

Evaluasi Kondisi Komponen Pengaku pada Menara Pendingin dan Perkiraan Sisa Masa Pakainya (*Evaluation on Bracing Component of Cooling Tower and Estimation for Its Remaining Service-Life Time*)

Effendi T Bahtiar^{1*}, Wilis Wiryawan², Kholiyah¹, Rita K Sari¹, Arinana¹, Naresworo Nugroho¹

¹ Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor,
Kampus IPB Darmaga Bogor, Jawa Barat, 16680

² Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd., Perkebunan Kertamanah, Desa
Margamukti, Pangalengan, Bandung, Jawa Barat.

*Penulis korespondensi: bahtiar_et@yahoo.com

Abstract

Cooling tower is a refrigeration system that releases heat into the air to reduce the water temperature by evaporation mechanism. Cooling tower reduces the temperature by pouring the hot water from the top into the basin, passing through its fin thus the water scattered and made contact with the windy cold air. This research aims to measure the bracing components degradation of the 15 years old cooling tower and to estimate its remaining service-life time. Some tests were conducted namely wood identification, preservatives residual presence testing, density degradation measurement, static mechanical testing, and creep testing. The wood was identified as Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). The test results showed that the wood cell has been deteriorated, the wood density in the outer part has been lowered than the control, and some mechanical properties degradation was occurred so that the values become lower than NDS 2005 specification. Creep testing revealed that the wood strength continues to reduce with the longer loading time. Based on the wood deterioration rate and its strength reduction rate, the mathematical model was built to estimate the remaining service life time of the wood. The model estimated that the remaining service life time of the bracing component is 7 years.

Keywords: bracing component, cooling tower, long term loading, mathematical model, wood deterioration rate.

Abstrak

Menara pendingin merupakan sistem pendinginan yang melepaskan panas ke udara untuk menurunkan suhu air melalui mekanisme penguapan. Air panas ditumpahkan dari puncak ke dasar menara, melewati sirip-sirip sehingga air terpecah dan kontak dengan angin dingin. Penelitian ini ditujukan untuk mengukur degradasi komponen pengaku pada bangunan menara pendingin yang telah berumur 15 tahun, serta menduga sisa umur pakainya. Beberapa pengujian dilakukan antara lain identifikasi jenis kayu, uji sisaan bahan pengawet, pengukuran degradasi kerapatan, uji mekanis statis, dan uji rangkai. Kayu diidentifikasi sebagai Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa dinding sel kayu telah terdegradasi, kerapatan kayu di lapisan luar telah menurun di banding kontrol, dan sifat-sifat mekanis kayu telah terdegradasi sehingga nilainya menjadi lebih rendah daripada spesifikasi NDS 2005. Uji *creep* juga menunjukkan bahwa kekuatan kayu terus menurun seiring dengan semakin lamanya jangka waktu pembebanan. Berdasarkan laju deteriorasi kayu dan penurunan kekuatan selama jangka waktu pembebanan, sebuah model matematika dibangun untuk

menduga sisa masa pakai kayu. Model yang dibangun menghasilkan dugaan sisa masa pakai komponen pengaku yaitu 7 tahun lagi.

Kata kunci: komponen pengaku, menara pendingin, pembebanan jangka panjang, model matematika, laju deteriorasi kayu.

Pendahuluan

Kayu telah sejak lama digunakan sebagai bahan bangunan. Bahtiar *et al.* (2012) menyatakan bahwa sebagai material organik, kayu menjadi pilihan tepat untuk konstruksi hijau karena memiliki siklus alamiah tertutup akibat kemampuannya untuk terdekomposisi oleh faktor-faktor lingkungan. Kayu dipergunakan sebagai pilihan utama komponen struktur menara pendingin sejak struktur tersebut diperkenalkan pertama kali di dunia. Menara pendingin merupakan suatu sistem pendinginan yang melepaskan panas ke udara melalui mekanisme penguapan (evaporasi) untuk mendinginkan air panas. Menara pendingin menurunkan temperatur air panas dengan menumpahkan air dari puncak ke dasar menara, melewati sirip-sirip sehingga air terpercik dan kontak dengan angin dingin dari kipas (Stanford 2003). Selain untuk komponen struktur utama, kayu juga dipergunakan untuk komponen pengaku (*bracing*). *Bracing* adalah bagian pengaku pada struktur yang menerima gaya lateral (Badrauddin *et al.* 2013). *Bracing* dipasang menyilang dan menghubungkan antar komponen struktur utama sehingga bangunan menjadi lebih kaku. Komponen *bracing* digunakan sebagai contoh uji dalam penelitian ini karena dapat diambil dari struktur dengan tingkat resiko yang rendah. Komponen struktur utama sangat sulit untuk diambil karena beresiko struktur menjadi runtuh saat komponen struktur utama tersebut diambil.

Morisson (2008) menyatakan bahwa kayu merupakan material yang paling ekonomis digunakan untuk menara pendingin dengan masa pakai cukup panjang dibandingkan beton, metal, atau *fiberglass*. Kayu memiliki kekuatan yang tinggi dibandingkan kerapatannya, mempunyai daya tahan tinggi terhadap pengaruh kimia dan listrik, dapat segera diganti, dan mudah dikerjakan. Kayu memiliki ketahanan tinggi terhadap asam ringan dan larutan garam-garam asam (FPL 1999) seperti yang banyak terkandung di sumber-sumber air panas. Tidak seperti komponen beton, material terkikis dari kayu sangat sedikit dan tidak bersifat korosif terhadap logam. Setelah didinginkan di menara pendingin kayu, air dapat digunakan untuk mendinginkan mesin atau diinjeksikan lagi ke dalam tanah karena zat asing terlarut sangat sedikit. Karena sifat-sifat tersebut di atas, kayu paling populer digunakan sebagai komponen utama menara pendingin di seluruh dunia.

Penggunaan kayu sebagai material menara pendingin sudah dilakukan sejak lama. Kondisi menara pendingin yang selalu basah serta lamanya waktu pemakaian akan mengakibatkan degradasi mutu kayu. Degradasi tersebut terutama berupa dekomposisi kayu oleh faktor fisis, mekanis, kimia, dan biologi selama jangka waktu penggunaannya. Sebagaimana material pada umumnya, kayu juga mengalami penurunan kekuatan ketika menerima beban jangka panjang. Kombinasi berbagai faktor tersebut berpengaruh terhadap keterbatasan umur masa pakai kayu untuk komponen menara pendingin.

Menara pendingin berbahan kayu pada umumnya merupakan konstruksi khusus yang didesain untuk jangka waktu pemakaian 25 tahun. Umur rencana menara pendingin tersebut lebih panjang daripada konstruksi kayu penggunaan umum yang biasanya dirancang untuk 10 tahun penggunaan standar. Monitoring dan pemeliharaan berkala pada menara pendingin perlu dilakukan untuk mempertahankan fungsi layannya sampai akhir masa pakainya. Evaluasi kondisi dan pendugaan sisa masa pakai menara pendingin yang telah beroperasi lebih dari setengah umur rencananya harus dilakukan agar pihak manajemen dapat mengambil keputusan untuk memperpanjang pemakaian dengan melakukan tindakan pemeliharaan yang tepat, mengganti sebagian komponen, atau bahkan merobohkan lalu mengganti dengan konstruksi baru.

