

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sebelum memahami tentang plastik maka terlebih dahulu dijelaskan tentang polimer. Dalam hal ini plastik merupakan bagian yang tak terpisahkan dari polimer. Selain itu banyak material polimer berbeda yang lain seperti karet (*rubbers*), serat (*fibers*) dan lainnya. Semua material tersebut termasuk kategori polimer.

2.1. Pengertian polimer dan plastik

Polimer adalah sebuah molekul besar yang terbentuk dari pengulangan molekul-molekul yang lebih kecil atau monomernya. Molekul ini bergabung membentuk rangkaian yang sangat panjang. Dengan demikian berat molekul dari polimer sangat besar. Plastik mempunyai jangkauan (*range*) berat molekul rata-rata antara 10.000 hingga 1.000.000. Dengan demikian plastik merupakan polimer dengan berat molekul yang besar dan dapat dikatakan bahwa semua plastik merupakan polimer sedangkan polimer belum tentu plastik (*Bill Mayer: 1997*).

Untuk memenuhi kebutuhan yang luas dari penggunaan polimer, ada sub-kelompok polimer yang termasuk klasifikasi umum ini. Sangat sedikit dari polimer dasar (umumnya dikenal sebagai resin) yang diproses atau digunakan sendiri dan kebanyakan plastik adalah campuran dari polimer dan aditif sehingga dihasilkan sifat yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu. Dengan demikian secara sederhana dapat dijelaskan dalam pernyataan dibawah ini:

plastik = polimer + aditif

Plastik dapat didefinisikan sebagai material berbahan dasar-polimer dimana yang dapat digabungkan dengan satu atau lebih zat aditif. Plastik terbagi menjadi dua bagian besar yaitu *thermoplastics* dan *thermosetting*. *Thermoplastic* adalah jenis plastik yang apabila terkena suhu dan berubah bentuknya, jika dipanaskan kembali akan dapat dibentuk seperti semula. Termasuk ke dalam jenis ini adalah *Polyvinyl Chloride*, *Polyethylene*, *Polypropylene*, *Acrylonitrile butadiene-styrene*, *Polystyrene*, *Nylon*, *Polycarbonate* dan lainnya. Sedangkan *thermosetting* adalah jenis plastik yang apabila terkena suhu dan berubah bentuknya, jika dipanaskan

tidak dapat kembali menjadi bentuk semula. Termasuk jenis ini adalah *Epoxy, Phenolic, Polyester, Urea, Melamine* dan lainnya.

Unsur yang paling banyak ditemukan pada plastik adalah karbon, hidrogen, nitrogen, nitrogen, oksigen, klorin, flor dan brom. Beberapa unsur ini sangat berbahaya ketika berdiri sendiri tetapi menjadi inert pada saat bercampur membentuk polimer organik. Jenis-jenis polimer ini mulai dari polietilena, poliester, polistiren, polipropilena, dan juga polivinyl chlorida ini kebanyakan terdapat sebagai limbah plastik setelah dalam masa penggunaan terlihat pada Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2: Polimer Umum

Polimer	Jenis Penggunaan	Masa Pakai
<i>High Density polyethylene</i> (PE-HD)	Pengemasan & film, botol, <i>tubes</i> , gelas, mainan, tanki, drum, krat susu & bir, pembungkus kabel, pipa, tangki bahan bakar, botol atau kotak plastik	2 tahun 30 tahun
<i>Low Density Polyethylene</i> (PE-LD,PE-LLD)	film, plastik pembungkus, kantong, penutup plastik, mainan, pelapis, wadah plastik, pipa irigasi,	2 tahun 5 tahun 20 tahun
<i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET)	botol, pengemasan makanan, pita rekaman, karpet, penguat ban kendaraan, serat.	5 tahun 10 tahun
<i>Polypropylene</i> (PP)	Wadah plastik mentega dan yoghurt, pembungkus makanan, plastik pembungkus, penutup botol, kotak aki dan komponen kendaraan bermotor, komponen elektrikal	5 tahun 10 tahun 15 tahun
<i>Polystyrene</i> (PS)	Aplikasi pembungkus, wadah produk susu, piring dan cangkir, peralatan elektrikal, pita kaset	5 tahun 10 tahun
<i>Polyvinylchloride</i> (<i>unplasticised</i> PVC-U) (foamed PVC-E) (<i>plasticized</i> PVC-P)	PVC-U , bingkai pintu dan jendela, saluran, pipa drainase & penyedia air, jas hujan PVC-E komponen bahan bangunan PVC-P lantai, insulasi kabel, kantong dan tubes kesehatan, sepatu, plastik pembungkus, pembungkus makanan, pipa untuk proses makanan dan susu, pembungkus bahan kimia	50 tahun 50 tahun 5 tahun

Sumber: UNEP 2002

Jadi dalam membahas tentang plastik maka tidak lepas dari pembahasan masalah zat aditifnya yang dipakai. Karena tanpa zat aditif plastik tidak dapat berdiri sendiri. Dengan kata lain bahwa untuk dapat dijadikan sebuah produk dan dapat dipakai, polimer membutuhkan berbagai zat aditif. Dalam hal ini, polimer tidak berbeda dengan baja atau kaca, dimana nama umum mencakup beberapa formula yang berbeda. Penggunaan zat-zat aditif, seperti *stabilizer* untuk menangkal panas, cahaya atau kandungan oksigen dalam udara, dipakai untuk memperpanjang umur produk atau untuk penggunaan tertentu (contoh lembaran pembungkus makanan, kusen, pipa dan lainnya).

2.1.1. Pengertian resin dan *compound*

Resin dapat disebut juga hasil dari proses polimerisasi. Resin atau polimer murni ini biasanya belum dapat langsung digunakan. Sebelum produk-produk akhir plastik dibuat, maka biasanya dibentuk dulu bahan plastik setengah jadi atau yang disebut *compound*, yaitu suatu produk senyawa atau campuran hasil proses *compounding* yang di dalamnya terjadi proses fisika. Jadi penambahan aditif pada resin akan membentuk *compound* yang akhirnya dicetak atau dibentuk menjadi produk akhir. Dengan demikian *compounding* dapat didefinisikan sebagai proses pencampuran untuk mencapai kehomogenan antara resin dengan zat-zat lainnya yang diperlukan (Patrick: 2004)

2.1.2. Pengertian Resin PVC

Sebenarnya singkatan dari PVC mempunyai dua arti tergantung dari konteks mana kata tersebut muncul.

- a. *Polyvinyl Chloride* adalah homopolimer dari vinyl chloride
- b. Merupakan bagian dari keluarga plastik berbahan dasar *polyvinyl chlorida* dan atau kopolimer dari vinyl chloride

Secara fisik PVC merupakan butiran halus berwarna putih dengan berat molekul bervariasi tergantung pada aplikasi akhir yang akan digunakan. Sifat fisik tersebut dapat diatur atau dikendalikan pada saat pembuatan PVC itu sendiri, dengan mengatur proses polimerisasi maka didapat sifat fisik yang bervariasi, seperti berat molekul rata-rata (*Average Molecular Weight*), densitas dan

sebagainya. Sifat-sifat ini sangat berkaitan erat dengan sifat fisik pada produk akhir yang akan digunakan.

Secara kimia PVC merupakan polimer berbahan dasar hidrokarbon –chlorin. PVC adalah material polimer sintetis (atau resin), yang dibentuk dari gabungan monomer *vinyl chloride* (VCM) yang berulang dengan rumus $\text{CHCl}=\text{CH}_2$. Jadi PVC mempunyai struktur yang sama seperti polietilen kecuali adanya kehadiran klorin. Klorin dalam PVC mengandung 57% dari berat total resin murni. 35% klorin dari elektrolisis kloroalkali berakhir di PVC. PVC murni merupakan material yang kaku dan secara mekanis bersifat keras, cukup tahan terhadap perubahan cuaca, air dan bahan kimia, penghantar listrik yang buruk sehingga cocok sebagai bahan insulasi kabel, tetapi tidak stabil terhadap cahaya dan panas. Panas dan sinar ultraviolet dapat menyebabkan hilangnya klorin dalam bentuk hidrogen klorida (HCl). Hal ini dapat dihindari melalui penambahan *stabilizer* (*Green Paper of Environmental Issue of PVC: 2000*).

PVC relatif tidak stabil terhadap cahaya dan panas. Adanya ketidakstabilan terhadap panas ini menyebabkan rantai ikatan carbon dan klorin menjadi tidak stabil juga sehingga dapat terlepas. Klorin yang terlepas ini dapat membentuk reaksi menjadi *Hidrogen Chloride* (HCL). Cahaya atau panas inilah yang dapat menginisiasi reaksi terjadinya pelepasan radikal klorin ingá membentuk senyawa HCL (Billmeyer: 1984).

Dilihat dari sifat mekanis, PVC dapat dibentuk melalui penambahan zat aditif dengan berat molekul kecil yang bercampur dengan susunan polimer. Penambahan ini dalam jumlah yang bervariasi menghasilkan material dengan sifat beragam yang sangat penting dan membuat penggunaan PVC meluas dalam berbagai aplikasi.

Pada plastik PVC polimernya selalu dihubungkan dengan zat aditif, yang mungkin ada dalam jumlah yang cukup besar. Contohnya penggunaan *plasticizer* dalam beberapa material lunak PVC. Di antara jenis plastik, PVC terkenal akan variasi dan batasan sifat yang luas melalui perencanaan formula dari komposisi masing-

masing bahan untuk tujuan atau penggunaan tertentu. PVC merupakan salah satu jenis polimer yang paling populer dan serbaguna. Kegunaannya hampir tak terbatas mulai dari bahan insulasi, gasket, mainan, pembungkus, pipa, alat-alat rumah tangga dan lain sebagainya. (*Titow: 1990*).

