

PENGARUH KOMPOSISI PHENOL DAN TRIETHYLAMINE SEBAGAI CURING AGENT TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN TERMAL PADA EPOKSI DGEBA SEBAGAI ADHESIVE BAJA A36

Hilbert Philip Malada, Hosta Ardhyanta
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh
Nopember (ITS)
Kampus ITS, Keputih, Surabaya 60111
E-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak— *Adhesive merupakan suatu materi yang diaplikasikan di antara dua materi lainnya untuk merekatkannya sehingga membentuk sambungan, menyebabkan material yang disambungkan menjadi satu melalui gaya kohesi dan adhesinya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa dan mempelajari pengaruh komposisi diglycidyl ether bisphenol-A/triethylamine/phenol (DGEBA/TEA/Ph) terhadap sifat mekanik dan termal epoksi dengan cara mereaksikan resin epoksi DGEBA, triethylamine dan phenol sebagai curing agent berdasarkan rasio berat. DGEBA/TEA/Ph dicuring pada temperatur 50°C selama 12 jam dan dipelajari dengan menggunakan pengujian adhesive dan thermogravimetry analysis (TGA). Penambahan Ph menurunkan kekuatan adhesive, kekuatan geser maksimum diperoleh DGEBA/TEA(20)/Ph(0) sebesar 13,14 MPa. Penambahan Ph meningkatkan stabilitas termal DGEBA/TEA/Ph, mencapai maksimum pada DGEBA/TEA(4)/Ph(16). Epoksi terdegradasi sebanyak 5% pada 311,3°C, sebanyak 10% pada 381,0°C dan terdekomposisi pada 438,4°C.*

Kata Kunci— *epoksi, dgeba, phenol, triethylamine, adhesive*

I. PENDAHULUAN

Resin epoksi adalah resin polimer yang mengandung lebih dari satu gugus epoksi dan mampu dikonversikan menjadi bentuk termoset. Gugus epoksi (oxirane) mengandung atom oksigen yang terikat dengan dua atom karbon, terikat oleh ikatan yang terpisah. Resin epoksi sederhana dibuat dari reaksi *bisphenol-A* dengan *epichlorohydrine*. Resin ini ketika mengalami proses *curing* tidak menghasilkan produk volatil^[1]. Epoksi dapat *curing* dengan berbagai jenis bahan dan reaksi kimia. Pengetahuan tentang ilmu kimia memungkinkan pengguna untuk melakukan proses *curing* pada berbagai rentang temperatur dan mengontrol derajat *crosslinking*^[2].

Fleksibilitas epoksi terlihat dari berbagai macam properti yang dapat dicapai. Struktur kimia *curing agent* dan kondisi *curing* memungkinkan untuk mendapatkan

ketangguhan, ketahanan kimia, sifat mekanik mulai dari fleksibilitas ekstrim hingga kekuatan dan kekerasan tinggi, kekuatan perekatan tinggi, ketahanan panas yang baik dan hambatan listrik yang tinggi^[2]. Fleksibilitas ini membuatnya cocok digunakan pada berbagai macam aplikasi, seperti sebagai perekat struktural *fiber* untuk pesawat, sebagai laminasi dalam papan sirkuit cetak (PCB) dan sebagai senyawa *molding* untuk enkapsulasi semikonduktor karena sifatnya yang menguntungkan seperti modulus tinggi, creep rendah, temperatur kerja tinggi, sifat dielektrik yang sangat baik, ketahanan kimia yang baik dan stabilitas dimensi^[3].

Phenol adalah senyawa yang memiliki gugus *hydroxyl* yang melekat secara langsung pada cincin *benzene*. Adanya gugus *hydroxyl* pada *phenol* menunjukkan bahwa beberapa sifat *phenol* mirip dengan alkohol, seperti mampu membentuk ikatan hidrogen intermolekular yang kuat, sehingga memiliki titik didih yang lebih tinggi daripada hidrokarbon lain yang memiliki berat molekular sama^[4].

