

UJI UNJUK KERJA EVAPORATOR TIPE *FALLING FILM* EFEK TUNGGAL UNTUK PEMEKATAN GELATIN IKAN

Hariato¹⁾, M. Sujai²⁾, Tazwir³⁾, dan Rosmawaty Peranginangin³⁾

ABSTRAK

Pengujian unjuk kerja telah dilakukan pada prototipe evaporator tipe lapisan tipis jatuh (*falling film*) efek tunggal untuk memekatkan larutan gelatin yang dibuat dari kulit ikan tuna. Bahan pengujian adalah larutan gelatin sebanyak 180 liter dengan padatan total awal 3,5% kemudian dipekatkan dalam evaporator dengan laju alir masuk 84 liter/jam. Evaporator ini dioperasikan pada tekanan vakum sekitar 2,5 cmHg pada suhu penguapan bahan 55°C dari sumber panas uap (*steam boiler*) dengan tekanan 2,5–4,0 kg/cm². Rata-rata suhu bahan yang masuk ke evaporator adalah 32°C. Larutan yang telah melalui permukaan evaporasi dikembalikan lagi ke tangki umpan dan dievaporasikan lagi secara berulang-ulang (sirkulasi) sampai larutan menjadi kental yang tampak seperti madu. Akhir evaporasi menghasilkan volume produk sebanyak 30 liter dengan padatan total 9,1% yang diselesaikan dalam waktu 5 jam. Dengan demikian kapasitas evaporator ini adalah 30 liter air teruapkan per jam dan tingkat ekonomi uap adalah 0,78 liter air teruapkan dari bahan per kg uap pemanas yang digunakan. Luas permukaan evaporasi dari evaporator ini adalah 1,67 m², dengan menggunakan persamaan pindah panas dan neraca entalpi didapatkan koefisien pindah panas keseluruhan sebesar 668 W/m² °C. Konsumsi bahan bakar dari evaporator ini adalah 3,58 liter/jam atau 0,12 liter minyak tanah per liter air teruapkan sehingga efisiensi energi bahan bakar evaporator ini sebesar 60%. Konsumsi energi listrik pada pengujian ini 34,7 kWh, dengan demikian efisiensi energi keseluruhan dari evaporator ini adalah 50%.

ABSTRACT: *Performance test of single effect falling film evaporator in concentrating fish gelatin solution. By: Harianto, M. Sujai, Tazwir and Rosmawaty Peranginangin*

Performance tests have been conducted on the prototype of single effect falling film evaporator in concentrating tuna skin gelatine solution. One hundred eighty liters of gelatine solution with 3.5% total solid was concentrated in the evaporator with a flow rate of 84l/h. This evaporator was operated at about 2.5 cmHg to allow the product moisture to evaporate at 55°C. The evaporator was supported by steam pressure of 2.5–4.0 kg/cm². The feed temperature was 32°C on average. The solution which has passed evaporation surface area was recirculated until a highly viscous liquor with honey like appearance was produced. The volume of final product was 30 liters with 9.1% total solid which was accomplished for 5 hours. The capacity of this evaporator was 30 liters water evaporated per hour, and the steam economy was 0.78 liters water evaporated from the product per kg steam utilized. Evaporation surface area of this evaporator was 1.67 m², the overall heat-transfer coefficient was 668 W/m² °C. Fuel consumption of this evaporator was 3.58 liters/hour or 0.12 liters per liter water evaporated and the efficiency of fuel energy for evaporation was 60%. Electrical energy consumption was 34.7 kWh and the efficiency of overall energy was 50%.

KEYWORDS: *falling film evaporator, fish gelatin*

PENDAHULUAN

Gelatin merupakan suatu hidrokoloid, yaitu suatu polimer larut air yang mampu membentuk koloid, mengentalkan larutan atau membentuk gel dari larutan tersebut (Fardiaz, 1989). Berdasarkan sifat tersebut gelatin dimanfaatkan sebagai bahan pembantu pada industri pangan, farmasi, kosmetika, fotografi, dan lain-

lain. Dalam industri pangan, gelatin digunakan sebagai pembentuk gel (*gelling agent*), penstabil (*stabilizer*), pengemulsi (*emulsifier*), pelembut tekstur, pengikat kohesi air dan masih banyak lagi (Rubin, 2002). Saat ini untuk memenuhi kebutuhan gelatin, Indonesia masih mengimpor dari negara-negara Eropa, Amerika, dan Australia. Jumlah impor mencapai 2.715.782 kg (2006) dengan nilai US\$ 9,535,128 (BPS, 2007).

¹⁾ Peneliti pada Pusat Teknologi Agroindustri, Kedepuitan Bidang TAB, BPPT

²⁾ Alumni Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor

³⁾ Peneliti pada Balai Besar Riset Pengolahan Produk dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan, DKP

Sumber bahan baku gelatin selain dari kulit dan tulang sapi yang cukup potensial di Indonesia adalah yang berasal dari kulit dan tulang ikan. Menurut Surono *et al.* (1994) tulang dan kulit ikan sangat potensial sebagai sumber gelatin karena mencakup 10–20% dari total bobot tubuh ikan.

Proses pembuatan gelatin meliputi pembersihan sisa daging dan lemak, perendaman dalam larutan asam, penetralan pH, ekstraksi, filtrasi, pemekatan dengan evaporasi, pemadatan dengan pendinginan, ekstrusi, pengeringan, penggilingan, dan pengemasan (Grosman & Bergman, 1992; Gomez & Montero, 2001).