Dalam beberapa dekade terakhir, konsumsi PVC telah meningkat tajam. Beberapa alasan kenapa PVC meningkat penggunaannya karena alasan berikut ini:

- harganya yang murah
- mempunyai tingkatan yang luas dalam perancangan
- mudah diproses
- dapat digunakan pada bermacam aplikasi
- relatif stabil terhadap sinar ultraviolet
- pada produksinya membutuhkan energi dan sumber daya yang lebih rendah (*European Commission: 2004*)

2.1.3. Pembuatan PVC

PVC dihasilkan dari dua jenis bahan baku utama: minyak bumi dan garam dapur (NaCl). Minyak bumi diolah melalui proses pemecahan molekul yang disebut *cracking* menjadi berbagai macam zat, termasuk etilena (C₂H₄), sementara garam dapur diolah melalui proses elektrolisa menjadi natrium hidroksida (NaOH) dan gas klor (Cl₂). Etilena kemudian direaksikan dengan gas klor menghasilkan etilena diklorida (CH₂Cl-CH₂Cl). Proses pemecahan (*cracking*) molekul etilena diklorida menghasilkan gas vnyil klorida (CHCl=CH₂) dan asam klorida (HCl). Akhirnya melalui proses polimerisasi, yaitu penggabungan senyawa-senyawa monomer (*vnyil chloride*), dihasilkan molekul raksasa dengan rantai yang panjang yang disebut polimer, yaitu PVC berupa bubuk halus berwarna putih. Masih diperlukan satu langkah lagi untuk mengubah resin PVC menjadi berbagai produk akhir yang bermanfaat (*Nass: 1988*).

Penampakan resin PVC sangat mirip dengan tepung terigu. Dan resin PVC memang dapat dianalogikan seperti tepung terigu: keduanya tidak dapat digunakan dalam bentuk aslinya. Resin PVC juga harus diolah dengan

mencampurkan berbagai jenis zat aditif hingga dapat menjadi berbagai jenis produk yang berguna dalam kehidupan sehari-hari.

2.1.4. Pengertian dan Pembuatan PVC Compound

Compound PVC adalah resin PVC yang telah dicampur dengan berbagai aditif yang masing-masing memiliki fungsi tertentu, sehingga siap untuk diproses menjadi produk jadi dengan sifat-sifat yang diinginkan. Sifat-sifat yang diinginkan meliputi warna, kefleksibelan bahan, ketahanan terhadap sinar ultra violet (bahan polimer/plastik cenderung rusak jika terpapar oleh sinar ultra violet yang terdapat pada cahaya matahari), kekuatan mekanik, transparansi, dan lain-lain. PVC dapat direkayasa hingga bersifat keras untuk aplikasi-aplikasi seperti pipa dan botol plastik, lentur dan tahan gesek seperti pada produk sol sepatu, hingga bersifat fleksibel/lentur dan relatif tipis seperti aplikasi untuk *wall paper* dan kulit imitasi. PVC dapat juga direkayasa sehingga tahan panas dan tahan cuaca untuk penggunaannya di alam terbuka. Dengan segala keluwesannya, PVC cocok untuk jenis produk yang nyaris tak terbatas dan setiap *compound* PVC dibuat untuk memenuhi kriteria suatu produk akhir tertentu.

Istilah PVC *Compound* digunakan untuk menyatakan produk lanjutan dari PVC murni. Proses utama berupa pencampuran dilakukan dalam berbagai tingkatan. Pencampuran itu sendiri meliputi berbagai macam bahan kimia baik padat maupun cair. Tergantung susunan zat-zat tersebut maka dapat dihasilkan produk setengah jadi (PVC *Compound*) yang bersifat elastis seperti karet (*rubbery flexible*) atau produk yang bersifat kaku (*rigid high impact*), dapat berupa plastik bening seperti kristal (*crystal clear*) atau tidak tembus cahaya (*opaque*). Bahkan dapat juga dibuat plastik yang beracun (*toxic*) maupun yang tidak beracun (*non toxic*), plastik yang mudah terbakar (*flammable*) atau yang tidak mudah terbakar (*inflammable*) dan lain sebagainya (Patrick: 2004).

Satu tahap penting sebelum resin PVC bisa ditransformasikan menjadi berbagai produk akhir adalah pembuatan *compound* yaitu proses *compounding*. *Compounding* merupakan istilah yang digunakan untuk proses pembuatan PVC

compound. Pada proses ini, penambahan zat-zat aditif bertujuan untuk mencapai produk yang diinginkan sifat-sifat fisiknya (*physical properties*).

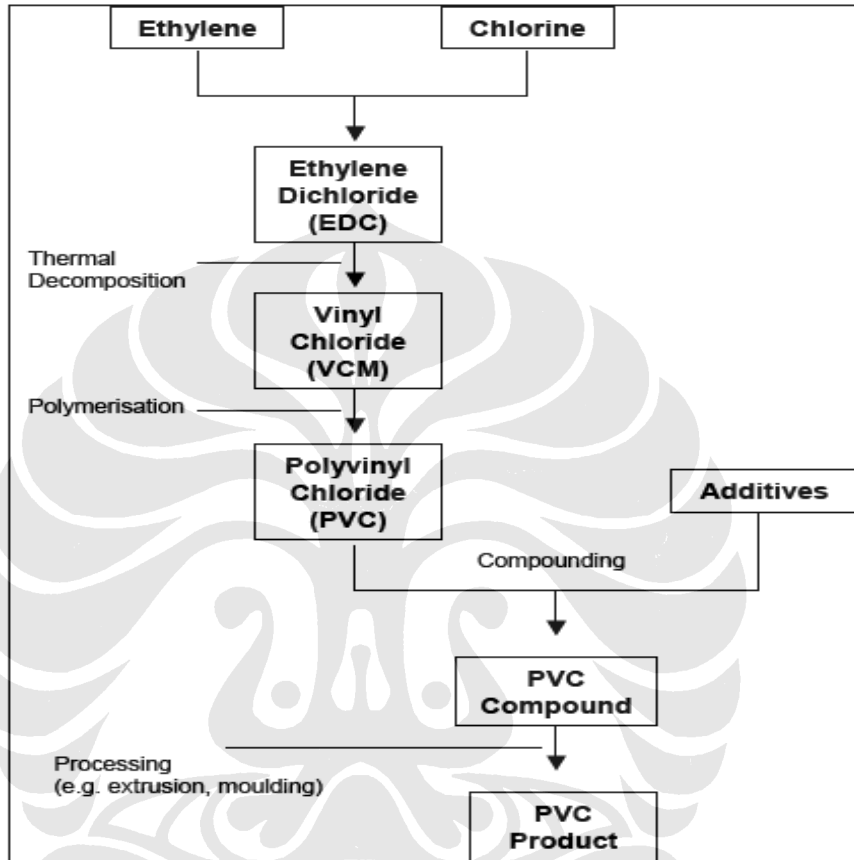
Compound PVC dapat diproses dengan berbagai cara untuk memenuhi ratusan jenis penggunaan yang berbeda, misalnya:

- a. PVC dapat diekstrusi, artinya dipanaskan dan dialirkan melalui suatu cetakan berbagai bentuk, sehingga dihasilkan produk memanjang yang profilnya mengikuti bentuk cetakan tersebut, misalnya produk pipa, kabel dan lain-lain.
- b. PVC juga dapat dilelehkan dan disuntikkan (cetak-injeksi) ke dalam suatu ruang cetakan tiga dimensi untuk menghasilkan produk seperti botol, *dash board*, *housing* bagi produk-produk elektronik seperti TV, komputer, monitor dan lain sebagainya.
- c. Proses *calendering* menghasilkan produk berupa film dan lembaran dengan berbagai tingkat ketebalan, biasanya dipakai untuk produk alas lantai, *wall paper*.
- d. Dalam teknik cetak-tiup (*blow molding*), lelehan PVC ditiup di dalam suatu cetakan sehingga membentuk produk botol, misalnya.
- e. Resin PVC yang terdispersi dalam larutan juga dapat digunakan sebagai bahan pelapis/coating, misalnya untuk lapisan bawah karpet dll.

Dengan formula yang sesuai *PVC compound* dapat dipakai untuk berbagai aplikasi seperti dibawah ini (EC, 2004)

- Insulasi Listrik (*electrical insulation*)
- Selang kesehatan (*medical tubing*),
- Pembungkus makanan (*food wrap*)
- Penutup Lantai (*flooring*)
- *Furniture* (*outdoor furniture*)
- Saluran listrik (*electrical conduit*)
- Selang air (*gardening hose*)
- Botol (*bottles*)

Secara umum proses pembuatan PVC mulai dari bahan baku, pembentukan monomer, proses polimerisasi, PVC *compounding* hingga menjadi sebuah produk akhir dapat dilihat pada Gambar 2 yaitu diagram alir proses pembuatan menyeluruh dari PVC



Gambar 2. Diagram alir proses proses menyeluruh dari PVC

Sumber: Life Cycle Assessment PVC, European Commission 2004

2.1.5. Zat Aditif PVC

Semua jenis plastik, termasuk bio-plastik, membutuhkan penggunaan zat-zat aditif sebagai bahan pembantu proses, meningkatkan propertis material (*reinforce*), mengurangi biaya material, dan memberikan karakter khusus seperti kestabilan terhadap panas dan cahaya, fleksibilitas, ketahanan terhadap panas, dan memberikan warna yang estetik. Namun karena sifat kerapuhan dan sensitif terhadap panas, PVC merupakan polimer yang paling banyak menggunakan aditif dibandingkan dengan polimer lainnya.

Secara garis besar zat-zat aditif tersebut digolongkan sebagai berikut:

1. Bahan pemelastis (*plasticizers*)
2. Bahan penstabil (*stabilizer*)
3. Pelumas (*lubricant*)
4. Bahan pembantu pemrosesan (*processing aid resin*)
5. Bahan pengisi (*fillers*)
6. Pewarna (*colorants*)
7. Lain-lain (*antistatic agents, ultraviolet absorbers, anti blocking agents, smoke control agents, flame retardants, fungicides, odorants*)

Semua zat aditif tersebut ditambahkan dengan jumlah tertentu tergantung dari jenis produk yang diinginkan. Volume penambahan zat aditif ini dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini:

Tabel 3 Jenis aditif plastik

Material	Konsentrasi
Antioksidan	1%
Material pengisi (<i>Fillers</i>)	40%
Material tahan benturan	10%
Pigmen	5%
<i>Plasticizers</i>	40%
<i>Stabilizers</i>	5%
Bahan pengahambat nyala api	15%

Sumber: UNEP 2002

Zat aditif pada Tabel 3 di atas dapat terlepas dari susunan polimer baik selama penggunaan maupun selama pembuangan. PVC merupakan polimer dengan penggunaan yang luas dari aditif baik jumlah maupun jenisnya, dimana *stabilizer* dan *plasticizer* merupakan zat yang paling penting. *Lead stabilizer* paling banyak digunakan. *Stabilizer* jenis *cadmium* sudah banyak dipakai di beberapa aplikasi tetapi sekarang penggunaannya sudah banyak diganti. Alternatif pengganti yang sekarang banyak dipakai adalah *lead stabilizer*. Penggunaan yang terpenting dari keduanya untuk aki. Tapi *stabilizer* yang sering dipakai dalam pembuatan PVC adalah *lead stabilizer*.

