

PENILAIAN DAUR HIDUP BOTOL GELAS PADA PRODUK MINUMAN TEH
LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF GLASS BOTTLE FOR TEA DRINKING PRODUCT

Mohamad Yani*, Endang Warsiki, dan Noviana Wulandari

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Kotak Pos 220, Bogor 16680, Indonesia.
E-mail: moh.yani@ipb.ac.id

ABSTRACT

Glass bottle is used as packaging for beverage product to keep its quality. The objectives of this study were life cycle assessment (LCA) of glass bottle, environmental impact assessment, and recycling cost analysis. The research was started from inventory analysis of glass bottle production, tea beverage industry, and recycling of glass waste, and data processing. The life cycle of glass bottle was observed as cycling from glass bottle production, tea beverage industry, consumer, cullet recycling, and come back to glass bottle production. The inventory analysis was observed at all steps. The glass bottle production occurred from mixing materials, melting, moulding, and cooling. The tea beverage industry operates glass bottle washing, filling, packing, and distributing to consumer. The glass bottle can be refilled up to 20 times. The glass recycling was started from collection, separation, size reduction to cullet, washing and drying. The cullet was added about 40%-60% of total raw materials for production of new glass bottle. The glass bottle production and recycling cullet caused environmental impact. The environmental impact assessment of bottle glass production indicated that effluent of wastewater and ambient air quality passed to standard regulation limit, in exception of total particulate matter and sulfur dioxide. The cullet recycling process produced water pollution to surface water. The glass bottle production produced air pollution. The recycling and production of glass bottle need high cost, caused by raw materials and a lot of energy requirement for washing, melting silica and cullet, so the glass bottle price was relatively more expensive.

Keyword: life cycle assessment, glass bottle, inventory analysis, recycle, environmental impact assessment, cost analysis

ABSTRAK

Botol gelas digunakan sebagai kemasan produk minuman untuk menjaga kualitas produk. Tujuan penelitian ini adalah penilaian daur hidup botol gelas, analisis dampak lingkungan, dan analisis biaya daur-ulangnya. Tahapan penelitian dimulai dari analisis inventori produksi botol gelas, industri minuman teh, daur-ulang limbah botol gelas, dan pengolahan data. Siklus hidup botol gelas ternyata berputar (*cycle*), mulai dari produksi botol gelas, industri minuman teh, konsumen, daur-ulang gelas (*cullet*), dan kembali ke produksi botol gelas. Analisis inventori dilakukan pada ketiga pabrik tersebut. Proses produksi botol gelas meliputi pencampuran bahan baku, peleburan, pencetakan, pendinginan, dan pengemasan. Industri minuman teh melakukan pencucian botol, pengisian minuman teh dan distribusi ke konsumen. Pada industri minuman teh, botol gelas dapat diisi-ulang (*refillable*) hingga 20 kali. Proses daur-ulang limbah botol gelas dimulai dari pengumpulan, pemisahan warna, pengecilan ukuran, pencucian, dan pengeringan. Limbah botol gelas (*cullet*) digunakan kembali sekitar 40-50% dari total bahan baku untuk produksi botol gelas. Produksi botol gelas dan daur-ulang *cullet* dapat menghasilkan dampak lingkungan. Analisis dampak lingkungan dari proses produksi botol gelas menunjukkan bahwa cemaran udara dan air masih memenuhi baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan, kecuali SO₂ dan debu. Proses daur-ulang *cullet* menghasilkan cemaran ke perairan. Biaya proses produksi dan daur-ulang botol gelas cukup besar karena membutuhkan bahan baku dan energi yang besar untuk pencucian, peleburan bahan baku dan *cullet*, sehingga harga botol gelas relatif lebih mahal.

Kata kunci: penilaian daur hidup, botol gelas, analisis inventori, daur-ulang, analisis dampak lingkungan, analisis biaya

PENDAHULUAN

Produk minuman teh dalam botol gelas pada awal diperkenalkan, banyak yang mempertanyakan, bagaimana kebiasaan minum teh segar berubah ke minuman teh dalam gelas. Ternyata sekarang telah diterima dengan baik, sehingga menjadi kebiasaan banyak orang. Produk

minuman teh dalam kemasan, sekarang telah memberikan budaya baru peningmat teh. Dengan berjalannya waktu dan perubahan pola hidup, maka minuman teh dalam berbagai rasa dan kemasan menjadi kebutuhan hidup masa kini. Walaupun perkembangan berbagai jenis kemasan teh, namun minuman teh dalam botol gelas tetap diminati.

Kemasan berfungsi untuk melindungi produk atau komoditas selama pengangkutan dari tempat produksi ke konsumen akhir atau dari satu tahapan produksi ke tahapan produksi yang lain, sehingga produk berada dalam kondisi baik sampai produk siap digunakan atau dikonsumsi. Sebagian orang menganggap bahwa kemasan dari suatu produk merupakan sesuatu yang kurang bermanfaat atau bernilai apabila dikaitkan dengan pengolahan akhir bekas kemasan. Kecenderungan penilaian negatif dikaitkan dengan munculnya masalah lingkungan yang disebabkan akumulasi bahan kemasan bekas, terutama plastik, dimana sebagian besar bahan kemasan tidak dapat didegradasi alami oleh lingkungan, atau sulit didaur ulang kembali, sehingga perlu dilakukan suatu pengkajian mengenai jenis kemasan yang paling baik terhadap lingkungan dengan menggunakan metoda *Life Cycle Assessment* (LCA).

LCA adalah suatu metoda yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang disebabkan oleh suatu produk selama proses produksi atau aktivitas selama siklus hidupnya dan aliran bahan yang terjadi di dalam proses produksi produk tersebut (Drive, 2006). Kajian tentang LCA untuk suatu produk dimulai dari kajian bahan baku, proses, transportasi, pabrikasi (produksi barang), pengguna produk, dan manajemen limbah (Baumann dan Tillman, 2002). Dalam diagram alir proses produksinya, ada masukan bahan baku dan energi serta ada keluaran yang dapat menimbulkan pencemaran terhadap air, udara dan tanah. Kajian penggunaan bahan kemasan pada produk minuman, pada umumnya adalah perbandingan beberapa jenis kemasan, terutama penggunaan botol sekali pakai (*disposable*) dan isi ulang (*refillable*), baik botol dengan bahan jenis gelas maupun plastik (Arvanitoyannis, 2008). Proses daur-ulang berbagai bahan kemasan minuman telah dikaji terhadap konsumsi energi dan pemanasan global (Pasqualino *et al.*, 2011). Daur-ulang botol PET dan gelas pada

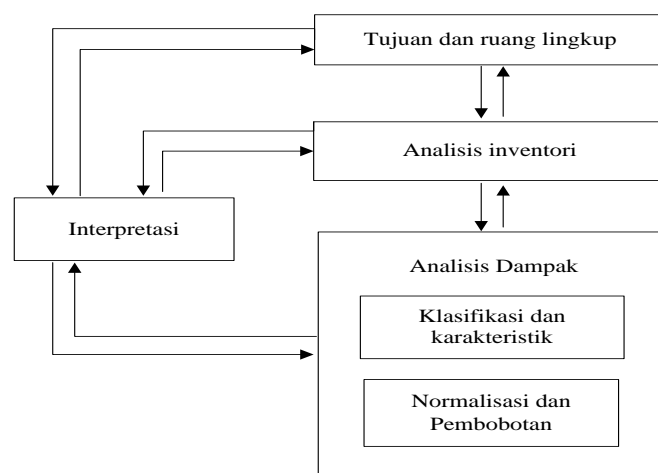
produk minuman telah dikaji dalam hal sistem isi ulang (*refilling system*) (Nessi *et al.*, 2012). Yani *et al.* (2013), telah mengkaji LCA botol PET di Indonesia.