Proses yang umum dilakukan dalam pemekatan gelatin adalah dengan metode evaporasi. Metode tersebut memiliki resiko kerusakan produk akibat pemanasan yang cukup lama karena gelatin merupakan produk yang sensitif terhadap suhu tinggi. Gelatin dapat mengalami kerusakan pada suhu di atas 80°C (Simon *et al.*, 2002). Ward & Courts (1977) menyatakan bahwa evaporasi gelatin harus memenuhi ketentuan seperti suhu evaporasi rendah, waktu kontak antara larutan gelatin dengan panas singkat dan mencegah pembentukan buih. Proses evaporasi dilakukan pada suhu 40–80°C, dalam kondisi vakum. Menurut *Gelatin Manufacturers Institute of America* (Anon., 2003) hampir semua pengurangan air dari larutan gelatin (pemekatan) dilakukan dengan evaporator vakum *multi-stage*.

Salah satu jenis evaporator yang paling dikenal untuk menguapkan bahan pangan yang sensitif terhadap panas adalah *falling film evaporator* (Shilling *et al.*, 1999). Pada evaporator ini cairan dipompakan dari atas pada bagian penukar panas hingga menyebar di antara pipa-pipa pemanas yang berupa aliran lapisan tipis yang seragam dan turun melalui pipa-pipa pemanas. Uap air dipisahkan pada bagian pemisah (separator) di bagian bawah. Keuntungan evaporator tipe ini adalah waktu kontak antara bahan dengan pipa-pipa pemanas relatif singkat, dengan laju pindah panas yang tinggi dan ekonomis. Evaporator ini sangat baik dioperasikan pada tekanan vakum sehingga dapat digunakan untuk bahan yang sensitif terhadap panas seperti gelatin dan sari buah (Heldman & Lund, 1992).

Menurut McCabe *et al.* (1985) ukuran pokok untuk menilai unjuk kerja (performansi) evaporator jenis tabung dengan pemanasan uap (*steam*) adalah kapasitas dan tingkat ekonominya. Kapasitas didefinisikan sebagai banyaknya kg air yang diuapkan per jam. Tingkat ekonomi dilihat dari banyaknya kg air yang diuapkan per kg uap (*steam*) yang diuapkan ke dalam unit itu.

Dalam rangka penyediaan teknologi produksi gelatin telah dilakukan perekayasaan prototipe

evaporator vakum tipe *falling film* efek tunggal. Kegiatan penelitian ini bertujuan melakukan uji unjuk kerja prototipe evaporator tersebut untuk pemekatan larutan ekstrak gelatin ikan.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan untuk uji evaporasi berupa larutan ekstrak gelatin ikan. Larutan gelatin dibuat dari bahan baku kulit ikan tuna yang berasal dari pabrik filet ikan di Muara Baru. Bahan lain digunakan untuk membantu pembuatan larutan gelatin yaitu air, kapur, Na₂S, amonium sulfat, enzim oropon, dan asam sitrat.

Penyiapan larutan ekstrak gelatin adalah sebagai berikut: kulit ikan tuna 100 kg direndam dalam larutan yang dibuat dari 600 liter air dengan ditambahkan kapur 3 kg dan Na₂S 3 kg selama 48 jam lalu kulit dibersihkan dari sisa daging dan lemaknya. Kemudian bahan direndam dalam 400 liter air yang ditambah dengan amonium sulfat 1 kg dan diaduk selama 30 menit, ditambahkan enzim oropon 1 kg dan diaduk selama 2 jam, kemudian dicuci sampai bersih. Bahan direndam dalam larutan asam sitrat sampai pH 3 selama 24 jam kemudian dicuci hingga pH mendekati netral (6 – 7). Selanjutnya bahan diekstrak dalam air panas sebanyak 300% dari bobot bahan dengan suhu 60°C selama 2 jam dan ekstraknya disaring, ampasnya diekstrak dengan cara yang sama pada suhu 70°C selama 2 jam. Filtrat hasil ekstraksi berupa larutan yang siap digunakan sebagai bahan untuk uji evaporasi.

Alat utama penelitian ini adalah prototipe evaporator efek tunggal (*single effect*) tipe *falling film* seperti tampak pada Gambar 1. Bagian-bagian utama alat ini adalah tabung pemanas tipe *shell and tubes*, tabung pemisah produk dan uap (*vapor separator*), tabung kondensor, dan pompa vakum yang semuanya ditempatkan di atas rangka menara setinggi 10 meter dan bagian lain di permukaan tanah yaitu tabung penampung sementara produk tipe *seal pot* dan tangki pengumpan. Unit pendukung alat ini terdiri atas penghasil uap (*boiler*) dan pendingin air (*water cooler*). Mekanisme kerja dari evaporator ini adalah bahan di tangki penampung umpan dialirkan ke corong pengumpan (*hoper*), sebagian bahan terhisap masuk ke tabung pemanas (penguap) dan sebagian lain melimpah (*overflow*) mengalir kembali ke tangki penampung bahan (umpan). Tabung (*shell*) pemanas mendapat panas yang berupa *steam* dari *boiler* dan di dalam pipa penguap bertekanan vakum karena dihisap dari pompa vakum. Bahan dari umpan mengalir ke bawah (*falling*) berupa lapisan tipis (*film*) lalu memasuki tabung separator atau tabung pemisah antara larutan yang sudah terevaporasi dan uap.

