

# Pengaruh Kelembaban *Adherend* pada Durabilitas Perbaikan Komposit

Sugiman\* dan Masri\*\*

\*Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram

\*\*Alumni Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram

Email: s-giman@lycos.com

## ABSTRAK

Dalam paper ini pengaruh kelembaban pada perbaikan durabilitas komposit *fiberglass/polyester* telah diselidiki dengan pendekatan *fracture mechanics*. Spesimen berupa *Double Cantilever Beam* yang terbuat dari dua *adherend* komposit *fiberglass/polyester* yang direkatkan dengan perekat epoxy. *Adherend* direndam dalam air distilat untuk memperoleh kelembaban dan kemudian dikeringkan dengan beberapa suhu pengeringan, yaitu suhu kamar selama 12 jam diikuti dengan 100 °C selama 15 menit, 50 °C selama 5 jam dan 100 °C selama 2,5 jam. Spesimen diuji baji pada kondisi kering (lingkungan udara) dan kondisi basah (lingkungan air). Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk pengujian kering, kelembaban yang rendah sesuai dengan suhu pengeringan 100 °C memberikan durabilitas yang lebih baik diikuti dengan suhu pengeringan 50 °C dan kemudian pada suhu kamar. Hal tersebut ditunjukkan dengan energi patah yang relatif cukup tinggi dan juga kecepatan retak yang rendah pada energi patah tinggi. Sedangkan pada pengujian basah, hasil yang lebih baik diperoleh pada suhu pengeringan 50 °C (kelembaban 4,4%) dan suhu pengeringan 100 °C memberikan hasil yang terendah. Hal ini menyarankan bahwa suhu pengeringan seharusnya tidak pada atau lebih tinggi dari 100 °C untuk kondisi lingkungan basah.

**Kata kunci:** Perbaikan, kelembaban, pengeringan, *double cantilever beam*, uji baji, durabilitas.

## ABSTRACT

*In this paper, the effect of moisture on the durability of composite repair is investigated using fracture mechanics approach. The specimens of double cantilever beam were made from two composites adherend (fiberglass/unsaturated polyester) bonded by epoxy adhesives. The adherend were immersed in the distillate water to gain moisture and then dried in different drying conditions at room temperature (RT) for 12 hours followed by 100 °C for 15 minutes, 50 °C for 5 hours and 100 °C for 2.5 hours. The specimen was wedged tested in both dry and wet condition in room temperature. The results show that the lower moisture about 2.8%wt according to drying temperature 100 °C give the better durability followed by drying temperature of 50 °C and room temperature. The indication is shown by stable crack growth at higher fracture energy and also by low crack speed at higher fracture energy. Whereas, for wet testing, the better result is reached by drying temperature of 50 °C (moisture contents of 4,4 %wt) and for dry temperature of 100 °C give the worst result. The contradiction suggested that drying temperature for adherend of composite repair should not higher than 100 °C.*

**Keywords:** Repair, moisture, drying, *double cantilever beam*, wedge test, durabilitas.

## PENDAHULUAN

Komposit yang terbuat dari polyester tak jenuh yang diperkuat oleh fiberglass telah digunakan secara luas di bidang transportasi laut seperti untuk pembuatan kano, speedboat, dan badan kapal-kapal besar [1]. Dalam pengoperasian kapal, ada kalanya terjadi kecelakaan berupa tumbukan dengan batu karang, kapal lain atau terjadi hantaman dengan ombak yang besar, yang mengakibatkan terjadinya beban lebih pada bagian tertentu dari kapal. Adanya

beban lebih tersebut menyebabkan komposit mengalami kerusakan. Beban lebih tersebut juga dapat merambatkan cacat yang ada pada komposit yang dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan awal pada konstruksi, sehingga kerusakan yang terjadi harus segera diperbaiki.

Dalam memperbaiki kerusakan komposit tersebut, bagian yang rusak harus dipotong dan diganti dengan bahan perbaikan. Penambahan bahan baru tersebut pada prinsipnya sama dengan proses penyambungan. Perbaikan bahan komposit dengan

metode sambungan perekat adalah merupakan metode yang paling cocok karena menawarkan beberapa keuntungan seperti ringan, distribusi tegangan lebih merata, permukaan yang lebih halus dan lain sebagainya [2]. Selain itu metode perekatan mampu menghemat ongkos perbaikan dan tidak membutuhkan teknologi tinggi.

Dalam memperbaiki komposit laminat untuk memperoleh kekuatan tinggi dan daya tahan (durabilitas) yang baik, hal yang sangat perlu diperhatikan pada proses perbaikan adalah bahwa komposit bermatrik polimer sangat peka terhadap kelembaban. Pada proses penyambungan, adanya air sangat tidak diharapkan, baik di dalam komposit maupun pada permukaan komposit. Hart-Smith [3] melaporkan bahwa sambungan perekat akan mengalami kegagalan prematur dengan adanya air. Air dapat mempunyai pengaruh yang merugikan pada sambungan perekat baik secara kimia maupun secara fisik. Secara kimia air mempengaruhi struktur kimia resin matrik dan telah dilaporkan bahwa air dapat menurunkan suhu transisi gelas [4]. Sedang secara fisik, air dapat menggembungkan matrik dan menyebabkan tegangan dalam antara fiberglass dan matrik [5]. Hal itu akan menyebabkan retak pada matrik dan atau delaminasi pada antar muka matrik-fiber sehingga daerah yang rusak harus dikeringkan sebelum diperbaiki dengan perekatan. Penggunaan panas dalam proses pengeringan akan memberikan hasil yang lebih baik, namun suhu pengeringan harus diperhatikan agar tidak mempengaruhi struktur kimia atau menyebabkan kerusakan.