Botol gelas merupakan kemasan yang sangat baik untuk benda padat, cair, dan gas. Kemasan gelas menjadi bahan pelindung yang sangat baik dari kontaminasi bau dari luar sehingga citra rasa produk dapat dipertahankan. Menurut Coles *et al.* (2003), proses pembuatan botol gelas dimulai dari pemilihan dan pencampuran bahan baku, peleburan (*melting*), pembentukan botol gelas, dan *annealing*. Botol gelas terbuat dari campuran bahan yang terdiri dari silika (SiO₂), soda abu (Na₂O), batu kapur (CaO), dan aluminium oksida (Al₂O₃). Tahapan proses produksi botol gelas perlu dikaji dampaknya terhadap pencemaran lingkungan.

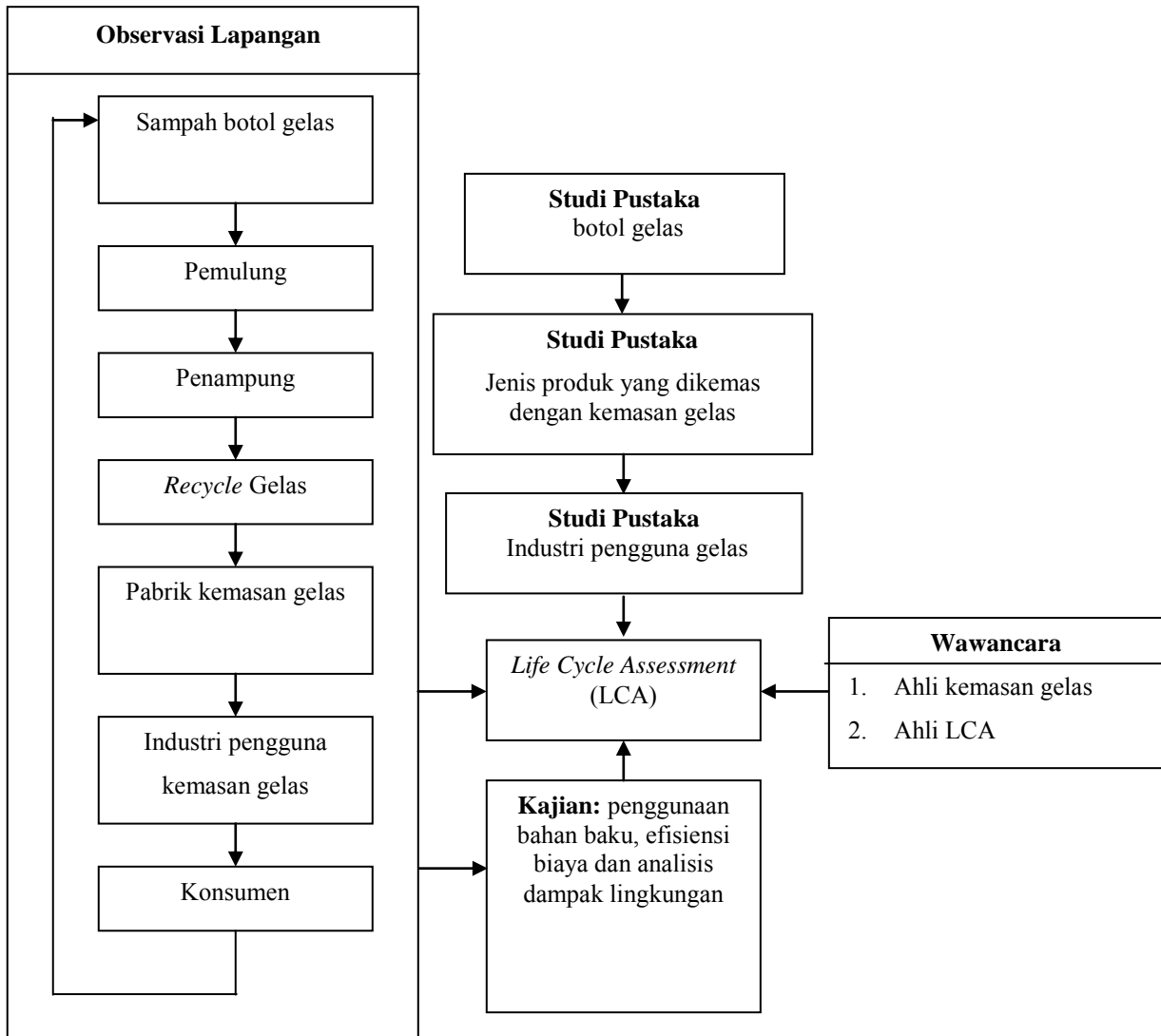
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi siklus hidup botol gelas yang mencakup analisis inventori dari sisi kebutuhan bahan baku, energi dalam proses produksi, analisis dampak pencemaran lingkungan (perairan, udara dan kebisingan) dan analisis biayanya.

METODE PENELITIAN

Tahapan LCA terdiri dari empat tahap, yaitu: penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak, dan interpretasi (Gambar 1). Tahap pertama dari metode LCA yaitu menentukan parameter-parameter yang berhubungan dengan analisis. Pada tahap analisis inventori, dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan dalam melakukan analisis, meliputi bahan baku, energi, emisi, dan limbah yang dihasilkan. Analisis dampak bertujuan untuk mengetahui dampak yang mungkin dapat terjadi selama siklus hidup suatu produk. Penelitian ini dilakukan terhadap botol gelas untuk produk minuman teh. Tahapan penelitian terdiri dari pengamatan di lapangan, studi pustaka, dan pengolahan data LCA (Gambar 2).



Gambar 1. Tahapan LCA (ISO 14040 1997)



Gambar 2. Diagram alir penelitian daur hidup botol gelas

Pengamatan lapang dilakukan terhadap pabrik botol gelas, pabrik minuman teh, jaringan daur-ulang gelas di beberapa perusahaan dan unit usaha daur-ulang beberapa kota di Provinsi Banten, Jawa Barat dan Jawa Timur. Jenis data yang digunakan pada penelitian ini adalah data primer dan data sekunder yang berupa data kuantitatif maupun kualitatif. Data yang dibutuhkan meliputi: (i) proses produksi; (ii) kebutuhan bahan baku dan energi; (iii) pencemaran udara (NO_x , SO_x dan debu) dan kebisingan, (iv) pencemaran air (COD dan BOD); dan (v) biaya produksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Inventori