Larutan yang sudah terevaporasi turun ke tabung penampung sementara produk. Uap di tabung separator terhisap ke tabung kondensor dan dikondensasikan dengan cara disemprot langsung (*direct contact*) dengan air dingin yang kemudian bersama-sama dialirkan kembali ke pendingin air. Larutan hasil evaporasi yang ditampung sementara di tabung penampung produk bila sudah penuh dikembalikan lagi ke tangki umpan secara berulang-ulang hingga produknya terlihat cukup kental sehingga operasi evaporasi dapat dihentikan.

Peralatan yang digunakan selama pengujian adalah termometer, pengukur tekanan, timbangan digital, oven, dan *desiccator*. Peralatan untuk pembuatan larutan ekstrak gelatin yaitu ember plastik, mesin cuci, pisau, ekstraktor, dan saringan (*filter*). Di samping itu juga digunakan peralatan untuk melanjutkan hasil evaporasi menjadi butiran gelatin kering yaitu *chillroom*, alat ekstrusi, pengering, dan penggiling (*grinder*).

Metode

Proses evaporasi dilakukan dengan memasukkan bahan pada tangki umpan lalu pompa pengumpanan

dijalankan hingga melimpah (*overflow*) dari corong (*hoper*) pengumpan. Pompa input kondensor dijalankan berikut pompa vakum. Keran pengatur umpan (*input*) bahan dibuka hingga laju masuk bahan 1,4 liter per menit. Lalu keran input kondensor dibuka dan segera pompa output kondensor dijalankan dan keran output kondensor dibuka. Kipas dan pompa pendingin air (*water cooler*) dijalankan. Keran uap pemanas (*steam*) dibuka sambil diatur agar suhu bahan di tabung pemanas 55°C. Hal ini dilakukan secara rutin setiap kali bahan penuh di tabung penampung, produk dikeluarkan dengan pompa *output* produk untuk dialirkan kembali ke tangki umpan. Proses ini terus berulang sampai terlihat secara visual bahan sudah cukup kental.

Parameter yang diukur pada pelaksanaan evaporasi adalah volume awal dan akhir, kadar air awal dan akhir, suhu awal bahan, konsumsi bahan bakar minyak tanah untuk *boiler*, konsumsi air *boiler*, waktu (*lama*) kerja dari tiap komponen alat yang menggunakan listrik. Uji unjuk kerja prototipe evaporator dilakukan dengan mengukur dan menganalisis kapasitas evaporator, tingkat ekonomi evaporator, dan penggunaan energi.

Penilaian kapasitas alat dilakukan dengan mengukur banyaknya bahan yang dievaporasi, laju evaporasi, hasil pemekatan, dan menganalisis aspek pindah panas. Laju evaporasi adalah banyaknya air yang diuapkan selama evaporasi yang dihitung dengan rumus :

$$V = \frac{V_o - V_t}{\Delta t} \dots\dots\dots(1)$$

- V = Laju evaporasi (liter/jam)
- V_o = Volume awal bahan (liter)
- V_t = Volume akhir bahan (liter)
- Δt = Lama evaporasi (jam)



Keterangan/Note:

1. Pompa pengumpanan/*Feeding pump*,
2. Saluran pelimpahan bahan/*Material overflow discharge*,
3. Tabung pemanas/*Heater*,
4. Separator/*Separator*,
5. Kondensor/*Condensor*,
6. Pompa vakum/*Vacuum pump*,
7. Tabung penampung produk/*Product collecting tube*

Gambar 1. Gambar skema prototipe evaporator tipe *falling film* efek tunggal (tanpa tangki umpan).
 Figure 1. Technical draw of *falling film* evaporator (without feeding tank).

Hasil pemekatan diukur dari padatan total hasil evaporasi yang dihitung dengan rumus:

$$X = \frac{m_{padat}}{m_{air} + m_{padat}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

- X = padatan total (%)
- m_{air} = bobot air yang terkandung dalam bahan (g)
- m_{padat} = bobot padatan bahan kering (g)

Penilaian tingkat ekonomi evaporator dilakukan dengan mengukur tingkat ekonomi uap dan menganalisis aspek neraca entalpi. Tingkat ekonomi uap menggambarkan efisiensi dari proses evaporasi dan merupakan perbandingan antara banyaknya air yang diuapkan per kg uap yang digunakan sebagai media pemanas yang dihitung dengan rumus (Heldman & Singh, 1981) sebagai berikut:

$$E_s = \frac{V_e}{m_s} \dots\dots\dots(3)$$

- E_s = Tingkat ekonomi uap (liter/kg)
- V_e = Volume air yang diuapkan (liter)
- m_s = Volume uap yang digunakan (kg)

Pengukuran volume uap dilakukan dengan mengkonversi jumlah air yang digunakan boiler untuk memproduksi uap dengan asumsi bahwa setiap 1 liter air yang masuk boiler dikonversi oleh boiler menjadi 1 kg uap.

