

SINTESIS, KARAKTERISASI DAN MODIFIKASI BUSA POLIURETAN FLEKSIBEL BERBAHAN BAKU BIOPOLIOL BERBASISKAN MINYAK KELAPA SAWIT DAN MINYAK NABATI LAINNYA: SEBUAH REVIEW

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND MODIFICATION OF FLEXIBLE POLYURETHANE FOAMS USING RAW MATERIALS FROM BIOPOLYOLS BASED ON PALM OIL AND OTHER VEGETABLE OILS: A REVIEW

Neswati^{1*}, Novizar², Syukri Arief³ dan Yusniwati⁴

¹⁾ Jurusan Teknologi Industri Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas

²⁾ Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas

³⁾ Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Andalas

⁴⁾ Jurusan Pemuliaan Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Andalas

Universitas Andalas, Limau Manis, Pauh, Padang 25163

*Email korespondensi: neswati.aulia@gmail.com

Diterima 18-10-2019, diperbaiki 13-11-2019, disetujui 17-11-2019

ABSTRACT

Flexible polyurethane foams is the most produced foam compared to other types of polyurethane foams. The raw material for polyurethane foams is usually derived from petroleum polyols. The decreasing availability of petroleum, it is necessary to find alternative polyurethane foam raw materials from vegetable polyols (biopolyols). The relatively high productivity of palm oil causes the potential of palm oil to be used as raw material for flexible polyurethane foams compared to other vegetable oils. Various formulations and modifications that have been made in synthesizing flexible polyurethane foams from various types of biopolyols are aimed at increasing the usability and to produce flexible polyurethane foams with characteristics close to polyols made from petroleum-based foams.

Keywords: *biopolyol, flexible polyurethane foams, palm oil, vegetable oil*

ABSTRAK

Busa poliuretan fleksibel merupakan busa yang paling banyak diproduksi dibanding dengan jenis busa poliuretan yang lain. Bahan baku busa poliuretan biasanya berasal dari polioli minyak bumi. Semakin berkurangnya ketersediaan minyak bumi, maka perlu dicari alternatif bahan baku busa poliuretan dari polioli nabati (biopolioli). Produktivitas kelapa sawit yang cukup tinggi menyebabkan minyak kelapa sawit cukup potensi digunakan sebagai bahan baku busa poliuretan dibandingkan dengan minyak nabati lain. Berbagai formulasi dan modifikasi yang telah dilakukan dalam mensintesis busa poliuretan fleksibel dari berbagai jenis biopolioli bertujuan untuk meningkatkan daya guna dan untuk menghasilkan busa poliuretan fleksibel dengan karakteristik mendekati busa berbahan baku polioli dari minyak bumi.

Kata kunci: biopolioli, busa poliuretan fleksibel, minyak kelapa sawit, minyak nabati

PENDAHULUAN

Poliuretan merupakan bahan polimer yang mengandung gugus fungsi uretan (-NHCOO-) dalam rantai utamanya. Gugus uretan terbentuk dari reaksi antara gugus isosianat dengan gugus hidroksil (Rohaeti dkk., 2003). Poliuretan telah banyak digunakan pada industri busa fleksibel, busa semi fleksibel, busa kaku, pelapis, perekat, *sealant*, elastomer dan resin (Ashida, 2007). Kattiyaboot dan Thongpin (2016) menyatakan bahwa busa poliuretan fleksibel (PUF) memiliki pasar terbesar dari semua produk poliuretan. Busa PUF banyak digunakan untuk furnitur, kasur, bantal, kemasan, transportasi, dan lain-lain (Kraitape dan Thongpin, 2016)

Selama ini bahan baku poliuretan adalah polioliol dari minyak bumi. Minyak bumi merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui dan ketersediaannya semakin lama semakin berkurang. Sementara itu, ketergantungan manusia terhadap minyak bumi dan produk turunannya sangat tinggi. Oleh karena itu perlu dicari sumber daya alternatif yang dapat menggantikan fungsi minyak bumi untuk memenuhi kebutuhan manusia. Sumberdaya alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku polioliol adalah bahan-bahan yang berbasis karbohidrat, senyawa-senyawa fenol alami seperti tannin dan minyak nabati, namun telah banyak penelitian yang menggunakan minyak nabati sebagai bahan baku polioliol, contohnya minyak kedelai (Campanella dkk., 2009; Khundamri dkk., 2019), minyak kelapa sawit (Chain dan Gan, 1998; Pawlik dan Prociak, 2012), minyak jarak (Ogunleye dkk., 2008; Ogunniyi dan Fakayejo, 1996), minyak lobak (Prociak dkk., 2012), minyak kernel kelapa sawit (Badri dan Ngah, 2015), dan minyak bui (Kraitape dan Thongpin, 2016). Polioliol nabati dapat menggantikan polioliol petrokimia sebagian atau seluruhnya pada pembuatan busa poliuretan fleksibel

(Bernardini dkk., 2015). Salah satu bahan baku polioliol yang cukup banyak tersedia adalah minyak kelapa sawit.

Direktorat Jenderal Perkebunan (2017) menjelaskan bahwa luas pekebunan kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2015 adalah sekitar 11,3 juta Ha dengan produksi sekitar 6,2 juta ton, sedangkan luas perkebunan kelapa sawit Indonesia pada tahun 2017 adalah 12,3 juta Ha dengan produksi sekitar 7,1 juta ton. Pada data dapat diketahui bahwa luas dan produksi kelapa sawit terus meningkat dari tahun ke tahun; kenaikan ini juga diiringi meningkatnya produksi minyak kelapa sawit. Hal ini menunjukkan bahwa minyak kelapa sawit sangat berpotensi untuk menggantikan peran minyak bumi sebagai bahan baku poliuretan. Jenis Minyak kelapa sawit yang telah digunakan sebagai bahan baku poliuretan adalah *Crude Palm Oil* (CPO) (Abdullah, 2012), *Refined Bleached and Deodorized Palm Kernel Oil* (RBD PKO) (Badri dan Ngah, 2015; Ifa dkk., 2012), minyak goreng bekas (Nofiyanti dan Mariam, 2018), minyak epoksi kelapa sawit (Solo dkk., 2018; Paulik dan Prociak, 2012), olein minyak kelapa sawit untuk memproduksi busa poliuretan kaku (Arniza dkk., 2015), olein minyak kelapa sawit untuk memproduksi busa poliuretan *viscoelastic* yang menggantikan polioliol dari minyak bumi (Ain dkk., 2017). Namun penggunaan polioliol minyak nabati yang semakin banyak menyebabkan bilangan hidroksil semakin tinggi. Bilangan hidroksil yang tinggi pada polioliol menyebabkan makin banyak sel tertutup yang terbentuk sehingga tekstur busa fleksibel semakin keras. Hal ini sesuai penelitian Tu dkk., (2008), ketika polioliol minyak kedelai menggantikan polioliol petrokimia, maka bilangan hidroksil menjadi lebih tinggi.

MINYAK KELAPA SAWIT

Kelapa sawit menghasilkan dua jenis minyak, yaitu minyak kelapa sawit mentah

dari *mesocarp* dan minyak inti sawit mentah (Hao dkk., 2019). Asam lemak utama dalam minyak kelapa sawit adalah miristat, palmitat, stearat, oleat dan linoleat. Konstituen minor dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu turunan asam lemak (gliserida parsial seperti mono dan diasil gliserol), fosfatida, ester dan sterol) dan golongan senyawa yang tidak berhubungan secara kimiawi dengan asam lemak yang disebut konstituen non-gliserida. Fraksi non-gliserida dari minyak kelapa sawit terdiri dari sterol, alkohol triterpen, tokoferol, fosfolipid, klorofil, karotenoid, komponen *volatile* dari flavor seperti aldehida dan keton. Ada juga beberapa hidrokarbon, alkohol alifatik, sterol bebas, tokoferol, pigmen, gliserida parsial dan fosfatida, dan logam-logam (Sambanthamurthi dkk., 2000).

Asam palmitat adalah asam lemak jenuh utama dalam minyak sawit dan 39% asam oleat tak jenuh tunggal serta 11% asam linoleat tak jenuh ganda. Sisanya sebagian besar asam stearat (5%) dan asam miristat (1%). Minyak kelapa sawit memiliki asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam jumlah yang kira-kira sama (Sambanthamurthi dkk., 2000). Asam linoleat dan asam palmitat biasanya digunakan sebagai indikator untuk mengukur kerusakan lanjut dari minyak karena asam linoleat lebih rentan terhadap oksidasi sedangkan asam palmitat lebih stabil terhadap oksidasi (Gan dkk., 2005).