1. *Stabilizers*

Stabilizer adalah campuran kompleks yang dibuat untuk mencegah degradasi dari panas atau cahaya matahari. *Stabilizer* ini juga ditambahkan ke dalam PVC polimer untuk mencegah degradasi panas dan perubahan hidrogen klorida selama proses. Semua PVC dijaga kestabilannya melalui penambahan *stabilizer*.

PVC sangat khas dengan kandungan aditif dan klorinnya yang tinggi, yang akan menyebabkan racun bagi lingkungan melalui seluruh siklus hidupnya. *Vinyl chloride* telah diketahui bersifat karsinogenik terhadap manusia. PVC melepaskan dioksin dan polutan organik lain selama masa pembuatan dan pembuangannya dan sangat sulit sekali untuk *di-recycle* karena kandungan klorin dan zat aditifnya. Lebih jauh lagi zat-zat aditif ini tidak terikat di dalam plastik secara kimia sehingga dapat terlepas dan bermigrasi (*Greenpeace: 2002*).

Produk-produk PVC termasuk produk yang tahan lama. Maka dari itu produk PVC pada akhir pemakaian menjadi masalah karena adanya *stabilizer* ini. Dari beberapa pendapat yang ada, dampak lingkungan dari timbal yang dipakai pada produk PVC hanya tertuju pada bagian akhir-pakai (*end-of-life*). Selama fase penggunaan, tidak ada dampak lingkungan potensial yang teridentifikasi jika produknya digunakan sesuai dengan petunjuk yang benar. Paparan terhadap timbal di dalam industri plastik dapat terjadi selama pencampuran aditif dan selama proses pembersihan. Di Eropa sendiri penggunaan *stabilizer* jenis timbal mulai dikurangi 15% tahun 2005 dan pengurangan seluruhnya pada tahun 2015.

2. *Plasticizer*

Plasticizer merupakan campuran organik yang memisahkan rantai polimer sehingga meningkatkan keelastisitasannya. *Plasticizer* yang pertama digunakan pada produk vinyl adalah *tricresyl phosphate*. Namun sekarang penggunaannya mulai tergantikan dengan golongan ester karena cenderung menyebabkan penurunan suhu yang berakibat terbentuknya partikel yang keras pada saat proses *compounding*. Kandungan zat aditif yang ditambahkan ini jumlahnya bervariasi dengan aplikasi akhir produk, namun rata-rata penggunaannya mencapai 30% berat (*Billmeyer: 1984*).

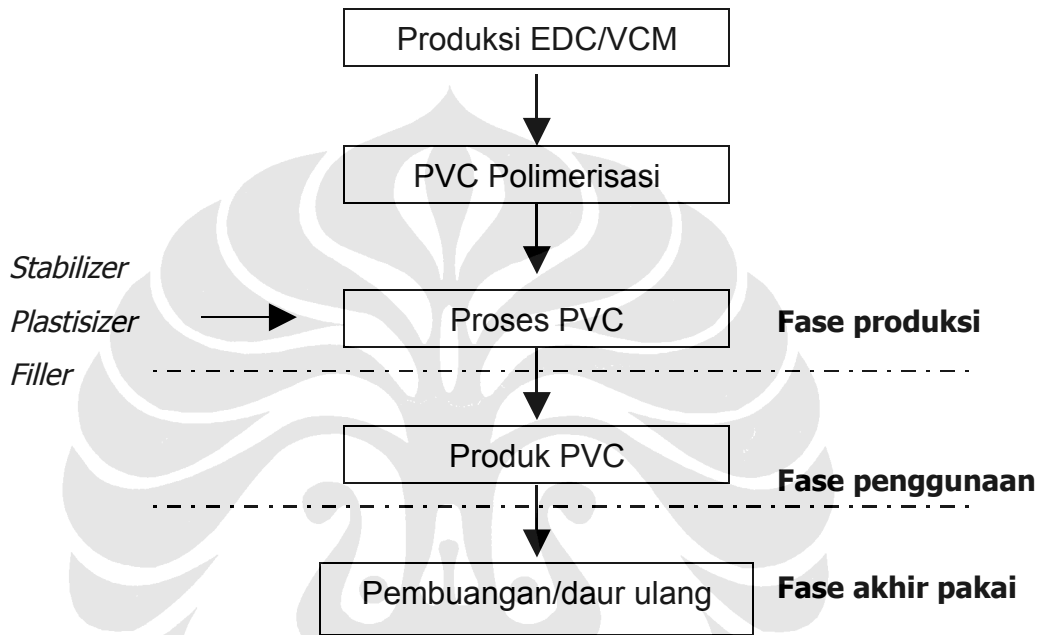
Plasticizers yang paling umum digunakan pada industri plastik adalah campuran senyawa *phthalate*, khususnya yaitu *dioctyl phthalate* (DOP) atau di-(2-ethylhexyl) *phthalate* (DEHP). Sebagian besar industri pembuatan DOP ini dipakai sebagian besar untuk industri PVC. Di Eropa sendiri hampir 90% *plasticizer* yang dihasilkan diserap pemakaiannya oleh industri PVC. Alasannya bahwa DOP ini memberikan sifat dan karakteristik yang bagus sebagai *plasticizer* (Haryono: 2006).

Diantara 300 jenis *plasticizers* yang telah dibuat di dunia ini, *dioctyl phthalate* (DOP) atau di-(2-ethylhexyl) *phthalate* (DEHP) ini merupakan *plasticizer* yang paling banyak digunakan. Masalah yang kemudian muncul adalah *plasticizer* komersial ini yaitu DOP dan DEHP khususnya pada aplikasi mainan anak dan alat kesehatan, dapat terlepas keluar dari plastik PVC dan dapat membahayakan kesehatan manusia. DOP dapat bermigrasi pada laju yang konstan dari produk plastik ke lingkungan. DOP diketahui dapat berada pada air, tanah dan juga makanan. Maka dari itu DOP dikenal sebagai kontaminan lingkungan yang menyebar luas. Sedangkan untuk DEHP dari penelitian pada tikus percobaan di laboratorium ternyata DEHP telah diketahui bersifat *carcinogenic* sehingga menyebabkan gangguan sel kanker. Namun memang untuk dapat berdampak terhadap manusia masih menjadi perdebatan para ilmuwan (Kresnadi: 2006).

Plasticizer di PVC 90% adalah *phtalat*. Produksi senyawa ini di dunia hampir sebagian besar dipakai pada plastik PVC dan sisanya dipakai pada plastik –plastik lainnya. Penggunaan *phtalat* adalah 90% dalam pembuatan PVC. Beberapa plastik mengandung bahan penghambat nyala api (*flame retardants*) sebagai zat aditif. Produk yang terkenal adalah oksida antimony (*antimony oxides*), pospat ester (*phosphate esters*), MCCP medium parafin rantai klor (*medium chain chlorinated paraffins*) atau BFRs penghambat nyala api senyawa bromida (*brominated flame retardant*). Bahan kimia brominated paling banyak digunakan sebagai bahan penghambat nyala api untuk plastik. BFRs digunakan khususnya pada *electrical* dan peralatan elektronik, *coatings*, onderdil otomotif, *coated textiles*, mebel, bahan bangunan dan pembungkus.

2.1.6. Siklus Hidup PVC

Produk-produk PVC diketahui mempunyai dampak yang spesifik yang tidak dapat dijabarkan dalam bentuk yang umum. Tetapi daur hidup PVC dapat digambarkan dalam fase yang berbeda agar terlihat daur hidup dari awal hingga akhir. Daur hidup PVC yang umum tidak pernah ada karena variasi pada perhitungan *compound* untuk daur hidup bagian lebih spesifik.



Gambar 3. Tahapan daur hidup PVC

Sumber: Life Cycle Assessment PVC, European Commission 2004

2.2. Kajian Bahaya PVC Pada Tiap Fase

Pada Gambar 3 terlihat tahapan daur hidup PVC. Dari tiap fase ini PVC menimbulkan bahaya bagi manusia dan lingkungan mulai dari awal proses pembentukan, penggunaan dan pada akhir penggunaan atau pembuangan. Dari siklus hidup PVC dapat terlihat adanya pembentukan dan pelepasan zat-zat berbahaya ke lingkungan. Dengan menganalisis setiap fase, yaitu pembentukan, penggunaan dan pembuangan dari siklus PVC maka akan semakin terlihat jelas bahaya yang ditimbulkannya. Pada proses pembentukan klorin sebagai bahan baku untuk *ethylene dichloride* (EDC) menimbulkan bahaya seperti emisi dioksin dan merkuri. EDC diproses menjadi senyawa monomer (VCM) hingga menjadi

senyawa polimer (PVC) melalui polimerisasi juga menimbulkan bahaya yaitu pajanan terhadap senyawa VCM.