Di bawah kondisi beban hampir statis (*quasi-static load*) sambungan perekat harus tahan terhadap beban terpakai dalam jangka waktu yang lama, sehingga menjadi perlu untuk mengontrol kepaduan seluruh konstruksi. Kekuatan sambungan perekat biasanya diperkirakan dengan kekuatan sambungan tarik geser karena pembebanan sebenarnya biasanya dalam geser. Namun beberapa peneliti melaporkan bahwa kekuatan geser tidak memberikan perkiraan yang memuaskan, karena hal itu hanya memberikan perkiraan kekuatan dalam jangka pendek [6]. Lebih lagi Hart-Smith [7] telah memberikan catatan bahwa uji geser tidak memberikan informasi apa-apa tentang durabilitas dan proses pengontrolan, pemantauan dengan uji baji dapat membantu menjamin durabilitas jangka panjang. Dalam hal tersebut pendekatan mekanika perpatahan seharusnya diterapkan karena dapat memberikan perkiraan yang lebih teliti terutama dari sudut pandang perambatan retak. Dengan menggunakan pendekatan mekanika perpatahan Bardis dkk [8] telah mempelajari pengaruh perlakuan permukaan pada durabilitas jangka panjang sambungan perekat dengan uji baji.

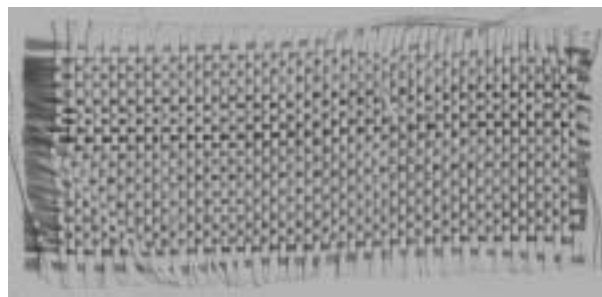
Dalam artikel ini pengaruh kandungan air dalam bahan yang diperbaiki (*adherend*) pada durabilitas perbaikan komposit polyester diperkuat fiberglass dipelajari dengan uji baji. *Double Cantilever Beam* (DCB) digunakan untuk mempelajari kecepatan perambatan retak dalam lingkungan kering dan basah. Baji disisipkan pada DCB untuk mensimulasikan perambatan retak, sampel diamati dan ujung retak dicatat.

## METODE PENELITIAN

### Bahan dan penyiapan spesimen

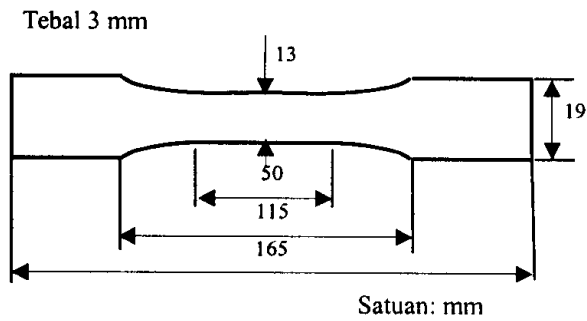
Bahan untuk *adherend* adalah sebuah komposit laminat yang terbuat dari polyester tak jenuh yang diperkuat fiberglass. Laminat tersebut terdiri dari 9 lapis serat anyam dan acak (*mat*) dengan susunan selang-seling dengan serat anyam pada lapis terluarnya. Jenis serat anyam yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1. Susunan ini sering dipakai untuk pembuatan kapal dari komposit fiberglass di CV Aneka Fiberglass Meninting Lombok. Laminat dibuat secara *hand lay-up* dalam cetakan. Matrik resin polyester tak jenuh dengan hardener ditimbang dan dicampur dengan perbandingan resin dan hardener sesuai dengan rekomendasi pembuat. Proses curing dilakukan pada suhu kamar selama 24 jam.

Spesimen dibuat dari *adherend* yang dicetak dengan dimensi panjang 150 mm dan lebar 100 mm dengan ketebalan menyesuaikan dengan jumlah lapis serat (9 lapis mempunyai tebal kira-kira 5 mm). Laminat hasil cetakan tersebut kemudian permukaannya diampelas dengan kertas amplas ukuran 220 mes untuk memperoleh kekasaran permukaan.



