada industri PVC mencapai 50-60% dari total produksi *plastisizer*. DOP juga memberikan viskositas yang stabil pada saat aplikasinya pada PVC. Lebih dari itu, harga DOP paling murah di antara sekitar 300 *plastisizer* yang dikembangkan, karena proses sintesanya sederhana dan bahan baku industri petrokimia ini juga melimpah ².

Kontaminasi *styrene* pada makanan yang dikemas menggunakan *styrofoam* pertama kali didokumentasikan pada tahun 1972 dan dilanjutkan oleh penelitian Dowly *et al* ⁸. *Styrofoam* mengalami proses *leaching* atau peluruhan ke dalam cairan yang dikemasnya ¹¹. *Styrene* juga ditemukan pada produk yoghurt, keju lunak, margarin, minuman panas dan dingin, dan makanan siap saji yang dikemas menggunakan *styrofoam* ^{12,13}.

Menurut Lickly *et al* ⁷, besarnya migrasi *styrene* dari kemasan *styrofoam* ke dalam produk makanan berbanding proporsional dengan akar kuadrat dari lamanya waktu kontak. Semakin lama waktu kontak maka jumlah *styrene* yang bermigrasi juga semakin tinggi.

PATI SEBAGAI BAHAN BAKU BIODEGRADABLE FOAM

Ada berbagai sumber polimer alami yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku kemasan ramah lingkungan, diantaranya polisakarida, protein, lemak dan polimer alami lain seperti karet. Pati adalah salah

satu bentuk polisakarida yang sudah banyak dimanfaatkan karena memiliki beberapa keunggulan yaitu *renewable*, melimpah dan mudah terdegradasi. Pati juga memiliki sifat khusus seperti memiliki kemampuan mengembang, dan mudah dimodifikasi.

Kemampuan pati untuk mengembang dipengaruhi oleh karakteristik fisiko kimia dan fungsional dari pati tersebut. Rasio amilosa dan amilopektin, *swelling power*, suhu gelatinisasi, akan berpengaruh terhadap kemampuan ekspansi dan sifat mekanik dari produk *biodegradable foam* yang dihasilkan.

Pengaruh karakteristik bahan baku terhadap karakteristik *biodegradable foam*:

a. Kadar air

Kadar air dalam bahan baku akan berpengaruh terhadap kemampuan ekspansi produk *biodegradable foam* mengingat air dapat berfungsi sebagai *blowing agent* bila ada tekanan yang cukup besar. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa, peningkatan kadar air selama proses ekstrusi dapat mengurangi besarnya ekspansi radial ^{14,15,16} dan ekspansi volumetrik ¹⁷ serta meningkatkan densitas dari ekstrudat ¹⁸.

Sementara itu, Owusu-Ansah *et al.* ¹⁹ mengemukakan bahwa kekuatan patah dari pati jagung yang diekstrusi akan berkurang dengan semakin meningkatnya kelembaban. Peningkatan kadar air akan menurunkan nilai *modulus flexural* dan kekuatan produk ekstrusi pati gandum karena terjadi peningkatan densitas ²⁰.

b. Kadar Protein

Protein merupakan salah satu polimer alami yang akan mempengaruhi kemampuan ekspansi dan sifat mekanik dari produk *biodegradable foam* yang dihasilkan. Faubion and Hosney ¹⁵ menemukan kekuatan tarik serta ketahanan terhadap gesekan produk ekstrusi pati gandum berkurang dengan penambahan gluten hingga 15%. Menariknya, penambahan isolat protein kedelai memiliki efek sebaliknya. Penambahan protein juga berdampak terhadap kemampuan ekspansi produk ekstrusi. Hal ini karena protein akan mengurangi kemampuan elongasi pati pada saat keluar dari lubang ekstruder ²¹.

Penelitian yang dilakukan oleh Wu *et al* ²², menunjukkan bahwa penambahan protein dari *flaxseed* dapat meningkatkan daya viskoelastisitas pasta sehingga berdampak pada kemampuan ekspansinya.

c. Rasio Amilosa : Amilopektin

Rasio amilosa dan amilopektin merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap kemampuan ekspansi dari *biodegradable foam*. Menurut Fritz ²³,

amilosa berekspansi secara maksimal pada suhu 225°C sementara amilopektin pada suhu 135°C. Di sisi lain amilosa cenderung mengembang secara longitudinal sementara amilopektin mengembang secara radial. Produk *biodegradable foam* yang menggunakan bahan baku dengan kadar amilopektin tinggi memiliki pori-pori yang lebih kecil serta densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan produk yang menggunakan amilosa tinggi. Produk dengan amilosa tinggi cenderung kurang mengembang, kaku tetapi lebih tahan terhadap kelembaban.

d. Ukuran Partikel

Ukuran partikel bahan baku ternyata juga berpengaruh terhadap kemampuan ekspansi produk ekstrusi. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa bahan baku dengan ukuran partikel yang lebih besar menghasilkan ekstrudat dengan tingkat ekspansi lebih tinggi^{24,25,26}. Namun demikian menurut Carvalho *et al*²⁶, partikel berukuran lebih kecil menghasilkan ketahanan mekanis produk ekstrusi lebih tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Bhatnagar dan Hanna²⁷, menunjukkan bahwa teknik ekstrusi dapat digunakan untuk menghasilkan *biodegradable foam*. Penelitian ini menggunakan beberapa sumber pati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pati dapat menggantikan 70% polistiren dalam pembuatan *foam*. Namun demikian produk yang dihasilkan dari pati belum memuaskan. Selanjutnya para peneliti menggunakan pati modifikasi untuk meningkatkan sifat hidrofobik produk *biodegradable foam* dengan menggunakan antara lain pati asetat^{28,29}. Selain itu juga dilakukan penambahan polimer sintetik, *plastisizer* serta bahan tambahan lainnya. Upaya lain adalah dengan penambahan serat atau selulosa, penambahan lateks dan pelapisan *biodegradable foam* dengan *polyvinil chloride film*^{30,31}.

Perkembangan selanjutnya dalam penelitian *biodegradable foam* adalah penggunaan berbagai teknik dan metode seperti *thermo-pressing*^{32,31,33,34,35}. Selain itu juga ada teknik lain yaitu *microwave assisted moulding*³⁶.