Untuk menghitung penggunaan energi dilakukan pengukuran penggunaan bahan bakar (Q_{bb}), penggunaan energi listrik (Q_l), dan analisis efisiensi energi. Perhitungan energi bahan bakar dan energi listrik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_{bb} = V_{bb} \times N_{kb} \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_l = N_{kl} \times P_k \times t \dots\dots\dots(5)$$

- V_{bb} = Volume bahan bakar (liter)
- N_{kb} = Nilai kalor bahan bakar (kJ/liter)
- N_{kl} = Nilai kalor listrik (kJ/kWh)
- P_k = Daya listrik (kW)
- t = Lama operasional alat (jam)

Efisiensi energi dapat dilihat dari efisiensi penggunaan energi bahan bakar (ζ_{bb}) yakni perbandingan antara energi evaporasi dengan energi bahan bakar. Efisiensi penggunaan seluruh energi

(ζ_{total}) dihitung dari perbandingan energi evaporasi dengan gabungan energi bahan bakar dan energi listrik. Energi evaporasi (Q_e) dihitung dari perkalian laju perpindahan panas (q) dengan lama evaporasi. Laju perpindahan panas (q) dihitung secara khusus melalui pendekatan analisa aspek neraca entalpi yang akan diuraikan lebih mendalam pada bab hasil dan pembahasan, secara matematis ditunjukkan sebagai berikut :

$$Q_e = q \times t \dots\dots\dots(6)$$

- q = laju perpindahan panas (kJ/jam)
- t = lama evaporasi (jam)

$$\eta_{bb} = \frac{Q_e}{Q_{bb}} \times 100\% \dots\dots\dots(7)$$

$$\eta_{total} = \frac{Q_e}{(Q_{bb} + Q_l)} \times 100\% \dots\dots\dots(8)$$

HASIL DAN BAHASAN

Seperti dinyatakan oleh McCabe *et al.* (1985), kriteria utama untuk menilai kinerja atau unjuk kerja (performansi) evaporator jenis tabung dengan pemanasan uap (*steam*) adalah kapasitas dan ekonominya.

Kapasitas

Besaran bahan yang dievaporasi

Kapasitas mencerminkan kemampuan suatu alat dalam melaksanakan fungsinya. Kapasitas dapat dilihat dari besaran bahan yang dikerjakan atau besaran dari hasil kerja atau produk yang dihasilkan. Dilihat dari bahan yang dikerjakan, evaporator ini mampu menguapkan 180 liter bahan (larutan hasil ekstraksi) selama 5 jam. Akan tetapi menggunakan ukuran ini untuk menilai kapasitas evaporator belum lengkap karena belum terlihat hasil kerja evaporator.

Laju evaporasi

Dilihat dari hasil kerjanya, evaporator ini mampu membuang (menguapkan) 150 liter air selama 5 jam. Bila dinyatakan dalam banyaknya air teruapkan per jam seperti disebutkan oleh McCabe *et al.* (1985) maka besarnya laju evaporasi adalah rata-rata 30 liter air teruapkan per jam atau 0,5 liter per menit. Akan tetapi menggunakan ukuran laju evaporasi untuk evaporator ini kurang tepat karena evaporator ini dioperasikan dengan cara *batch* bukan kontinyu. Banyaknya sirkulasi atau pengembalian hasil evaporasi dari tabung penampung produk (*seal pot*) ke tangki umpan adalah 24 kali.

Hasil pemekatan

Menilai kapasitas evaporasi dilihat dari produk yang dihasilkan dan dapat dikaitkan dengan tujuan evaporasi dalam tahap-tahap proses pembuatan gelatin yaitu kemampuan pemekatan. Kepekatan suatu bahan dapat diukur dari persentase padatan total (*total solid*) dalam suatu larutan yang perhitungannya sesuai dengan rumus nomor (2).

Hasil pemekatan dari 180 liter larutan ekstrak gelatin kulit ikan dengan padatan total awal 3,5% ini adalah 30 liter larutan pekat dengan padatan total akhir 9,1%. Padatan total hasil pemekatan ini dinilai masih kurang pekat ditinjau dari padatan total ideal untuk tahap proses selanjutnya yakni ekstrusi dan pengeringan. Menurut hasil penelitian Winata (2006), padatan total terbaik untuk proses pengeringan yang paling aman dari resiko meleleh (*melting*) adalah 25% dibandingkan dengan padatan total 20% dan 15%. Untuk mencapai padatan total 25% tentunya evaporasi harus dilanjutkan lagi. Namun untuk melanjutkan evaporasi sampai volume akhir di bawah 30 liter pada evaporator ini sulit, karena jumlah sebanyak itu tidak tersisa di tabung penampung produk melainkan tertinggal di sepanjang pipa-pipa penghubung dari tangki umpan dan pipa ke tabung penampung produk. Untuk kasus ini tentunya volume awal harus diperbesar lebih dari 180 liter.

Analisis aspek pindah panas

Evaporator adalah alat yang merupakan bentuk aplikasi dari teori pindah panas (*heat transfer*). Laju pindah panas (q) merupakan hasil kali tiga faktor, yaitu luas permukaan pindah panas (A), koefisien pindah panas keseluruhan (U) dan selisih suhu keseluruhan atau *temperature drop* (ΔT), secara matematis dituliskan dalam rumus :

$$q = U A \Delta T \dots\dots\dots(9)$$

Selisih suhu keseluruhan (ΔT)

Selisih suhu keseluruhan adalah perbedaan suhu antara posisi awal panas berpindah (dari *steam*) ke akhir dari proses pindah panas (lapisan tipis larutan gelatin di permukaan pindah panas). Jika suhu umpan atau bahan (larutan gelatin) yang masuk evaporator sama dengan titik didihnya (*boiling point*) maka semua panas yang berpindah digunakan untuk evaporasi. Jadi kapasitasnya sama dengan q . Jika suhu umpan lebih kecil dari titik didih maka kapasitasnya kurang dari q karena sebagian panas dipakai untuk menaikkan suhu hingga suhu pendidihan. Sebaliknya, jika suhu umpan lebih besar dari titik didih maka sebagian dari umpan akan menguap secara spontan melalui penyeimbangan

adiabatik dengan tekanan ruang uap. Proses ini disebut evaporasi kilatan (*flash evaporation*) dan kapasitas evaporator akan lebih besar dari yang ditunjukkan oleh q .