Bahan dan Metode

Penelitian ini dilakukan selama tiga bulan dari bulan September sampai Desember 2014 di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd. Pelaksanaan pengujian dilakukan di Divisi Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor dan Laboratorium *Scanning Electron Microscope* (SEM), Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.

Pengambilan contoh uji

Contoh uji balok kayu diambil dari komponen pengaku (*bracing*) pada menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd, Pengalengan, Jawa Barat. Batang diambil sesuai dengan kondisi batang yaitu batang yang masih baik,

mengalami kerusakan sedang, dan kerusakan paling parah. Dua batang yang masih baik diambil dari kayu cadangan yang disimpan di gudang. Batang yang mengalami kerusakan sedang dan parah dipilah secara visual dan diambil dari komponen yang telah digunakan selama 15 tahun, masing-masing dua batang. Sesuai dengan uraian di atas, terdapat enam batang contoh uji *bracing* yang selanjutnya diangin-anginkan selama 2 hari, lalu dipotong-potong sesuai dengan ukuran masing-masing pengujian.

Persiapan contoh uji

Pertama-tama pengukuran dimensi kayu diukur dan sketsa pemotongan contoh uji digambar. Proses selanjutnya adalah pemotongan kayu dengan dimensi pengujian sesuai dengan standar British (BS 373-1957). Dimensi kayu untuk uji lentur, tarik, dan rangkak (*creep*) berukuran 2×2×30 cm, sedangkan untuk uji tekan sejajar dan tegak lurus serat berukuran 2×2×10 cm. Setelah dipotong, kayu diangin-anginkan dengan bantuan kipas angin selama 2×24 jam. Selanjutnya kayu dimasukkan ke dalam oven dengan suhu yang semakin meningkat, mula-mula 60°C, 80°C, hingga 100°C masing-masing selama 24 jam sehingga contoh uji telah berada dalam oven selama 72 jam. Setelah dikeluarkan dari oven, contoh uji diangin-anginkan kembali agar suhunya turun dan kadar airnya kering udara. Setelah tahap persiapan sampel ini selesai, sampel kayu siap diuji ke tahap selanjutnya.

Identifikasi jenis kayu

Identifikasi jenis kayu dilakukan dengan pengamatan makroskopis dan mikroskopis. Proses identifikasi dimulai dengan pembuatan sayatan mikrotom.

Sebelum proses penyayatan, sampel terlebih dahulu direbus dalam air dengan suhu 80°C selama satu minggu. Penyayatan dilakukan pada tiga penampang yaitu radial, tangensial, dan transversal. Hasil sayatan diwarnai dengan direndam safranin selama 24 jam, setelah itu dilakukan pencucian dengan air dan alkohol bertingkat dengan konsentrasi 30%, 50%, 70%, 90% dan absolut. Setelah pencucian, sampel dicelupkan ke dalam xylol sampai bening. Identifikasi mikroskopis dilakukan dengan perbesaran 40×. Identifikasi dilakukan berdasarkan pengamatan terhadap ciri-ciri khusus yang ditemukan pada ketiga bidang kayu tersebut. Sebagai standar identifikasi kayu, dipilih *chart keys* dari buku *Identifying Wood Accurate Results with Simple Tools* karangan R. Bruce Hoadley tahun 1990 dan *Wood Identification and Use Revised and Expanded* karangan Terry Porter tahun 2006.

Identifikasi bahan pengawet boron

Salah satu jenis pengawet yang banyak digunakan adalah pengawet yang mengandung boron. Untuk mengetahui adanya boron pada kayu dilakukan pengujian menggunakan pereaksi A yang terdiri atas 2 g ekstrak kurkuma dalam 100 ml alkohol disemprotkan pada contoh uji. Sampel dibiarkan 10-15 menit, lalu pada lokasi yang sama disemprotkan pereaksi B berupa 20 ml HCl yang dijenuhkan dalam asam salisilat lalu ditambahkan dengan 80 ml alkohol. Adanya unsur boron ditunjukkan oleh warna oranye kemerahan yang timbul pada lokasi penyemprotan.

Identifikasi bahan pengawet tembaga

Pengujian keberadaan pengawet tembaga dilakukan menggunakan pereaksi A

berupa 1 bagian amonia pekat (10 ml) dalam 6 bagian aqua destilata (60 ml) disemprotkan pada contoh uji. Sampel dibiarkan 10-15 menit, lalu pada lokasi yang sama disemprotkan pereaksi B yang terdiri atas 0,1 g asam rubianat dalam 18 ml alkohol lalu ditambahkan 2 ml aseton. Adanya unsur tembaga ditunjukkan oleh warna biru kehitaman yang timbul pada lokasi penyemprotan.

Pengamatan degradasi dinding sel kayu

Pengamatan degradasi dinding sel dilakukan dengan mengamati foto SEM perbesaran 200× dan 500×. Perbesaran 500× dipilih pada bagian yang menunjukkan gejala kerusakan. Sampel diambil dari bagian tengah dan tepi. Degradasi terjadi pada bagian tepi, sedangkan bagian tengah diasumsikan tidak terdegradasi sehingga digunakan sebagai kontrol.

Pengukuran degradasi kerapatan kayu

Kedalaman kerusakan kayu ditentukan dengan cara mengukur kerapatan kayu di berbagai kedalaman lalu memplotkannya di diagram kartesius seperti telah dilakukan oleh Bahtiar *et al.* (2012a dan 2012b). Pengukuran kerapatan kayu di setiap kedalaman dilakukan dengan cara menimbang kayu dan mengukur dimensinya, lalu kayu diserut pada empat permukaan. Setelah diserut, kayu ditimbang dan dimensinya diukur kembali. Kerapatan di setiap kedalaman diukur dan dihitung berdasarkan rumus:

$$\rho_i = \frac{W_i - W_{i+1}}{V_i - V_{i+1}}$$

dimana:

ρ_i = kerapatan kayu pada kedalaman ke-*i*

W_i = berat kayu sebelum serutan ke-*i*

W_{i+1} = berat kayu sesudah serutan ke-*i*

V_i = volume kayu sebelum serutan ke- i
 V_{i+1} = volume kayu sesudah serutan ke- i

Kerapatan kayu tersebut diplotkan di diagram kartesius dengan absisnya adalah kedalaman dan ordinatnya adalah kerapatan sehingga sebuah kurva kerapatan di setiap kedalaman kayu dapat dibuat. Kerusakan dianggap telah terjadi ketika kerapatan kayu lebih rendah daripada kontrol. Kayu bagian dalam dianggap sebagai kontrol. Titik pertemuan pertama antara kurva kerapatan dengan kerapatan kontrol menunjukkan batas kedalaman kerusakan.