Gambar 1. Serat Anyam

Selain itu spesimen uji tarik *adherend* dibuat dengan dimensi (300 x 25,4 x 5) mm dengan jumlah lapis yang sama seperti untuk DCB. Spesimen perekat berbentuk tulang anjing (*dog bone*) dibuat sesuai dengan ASTM D638-90 untuk uji tarik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2. Spesimen Uji Tarik Perekat (dog bone)**

Pengujian dengan kedua jenis spesimen tarik tersebut bertujuan untuk mendapatkan modulus elastis adherend dan perekat yang akan digunakan untuk menghitung energi patah spesimen DCB. Pengujian menggunakan mesin uji tarik universal merk Hung Ta dengan kecepatan penarikan 1 mm/menit.

### Persiapan spesimen

*Adherend* kemudian direndam dalam air distilat selama 101 hari (dari tanggal 18 Oktober 2003 sampai tanggal 27 Januari 2004), kemudian dikeringkan dengan beberapa suhu dan waktu pengeringan. Namun sebelum direndam adherend ditimbang dengan neraca digital untuk mengetahui berat awal. Kandungan air spesimen yang tak direndam diasumsikan 0%. Setelah perendaman selesai spesimen ditimbang untuk mengetahui kandungan air dalam *adherend*. Kandungan air yang terserap oleh spesimen dihitung dengan Persamaan 1.

$$\text{Air terserap} = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

dimana  $W_0$  adalah berat spesimen mula-mula, dan  $W_f$  adalah berat spesimen setelah direndam.

Setelah direndam dan ditimbang, spesimen kemudian dikeringkan dengan beberapa suhu dan waktu pengeringan. Suhu pengeringan tersebut adalah: (a) dikeringkan pada suhu kamar selama 12 jam, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 15 menit, (b) dikeringkan pada suhu 50 °C selama 5 jam, dan (c) dikeringkan pada suhu 100 °C selama 2,5 jam. Penimbangan juga dilakukan setelah pengeringan untuk mengetahui kandungan akhir spesimen sebelum disambung.

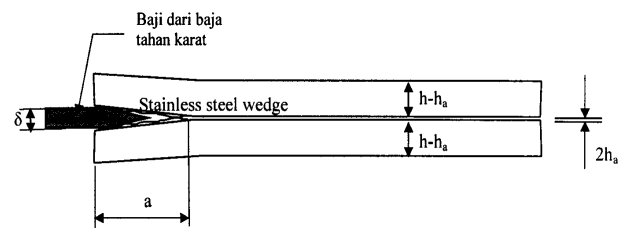
Setelah penimbangan, permukaan adherend kemudian dibersihkan dengan Acetone dengan cara dilap dengan kain katun yang telah dibasahi Acetone. Permukaan *adherend* kemudian dikeringkan selama beberapa menit pada suhu kamar sampai Acetone kering. Adherend siap direkatkan dengan perekat untuk membentuk spesimen DCB. Perekat menggunakan resin Epoxy dengan

Hardener Poliamine yang diperoleh dari PT. Wichem Surabaya. Perbandingan resin dan *hardener* adalah 100 : 120 dalam volume. Penyambungan dilakukan langsung setelah permukaan *adherend* kering, tanpa ditunda untuk menghindari pengotoran lagi oleh debu-debu di udara. Penyambungan dilakukan dengan perekat yang dioleskan dengan ketebalan lapisan perekat rata-rata 0,1 mm.

Untuk mengontrol ketebalan perekat agar tetap sama digunakan *spacer* yang terbuat dari kawat tembaga dengan diameter 0,1 mm. Sambungan tersebut kemudian diklem dengan penjepit kertas agar padu selama (*curing*) pengeringan. Setelah penyambungan selesai, kemudian dilakukan proses pengeringan perekat pada suhu 100 °C selama 3 jam dalam oven listrik merk Gunther dengan kontrol elektronik.

### Uji baji

Spesimen DCB untuk pengujian ini adalah modifikasi dari ASTM D 3762-79 dibuat sebanyak 24 spesimen, sedangkan untuk baji dibuat dari plat baja dengan ketebalan 3 mm seperti terlihat pada Gambar. 3. Kedua sisi pada daerah perekatan diolesi dengan typex putih untuk menambah kontras agar retak kelihatan selama pengamatan.



**Gambar 3. Spesimen DCB dengan Beban Pembajian**

Baji dimasukkan ke dalam sambungan spesimen dan kemudian dipukul dengan menggunakan palu dari karet secara perlahan-lahan hingga mulai terjadi retak. Pemukulan diusahakan agar retak tidak stabil tak terjadi. Waktu perambatan retak dihitung mulai saat awal terjadinya retak. Selanjutnya dilakukan pengukuran dan pencatatan pertambahan retak dengan mikroskop berjalan setiap beberapa selang waktu yang telah ditentukan hingga terjadi kestabilan pertambahan retak. Retak merambat karena terjadi tegangan terinduksi akibat baji yang membuka spesimen selama pembajian.

Pengujian baji ini dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi kering dan kondisi basah. Pada kondisi kering dilakukan di dalam ruangan dengan suhu kamar, sedang pada kondisi basah spesimen direndam dalam air distilat. Pengukuran panjang retakan pada lingkungan basah dilakukan dengan mengambil spesimen selama pengukuran kemudian dikembalikan lagi setelah pengukuran.