MODIFIKASI PATI UNTUK PEMBUATAN BIODEGRADABLE FOAM

Pati dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan berbagai produk baik pangan maupun bahan baku industri. Karakteristik pati alami umumnya belum dapat memenuhi kebutuhan industri yaitu tahan terhadap gaya gesek yang tinggi akibat penggunaan mesin selama proses. Selain itu pati juga harus tahan terhadap suhu yang ekstrim baik panas maupun dingin serta mampu bertahan pada tingkat keasaman yang rendah³⁷.

Agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku *biodegradable foam*, pati alami harus dimodifikasi terlebih dahulu untuk mendapatkan karakteristik tertentu yang dibutuhkan dalam proses produksi.

Modifikasi pati dapat dilakukan secara fisik dengan menggunakan panas, kelembaban dan tekanan (HMT, *annealing*, pregelatinisasi, penggunaan tekanan tinggi) maupun secara kimia dengan menggunakan reaksi derivatif (*cross linking*, substitusi, dan *grafting*) ataupun dekomposisi (hidrolisis asam atau enzimatis dan oksidasi)³⁸.

a. Modifikasi fisik

Pati merupakan bahan yang dapat dijadikan alternatif pengganti polimer sintetik pada situasi di mana tidak dibutuhkan sifat yang tahan lama. Semua tipe pati dapat mengalami proses destrukturisasi untuk menjadi bahan termoplastis³⁹.

Pati alami umumnya bersifat non plastis karena ikatan hidrogen inter dan antar molekul diantara gugus hidroksil pada molekul pati. Umumnya pati bersifat semi-kristalin di mana senyawa amilo-pektin menentukan derajat kristalinitas yang dimilikinya. Untuk merubah karakteristik pati tersebut dibutuhkan proses destrukturisasi untuk merubah keadaan semi-kristalin menjadi matriks polimer yang bersifat amorf³⁹.

Proses destrukturisasi dapat dilakukan dengan proses panas untuk menghancurkan dan mengubah struktur semikristalin granula pati agar membentuk material yang homogen dan amorf. Proses perubahan ini biasanya membutuhkan sejumlah bahan tambahan yang disebut dengan *plastisizer*⁴⁰. Material yang dihasilkan oleh proses ini disebut dengan pati termoplastis sedangkan proses yang biasa digunakan dapat berupa proses ekstrusi, pencetakan secara injeksi/ kompresi, pencampuran dan tekanan panas (*hot pressing*).

Penambahan *plastisizer* umumnya dilakukan dengan menambahkan bahan yang kaya akan gugus hidroksil seperti gliserol, air dan poliol⁴¹. Bahan lain yang juga dapat digunakan adalah formamida dan urea⁴² dan asam sitrat⁴³. Penggunaan *plastisizer* dari kelompok poliol (gliserol dan sorbitol) memiliki kemampuan yang baik untuk menghancurkan struktur molekul pati, namun dapat menginduksi terjadinya retrogradasi⁴⁴.

Parameter yang mempengaruhi karakteristik pati termoplastis adalah adalah konsentrasi *plastisizer* dan kondisi proses. Kandungan *plastisizer* yang kurang dari 10% akan menghasilkan material termoplastis yang rapuh (*fragile*), sementara konsentrasi di atas 20% akan meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan perpanjangan (*elongasi*) yang semakin besar⁴⁵. Menurut Lourdin *et al*.⁴⁶, penambahan *plastisizer* seperti gliserol dan sorbitol berkisar 20-40% dari berat pati. Banyaknya penambahan *plastisizer* berpengaruh terhadap sifat mekanis dan sifat termal (Tg) dari produk yang dihasilkan. Adapun kondisi optimum proses termoplastisasi adalah 120°C pada kecepatan 50 rpm selama 4 menit dengan *plastisizer* gliserol, sedangkan bila *plastisizer*-nya urea maka kondisi optimum 135°C dengan kecepatan 50 rpm selama 4 menit⁴⁷.

Bahan *plastisizer* yang paling sering digunakan dalam pembuatan pati termoplastik adalah gliserol, yang berfungsi sebagai perenggang antar molekul dan menurunkan tingkat interaksinya satu sama lain⁴⁸. Penggunaan gliserol yang dicampurkan pada komposit termoplastis pati sagu dan PE (polietilen) memiliki pengaruh terhadap sifat mekanis produk termoplastis yang dihasilkan⁴⁹. Peningkatan konsentrasi gliserol pada pembuatan ampok termoplastis (produk samping industri penggilingan jagung) dapat menurunkan kekuatan tarik namun meningkatkan nilai kekerasannya⁵⁰. Untuk lebih meningkatkan sifat mekanis serta mengurangi sifat hidrofobik pati termoplastis, dapat dilakukan beberapa hal diantaranya penambahan serat alami dan polimer sintetik untuk meningkatkan kekuatan serta ketahanan terhadap air⁵¹.

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menambahkan serat ke dalam proses pembuatan pati termoplastis^{52,53}. Penambahan serat selulosa hingga 15% dapat meningkatkan ketahanan terhadap air, selain itu juga dapat meningkatkan nilai *tensile strength*⁵⁴. Penambahan serat sisal pada penelitian Sreekumar *et al.*⁵⁵ dapat meningkatkan sifat mekanik dari pati termoplastik yang dihasilkan.