Pada pengujian ini suhu umpan awalnya sesuai dengan suhu bahan setelah ekstraksi dan filtrasi, akan tetapi karena selama proses evaporasi bahan disirkulasikan berulang-ulang ke tangki umpan yang terbuka maka suhu umpan turun menyesuaikan suhu lingkungan hingga 32°C. Padahal suhu ekstraksi yang digunakan berkisar antara 55°C hingga 83°C.

Titik didih pada evaporator yang diuji ini adalah 55°C. Hal ini mengacu pada hasil percobaan pendahuluan bahwa suhu pendidihan larutan gelatin pada tabung dengan tekanan vakum adalah 55°C, meskipun larutan yang digunakan tidak disirkulasikan. Oleh karena itu uap yang masuk evaporator yang diuji ini diatur hingga suhu produk pada ujung tabung evaporator adalah 55°C.

Selisih suhu keseluruhan tergantung pada: (1) karakteristik larutan; (2) perbedaan tekanan antara rongga uap pemanas dengan ruang uap hasil evaporasi; (3) ketebalan cairan di atas permukaan pemanasan. Pada beberapa evaporator, kecepatan alir larutan juga mempengaruhi selisih suhu keseluruhan, karena adanya kehilangan akibat gesekan (*frictional loss*) yang meningkatkan tekanan efektif cairan. Bila cairan itu mempunyai karakteristik seperti air murni, maka titik didihnya dapat dibaca pada Tabel Uap (McCabe *et al.*, 1985), jika tekanannya diketahui, sebagaimana kita juga membaca suhu uap yang berkondensasi. Namun pada kenyataannya titik didih larutan dipengaruhi oleh dua faktor yaitu: (1) kenaikan titik didih dan (2) tinggi-tekan (*head*) zat cair. Dengan demikian titik didih 55°C yang dipakai sebagai acuan pada pengujian ini kemungkinan sedikit lebih tinggi dibanding titik didih riil di dalam evaporator yang diuji karena evaporator skala laboratorium yang digunakan sebagai acuan menggunakan larutan yang tidak disirkulasikan (menggenang) atau terdapat beban tinggi-tekan (*head*) dari kedalaman larutan.

Luas permukaan evaporasi (A)

Semakin luas permukaan evaporasi suatu evaporator maka akan semakin besar kapasitasnya. Permukaan evaporasi dari evaporator ini adalah permukaan bagian dalam pipa-pipa (*tubes*) di dalam tabung evaporator yang panjangnya 2 m, diameter 0,75 inci dengan jumlah 14 batang, jadi luasnya adalah 1,67 m².

Koefisien pindah panas keseluruhan (U)

Koefisien pindah panas keseluruhan (*overall heat-transfer coefficient*) adalah nilai besarnya panas

(Watt) yang dapat dipindahkan per luasan (m^2) pindah panas untuk setiap kenaikan atau penurunan suhu $1^\circ C$. Besarnya koefisien dipengaruhi oleh konstruksi dan material evaporator. Koefisien pindah panas keseluruhan adalah kebalikan dari tahanan (*resistance*) terhadap proses pindah panas keseluruhan yang merupakan gabungan dari tahanan-tahanan terhadap aliran panas, yaitu tahanan lapisan tipis (*film steam*), tahanan kerak di luar dan di dalam pipa-pipa (*tubes*), tahanan dinding pipa dan tahanan dari cairan (larutan gelatin) yang mendidih. Tahanan-tahanan tersebut sulit diukur sehingga koefisien pindah panas keseluruhan biasanya diperoleh dari percobaan.

Konstruksi evaporator yang diuji pada penelitian ini menggunakan acuan McCabe *et al.* (1985) dan jenis evaorator yang paling mirip adalah jenis evaporator vertikal tabung panjang sirkulasi paksa dengan nilai umum koefisien pindah panas keseluruhan antara $2000-5000 W/m^2^\circ C$. Dari ketiga faktor pindah panas di atas yakni besarnya fluks aliran pindah panas dari evaporator, sesuai dengan rumus (6) adalah berkisar antara $76,82 kW$ hingga $192,05 kW$ atau dalam satuan yang sama nilainya yaitu kJ/detik.

Ekonomi Evaporator

Ekonomi uap

Hasil pengukuran menunjukkan ekonomi uap (*steam*) adalah $0,78 kg$ air teruapkan per kg uap yang digunakan. Faktor utama yang mempengaruhi ekonomi uap sistem evaporator ialah banyaknya efek (McCabe *et al.*, 1985). Evaporator yang diuji ini adalah evaporator efek tunggal. Untuk efek tunggal, ekonomi uap berkisar $0,8$, sedangkan untuk evaporator dua efek adalah $1,6$; tiga efek $2,4$ dan seterusnya. Biaya minimum biasanya diperoleh pada efek delapan atau lebih.