Degradasi sifat mekanis kayu

Pengukuran sifat mekanis kayu dilakukan sesuai dengan British Standard BS 373-1957 (BSA 1957). Sifat mekanis yang diuji meliputi lentur (MOE dan MOR), tarik sejajar serat, tekan sejajar serat, dan tekan tegak lurus serat. Pengukuran kadar air dilakukan sesaat setelah contoh uji selesai diuji mekanis. Pengujian sifat mekanis kayu harus dilakukan pada kadar air di bawah 15%. Selanjutnya nilai-nilai sifat mekanis kayu diolah lebih lanjut menjadi tegangan ijin sesuai dengan prosedur ASTM D2915. Secara umum, tegangan ijin diperoleh melalui rumus:

$$F_i = \frac{\bar{F}_i - 1.645s}{AF}$$

dengan:

F_i = tegangan ijin (F_b =tegangan ijin lentur,

$F_{t//}$ = tegangan ijin tarik sejajar serat,

$F_{c//}$ = tegangan ijin tekan sejajar serat,

$F_{c\perp}$ = tegangan ijin tekan tegak lurus serat),

\bar{F}_i = rata-rata hasil pengujian,

s = standar deviasi,

AF = faktor penyesuaian sesuai daftar ASTM D2915 (ASTM 2003).

Nilai tegangan ijin dibandingkan dengan nilai standar yang dicantumkan pada *National Design Specification* (NDS) 2005 (AF&PA 2005). Jika nilai tegangan ijin hasil pengukuran lebih rendah daripada nilai yang ditetapkan NDS 2005, maka kayu dianggap telah mengalami penurunan mutu kekuatan. Selain itu nilai tegangan ijin hasil pengukuran juga dibandingkan nilai tetapan NDS 1991 (AF&PA 1991) karena pada saat konstruksi menara pendingin tersebut dibangun, spesifikasi desain konstruksi yang dipakai adalah NDS 1991.

Pengujian rangkak (*creep*)

Pengujian rangkak (*creep*) dilakukan untuk menentukan penurunan kekuatan kayu akibat beban jangka panjang. Pengujian rangkak diawali dengan pengujian lentur statis pada contoh uji lentur berukuran $(2 \times 2 \times 30)$ cm³ untuk mendapatkan rata-rata besaran defleksi pada saat patah. Selanjutnya sampel yang lain diuji creep yaitu diberikan beban tetap dengan konfigurasi lentur *center point loading*. Beban yang diberikan pada masing-masing sampel yaitu 25, 40, 55, dan 70 kg. Beban dibiarkan menggantung pada contoh uji selama 10 – 11 hari atau sampai contoh uji patah. Besarnya defleksi diukur dan dicatat setiap 10 menit selama 10 – 11 hari dengan menggunakan *linear variable data transducer* (LVDT) yang dilengkapi dengan *Multi Purpose Data Indicator* (MDPI). Data jangka waktu pembebanan dan besarnya defleksi selama pembebanan diplotkan pada diagram Cartesius dan dibangun kurva defleksi (y) sebagai fungsi dari jangka waktu pembebanan (T). Fungsi tersebut

didekati melalui regresi nonlinier dengan fungsi *Weibull*.

Estimasi sisa masa pakai kayu pengaku (*bracing*)

Pendugaan sisa umur pakai kayu dilakukan pada 3 contoh uji balok pengaku yang secara visual terlihat dalam kondisi baik (kayu cadangan), rusak sedang, dan rusak parah. Masing-masing contoh uji balok dipotong berukuran sama dengan uji lentur statis yaitu $(2 \times 2 \times 30)$ cm³ untuk uji rangkak (*creep*). Terdapat 4 – 6 contoh uji kecil dari masing-masing balok, sehingga uji rangkak dilakukan pada 15 benda uji. Hasil uji creep yaitu suatu fungsi yang menyatakan hubungan antara defleksi (*y*) dengan jangka waktu pembebanan (*t*) dipergunakan sebagai dasar pendugaan sisa masa pakai kayu. Pendugaan dimulai dengan menghitung rata-rata MOR, defleksi patah dan *initial deflection* saat uji lentur statis, serta defleksi yang terjadi saat pengujian rangkak. *Initial deflection* merupakan defleksi sesaat segera setelah contoh uji diberi beban tetap pada uji creep. Nilai *initial deflection* ini diasumsikan sama dengan nilai defleksi uji lentur statis ketika beban yang diberikan sama dengan beban creep. Selanjutnya nilai-nilai tersebut diolah secara matematis sehingga diperoleh model yang memiliki ketelitian cukup memadai untuk menduga sisa masa pakai kayu. Model yang digunakan pada pengolahan data penelitian ini adalah model eksponensial dan power sesuai dengan pendekatan teoritis yang dikembangkan Bahtiar *et al.* (2012a dan 2012b). Model yang dibangun berdasarkan prinsip-prinsip kekuatan bahan tersebut dikombinasikan dengan laju deteriorasi yang mengurangi momen inersia dan luas bidang penampangnya. Dengan demikian, sisa

masa pakai dalam penelitian ini diduga berdasarkan pengaruh dua aspek yaitu laju penurunan sifat mekanis dan laju deteriorasi kayu.

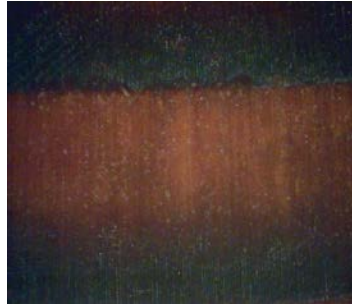
Hasil dan Pembahasan

Identifikasi jenis kayu

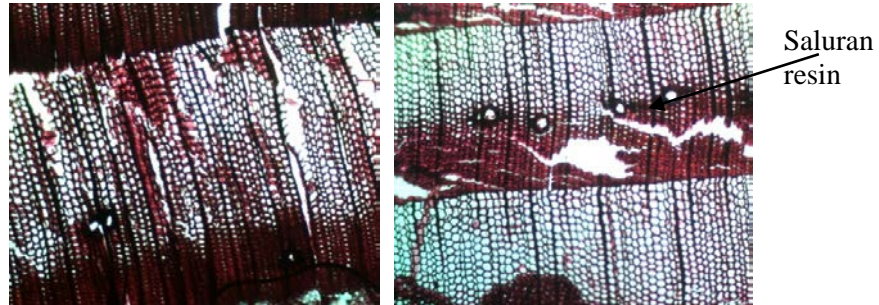
Hasil identifikasi kayu secara makroskopis dan mikroskopis yang mengacu pada Hoadley (1990) dan Porter (2006) menunjukkan bahwa kayu yang digunakan sebagai komponen pengaku pada menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd Pengalengan Bandung ini merupakan jenis douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). Secara makroskopis *Douglas fir* mempunyai ciri-ciri bertekstur kasar, perbedaan antara kayu awal dan akhir sangat mencolok, mempunyai saluran resin, dan berserat lurus. Foto makroskopis penampang lintang kayu disajikan pada Gambar 1. Pengamatan lebih lanjut pada foto mikroskopis (Gambar 2 dan 3) menunjukkan ciri-ciri *Douglas fir* yaitu memiliki saluran resin yang berukuran kecil, distribusi saluran resin tidak merata dengan jumlah yang sedikit, sel-sel epitel ber dinding tebal, dan memiliki dinding sel trakeid yang halus.