Kandungan asam lemak jenuh pada minyak kelapa sawit menyebabkan minyak menjadi keruh. Minyak kelapa sawit jernih dapat diperoleh melalui proses fraksinasi. Proses fraksinasi adalah proses pemisahan TAG yang mempunyai titik leleh tinggi dengan TAG yang bertitik leleh rendah (Metin dan Hartel, 2005). Proses fraksinasi menghasilkan 2 produk, yaitu fraksi cair (olein) dan fraksi padat (stearin). Olein kelapa sawit mengandung USAFA (*Unsaturated Fatty Acid*) yang tinggi, sedangkan fraksi stearin mengandung SAFA (*Saturated Fatty Acid*) yang tinggi (Dian

dkk., 2019). Olein kelapa sawit yang mengandung asam lemak tidak jenuh tinggi akan lebih mudah dioksidasi membentuk minyak epoksida.

REAKSI PEMBENTUKAN POLIOL

Poliol terbentuk dari reaksi hidroksilasi. Reaksi hidroksilasi meliputi dua tahap reaksi, yaitu reaksi epoksidasi pembentukan cincin epoksida (oksiran) dan reaksi pembukaan cincin oksiran. Karina (2005) menjelaskan bahwa hidroksilasi merupakan reaksi yang menambahkan gugus hidroksi kepada suatu senyawa organik. Pada reaksi ini, juga bisa disebut dengan reaksi pembukaan cincin oksiran pada senyawa epoksida. Suatu cincin epoksida, seperti cincin siklopropana, tidak dapat memiliki sudut ikatan sp^3 sebesar 109° , sudut antar inti hanya 60° , sesuai dengan persyaratan cincin tiga anggota. Orbital yang membentuk ikatan cincin tidak dapat mencapai tumpang-tindih maksimal; oleh karena itu cincin epoksida mengalami tarikan. Polaritas ikatan-ikatan C-O, bersama dengan cincin ini, mengakibatkan reaktivitas tinggi. Pembukaan cincin tiga anggota menghasilkan produk yang lebih stabil dan berenergi yang lebih rendah. Reaksi khas epoksida adalah reaksi pembukaan cincin yang dapat dibuka dengan mudah di bawah kondisi asam. Asam yang biasa digunakan adalah asam formiat dan asam asetat.

a. Reaksi Pembentukan Epoksida

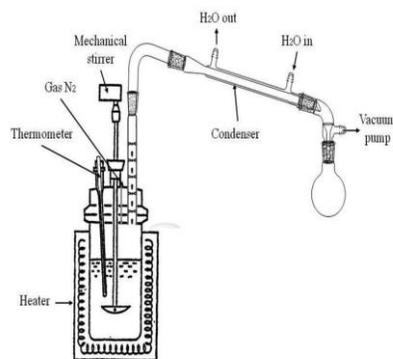
Reaksi pembentukan epoksida sebagai pre polioliol adalah reaksi dari suatu alkena dengan suatu asam peroksi organik, baik dalam bentuk langsung asam peroksi maupun yang dibentuk in-situ dengan mereaksikan asam-asam karboksilat (biasanya asam asetat) sebagai pembawa oksigen dengan hidrogen sebagai donor oksigen (Campanella dan Baltan'as, 2005). Epoksidasi juga dapat didefinisikan sebagai reaksi pembentukan gugus oksiran dengan

cara mengoksidasi ikatan rangkap menggunakan peroksi asam asetat dan katalis (Sinaga, 2007). Epoksida sebagai produk antara poliol perlu dioptimalkan sebelum prosedur berlanjut. Epoksidasi merupakan reaksi yang reversibel dan terdapat kemungkinan munculnya reaksi samping, sehingga epoksidasi diusahakan untuk berlangsung pada suhu yang rendah dan waktu yang singkat (Kirk-Othmer, 2004). Pada suhu yang lebih tinggi, produk akhir menjadi sedikit lebih gelap dan jumlah asam menurun (Firdaus, 2014).

Minyak epoksida dihasilkan dengan cara mereaksikan minyak nabati dengan asam asetat dalam labu leher tiga rangkai pada suhu 50-55°C, kemudian ditambahkan larutan hidrogen peroksida dan asam sulfat. Kondisi optimum pembentukan epoksi dari bahan baku minyak jarak dan CPO adalah pada suhu 70⁰ C dengan perbandingan pereaktan asam asetat 0,3 mol dan H₂O₂ 1,7 mol dengan waktu reaksi 2 jam. Epoksi yang didapat berwarna putih kekuningan dengan densitas 0,945 g/ml (Abdullah, 2012). Nofriyanti dan Mariam (2018), reaksi hidroksilasi minyak goreng bekas dengan menggunakan asam formiat 90 % (v/v) dan hidrogen peroksida 50 % (v/v), temperatur reaksi dipertahankan pada 40°C. Menurut Maisaroh dan Susetyo (2017), epoksidasi asam oleat dilakukan pada suhu reaksi 65°C dan waktu reaksi 75 menit dengan perbandingan mol rasio asam oleat : asam format : hydrogen peroksida yaitu 1 : 1 : 6, sedangkan epoksi optimal dengan konversi ikatan rangkap maksimum pada perbandingan mol rasio 1:2:6 yaitu 98,8%. Kinasih dan Cifriadi (2013), menggunakan 30 mL hidrogen peroksida (H₂O₂) 30% dan 90 mL asam asetat glasial (CH₃COOH) untuk menghasilkan minyak epoksida biji kelor. Epoksidasi dapat berlangsung baik dengan menggunakan hidrogen peroksida (H₂O₂) yang berlebih (Gall dan Greenspan, 2003).

Badri dan Ngah (2015) menjelaskan bahwa poliol berbasis minyak inti sawit

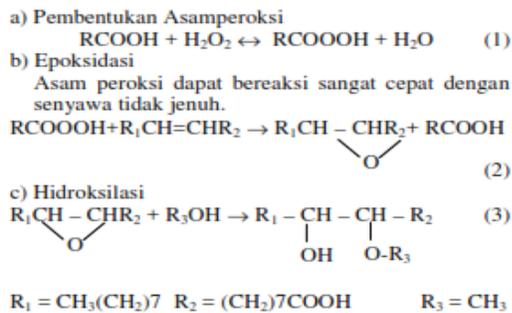
(PKO-p) disiapkan sesuai dengan proses yang dipatenkan (MY145097 - A). Percobaan dilakukan pada unit reaktor *batch*. Etilen glikol, dietanolamin dan kalium asetat dicampur terlebih dahulu dengan perbandingan 30: 3: 1 dan dimasukkan ke dalam reaktor yang telah berisi minyak inti sawit (PKO) dengan rasio 20:80. Campuran diaduk terus menerus dengan kecepatan 100-400 rpm, suhu dipertahankan pada 190 ± 5° C selama 30 menit dengan aliran gas nitrogen di seluruh proses. Tekanan reaktor berkisar 400-800 mbar. Setelah reaksi selesai, dinginkan sampai suhu 80-100°C, sebelum dilakukan penyimpanan dan analisis lebih lanjut. Pengaliran gas nitrogen bertujuan untuk mencegah terjadinya reaksi oksidasi. Hasil penelitian adalah kondisi proses produksi PKO-p dengan menggunakan reaktor skala laboratorium optimal, yaitu waktu pemrosesan 2-3 jam, kondisi optimum ditetapkan pada laju pemanasan 2° C, tekanan vakum 400 mbar dan kecepatan pengaduk 200 rpm, yang menghasilkan konversi 95% dari PKO ke PKO-p dengan nilai bilangan hidroksil sebesar 355,65 mg KOH / g. Reaktor skala laboratorium untuk memproduksi poliol dari minyak kernel kelapa sawit (PKO-p) dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaktor Skala Laboratorium untuk Memproduksi Poliol dari Minyak Kernel Kelapa Sawit (PKO-p) (Badri dan Ngah, 2015)

b. Reaksi Pembukaan Cincin Epoksida

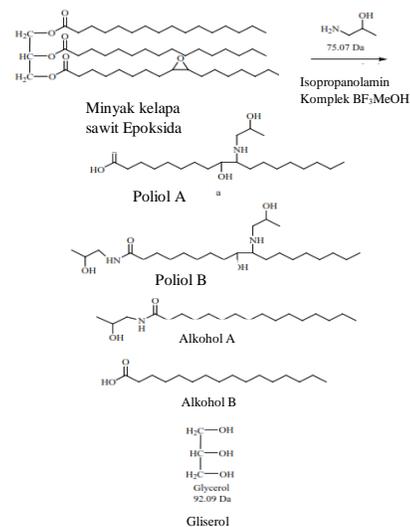
Menurut Firdaus (2014), polioli merupakan komponen kunci dalam mensintesis poliuretan. Gugus hidroksil dalam komponen polioli akan bereaksi dengan isosianat untuk membentuk ikatan uretan. Sudrajat dkk., (2010) menyatakan bahwa polioli dapat disintesis dari minyak nabati melalui epoksidasi dilanjutkan dengan pembukaan cincin epoksida. Pembuatan polioli dari minyak nabati melibatkan pengubahan ikatan rangkap pada rantai samping trigliserida menjadi gugus hidroksil. Reaksi umum pembentukan polyoli dari senyawa tidak jenuh dari minyak sawit dapat dilihat pada Gambar 2.