Tabel 4. Gambaran Bahaya Daur hidup PVC

Fase	Bahaya
1. Bahan Baku	<ul style="list-style-type: none"> • Kebocoran gas klorin di tangki penyimpanan (<i>toxic gas</i>)
2. Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Emisi udara dan air limbah yang dikeluarkan dari fasilitas produksi <i>ethylene dichloride</i> dan <i>vinyl chloride monomer</i> • Dioksin dan senyawa <i>organochlorine</i> lain sebagai senyawa by-product dari produksi <i>ethylene dichloride</i> dan <i>vinyl chloride monomer</i> • Pajanan VCM terhadap pekerja (efek ke manusia) • Pembakaran limbah produksi (ke udara)
2. Penggunaan	<ul style="list-style-type: none"> • Migrasi zat aditif (<i>stabilizer dan plasticizer</i>) yang terlepas dari produk PVC (manusia dan lingkungan) • Kebakaran peralatan yang melepaskan gas dioksin (ke udara)
3. Pembuangan	
a. <i>Recycling</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ragam aditif membuat daur ulang campuran produk PVC menjadi sulit dan kualitas produk hasil <i>recycling</i> tidak bagus • Laju <i>recycling</i> sangat rendah (biasanya hanya 1%) • Mengkontaminasi plastik dan produk lain • Tidak mempengaruhi total permintaan bahan baku plastik dan jumlah vinyl yang diproduksi setiap tahun
b. <i>Landfill</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Pembakaran di <i>landfill</i> melepaskan gas dioksin (ke udara) • Lindi (<i>leacheate</i>) zat aditif, logam berat dan dioksin (ke air tanah)
c. Pembakaran	<ul style="list-style-type: none"> • Pembentukan dioksin dari pembakaran PVC (ke udara) • Pelepasan HCL, logam berbahaya dan dioksin (ke udara) • Abu pembakaran yang tersisa di <i>landfill</i> mengandung logam berat dan dioksin (tanah dan air)

Sumber: Belliveau, 2004

Dari Tabel 4 yang memperlihatkan bahaya PVC mulai dari proses pembentukan EDC, VCM, polimerisasi PVC, penggunaan hingga pasca penggunaan PVC terlihat bahwa semua proses tersebut memberikan bahaya terhadap manusia dan lingkungan dengan adanya pelepasan senyawa kimia yang berbahaya.

2.2.1. Bahan Baku dan Penunjang Pembuatan PVC

Bahan baku dasar dan penunjang pada pembuatan senyawa PVC adalah ethylene dan klorin serta katalis dari golongan logam. Kedua bahan baku ini ada dalam bentuk gas, sehingga pada saat penyimpanan kedua senyawa ini harus sesuai dengan persyaratan penyimpanan bahan baku gas. Karena apabila terjadi kebocoran akan menimbulkan bahaya bagi manusia dan lingkungan. Pada fase bahan baku pembuatan PVC dampak bahayanya dapat dicegah dengan memperhatikan proses penyimpanan dan karakteristik dari material yang akan diproses tersebut. Hal ini misalnya penerapan standar operasi yang sesuai dengan prosedur pada pekerja pabrik, monitoring pengukuran gas, dan alat pendeteksi gas klorin (*chlorine gas detector*). Dalam lingkungan kerja jika sistem berjalan sesuai dengan ketiga hal tersebut, maka dampak bahaya dari gas klorin terhadap para pekerja dapat dicegah.

2.2.2. Bahaya Proses Produksi PVC

Beberapa bahaya yang muncul selama proses pembentukan klorin, senyawa *ethylene dichloride*, VCM sampai pada proses polimerisasi PVC adalah terlepasnya senyawa-senyawa seperti merkuri, klorin, EDC, VCM, dan beberapa produk samping lainnya yang dikaitkan terhadap bahaya lingkungan.

2.2.1.1. Emisi Merkuri

Emisi merkuri dapat terjadi pada proses pembuatan klorin dan sintesis *vinyl chloride* dari *acetylene*. Data yang sah berapa volume emisi merkuri dari proses pembentukan acetylene tidak dapat diketahui secara pasti. Pada proses pembuatan klorin, ada emisi merkuri yang terlepas ke produk, air limbah dan udara yang keluar dari proses produksi. Merkuri dalam produk ini ada pada klorin, hidrogen dan larutan soda kaustik. Masing-masing kandungan merkuri adalah 0,001-0,1 g/t klorin; 0,002-0,15 mg/m³ hidrogen dan 0,1 g/t kaustik soda.

Merkuri juga terlepas pada air limbah proses. Kandungan merkuri dalam air limbah ini adalah sebesar 0,1 g per ton klorin yang terbentuk. Pada udara dari proses produksi, volume merkuri yang terlepas sekitar 1,5-2 g per ton klorin yang terbentuk. Sedangkan pada *landfill*, merkuri yang terbang bersama lumpur filter, katalis dan residu hasil dari proses purifikasi sebanyak 16 g per ton klorin (Totseh, 1992).

2.2.1.2. Emisi Klorin

Emisi klorin terjadi pada saat proses pembentukan klorin. Klorin termasuk senyawa dengan bentuk gas dan uap. Maka, konsentrasi gas yang terlepas tidak boleh melebihi 5 mg/m³ jika kandungan gas yang dipakai di dalam proses sebesar 50 g/ jam atau lebih. Biasanya persyaratan kadar klorin pada pabrik pembuatan klorin tidak boleh melebihi 1-6 mg/m³. Dengan demikian emisi klorin harus di bawah 1 g/t klorin yang dihasilkan.

2.2.1.3. Emisi 1,2 *Dichloroethane* (EDC)

Senyawa ini termasuk karsinogenik. Biasanya konsentrasi senyawa ini berdasarkan pertimbangan toksikologi. Namun data yang valid untuk konsentrasi senyawa ini tidak bisa didapatkan. Konsentrasi EDC pada ventilasi gas tidak boleh melebihi 5 mg/m³. Emisi EDC yang dikaitkan dengan proses pembuatan PVC biasanya dari proses *oxychlorination*. Emisi aktual dari EDC sekitar 10-30 ton per tahun. Di atmosfer EDC terdekomposisi lebih lambat dari VCM. Waktu paruhnya di atmosfer diperkirakan 3-4 bulan.

2.2.1.4. Emisi *Vinyl Chloride Monomer*

Bahaya dari senyawa ini diperkirakan memberikan dampak dalam jangka waktu yang lama karena sifat akut toksisitasnya rendah. Senyawa ini termasuk karsinogenik (penyebab kanker hati). Emisi *vinyl chloride* dapat terjadi dari proses pembuatan VCM dan polimerisasi PVC. Udara yang digunakan untuk menarik senyawa polimer dari residu monomer harus dalam jumlah besar sehingga diperoleh produk polimer dengan sedikit kandungan monomernya. Emisi rata-rata dari senyawa VCM yang terlepas dari proses pembuatan monomernya sekitar 1-2 g/ ton produk VCM.

Hal yang dikhawatirkan dari proses polimerisasi adalah masih adanya monomer yang tersisa karena proses polimerisasi berlangsung tidak sempurna. Monomer ini masih ada terikat dalam polimer PVC atau produk, ikut keluar dari proses ke udara dan juga air limbah sisa proses produksi. Setelah PVC terbentuk, untuk membersihkan sisa monomer ini dipakai sejumlah udara kering. Hasil dari monomer ini berbeda-beda untuk tiap jenis produk PVC yang dihasilkan. Biasanya dari ventilasi udara keluar rata-rata konsentrasi VCM adalah 5 mg/m^3 udara. Selain emisi VCM pada proses pembentukan polimerisasi, emisi ini juga dapat terjadi pada air yang dipakai dalam proses, air yang digunakan pada udara pembakaran, air pembersih senyawa EDC dan juga uap kondensat hasil produksi.

2.2.1.5. Produk samping (*By-product*) proses pembuatan *vinyl chloride*

Pada proses *oxychlorination* terbentuk beberapa senyawa produk samping. Produk samping ini juga bisa terbentuk dari pemecahan senyawa EDC. Senyawa-senyawa ini biasanya dalam bentuk cair dipakai sebagai bahan pelarut. Beberapa senyawa ini adalah *chloroform*, *EDC*, *carbon tetrachloride*, *chlorobutadiene*, *1,1 dichloroethane*, *1,1,2-trichloroethane*, *dichlorobutane*, dan *tetrachloroethane*.

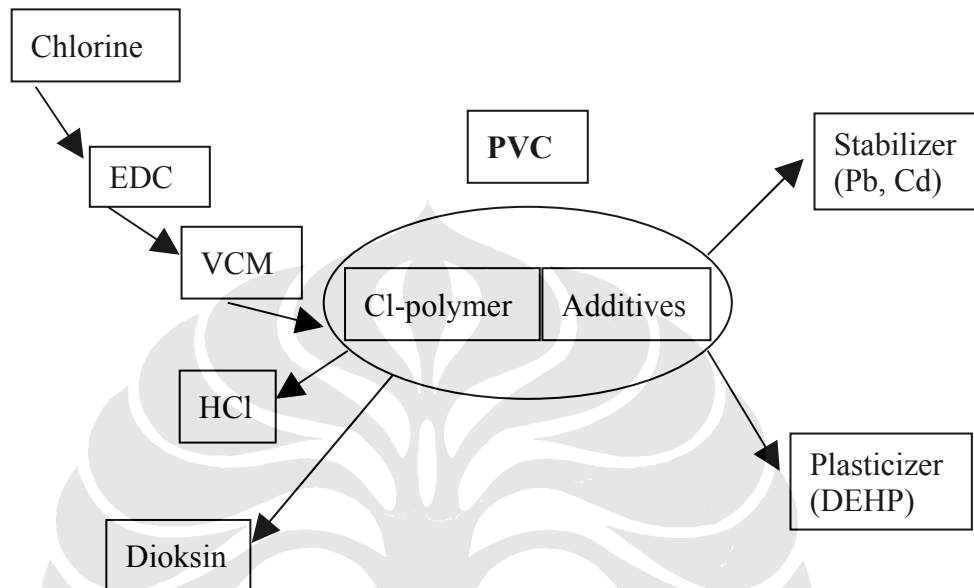
2.2.3. Bahaya Penggunaan PVC

Bahaya yang ditimbulkan produk-produk PVC adalah zat aditifnya yang dapat terlepas ke lingkungan sekitar. Zat aditif ini seperti phthalate (*plasticizer*), kadmium, timbal (*stabilizer*) dan *hydrogen chloride* (HCL) dapat bermigrasi keluar dari produk PVC jika terjadi kontak langsung secara oral khususnya pada mainan anak dan jika terkena suhu yang tinggi akan terjadi kerusakan sifat produk (*thermal degradation*). Senyawa yang terlepas karena adanya degradasi panas pada produk PVC adalah HCl dalam bentuk gas.