Thermosetting oleh *phenol* menghasilkan karakteristik insulasi, sifat perekat, ketahanan kimia yang baik, serta mempertahankan properti dalam kondisi operasi yang berat, adsorpsi kelembaban rendah, dan tidak ada reaksi samping. Reaksi *curing* epoksi-*phenol* dapat dilakukan pada suhu moderat dengan adanya katalis seperti *quaternary ammonium salt*, *tertiary amine*, dan/atau *metal alkoxide*. Di antara katalis ini, *tertiary amine* sering digunakan^[5].

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan resin epoksi *diglycidyl ether bisphenol-A* (DGEBA) dengan *curing agent* berupa *phenol* (Ph) dan *tertiary amine* jenis *triethylamine* (TEA) (DGEBA/TEA/Ph). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari dan menganalisa pengaruh variasi komposisi Ph dan TEA pada epoksi DGEBA terhadap stabilitas termal dan kekuatan adhesive pada sambungan baja A36. *Phenol* digunakan untuk mensubstitusi penggunaan *curing agent* berbasis *amine* yang telah umum digunakan pada proses *curing* epoksi. Hal ini dikarenakan proses *curing* dengan *curing agent* berbasis *amine* memakan waktu sangat lama, yaitu hingga lebih dari 7 hari atau memerlukan temperatur *curing* yang tinggi^{[6],[7]}. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan epoksi sebagai *adhesive* yang dapat mengalami proses *curing* pada temperatur rendah dan

memiliki sifat mekanik dan termal yang baik sehingga dapat diaplikasikan sebagai *adhesive* pada sambungan material logam. Dengan menggunakan *curing agent phenol*, diharapkan DGEBA/TEA/Ph akan memiliki properti mekanik dan termal yang lebih unggul dengan waktu *curing* yang lebih cepat dibandingkan dengan epoksi yang umum beredar sekarang, yakni dengan *curing agent* berbasis *amine*. Proses *curing* dilakukan pada temperatur rendah untuk mempermudah proses bila campuran ini nantinya diaplikasikan untuk kebutuhan di lapangan.

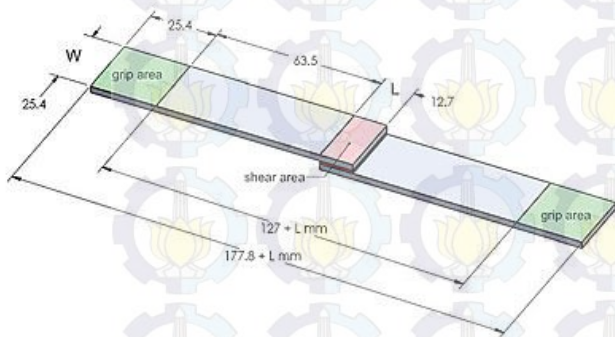
II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Preparasi DGEBA/TEA/Ph

Penelitian dimulai dengan menyiapkan resin epoksi *diglycidyl ether bisphenol-A* (DGEBA) sebagai matriks dan *phenol* (Ph) serta *triethylamine* (TEA) sebagai *curing agent*. Rasio DGEBA/TEA/Ph yang digunakan adalah 80/20/0, 80/16/4, 80/12/8, 80/8/12, 80/4/16 dan 80/0/20. Ph ditambahkan dengan berbagai variasi persentase berat untuk mengetahui pengaruhnya pada proses *curing* epoksi. Proses pencampuran adalah sebagai berikut. Pertama, epoksi DGEBA (80%) dicampurkan dengan Ph (0%, 4%, 8%, 12%, 16% dan 20%) pada wadah aluminium. Kedua, TEA dicampurkan pada DGEBA-Ph hingga persentase komposisi mencapai 100%. Campuran kemudian diagitasi dengan menggunakan *magnetic stirrer* bertipe 79HW-1 Constant Temperature Magnetism Mixer. Agitasi dilakukan selama 10 menit hingga campuran menjadi homogen.