Parameter uji dalam penelitian ini adalah energi regangan yang dikeluarkan selama perambatan retak, yang selanjutnya disebut sebagai energi patah mode I ( $G_I$ ), dan dihitung dengan Persamaan 2 dan 3.

$$G_I = \frac{d^2 E h^3 (1 - h_a/h)^3 (a + h)^2}{48(a^3/3 + a^2 b + ab^2)^2} \quad (2)$$

$$\beta = 0.67 h \left\{ \left( 1 - \frac{h_a}{h} \right)^3 \left[ 1 + \frac{h_a}{h} \left( 2 \frac{E}{E_a} - 1 \right) \right] \right\}^{1/4} \quad (3)$$

dengan,  $G_I$  adalah laju energi regangan yang dilepaskan (J/m<sup>2</sup>),  $\delta$  ketebalan baji (mm),  $E$  modulus elastisitas *adherend* (Pa),  $E_a$  modulus elastis perekat,  $h$  setengah tebal *cantilever beam* (mm),  $h_a$  setengah tebal *adhesive* (mm) dan  $a$  panjang retak (mm).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kadar Air laminat dan sifat mekanisnya

Ketika direndam, laminat akan menyerap air sehingga spesimen memiliki kelembaban awal. Hasil penyerapan air oleh komposit laminat setelah direndam selama 101 hari, rata-rata sebesar 5,6% berat. Berat spesimen sebelum perendaman dijadikan acuan dengan kandungan air diasumsikan 0% (untuk pengukuran sebenarnya kadar ini tidak tercapai). Setelah spesimen mengalami pengeringan dengan berbagai macam suhu diperoleh data tentang kadar air yang tersisa dalam spesimen seperti ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Kadar air tersisa dalam adherend setelah pengeringan**

| Perenda-man (hari) | Suhu Pengeringan (°C)            | Kadar air (% Berat) |
|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| 101                | 100 °C, 2,5 jam                  | 2,8                 |
| 101                | 50 °C, 5 jam                     | 4,4                 |
| 101                | RT(30), 12 jam + 100 °C 15 menit | 5,3                 |

Tabel 1 menunjukkan bahwa pengeringan dengan suhu 100 °C selama 2,5 jam memberikan hasil yang lebih baik, dimana kandungan air sisanya paling sedikit, yakni 2.8%. Data tersebut memberikan indikasi bahwa pengeringan dengan suhu tinggi dan dengan waktu yang singkat menghasilkan kualitas pengeringan yang lebih baik dari pada hasil yang dicapai dengan pengeringan pada suhu rendah dan dalam waktu yang lebih lama.

Kadar air yang dinyatakan sebagai hasil pengukuran dalam penelitian ini adalah kadar air rata-rata dari kadar air pada beberapa tingkat kedalaman dari tebal spesimen. Setelah pengeringan, di dekat dan pada permukaan komposit

mempunyai kadar air yang rendah. Di posisi yang semakin dalam dari ketebalannya, maka semakin tinggi kadar airnya. Namun demikian paper ini tidak membahas fenomena tersebut, dimana pembahasan yang lebih detil dapat dilihat pada pustaka 5.

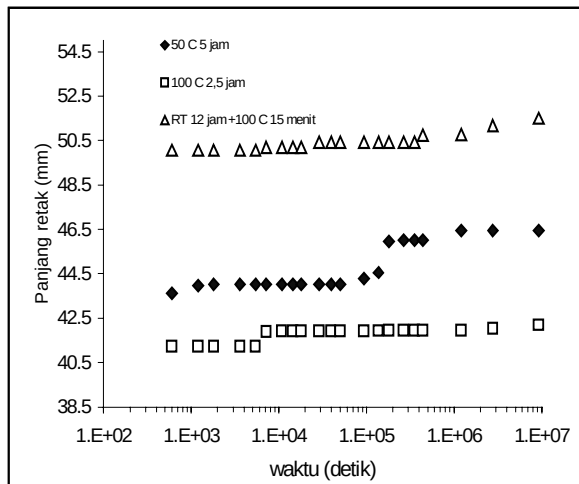
Dari pengujian tarik spesimen laminat *adherend* dan perekat diperoleh nilai modulus elastis dari analisa tegangan-regangan adalah sebesar 3,33 GPa untuk laminat dan 2,4 GPa untuk perekat Epoxy. Modulus elastis laminat diasumsikan konstan sebelum dan sesudah perendaman kemudian diikuti pengeringan. Asumsi tersebut mungkin tidak realistis karena nilai modulus berubah dengan adanya kelembaban. Namun beberapa peneliti menunjukkan bahwa kelembaban mempunyai pengaruh kecil pada penurunan modulus elastis longitudinal laminat fiberglass/polyester [5]. Di lain pihak sifat-sifat laminat akan kembali setelah kelembaban laminat dihilangkan [9, 10].