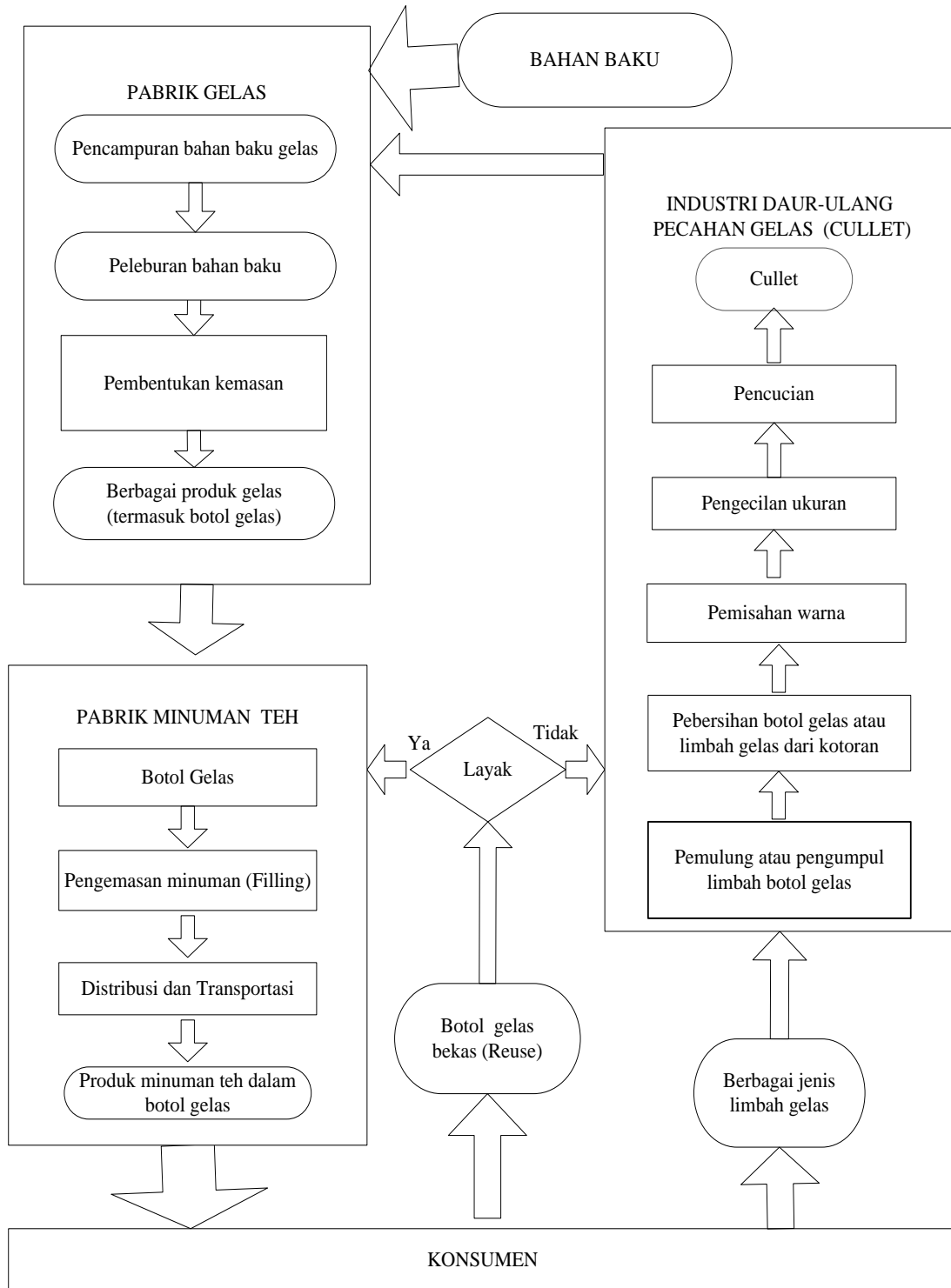
Analisis inventori terdiri dari data input bahan, tahapan proses yang dibutuhkan pada proses produksi botol gelas, output yang dihasilkan dari proses produksi berupa produk botol gelas maupun

cemaran terhadap lingkungan, berupa limbah padat, cair, gas, debu, dan kebisingan. Berdasarkan warnanya, botol gelas dibagi menjadi 3 jenis, yaitu hijau (UVA hijau), *flint* (putih jernih), dan *amber* (cokelat). Berdasarkan jenis botol gelas yang dihasilkan dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu HPS (Hasil Produk Selesai) dan HPA (Hasil Produk Antara). Berdasarkan tujuan penggunaan botol gelas, dibagi menjadi 3 jenis, yaitu a) botol gelas sekali pakai dirancang dengan bahan yang ringan (jenis kemasan ini biasanya dibuang setelah digunakan), b) botol gelas setelah dipakai dapat digunakan kembali tiga sampai lima kali, dan c) botol gelas yang dapat dipakai kembali sampai lebih dari 70 kali.

Pada tahap inventori dilakukan pengumpulan data yang mendukung LCA. Data tersebut meliputi kebutuhan bahan baku dan energi, proses produksi botol gelas, serta siklus hidup botol gelas. Siklus hidup botol gelas, diawali dengan proses produksi botol gelas, kemudian botol gelas

yang telah selesai diproduksi, digunakan untuk mengemas produk minuman teh. Limbah botol gelas yang masih dalam keadaan baik atau layak pakai akan dikembalikan ke industri pengguna botol gelas untuk digunakan sebagai bahan pengemas produk kembali sampai botol gelas tersebut dinyatakan tidak

layak. Botol gelas yang tidak layak akan didaur-ulang sebagai *cullet* dan selanjutnya digunakan sebagai bahan baku pada proses produksi botol gelas. Siklus hidup botol gelas dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Siklus hidup botol gelas untuk produk teh

Bahan Baku dan Tambahan pada Produksi Botol Gelas

Pada proses produksi botol gelas, bahan-bahan yang digunakan dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu bahan baku dan bahan tambahan. Bahan baku adalah bahan yang digunakan untuk membentuk botol gelas, sedangkan bahan tambahan adalah bahan yang digunakan untuk memperbaiki sifat dan memberikan warna pada botol gelas. Bahan baku yang digunakan terdiri dari pasir silika, soda ash, *cullet* (beling, pecahan gelas). Komposisi bahan baku yang digunakan di salah satu perusahaan botol gelas adalah sebagai berikut : SiO₂ 73%, Na₂O 14%, CaO 11%, Al₂O₃ 1%.

Pasir silika merupakan sumber SiO₂ dan memiliki titik leleh sekitar 2000°C. Bahan pengotor utama pada pasir silika adalah Fe₂O₃. Pasir silika yang digunakan dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

- Pasir P-1 yang digunakan untuk memproduksi botol gelas *flint* atau bening
- Pasir P-2 yang digunakan untuk memproduksi botol gelas UVA hijau
- Pasir P-3 yang digunakan untuk memproduksi botol gelas *amber* atau cokelat.

Bahan tambahan berupa soda abu yang digunakan berasal dari beberapa negara seperti Australia, Kenya, China, dan India. Tujuan penambahan soda abu pada proses produksi botol gelas adalah untuk menurunkan titik leleh dari pasir silika, dimana soda abu memiliki titik leleh sekitar 850°C.

Cullet adalah pecahan kaca yang berasal dari *overflow* pada saat kegagalan produksi pada proses pencetakan, *annealing*, *decorating*, pengepakan, dan botol yang tidak memenuhi standar. *Cullet* yang digunakan pada proses produksi botol gelas sekitar 40-50% dari berat campuran bahan baku. Fungsi penambahan *cullet* adalah untuk mempermudah proses peleburan bahan baku, semakin banyak *cullet* yang digunakan maka kecepatan peleburan semakin tinggi. Harga beli *cullet* sebesar Rp 1000/kg.

Bahan tambahan yang digunakan meliputi alumunium hidroksida, natrium bikromat, arang bubuk, selenium, limestone, sodium sulfat, dan dolomite. Alumunium hidroksida merupakan

sumber alumina yang dapat menambah daya tahan botol gelas terhadap panas, selain itu juga dapat mencegah terjadinya kristal dan menambah elastisitas. Natrium bikromat digunakan untuk menghasilkan botol gelas berwarna hijau. Jika dicampur dengan bahan baku pengoksidasi seperti natrium nitrat akan menghasilkan warna hijau kekuningan dan dapat digunakan sebagai pelindung dari sinar UV. Arang bubuk sebagai pewarna botol gelas cokelat. Selenium memiliki warna cokelat kehitaman dan dapat memberikan warna muda pada botol gelas. Bahan ini digunakan bersama *cobalt* untuk menetralkan warna kuning kehijauan akibat proses oksidasi besi. Jika digunakan terlalu banyak dapat menimbulkan warna merah muda pada botol gelas ketika dilakukan pemanasan pada tahap *annealing*.

Proses Produksi Botol Gelas

Proses produksi botol gelas dari salah satu perusahaan disajikan pada Gambar 5, diawali dengan melakukan proses pengisian bahan baku pada *cylo* atau tangki penampung. Penampungan pasir silika terdiri dari 3 jenis *cylo* yang masing-masing digunakan untuk menampung jenis pasir yang berbeda. Proses pengisian pasir ke dalam *cylo* melalui *dumper* dengan menggunakan truk pemuat. Pasir silika yang telah berada di dalam *dumper*, kemudian dialirkan ke dalam *cylo* melalui elevator. Hal yang sama terjadi pada bahan tambahan lainnya. Pada bahan tambahan *dumper* yang digunakan ditambahkan alat *vacuum* yang berfungsi mengisap debu. *Cullet* yang berasal dari supplier, mengalami proses pencucian terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran yang terdapat pada *cullet*. *Cullet* yang telah bersih dimasukkan ke dalam *dumper*, kemudian digiling dalam *hammer mill* untuk menyeragamkan ukuran. *Cullet* yang telah seragam ukurannya akan disimpan dalam *cylo* melalui elevator. Sebelum *cullet* masuk ke dalam *cylo*, *cullet* tersebut melalui *separator magnetic* untuk menghilangkan logam-logam yang ikut terbawa. Pemasukkan bahan pewarna ke dalam *cylo* dilakukan secara manual, sesuai kebutuhan jenis dan jumlah pewarna.