B. Preparasi Spesimen Pengujian Adhesive

Bentuk dan dimensi spesimen pengujian *adhesive* mengacu pada standar ASTM D 1002 – 01. Gambar 2.1 menunjukkan bentuk dan dimensi spesimen standar ASTM D 1002 – 01. Standar ASTM D 1002 - 01 menentukan metode pengujian kekuatan geser (*shear strength*) yang digunakan untuk mengetahui kekuatan *adhesive* epoksi. Pengujian *adhesive* dilakukan dengan cara mengaplikasikan *adhesive* pada dua substrat logam yang direkatkan dengan metode *single-lap-joint*. Larutan DGEBA/TEA/Ph yang telah homogen dioleskan dengan metode *single swap* pada kedua permukaan substrat logam



Gambar 2.1 Standar pengujian *adhesive* ASTM D 1002 – 01

yang telah dibersihkan dari oksida dan kotoran dengan menggunakan kertas gosok. Kedua substrat logam kemudian direkatkan tanpa menggunakan tekanan. Sisa-sisa *adhesive* berlebih lalu dibersihkan. Substrat logam yang digunakan pada penelitian ini adalah baja A36.

Proses *curing adhesive* dilakukan dengan oven elektrik bermerek Maspion tipe MOT-600 yang telah dimodifikasi dengan *controller* temperatur digital sehingga temperatur dapat diatur sesuai dengan temperatur yang diinginkan dengan toleransi kesalahan 10%. Proses *curing adhesive* dilakukan pada temperatur 50°C selama 12 jam.

C. Preparasi Spesimen Pengujian TGA

Larutan DGEBA/TEA/Ph yang telah homogen dituang ke dalam cetakan aluminium tanpa sambungan, (*seamless*) untuk menghindari kebocoran ketika proses *curing*. Proses *curing adhesive* dilakukan dengan oven elektrik bermerek Maspion tipe MOT-600 yang telah dimodifikasi dengan *controller* temperatur digital. Proses *curing adhesive* dilakukan pada temperatur 50°C selama 12 jam. Spesimen yang telah *curing* kemudian dipotong sehingga berdimensi tidak lebih dari 10 mm x 10 mm x 10 mm agar dapat diuji dengan mesin TGA.

D. Pengujian Adhesive

Kekuatan *adhesive* epoksi DGEBA/TEA/Ph dipelajari dengan metode pengujian kekuatan geser. Pengujian *adhesive* yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian *single-lap shear* atau biasa disebut dengan *tensile-shear test*. Pengujian *adhesive* menggunakan mesin uji tarik bermerek GOTECH, tipe GT-7001-LC30, berkapasitas 30.000 kg dan berlokasi di Balai Latihan Kerja Industri (BLKI) - Surabaya. Metode pengujian *single-lap shear* mengacu pada standar ASTM D 1002 - 01. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekuatan geser dari bahan *adhesive*. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk masing-masing variasi komposisi. Pengujian dilakukan dengan cara menarik kedua ujung pelat logam baja A36 yang telah direkatkan dengan *adhesive* hingga sambungan patah. Kekuatan geser merupakan kekuatan yang diperlukan untuk membuat sambungan tersebut patah. Pengujian ini merupakan pengujian bahan *adhesive* yang paling umum karena spesimen pada pengujian ini mudah untuk dipersiapkan dengan sederhana, serta relatif murah.

E. Pengujian TGA (Thermogravimetry Analysis)

Pengujian TGA menggunakan mesin bermerek Mettler Toledo, tipe TGA/DSC 1 dan berlokasi di Laboratorium Energi, LPPM-ITS. Pengujian dilakukan sebanyak satu kali untuk masing-masing variasi komposisi. Pengujian TGA dilakukan untuk mengetahui stabilitas termal epoksi. Stabilitas termal epoksi dipelajari dari perubahan berat material (*weight loss*) terhadap pengaruh perubahan temperatur yang disebabkan oleh perubahan temperatur pemanasan. Pelaksanaan pengujian termal ini dilakukan dengan pemanasan sampel dengan berat awal 20 mg, dipanaskan dalam *crucible* aluminium dengan pan terbuka. Hasil pengujian berupa grafik hubungan antara temperatur-waktu-*weight loss*.