### Uji baji di lingkungan kering

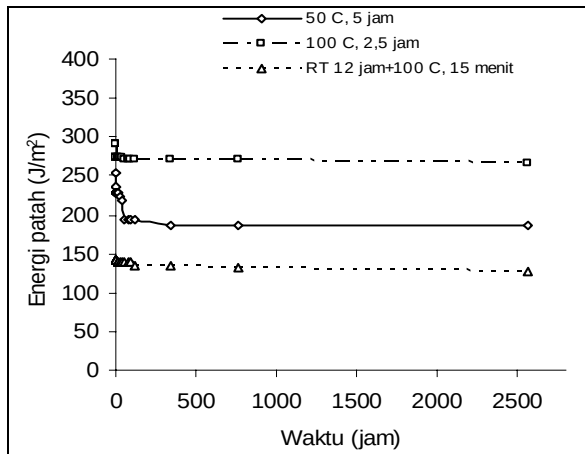
Untuk memaparkan perambatan retak terhadap waktu, maka hasil pengukuran setiap spesimen diplot menjadi kurva semi log waktu terhadap panjang retak. Adapun nilai panjang retak yang diplot adalah merupakan rata-rata hasil pengukuran panjang retak pada dua sisi.

Variasi panjang retak yang cukup besar adalah akibat dari perbedaan panjang retak awal karena pembajian. Namun karena perbedaan gaya pembajian dan posisi baji semula adalah kecil, maka variasi tersebut dapat dianggap sebagai perbedaan ketahanan pertumbuhan retak. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa panjang retak mula-mula pada spesimen dengan pengeringan pada suhu tinggi, (kelembaban lebih rendah) lebih kecil dari panjang retak yang terjadi pada spesimen dengan suhu pengeringan rendah (kelembaban lebih tinggi). Untuk spesimen yang suhu pengeringannya tinggi, perambatan retaknya lebih stabil dari pada spesimen yang suhu pengeringannya rendah.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara energi patah terhadap waktu perambatan retak dalam uji baji spesimen. Karena energi patah merupakan fungsi panjang retak, maka kurva energi patah *versus* waktu perambatan retak menunjukkan kecenderungan yang sama seperti kurva panjang retak *versus* waktu. Energi patah yang tinggi juga ditunjukkan untuk spesimen dengan kelembaban rendah (suhu pengeringan tinggi). Energi patah menurun dengan waktu perambatan retak dan cenderung tetap seiring dengan pertumbuhan retak. Tipikal pembebanan pada simpangan tetap seperti pada uji baji ini adalah mula-mula retak merambat dengan cepat dan kemudian melambat ketika spesimen lebih lenting seiring dengan perambatan retak yang lebih jauh.



**Gambar 4. Panjang Retak vs Waktu Perambatan Retak pada Pengujian Kering**

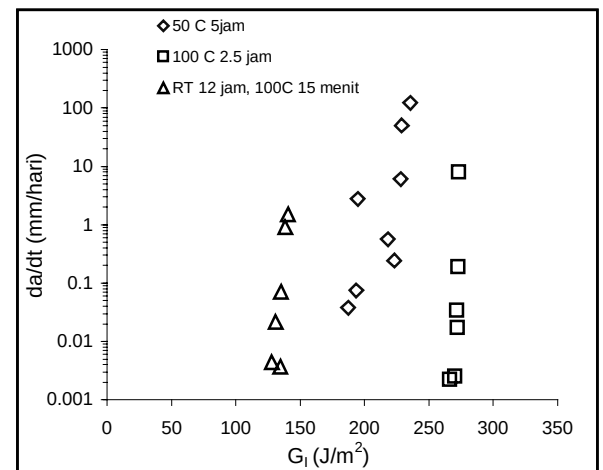


**Gambar 5. Energi Patah vs Waktu Perambatan Retak pada Pengujian Kering**

Tipikal kurva seperti itu dapat dijelaskan bahwa adherend mengalami perubahan suhu setelah perendaman, pengeringan dan curing. Setelah perekatan, perekat mengalami *curing* pada suhu tinggi (100 °C selama 3 jam). Kelembaban berdifusi ke permukaan dan mempengaruhi kondisi antar muka antara laminat dan lapisan perekat. Laminat dengan kelembaban tinggi menyumbangkan kelembaban lebih tinggi pula pada antar muka. Kelembaban membuat perekatan antara laminat dan lapisan perekat menjadi lebih lemah sehingga cenderung menyebabkan kegagalan *interfacial*. Di samping itu kelembaban tersebut juga dapat masuk ke dalam lapisan perekat dan juga berakibat pada penurunan sifat mekanis dari perekat. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa pada kelembaban 2,8% sesuai dengan suhu pengeringan 100 °C selama 2,5 jam, energi patah sedikit turun ( $\pm 10\%$ ) setelah 16 jam dan kemudian cenderung konstan sampai kira-kira 2600 jam dibandingkan terhadap energi patah semula.