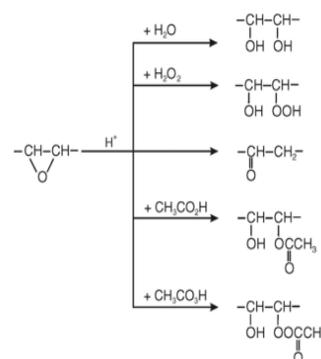
Gambar 2. Reaksi umum pembentukan polyoli dari senyawa tidak jenuh dari minyak sawit (Hui, 1996)

Soloi dkk. (2018), reagen pembuka cincin yang digunakan untuk menghasilkan polioli adalah alkohol, air, asam dan amina. Jika reagen pembuka cincin yang digunakan asam dan alkohol, maka nilai OH adalah 300 mg KOH / g (Narine dkk., 2007), dan jika reagen pembuka cincin yang digunakan amina, maka OHV akan lebih tinggi (Fairheller dkk., 1994). Miao dkk. (2013) telah menggunakan reagen berbasis alkohol amino, yaitu isopropanolamin (IPA) direaksikan dengan minyak kedelai epoksidasi (ESO) untuk membuka cincinnya. Sintesis dilakukan pada suhu rendah 80-100°C menggunakan teknik sintesis *one pot* dengan kondisi ringan, lebih

sedikit pelarut dan menghasilkan polioli dengan OHV sekitar 310 mg / KOH. Polioli amida yang diperoleh dari pembukaan cincin minyak kelapa sawit epoksidasi dengan iso propanolamin dapat dilihat pada Gambar 3. Reaksi pembukaan cincin oksiran dari minyak nabati epoksida secara konvensional menggunakan asam asetat-hidrogen peroksida dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Polioli amida yang diperoleh dari pembukaan cincin minyak kelapa sawit epoksida dengan iso propanolamin (Soloi dkk., 2018)



Gambar 4. Reaksi pembukaan cincin oksiran dari minyak nabati epoksida secara konvensional menggunakan asam asetat-hidrogen peroksida (Campanella dan Baltana's, 2005)

Minyak epoksida direaksikan dengan etilen glikol dalam labu leher tiga yang menggunakan katalis asam. Kondisi optimum untuk pembentukan polioliol diperoleh pada waktu reaksi 1jam dengan suhu konstan 120°C dengan bahan baku epoksi 20 ml dan etilen glikol 30 ml. Polioliol yang didapat berwarna kuning bening dengan indeks bias 1,4705 (Abdullah, 2012). Sudrajat dkk. (2010) menjelaskan bahwa minyak jarak pagar dikonversi menjadi hidroksi melalui beberapa cara diantaranya dengan hidrogenasi katalitik, reaksi dengan asam hidroklorida, atau hidrobromida, serta dengan reaksi pembukaan cincin dengan katalis asam menggunakan metanol. Konversi dengan katalis asam menggunakan metanol, memberikan nilai konversi yang cukup tinggi yaitu sebesar 93% dengan bilangan hidroksil mencapai 199, sedangkan konversi dengan asam klorida memberikan nilai konversi sebesar 94% dan bilangan hidroksil mencapai 197. Bilangan hidroksil sebesar 350-560 mg KOH/g sampel menghasilkan poliuretan yang bersifat kaku, 100-200 mg KOH/g sampel untuk poliuretan semi fleksibel dan 5,6-70 mg KOH/g sampel untuk poliuretan fleksibel. Firdaus (2014)

menyatakan bahwa polioliol yang digunakan untuk menghasilkan busa fleksibel harus memiliki nilai hidroksil yang rendah (umumnya LOH <100 mg KOH / g). Hasil penelitian dari Sudrajat dkk., (2010) adalah hidroksilasi melalui halogenasi memberikan bilangan hidroksil total sebesar 18,15 mg KOH/g untuk waktu 60 menit, dan sebesar 10, 94 mg KOH/g untuk waktu 90 menit, sedangkan hidroksilasi melalui metoksilasi memberikan nilai bilangan hidroksil total antara 85,2 – 157,7 mg KOH/g yang dapat digunakan untuk membuat poliuretan yang bersifat semi fleksibel.

Scarfato dkk., (2017) busa poliuretan komersial mempunyai densitas yang berbeda-beda yang berkaitan dengan bilangan hidroksil dari polioliol yang digunakan. Karakteristik polioliol minyak kelapa sawit yang baik untuk bahan baku busa poliuretan fleksibel dapat mengacu pada karakteristik CARADOL SA34-05 (tabel 1) yang merupakan polioliol yang berasal dari minyak bumi dalam bentuk propilena oksida dan trioliol polieter berbasis etilena oksida yang biasa digunakan untuk memproduksi busa poliuretan fleksibel.

Tabel 1. Sifat CARADOL SA34-05

Sifat	Metode Uji	Satuan	Nilai
Kenampakan			Cairan jernih
Warna Pt/Co	ASTM 1209		10
Nilai hidroksil	ASTM D4274D	mg KOH/g	34
Densitas pada 20°C	ASTM D4052	kg/l	1,02
Kadar air	ASTM D4672	% m/m	0,03
Total asam	ASTM D4662	mg KOH/g	0,03
Viskositas pada 25°C	ASM D445	MPa.s	860
pH	SMS 2801		7
Titik Nyala (Flash point)	ASTM D93	°C	>140

Diukur dalam 10:6 IPA(Isopropanolamine)/larutan air (Shell Chemicals, 2016)

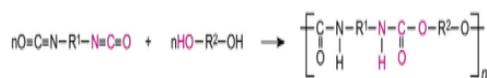
Menurut Ifa dkk., (2012) bahwa polyoliol terbentuk dari penambahan asam peroksi asetat yang dibentuk secara in situ dari H₂O₂ dan CH₃COOH dengan katalis H₂SO₄ kedalam RBD *palm olein* untuk membentuk RBD *palm olein* terepoksidasi. RBD *palm*

oil terepoksidasi ditambahkan kedalam campuran metanol (MeOH), isopropanol (IPA) dan sejumlah katalis H₂SO selama 2 jam pada suhu 60°C sehingga terbentuk polioliol berbasis RBD *palm oil*.

Prociak dkk., (2018) melakukan penelitian tentang kombinasi antara polioliol dari minyak bumi dengan polioliol minyak kelapa sawit dengan bilangan hidroksil 102 (menggunakan air sebagai pembuka cincin oksiran) dan polioliol minyak kelapa sawit dengan bilangan hidroksil 128 (menggunakan dietilen glikol sebagai pembuka cincin oksiran). Peningkatan penggunaan biopolioliol mengakibatkan viskositas lebih tinggi dari pada penggunaan polioliol minyak bumi sehingga busa poliuretana fleksibel yang dihasilkan dari biopolioliol mempunyai tekstur lebih keras. Polioliol 102 dan 128 menghasilkan busa yang keras dan densitas yang tinggi. Hal ini disebabkan karena P102 dan P128 memiliki nilai bilangan OH tinggi yang menyebabkan kebutuhan isosianat juga tinggi.