Dengan beberapa pertimbangan tersebut, maka dalam penelitian yang dilakukan oleh Iriani *et al.*⁵⁰ digunakan bahan baku pembuatan *biodegradable foam* berupa ampok. Hal ini dilakukan mengingat ampok memiliki kadar pati yang cukup tinggi serta serat yang diharapkan dapat memperbaiki sifat mekanisnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan baku ampok yang mengandung serat sekitar 35% dapat meningkatkan nilai kekerasan dari produk termoplastis yang dihasilkan. Namun demikian, bila peningkatan konsentrasi ampok terlalu besar maka akan menurunkan ketahanan tarik dan nilai elongasi.

b. Modifikasi kimia

Dalam proses pangan, modifikasi secara kimia dilakukan untuk merubah beberapa sifat alami dari pati tersebut, diantaranya mengurangi derajat kristalin dari granula pati, meningkatkan *swelling power*, dan mengurangi suhu gelatinisasi. Modifikasi kimia dengan menggunakan asam dapat merubah sifat fisikokimia dari pati tanpa merusak struktur granula pati tersebut. Suhu gelatinisasi akan meningkat karena proses hidrolisis tersebut⁵⁶. Laju retrogradasi pada gel pati yang terhidrolisis juga akan meningkat⁵⁷. Modifikasi asam juga meningkatkan kelarutan dan kekuatan gel serta penurunan kekentalan⁵⁸. Sifat viskoelastisitas pati juga dipengaruhi oleh hidrolisis asam. Virtanen *et al.*⁵⁹, melaporkan bahwa pati *oat* yang dimodifikasi menggunakan asam bersifat lebih elastis dibandingkan pati alaminya. Modifikasi menggunakan asam menunjukkan *Newtonian behaviour* serta bersifat viskoelastis dibandingkan pati alami yang bersifat kaku selama proses penyimpanan⁶⁰.

Asetilasi merupakan salah satu jenis modifikasi secara kimia yang tergolong pada proses esterifikasi. Esterifikasi pati yang dilakukan bertujuan untuk meningkatkan suhu gelatinisasi, stabilitas termal dan mengurangi kecenderungan retrogradasi. Pati asetat banyak dimanfaatkan pada berbagai macam aplikasi seperti bahan pengental pada berbagai produk pangan, sebagai bahan pengisi pada industri tekstil dan kertas serta sebagai bahan perekat. Umumnya untuk produk pangan dibutuhkan Derajat Substitusi (DS) yang rendah berkisar 0,01-0,2, namun untuk aplikasi sebagai bahan kemasan dibutuhkan pati asetat dengan nilai DS yang cukup tinggi (>2)⁶¹.

Pembuatan pati asetat secara komersial dilakukan melalui suspensi pati dengan konsentrasi 35-42%. Selanjutnya ditambahkan asetat anhidrat pada konsentrasi tertentu sesuai nilai DS yang diinginkan. Menurut Singh *et al.*³⁸, masuknya gugus asetil pada molekul pati akan meningkatkan ikatan hidrogen antar molekul sehingga mendorong terjadinya penyatuan granula pati.

Pati asetilasi DS rendah biasanya diperoleh melalui proses esterifikasi pati alami dengan asetat anhidrat pada medium air dengan katalis dari golongan alkali. Pati asetilasi DS tinggi umumnya memiliki kemampuan termoplastis dan juga bersifat hidrofobik. Pati asetilasi DS tinggi ini umumnya digunakan untuk pengikat tablet, perekat panas, filter rokok dan bahan kemasan⁶².

Nilai DS bervariasi tergantung pada sumber pati, rasio amilosa dan amilopektin, jumlah bahan kimia yang ditambahkan serta lamanya waktu reaksi. Pati asetilasi bernilai DS tinggi (>1) umumnya bersifat hidrofobik sehingga dapat digunakan sebagai bahan kemasan seperti *biodegradable foam*²⁹.

Penelitian Shogren *et al.*³⁴ dilakukan dengan menyiapkan serangkaian proses esterifikasi seperti asetilasi pati pada suhu dan tekanan tinggi, sementara Mehlretter and Mark⁶³, menyiapkan pati asetilasi dengan mereaksikan asetat anhidrat secara berlebih menggunakan sodium hidroksida sebagai katalis.

Proses asetilasi merupakan upaya untuk menghasilkan material yang bersifat tahan air. Namun demikian, proses asetilasi tersebut tergolong mahal dan menyebabkan kemampuan bioplastik untuk terurai menjadi berkurang⁶⁴. Dengan demikian penggunaan pati asetat harus dilakukan seoptimum mungkin agar tidak mengurangi kemampuan degradasi dari *biodegradable foam*.

PRODUK FOAM BERBASIS PATI

Ada tiga jenis *biodegradable foam* yaitu (1) *foam* berupa butiran kecil (*loose fill foam*) yang umumnya digunakan sebagai penyerap getaran atau bantalan pada produk-produk yang mudah rusak seperti elektronik; (2) *foam* berupa lembaran yang selanjutnya akan dibentuk atau dimolding dan (3) *foam* dengan bentuk khusus seperti mangkok, piring dan gelas yang dibuat dengan proses pembakaran.

Proses pembuatan *loose fill foam* atau *peanut foam* dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip pembuatan *snack food* dengan menggunakan ekstruder. *Foam* dihasilkan dari proses ekstrusi dimana panas dan gaya gesek yang timbul pada proses ini akan mengakibatkan pati yang ada mengalami gelatinisasi dan mencair. Penguapan air akibat meningkatnya tekanan pada saat melewati lubang kecil pada ekstruder akan menimbulkan *bubble effect* sehingga cairan pati akan mengembang. Selanjutnya kontak dengan udara luar yang lebih rendah suhunya akan menyebabkan produk yang sudah mengembang tersebut mengeras hingga diperoleh produk yang jauh lebih besar dibandingkan bahan bakunya. Sayangnya *foam* yang dihasilkan umumnya rapuh serta hidrofilik sehingga tidak bisa digunakan untuk bahan kemasan.

Beberapa upaya dilakukan untuk mengatasi kelemahan tersebut diantaranya dengan memodifikasi pati menjadi hidrofobik serta termoplastis. Hal ini agar mudah dicampur dan dibentuk melalui pembuatan pati asetilasi dan pati termoplastis. Selain itu penambahan berbagai bahan polimer sintetik, *filler* seperti serat, dan bahan aditif lainnya dapat meningkatkan sifat termal, morfologi dan mekanikal dari produk *biodegradable foam*.

Karakteristik *biodegradable foam* berbahan baku pati sangat ditentukan oleh kadar air dari pati serta kondisi proses ekstrusi. Campuran yang terdiri dari 49% pati gandum dan pati jagung, 33% polimer sintetik, 10,5% air, 7% *blowing agent* dan 0,5% *nucleating agent* yang diekstrusi pada suhu 100-160°C pada kecepatan 100 rpm menghasilkan produk *biodegradable foam* dengan sifat terbaik⁶⁵. Penambahan *nucleating agent* berupa *talc* 5% berfungsi untuk meningkatkan keseragaman dari sel *foam* yang dihasilkan⁶⁶.