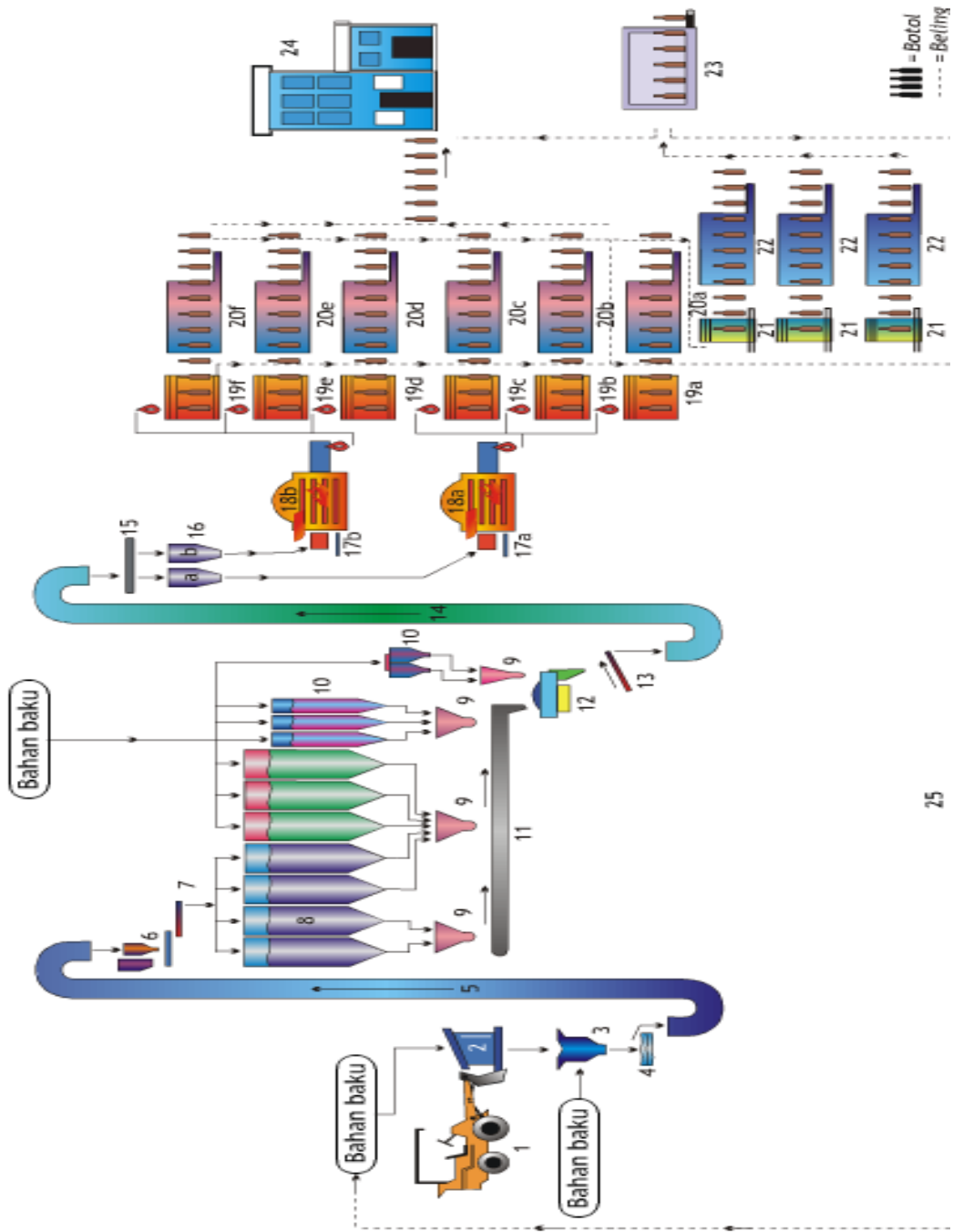
(a)



(b)

Gambar 4. *Cullet*; (a) *cullet* hijau, (b) *cullet* putih

- Keterangan:
1. Truk Pemuat
 2. Pengumpan
 3. Alat Penampung
 4. Pengumpan Bergerak
 5. Elektromekanis
 6. Alat Pengangkut
 7. Distributor Berputar
 8. Pengumpan Bergetar
 9. Penampung Bahan Baku
 10. Timbangan Berskala Otomatis
 10. Wadah Bahan Baku Tambahan
 11. Ban Berjalan
 12. Pencampur Bahan
 13. Ban Berjalan
 14. Alat Pengangkut Bahan
 15. Ban Berjalan
 16. a. Penampung Bahan untuk Dapur G1
b. Penampung Bahan untuk Dapur G2
 17. a. Pengumpan Bahan untuk Dapur G1
b. Pengumpan Bahan untuk Dapur G2
 18. a. Dapur G1
b. Dapur G2
 19. Mesin IS-8/DG/SG (a,c,d)
Mesin IS-5/DG/SG (b,e,f)
 20. Terowongan Pendingin (a,b,c,d,e,f)
 21. Mesin ACL (4 buah)
 22. Terowongan Pendingin (4 buah)
 23. Penyimpanan dan Pengemasan
 24. Beling atau *Cullet*
 25. Reuse botol cacat dan cullet



25

Gambar 5. Diagram alir proses produksi botol gelas di salah satu pabrik X

Proses pecampuran komposisi bahan baku dilakukan dengan sistem komputer. Secara otomatis setiap bahan akan ditimbang pada alat timbangan berskala otomatis sampai batas yang telah ditentukan. Bahan yang telah ditimbang kemudian dialirkan ke dalam *mixer* dengan menggunakan *belt conveyor* untuk dilakukan proses pencampuran. Bahan yang telah tercampur dengan sempurna, kemudian di transfer ke *batch hopper*. Setelah itu, bahan akan dialirkan ke dapur dengan menggunakan *belt conveyor*.

Proses peleburan sangat penting dalam industri botol gelas, hal tersebut dikarenakan mutu botol gelas yang dihasilkan sangat dipengaruhi pada proses peleburan. Proses peleburan yang menggunakan bahan pasir silika murni pada suhu 1500 – 1600°C, sedangkan apabila menggunakan *cullet* pada suhu 1000 - 1200°C. Bahan baku yang telah dilebur dalam tanur, keluar melalui *working end* untuk dibagi menjadi tiga bagian, kemudian menuju ke *feeder* melalui *forehearth*. Pada *forehearth* lelehan botol gelas dipanaskan untuk menjaga suhu dari botol gelas. Di dalam *feeder*, botol gelas cair masuk ke dalam cincin *orifice* yang terletak pada bagian bawah *feeder*, kemudian bahan gelas cair tersebut akan dipotong sesuai dengan berat yang diinginkan. Potongan bahan gelas cair tersebut dinamakan GOB. Setiap GOB yang jatuh akan masuk ke dalam *blank mould* dengan menggunakan *delivery system*. Apabila proses *delivery system* ini tidak berjalan dengan lancar maka akan menimbulkan cacat pada botol yang akan dihasilkan.