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Proses Curing DGEBA/TEA/Ph

Spesimen DGEBA/TEA/Ph dengan rasio berat 80/20/0, 80/16,4, 80/12/8, 80/8/12, 80/4/16 dan 80/0/20 yang telah mengalami proses *curing* pada temperatur 50°C selama 12 jam diamati secara fisik. Hasil pengamatan dapat dilihat pada Tabel 3.1. DGEBA/TEA(0)/Ph(20) didapati tidak mengalami proses *curing* sehingga campuran masih dalam keadaan cair. Absennya TEA pada DGEBA/TEA(0)/Ph(20) ditengarai merupakan penyebab utama tidak *curing*nya campuran ini, sehingga peran TEA dapat dianggap cukup krusial.

Hasil *curing* berbentuk material solid berwarna putih kekuningan dan bening kekuningan. Pada temperatur *curing* yang lebih rendah, proses *curing* DGEBA/TEA/Ph berjalan sangat lambat, pada beberapa jenis komposisi bahkan memerlukan waktu hingga berhari-hari. Pada temperatur *curing* yang lebih tinggi, terjadi fenomena *bubble* yang memunculkan banyak *void*.

Terdapat 2 perkiraan mekanisme terbentuknya *bubble*. Pertama, *bubble* terbentuk oleh gas yang terperangkap dalam campuran epoksi selama proses *mixing* dan melepaskan diri ketika proses *curing* pada temperatur di atas temperatur ruangan^[8]. Kedua, *bubble* terbentuk saat reaksi *curing* berjalan, ketika berat molekular naik, pemisahan fase terjadi pada tahap tertentu sehingga menimbulkan morfologi dua fase^[9].

Tabel 3.1

Hasil proses *curing* epoksi

No	Kode Sampel	Hasil	Tampilan Fisik
1	DGEBA/TEA(20)/Ph(0)	Cured	Solid, Putih-kekuningan
2	DGEBA/TEA(16)/Ph(4)	Cured	Solid, Putih-kekuningan
3	DGEBA/TEA(12)/Ph(8)	Cured	Solid, Bening-kekuningan
4	DGEBA/TEA(8)/Ph(12)	Cured	Solid, Bening-kekuningan
5	DGEBA/TEA(4)/Ph(16)	Cured	Solid, Bening-kekuningan
6	DGEBA/TEA(0)/Ph(20)	Uncured	-

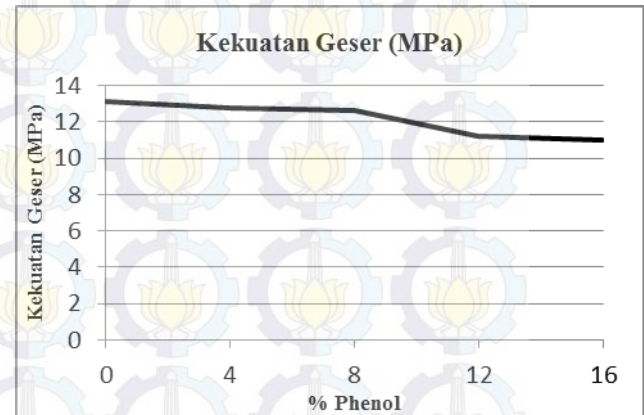
B. Hasil Pengujian Adhesive

Kekuatan geser campuran DGEBA dengan *curing agent* berbasis *phenol* cukup tinggi, bahkan hampir dua kali lipat kekuatan geser epoksi dengan *curing agent* berbasis *amine*^[9]. Tabel 3.2 menunjukkan hasil pengujian *adhesive*. Kekuatan geser maksimum diperoleh pada komposisi DGEBA/TEA(20)/Ph(0), yaitu sebesar 13,14 MPa. Kekuatan geser semakin menurun seiring dengan naiknya rasio berat Ph^[10]. Kekuatan geser minimum diperoleh pada komposisi DGEBA/TEA(4)/Ph(16), yaitu sebesar 10,98 MPa.