Bhatnagar dan Hanna⁶⁷, menyatakan bahwa *biodegradable foam* yang terbuat dari campuran 25% pati jagung yang ditambahkan *polistiren* dan kemudian diekstrusi menggunakan ekstruder komersial pada suhu 120°C dengan kecepatan 140 rpm dengan kadar air 6% memberikan hasil terbaik.

Penggunaan pati hasil asetilasi dengan nilai DS 2-3 pada pembuatan *biodegradable foam* menghasilkan produk dengan *spring index* rendah, serta densitas tinggi dibandingkan bila pati asetat tersebut dicampur dengan etanol pada saat proses ekstrusi²⁸. Selain itu *foam* yang dihasilkan juga memiliki sifat mekanis yang rendah sehingga harus dicampur dengan polimer sintetik lain seperti PVA, PLA, dll menggunakan *twin screw ekstruder*²⁹.

TEKNIK PEMBUATAN BIODEGRADABLE FOAM

1. Proses Ekstrusi

Teknologi ekstrusi memanfaatkan kemampuan pati untuk mengembang atau berekspansi karena adanya pengaruh panas dan gesekan selama proses ekstrusi.

Teknologi ini pertama kali ditemukan oleh Joseph Baramat pada tahun 1797, yang kemudian mendorong berkembangnya aplikasinya pada industri pangan, plastik dan farmasi. Industri makanan terutama makanan ringan mengalami revolusi besar dengan diperkenalkannya *twin screw extruder* tahun 1960.

Proses ekstrusi merupakan teknologi yang menghasilkan beragam produk mulai dari pasta, *cereal breakfast*, *snack*, *flat bread*, *texturized protein* dan *pet foods*. Beragam parameter operasi digunakan untuk menghasilkan produk ekstrusi yang beragam mulai dari penggunaan kelembaban tinggi (hingga 75%)- suhu rendah (50°C) dan gaya gesek rendah seperti pada pembuatan pasta hingga penggunaan suhu tinggi (180°C) dengan gaya gesek tinggi seperti pada pembuatan *cereal breakfast* dan produk *snack*⁶⁸.

Teknologi ekstrusi banyak digunakan untuk berbagai produk olahan pangan maupun non pangan karena memiliki banyak fungsi seperti pengadukan, pencampuran, pembentukan dan pemasakan. Ekstruder mampu melakukan proses pencampuran dengan baik yang bertujuan agar bahan dapat bercampur secara homogen dan terdispersi dengan baik⁶⁹.

Proses ekstrusi umumnya menggunakan suhu tinggi dan gesekan dengan waktu proses singkat. Energi panas yang disertai dengan gesekan tersebut akan menyebabkan pati dan bahan campuran lainnya mengalami perubahan fisikokimia. Menurut Kaletunc and Breslauer⁷⁰, suhu tinggi dan gesekan selama proses ekstrusi mampu mengubah campuran pati dan protein pada pati jagung menjadi bahan yang bersifat viskoelastis. Bahan ini selanjutnya akan mengembang dan mengeras membentuk partikel padat berbentuk busa atau *foam*.

Panas yang timbul selama proses ekstrusi akan menyebabkan terjadinya berbagai perubahan pada bahan baku yang digunakan seperti proses gelatinisasi pati, denaturasi protein, inaktivasi enzim, penghancuran toksin alami yang ada pada bahan baku serta mengurangi pertumbuhan mikroorganisme pada produk yang dihasilkan⁷¹.

Kemampuan ekspansi produk ekstrusi ditentukan oleh banyak faktor yang merupakan kombinasi antara kondisi proses dan kualitas bahan baku. Variabel kondisi proses yang sudah banyak diteliti pengaruhnya adalah suhu tangki, kecepatan *screw*, dimensi *die nozzle*, konfigurasi *screw*, ukuran tangki dan kelembaban^{72,73}. Sedangkan penelitian kualitas bahan baku meliputi komposisi bahan baku : perbandingan lemak, protein, serat dan pati serta rasio amilosa terhadap amilopektin. Kesemua faktor tersebut akan mempengaruhi aliran dan kekentalan dari pati atau tepung⁷⁴.

Derajat ekspansi produk ekstrusi akan menentukan struktur dan tekstur dari produk yang dihasilkan⁷⁵. Selama ini banyak penelitian yang hanya menggunakan radial ekspansi sebagai ukuran untuk menentukan derajat ekspansi produk ekstrudat.

Namun penelitian yang dilakukan Lai *et al.*⁷⁶ menunjukkan bahwa ekspansi dapat berlangsung secara lateral dan longitudinal. Sedangkan Alvarez-Martinez *et al.*¹⁷, mengembangkan model yang menyatakan bahwa ekspansi berlangsung secara radial, longitudinal dan volumetrik.

Seperti yang telah diulas pada bagian sebelumnya, bahwa rasio amilosa dan amilopektin sangat berpengaruh terhadap kemampuan ekspansi. Semakin tinggi amilosa maka produk akan berekspansi secara longitudinal, sebaliknya bila amilopektin yang tinggi maka akan berekspansi secara radial.

Penelitian Bhatnagar dan Hanna²⁷, menunjukkan bahwa pati jagung dan tapioka memberikan nilai ekspansi yang lebih besar dibandingkan pati jagung, beras dan kentang dalam pembuatan *biodegradable foam*. Pati jagung terutama dari tipe *waxy corn* memiliki kadar amilopektin yang cukup tinggi sehingga memiliki peluang menghasilkan produk ekstrudat dengan rasio ekspansi tinggi.

Fang dan Hanna⁶⁶, juga menyatakan bahwa pati dengan amilopektin tinggi berekspansi secara radial lebih besar dibandingkan dengan pati dengan amilopektin normal. Pati dengan kemampuan ekspansi tinggi juga akan menghasilkan produk *foam* dengan densitas yang rendah.