2.2.4. Bahaya Pasca Penggunaan PVC

Bahaya produk PVC pada masa pembuangan adalah jika dilakukan pembakaran maka akan menghasilkan suatu senyawa beracun yaitu gas dioksin. Produk-produk PVC diketahui berkaitan erat dengan adanya senyawa dioksin melalui proses pembakaran. Dioksin merupakan salah satu kelompok senyawa kimia

yang terbentuk pada saat molekul klorin berikatan dengan molekul karbon selama proses pembakaran atau proses produksi pada suatu industri. Gambar 4 memperlihatkan senyawa yang berbahaya pada tiap siklus PVC.

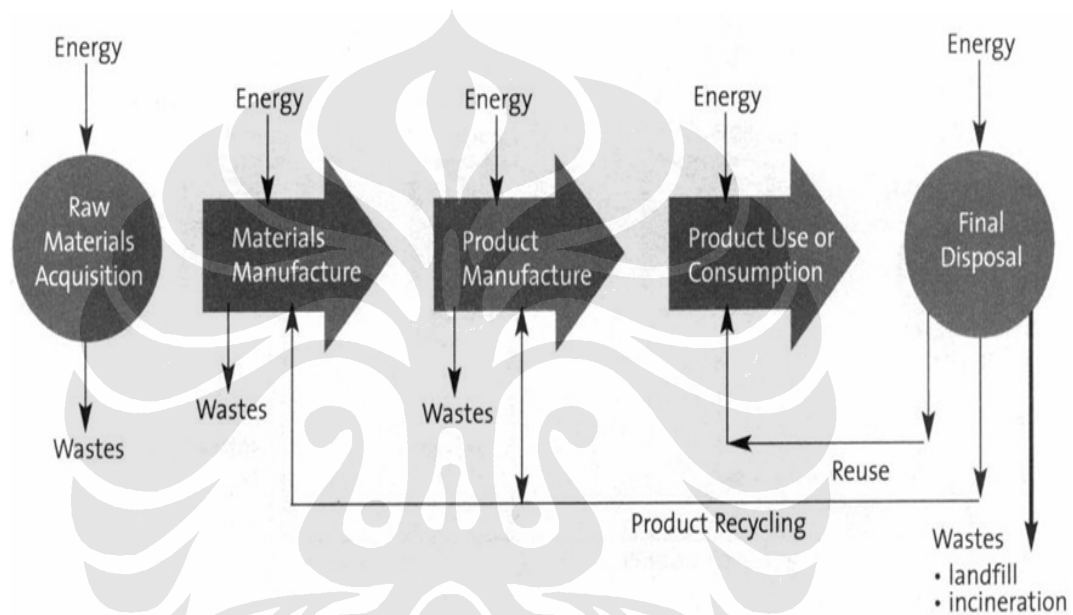


Gambar 4. Zat berbahaya pada siklus hidup PVC

Dari Tabel 4 dan Gambar 4 terlihat jelas bahwa mulai dari awal proses pembentukan klorin, EDC, VCM, penggunaan produk hingga pasca penggunaan PVC, senyawa-senyawa kimia yang berbahaya seperti merkuri, klorin, *vinyl chloride monomer*, pthalate, kadmium, timbal, HCl dan dioksin. Semua senyawa kimia tersebut termasuk senyawa kimia yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Dari awal proses terjadi pelepasan senyawa klorin, EDC dan VCM. Dengan kandungan klorin murni 57%, resin PVC ditambah dengan zat aditif yang berbahaya seperti kadmium, timbal, dan pthalate yang dapat terlepas pada fase penggunaan. Sedangkan pada fase pembuangan, gas HCl dan dioksin dapat terlepas apabila plastik mengalami pembakaran.

Hal ini juga diperjelas dari Gambar 5 yang menunjukkan limbah proses dari tiap-tiap tahapan pembentukan PVC dari awal proses hingga akhir pembuangan (*final disposal*). Pada akhir pembuangan produk PVC dipakai prinsip penggunaan

kembali (*reuse*) dan daur ulang (*recycle*). Daur ulang pada produk PVC biasanya memakai mekanikal dan *chemical recycling*. Proses daur ulang secara mekanikal ini biasanya hasil yang didapat tidak banyak. Bahan produk yang direcycle dikembalikan sebagai bahan baku proses, dengan memperhatikan kualitas bahannya. Sedangkan teknologi *chemical recycling* membutuhkan tahapan proses dengan adanya unit tersendiri. Namun kendala yang umum diketahui bahwa proses daur PVC sangat susah dilakukan karena beragamnya zat aditif yang dipakai (*Eroupean Commission, 2004*).



Gambar 5 Siklus produk PVC

2.3. Kajian Analisis Siklus Hidup PVC

Kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) tidak bertujuan untuk mengevaluasi dampak dari bahaya dan pajanan dengan data terkait seperti analisis resiko (*Risk Assessment*). LCA mengidentifikasi aspek lingkungan terpenting dan tahapan dari siklus hidup (*life cycle*), sedangkan analisis resiko menganalisis bahaya dan pajanan dari informasi yang terkait. Analisis resiko bertujuan menentukan semua kemungkinan dampak merugikan yang akan terjadi berhubungan dengan aktivitas spesifik antropogenik, jadi tidak menghitung sampai keseluruhan siklus hidup.

LCA bertujuan untuk mengukur dan menentukan pengaruh masing-masing tahapan dari siklus hidup suatu sistem produk yang kompleks terhadap dampak lingkungannya. LCA juga menentukan perbandingan antara tahapan siklus hidup yang sebanding. Misal fase penggunaan produk PVC dan produk alternatifnya. Walaupun LCA tidak memberi tahu apakah produk itu aman atau tidak, tapi paling tidak kajian ini menyediakan informasi terpenting terkait dengan nilai prakiraan dampak yang didapat dari sebagian atau semua siklus hidup produknya yang berhubungan dengan kategori dampak yang telah ditentukan (*European Commission: 2004*).

Dengan demikian LCA merupakan alat yang berguna dalam (*European Commission: 2004*):

- a. Mendukung pemahaman dari proses penting di dalam suatu siklus hidup.
- b. Mengidentifikasi point yang lemah dan optimisasi siklus hidup yang potensial, sehingga lebih jauh akan menurunkan dampak lingkungan dari masing-masing produk.
- c. Mengidentifikasi perhitungan untuk mengurangi dampak lingkungan secara efektif.
- d. Mencegah pemindahan masalah lingkungan pada tahapan lain di dalam siklus hidup.

Berikut kesimpulan umum dari PVC dan siklus hidupnya yang dapat diambil (*European Commission, 2004*):

- a. Dalam rantai siklus hidup PVC, produksi *intermediate* (produksi antara) terutama dari proses awal hingga pembentukan VCM, memainkan peranan utama dalam hal efek terhadap lingkungan.
- b. Dari perspektif siklus hidup PVC, produksi *stabilizer* dan *plasticizer* juga memegang peranan penting dalam memberikan dampak terhadap lingkungan.
- c. Beberapa teknologi yang ada, seperti misalnya *mechanical recycling* berdasarkan pelarut yang dipilih untuk *merecycle* PVC dengan cara yang sangat ekonomis. Tetapi bagaimanapun juga, saat ini hanya sedikit sekali limbah PVC pasca penggunaan yang berhasil *direcycle*.

- d. Disamping *mechanical recycling*, ada cara lain untuk *recycle* produk PVC yaitu dengan cara kimia (*chemical recycling*)
- e. Berbeda dengan logam, untuk pasar *recycle* plastik untuk saat ini belum mapan. Tetapi di masa mendatang perpaduan antara teknologi *mechanical and chemical recycling* merupakan strategi yang akan diminati untuk mengoptimasi dampak lingkungan dari PVC dan materi pesaing dari produk PVC.
- f. Para pengguna biasanya tidak menerima produk hasil *recycle* dikarenakan masalah *aesthetic quality* (misalnya warna atau bagusnya permukaan produk) walaupun secara sifatnya sama.

Perbandingan LCA harus dilihat dari tingkat aplikasi daripada tingkat bahan atau material. Tergantung dari jenis produk, dampak lingkungan selama pemakaian atau *end-of-life* merupakan hal yang lebih penting daripada dampak lingkungan dari produksi material itu sendiri. Berikut adalah LCA dari PVC dan produk pesaing (*European Commission, 2004*).

- a. Untuk frame atau list jendela (*windows*), salah satu aplikasi PVC terpenting, studi yang tersedia menyimpulkan tak ada yang unggul dalam hal material yang dipilih. Hal ini dapat dikatakan juga bahwa tidak ada material yang mempunyai keuntungan untuk kategori dampak standarnya. Hal potensial yang paling menjanjikan untuk meminimalkan dampak lingkungan produk *frame* jendela ini adalah melalui optimisasi perancangannya. Dengan kata lain pemilihan material tidak terlalu penting, sepanjang material tersebut menyediakan kualitas sistem yang dibutuhkan.
- b. Untuk aplikasi pada atap (*roofing*) penelitian yang ada menyimpulkan bahwa kualitas yang tinggi dari sistem (konduktifitas panas per tebal permukaan lembaran atap) mempunyai pengaruh yang besar dalam hal pengurangan dampak lingkungan. Penelitian juga menjelaskan beberapa larutan polimer cenderung mempunyai dampak lingkungan yang rendah dibandingkan dengan bahan pesaing sejenis.
- c. Untuk hasil pada aplikasi pipa sangat heterogen. Beberapa penelitian menjelaskan keuntungan untuk pipa bahan padat atau serat semen,

tetapi beberapa penelitian juga memperlihatkan keuntungan pemakaian pipa bahan PVC atau PE dan beberapa penelitian yang lain menyimpulkan bahwa bahan material yang dipakai tidak berperan penting selama tidak dipilih material besi.