Proses *settle blow* dilakukan pada GOB yang terdapat pada *blank mould*. *Settle blow* merupakan tahap pembentukan kepala botol. Prinsip dari *settle blow* yaitu GOB yang akan masuk ke dalam *blank mould*, kemudian ditiup dengan menggunakan udara bertekanan melalui *baffle* sehingga mendorong GOB turun dan jatuh di atas *plunger* dan masuk ke dalam *ring mould*, sehingga terbentuk bagian kepala botol. Proses *counter blow* dilakukan pada GOB yang telah terbentuk kepalanya. Tahapan ini dilakukan dengan cara meniupkan udara bertekanan sekitar 40 psi, sehingga dihasilkan *parison*. *Parison* yang dihasilkan kemudian dipindahkan ke dalam *blow mould* untuk dilakukan proses *final blowing*.

Proses pemindahan *parison* dilakukan dengan menggunakan alat yang bernama lengan balik (*invert arm*), dimana *invert arms* tersebut memegang *ring mould*, selanjutnya melakukan gerakan berputar 180° ke arah *blow mould*. Sebelum dilakukan *final blowing*, terlebih dahulu dilakukan proses pemanasan kembali terhadap *parison*. Proses pemanasan tersebut dilakukan dengan cara menghentikan sementara *parison* sehingga memiliki suhu yang sama pada setiap bagiannya. Setelah itu, dilakukan proses *final blowing* dengan cara meniupkan udara bertekanan melalui kepala botol sehingga menekan *parison* ke arah luar, dimana kulit

luar *parison* akan menempel pada dinding *blow mould* dan bagian bawahnya akan menempel pada *bottom plate*.

Botol yang telah dibentuk akan menuju *annealing* untuk dilakukan proses pendinginan secara bertahap, dengan tujuan untuk menghindari terbentuknya botol bertegangan akibat proses pendinginan yang terjadi secara tiba-tiba. Botol bertegangan mudah pecah dan sangat berbahaya. Proses *annealing* berlangsung selama 2 jam dan dilakukan dengan cara memasukkan botol ke dalam terowongan *annealing*. Di dalam terowongan dilakukan proses pemanasan untuk menghindari proses penurunan suhu yang drastis dan pada bagian akhir dari terowongan tersebut terjadi proses pendinginan dengan menggunakan *blower*.

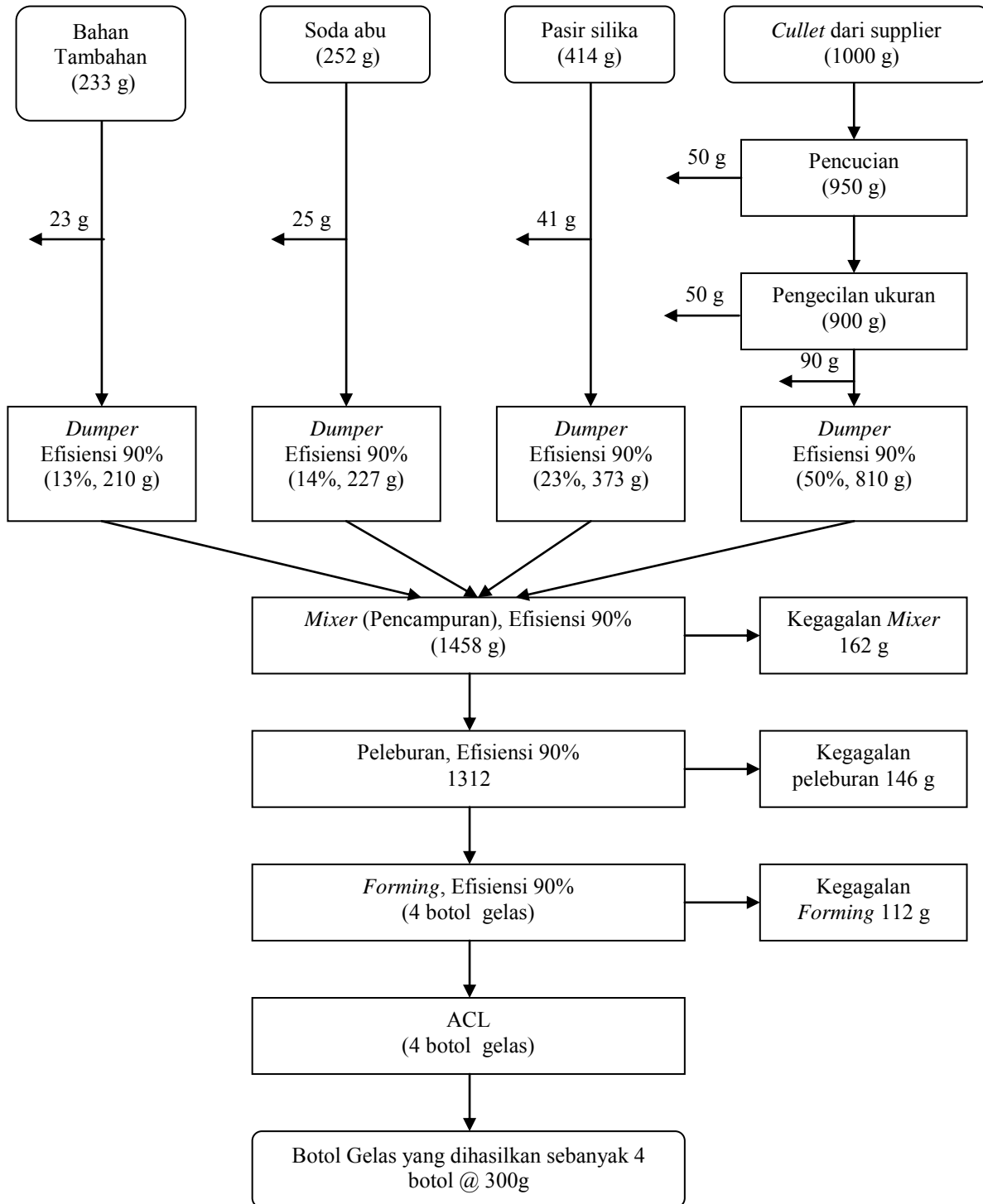
Botol-botol yang keluar dari terowongan kemudian disortasi secara manual dan otomatis. Jenis cacat botol dikelompokkan menjadi tiga, yaitu (i) cacat kritis, cacat yang mempengaruhi kualitas produk ke konsumen secara langsung dan dapat membahayakan konsumen, (ii) cacat mayor, cacat yang dapat menyebabkan kegagalan dalam proses di pelanggan, (iii) cacat minor, cacat yang mempengaruhi penampilan dari botol. Sebelum dilakukan proses sortasi secara manual, botol yang keluar dari *annealing* terlebih dahulu disortasi secara otomatis dengan menggunakan tiga buah alat secara berurutan, yaitu (i) *gause*, berfungsi untuk mengecek diameter mulut botol, (ii) *alfacamp*, berfungsi untuk mendeteksi cacat visual, (iii) *checkplus*, berfungsi untuk mendeteksi cacat retak. Selain bagian sortasi, pengecekan terhadap botol juga dilakukan oleh bagian *quality control* (QC), meliputi uji cacat fisik, dimensi, tegangan dalam, dan lain-lain. Setelah QC menyatakan OK, kemudian dilakukan proses pengemasan. Pada botol HPS yang telah lulus sortasi akan disusun di atas *pallet* secara manual oleh bagian pengemasan, kemudian *pallet* tersebut akan disegel untuk merekat plastik dengan menggunakan alat yang bernama *stiring tunnel*. Produk jenis HPA yang telah lulus sortasi dilakukan proses pengemasan sementara, kemudian dilakukan proses pencetakan label (*printing*).