Kadar air juga merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap karakteristik *biodegradable foam*. Pati membutuhkan air yang cukup agar dapat mengembang, semakin tinggi kadar air berarti akan semakin banyak uap air yang dapat dihasilkan untuk membantu proses *blowing*. Namun demikian bila kadar air terlalu tinggi maka produk yang dihasilkan akan lunak. Fang dan Hanna⁶⁶, menyebutkan bahwa kadar air optimum untuk proses ekstrusi berkisar 19%. Peningkatan kadar air akan menurunkan kemampuan ekspansi serta meningkatkan densitas.

Selain karakteristik bahan baku dan bahan tambahan, kondisi proses juga merupakan faktor yang harus diperhatikan. Suhu proses, yang meliputi suhu pada masing-masing *barrel* serta *die* sangat mempengaruhi karakteristik *foam*. Nabar and Narayan⁷⁷, menyatakan ekspansi radial dapat diperoleh pada kondisi proses 100-110°C. Sementara Cha *et al.*⁶⁵, menyatakan kondisi optimum proses ekstrusi adalah 140°C. Penelitian yang dilakukan oleh Milladinov dan Hanna²⁸, menghasilkan suhu 160°C sebagai kondisi terbaik. Perbedaan hasil ini dapat disebabkan oleh perbedaan bahan baku yang digunakan maupun kecepatan putaran dari ekstruder.

Proses pembuatan *starch based foam* dilakukan dengan mencampur 95% pati jagung berkadar amilosa tinggi yang sudah dimodifikasi dengan 5% *Polyvinyl Alcohol* (PVA)⁷⁸. Beberapa peneliti lain juga mengkaji sifat mekanis *starch based foam* yang terbuat dari berbagai jenis pati^{79,20,74,80,67}. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa ada hubungan antara sifat mekanis dengan *bulk density* bahan bakunya. Upaya perbaikan sifat mekanis juga dilakukan karena

semakin tinggi jumlah pati dalam campuran maka fleksibilitas dan elastisitas *biodegradable foam* tersebut akan berkurang. Namun demikian sampai saat ini sifat fisik dan mekanis produk *biodegradable foam* yang dihasilkan belum mampu menandingi *styrofoam*⁸¹.

Pimpa *et al.*⁸², melakukan penelitian menggunakan bahan baku pati sagu yang dicampur dengan *Polyvinyl Acetate* (PVA) dan PVP (*Polyvinyl Pyrrolidone*). Campuran tersebut kemudian diradiasi menggunakan *electron beam* dengan kekuatan 10-15 kGy untuk membantu proses ikat silang antara molekul pati dengan PVA dan PVP. Selanjutnya untuk membentuk *foam* campuran tersebut dimasukkan ke dalam microwave.

2. Thermopressing

Thermopressing atau sistem pembakaran yang diikuti dengan pencetakan merupakan teknik lain yang digunakan untuk membuat *biodegradable foam* berbahan baku pati.

Biodegradable foam yang dihasilkan melalui proses ekstrusi sebenarnya sudah memiliki sifat mekanis yang cukup baik namun demikian kelemahannya adalah sulit dibentuk. Untuk mengatasi masalah kemudian digunakan prinsip pembuatan wafer dengan membakar adonan. Adonan dengan kelembaban 70-80% diletakkan dalam cetakan panas. Uap yang terbentuk pada adonan menjadi *blowing agent* untuk membentuk *foam*. Produk berupa *tray* yang dihasilkan pada proses ini memiliki bobot ringan dan memiliki kemampuan menahan suhu yang baik. Namun demikian produk ini belum memiliki daya tahan yang baik terhadap air⁸³.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan metode ini antara lain menggunakan bahan baku pati kentang, pati sagu, tapioka, pati beras dan pati jagung. Untuk memperbaiki sifat mekanisnya serta meningkatkan ketahanan terhadap air, beberapa peneliti juga menggunakan tambahan serat ataupun polimer sintetik lain.

Shogren *et al.*³⁴, menggunakan pati kentang dengan kadar amilopektin tinggi yang ditambahkan dengan pati jagung amilosa tinggi. Selain itu ditambahkan pula dengan polimer sintetik PVA dan *aspen fiber* serta monostearil sitrat. Penambahan monostearil sitrat dimaksudkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap air. Untuk mencegah adonan lengket pada cetakan dilakukan penambahan magnesium stearat..

Cinelli *et al.*³⁰, membuat kemasan habis pakai berupa piring yang dibuat dari pati kentang yang dicampur dengan serat jagung dan PVA. Penambahan serat jagung ternyata dapat menurunkan sifat mekanis piring yang dihasilkan tetapi ketahanan terhadap air (*water resistance*) meningkat.

Salgado *et al.*⁸⁴, menggunakan tapioka sebagai bahan utamanya dengan campuran protein bunga matahari dan serat selulosa. Penambahan protein dan

serat tersebut untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanis *biodegradable foam* yang dihasilkan. Peningkatan konsentrasi serat dapat meningkatkan sifat mekanis produk serta mengurangi kadar air produk setelah di proses pengepresan. Peningkatan konsentrasi protein dapat mengurangi kadar air setelah pengepresan, kapasitas penyerapan air serta laju kerusakan. Hasil terbaik dari penelitian ini adalah dengan menggunakan campuran serat 20% dan protein 10%.

Pimpa *et al.*⁸², menggunakan pati sagu yang ditambahkan dengan PVA dan PVP kemudian diiradiasi. Hasilnya menunjukkan bahwa campuran sagu dan PVA hasil iradiasi lebih baik dibandingkan campuran sagu dan PVP karena produk *foam* yang dihasilkan lebih fleksibel.

Tampaknya penambahan serat serta polimer sintetik merupakan faktor penting dalam menghasilkan produk *biodegradable foam*. Selain itu penggunaan pati modifikasi juga dapat membantu mengurangi kelemahan produk *biodegradable foam*. Penggunaan serta penambahan bahan tambahan tersebut tentunya harus dilakukan secermat mungkin mengingat faktor harga serta pengaruhnya terhadap kemampuan degradasi dari produk *biodegradable foam*.