Analisis aspek neraca entalpi

Menurut McCabe *et al.* (1985), secara kuantitatif, ekonomi evaporator adalah semata-mata masalah neraca entalpi. Panas dari pemanas uap berpindah melalui permukaan pemanasan kemudian memanaskan dan menguapkan air dari larutan gelatin. Oleh karena itu neraca entalpi dapat dilihat dari dua sisi yaitu satu sisi pada bagian uap pemanas dan satu sisi lagi pada bagian cairan atau larutan gelatin.

Neraca entalpi bagian uap pemanas

Panas yang dikandung uap pemanas (H_s) yang mengalir ke bagian dalam evaporator menyebabkan

turunnya suhu dan terjadi kondensasi (H_c) menjadi air. Analisis entalpi bagian ini berdasarkan asumsi tidak ada kebocoran atau cairan yang terbawa ikut bersama uap pemanas. Besarnya aliran gas yang tidak dapat dikondensasikan (*non condensable gas*) dapat diabaikan, dan bahwa kehilangan panas (*heat losses*) tidak perlu diperhitungkan. Dengan asumsi tersebut maka selisih antara entalpi uap pemanas (H_s) dan kondensatnya (H_c) hanyalah panas laten kondensasi uap pemanas (\ddot{e}_s). Neraca entalpi bagian uap pemanas ini dirumuskan sebagai berikut:

$$q_s = m_s (H_s - H_c) = m_s \lambda_s \dots\dots\dots(10)$$

m_s adalah laju aliran uap yang besarnya sama dengan laju keluarnya kondensat uap yang berdasarkan hasil pengukuran adalah $38,46 kg/jam$. H_s adalah entalpi uap pemanas pada tekanan kerja yang sesuai hasil pengukuran yang tertera pada boiler adalah antara 25 sampai $40 kPa$ dengan asumsi tidak ada kehilangan tekanan (*pressure drop*) sepanjang saluran antara boiler hingga evaporator. Sesuai tabel uap (McCabe *et al.*, 1985), H_s berkisar antara $2.618,3 - 2.642,35 kJ/kg$. H_c adalah entalpi kondensat uap pada suhu yang diasumsikan sama dengan suhu pendidihan produk $55^\circ C$ yaitu $230,23 kJ/kg$. Dari hasil perhitungan rumus (10), didapatkan panas yang dipindahkan ke dalam ruang evaporator adalah berkisar antara $25,51 - 25,77 kJ/detik$ atau rata-rata $25,64 kW$.

Bila dibandingkan dengan hasil perhitungan pindah panas sebelumnya yang besarnya antara $76,82 kW$ hingga $192,05 kW$ maka terlihat perbedaan yang besar dengan hasil perhitungan entalpi ruang pemanasan uap. Hal ini menunjukkan angka koefisien pindah panas keseluruhan yang digunakan sebagai acuan adalah terlalu besar.

Neraca entalpi bagian cairan yang dievaporasikan

Neraca entalpi untuk bagian ini adalah panas yang masuk ke ruang pemanasan/evaporasi yang menyebabkan bahan atau umpan ($m_f H_f$) naik suhunya sampai titik didih (mH) dan terjadi evaporasi ($m_f - m$) H_v . Neraca entalpi dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut :

$$q = (m_f - m)H_v - m_f H_f + mH \dots\dots\dots(11)$$

Sesuai dengan hasil pengukuran laju evaporasi ($m_f - m$) yaitu $30 liter$ air per jam yang setara dengan $30 kg$ air per jam, laju umpan m_f $1,4 liter$ per menit atau $84 kg/jam$ maka laju keluarnya produk adalah $54 kg/jam$. Dengan suhu umpan rata-rata $32^\circ C$ maka entalpi H_f sesuai tabel uap adalah $138,33 kJ/kg$, titik didih pada suhu $55^\circ C$ entalpinya adalah $230,23 kJ/kg$

dan entalpi uap pada 55°C adalah 2600,9 kJ/kg. Sesuai dengan rumus (11), panas yang diterima di ruang penguapan adalah 78.839,7 kJ/jam atau 21,9 kJ/detik atau 21,9 kW.

Jika tidak ada kehilangan panas (*heat losses*), panas yang berpindah dari uap pemanas (*steam*) ke pipa-pipa (*tubes*) harus sama dengan panas yang berpindah dari pipa ke cairan yang dievaporasikan, jadi $q_s = q$. Pada kenyataannya hasil perhitungan panas yang dihasilkan dari ruang pemanas steam adalah 25,64 kW sedangkan yang diterima di ruang pemanasan dan penguapan 21,9 kW. Dengan demikian terdapat selisih sebesar 3,74 kW yang mungkin terjadi dua hal. Pertama, angka panas dari ruang pemanasan *steam* terlalu besar disebabkan oleh diabaikannya *pressure drop* (asumsi), kedua karena kehilangan panas (*heat losses*) yang mengalir ke arah sebaliknya yakni ke arah dinding ruang pemanasan *steam*.