REAKSI PEMBENTUKAN POLIURETAN

Scarfato dkk., (2017) menjelaskan bahwa busa poliuretana (PU) adalah polimer serbaguna yang terdiri dari campuran fasa padat dan gas, diproduksi secara industri melalui poliadisi poliisosiyanat dan *macropolyols*, dimana kelompok uretan terbentuk dalam polimer tulang belakang. Pembentukan ikatan uretan melalui reaksi antara diisosiyanat dengan diol dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pembentukan ikatan uretan melalui reaksi antara diisosiyanat dengan diol (Scarfato dkk., 2017)

Sintesis PUF (*Polyurethane Foam*) melibatkan dua reaksi utama seperti reaksi pembentukan gel dan pembentukan busa. Reaksi pembentuk gel berhubungan dengan pembentukan ikatan yang merupakan hasil reaksi dari isosiyanat dan gugus hidroksil. Dounis and Wilkes (1997) menyatakan bahwa struktur mikro tersusun dari ikatan silang secara fisik dan kimia. Ikatan silang secara fisik terjadi jika ukuran dan konsentrasi gugus urea mencukupi untuk

membentuk interaksi antara ikatan hidrogen dengan gugus urea lainnya dan pemisahan fase antara segmen lunak dengan bagian keras. Selanjutnya Heintz dkk., (2005); Li dkk., (2002) menyatakan bahwa ikatan silang secara kimia dihasilkan dari reaksi uretan, dimana jaringan kovalen terbentuk dari oligomer poliurea dan segmen lunak polioliol melalui uretan obligasi. Struktur mikro dan morfologi tergantung pada beberapa faktor seperti kompetisi antara dua reaksi utama, mobilitas kelompok urea, ikatan silang muncul dari reaksi antara diisosiyanat dan polioliol dan interaksi spesifik antara segmen polioliol dan poliurea.

Reaksi pembentukan busa adalah reaksi yang menghasilkan gelembung udara yang terperangkap di dalam campuran yang reaktif. Munculnya gelembung udara dapat dihasilkan oleh zat pembentuk busa (*blowing agent*) yang terdiri dari dua jenis yaitu zat pembentuk busa secara fisika dan kimia. Pembentukan busa secara fisika dapat dihasilkan oleh proses penguapan ketika struktur seluler berkontak dengan panas. Contoh zat pembentuk busa secara fisika adalah hidroklorofluorokarbon (HCFC) dan klorofluorokarbon (CFC). Penggunaan CFC sudah mulai berkurang karena menyebabkan penipisan ozon di stratosfer (Landrock, 1995). Contoh zat pembentuk busa secara kimia adalah air. Air merupakan pereaksi ramah lingkungan dan dapat bereaksi dengan campuran polioliol dan isosiyanat pada suhu ruang membentuk karbondioksida dan urea (Rashmi dkk., 2013; He dkk., 2002). Walaupun penggunaan air ramah lingkungan, namun penggunaan air berlebihan akan menyebabkan terjadinya tekanan negatif yang dapat mempercepat difusi CO₂ melalui dinding sel sehingga sel menjadi rusak (Lim dkk., 2008).

Kattiyaboot dan Thongpin (2016) menggunakan TDI-80 untuk menghasikan reaksi poliuretana. TDI 80 merupakan campuran 80% berat 2,4 Toluene diisosiyanat dan 20% berat dari 2,6 Toluene diisosiyanat.

Air destilasi digunakan sebagai *blowing agent* dalam pembuatan busa poliuretan fleksibel sebanyak 2,2 pphp (*part per hundred polyol*) (Kattiyaboot dan Thongpin, 2016), sementara itu Triwulandari dkk., (2007), menggunakan *blowing agent* yang merupakan campuran dari 2,67 pphp air destilasi dengan 10 pphp metilen klorida. Jumlah TDI 80 optimum untuk menghasilkan busa fleksibel berbahan baku campuran C.SA34-05 (poliol minyak bumi) dan EM-14001 (poliol minyak nabati) adalah 27,43 g per 100 g poliol, sedangkan Triwulandari dkk., (2007) menggunakan MDI 7,75 g per 10 g poliol. TDI 80 cocok digunakan dalam pembuatan busa poliuretan fleksibel sedangkan MDI cocok untuk pembuatan busa poliuretan kaku. Senyawa isosianat merupakan senyawa yang bersifat toksik yang fungsinya dapat digantikan dengan bahan yang ramah lingkungan yaitu *kraft lignin* (Fernández dkk., 2017) dan hidroksi uretan yang diperoleh dari reaksi polimerisasi karbonat siklis dan diamin (Cornille dkk., 2016).

Surfaktan digunakan sebagai *foam stabilizer* untuk menstabilkan struktur gelembung-gelembung (*bubbles*) yang terbentuk dengan menjadikan sedikit viskos sampai kekakuan (*rigidity*) sel mengatur struktur *foam*. Fungsi surfaktan adalah untuk menurunkan tegangan permukaan antara liquid – liquid atau liquid – solid, mencampur komponen – komponen yang tidak saling larut, memperbaiki penampilan struktur sel, untuk stabilisasi ekspansi *foam* saat mengembang, pengontrol ukuran sel, menghasilkan tipe struktur sel yang diinginkan seperti sel terbuka (*opened cell*) atau sel tertutup (*closed cell*). Jenis surfaktan yang biasa dipakai adalah tipe silikon glikol. Variasi tipe dan banyaknya material yang digunakan, maka dapat mempengaruhi properti seperti densiti, kandungan dari sel terbuka atau sel tertutup. Surfaktan yang digunakan pada reaksi poliuretan adalah

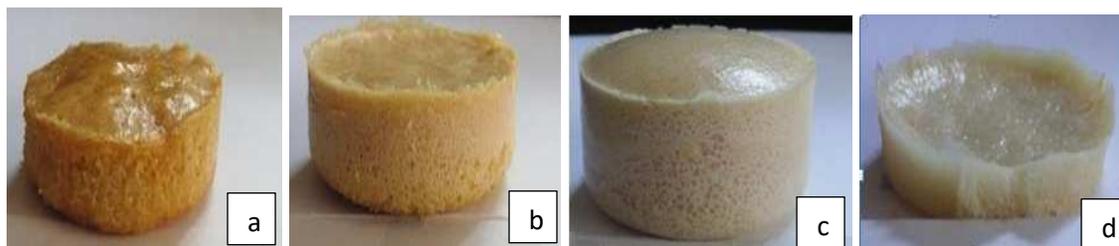
sebanyak 2 pphp (Kattiyaboot dan Thongpin, 2016); 2,04 pphp (Triwulandari dkk., 2007).

Cornille dkk., (2016) menyatakan bahwa diisosianat dan poliol sangat mudah divariasikan dalam menghasilkan poliuretan dengan pengaplikasian yang berbeda-beda, seperti busa fleksibel digunakan untuk kasur tempat tidur dan kursi otomotif, busa kaku digunakan untuk isolasi termal, lapisan anti gores dan tahan korosi, serat elastomer digunakan untuk tekstil dan komponen perekat serta *sealant*. Penggunaan berbagai jenis zat kimia pada pembuatan poliuretan menimbulkan pengaruh negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia. Diisosianat merupakan senyawa yang sangat berbahaya. Kontak yang terlalu lama dengan senyawa tersebut dapat menimbulkan risiko kesehatan seperti asma, dermatitis, konjungtiva dan keracunan akut. Isosianat yang banyak digunakan dalam industri poliuretan adalah metilen difenil 4,4 - diisosianat (MDI) dan toluen diisosianat (TDI), diklasifikasikan sebagai CMR (*Carcinogen, Mutagen, dan Reprotoxic*). Hal ini dapat dihindari dengan mensintesa *non-isocyanate polyurethane* (NIPU) yang diperoleh dari reaksi monomer *bicyclic carbonate* dengan *diamine*.

Pada saat reaksi pembentuk gel antara poliol dengan isosianat, juga terjadi reaksi pembentukan busa yang berlangsung pada suhu kamar. Sebaliknya, reaksi pembentukan PHU (*polyhydroxyurethane*) antara karbonat siklik dan amina tidak menghasilkan *blowing agent*. Berbagai busa polimer telah disintesis melalui reaksi polimerisasi yang tidak menghasilkan *blowing agent*, oleh karena itu zat aditif harus ditambahkan ke formulasi. Beberapa metode dapat digunakan untuk mendapatkan busa epoksi. Sistem epoksi-amina dapat dibentuk busa melalui dekomposisi azodikarbonamid (Takiguchi dkk., 2008) atau natriumbikarbonat (Altuna dkk., 2015); Mazzon, dkk., (2015)) dicampur dengan epoksi atau *curing agent*.