Tabel 3.2

Hasil pengujian *adhesive*

No	Kode Sampel	$\sigma_{\max}$ (Kgf/mm ²)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
1	DGEBA/TEA(20)/Ph(0)	1,34	13,14
2	DGEBA/TEA(16)/Ph(4)	1,30	12,75
3	DGEBA/TEA(12)/Ph(8)	1,29	12,65
4	DGEBA/TEA(8)/Ph(12)	1,14	11,18
5	DGEBA/TEA(4)/Ph(16)	1,12	10,98
6	DGEBA/TEA(0)/Ph(20)	-	-



Gambar 3.1 Grafik pengaruh %*phenol* terhadap kekuatan geser DGEBA/TEA/Ph

Epoksi DGEBA yang mengalami proses *curing* dengan *curing agent* berbasis *phenol* menghasilkan *lap shear strength* dan kekuatan *adhesive* yang cukup baik^[11]. *Curing agent* berbasis *phenol* pada dasarnya memiliki kekuatan geser rendah dikarenakan sifatnya yang sangat getas, tetapi dapat ditingkatkan secara signifikan ketika dicampurkan dengan epoksi DGEBA. Pencampuran dengan epoksi DGEBA memungkinkan penurunan kegetasan^[10]. Hal ini menjelaskan tren yang terjadi pada pengujian *adhesive* DGEBA/TEA/Ph.

Pada seluruh spesimen hasil pengujian, teramati bahwa kegagalan terjadi pada *interface* antara DGEBA/TEA/Ph dengan logam, bukan pada substrat logam baja atau pada epoksi. Hal ini ditunjukkan oleh permukaan *overlap* pelat baja yang relatif bersih dari *adhesive*. Fenomena ini menandakan kekuatan *adhesive* DGEBA/TEA/Ph masih bisa ditingkatkan pada area *interface* sehingga kekuatan geser secara keseluruhan dapat meningkat hingga mendekati atau bahkan melebihi kekuatan tarik epoksi^[12].

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kekuatan geser adalah dengan mengasarkan permukaan *overlap* pelat baja, semisal dengan metode *sand-blasting*. Metode ini akan membuat permukaan *overlap* pelat baja menjadi tidak rata sehingga akan meningkatkan *mechanical bonding* atau *mechanical locking* antara permukaan *overlap* pelat baja dengan epoksi. Dengan itu, diharapkan kekuatan geser epoksi akan mendekati kekuatan tariknya^[13].

Kekuatan *adhesive* DGEBA/TEA(20)/Ph(0) dibandingkan dengan kekuatan *adhesive* DGEBA/PAA

dari dua penelitian sebelumnya^{[6],[7]}. DGEBA/TEA(20)/Ph(0) dipilih karena memiliki kekuatan geser terbaik. Kedua epoksi pembanding terdiri dari resin epoksi DGEBA dengan *hardener* poli(amino amid) (PAA) dengan perbedaan pada katalis, yaitu kobalt (DGEBA/PAA(20)/Kobalt(4%))^[6] dan metil etil keton peroksida (mepoxe) (DGEBA/PAA(20)/Mepoxe(4%))^[7]. Temperatur *curing* adalah temperatur ruangan. Hasil komparasi menunjukkan bahwa DGEBA/TEA(20)/Ph(0), bahkan seluruh variasi komposisi DGEBA/TEA/Ph memiliki kekuatan geser yang lebih tinggi dari DGEBA/PAA(20)/Kobalt(4%) dan DGEBA/PAA(20)/Mepoxe(4%) dengan perbedaan yang cukup besar.