Identifikasi Bahan Pengawet

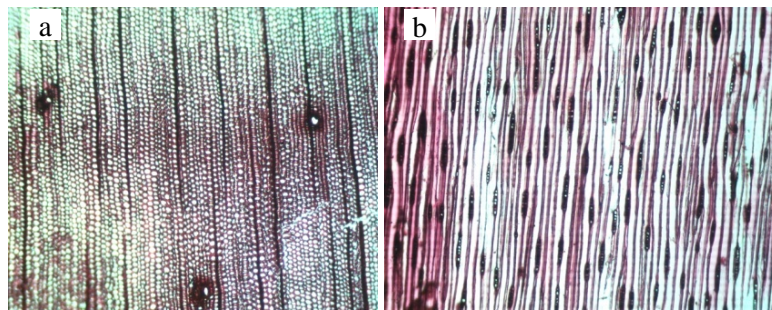
Identifikasi sisa bahan pengawet menunjukkan adanya kandungan pengawet boron dan tembaga. Keberadaan senyawa boron ditunjukkan dengan adanya perubahan warna dari kuning menjadi lebih gelap kemerahan pada kayu setelah diuji penetrasi boron (Gambar 4). Sedangkan keberadaan senyawa tembaga ditunjukkan dengan adanya perubahan warna menjadi lebih gelap kebiruan ketika diuji (Gambar 5).



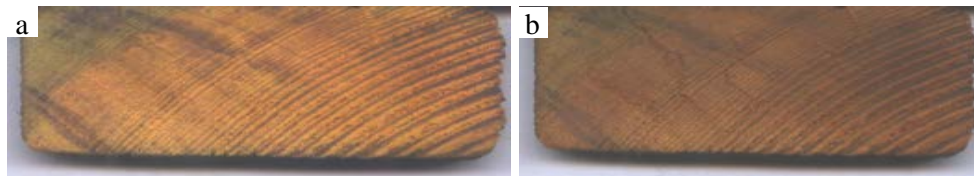
Gambar 1 Penampang lintang kayu contoh uji (perbesaran 3×)



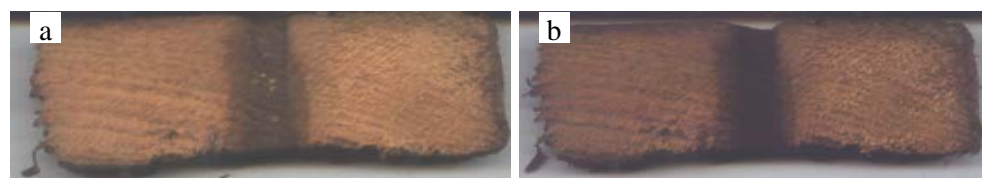
Gambar 2 Penampang lintang hasil sayatan (mikrotom) (perbesaran 40×)



Gambar 3 Penampang radial (a) dan tangensial (b) kayu hasil sayatan mikrotom (perbesaran 40 ×)



Gambar 4 Perubahan warna kayu dari kuning (a) menjadi gelap kemerahan (b) setelah diuji penetrasi boron menunjukkan masih terdapat sisa bahan pengawet boron



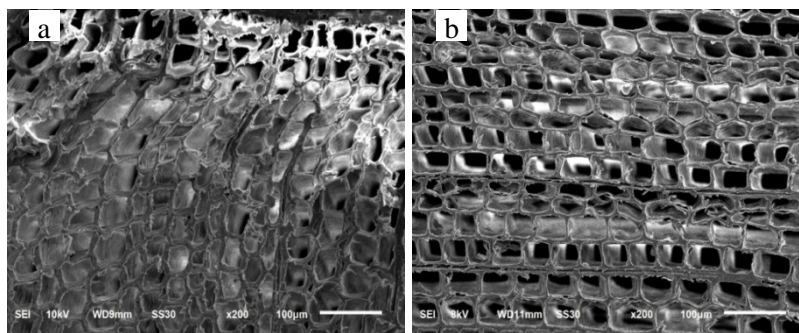
Gambar 5 Perubahan warna kayu (a) menjadi gelap kebiruan (b) setelah diuji penetrasi tembaga menunjukkan masih terdapat sisa bahan pengawet tembaga

Pengujian penetrasi boron dan tembaga memperlihatkan bahwa masih terdapat kandungan bahan pengawet boron dan tembaga pada kayu meskipun kayu tersebut telah terbilas air berulang-ulang selama beroperasinya menara pendingin sejak 15 tahun lalu. Bahan pengawet tersebut bersifat racun sehingga mencegah serangan organisme perusak kayu. Oleh karena itu deteriorasi kayu pada menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd, lebih dominan disebabkan oleh faktor fisik dan lingkungan. Faktor fisik dan lingkungan yang berpengaruh terhadap kerusakan kayu adalah kadar air, suhu, dan kondisi cuaca (sinar UV). Perubahan kadar air dan suhu yang berulang-ulang dalam jangka panjang dapat mengakibatkan *fatigue* (kelelahan) pada kayu karena peristiwa kembang susut yang berulang-ulang. Kikisan permukaan kayu oleh limpasan air dan hembusan angin dapat mengurangi luas penampang kayu sehingga beban yang dapat diterima menjadi berkurang. Berkurangnya luas penampang menyebabkan berkurangnya momen inersia penampang pada konstruksi terlentur sehingga kemampuan menahan beban lentur menjadi berkurang. Beban dinamis

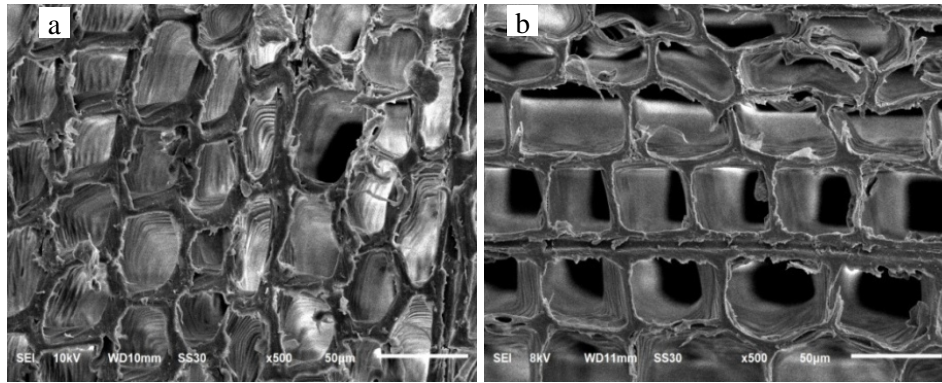
berupa putaran kipas angin berukuran besar di puncak menara pendingin menyebabkan getaran pada struktur yang dalam jangka panjang dapat menurunkan kekakuan dan kekuatannya.