- d. Pada aplikasi mainan (*toys*), resiko potensial dihubungkan dengan penggunaan atau pemakaian yang salah (*misuse of toys*) seperti terhirup, terhisap atau tertelan, merupakan hal yang paling utama. Tetapi bagaimanapun juga, LCA tidak dapat menganalisis resiko ini secara akurat, maka dari itu hal ini harus juga dianalisis dengan alat atau metoda lain seperti analisis resiko.
- e. Untuk aplikasi alat rumah tangga (*consumer goods*) sangat sedikit sekali data yang tersedia. Tidak ada kesimpulan umum dari perbandingan material untuk aplikasi ini yang dapat diperoleh.
- f. Untuk aplikasi pengemasan (*packaging*) terjadi penurunan pemakaian. Botol dari plastik PVC cenderung mempunyai dampak yang lebih berbahaya dibandingkan dengan botol dari plastik PET. Tetapi bagaimana pun juga di Eropa sendiri, pasar botol PVC sudah mengalami penurunan.
- g. Pada sektor transportasi (*automotive*) beberapa penelitian LCA pembandingan termasuk pada penggunaan alternatif PVC telah dilakukan. Bagaimanapun juga penelitian ini sangat rahasia dan data-datanya tidak bisa didapatkan.
- h. Pada aplikasi kabel (*cables*) untuk bahan PVC ini bisa dikatakan tidak ada pesaing. Maka dari itu LCA untuk aplikasi kabel sangat sedikit. Proses *recycling* dilakukan terutama dalam hal nilai ekonomi dari *copper* dan aluminium yang didapat. Pilihan berdasarkan kelayakan ekonomi ini ada untuk *recovery* PVC.

Dari kajian LCA oleh Mark Rossi pada tahun 2004 tentang PVC dan produk bahan lainnya menjelaskan kritiknya terhadap beberapa kajian LCA tentang PVC dan bahan lainnya. Salah satu pendapatnya adalah zat aditif pada PVC, yaitu *plasticizer*. Zat aditif ini digunakan sebagian besar pada produk PVC. Beberapa LCA menyatakan bahwa zat aditif ini sangat berbahaya bagi lingkungan dan dapat terlepas dari produk-produk PVC. Namun sebenarnya *phthalate* ini

menyebarkan luas di lingkungan dan hampir sebagian besar orang di negara berkembang mengandung zat ini pada tubuhnya. Perhitungan jumlah zat ini yang terlepas dan masuk ke dalam tubuh manusia sangat sulit untuk dihitung. Beberapa plastik alternatif seperti PE, PP dan PS hampir tidak membutuhkan *plasticizer* untuk membuat produknya menjadi fleksibel.

Namun dilihat dari segi daur ulang (*recycling*) produk terlihat bahwa plastik PVC sangat sedikit yang berhasil didaur ulang. Jumlah yang sedikit ini menggambarkan bahwa plastik PVC adalah plastik dengan urutan terakhir dalam hal daur ulang. Tabel 5 menunjukkan urutan plastik ditinjau dari segi daur ulangnya.

Tabel 5. Daftar Plastik dari Aspek Daur Ulang

1	PE, PP
2	POM, <i>Polyamide</i> , TPU
3	ABS , <i>Polymethylmethacrylate</i> , SMA, ASA, SAN
4	PET, PBT, <i>Polycarbonate</i>
5	TPE
6	<i>Polyurethane</i>
7	<i>Sheet Molding Compound</i>
8	Elastomer
9	PVC
10	<i>Mixture of Incompatible Materials</i>

Sumber: Rossi, 2004

Tabel 5 menyatakan urutan plastik berdasarkan sifat daur ulangnya. Dari Tabel 5 di atas terlihat bahwa plastik PVC berada pada tingkatan terbawah dari segi kemudahan untuk di daur ulang. Plastik PVC setingkat lebih baik dibandingkan campuran material yang dapat di daur ulang, sedangkan plastik ABS berada di bawah plastik PE dan PP. Di dalam kajian ini juga dinyatakan bahwa di Eropa plastik jenis PVC yang berhasil didaur ulang hanya 3% saja. Kesulitan untuk mendaur ulang plastik PVC ini karena terkait teknologi yang dipakai hanya *mechanical recycling*. Sedangkan teknologi yang lain seperti *chemical recycling* masih sedikit diterapkan karena pemakaian bahan pelarut dengan harga mahal.

Beberapa produk PVC yang umum dipakai mempunyai tahapan bahaya baik pada saat proses pembuatan hingga pada tahap pembuangan. Produk ini termasuk produk keras dan lunak dari PVC. Bahaya produk ini biasanya harus diperhatikan pada saat masa penggunaan.

2.3.1. Fase pembuatan produk PVC

1. Pipa

Pipa yang terbuat dari PVC digunakan untuk keperluan pipa pembuangan limbah cair, untuk air bersih, untuk drainase dan untuk keperluan lainnya. Biasanya pipa yang digunakan mengandung PVC hingga 90% berat.

Dampak lingkungan: dampak lingkungan yang ditimbulkan dari pipa jenis PVC bervariasi dengan komposisi dan aplikasinya. Beberapa dampak yang sudah diteliti antara lain kontribusinya terhadap efek rumah kaca, pembentukan *fotochemical*, *eutropication*, polusi air dan udara, eko-toksik perairan dan toksisitas pada manusia. Dibandingkan dengan dengan pipa dari besi, dampak lingkungan pipa PVC lebih besar, karena konsumsi energi yang lebih besar selama proses pembentukannya.

2. Kabel

Biasanya kabel yang terbuat dari PVC digunakan untuk kabel instalasi dengan voltase rendah (1 kv). Keuntungan menggunakan PVC pada aplikasi ini adalah fakta bahwa kabel PVC susah untuk terbakar, tahan terhadap sinar matahari dan terbungkus baik secara mekanik. Kabel biasanya diproduksi dengan cara ekstrusi.

Dampak lingkungan: Jumlah energi khusus yang dibutuhkan proses ekstrusi sebesar 3-5 MJ per kg kabel. Selama pembuatan ini, emisi yang terlepas adalah *volatile organic compound* (VOC) dan logam berat dari stabiliser dan pigment.

2.3.2. Fase penggunaan produk PVC

Ini merupakan fase pertengahan dari pengkajian siklus hidup PVC. Pada fase penggunaan ini, tiap-tiap produk PVC yang dipakai akan dilihat dampaknya

terhadap manusia dan lingkungan sekitarnya. Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan produk-produk PVC adalah terlepasnya zat aditif yang bermigrasi dari produk PVC ke lingkungan sekitar.

2.3.2.1. Bangunan dan Gedung

Dampak yang ditimbulkan oleh penggunaan produk PVC di berbagai aplikasi bangunan masih terus diteliti sampai saat ini. Memang belum ada panduan dasar yang mengarahkan bahwa penggunaan PVC pada beberapa sektor bangunan yang utama dapat membahayakan kepada manusia dan lingkungan dari pada penggunaan alternatif selain dari PVC.

Penggunaan PVC terbesar pada aplikasi bangunan adalah pada pipa, insulasi kabel dan penutup lantai (*floor covering*) (Russel Smith, 1998). Bahaya lingkungan yang mungkin timbul dari penggunaan PVC pada aplikasi bangunan dan gedung berasal dari adanya pemakaian zat aditif yang akan keluar ke lingkungan sekitarnya, dari emisi yang terlepas pada saat terjadinya kebakaran dan dari pembuangan limbah sisa penggunaan produk PVC pada bangunan. Zat aditif ini antara lain penahan panas (*heat stabilizers*), pemelastis (*plasticizers*), dan bahan penghambat nyala api (*flame retardant*).

Pada bingkai atau list jendela (*windows frame*) diketahui masa pakai produk ini diperkirakan 30 tahun, bahkan ada yang memperkirakan hingga 40 tahun. Pada fase penggunaan yang demikian lama hal itu berarti punya dampak yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan untuk waktu yang lebih pendek. Namun hal ini juga bergantung dari sifat pemakaian. Selama fase penggunaan dibandingkan dengan produk sejenis, *frame* dari PVC lebih menguntungkan dari segi penggunaan energi dan perawatannya.

Pada fase penggunaan, lantai (*flooring*) PVC dipakai dengan berbagai macam variasinya. Dampak lingkungan yang muncul pada fase ini adalah sebagian besar karena emisi *Volatile Organic Compound* (VOC) yang terkandung dalam zat adhesif yang dipakai. Jika kebakaran, maka akan terbentuk emisi zat-zat karsinogenik. Selama masa pembersihan, *phthalate* dapat terlepas ke udara.

2.3.2.2. Penggunaan Kabel PVC

Selama fase penggunaan pada kabel, diketahui bahwa *phthalate* dapat terlepas ke udara dan tanah. Kemungkinan terburuknya adalah pelepasan gas dioxin ke udara karena kebakaran kabel-kabel ini. Jika penggunaan PVC pada pipa dan penutup lantai mempunyai alternatif lain selain PVC, maka pada penggunaan PVC di kabel hampir tidak ada alternatif pengganti secara komersial yang dapat bertahan dan biaya yang paling efektif sebagai pengganti insulasi kabel PVC pada aplikasi bangunan dan gedung. Sampai saat ini memang masih terjadi perdebatan yang panjang tentang masalah dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh senyawa *phthalate*, yaitu senyawa aditif yang paling banyak digunakan dalam produk PVC. Sampai sekarang bukti-bukti tentang dampak bahaya *phthalate* terhadap manusia dan lingkungan masih terus menjadi penelitian. Biasanya kabel PVC menggunakan bahan penghambat nyala api dimana bahan ini memang diperlukan karena sifat *plasticizer* PVC yang mudah terbakar dan juga akan menurunkan kadar klorin pada produk PVC yang lunak. Biasanya jika suatu kabel terbakar maka yang berbahaya bukan tingkat kebakaran yang semakin tinggi, melainkan kandungan asap yang beracun yang keluar dari kabel tersebut yang akan meracuni pernafasan manusia atau pekerja yang menghisapnya.