Untuk kelembaban 4,4% sesuai dengan suhu pengeringan 50 °C terjadi penurunan dalam energi patah setelah 27 jam dari 250 ke 190 J/m<sup>2</sup>. Energi patah yang stabil tetapi rendah ditunjukkan pada kelembaban 5,3% sesuai dengan pengeringan pada suhu kamar selama 12 jam diikuti dengan 100 °C selama 15 menit. Dari data seharusnya ada ketidak sensitifan energi patah pada pengaruh kelembaban awal pada laminat. Diperkirakan bahwa kelembaban awal laminat seharusnya lebih rendah dari 2%, agar pengaruh kelembaban dapat diabaikan. Peneliti lain Ahn dkk [9] menunjukkan bahwa kelembaban awal laminat karbon epoxy harus lebih rendah dari 1,1%, agar pengaruhnya pada kekuatan perbaikan dapat diabaikan.

Gambar 5 menunjukkan kurva kecepatan retak terhadap energi patah. Hubungan tersebut dimaksudkan untuk membangun kurva dimana pertumbuhan retak tidak sensitif terhadap energi patah dan juga untuk memperkirakan pertumbuhan retak ambang atau pemberhentian retak.

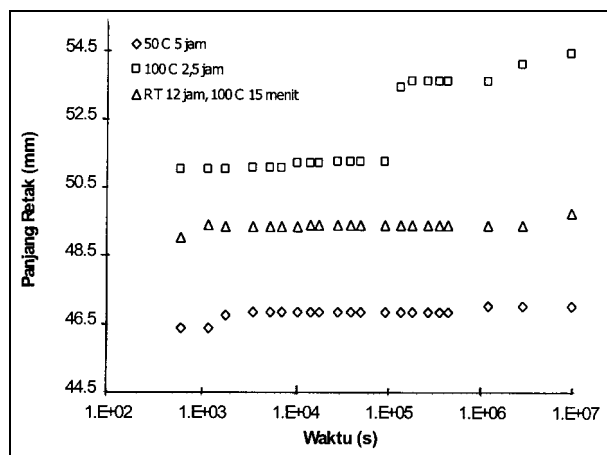


**Gambar 6. Kecepatan Perambatan Retak vs Laju Pelepasan Energi Regangan pada Pengujian Kering**

Kurva dari tiga kondisi pengeringan menunjukkan bahwa kecepatan retak adalah sangat sensitif terhadap energi patah. Hal itu ditandai oleh perubahan kecepatan retak yang tiba-tiba dengan energi patah yang rendah. Sedang bagian yang tidak sensitif yang biasanya terjadi pada kecepatan retak dan energi patah tinggi tidak terlihat. Hal itu karena perambatan retak cukup rendah dan stabil sehingga bagian itu tidak terjadi. Untuk pengeringan pada suhu 100 °C, retak berhenti pada energi patah yang lebih tinggi. Tetapi kecepatan retak rata-rata paling rendah terjadi untuk suhu pengeringan pada suhu kamar selama 12 jam yang diikuti dengan pengeringan pada 100 °C selama 15 menit. Kecepatan retak rata-rata dari ketiga kondisi kelembaban (suhu pengeringan) untuk kondisi kering berkisar antara 0,4-8,71 mm/hari.

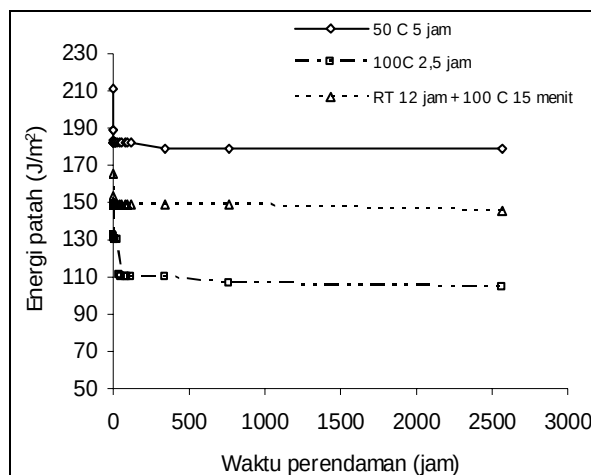
### Uji baji dalam lingkungan kondisi basah

Uji baji dilakukan pada suhu kamar untuk mengukur pertumbuhan retak dari perbaikan laminat karena kelembaban. Pertambahan retak terhadap waktu ditunjukkan dalam Gambar 7. Spesimen dengan kelembaban 2,8% mengalami pertambahan panjang retak paling tinggi. Kemudian berturut-turut diikuti oleh spesimen dengan kelembaban 4,4% dan 5,3%. Kenyataan ini bertolak belakang dengan hasil uji pada kondisi kering dimana pada kelembaban paling rendah mempunyai pertambahan panjang retak yang paling kecil.