Menurut McCabe *et al.* (1985) bahan organik dengan konsentrasi sedang seperti halnya larutan gelatin, panas pengencerannya (*heats of dilution*) dapat diabaikan, neraca entalpi pada evaporator efek tunggal dapat dihitung dari panas spesifik dan suhu larutan. Laju perpindahan panas q pada bagian cairan mencakup panas yang berpindah ke cairan encer untuk menaikkan suhunya (q_f) dari suhu umpan T_f ke titik didih T , dan panas yang diperlukan untuk evaporasi q_v , jadi :

$$q = q_f + q_v \dots\dots\dots(12)$$

Jika panas spesifik cairan encer (c_{pf}) diasumsikan tetap pada suhu antara T_f dan T , maka

$$q_f = m_f c_{pf} (T - T_f) \dots\dots\dots(13)$$

Jika panas spesifik gelatin kering menurut Skuratov & Shkitov (1946) adalah 1,19 kJ/kg°C, maka panas spesifik gelatin encer (c_{pf}) dengan padatan total 3,5% yang masuk ke evaporator adalah 4,13 kJ/kg°C. Dengan laju umpan m_f sebesar 1,4 liter per menit atau 84 liter/jam, dan berat jenis larutan 0,86 kg/liter maka laju umpan m_f menjadi sebesar 72,24 kg/jam. Bila suhu umpan 32°C dan titik didih 55°C maka panas untuk menaikkan suhu umpan sesuai rumus (10) adalah sebesar 6.862,08 kJ/jam atau 1,9 kJ/detik atau 1,9 kW.

Jika suhu T_f cairan encer itu lebih besar dari T maka suhu $m_f c_{pf} (T - T_f)$ nilainya negatif dan merupakan entalpi neto yang dibawa masuk ke dalam evaporator oleh cairan encer, suhu ini disebut *flash evaporation*. Jika suhu T_f cairan encer yang diumpankan kepada evaporator itu kurang dari T maka suhu $m_f c_{pf} (T - T_f)$ nilainya positif sehingga bagi evaporator diperlukan tambahan *steam* pemanas

untuk memberikan entalpi itu. Oleh karena itu suhu $m_f c_{pf} (T - T_f)$ disebut beban pemanasan (*heating load*).

$$q_v = (m_f - m) \lambda_v \dots\dots\dots(14)$$

Jika diasumsikan kenaikan titik didih cairan pekat dapat diabaikan maka $l_v = l$ yakni panas laten penguapan air pada tekanan ruang uap. Bila kenaikan titik didih cukup besar maka uap yang keluar dari larutan itu adalah panas lanjut (*superheated*) sebanyak kenaikan titik didih (dalam derajat) dan l_v agak berbeda dari l . Akan tetapi dalam prakteknya penggunaan l biasanya sudah cukup teliti, dan nilainya dapat dibaca langsung pada Tabel Uap (McCabe *et al.*, 1985) yaitu 2.260 kJ/kg. Jadi panas untuk penguapan sesuai rumus (14) adalah 18,8 kJ/detik atau 18,8 kW. Dengan demikian panas di bagian ruang evaporasi sesuai rumus (12) adalah 20,7 kJ/detik atau 20,7 kW. Hasil perhitungan ini bila dibandingkan dengan cara neraca entalpi di atas yang hasilnya 21,9 kW menunjukkan selisih 1,2 kW yang merupakan konsekuensi logis dari penyederhanaan melalui asumsi-asumsi yang digunakan.

Penggunaan Energi

Konsumsi energi bahan bakar dan listrik

Konsumsi bahan bakar minyak tanah untuk *boiler* adalah 18 liter, nilai kalor minyak tanah adalah 34,31 MJ/liter berarti input energi bahan bakar 617,6 MJ. Dengan lama operasi 5 jam, konsumsi minyak tanah 3,58 liter per jam, konsumsi energi spesifik bahan bakar minyak tanah adalah 0,12 liter per liter air teruapkan.

Konsumsi energi listrik dari masing-masing komponen evaporator disajikan pada Tabel 1. Terlihat bahwa komponen yang terbesar mengkonsumsi energi hingga 49% dari total energi listrik adalah pompa dan kipas pendingin air (*water cooler*). Hal ini disebabkan pendingin air yang digunakan memiliki kapasitas yang lebih besar dari yang dibutuhkan. Bila digunakan sesuai dengan kebutuhan tentunya penggunaan energi listrik bisa dihemat.

Jumlah konsumsi energi listrik adalah 34,7 kWh, atau energi input listrik 125,04 MJ atau 0,23 kWh per liter air teruapkan. Energi input gabungan bahan bakar minyak tanah dan listrik adalah 742,6 MJ.

Efisiensi energi

Efisiensi penggunaan bahan bakar minyak (BBM) untuk evaporasi ini (pemanasan dan penguapan) adalah 60%. Bila dihitung efisiensi penggunaan seluruh energi dari sistem secara keseluruhan (BBM dan listrik) untuk evaporasi ini adalah 50%.

Dengan memperhatikan analisis pindah panas dan neraca entalpi di atas, efisiensi ini masih dapat ditingkatkan dengan cara: 1) memperkecil selisih suhu (*temperature drop*) dengan cara membuat insulasi pada tangki umpan dan saluran antara tangki umpan dengan evaporator, serta saluran antara tangki

Konsumsi energi bahan bakar minyak tanah untuk pemanasan selama evaporasi adalah 18 liter atau 617,6 MJ atau 3,58 liter/jam atau 0,12 liter per liter air teruapkan. Efisiensi penggunaan bahan bakar untuk kerja evaporasi (pemanasan dan penguapan) larutan adalah 60%. Konsumsi energi listrik 34,7 kWh atau

Tabel 1. Konsumsi energi listrik
Table 1. Electrical energy consumption

Komponen/Component	Daya/Power (kW)	Energi/Energy (kWh)
Pompa pengumpan/Feeding pump	0.75	3.90
Pompa masukan air kondensor/Condensor water input pump	0.20	1.00
Pompa vakum/Vacuum pump	1.50	7.60
Pompa keluaran air kondensor/Condensor water output pump	0.13	0.60
Pompa dan kipas pendingin air/Pump and fan of water cooler	3.38	17.00
Pompa produk/Product pump	0.75	0.20
Boiler	0.80	4.30
Total	7.51	34.70

sementara produk dengan tangki umpan; 2) meningkatkan ekonomi uap dengan cara menambah tabung evaporator dan mengaplikasikan sistem evaporator multi efek; 3) memanfaatkan sisa panas dari air kondensat uap pemanas (*steam*) untuk pasokan air boiler; 4) menggunakan pendingin air (*water cooler*) dengan daya listrik sesuai kebutuhan.