Tabel 3.3

Perbandingan kekuatan geser DGEBA/TEA(20)/Ph(0) dengan DGEBA/PAA(20)/Kobalt(4%) dan DGEBA/PAA(20)/Mepoxe (4%)

No	Komposisi	Kekuatan Geser (MPa)
1	DGEBA/TEA(20)/Ph(0)	13,14
2	DGEBA/PAA(20)/Kobalt(4%)	8,4
3	DGEBA/PAA(20)/Mepoxe(4%)	8,23

C. Hasil Pengujian TGA

Secara umum, epoksi dengan *curing agent* berbasis *phenol* memiliki stabilitas termal yang baik^[14]. Tabel 3.4 menunjukkan stabilitas termal dengan membandingkan $T_{5\%}$ dan $T_{10\%}$ (temperatur ketika epoksi terdegradasi sebanyak 5% dan 10%, secara berurutan), T_{id} dan T_{pd} (temperatur dekomposisi awal dan puncak, secara berurutan), serta persentase residu (R) pada setiap variasi DGEBA/TEA/Ph.

Bertambahnya persentase *phenol* terbukti meningkatkan stabilitas termal pada temperatur medium, ditunjukkan dengan $T_{5\%}$ dan $T_{10\%}$ DGEBA/TEA/Ph. Penambahan persentase *phenol* sedikit pengaruhnya pada stabilitas termal temperatur tinggi (T_{id} dan T_{pd}) dimana terjadi dekomposisi sehingga epoksi mengalami penurunan berat secara signifikan^[8]. Semakin tinggi persentase *phenol*, T_{id} bergeser sedikit lebih rendah dan T_{pd} akan bergeser sedikit lebih tinggi. Menurut penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, perilaku ini didapat tanpa mengorbankan sifat mekanik secara signifikan^[14].

Penurunan berat minor pada temperatur relatif rendah, yaitu di bawah 200°C, disebabkan oleh penguapan air, zat-zat volatil, hasil sampingan dari reaksi *cross-linking* maupun oligomer yang tidak bereaksi di dalam epoksi^{[3],[8],[15]}. Zat-zat tersebut cenderung memiliki temperatur penguapan yang rendah.

Proses awal dekomposisi terjadi pada temperatur sekitar 300°C. Pada temperatur ini jaringan polimer masih cenderung stabil dan hanya mengalami sedikit penurunan berat akibat degradasi gugus hidroksil sekunder pada rantai propil resin epoksi^{[3],[15]}.

Penurunan berat signifikan (di atas 80%) yang terjadi pada temperatur tinggi, yaitu di atas 400°C, merupakan proses dekomposisi material epoksi dan

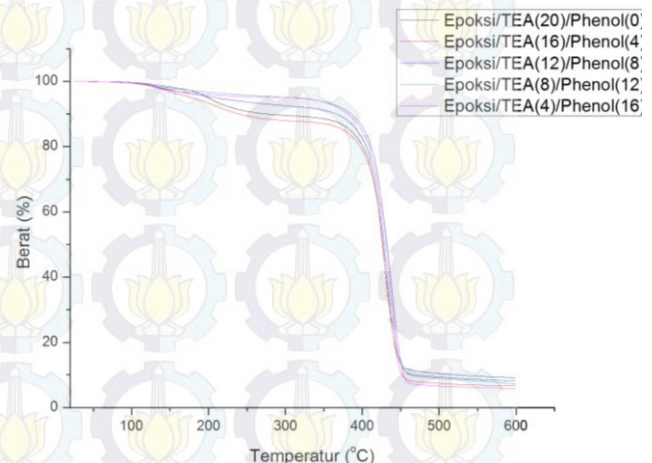
karbonisasi dimana hanya menghasilkan residu tidak lebih dari 10% berat awal pada akhir proses^[8]. Pada temperatur ini terjadi perubahan yang dramatis, menyebabkan hancurnya jaringan polimer yang merupakan penyebab utama kehilangan berat pada degradasi termal dan pembentukan domain poliaromatik^{[15],[16]}. Temperatur dekomposisi ini mencerminkan stabilitas termal epoksi pada temperatur tinggi.

Degradasi terakhir terjadi pada temperatur di atas 600°C dimana terjadi reaksi termo-oksidasi^[3]. Atmosfer nitrogen menghindarkan reaksi pirolisis yang dapat terjadi jika terdapat oksigen dalam atmosfer^[17].