3. Puffing and Popping

Teknologi lainnya yang dapat digunakan untuk membuat *biodegradable foam* adalah proses pemanasan dengan menggunakan bahan baku pati dengan kelembaban rendah. Proses ini seperti halnya pada pembuatan *popcorn*, dimana jagung dengan kadar air 10-15% dipanaskan pada suhu sekitar 177°C hingga mencapai ukuran maksimum 85. Proses *puffing* dengan sistem eksplosif berlanjut dikembangkan untuk biji-bijian yang tidak bisa mengembang secara alami ketika dipanaskan⁸⁶. *Ekspllosion puffing* dapat menghasilkan *starch based foam* berdensitas rendah dalam beberapa detik saja namun kurang sesuai untuk membuat produk yang dibentuk (*moulded*).

Proses lain yang juga dapat digunakan untuk menghasilkan *biodegradable foam* adalah dengan *microwave assisted moulded*. Saat ini penggunaan *microwave* untuk membantu proses pembuatan *moulded starch foam* sudah mulai dilakukan dengan menggunakan pelet hasil ekstrusi⁸⁷. Proses ini meliputi perubahan bentuk dari pati menjadi pelet dengan proses ekstrusi dan selanjutnya pelet tersebut digelembungkan dengan menggunakan *microwave*.

Meski sudah banyak penelitian yang dilakukan untuk menghasilkan produk *biodegradable foam*, namun yang sudah komersial dan dipasarkan masih terbatas. Hal ini disebabkan karena produk *biodegradable foam* masih memiliki beberapa kelemahan seperti tidak kedap air, serta sifat mekanik yang rendah. Untuk itu penelitian ini masih terus dilanjutkan dengan menggunakan berbagai sumber pati, serat, polimer serta melakukan modifikasi pati

agar dapat menghasilkan produk *biodegradable foam* yang dapat bersaing dengan *styrofoam*.

PENUTUP

Pengembangan bahan *biodegradable* untuk mengurangi ketergantungan terhadap plastik maupun *styrofoam* sudah sangat mendesak. Hal ini mengingat sumber bahan baku plastik dan *styrofoam* adalah bahan bakar fosil yang ketersediaannya terbatas, sulit diuraikan oleh alam serta berdampak negatif terhadap kesehatan manusia.

Pati merupakan salah satu polimer alami yang memiliki kemampuan untuk mengembang karena adanya panas atau gesekan. Kemampuan tersebut dapat dimanfaatkan untuk pembuatan *biodegradable foam*. Namun demikian diperlukan berbagai upaya untuk mengatasi kelemahan *biodegradable foam* berbahan dasar pati. Mengingat kebutuhan pati di Indonesia sebagian besar masih diperuntukkan untuk pangan maka perlu dipikirkan untuk mencari bahan-bahan lain yang mengandung pati namun tidak bisa dimakan seperti limbah pertanian berupa dedak, ampok, onggok, dll. Untuk saat ini teknologi yang paling *feasible* adalah teknik ekstrusi dan *thermopressing*.

Pengembangan *biodegradable foam* ini tentunya harus mendapat dukungan kebijakan pemerintah maupun industri serta peran serta masyarakat agar mau mengurangi pemakaian plastik dan *styrofoam*. Karena tanpa ada kemauan yang kuat sangat sulit melepaskan ketergantungan pada plastik yang begitu murah dan mudah didapat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bioplastic at a glance [Internet]. 2010 [Diunduh 18 Februari 2010]. Tersedia di: www.european-bioplastics.org
2. Sulchan M, Endang NW. Keamanan pangan kemasan plastik dan *styrofoam*. *Majalah Kedokteran Indonesia* 2007; 57(2):54-59.
3. Informasi sehat [Internet]. 2009 [Diunduh 19 Mei 2009]. Tersedia di: <http://informasi-sehat.wordpress.com>
4. Davis G, Song JH. Biodegradable packaging based on raw material from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Product* 2006; 23:147-161.
5. Robertson GL. *Food packaging: Principles and practice*. New York : Marcel Dekker Inc.; 1993.
6. Manurung B. Penggunaan *styrofoam* sebagai kemasan pangan [Internet]. 2008 [Diunduh 18 Februari 2010]. Tersedia di: <http://www.harian-analisa.com>
7. Lickly TD, Lehr KM, Welsh gC. Migration of *styrene* from *polystyrene foam* food-contact articles. *Food Chem Toxic* 1995; 33(6):475-481.