Nofriyanti dan Mariam (2018) menjelaskan bahwa penambahan aditif (PEG 400) pada proses polimerisasi sebagai pemanjang rantai (*chain extender*) diperlukan agar lebih mudah bereaksi dengan isosianat dan diperoleh busa

poliuretan dengan sifat termal yang lebih baik. Namun menurut penelitian Firdaus (2014), pembuatan busa fleksibel dapat dilakukan tanpa penggunaan etilen glikol. Busa hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. PU berbasis Minyak Kedelai dengan EG (a); PU berbasis Minyak Kedelai-Sintetik Tanpa EG (b); PU Berbasis Minyak Kedelai Tanpa EG (c); PU berbasis sintetik (Firdaus, 2014)

Lim dkk., (2008), pembentukan busa dapat dilakukan dengan menggunakan metode *one shot* dan *two shot*. metode *one shot* yaitu semua bahan dimasukkan ke dalam wadah pencampur dan diaduk sampai homogen sebelum dituangkan ke dalam cetakan. Metode *two shot* yaitu semua bahan dicampur terlebih dahulu kecuali isosianat. Sistem *one-step* umumnya digunakan dalam pembentukan *foam* poliuretan, sedangkan sistem *two-step* diaplikasikan pada produksi elastomer (Feng,1998).

Kattiyaboot dan Thongpin (2016) bahwa busa poliuretan fleksibel disintesis dengan metode satu tembakan Polyol dan semua bahan kimia seperti katalis pembentuk gel, surfaktan dan zat pembentuk busa dicampur dalam gelas plastik selama 5 menit menggunakan pengaduk mekanis pada 2.000 rpm. Kemudian, TDI-80 dengan cepat ditambahkan ke dalam campuran dan dicampur lebih lanjut selama 5 detik pada kecepatan yang sama. Setelah itu, campuran dituangkan ke dalam cetakan terbuka (240 x 170 x 80 mm³), kemudian dipanaskan pada suhu 60°C dalam oven selama 24 jam. Indeks NCO (setara NCO / setara OH) ditetapkan pada 1,00.

BUSA POLIURETAN FLEKSIBEL BERBAHAN BAKU CAMPURAN POLIOL MINYAK NABATI DENGAN JENIS POLIOL NABATI LAINNYA

Ugarte dkk., (2014) menyatakan bahwa busa poliuretan 90% polioli minyak jarak dengan 10% politrimetilen eter glikol yang diperoleh dari sukrosa jagung menunjukkan densitas paling rendah dan ukuran sel paling tinggi. Busa berbasis polioli petrokimia stabil hingga 200°C, sementara itu busa poliuretan berbasis biopolioli mulai mengalami degradasi sekitar 220°C. Semakin tinggi substitusi polioli minyak jarak dengan politrimetilen eter glikol, maka bilangan hidroksi semakin tinggi, namun densitas dan ikatan silang semakin menurun dan sifat tekan semakin meningkat. Komposisi 100%-80% polioli minyak jarak (20% politrimetilen eter glikol) menghasilkan karakteristik busa yang terbaik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan politrimetilen eter glikol kedalam formulasi menyebabkan terjadinya ikatan hidrogen gugus urea, hal ini disebabkan karena terjadi peningkatan pemisahan fasa.

Khundamri dkk., (2019) menyatakan bahwa minyak kedelai epoksida dan tanin manggis epoksida dapat dijadikan sebagai bahan baku busa poliuretan fleksibel. Tanin diperoleh dari ekstraksi. Tanin merupakan polifenol oligomer yang mengandung beberapa gugus hidroksil aromatik dan aktif, yang bisa bersama-sama diubah menjadi kelompok epoksi. Tanin didepolimerisasi dengan proses *thylolysis* menggunakan 2-mercaptoethanol sebagai reagen nukleofilik (Roumeas dkk., 2013). Tanin manggis yang sudah didepolimerisasi, dilakukan epoksidasi melalui proses glisidilasi, yang terdiri dari 2 tahap, yaitu: Tahap 1, tannin yang sudah didepolimerisasi direaksikan dengan epiklorohidrin dengan katalisator benziltriethylamonium; Tahap 2 campuran reaksi didinginkan pada suhu 30°C sebelum larutan NaOH ditambahkan, setelah itu dimurnikan (Aouf dkk., 2012). Hasil pengamatan FTIR menunjukkan bahwa minyak kedelai epoksi dapat dijadikan sebagai bahan baku busa fleksibel (Khundamri dkk., 2019). Penambahan tanin manggis epoksida pada busa minyak kedelai epoksi dapat meningkatkan suhu degradasi, kekuatan tekan, densitas busa, tetapi menurunkan set kompresi. Nilai set kompresi yang rendah diinginkan karena menunjukkan busa dapat kembali ke bentuk semula lebih baik setelah proses penekanan.

Bryskiewicz dkk., (2016) menyatakan bahwa campuran Rokopol F3600 (poliol) dengan serbuk cangkang walnut dan hazelnut untuk meningkatkan sifat termal dan mekanik busa fleksibel poliuretan. Perlakuan terbaik adalah penambahan 13,5% cangkang hazelnut. Penambahan filler dalam jumlah lebih sedikit menghasilkan busa poliuretan fleksibel dengan parameter yang paling baik. Choe dkk. (2018), penggunaan serat kayu yang diberi perlakuan secara kimia dapat menurunkan porositas terbuka pada busa fleksibel poliuretan sehingga kemampuan busa untuk meredam suara mobil juga menurun. Bernardini dkk., (2015), soda lignin atau soda oxypropylated lignin dapat dijadikan bahan baku alternatif dalam pembuatan

busa poliuretan fleksibel dengan menggunakan minyak jarak sebagai *chain extender*. Carriço dkk. (2016), perlakuan terbaik adalah penambahan *kraft lignin* sebesar 17,5% menghasilkan busa yang lebih stabil terhadap panas, penggunaan minyak jarak yang lebih tinggi dapat meningkatkan jumlah ikatan uretan dan meningkatkan kekakuan dari busa, penggunaan blowing agent yang bersifat *volatile* menghasilkan busa dengan sel-sel yang lebih kecil dengan densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan air destilasi.

BUSA POLIURETAN FLEKSIBEL ANTI API

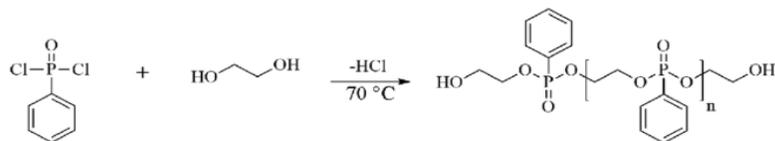
Sepiolite adalah mineral tanah liat berserat magnesium silikat yang mengandung air zeolitik dalam intrakristalin yang memiliki formula $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH_2)_4 \cdot xH_2O$ ($x=6-8$), di mana (OH_2) mewakili air kristal dan H_2O air zeolitik (Mora dkk., 2010). *Sepiolite* merupakan tanah liat yang tidak mengembang, berpori, ringan dengan permukaan spesifik besar. Permukaan busa poliuretan fleksibel dilapisi dengan *sepiolite* dan alginate dengan menggunakan metode *nanocoating*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak penambahan *sepiolite* dan alginate, maka semakin tinggi ketahanan bakar busa poliuretan fleksibel (Pan dkk., 2019).

Chen dkk., (2019), menggunakan bahan anti api berupa senyawa-senyawa organoslikon yang mengandung posfor dengan 2 jenis segmen polieter yang berbeda (segmen polieter dengan gugus hidroksil dan segmen polieter dengan gugus amino. Zat-zat ini dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan ammonium polipospat yang biasa dipakai sebagai bahan anti api pada busa kaku poliuretan. Kekurangan dari ammonium pospat adalah unsur posfor bervalensi +5 dan zat ini kurang kompatibel dengan busa (Lorenzetti dkk., 2019). Chen dkk., (2019) menyatakan bahwa ammonium polipospat yang

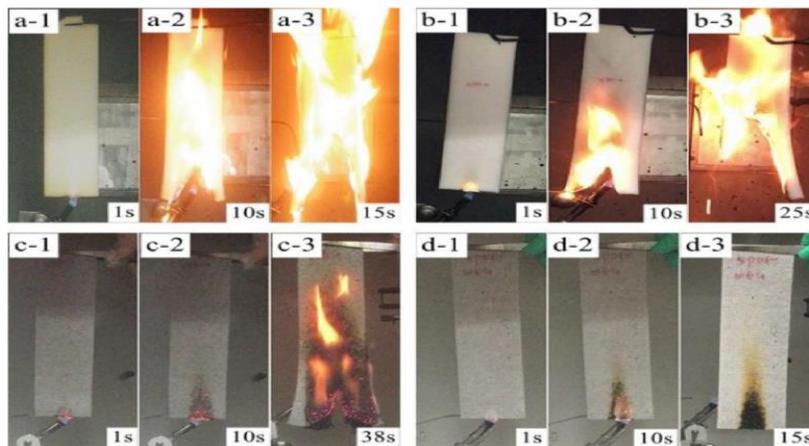
mengandung gugus amino berperan lebih baik sebagai zat anti api dibandingkan amonium polipospat yang mengandung gugus OH.