Tabel 3.4

Hasil pengujian TGA

No	Kode Sampel	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{10\%}$ (°C)	T_{id} (°C)	T_{pd} (°C)	R (%)
1	DGEBA/TEA(20)/Ph(0)	199,3	275,3	418,5	429,5	9,41
2	DGEBA/TEA(16)/Ph(4)	178,6	240,1	411,2	425,5	6,61
3	DGEBA/TEA(12)/Ph(8)	208,4	366,1	415,2	429,7	8,48
4	DGEBA/TEA(8)/Ph(12)	307,4	385,7	404,3	436,5	8,47
5	DGEBA/TEA(4)/Ph(16)	311,3	381,0	404,5	438,4	5,83
6	DGEBA/TEA(0)/Ph(20)	-	-	-	-	-



Gambar 3.2 Grafik pengaruh %*phenol* terhadap stabilitas termal

Stabilitas termal DGEBA/TEA(4)/Ph(16) dibandingkan dengan stabilitas termal DGEBA/PAA(20) yang telah dipelajari pada penelitian sebelumnya^{[6],[7]}. DGEBA/TEA(4)/Ph(16) dipilih karena memiliki stabilitas termal tertinggi. Epoksi pembanding adalah resin epoksi DGEBA dengan *hardener* poli(amino amid) (PAA) (DGEBA/PAA(20))^{[6],[7]}. Temperatur *curing* adalah temperatur ruangan.

Hasil komparasi menunjukkan bahwa secara umum DGEBA/TEA(4)/Ph(16) memiliki stabilitas termal yang lebih baik dari DGEBA/PAA(20), khususnya pada temperatur tinggi. T_{pd} pada DGEBA/TEA(4)/Ph(16) jauh melebihi T_{pd} milik DGEBA/PAA(20) dengan jumlah residu yang serupa. DGEBA/TEA(4)/Ph(16) juga terdegradasi sebanyak 10% pada temperatur yang lebih

tinggi, walaupun terdegradasi sebanyak 5% pada temperatur yang lebih rendah.

Tabel 3.5

Perbandingan stabilitas termal DGEBA/TEA(4)/Ph(16) dengan DGEBA/PAA(20)

No	Kode Sampel	T _{5%} (°C)	T _{10%} (°C)	T _{pd} (°C)	R (%)
1	DGEBA/TEA(4)/Ph(16)	311,3	381,0	438,4	5,83
2	DGEBA/PAA(20)	351,3	361,5	370	6,16

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap variasi komposisi resin epoksi DGEBA dengan *curing agent phenol* (Ph) dan *triethylamine* (TEA), dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil *curing* DGEBA/TEA/Ph berbentuk material solid berwarna putih kekuningan dan bening kekuningan.
2. Penambahan persentase *phenol* dalam komposisi *curing agent* menurunkan kekuatan *adhesive* epoksi. Kekuatan geser maksimum diperoleh pada DGEBA/TEA(20)/Ph(0), yaitu sebesar 13,14 MPa.
3. Penambahan persentase *phenol* dalam komposisi *curing agent* meningkatkan stabilitas termal epoksi hingga mencapai titik maksimum pada DGEBA/TEA(4)/Ph(16). Epoksi terdegradasi sebanyak 5% pada temperatur 311,3°C, terdegradasi sebanyak 10% pada temperatur 381,0°C dan terdekomposisi pada temperatur 438,4°C.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap variasi komposisi resin epoksi DGEBA dengan *curing agent phenol* (Ph) dan *triethylamine* (TEA), dapat disarankan :