Degradasi dinding sel kayu

Hasil pengamatan secara kasat mata pada foto SEM sel kayu *Douglas fir* menunjukkan kerusakan pada sel kayu berupa terkikisnya dinding lamela. Kerusakan dinding lamela ini terjadi pada kayu bagian tepi maupun tengah. Pada kayu bagian tepi kerusakan berupa terpisahnya dinding lamela dengan celah sel berukuran cukup panjang dan menerus, bentuk sel juga telah terdeformasi sehingga tidak lagi teratur (Gambar 6a). Pada kayu bagian tengah, bentuk sel masih sempurna dan pemisahan dinding lamela juga masih sedikit yaitu membentuk retak-retak pendek (Gambar 6b). Selain itu, dinding dalam rongga sel juga banyak yang mengkerut (Gambar 7). Hal ini terjadi karena kayu sering terkena limpasan air sehingga sel-sel kayu terkikis. Distribusi kerusakan tidak merata pada seluruh bagian, secara umum kondisi sel kayu masih cukup baik.



Gambar 6. Foto SEM perbesaran 200×: Pada kayu bagian tepi terjadi deformasi sel dan pemisahan lamela tengah membentuk celah yang menerus (a), dan pada kayu bagian dalam bentuk sel masih teratur dan sedikit retak-retak pendek (b)



Gambar 7. Foto SEM perbesaran 500×: pada kayu bagian tepi permukaan dinding sel kasar dan berkerut-kerut (a), pada kayu bagian dalam permukaan dinding sel halus (b)

Kondisi kayu yang selalu tersiram air menyebabkan sel-sel kayu terkikis oleh air. Kayu bagian tepi menerima benturan langsung dengan air mengalir sehingga mengalami kerusakan lebih parah dibandingkan kayu bagian dalam. Selain itu bagian tepi kayu menerima sinar matahari langsung dan hembusan angin. Fluktuasi intensitas sinar matahari menyebabkan pergerakan perubahan suhu kayu sehingga kayu mengalami kembang susut. Suhu pada kayu bagian tepi berfluktuasi lebih cepat daripada bagian dalam sehingga terjadi perbedaan laju kembang susut. Perbedaan laju kembang susut tersebut menimbulkan tegangan internal pada kayu yang terjadi secara berulang dalam waktu yang panjang. Selain dipengaruhi oleh fluktuasi suhu, kembang susut pada kayu juga dipengaruhi oleh kadar air. Sebagai benda higroskopis, kayu dapat menyerap dan melepaskan kayu dari lingkungannya untuk mencapai kadar air keseimbangan. Kayu mengembang ketika kadar air meningkat, sebaliknya menyusut ketika lebih kering. Kembang susut menyebabkan tegangan internal yang terjadi secara berulang dalam jangka waktu yang lama sehingga dapat menyebabkan *fatigue* (kelelahan) pada kayu (Mardikanto *et al.* 2011).

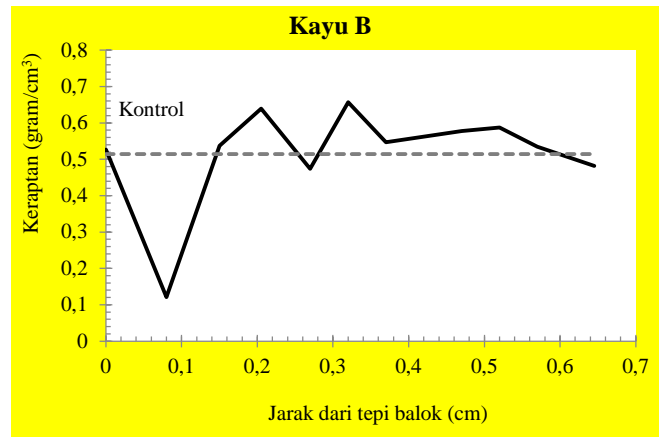
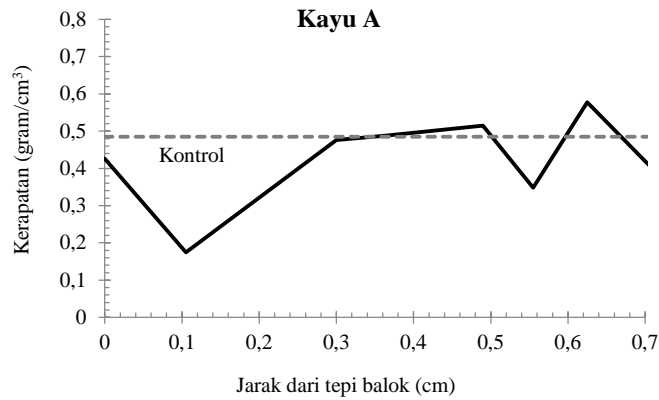
Degradasi dinding sel kayu juga dapat disebabkan oleh paparan sinar ultra violet (UV) matahari dalam jangka waktu lama. Penyinaran UV mempengaruhi penyusutan dinding sel yang menimbulkan retak-retak kecil pada lamela tengah. Lamanya penyinaran UV juga dapat menyebabkan kayu kehilangan beratnya. Kehilangan berat sangat dipengaruhi oleh suhu dan energi penyinaran. Kehilangan berat akan jauh lebih tinggi jika kayu disinari dalam air (Fengel dan Wegener 1995). Pada kayu di menara pendingin, laju kerusakan sel ini diperparah dengan tambahan energi kinetik dari limpasan air. Energi kinetik mengikis permukaan dinding sel kayu yang telah melunak akibat paparan sinar UV pada kayu basah. Paparan UV dapat mendegradasi lignin sehingga kayu menjadi lapuk.