Proses *printing* diawali dengan menyusun kembali botol yang akan dicat pada *double conveyer*. Botol-botol tersebut akan masuk ke bagian meja bundar. Pada meja bundar, botol diatur letaknya pada *conveyer* kemudian botol menuju ke mesin *printing* dan diterima oleh bagian *body steady* yang berfungsi untuk memastikan posisi dari botol sebelum masuk ke bagian *invite*. Pada bagian *invite*, botol dipindahkan ke dalam *botol carrier* dan dilakukan proses *printing* dengan menggunakan cat khusus. Cat yang akan digunakan pada proses *printing* terlebih dahulu dilakukan proses pelelehan. Cat yang telah mencair dimasukkan ke dalam *screen* atau alat pencetak dan dilakukan proses *printing* secara otomatis. Pada saat proses *printing* terjadi, *screen* yang digunakan tetap dipanaskan dengan

tujuan menjaga kondisi cat agar tetap dalam keadaan pasta. Botol yang telah di-*printing* diterima oleh bagian *unload* dan *body steady*, kemudian dialirkan melalui *conveyor* menuju ke bagian *decorating*.

Pada terowongan *decorating*, botol akan mengalami proses pendinginan agar dihasilkan botol

yang sempurna dan *printing* tidak dapat dilepaskan. Setelah dilakukan proses pendinginan, dilakukan proses *coating* yang bertujuan melicinkan permukaan botol agar tidak menimbulkan goresan atau retak pada saat terjadi kontak antar botol. Setelah itu, botol dikemas kembali.



Gambar 6. Neraca massa proses pembuatan botol gelas di perusahaan X

Kebutuhan Bahan Baku dan Energi

Berdasarkan pengamatan dan wawancara di pabrik botol gelas, dibuat neraca masa pada produksi botol gelas (Gambar 6). Perkiraan efisiensi dari semua tahapan proses adalah 90%. Dari sejumlah bahan baku *cullet*, pasir silika, soda abu dan bahan tambahan dengan melalui beberapa tahap operasi, dihasilkan 4 buah botol gelas @ 300 g. Bahan-bahan yang keluar dari pengolahan sebelum pencampuran menjadi limbah cair dan debu. Bahan-bahan yang keluar dari pengolahan setelah pencampuran, berupa bahan setengah jadi dari kegagalan proses pencampuran, peleburan dan *forming* akan dikumpulkan dan olah kembali (*reuse*) menjadi *cullet*. Siklus hidup botol gelas dapat dilihat pada Gambar 3. Limbah botol gelas yang dihasilkan digunakan kembali sebagai bahan baku pada industri pembuat botol gelas.

Perbandingan analisis inventori dilakukan pada parameter siklus hidup botol gelas, kebutuhan energi, kebutuhan bahan baku, karakteristik kemasan. Botol gelas memiliki siklus hidup yang berputar (Gambar 3), dimana limbah botol gelas dapat digunakan kembali (*recycle* dan *reuse*), sedangkan botol PET di Indonesia tidak digunakan kembali menjadi botol PET (Yani *et al.*, 2013). Penggunaan kembali botol gelas (*refill*) untuk produk minuman teh di perusahaan minuman teh di Indonesia mencapai 20 kali. Menurut Nesi *et al.* (2012), di Italy, beberapa jenis botol gelas digunakan kembali (*refillable*) hingga 20-25 kali.

Dilihat dari jumlah bahan baku yang dibutuhkan, pada proses produksi botol gelas 280 mL seberat 300 g/botol, lebih besar dibandingkan dengan botol PET 600 mL yang hanya membutuhkan bahan baku sebesar 28 g. Dengan berat botol yang sedemikian (300 g), maka diperlukan energi dan biaya penanganan transportasi lebih tinggi dari pada botol PET yang relative lebih ringan. Disamping itu, botol gelas memiliki kekurangan yaitu mudah pecah apabila kontak dengan benda lain atau terjatuh. Meskipun bahan baku yang digunakan pada produksi botol gelas lebih besar, tetapi limbah botol gelas dapat didaur ulang sebagai *cullet*. Perusahaan pembuatan botol gelas di Indonesia menggunakan *cullet* 40-60% dari jumlah bahan baku (Gambar 5) untuk diproses kembali menjadi botol gelas yang baru.

Kebutuhan energi dan bahan baku pada proses produksi botol gelas tidak tersedia data dari perusahaan, sehingga pendugaan kebutuhan energi menggunakan data sekunder pada Tabel 1. Kebutuhan energi untuk proses produksi botol gelas dihitung dari keperluan bahan bakar transportasi bahan baku, energi untuk proses pabrikasi (pencampuran, peleburan, pemanasan, pendinginan, dan pergerakan). Edwards dan Schelling (1999) melaporkan bahwa dengan upaya proses daur-ulang gelas, akan diperoleh penghematan energi hingga 4 MJ per kg produk gelas. Menurut Neri *et al.* (2007),

total kebutuhan energi untuk pembuatan botol gelas 1 L adalah 9146 MJ. Kebutuhan energy ini lebih tinggi dari pada pembuatan botol PET 1,5 L yaitu 4956 MJ. Perbedaan kebutuhan energi pada proses produksi botol gelas sekitar dua kali lipat dari produksi botol PET. Hal ini dapat dipahami dari proses peleburan campuran bahan baku gelas pada suhu 1500 – 1600°C, sedangkan proses pencairan bahan PET dilakukan pada suhu sekitar 120 °C (Yani *et al.*, 2013). Pada siklus hidup botol gelas memerlukan energi pada proses produksi, transportasi, dan pengolahan limbah. Kebutuhan energi paling besar terjadi pada tahap proses produksi botol gelas.

Tabel 1. Kebutuhan energi dan bahan baku pada proses produksi botol PET dan botol gelas

Karakteristik energi	Botol gelas	Botol PET
Total yang tidak dapat diperbaharui (MJ) ^a	8256	4511
Total yang dapat diperbaharui (MJ) ^a	890	445
Total kebutuhan energi (MJ) ^a	9146	4956

Sumber: ^aNeri *et al.* (2007)

Dampak Pencemaran Udara, Kebisingan dan Perairan

Cemaran lingkungan yang terjadi selama siklus hidup botol gelas diamati dari komponen fisik-kimia (cemaran air, udara, debu, dan kebisingan). Kebutuhan data LCA sering kali tidak mencukupi data untuk ulasan detil mengenai data proses, kesetimbangan bahan dan energi, serta kurang tepat implikasi energi terhadap nilai pasar (Ayres, 1995). Data pemantauan kualitas udara ambien dan air limbah pada produksi botol gelas disajikan pada Tabel 2. Hasil pemantauan tersebut menunjukkan parameter kualitas udara dari kegiatan proses produksi botol gelas cukup baik dan masih memenuhi baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan, kecuali SO₂ dan debu (TSP).

Pada proses produksi botol gelas menghasilkan keluaran pencemaran udara ambien sebesar SO₂ 1074 µg/m³ dan debu (TSP) 300 µg/m³ (Tabel 2). Tingginya kandungan gas SO₂ diperkirakan dari gas buang pembakaran batubara untuk menghasilkan energi yang sangat besar untuk proses peleburan pasir silika dan *cullet* pada suhu tinggi (1200-1500 °C). Tingginya kandungan debu pada cemaran udara yang dihasilkan dari kegiatan proses produksi botol gelas, berupa debu dari penanganan bahan baku (pasir silika, *cullet*, soda abu), penggilingan dan pada proses pencampuran bahan. Pada proses produksi botol gelas menghasilkan jumlah debu yang cukup besar. Debu

yang dihasilkan pada proses produksi botol gelas mendapat penanganan secara khusus dengan cara menggunakan mesin *vacuum*. Mesin *vacuum* tersebut digunakan untuk menghisap debu yang dihasilkan pada saat proses penyiapan bahan yang berbentuk bubuk, sehingga debu yang beterbangan dapat dikurangi. Pengelolaan debu ini, ternyata belum baik, sehingga masih mencemari lingkungan ruang kerja dan udara ambien sekitar pabrik.

Tabel 2. Pemantauan kualitas udara dan air limbah pada produksi botol gelas

Parameter	Satuan	Nilai	BML
Pencemaran udara			
SO ₂	µg/m ³	1074	800 ^a
NO ₂	µg/m ³	3,09	1000 ^a
Debu (TSP)	µg/m ³	300	230 ^a
NH ₃	µg/m ³	0,46	1390 ^b
H ₂ S	µg/m ³	0,10	2,78 ^b
Pencemaran air			
BOD	mg/L	41	50 ^c
COD	mg/L	111	300 ^c
TSS	mg/L	48	200 ^c

^a PPRI No. 41/1999 : BML udara ambient

^b KepMenLH No. 50/1996 : BML kebauan

^c SK Gubernur Jawa Timur No.188/231/KPTS/013/2005.