**Gambar 7. Panjang Retak vs Waktu Perambatan Retak pada Pengujian Basah**

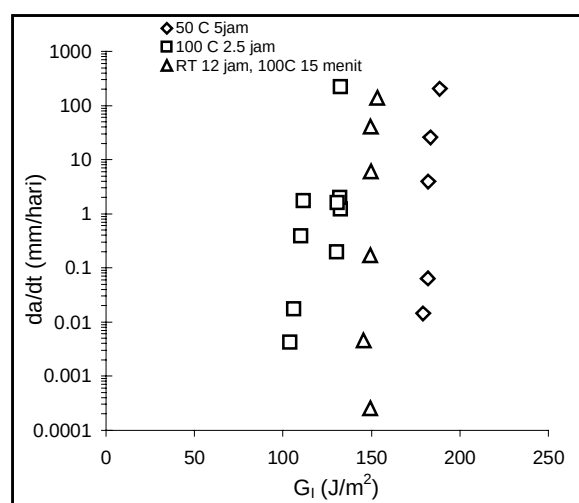
Gambar 8 juga menunjukkan hal yang sama dengan Gambar 7 dimana energi patah spesimen pada kondisi basah jauh lebih rendah dari kondisi kering. Hal ini menunjukkan bahwa adanya air mempengaruhi kondisi spesimen. Untuk adherend dengan kelembaban yang paling rendah, kondisi tersebut sangat merugikan karena pada kondisi kering energi patahnya paling tinggi.



**Gambar 8. Energi Patah dan Waktu Perendaman selama Uji Baji**

Hasil tersebut menyarankan bahwa pengeringan pada suhu 100 °C atau lebih tinggi seharusnya dihindari karena menghasilkan penguapan yang cepat dan cenderung meninggalkan adanya void pada laminat. Seperti ditunjukkan pada Gambar 8 bahwa pada pengeringan 100 °C menghasilkan penurunan yang tiba-tiba pada energi patah setelah 28 jam ( $\pm 14\%$ ) dimana spesimen yang lain masih stabil. Hal ini dapat diterangkan bahwa air berdifusi secara lebih cepat ke dalam laminat karena perbedaan konsentrasi kelembaban yang tinggi. Sedangkan dengan adanya kelembaban awal yang lebih tinggi pada laminat membuat difusi lebih lambat. Kelembaban juga lebih cepat mempengaruhi kondisi antar muka laminat perekat yang pada akhirnya mempengaruhi durabilitas perekatan.

Energi patah yang tinggi pada spesimen dengan kelembaban lebih tinggi dapat diterangkan dengan sifat melekat dari perekat. Tampaknya air yang terserap setelah perekatan menghasilkan penangguhan yang diinduksi oleh air. Hal ini menyebabkan perekat menjadi lebih tangguh dan mampu menghambat perambatan retak. Beberapa peneliti, seperti Armstrong [10] dan Plausinis [11] mengamati hasil serupa tentang penangguhan epoksi yang diinduksi air. Nurchayati dkk [12] menunjukkan pengamatan yang sama sewaktu menyelidiki durabilitas sambungan perekat aluminium dengan perekat epoksi. Mereka menunjukkan bahwa kekuatan geser sambungan meningkat sampai perendaman selama 30 hari. Fenomena ini menarik karena merupakan informasi yang sangat penting dalam mendesain sambungan atau perbaikan menggunakan metode perekatan, namun penyelidikan lebih lanjut diperlukan untuk membuktikan hal tersebut.



**Gambar 9. Kecepatan Perambatan Retak vs Laju Pelepasan Energi Regangan pada Pengujian dalam Air**

Gambar 9 menunjukkan tipikal kurva kecepatan retak versus energi patah DCB untuk kondisi basah. Pada Gambar 9 terlihat bahwa kurva mulai menunjukkan transisi antara daerah sensitif dan tidak sensitif energi patah terhadap kecepatan retak.

Besar energi patah daerah transisi untuk masing-masing spesimen berbeda tetapi untuk rentang kelembaban adherend antara 5,3-2,8% berat adalah sekitar 150-200 J/m<sup>2</sup>. Sehingga setelah energi patah mencapai nilai tertentu dalam rentang tersebut maka retak akan merambat dengan kecepatan konstan berapa pun energi patahnya meningkat. Kecepatan retak rata-rata paling rendah juga terjadi pada suhu pengeringan suhu kamar selama 12 jam dilanjutkan dengan pengeringan oven 100 °C selama 15 menit. Kecepatan rata-rata untuk ketiga kondisi kelembaban pada kondisi basah berkisar antara 8,9 – 12,5 mm/hari.

Gambar 10 adalah spesimen yang dibaji dan permukaan patahan kegagalan setelah spesimen dipatahkan pada kondisi pengujian kering. Dari pengamatan, untuk kedua kondisi pengujian mode kegagalan yang terjadi adalah sama yaitu campuran antara kohesif dan *interfacial*.

Daerah kohesif mempunyai kenampakan yang lebih gelap pada kedua permukaan karena perekat terpisah dan menempel pada kedua permukaan. Sedang pada daerah *interfacial*, perekat memisah dari satu permukaan tetapi sebagian masih melekat pada permukaan pasangannya. Permukaan yang tidak mengandung perekat nampak lebih terang, sedang permukaan dengan perekat yang masih menempel nampak lebih gelap. Namun dari detail pengamatan prosentasi kohesif dan *interfacial* berbeda untuk setiap kandungan kelembaban. Persentase kegagalan *interfacial* lebih besar terjadi pada spesimen yang diuji pada kondisi basah. Gambar hasil patahan pada kondisi pengujian basah dalam makalah ini tidak ditunjukkan.