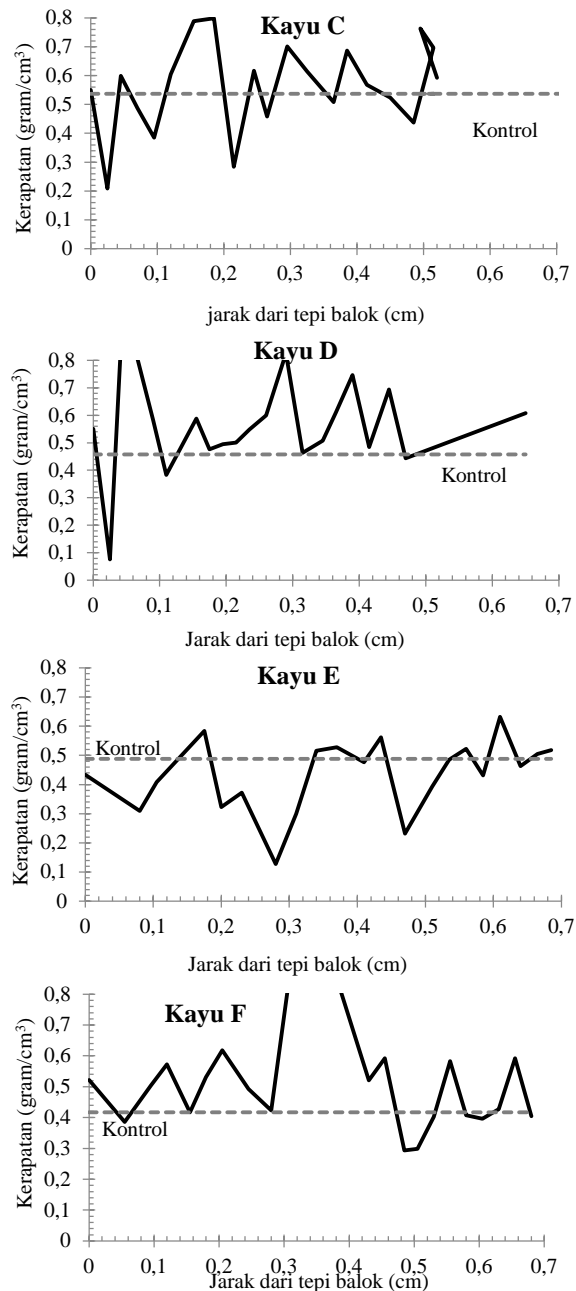
Degradasi kerapatan

Degradasi sel-sel kayu setelah 15 tahun digunakan sebagai batang pengaku (*bracing*) pada menara pendingin juga tercermin pada penurunan kerapatan kayu. Penurunan kerapatan ini diduga dipengaruhi oleh: (1) Pengikisan menyebabkan dinding sel kayu menjadi lebih tipis, (2) Lamela tengah retak-retak dan membentuk celah-celah tipis sehingga memperlebar jarak antar sel.

Fluktuasi kerapatan contoh uji kayu di berbagai kedalaman diplotkan pada diagram kartesius pada Gambar 8. Sesuai dengan Gambar 8, kayu Douglas fir A, B, dan E telah mengalami degradasi masing-masing sedalam 0,32, 0,15, dan 0,13 cm, sedangkan contoh uji C, D, dan F belum terdegradasi karena kerapatan kayunya masih lebih tinggi

daripada kontrol. Kayu bagian tengah (sisa serutan) bertindak sebagai kontrol. Kayu yang diuji digunakan sebagai komponen pengaku menara pendingin yang telah beroperasi selama 15 tahun sehingga laju degradasi maksimum adalah $0,32/15 = 0,0213$ cm/tahun berdasarkan perubahan kerapatannya.





Gambar 8 Kerapatan kayu pengaku (*bracing*) di berbagai kedalaman.

Degradasi sifat mekanis kayu

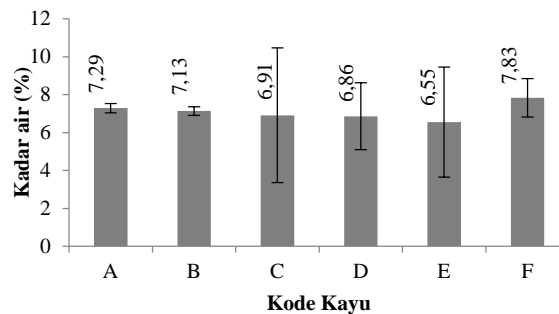
Sebagai benda higroskopis, kayu menyerap air dari lingkungan sekitarnya. Kadar air kayu merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kekuatan kayu. Kayu basah akan memiliki kekuatan tarik, tekan, dan lentur yang lebih rendah dibandingkan kayu kering. Sesuai dengan prosedur BS

373-1957 (BSH 1957), pengujian sifat mekanis kayu harus dilakukan pada kadar air kurang dari 15%. Uji sifat mekanis kayu kali ini dilakukan pada kadar air 5-10%, dengan rata-rata 7,1% sebagaimana disajikan pada Gambar 9.

Sifat mekanis yang diuji meliputi uji lentur, tarik sejajar serat, tekan sejajar serat, dan tekan tegak lurus serat.

Pengujian menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) Instron 3369. Nilai-nilai hasil pengujian tersebut kemudian diolah sesuai dengan prosedur ASTM D2915 untuk mendapatkan tegangan ijin. Tegangan ijin hasil pengujian dibandingkan nilai standar NDS 2005 dan NDS 1991 lalu disajikan dalam Tabel 1. Hasil pengujian lentur kayu Douglas fir terpakai menunjukkan bahwa nilai tegangan ijin lentur masih lebih tinggi dibandingkan spesifikasi NDS 2005 kayu Douglas fir

mutu konstruksi maupun NDS 1991 mutu No 1 & BTR (Tabel 1). Kayu tidak akan patah akibat beban lentur karena kapasitasnya di atas tegangan ijin. Akan tetapi, uji lentur juga menunjukkan bahwa Modulus elastisitas (MOE) rata-rata hasil pengujian berada di bawah standar sehingga defleksi dan vibrasi menjadi lebih besar daripada yang dipersyaratkan. Untuk menghindari kerusakan lebih lanjut akibat turunnya nilai MOE kayu ini, maka kekakuan struktur perlu ditingkatkan.



Gambar 9 Kadar air contoh uji saat pengujian mekanis

Tabel 1 Tegangan ijin kayu hasil pengujian dibandingkan spesifikasi NDS 2005 dan NDS 1991 (satuan dalam kg cm^{-2})

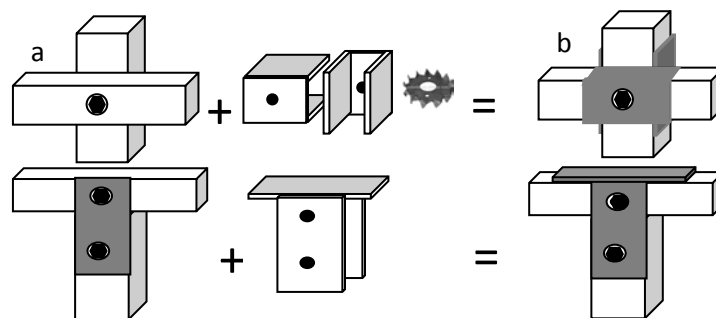
Kriteria	Lentur (Fb)	Tarik // (Ft//)	Tekan \perp (Fc \perp)	Tekan // (Fc//)	MOE	
					E	E _{min}
NDS 2005 (Douglas Fir):						
Konstruksi	70	46	44	116	105 460	38 669
Standar	40	26	44	98	98 430	35 857
Utility	19	12	44	63	91 399	33 044
NDS 1991 (Douglas fir)						
No 1 & BTR	80.9	54.5	-	105.5	126554	-
Hasil pengujian (Douglas fir)						
Terpakai	146,79	72	6,9	104,8	83555	46 192
Jumlah sampel	27	24	24	25	27	27
Cadangan	423	343	26,6	230	117 431	107 707
Jumlah sampel	4	6	5	5	4	4