1. Epoksi DGEBA/TEA/Ph cocok digunakan untuk aplikasi *adhesive* yang memerlukan kekuatan tinggi dan bertemperatur kerja tinggi, serta tampilan yang baik.
2. Permukaan substrat objek *adhesive* sebaiknya dikasarkan terlebih dahulu sebelum aplikasi DGEBA/TEA/Ph untuk meningkatkan *mechanical bonding adhesive*.
3. Penelitian selanjutnya diharapkan mengadakan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan sifat mekanik dan termal epoksi DGEBA/TEA/Ph pada temperatur *curing* yang lebih rendah dan dengan waktu tahan yang lebih singkat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bhatnagar, M. S. 1996. Epoxy Resins (Overview). In M. S. Bhatnagar, *The Polymeric Materials Encyclopedia*. CRC Press, Inc.
- [2] May, C. A. 1988. Introduction to Epoxy Resins. In C. A. May, *Epoxy Resins Chemistry and Technology Second Edition*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [3] Shokralla, S. A., & Al-Muaiikel, N. S. 2009. Thermal Properties of Epoxy (DGEBA)/Phenolic Resin (Novolac) Blend. *The Arabian Journal for Science and Engineering*.
- [4] Solomons, T. G., Fryhle, C. B., & Snyder, S. A. 2013. Organic Chemistry 11th Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Pham, M.-P. 2011. Theoretical Studies of Mechanisms of Epoxy Curing Systems. Utah.
- [6] Liemawan, F. K. 2014. Pengaruh Penambahan Cobalt Terhadap Sifat Mekanik dan Thermal Epoksi Sebagai Bahan Adhesif Baja ASTM A-36. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [7] Ramaputra, D. W. 2014. Pengaruh Penambahan Mepoxe Terhadap Sifat Mekanik dan Stabilitas Thermal Epoksi Sebagai Bahan Adhesif Baja ASTM A-36. Surabaya: ITS.
- [8] Liu, C., Li, K., Li, H., Zhang, S., & Zhang, Y. 2014, January. The Effect of Zirconium Incorporation on the Thermal Stability and Carbonized Product of Phenoleformaldehyde Resin. *Polymer Degradation and Stability*, 102, 180-185.
- [9] Huang, K., Zhang, Y., Li, M., Lian, J., Yang, X., & Xia, J. 2012, January. Preparation of a Light Color Cardanol-based Curing Agent and Epoxy Resin Composite: Cure-induced Phase Separation and Its Effect on Properties. *Progress in Organic Coatings*, 74, 240-247.
- [10] Augustine, D., Vijayalakshmi, K. P., Sadhana, R., Mathew, D., & Nair, C. R. 2014, September. Hydroxyl Terminated PEEK-Toughened Epoxy-Amino Novolac Phthalonitrile Blends - Synthesis, Cure Studies and Adhesive Properties. *Polymer*, 55, 6006-6016.
- [11] Su, W. A., Chen, K. C., & Tseng, S. Y. 1999, December. Effects of Chemical Structure Changes on Thermal, Mechanical, and Crystalline Properties of Rigid Rod Epoxy Resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 78, 446-451.
- [12] Wang, J., Jiang, N., & Jiang, H. 2009, April. Effect of the Evolution of Phenol-formaldehyde Resin on the High-temperature Bonding. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 718-723.
- [13] Wang, J., Jiang, N., & Jiang, H. 2009, April. Effect of the Evolution of Phenol-formaldehyde Resin on the High-temperature Bonding. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 718-723.
- [14] Nair, C. R. 2004. Advances in Addition-cure Phenolic Resins. *Prog. Polym. Sci.*, 29, 4011-498.
- [15] Zhang, Y., Shen, S., & Liu, Y. 2012, December. The Effect of Titanium Incorporation on the Thermal Stability of Phenol-formaldehyde Resin and its Carbonization Microstructure. *Polymer Degradation and Stability*, 98, 514-518.
- [16] Ahamad, T., & Alshehri, S. M. 2013, May. Thermal Degradation and Evolved Gas Analysis of Epoxy (DGEBA)/Novolac Resin Blends (ENB) During Pyrolysis and Combustion. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 111, 445-451.
- [17] Ren, H., Sun, J., Wu, B., & Zhou, Q. 2007, February. Synthesis and Curing Properties of a Novel Novolac Curing Agent Containing Naphthyl and Dicyclopentadiene Moieties. *Chin. J. Chem. Eng.*, 15(1), 127-131.