2.3.2.3. Penggunaan Pipa PVC

Secara lingkungan, PVC bukan pilihan untuk pemakaian pipa. PVC berbahaya sepanjang siklus hidupnya. PVC dalam bentuk apapun, dari lantai sampai mainan hingga ke pipa, mengandung sejumlah zat aditif yang berbahaya ketika terbakar. Senyawa timbal biasanya dipakai sebagai *heat stabilizers*. Bagaimanapun juga karena *stabilizer* ini terdapat di dalam berbagai macam matrik PVC, kehilangan zat aditif ini hanya secara terbatas dan tidak terjadi secara terus menerus. Ekstraksi timbal dari air pipa yang terjadi karena adanya pengaliran air inilah yang menyebabkan stabiliser ikut terbawa. Dari sini dapat ditunjukkan bahwa kadar timbal yang diekstraksi dari pipa oleh aliran air akan berkurang pada nilai yang lebih kecil setelah periode penggunaan pipa tersebut. Dari sini dapat disimpulkan bahwa kemungkinan terlepasnya kandungan timbal ke lingkungan sekitar adalah

sangat terbatas dan membuat kontribusi yang kecil kepada pencemaran lingkungan dibandingkan dengan sumber-sumber yang lainnya.

Di Jepang, pernah terjadi keracunan PCB yang menimbulkan penyakit yang dikenal sebagai *yusho*, akibat masyarakat mengkonsumsi makanan yang diproduksi sebuah pabrik yang memakai pipa PVC untuk mengalirkan minyak goreng. Akibatnya makanan tercemar oleh PCB yang berasal dari pipa PVC. PCB merupakan senyawa *penta kloro bifenil* yang ditambahkan sebagai *satic agent* agar plastik dapat tahan terhadap panas. Tanda dan gejala dari keracunan ini berupa pigmentasi pada kulit dan benjolan-benjolan, gangguan pada perut, serta tangan dan kaki lemas. Sedangkan pada wanita hamil, mengakibatkan kematian bayi dalam kandungan serta bayi lahir cacat. Pengaruh keracunan menahun pada manusia karena PCB, antara lain kematian jaringan hati serta kanker hati. Karena itu, untuk mengurangi bahaya plastik bagi kesehatan maupun lingkungan hidup, maka penggunaan plastik untuk berbagai keperluan dianjurkan sesedikit mungkin (*Healthy Life, 2005*)

Biasanya masa pakai penggunaan pipa PVC cukup panjang yaitu 40 sampai 80 tahun. Penelitian yang berkaitan dengan kemungkinan pelepasan bahan kimia, terutama aditif, selama masa penggunaan sangat jarang sekali. Namun ada penelitian yang menyatakan bahwa pipa yang terbuat dari PVC dapat terjadi seperti kebocoran pada pipa itu sendiri. Biasanya pada pipa yang dipakai air limbah, kebocoran ini dihubungkan dengan peningkatan COD.

2.3.2.4. Mainan Anak

Penggunaan plastik pada mainan anak mulai berkembang dengan pesat sejak tahun 1950, hal ini bersamaan dengan perkembangan pesat plastik berbahan dasar petrokimia. Sampai saat ini plastik yang digunakan pada mainan anak mencapai 80%. Plastik mempunyai banyak kelebihan dibandingkan material konvensional seperti tanah liat, logam, keramik dan kayu. Kelebihan ini antara lain material plastik lebih murah, mudah diproses, dan mempunyai banyak kombinasi warna yang menarik.

Perdebatan yang muncul tentang penggunaan PVC pada mainan anak terfokus pada apakah resiko yang terjadi pada anak dari pajanan zat-zat aditif yang berbahaya yang terlepas selama penggunaan adalah bisa dipakai sebagai jaminan adanya pembatasan atau pelarangan plastik PVC dalam jangka menengah maupun jangka panjang. PVC lunak pada mainan anak mengandung sekitar 50% berat *plasticizer*, terutama ester pthalat, yang secara kimia tidak terikat ke dalam plastik sehingga memungkinkan terlepas atau berpindah. Kajian pada laboratorium menunjukkan bahwa pthalat dapat menyebabkan kanker, bahaya pada sistem reproduksi dan kemungkinan pengganggu kerja sistem hormon (Joel Tickner: 1999)

Para ilmuwan sedikit mengetahui bagaimana *pthalate* dapat mempengaruhi kesehatan anak, dan mengetahui pembuktian secara langsung bahayanya, sebagai hasil dari pajanan pthalat oleh mainan anak yang mengandung PVC lunak. Hal ini sangat mustahil dilakukan tanpa adanya penerapan control secara eksperimen terhadap anak dan mencari efek merugikan sepanjang waktu hidupnya. Hal ini berarti bahwa penelitian secara kohort sangat sulit untuk dilakukan.

Pada saat plastik dipakai, maka selalu ada kemungkinan aditif yang dipakai dapat berpindah ke permukaan produk dan juga media sekitar dalam jumlah yang kecil. Hal ini berarti bahwa perpindahan ini dapat terjadi ke manusia akibat terpajan zat aditif ini. Peristiwa pindah atau terlepasnya dari molekul polimer ini ke permukaan produk dapat bervariasi tergantung pada: jenis plastik, sifat difusi dari aditif yang dipakai pada plastik, waktu kontak, interaksi antara aditif yang berbeda dan jumlah konsentrasi aditif.

2.3.3. Fase *disposal* atau *recycling*

Pada fase ini dihasilkan limbah pasca penggunaan. Proses daur ulang (*recycling*) limbah pasca penggunaan sangat sulit dilakukan karena sudah berbentuk barang sisa pakai dan sudah bercampur dengan jenis plastik lainnya. Pencampuran produk dari berbagai plastik ini idealnya harus dilakukan pemisahan masing-masing plastik terlebih dahulu. Namun PVC produk pada fase ini tidak dibahas

terlalu banyak. Tidak ada hubungan linear antara konsumsi PVC tahunan dengan hasil limbahnya. Hal ini terkait fakta bahwa sebagian besar konsumsi PVC adalah produk tahan lama dengan masa pakai di atas 40-50 tahun atau lebih.

2.4. Industri PVC di Eropa

PVC sudah lama dipakai di beberapa negara-negara Eropa. Peningkatan penggunaan PVC di Eropa ini dimulai pada awal tahun 1960-an. Produksi di Eropa Barat pada tahun 1998 sekitar 5.5 juta ton atau 26% produksi dunia. Rata-rata laju pertumbuhan produksi PVC beberapa tahun terakhir antara 2% hingga 10%, dengan adanya perbedaan tiap wilayah (lebih tinggi di Asia dan lebih rendah di Eropa) dan untuk tiap aplikasi (lebih banyak untuk jenis kaku dan lebih rendah untuk jenis yang fleksibel). Di negara Inggris pemakaian PVC ini menempati urutan pertama dibandingkan dengan jenis plastik lainnya untuk kurun waktu 1970 sampai tahun 1980. Hingga tahun 1980 total pemakaian PVC mencapai 970 ribu ton. Dari Tabel 6 terlihat pemakaian plastik lainnya masih berada di bawah PVC.

Tabel 6. Konsumsi Plastik Utama di Inggris Tahun 1970-1980

Plastik	Ribuan Ton (Ribuan)		
	1970	1975	1980
Polivinylchloride (PVC)	322	630	970
Polyethylene (PE)	318	570	830
Polystyrene (PS)	147	330	530
Polypropylene (PP)	86	210	330
Urea n melamine formal dehyde	90	96	110
Phenol formaldehyde	63	95	100
Polyurethanes	54	95	140
Unsaturated polyesters	42	80	100
Epoxide	9	14	24
Polymethylmethacrylate	17	20	26
Polyamide (nylon)	13	19	37
Saturated polyester	7	13	27
Polycarbonate	0,5	34	66
Polyvinylalcohols	37	46	57
Alkyds	74	80	90

Sumber: *Plastic and the environment* J.J.P Stawdinger, 1984

Dari Tabel 6 di atas terlihat bahwa dalam kurun waktu 10 tahun pemakaian plastik PVC meningkat hingga 3 kali lipat. Plastik polietilena juga mengalami peningkatan pemakaian.

Konsumsi PVC di Eropa termasuk besar. Pada tahun 1984, konsumsi PVC di Eropa barat mencapai hampir 4 juta ton atau sekitar 25% dari total plastik. Sedangkan konsumsi polimer lain seperti PE dan PP masih berada di bawah konsumsi PVC. Konsumsi PVC dan polimer lainnya dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Konsumsi PVC dan Polimer lain tahun 1984

Polimer	PVC		LDPE		HDPE		PP	
	Juta ton	% plastik total	Juta ton	% plastik total	Juta ton	% plastik total	Juta ton	% plastik total
Amerika	3,01	15,1	3,73	18,7	2,67	13,4	2,21	11,1
Eropa Barat	3,88	25,3	3,75	24,3	1,62	10,6	1,81	11,8
Inggris	0,44	18,2	0,51	21,1	0,21	8,7	0,30	12,4
Jerman	1,13	15,2	0,68	9,2	0,63	8,5	0,42	5,7
Jepang	1,21	18,9	1,16	18,1	0,85	13,3	1,23	19,2

Sumber: Titow, 1990

Dari Tabel 7 terlihat bahwa untuk Asia, Jepang termasuk negara dengan konsumsi PVC yang besar. Konsumsi ini melebihi negara Inggris, namun sama dalam hal kuantitas PVC terhadap konsumsi plastik totalnya. Perbandingan pemakaian PVC dan plastik lainnya di Jepang hampir sama jumlahnya dengan pemakain total plastik. Di negara ini yang paling banyak penggunaannya adalah polietilen dengan jenisnya yaitu *high density* dan *low density polythylene*

Selain Inggris, salah satu negara di Eropa yang banyak mengkonsumsi produk plastik PVC adalah Jerman. Mulai tahun 1976, konsumsi untuk produk setengah jadi mengalami peningkatan. Walaupun pada awal tahun 1980-an sempat mengalami penurunan, namun konsumsi PVC hingga akhir tahun 1990-an terus meningkat. Pada tahun 1989 lebih dari 1 juta produk *intermediate* ini dikonsumsi

di Jerman. Tabel 8 menunjukkan jumlah konsumsi PVC di Jerman mulai dari tahun 1976 hingga akhir tahun 1990.