8. Dowly BJ, Laseter JL, Storet J. Transplacental migration and accumulation in blood of volatile organic constituents. *Journal of Pediatric Research* 1976; 10: 696–701.
9. Brown NA. Reproductive and developmental toxicity of *styrene*. *Reprod. Toxicol* 1991; 5:3-29.
10. Koswara S. Bahaya di balik kemasan plastik [Internet]. 2010 [Diunduh 18 September 2010]. Tersedia di: <http://ebookpangan.com>
11. Withey JR. Quantitative analysis of *styrene* monomers in PS and foods. *Journal of Environmental Health Perspective* 1976; 17:125–153.
12. Miller RR, Newhook R, Poole A. *Styrene* production use and human exposure. *Journal of Critical Reviews In Toxicology* 1994; 24 : S1–S10.
13. Ahmad M, Bajahlan AS. D Leaching of *styrene* and other aromatic compounds in drinking water from PS bottles. *Journal of Enviromental Sciences* 2007; 9:421-426.
14. Singh B, Sekhon KS, Singh N. Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry* 2007; 100:198-202.
15. Faubion JM, Hoseney RC. High temperature short time extrusion cooking of wheat starch and flour II: Effect of protein and lipid on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 1982; 59(6):533-537.
16. Chinnaswamy R, Hanna MA. Optimum extrusion-cooking condition for maximum expansion of corn starch. *J. Food Sci.* 1988a; 53:834-840.
17. Alvarez-Martinez L, Kondury KP, Harper JM. A general model for expansion of extruded products. *J. Food Sci.* 1988; 53(2):609-615.
18. Lin Y, Hsieh F, Heymann H, Huff HE. Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science* 2000; 65:1253–1259.
19. Owusu-Ansah J, Van De Voort FR, Stanley DW. Textural and microstructural changes in corn starch as a function of extrusion variables. *Journal of Canadian Institute of Food Science and Technology* 1984; 17 : 65–70.
20. Hutchinson RJ, Siodlak GDE, Smith AC. Influence of processing variables on the mechanical properties of extruded maize. *J. Mater. Sci* 1987; 22(11):3956-3962.
21. Derby RI, Miller BS, Miller BF, Trimbo HB. Visual observation of wheat starch gelatinization in limited water systems. *Cereal Chemistry* 1975; 76(5):638-645.
22. Wu M, Li D, Wang LJ, Ozkan N, Mao ZH. Rheological properties of extruded dispersion of flaxseed-maize blend. *J. Food Eng.* 2010; 98:480-491.
23. Fritz HG, Seidenstucker T, Bolz U, Juza M. Study on production of thermoplastics and fibres based mainly on biological materials. German: Universitas Stuttgrat; 1984. Hal 350.
24. Ryu GH, Lee CH. Effects of moisture content and particle size of rice flour on the physical properties of the extrudate. *Korean Journal of Food Science and Technology* 1988; 20(4):463-469.
25. Zhang W, Hoseney RC. Factors affecting expansion of corn meals with poor and good expansion properties. *Cereal Chemistry* 1998; 75(5):639-643.
26. Carvalho CWP, Takeiti CY, Onwulata CI, Pordesimo LO. Relative effects of particle size on the physical properties of corn meal extrudates : Effects of particle size on the extrusion of corn meal. *J. Food Eng.* 2010; 98:103-109.
27. Bhatnagar S, Hanna MA. Starch based plastic foam from various starch sources. *Cereal Chem.* 1996; 73(5):601-604.
28. Miladinov VD, Hanna MA. Temperature and ethanol effects on the properties of extruded modified starch. *Industrial Crops and Products* 2001; 13: 21-28.
29. Guan J, Fang Q, Hanna MA. Functional properties of extruded starch acetate blends. *J. Polym. Environ.* 2004; 12(2): 57-63.
30. Cinelli P, Chiellini E, Lawton JW, Imam SH. Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinylalcohol). *Polymer Degradation and Stability* 2005; 91:1147-1155.
31. Glenn GM, Orts WJ, Nobes GAR. Starch, fiber and CaCO₃ effects on the physical properties of foam made by baking process. *Industrial Crops and Product* 2001; 14:201-212.
32. Glenn GM, Orts WJ. Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing. *Industrial Crops and Product* 2001; 13:135-1143.
33. Shey J, Imam SH, Glenn GM, Orts WJ. Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops and Product* 2006; 24:34-40.
34. Shogren RL, Lawton JW, Tiefenbacher KF. Baked starch foam: Starch modification and additives improve process parameters, structure and properties. *Industrial Crops and Product* 2002; 16: 69-79.
35. Soykeabkaew N, Supaphol P, Rujiravanit R. Preparation and characterization of jute and flax reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate Polymers* 2004; 58:53-63.
36. Zhou J, Song J, Parker R. Microwave-assisted moulding using expandable extruded pellets from wheat flours and starch. *Carbohydrate Polymers* 2007; 69 :445–454.

37. Whistler RL, Be Miller JN, Paschall EF. Starch: chemistry and technology. Academic Press Inc.; 1984.
38. Singh J, Kaur L, Singh N. Effect of acetylation on some properties of corn and potato starches. *Starch-Starke* 2004; 56(12) : 586-601.
39. Plackett D, Vaquez A. Natural polymer sources. Di dalam: Caroline Bailie, editor. Green composites: Polymer composites and the environment. Boca Raton: CRC Press; 2004.
40. Ma XF, Yu JG, Wan JJ. Urea and ethanolamine as a mixed *plastisizer* for thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers* 2006; 64 : 267–273.
41. Da Roz AL, Carvalho AJF, Gandini A, Curvelo AAS. The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing. *Carbohydrate Polymers* 2006; 63: 417-424.
42. Ma XF, Yu JG, Feng J. A mixed plasticizer for the preparation of thermoplastic starch. *Chinese Chemical Letters* 2004; 15(6):741–744.
43. Park H-R, Chough S-H, Yun Y-H, Yoon S-D. Properties of starch/PVA blends films containing citric acid as additive. *Journal of Polymers and the Environment* 2005; 13(4): 375–382.
44. Krogars K, Heinämäki J, Karjalainen M, Niskanen A, Leskelä M, Yliruusi J. Enhanced stability of rubbery amylose-rich maize starch films plasticized with a combination of sorbitol and glycerol. *Int.J. Pharm.* 2003; 251:205–20.
45. Myllarinen P, Partanen R, Seppala J, Forssell P. Effect of glycerol on behaviour of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymer* 2002; 50(4): 355–361.
46. Lourdin D, Del Valle G, Colonna P. Influence of amylose content on starch-films and foams. *Carbohydrate Polymers* 1995; 27(4):261-270.
47. Zullo R, Iannace S. The effects of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch: Correlation among process, elongational properties and macromolecular structure. *Carbohydrate Polymers* 2009; 77: 376–383.
48. Janssen L. Influence of process conditions on the physical properties of TPS. Di dalam: Leon J, Leszeck M, editor. Thermoplastic starch: a green material for various industries. Weinheim : Wiley-Vch; 2009.
49. Lee TS, Rahmat AR, Rahman WA, Zhao YS, Samad AA. Rheology and thermal transition state of polyvinyl alcohol–cassava starch blends. *Carbohydrate Polymers* 2010; 81: 737-739.
50. Iriani ES, Sunarti TC, Hadiyoso A, Mangunwidjaja D. Utilization of corn hominy as a new sources material for thermoplastic production. Bali : IPST Conference; 2011.
51. Carvalho AJF, Curvelo AAS, Agnelli JAM. A first insight on composites of thermo-plastic starch and kaolin. *Carbohydrate Poymers* 2001; 45:189-195.
52. Carmen MO, Muller JBL, Fabio Y. Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values. *Carbohydrate Polym* 2009; 77:293–299.
53. Canigueral N, Vilaseca F, Mendez JA, Lopez JP, Barbera L, Puig J. Behavior of biocomposite materials from flax strands and starch-based biopolymer. *Chem Eng Sci* 2009; 64:2651-2658.
54. Avérous L, Fringant C, Moro L. Plasticized starch-cellulose inter-actions in polysaccharide composites. *Polymer* 2001; 42(15): 6571-6578.
55. Sreekumar PA, Gopalakrishnan P, Leblanc N, Saiter JM. Effect of glycerol and short sisal fibers on the viscoelastic behavior of wheat flour based thermoplastic. *Composites: Part A* 2010; 41: 991–996.
56. Shi YC, Seib PA. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. *Carbohydrate Research* 1992; 227:131–145.
57. Kang KJ, Kim S, Lee SK, Kim SK. Relationship between molecular structure of acid-hydrolyzed rice starch and retrogradation. *Korean Journal of Food Science and Technology* 1997; 29: 876–881.
58. Kim RE, Ahn SY. Gelling properties of acid-modified red bean starch gels. *Agricultural Chemistry and Biotechnology* 1996; 39 : 49–53.
59. Virtanen T, Autio K, Suortti T, Poutanen K. Heat-induced changes in native and acid-modified oat starch pastes. *Journal of Cereal Science* 1993; 17: 137–145.
60. López OV, Zaritzky NE, García MA. Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of Food Engineering* 2010; 100(1):160-168.
61. Junistia L, Sugih AK, Manurung R, Picchioni F, Janssen L, Heeres HJ. Synthesis of higher fatty acid starch esters using vinyl laurate and stearate as reactants. *Starch-Starke* 2008; 60:667-675.
62. Aburto J, Alric I, Thiebaud S, Borredon E, Bikiaris D, Prinós J, Panayiotou C. Synthesis, characterization, and biodegradability of fatty-acid esters of amylose and starch. *J. Appl. Polym. Sci.* 1999; 74:1440–1451.
63. Mehlretter CL, Mark AM. Process for making starch triacetates. 1974. US Patent, 3,795.670.