Kekakuan struktur dapat ditingkatkan dengan beberapa cara yaitu:

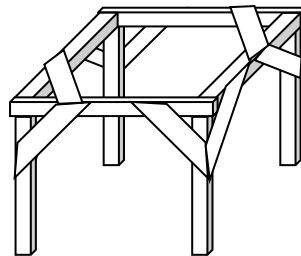
- (1) mengganti buhul-buhul sambungan dengan alat sambung yang lebih kaku, dari semula menyerupai tipe sendi menjadi lebih dekat ke tipe jepit. Sambungan baut yang semula hanya dikencangkan perlu ditambahkan pelat baja berbentuk U (Gambar 11); Di antara dua kayu asli dapat ditambahkan kokot atau pelat

paku ganda (*double sided gang nail*) yang berfungsi sebagai kokot.

- (2) menambahkan *bracing* untuk menghubungkan balok dengan tiang dan/atau balok dengan balok yang berdekatan (Gambar 12);
- (3) menggandakan komponen menjadi balok susun sehingga luas penampangnya menjadi lebih besar; atau
- (4) mengganti komponen dengan kayu yang baru.



Gambar 10 Penambahan pelat besi U pada sambungan baut: (a) kondisi mula-mula; (b) kondisi setelah ditambahkan pelat baja.



Gambar 11 Penambahan *bracing*

Beban aksial pada kayu komponen menara pendingin dapat berupa beban tarik atau tekan. Kayu yang terpakai masih mampu menahan beban tarik sejajar serat karena tegangan ijin tarik sejajar seratnya lebih tinggi daripada NDS 2005 maupun NDS 1991. Namun tegangan ijin tekan sejajar serat kayu Douglas fir terpakai telah turun menjadi $104,8 \text{ kg cm}^{-2}$, jauh lebih rendah daripada kayu cadangannya (230 kg cm^{-2}). Kekuatan tekan sejajar serat kayu

Douglas fir terpakai telah terdegradasi hingga turun kelas dari mutu konstruksi menjadi mutu standar NDS 2005. NDS 1991 juga menyatakan bahwa nilai tegangan ijin kayu Douglas fir No 1 & BTR adalah $105,47 \text{ kg cm}^{-2}$, masih lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian. Dengan demikian, perhatian lebih lanjut diperlukan pada tiang-tiang penyangga yang menerima beban tekan sejajar serat karena kelas mutu kayunya telah turun dari mutu mula-mula.

Hasil pengujian tekan tegak lurus serat memperlihatkan bahwa tegangan ijin kayu terpakai telah sangat turun dibandingkan kayu cadangannya. Beban tekan tegak lurus yang dapat diterima akan terus meningkat meskipun telah terjadi kerusakan. Nilai kekuatan tekan tegak lurus serat pada pengujian ini adalah tegangan tekan tegak lurus serat pada batas proporsi. Hasil uji tekan menunjukkan bahwa tegangan ijin tekan tegak lurus kayu terpakai adalah 7 kg cm⁻², sedangkan kayu cadangannya adalah 44,15 kg cm⁻². Dibandingkan NDS 2005, nilai tegangan ijin tekan tegak lurus serat kayu Douglas fir terpakai berada di bawah standar sehingga pemeriksaan detail pada bagian tumpuan dan sambungan ini harus menjadi perhatian serius.

Pengujian Rangkak (Creep)

Pengujian rangkak (*creep*) dilakukan untuk menentukan penurunan kekuatan kayu akibat beban jangka panjang. Hasil pengujian creep menunjukkan bahwa kekuatan kayu terpakai dalam menahan beban jangka panjang telah sangat turun dibandingkan kayu cadangannya. Hal ini dapat dilihat dari defleksi pada kayu terpakai (A dan B) yang jauh lebih besar

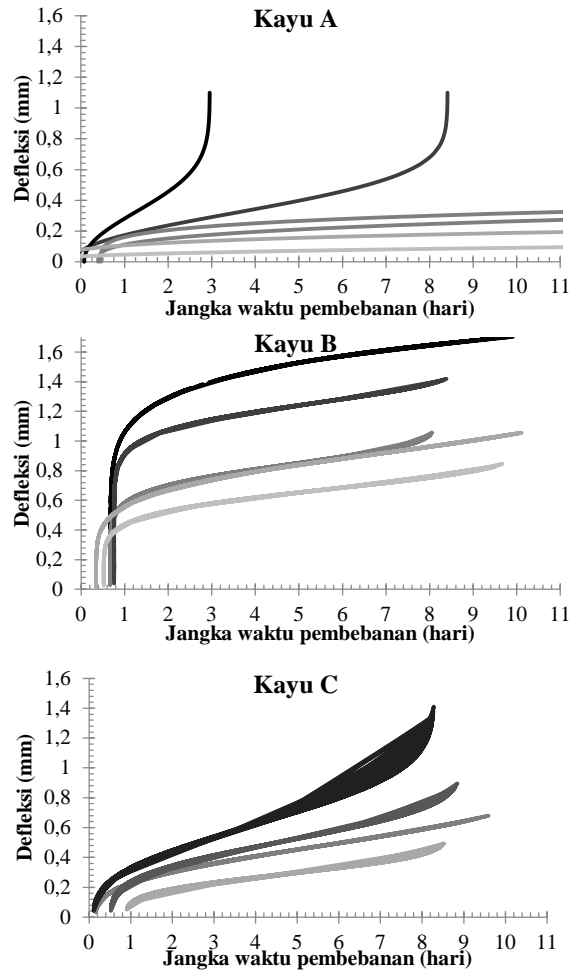
daripada kayu cadangan. Defleksi akibat beban tetap tersebut semakin besar seiring dengan berjalannya waktu pembebanan. Dengan memperhatikan penurunan kekuatan kayu Douglas fir akibat pemakaian jangka panjang dibandingkan uji lentur statisnya, tidak direkomendasikan untuk memperpanjang umur pakai menara pendingin tersebut. Hasil pengujian creep menunjukkan bahwa kekuatan kayu terpakai dalam menahan beban jangka panjang telah sangat turun dibandingkan kayu cadangannya. Hasil pengujian rangkak dari LVDT diplotkan pada diagram Cartesius, sehingga diperoleh hubungan tegangan lentur dengan jangka waktu pembebanan kayu seperti disajikan pada Gambar 13,14, dan 15. Berdasarkan uji creep diperoleh model untuk menghitung waktu patah kayu pada beberapa tegangan lentur. Model tersebut dibangun melalui data empiris uji *creep* yang didekati dengan persamaan Weibull:

$$t = a - b \exp(-cy^d)$$

di mana:

t = jangka waktu pembebanan (hari)

y = defleksi (cm)



Gambar 12 Kurva defleksi vs jangka waktu pembebanan pada uji rangkak

Konversi dari 10 hari pembebanan menjadi 10 tahun pembebanan standar adalah dengan membaginya dengan nilai 2,1 sesuai dengan ketentuan ASTM D2915. Dengan memperhatikan penurunan kekuatan kayu Douglas fir akibat pemakaian jangka panjang dibandingkan uji lentur statisnya, tidak direkomendasikan untuk memperpanjang umur pakai *cooling tower* tersebut.