Rao dkk., (2018) menyatakan bahwa adanya efek sinergis dari campuran cairan yang mengandung posfor dan *expandable graphite* ke dalam formulasi busa. Karakteristik busa yang dihasilkan adalah terjadinya peningkatan ketahanan busa terhadap api dan berkurangnya asap yang terbentuk. Tes pembakaran vertikal mengungkapkan bahwa busa fleksibel poliuretan yang ditambah 5 php cairan polioli yang mengandung posfor (PDEO) dan

10 php *expandable graphite* (EG) lebih cepat padam tanpa menetes dan bentuk aslinya tetap terjaga walaupun sudah terbakar. Calorimeter kerucut menunjukkan bahwa efek sinergis dari PDEO dan EG secara efektif dapat mengurangi laju pelepasan panas. Rute sintesis polioli mengandung posfor PDEO dapat dilihat pada Gambar 7. Tes pembakaran vertikal dan ketahanan api dari busa poliuretan fleksibel murni (FPUF) (a-1~a-3), FPUF/5PDEO (b-1~b-3), FPUF/15 EG (c-1~c-3) and FPUF/10 EG/5PDEO (d-1~d-3) pada waktu pembakaran yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Rute sintesis polioli mengandung posfor PDEO (Rao dkk., 2018)



Gambar 8. Tes pembakaran vertikal dan ketahanan api dari busa poliuretan fleksibel murni (FPUF) (a-1~a-3), FPUF/5PDEO (b-1~b-3), FPUF/15 EG (c-1~c-3) and FPUF/10 EG/5PDEO (d-1~d-3) pada waktu pembakaran yang berbeda (Rao dkk., 2018)

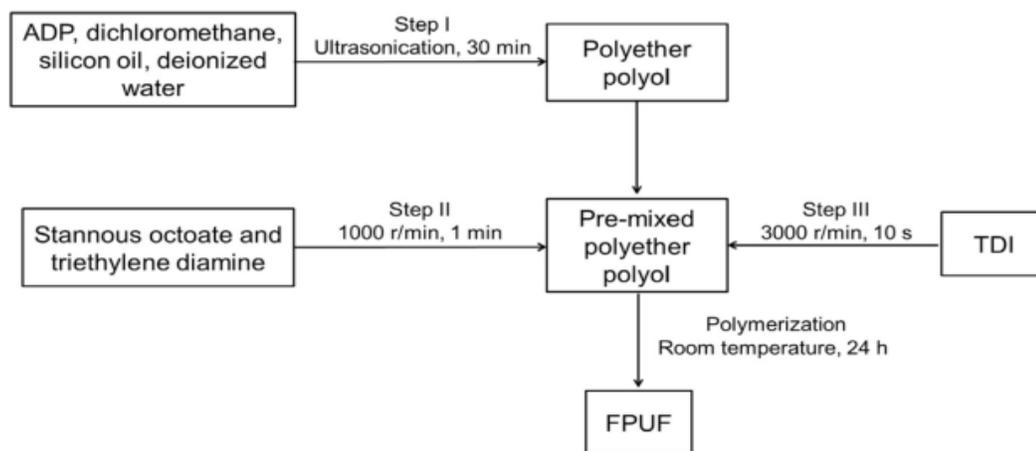
Mohammadi dkk., (2019) menyatakan bahwa busa poliuretan fleksibel nanokomposit berbasis minyak jarak yang digabung dengan *unmodified Layered Double Hydroxides* dan dua jenis arena

kaliks yang mengandung sulfonat (makroskopik SC4A dan SuBC4A) diselingi LDH. Berdasarkan tes kerucut kalorimeter (CCT) mengungkapkan bahwa busa PUF / SuBC4A-LDH memiliki sifat tahan api dan

penekan asap terbaik dengan residu arang tertinggi dan laju pelepasan panas terendah.

Rao dkk., (2018), mencampur polioliol yang mengandung posfor (PDEO) dengan GEP-560s (polioliol dari minyak bumi). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan polioliol yang mengandung posfor maka busa poliuretan fleksibel lebih stabil terhadap suhu tinggi (tidak mudah terbakar).

Wang dkk., (2019), menghasilkan busa poliuretan fleksibel yang tahan api dengan menggunakan aluminium *diethylphosphinate* (ADP) yang tidak merusak sifat mekanik dan merubah warna busa poliuretan fleksibel menjadi hitam. Hasil terbaik adalah ADP 20% karena dapat menurunkan kandungan volatil yang mudah terbakar dalam fase gas. Langkah-langkah persiapan dalam pembuatan busa tahan api dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Langkah-langkah persiapan dalam pembuatan busa tahan api (Wang dkk., 2019)

Layered Double Hydroxides (LDH) yang dimodifikasi fosfor memiliki potensi untuk digunakan sebagai aditif tahan api (Fernández dkk., 2016). Penggunaan *aluminum diethylphosphinate* (ADP) sebanyak 20% dapat menurunkan kandungan volatil yang mudah terbakar dalam fase gas pada busa fleksibel poliuretan (Wang dkk., 2019).

BUSA POLIURETAN ANTI MIKROBA

Poliuretan merupakan jenis polimer yang paling banyak digunakan manusia terutama di bidang kesehatan. Pertumbuhan mikroorganisme pada busa dapat terjadi selama pemakaian dan penyimpanan. *Curcumin* merupakan senyawa fenol alami dapat digunakan sebagai antibakteri dan anti jamur pada busa poliuretan. Molekul *curcumin* memiliki gugus polar dan hidrofilik sehingga molekul *curcumin* dan

isocyanat dapat membentuk interaksi antar muka yang kuat melalui ikatan hidrogen sehingga terbentuk struktur ikatan silang. Penambahan *curcumin* 1-2% dapat meningkatkan kekuatan tekan dan menurunkan daya serap air. Penggunaan *curcumin* sebanyak 5% dapat menurunkan kekuatan tekan, tetapi lebih efektif digunakan untuk memproduksi busa poliuretan antimikroba (Sienkiewicz dkk., 2019).

KESIMPULAN

Penggunaan minyak nabati cenderung menghasilkan polioliol dengan bilangan hidroksil yang tinggi yang dapat meningkatkan pembentukan sel tertutup pada busa. Pada busa poliuretan fleksibel yang diharapkan adalah tingginya jumlah sel terbuka. Keberhasilan pembentukan busa