64. Rivard C, Moens L, Roberts K, Brigham J, S. Kelley. Starch esters as biodegradable plastics: Effects of ester group chain length and degree of substitution on anaerobic biodegradation. *Enzyme and Microbial Technology* 1995; 17(9):848-852.
65. Cha JY, Chung DS, Seib PA, Flores RA, Hanna MA. Physical properties of starch-based *foams* as affected by extrusion temperature and moisture content. *Industrial Crops and Products* 2001; 14:23-30.
66. Fang Q, Hanna MA. Functional properties of polylactic acid starch based loose fill packaging *foams*. *Cereal Chem.* 2000; 77(6):779-783.
67. Bhatnagar S, Hanna MA. Physical, mechanical and thermal properties of starch-based plastic *foams*. *Transaction of the ASAE* 1995; 38(2):567-571.
68. Moore G. Snack food extrusion. Di dalam: Frame ND, editor. *The technology of extrusion cooking*. Minnesota: American Association of Cereal Chemist, St. Paul; 1994.
69. Frame ND. *The technology of extrusion cooking*. Minnesota: American Association of Cereal Chemist, St. Paul; 1994.
70. Kaletunc G, Breslauer KJ. *Characterization of cereals and flours : Food science and technology*. New York : Marcell Dekker, Inc.; 2003.
71. Wolf B. Polysaccharide functionality through extrusion processing. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 2010; 15:50-54.
72. Bhattacharyya M, Hanna MA. Textural properties of extrusion cooked corn starch. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 1987; 20:195-201.
73. Barres C, Vergnes B, Tayeb J, Della Valle G. Transformation of wheat flour by extrusion cooking: Influence of screw configuration and operating conditions. *Cereal Chemistry* 1990; 67:427-433.
74. Chinnaswamy R, Hanna MA. Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of corn starches. *Cereal Chemistry* 1988b; 65:138-143.
75. Thymi S, Krokida MK, Pappa A, Maroulis ZB. Structural properties of extruded corn starch. *J. Food Eng.* 2005; 68:519-526.
76. Lai CS, Guetzlaff J, Hosney RC. Role of sodium bicarbonate and trapped air in extrusion. *Cereal Chemistry* 1989; 66:69-73.
77. Nabar Y, Narayan R. Biodegradable starch *foam* packaging for automotive applications. Di dalam: *Plastics: helping grow a greener environment*. Global Plastics Environmental Conference (GPEC) Society of Plastics Engineers; Brookfield. 2004. Hal 157-69.
78. Chinnaswamy R, Hanna MA. Macromolecular and functional properties of native and extrusion cooked corn starch. *Cereal Chemistry* 1990; 67:490-499.
79. Hayter AC, Smith AC, Richmond P. The Physical properties of extruded food *foams*. *J. Mater. Sci* 1986; 21(10):3729-3736.
80. Warburton SC, Donald AM, Smith AC. Structure and mechanical properties of brittle starch *foam*. *J. Mater. Sci* 1992; 27:1469-1474.
81. Tsa K. Evaluation of extruded corn as packing material [MS thesis]. Di dalam: Lui WB, Peng J. Physical, mechanical, biodegradable properties and energy asorption behaviour of corn grit-polyvinyl alcohol cushioning extrudates. *J. Food Eng.* 2005; 71:73-84.
82. Pimpa B, Muhammad K, Ghazali ZX, Hashim K, Hassan MA, Hashim DM. Optimization of condition for production of sago starch based *foam*. *Carbohydrate Polymers* 2007; 68: 751-760.
83. Tiefenbacher KF. Starch-based *foamed* material –use and degradation properties. *Journal of Macromolecular Sciences-Pure and Applied Chemistry* 1993; A30:727-731.
84. Salgado PR, Schmidt VC, Ortiz SEM, Mauri AN, Laurindo JB. Biodegradable *foams* based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by baking process. *J. Food Eng.* 2008; 85: 435-443.
85. Hosney RC. *Principles of cereal science and technology*. Minnesota: American Association of Cereal Chemist, Inc.; 1998.
86. Sullivan JF, Craig Jr JC. The development of explosion puffing, *Food Technol.* 1984; 38(2): 52-55.
87. Zhou J. Microwave assisted moulding of starch-based *foams* [PhD thesis]. UK: Brunell University; 2004.