Menurut Corbitt (2007), tingkat kebisingan peralatan dan mesin-mesin pabrik sangat tinggi; mesin-mesin pneumatic, seperti gilingan dan *chipper* (90-115 dbA), mesin *moulding* (102-107 dbA), dan *blower* (80-100 dbA), dan tanur pembakaran (82-97 dbA). Dalam proses produksi botol gelas menggunakan peralatan sejenis, sehingga tingkat kebisingannya sangat tinggi. Berdasarkan pengamatan di lapangan, pada proses produksi botol gelas menghasilkan kebisingan sekitar 80-90 dbA yang sangat mengganggu pendengaran pekerja karena telah melampaui ambang batas 85 dbA. Menurut Permenaker nomor 13 tahun 2011, para pekerja diwajibkan menggunakan alat pelindung telinga (*ear plug* atau *ear muff*) sehingga tidak terlalu membahayakan pendengaran para pekerja.

Pada proses produksi botol gelas, dihasilkan limbah padat berupa botol gelas yang tidak memenuhi standar, botol gelas yang gagal tersebut dapat digunakan kembali (*reuse*) gelas sebagai bahan inisiasi pada proses peleburan, sehingga dapat mengurangi cemaran lingkungan (Gambar 5). Dengan demikian telah diupayakan tidak ada limbah padat (*cullet*) yang terbuang, sebagai upaya minimasi limbah.

Pada proses produksi botol gelas, limbah cair berasal dari proses pencucian *cullet* dan pendinginan mesin produksi (Gambar 3 dan 4)

menunjukkan nilai COD, BOD dan TSS yang dikandung oleh suatu limbah cair dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan perairan. Limbah cair yang dihasilkan dari pencucian *cullet* ternyata tidak mengalami proses pengolahan terlebih dahulu, melainkan langsung dibuang ke sungai. Nilai COD 411 mg/L telah melampaui baku mutu 300 mg/L (Tabel 2) dari proses kimiawi, sehingga perlu dilakukan pengolahan limbah cairnya sebelum dibuang ke lingkungan. Kandungan zat padat tersuspensi (TSS) sebesar 48 mg/L dengan batas baku mutu sebesar 200 mg/L (Tabel 2). Padatan tersebut berasal dari kotoran yang menempel pada *cullet*. Limbah cair tersebut dapat menyebabkan terjadinya dampak turunan berupa menurunnya kualitas air sungai. Hal tersebut ditandai dengan air sungai yang tidak jernih dan berbau. Akumulasi limbah ini, pada akhirnya akan mencemari air sungai dan akan mengganggu keadaan ekosistem sungai. Dampak yang terlihat antara lain tidak terkontrolnya pertumbuhan tanaman air akibat air sungai mengalami eutrofikasi dan hilangnya beberapa jenis ikan karena air sungai yang keruh dan dangkal.

Dalam dokumen evaluasi dampak lingkungan seharusnya mencakup upaya penurunan sumberdaya, kesehatan masyarakat, toksisitas lingkungan, asidifikasi dan data kuantitatif pencemaran lingkungan (Ayres, 1995). Menurut Malik (2004), analisis dampak dapat dikembangkan dengan menggunakan metode *Eco-Indicator '95*. Metode tersebut menunjukkan bahwa cemaran yang dihasilkan pada proses produksi botol gelas dapat menyebabkan terjadinya dampak lingkungan. Dampak lingkungan yang dihasilkan pada proses produksi botol gelas di Indonesia tidak jauh berbeda dengan dampak yang ditimbulkan perusahaan sejenis. Dampak lingkungan proses produksi botol di Hungaria dan Meksiko (Tabel 3) menunjukkan bahwa pemanasan global, penipisan lapisan ozon, dan hujan asam yang diakibatkan dari proses produksi botol gelas. Hal ini dikarena pada proses produksi botol gelas memerlukan energi yang lebih besar dibandingkan dengan botol PET, maka dampak lingkungan yang dihasilkan botol gelas lebih besar dibandingkan dengan botol PET.

Tabel 3. Dampak lingkungan proses produksi botol gelas dan PET

Dampak Lingkungan	Botol gelas	Botol PET
Pemanasan Global (GWP 100) (kg CO ₂ eq.)	851	175
Penipisan Lapisan Ozon (kg CFC ⁻¹¹ eq.)	0,000011	0,000006
Hujan Asam (k mol H ⁺ eq.)	0,15	0,03
Eutrofikasi (kg O ₂ eq.)	18,7	8,1

Sumber: Malik (2004)

Dampak Sosial dan Ekonomi

Pada tahap proses produksi botol gelas dan daur-ulang *cullet*, diprakirakan dapat menciptakan kesempatan kerja bagi masyarakat lokal sehingga dapat meningkatnya pendapatan bagi masyarakat. Peningkatan pendapatan yang terjadi hanya terbatas pada peningkatan pendapatan tenaga kerja. Walaupun peningkatan pendapatan masyarakat melalui penyerapan atau penerimaan tenaga kerja tidak besar, namun diprakirakan dapat menciptakan kesempatan kerja bagi masyarakat dan mendorong terciptanya peluang usaha bagi masyarakat sekitar. Siklus hidup botol gelas dapat melibatkan pekerja, hal tersebut menyebabkan semakin meningkatnya kesejahteraan masyarakat akibat adanya daur-ulang gelas.

Penanggulangan cemaran lingkungan yang terjadi selama siklus hidup botol gelas dapat dilakukan dengan cara penanganan botol bekas minuman teh dengan baik, sehingga tidak terjadi kerusakan *printing*, cacat botol, atau pecah yang dapat menurunkan kelayakan penggunaan kembali (*refillable*) botol bekas. Di tingkat konsumen, segala jenis botol gelas bekas seharusnya dikumpulkan melalui pengumpul dan pendaur-ulang, sehingga akan diolah menjadi *cullet*, kemudian menjadi bahan baku proses produksi botol gelas. Masyarakat dihimbau atau disosialisasikan untuk menyimpan botol gelas bekas dan diberikan atau dijual ke pemulung atau penampungan bank sampah terdekat.

Di negara maju, manajemen botol gelas bekas, atau kemasan lainnya telah dilakukan dengan baik. Untuk menurunkan biaya pengumpulan dan transportasi gelas bekas, konsep *machine-to-machine product service systems* (M2M PSS) dengan menyusun program pengumpulan melalui beberapa cara : pengumpulan menggunakan *glass container bin (bottle bank)*, transportasi truk, sistem telekomunikasi, dan perangkat lunak lainnya, sehingga akan menurunkan biaya pengumpulan, transportasi, dan menghemat energi cukup besar, sekaligus menurunkan pencemaran global (GWP) (Lelah *et al.*, 2011). Manajemen limbah padat, termasuk limbah botol gelas perlu dilakukan dengan baik.

Vellini dan Savioli (2009) melakukan simulasi dengan menggunakan Bousted Model menunjukkan bahwa dalam hal penggunaan kembali

(*reuse/recycle*) bahan baku, produksi gelas lebih ramah lingkungan daripada PET. Produksi botol gelas menggunakan 80% reuse *cullet*, sedangkan PET hanya 25% saja. Grims *et al.* (2007) melaporkan botol gelas (*refill*) mungkin lebih efektif biaya pada jangka lama, namun konsumen perlu membudayakan diri untuk menyimpan/mengembalikan botol dengan perolehan insentif.