poliuretan fleksibel sangat tergantung dari karakteristik poliolnya. Banyak penelitian yang melakukan pelapisan bahan anti api pada busa bertujuan untuk mencegah terbentuknya senyawa *volatile* yang bersifat toksik pada saat busa terbakar. Alternatif lain agar terhindar dari senyawa toksik adalah menggunakan bahan-bahan alami yang bersifat ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S. 2012. Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap Bilangan Hidroksil Pada Pembentukan Polyol Dari Epoksidasi CPO dan Curcas Oil. *KONVERSI* 1(1): 1-10
- Ain, N.H., M. T. I.T. Noor, M. A. M. Noor, A. Srihanum, K. P.P. Devi, N. S. Mohd, N. Mohdnoor, Y.S. Kian, H. A. Hassan, I. Campara, C. M. Schiffman, K. Pietrzyk, V. Sendijarevic, dan I. Sendijarevic. 2017. Structure–property performance of natural palm olein polyol in the viscoelastic polyurethane foam. *Journal of Cellular Plastics* 53(1): 65–81
- Altuna, F.I., R.A.Ruseckaite, dan P.M. Stefani. 2015. Biobased Thermosetting Epoxy Foams: Mechanical, and Thermal Characterization. *ACS. Sust. Chem. Eng.* 3:1406-1411
- Aouf, C., Lecomte, J., Villeneuve, P., Dubreucq, E., Fulcrand, H., 2012. Chemo-enzymatic functionalization of gallic and vanillic acids: synthesis of bio-based epoxy resins prepolymers. *Green Chem.* 14:2328–2336. <https://doi.org/10.1039/c2gc35558b>.
- Aouf, C., S. Benyahya, A. Esnouf, S. Caillol, B. Boutevin, dan H. Fulcrand. 2014. Tara tannins as phenolic precursors of thermosetting epoxy resins. *Eur. Polym. J.* 55:186–198. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.03.034>.
- Arniza, M.Z., · S. S. Hoong , Z. Idris, S.K. Yeong, H.A. Hassan, A. K. Din, dan Y. M. Choo. 2015. Synthesis of Transesterified Palm Olein-Based Polyol and Rigid Polyurethanes from this Polyol. *J Am Oil Chem Soc* 92:243–255. DOI 10.1007/s11746-015-2592-9
- Ashida, K.. 2007. Polyurethane and Related Foams. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group; p. 50-51
- Badri, K. H. & M. S. Ngah. 2015. A Mini Scale Batch Reactor for the Production of Palm-Based Polyol. *Sains Malaysiana* 44(6):861–867
- Benyahya, S., C.Aouf, S. Caillol, B. Boutevin,, J.P. Pascault, dan H. Fulcrand. 2014. Functionalized green tea tannins as phenolic prepolymers for bio-based epoxy resins. *Ind. Crop Prod.* 53:296–307. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.045>.
- Bernardini, J., P. Cinelli, I. Anguillesi, M.B. Coltelli, dan A. Lazzeri. 2015. Flexible polyurethane foams green production employing lignin or oxypropylated lignin. *European Polymer Journal* 64:147–156
- Bryskiewicz, A., M. Zieleniewska, K. Przyjemska, P. Chojnacki, J. Ryszkowska. 2016. Modification of flexible polyurethane foams by the addition of natural origin fillers. *Polymer Degradation and Stability* 132:32-40
- Campanella A, dan M. A. Baltan´as. 2005. Degradation of the oxirane ring of epoxidized vegetable oils with hydrogen peroxide using anion exchange resin. *Catalysis Today*; 12: 208–214
- Campanella, A., L. M. Bonnaillie, R. P. Wool. 2009. Polyurethane Foams from Soy oil-Based Polyols. *Journal of Applied Polymer Science.* 112:2567–2578

- Carrigo, C.S., T. Fraga, dan V. M. D. Pasa. 2016. Production and characterization of polyurethane foams from a simple mixture of castor oil, crude glycerol and untreated lignin as bio-based polyols. *European Polymer Journal* 85:53–61
- Chian, K.S., dan L. H. Gan. 1998. Development of a Rigid Polyurethane Foam from Palm Oil. *Journal of Applied Polymer Science* 68:509-515
- Choe, H., G. Sung, dan J. H. Kim. 2018. Chemical treatment of wood fibers to enhance the sound absorption coefficient of flexible polyurethane composite foams. *Composites Science and Technology* 156:19-27
- Cornille, A., C. Guillet, S. Benyahya, C. Negrell, B. Boutevin, dan S. Caillol. 2016. Room temperature flexible isocyanate-free polyurethane foams. *European Polymer Journal* 84: 873-888
- Dian, N. L. H. M., L. Y. Ying, N. M. A. N. Ibrahim, N. A. M. Hassim, S. M. Huey, T. C. Ping, and L. O. Ming . 2019. Low-Temperature Directed Interesterification Increases Triunsaturated And Trisaturated Triacylglycerols Of Palm Oil And Affects Its Thermal, Polymorphic And Microstructural Properties. *Journal Of Oil Palm Research* 31 (1):95-109
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2017. Statistik Perkebunan Indonesia 2015-2017. Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian. <http://ditjenbun.pertanian.go.id>, 81 halaman
- Dounis, D.V., and G.L. Wilkes. 1997. Structure–property relationships of flexible polyurethane foams. *Polymer* 11:2819–2828, [http://dx.doi.org/10.1016/S00323861\(97\)85620-0](http://dx.doi.org/10.1016/S00323861(97)85620-0).
- Fearheller S. H, R. G. Bistline Jr., A. Bilyk, R. L. Dudley, M. F. Kozempel, dan M. J. Haas. 1994. “A novel technique for the preparation of secondary fatty amides,” *J. Am. Oil Chem. Soc.* 71 (8):863–866
- Fernández, S.G., L. Ugarte, C. P. Rodriguez, M. Zubitur, M. Á. Corcuera, dan A. Eceiza. 2016. Flexible polyurethane foam nanocomposites with modified layered double hydroxides. *Applied Clay Science* 123:109–120
- Fernández, S.G., L. Ugarte, T. C. Correias, C. P. Rodríguez, M. A. Corcuera, dan A. Eceiza. 2017. Properties of flexible polyurethane foams containing isocyanate functionalized kraft lignin. *Indust. Crops and Products* 100:51–64
- Firdaus, F.E. . 2014. Synthesis and Characterization of Soy-Based Polyurethane Foam with Utilization of Ethylene Glycol in Polyol. *Makara J. Technol.* 18(1):11-16. doi: 10.7454/mst.v18i1.2937
- Gan, H.L., C. P. Tan, , Y. B. Che Man, I. NorAini, and S. A. H. Nazimah. 2005. Monitoring the storage stability of RBD palm olein using the electronic nose. *Food Chemistry* 89:271-282
- Greenspan, F. P. dan R. J. Gall. 2003. Epoxy fatty acid ester plasticizer. *Industrial and Engineering Chemistry* 45:2722-2726
- Hao, Y.J. S. M. Huey, Y. C. Beng, S. Kanagaratnam, L. C. Abdullah, dan T. C. S. Yaw. 2019. The Effects of Polyglycerol Esters on Palm Olein Fractionation. *Journal of Oil Palm Research* 31(2):294-303
- He, Z.A., W. Blank, dan M. Picci. 2002. A selective catalyst for two-component waterborne polyurethane coatings. *J. Coat. Technol.* 74:31-36
- Heintz, A.M., D.J. Duffy, C.M. Nelson, Y. Hua, S.L.Hsu. 2005. A spectroscopic analysis of the phase evolution in polyurethane foams. *Macromolecules* 38:9192–9199. <http://dx.doi.org/10.1021/ma051599w>.

- Ifa, L., Sumarno, Susianto, dan Mahfud. 2012. Model Kinetika Reaksi Pembentukan Polyol berbasis Minyak Sawit. *Reaktor* 14 (1):1-8
- Karina, R.M. 2005. Stabilisasi Oksidasi Castor Oil sebagai Minyak Lumas Dasar. Tesis S2 Program Magster Departemen Depok: Teknik Kimia, UI
- Kattiyaboot, T. dan C. Thongpin. 2016. Effect of natural oil based polyols on the properties of flexible polyurethane foams blown by distilled water. *Energy Procedia* 89:177 – 185
- Khundamri, N., C. Aouf, H. Fulcrand, E. Dubreucq dan V. Tanrattanakul. 2019. Bio-based flexible epoxy foam synthesized from epoxidized soybean oil and epoxidized mangosteen tannin. *Industrial Crops & Products* 128:556–565
- Kirk-Othmer. 2004. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 9, 5th Edition. Wileyonline- library.com /ref/kirk, p 251
- Kraitape, N dan C. Thongpin. 2016. Influence of recycled polyurethane polyol on the properties of flexible polyurethane foams. *Energy Procedia* 89:186 – 197
- Landrock, A.H. 1995. *Handbook of plastic foams: Types, Properties, Manufacture and applications*. United States of America: Noycs Publication; p. 43-45.
- Li, W., A.J. Ryan, dan I.K. Meier. 2002. Effect of chain extenders on the morphology development in flexible polyurethane foam. *Macromolecules* 35:6306–6312. <http://dx.doi.org/10.1021/ma0202311>.
- Lim, H., S.H. Kim, dan B. K. Kim. 2008. Effects of the hydroxyl value of polyol in rigid polyurethane foams. *POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES*; *Polym. Adv. Technol.* 19: 1729–1734
- Lorenzetti, A., M. Modesti S. Besco D. Hrelja dan S. Donadi. 2011. Influence of phosphorus valency on thermal behavior of flame retarded polyurethane foams. *Polym Degrad Stabil* 96(8):1455–1461.
- Lumcharoen, D., and Saravari, O., 2014. Preparation And Characterization of flexible Polyurethane Foams from Palm Oil-Based Polyol. *Adv. Mater* 911:352-356. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.911.352>.
- Maisaroh dan I.B. Susetyo. 2017. Optimasi pada Epoksidasi Asam Oleat sebagai Bahan Baku dalam Sintesis Asam 9,10-Dihidroksi Stearat (DHSA). *Warta IHP/Journal of Agro-based Industry* 34 (2):96-103
- Mazzon, E., A. H. Ulloa, and J.P. Habas. 2015. Lightweight Rigid Foams from Highly Reactive Epoxy Resins derived from Vegetable Oil for Automotive Applications. *European Polymer Journal* 68:546–557
- Metin, S and R.W. Hartel. 2005. Crystallization of fats and oils. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Sixth edition. p. 6.
- Miao, S., S. Zhang, Z. Su, and P. Wang. 2013. Synthesis of bio-based polyurethanes from epoxidized soybean oil and isopropanolamine. *J. Appl. Polym. Sci.* 127:1929–1936
- Mohammadi, A., D.Y. Wang, A.S. Hosseini, J. D. L. Vega. 2019. Effect of intercalation of layered double hydroxides with sulfonate containing calix[4]arenes on the flame retardancy of castor oil-based flexible polyurethane foams. *Polymer Testing* 79:106055. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106055>
- Mora, M., M.I. López, M.A. Carmona, C. Jiménez-Sanchidrián, dan J.R. Ruiz.