KESIMPULAN

Hasil uji performansi prototipe evaporator tipe *falling film* efek tunggal menunjukkan bahwa alat tersebut dapat memekatkan 180 liter larutan gelatin hasil ekstraksi kulit ikan tuna dengan padatan total awal 3,5% dengan laju umpan 84 liter/jam selama 5 jam menjadi 30 liter larutan dengan padatan total 9,1%. Jumlah air ter evaporasi adalah 150 liter atau laju evaporasi 30 liter/jam.

Ekonomi uap evaporator ini adalah 0,78 kg air teruapkan per kg uap pemanas (*steam*) yang digunakan. Luas permukaan evaporasi evaporator adalah 1,67 m², selisih suhu keseluruhan (*temperature drop*) rata-rata 23°C dan koefisien pindah panas keseluruhan 668 W/m² °C.

Hasil perhitungan entalpi menunjukkan panas dari uap pemanas (*steam*) di tabung pemanas adalah 25,64 kJ/detik, sedangkan panas untuk peningkatan suhu umpan dan penguapan pada suhu 55°C adalah 21,9 kJ/detik. Berdasarkan perhitungan dengan panas spesifik dan panas laten penguapan, beban pemanasan (*heating load*) hingga titik didih adalah 1,9 kJ/detik dan panas untuk menguapkan larutan adalah 20,7 kJ/detik.

125,04 MJ. Efisiensi penggunaan seluruh energi (bahan bakar dan listrik) untuk evaporasi adalah 50%.

Efisiensi evaporator masih dapat ditingkatkan dengan cara: 1) memperkecil selisih suhu (*temperature drop*) dengan membuat insulasi pada tangki umpan dan saluran-saluran antara tangki umpan dengan evaporator; 2) menambah tabung evaporator dan mengaplikasikan sistem evaporator multi efek; 3) memanfaatkan sisa panas air kondensat uap pemanas (*steam*) untuk pasokan air boiler; 4) menggunakan pendingin air (*water cooler*) dengan daya listrik sesuai kebutuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. 2003. Raw materials and production, How we make gelatin. Gelatin Manufacturers Institut of America. <http://www.gelatin-gmia.com/html/qanda.html>. 11/4/2003.
- Biro Pusat Statistik. 2007. "Jumlah Impor dan Ekspor Gelatin di Indonesia", BPS, Jakarta.
- Fardiaz, D. 1989. *Hidrokoloid*. Pusat Antar Universitas Pangan dan Gizi, IPB, Bogor. 76 pp.
- Gomez, G.M.C. and Montero, P. 2001. Extraction of gelatin from megrim (*Lepidorhombus boscii*) skins with several organic acids. *J. Food Sci.* 66(2): 213–216.
- Grossman, S. and Bergman, M. 1992. *Process for The Production of Gelatin from Fish Skins*. United States Patent 5093474. 14 pp.
- Heldman, D.R. and Lund, D.B. 1992. *Handbook of Food Engineering*. Marcell Dekker, Inc., New York.
- Heldman, D.R. and Singh, R.P. 1981. *Food Process Engineering 2nd ed.* AVI Publishing Company, Inc., Westport, Coonecticut. p. 216–259.

- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriot, P. 1985. *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, New York. p. 253–446.
- Rubin. 2002. Markedsrapport gelatin. Scientific report. <http://www.rubin.no>. Trondheim, Norway.
- Shilling, R.L., Bill, K.J., Bernhagen, P.M., Flynn, T.M., Goldsmidt, V.M., Hrnjak, P.S., Standiford, F.C., and Timmerhaus, K.D. 1999. Heat transfer equipment. In Perry, R.H., Green, D.W., and Maloney, J.O. (eds.). *Perry's Chemical Handbook 7th ed.* The Mc Graw Hill Companies Inc. New York, p. 11-107 – 11-118.
- Simon, A., Vandanjon, L., Levesque, G., and Bourseau, P. 2002. Concentration and desalination of fish gelatin by ultrafiltration and continuous diafiltration processes. *Journal of Desalination*. 144: 313–318.
- Skuratov, S.M. and Shkitov, M.S. 1946. Specific heat of water bound by high polymeric substances. *Physycal Chemistry*. 53(7): 627.
- Surono, Djazuli, N., Budiyanto, D., Widarto, Ratnawati, Aji, U.S., Suyuni, A.M., dan Sugiran. 1994. Penerapan paket teknologi pengolahan gelatin dari ikan cucut. *Laporan BBMHP*. Jakarta.
- Ward, A.G. and Courts, A. 1977. *The Science and Technology of Gelatin*. Academic Press, New York.
- Winata, A.K. 2006. *Studi Pengeringan Gelatin Menggunakan Alat Pengering Rak (Tray Dryer)*. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. 98 pp.