Tabel 8. Produksi PVC dan konsumsi barang PVC setengah jadi di Jerman

Tahun	Produksi Bahan Baku (ton)	Konsumsi Bahan Setengah Jadi	
		Ton	%Produk
1976	965.076	845.690	88
1977	897.433	826.444	92
1978	1.006.265	851.221	85
1979	1.084.804	934.579	86
1980	953.189	843.805	89
1981	918.593	799.666	87
1982	864.372	721.957	84
1983	1.089.856	862.777	79
1984	1.131.926	831.999	74
1985	1.208.314	871.047	72
1986	1.241.865	894.620	72
1987	1.319.838	907.485	69
1988	1.411.513	1.033.705	73
1989	1.339.785	1.013.277	76

Sumber: Totseh 1992

Pada tahun 2000, terhitung statistik yang dihasilkan oleh industri PVC yaitu total pembuatan PVC dan industri hilir (produksi barang jadi), yang mengubah PVC menjadi barang produk siap pakai di rumah dan industri, dinyatakan bahwa di Eropa Barat lebih dari 21.000 perusahaan dengan lebih dari 530.000 pekerja dan pertukaran lebih dari 72 milyar euro. Industri PVC dapat dibagi menjadi 4 grup: penghasil PVC polimer, penghasil *stabilizers*, penghasil *plasticizer* dan PVC *transformer*.

Penggunaan PVC terbesar di Eropa adalah sebesar 57% untuk gedung, kemudian beberapa produk rumah tangga 18% sisanya dipakai di beberapa aplikasi. Tabel 9 di bawah ini memperlihatkan penggunaan PVC di Eropa dan persentase keseluruhan.

Tabel 9. Konsumsi PVC Polimer di Eropa

Penggunaan	Persen (%)	Rata-rata masa pakai (tahun)
Bangunan	57	10 sampai 50
Alat-alat rumah tangga	18	11
Pengemasan	9	1
Elektronik	7	21
Otomotif	7	12
Furniture	1	17
Lainnya	1	2 sampai 10

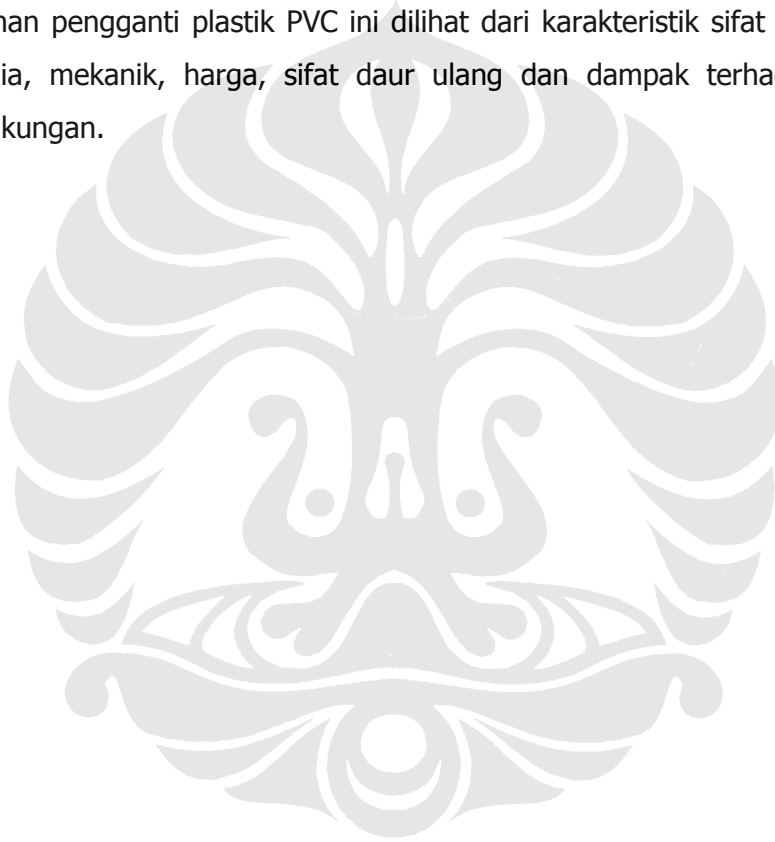
Sumber: *European Commission, 2004*

Dari Tabel 9 di atas terlihat bahwa aplikasi PVC di bidang bangunan menempati urutan paling besar, yaitu hampir 60% dari aplikasi PVC total. Industri penghasil polimer PVC paling banyak berlokasi di Eropa, Amerika Serikat dan Jepang. Kapasitas produksi di negara berkembang tumbuh stabil dengan sangat baik. Konsumsi tahunan di Eropa Barat sedikit lebih besar daripada produksinya dan sejak awal tahun 1990, impor lebih besar daripada ekspor sehingga menyebabkan terjadinya impor bersih sekitar 230.000 ton pada tahun 1998 (pada saat produksi domestik kira-kira 5.5 juta ton). Beberapa perusahaan menjadi satu dengan industri *petrochemical* atau *klorin* dan juga menghasilkan etilena, klorin dan VCM Monomer.

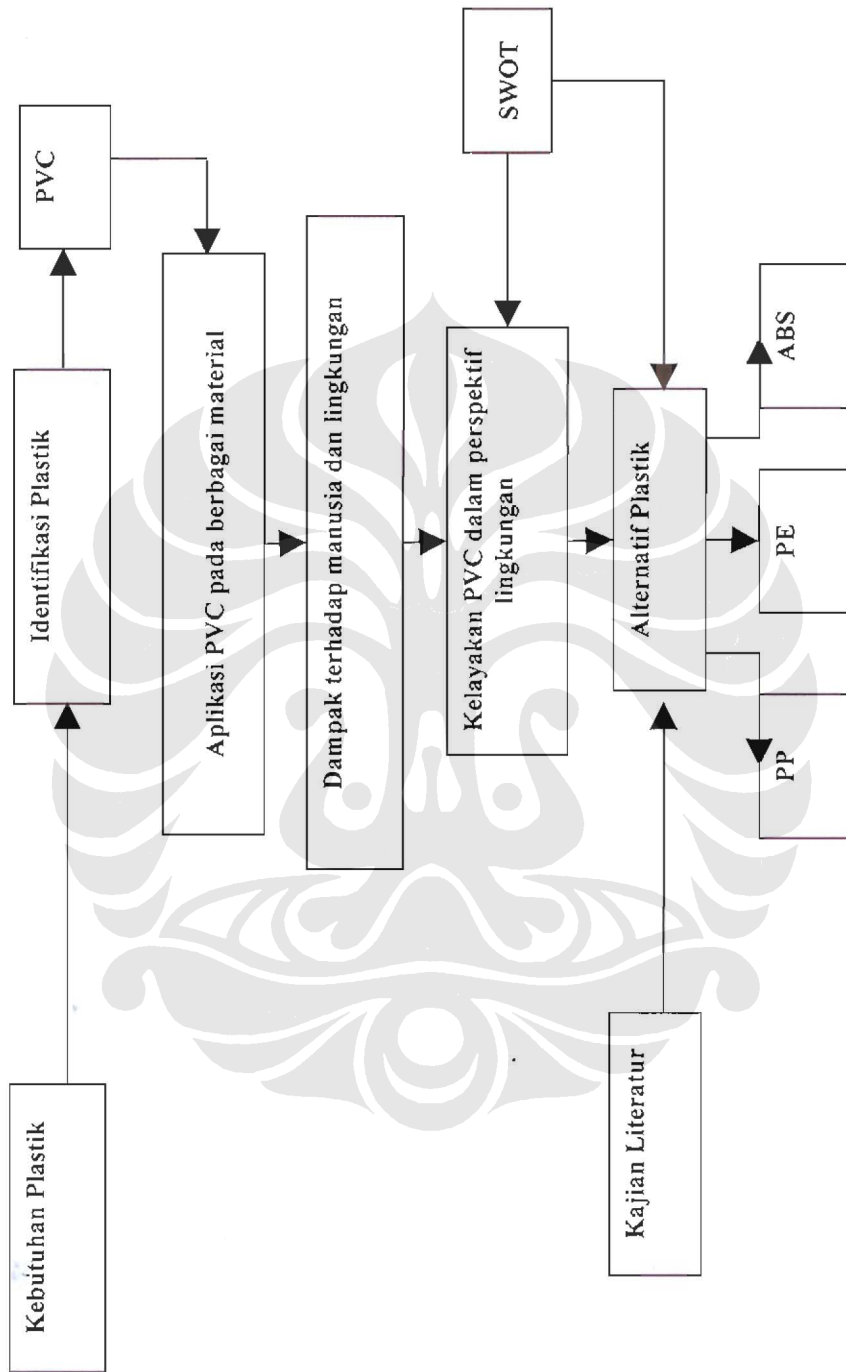
2.5. Kerangka Berpikir

Konsumsi plastik di Indonesia per kapita masih sangat kecil bila dibandingkan dengan negara lain. Kebutuhan dan peluang penggunaan plastik di Indonesia terus mengalami peningkatan. Berbagai jenis plastik dipakai dalam setiap aplikasi. Meningkatnya kebutuhan plastik ini karena adanya pergeseran penggunaan dari bahan non plastik ke bahan plastik. Hal ini karena plastik mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan bahan-bahan non plastik dan lainnya. Salah satu plastik yang dipakai dalam jumlah yang luas adalah plastik PVC, dikarenakan jangkauan produk dan variasinya yang luas. Namun ternyata plastik jenis PVC ini merupakan salah satu material plastik paling berbahaya yang pernah dibuat oleh manusia. Selain karena berbahan dasar

klorin, sebagai sumber dioksin terbesar, plastik PVC juga memakai bahan-bahan aditif sebagai *plasticizer* dan *stabilizer* dalam proses pembuatannya. Bahan-bahan aditif ini sangat berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Siklus hidup PVC dari pembuatan, penggunaan dan pasca penggunaan, telah menimbulkan dampak terhadap manusia dan lingkungan. Oleh karena itu tesis mengenai pemakaian plastik ini, mengkaji apakah masih dapat digunakan atau tidak. Pengkajian ini menggunakan analisis SWOT. Dari hasil analisis SWOT dan kajian literatur dapat dilihat alternatif plastik pengganti PVC. Pengkajian kelayakan dan pilihan pengganti plastik PVC ini dilihat dari karakteristik sifat produk yaitu fisik, kimia, mekanik, harga, sifat daur ulang dan dampak terhadap manusia dan lingkungan.



2.6. Kerangka Konsep



Gambar 6 Kerangka Konsep Penelitian