Analisis Biaya

Pada siklus hidup kemasan membutuhkan biaya, baik untuk membeli bahan baku maupun energi yang digunakan untuk mendukung proses produksi dan transportasi. Biaya yang dibutuhkan selama siklus hidup botol PET dan botol gelas dapat dilihat pada Tabel 4. Botol gelas memiliki siklus hidup yang tidak panjang dan limbah botol gelas tersebut dapat digunakan kembali dalam proses produksi botol gelas yang baru, sehingga pada proses produksi botol gelas baru hanya membutuhkan bahan baku silika murni sekitar 40 - 50% dari total kebutuhan bahan baku. Hal tersebut dapat mengefisiensikan biaya bahan baku. Menurut informasi di lapangan, harga resin PET jauh lebih mahal dibandingkan bahan baku gelas yaitu sebesar Rp 12.150 – Rp 14.400/kg sedangkan harga bahan baku botol gelas sebesar Rp 2267/kg. Kebutuhan bahan baku yang digunakan untuk produksi botol gelas membutuhkan bahan baku sebanyak 300 g/unit dengan biaya sebesar Rp. 680/unit, sedangkan pada produksi botol PET membutuhkan bahan baku sebanyak 28 g/unit dengan biaya sebesar Rp 340 – Rp 403/unit.

Biaya energi yang digunakan untuk produksi botol gelas jauh lebih besar dibandingkan dengan botol PET, hal ini dikarenakan titik cair pasir silika lebih tinggi dari pada plastik. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4, dimana pada proses produksi satu botol gelas membutuhkan biaya produksi sebesar Rp 1700/kg bahan, sedangkan untuk membuat satu botol PET biaya yang dibutuhkan hanya sebesar Rp 410 – Rp 473/kg bahan. Bila dilihat dari biaya bahan baku, energi dan transportasi yang dibutuhkan pada proses produksi gelas jauh lebih besar dibandingkan botol PET, hal tersebut membuat harga jual botol gelas sebesar Rp 2000/unit, jauh lebih mahal dibandingkan botol PET, sebesar Rp 900 – Rp 950/unit (Yani *et al.*, 2013).

Tabel 4. Perbandingan komponen biaya yang dibutuhkan selama siklus hidup botol gelas dan botol PET

Komponen biaya	Botol Gelas 280 mL (Rp/botol)	Botol PET 600 mL (Rp/botol) ^{a)}
Kebutuhan bahan baku	300 g/botol	28 g/botol
Biaya dan transportasi bahan baku	680	340-403
Harga Jual botol gelas	2000	900-950
Biaya transportasi	50	20
Energi pada proses produksi botol	970	50
Biaya produksi produksi (bahan baku energy dan transportasi) (Rp/kg)	1700	410-473
Harga jual limbah botol (Rp/kg)	1000	3000

Keterangan: ^{a)}Yani *et al.* (2013)

Pada proses penanganan limbah kemasan, biaya yang dibutuhkan untuk menangani limbah botol PET jauh lebih besar dibandingkan botol gelas, hal ini dikarenakan banyaknya tahapan yang dibutuhkan untuk daur-ulang limbah botol PET. Harga jual limbah botol PET jauh lebih besar dibandingkan botol gelas, yaitu sebesar Rp 3000/kg sedangkan limbah botol gelas sebesar Rp 1000/kg, hal tersebut dikarenakan kualitas limbah botol PET lebih baik dibandingkan botol gelas.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Daur hidup botol gelas berbentuk *cycle*, mulai dari produksi botol gelas, industri minuman teh, konsumen, daur-ulang gelas (*cullet*), dan kembali ke produksi botol gelas. Analisis inventori pada proses produksi dan daur-ulang botol gelas menunjukkan bahwa kebutuhan bahan baku gelas mencapai 300g/unit dan energi cukup tinggi. Limbah botol gelas (*cullet*) digunakan kembali sekitar 40-50% dari total bahan baku pada produksi botol gelas. Pada industri minuman teh, penggunaan botol gelas bekas dapat diisi-ulang (*refill*) hingga 20 kali sebelum menjadi limbah gelas (*cullet*).

Analisis dampak lingkungan dari proses produksi botol gelas menunjukkan bahwa cemaran udara dan air masih memenuhi baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan, kecuali debu dan SO₂. Produksi botol gelas dapat menghasilkan dampak lingkungan yang cukup besar terhadap pemanasan global, hujan asam dan eutrofikasi.

Analisis biaya proses produksi dan daur-ulang botol gelas cukup besar karena membutuhkan bahan baku lebih banyak, keperluan energi yang sangat besar untuk mengolah bahan baku pasir silika dan *cullet*, dan biaya transportasi produk yang lebih tinggi, serta biaya daur-ulang *cullet*, sehingga harga botol gelas relatif mahal. Namun demikian, dari sisi dampak lingkungan, penggunaan botol gelas lebih ramah lingkungan dari pada plastik.

Saran

Pada pengamatan *Life Cycle Assessment* (LCA) diperlukan kecermatan dalam perhitungan biaya daur-ulang botol gelas (*cullet*) dari tingkat pemulung, lapak, dan pabrik gelas. Kebutuhan energi untuk daur-ulang botol gelas masih sulit dilakukan, karena keterbatasan informasi dari produsen.

DAFTAR PUSTAKA

Arvanitoyannis IS. 2008. ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines. Chap3. In Waste Management for the Food Industries. Elsevier Inc.
Ayres RU. 1995. Life cycle analysis: A critique. *Res, Conserv and Recycl.* 14 :199-223.

Barboza ES, Lopez DR, Amico SC, Ferreira CA. 2009. Determination of a recyclability index for the PET glycolysis. *Res Conserv and Recycl.* 53 : 122–128.
Baumann H dan Tillman AM. 2002. The Hitchhiker's Guide to LCA. Chalmers University of Technology. Goteborg. Sweden.
Coles R, Mc.Dowell D dan Kirwan MJ. 2003. *Food Packaging Technology.* London: Blackwell Publishing.
Corbitt, R.A., 2007. *Standard handbook of Environmental Engineering.* 2nd edition. Tokyo: McGraw Hill Co.
Drive RB. 2006. *Life Cycle Assessment: Principles and Practice.* National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S Environmental Protection Agency, Ohio.
Edwards DW dan Schelling, J. 1999. Municipal waste life cycle assessment Part 2: transport analysis and glass case study. *Trans icheme (77):* 259-274.
Grimes HG, Seager TP, Theis TL, Powers SE. 2007. A game theory framework for cooperative management of refillable and disposable bottle lifecycles. *J Clean Prod.* 15:1618-1627.
ISO 14040. 1997. Environmental Management - Life Cycle Assessment- Principle and Framework. Stockholm.
Lelah A, Mathieux F, dan Brissaud D. 2011. Contributions to eco-design of machine-to-machine product service systems: the example of waste glass collection. *J Clean Prod.* 19: 1033-1044.
Madival S, Auras R, Singh SP, Narayan R. 2009. Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. *J Clean Prod.* 17: 1183–1194.
Malik AB. 2004. Comparative LCA soft drink containers and their respective waste management system in Hungary and Mexico. [Thesis] www.uni-miskolc.hu [20 Desember 2012].
Mattson B dan Ulf S. 2003. *Environmentally-Friendly Food Processing.* Cambridge: Wothead Publishing Limited.
Neri P, Olivieri G, dan Falconi F. 2007. Life Cycle Assessment for the preparation of an Environmental Product Declaration (EPD) of Cerelia natural mineral water packaged in PET bottle 1.5l and Glass bottle 1l, LCA-lab SRL, doc. RT.02_Rev.02, 1 Giugno 2007, pp.1-67, Bologna.
Nessi S, Rigamonti L, dan Grosso M. 2012. LCA of waste prevention activities: A case study for drinking water in Italy. *J Environ Mgmt.* 108 : 73-83

Vellini M dan Savioli M. 2009. Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. *Energy*. 34: 2137–2143.

Yani M, Warsiki E, dan Wulandari N. 2013. Penilaian daur hidup botol PET (*polyethylena terephtalate*) pada produk minuman . *J Bumi Lestari* 13(2) : 307-317.