2010. Study of the thermal decomposition of a sepiolite by mid- and near-infrared spectroscopies. *Polyhedron* 29:3046–3051
- Narine, S.S., J. Yue, and X. Kong. 2007. "Production of polyols from canola oil and their chemical identification and physical properties," *JAOCs, J. Am. Oil Chem. Soc.* 84:173–179
- Nofiyanti, E, dan N. Mariam. 2018. Sintesis dan Karakterisasi Busa Poliuretan dari Minyak Goreng Bekas dan Toluene Diisocyanat dengan Penambahan PEG-400. *CHEESA* 1(1):21-25
- Ogunniyi, D.S., dan W. R. O. Fakayejo. 1996. Preparation and Properties of Polyurethane Foams from Toluene Diisocyanate and Mixtures of Castor Oil and Polyol. *Iranian Polymer Journal* 5:56-59
- Ogunleye, O.O., F.A. Oyawale, dan E. Suru. 2008. Effects of Castor Oil on the Physical Properties of Polyether Based Flexible Polyurethane Foam. *Advances in Natural and Applied Sciences* 2:10-15
- Pan, Y, L.Liu, W. Cai, Y. Hu, S.Jiang dan H. Zhao. 2018. Effect of layer-by-layer self-assembled sepiolite-based nanocoating on flame retardant and smoke suppressant properties of flexible polyurethane foam. *Applied Clay Science* 168:230–236
- Pawlik, H. dan A. Prociak. 2012. Influence of Palm Oil-Based Polyol on the Properties of Flexible Polyurethane Foams. *J Polym Environ* 20: 438–445
- Prociak, A. , P. Rojek, dan H. Pawlik. 2012. Flexible polyurethane foams modified with natural oil based polyols. *Journal of Cellular Plastics* 00:1-12
- Prociak, A., E. Malewska, M. Kuranska, S. Bak, dan P. Budny. 2018. Flexible polyurethane foams synthesized with palm oil-based bio-polyols obtained with the use of different oxirane ring opener. *Industrial Crops & Products* 115:69–77
- Rao, W.H., Z.M. Zhu, S.X. Wang, T. Wang, Y.Tan, W. Liao, H.B. Zhao, dan Y.Z. Wang . 2018. A reactive phosphorus-containing polyol incorporated into flexible polyurethane foam: Self-extinguishing behavior and mechanism. *Polymer Degradation and Stability* 153:192-200
- Rao, W.H., W. Liao, H. Wang, H. B. Zhao, dan Y. Z. Wang. 2018. Flame-retardant and smoke-suppressant flexible polyurethane foams based on reactive phosphorus-containing polyol and expandable graphite. *Journal of Hazardous Materials* 360:651–660
- Rashmi, B. J., D. Rusu, K. Prashantha, M. F. Lacrampe, dan P. Krawczak. 2013. Development of Water-Blown Bio-Based Thermoplastic Polyurethane Foams Using Bio-Derived Chain Extender. *Journal of Applied Polymer Science*. 584:361-365
- Rohaeti, E., N. M. Surdia, C. L. Radiman & E. Ratnaningsih. 2003. Pengaruh Jenis Polioliol terhadap Pembentukan Poliuretan dari Monomer PEG400 dan MDI. *PROC. ITB Sains & Tek.* 35 A (2):97-109.
- Roumeas, L., C. Aouf, E. Dubreucq, dan H. Fulcrand. 2013. Depolymerisation of Condensed Tannins in Ethanol As A Gateway to Biosourced Phenolic Synthons. *Green Chem.* 15:3268–3275.
<https://doi.org/10.1039/C3GC41281D>.
- Sambanthamurthi, R., K. Sundram and Y. A. Tan. 2000. Chemistry and Biochemistry of Palm Oil. *Progress In Lipid Research* 39:507-55
- Scarfato, P., L. D. Maio, dan L. Incarnato. 2017. Structure and Physical-Mechanical Properties Related to Comfort of flexible Polyurethane Foams for Mattress and Effects of

- Artificial Weathering. Composites Part B 109:45-52
- Shell Chemicals, Data Sheet. 2016. Caradol SA 34-05 Urethane Chemicals For Flexible Applications. https://www.shell.com/business-customers/chemicals/our-products/polyols/_jcr_content/par/tabbedcontent/tab_132960334/textimage_221957534.stream/1519790816984/39b5b47e22e0cd548c2f7adc643d52401d5ac63b/caradol-sa34-05.pdf ; diakses 17 Agustus 2019.
- Sienkiewicz, N., S. Czlonka, A. Kairyte dan S. Vaitkus. 2019. Curcumin as a natural compound in the synthesis of rigid polyurethane foams with enhanced mechanical, antibacterial and anti-ageing properties. *Polymer Testing* 79:106046
- Sinaga. 2007. Pengaruh katalis H₂SO₄ pada reaksi epoksidasi metil ester PFA(Palm Fatty Acid Distillate). *Jurnal Teknologi Proses* 6(1):70-74
- Soloi, S., R. A. Majid, J. Jamaluddin, dan A. R. Rahmat. 2018. Novel Palm Oil Based Polyols with Amide functionality. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)* 37 (1):74-86
- Sudrajat, R, R.I. Yulita dan D. Setiawan. 2010. Pembuatan Polioli dari Minyak Jarak Pagar sebagai Bahan Baku Poliuretana. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 28 (3):231-240
- Takighuci, O., D. Ishikawa, M. Sugimoto, T. Tanighuci, dan K. Koyama. 2008. Effect of rheological behavior of epoxy during precuring on foaming. *J. Appl. Polym. Sci.* 110:657-662
- Thanapon Kattiyaboot and Chanchai Thongpin. 2016. Effect of natural oil based polyols on the properties of flexible polyurethane foams blown by distilled water *Energy Procedia* 89 :177 – 185
- Triwulandari, E., H. Prihastuti, A. Haryono dan E. Susilo. 2007. Synthesis And Structure Properties Of Rigid Polyurethane Foam From Palm Oil Based Polyol. *Indonesian Journal of Materials Science* 43(1):31-36
- Tu, Y.C., G.J. Suppes, dan F.H. Hsieh,. 2008. Water-blown rigid and flexible polyurethane foams containing epoxidized soybean oil triglycerides. *J. Appl. Polym. Sci.* 109:537–544. <http://dx.doi.org/10.1002/app.28153>.
- Ugarte, L., A. Saralegi, R. Fernández, L. Martín, M.A. Corcuera, dan A. Eceiza. 2014. Flexible polyurethane foams based on 100% renewably sourced polyols. *Industrial Crops and Products* 62:545–551
- Wang, X., P. Zhang, Z. Huang, W. Xing, L. Song, dan Y. Hu. 2019. Effect of aluminum diethyl phosphinate on the thermal stability and flame retardancy of flexible polyurethane foams. *Fire Safety Journal* 106:72–79