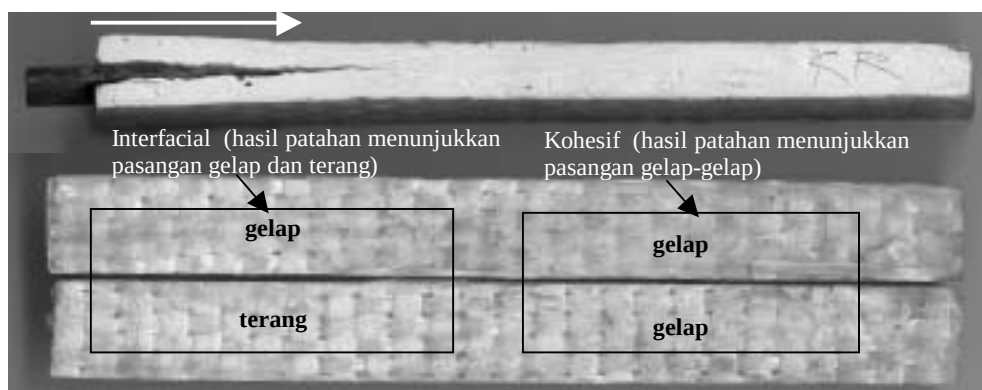
## KESIMPULAN

Uji baji telah dilakukan dalam kondisi kering dan basah dengan memperhatikan kelembaban laminat adherend dalam perbaikan komposit. Dari hasil dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kelembaban pada laminat komposit mempengaruhi kualitas perbaikan. Untuk kondisi pengujian kering kelembaban yang rendah sekitar 2,8% berat sesuai dengan suhu pengeringan 100 °C selama 2,5 jam memberikan durabilitas perbaikan yang lebih baik yang ditunjukkan dengan energi patah yang tinggi selama pembebanan jangka panjang. Sedang pada kondisi pengujian basah, kelembaban lebih tinggi memberikan durabilitas yang lebih baik dibanding dengan kelembaban rendah. Namun secara keseluruhan energi patah pada pengujian kondisi kering lebih rendah dari kondisi basah.
2. Untuk pengujian kering, kecepatan retak spesimen DCB menunjukkan laju yang jauh lebih rendah dari pada pengujian pada kondisi basah, dengan perbandingan dalam rentang antara 0,04-0,7. Tetapi spesimen dengan kelembaban paling tinggi mempunyai kecepatan retak rata-rata yang paling rendah untuk kedua kondisi pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Peters, S.T., 1996, Advanced Composite Materials and Processes in *Handbooks of Plastics, Elastomers and Composites*, C.A. Harper (editor), 3<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York.
2. Petrie, E.M., 1996, Joining of Plastic, Elastomers and Composites in *Handbooks of Plastics, Elastomers and Composites*, Harper C.A. (editor), 3<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York.



**Gambar 10. Spesimen dan Permukaan Patahan pada Pengujian Kondisi Kering. Panah putih menunjukkan arah perambatan retak. Patahan *interfacial* dan patahan kohesif ditunjukkan dengan kotak berbatas garis hitam.**

3. Hart-Smith, L.J., 1993, Joining of Organic-Matrix Composites, *ASM International*, pp. 1026-1027.
4. Delasi, R., and Whiteside, J.B., 1987, Effects Moisture on Epoxy Resins and Composite, in J.R. Vinson (ed.) *Advanced Composite Materials-Environmental Effects*, ASTM STP 658, pp. 2-20, American Society for Materials Testing, Philadelphia.
5. Gibson, R.F., 1994, Principles of Composite Material Mechanics, Mc Graw-Hill. New York.
6. Broughton, W.R., Crocker, L.E. and Urquhart, J.M., 2001, Strength of Adhesive Joints: A Parametric Study, NPL Report MATC(A)27, NPL Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK. [www.google.com](http://www.google.com).
7. Hart-Smith, L.J., 1997, A Peel Type Durability Test Coupon to Access Interface in Bonded, Co-Bonded, and Co-Cured Composite Structures, McDonnell Douglas Paper MDC97K0042, presented to MIL-HDBK-17 Meeting, 14-17 April, Tucson, AZ.
8. Bardis, J.D, Kedward, K., 2004, Effects of Surface Preparation on Long-Term Durability of Composite Adhesive Bonds, Mechanical Engineering, University of California Santa Barbara, CA 93106. [www.google.com](http://www.google.com).
9. Ahn, S.H., Springer, S.G., 1998, Repair of composite laminate II: Test results, *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 11, pp. 1036-1074.
10. Amstrong, K.B., 1996, Effect of Absorbed Water in CFRP Composites on Adhesive Bonding, *Int. J. Adhesion and Adhesives* Vol.16 No. 1, pp. 21-28.
11. Plausinis, D., Spelt, J.K., 1995, Designing for Time Dependent Crack Growth In Adhesive Joints, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol.15. No.3 pp. 143-154.
12. Nurchayati, Sugiman, 2005, Pengaruh Kekasaran Permukaan Adherend dan Lama Perendaman terhadap Kekuatan Geser Sambungan Perekat Aluminium, *Journal of Oryza*, Vol. IV, No. 3, pp. 172-181.