Pendugaan Sisa Masa Pakai Kayu

Pendugaan sisa masa pakai kayu dilakukan pada tiga sampel yaitu kayu A, B, dan C. Pendugaan dimulai dengan mengukur besarnya defleksi rangkak (*creep deflection*) maksimum yang dapat ditahan sebelum kayu menjadi patah.

Besarnya defleksi rangkak saat patah untuk tiap-tiap pembebanan diasumsikan sama dengan selisih dari defleksi saat patah *dengan initial deflection* pada uji lentur statis. Pada kasus ini yang diambil sebagai nilai *initial deflection* adalah defleksi saat pembebanan uji lentur statis sama besar dengan beban *creep*. Sesuai dengan hasil pengujian, nilai defleksi rangkak saat patah untuk tiap-tiap kayu disajikan pada Tabel 2. Kemudian nilai pada Tabel 2 diplotkan dalam diagram kartesius yang selanjutnya didekati dengan persamaan eksponensial dan power. Persamaan eksponensial atau power terbaik untuk mendekati kurva hubungan waktu patah dengan tegangan *creep* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Tegangan *creep*, *creep deflection*, dan waktu perkiraan patah contoh uji

Kode sampel	Tegangan <i>creep</i> (kg cm ⁻²)	<i>Creep deflection</i> (cm)	Waktu patah (tahun)
A1g	438	0,50	0,0180
A2e	413	0,50	0,0060
A1f	328	0,57	0,3140
A1i	339	0,57	0,3147
A2b	247	0,64	1,8036
A2a	151	0,71	4,5517
Persamaan:	$\sigma = 387,5e^{-0.216t}; R^2 = 95,03\%$		
B1h	417	0,56	0,0013
B2a	311	0,63	0,0011
B1l	270	0,63	0,0048
B2e	174	0,70	0,0067
B2l	158	0,70	0,0168
Persamaan:	$\sigma = 40,05t^{-0.33}; R^2 = 83,11\%$		
C2e	142	0,69	0,1596
C2a	233	0,65	0,0402
C1h	336	0,61	0,0159
C1d	409	0,56	0,0061
Persamaan:	$\sigma = 79,55t^{-0.332}; R^2 = 98,75\%$		

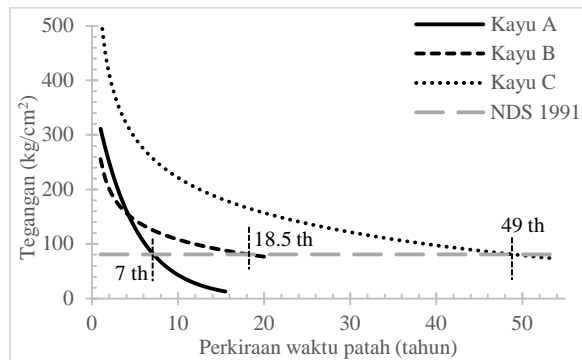
Selanjutnya model matematis dibangun berdasarkan laju penurunan kekuatan mekanis dan laju deteriorasi kayu. Rumus yang dibangun adalah:

$$\sigma = \text{MOR} \times \frac{(b - vt)(h - vt)^2}{bh^2} \times \frac{f(p)}{P_{\max}}$$

dimana nilai b dan h merupakan dimensi awal kayu, v merupakan laju degradasi maksimum, $f(p)$ merupakan persamaan hubungan antara tegangan *creep* dan waktu patah (Tabel 2), dan P_{\max} merupakan beban maksimal saat uji lentur statis. Sesuai hasil perhitungan, dapat disusun tabel hubungan tegangan dengan sisa masa pakai kayu. Hubungan tersebut disajikan dalam Gambar 14.

Sesuai dengan Gambar 14 jika perencanaan desain dilakukan sesuai dengan NDS 1991 di mana tegangan ijin rencana adalah 80,9 kg cm⁻², maka sisa umur pakai kayu A, B, dan C diduga adalah 7 tahun, 18,5 tahun, dan 49 tahun dari sekarang. Kayu A memiliki sisa

masa pakai yang singkat karena kerusakannya paling parah dibandingkan kayu B dan C. Kayu A mengalami degradasi kerapatan hingga ke lapisan yang lebih dalam daripada kayu yang lain. Sedangkan kayu C merupakan kayu kontrol yaitu kayu cadangan yang disimpan di gudang sehingga belum mengalami kerusakan akibat pemakaian. Sesuai dengan pendugaan masa pakai kayunya, disarankan untuk mengganti struktur selambat-lambatnya 7 tahun ke depan yaitu pada tahun 2021 untuk menjaga keamanan struktur. Pada tahun 2021 menara pendingin telah beroperasi selama 22 tahun, sedikit lebih muda daripada umur rencana yaitu 25 tahun. Sesuai dengan perkiraan sisa masa pakai ini, struktur menara pendingin dapat beroperasi dengan aman dalam waktu 3 tahun lebih pendek daripada yang direncanakan.



Gambar 13 Kurva perkiraan waktu patah kayu komponen bracing pada menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd

Kesimpulan

Kayu yang digunakan sebagai *bracing* pada menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd. merupakan jenis *Douglas fir*. Kerusakan kayu telah terjadi hingga kedalaman 3,2 mm. Pengujian mekanis menunjukkan bahwa MOE, tegangan ijin tekan sejajar serat dan tekan tegak lurus serat telah lebih rendah daripada spesifikasi NDS sehingga keamanan struktur kurang terjamin. Kerusakan ini mengakibatkan defleksi dan vibrasi yang melebihi rencana sehingga perlu tindakan peningkatan kekakuan struktur. Peningkatan kekakuan struktur dapat dilakukan dengan menambahkan *bracing*, perbaikan sambungan atau mengganti komponen dengan kayu yang baru. Sedangkan estimasi sisa masa pakai kayu bagian *bracing* adalah 7 tahun sehingga stuktur sebaiknya diganti pada tahun 2021. Dengan demikian masa pakai menara pendingin di Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd adalah 22 tahun, yaitu 3 tahun lebih pendek daripada masa pakai yang direncanakan.

Daftar Pustaka

- [AF&PA] American Forest and Paper Association. 1991. *National Design Specification for Wood Construction*. Amerika Serikat: American Forest and Paper Association.
- [AF&PA] American Forest and Paper Association. 2005. *National Design Specification for Wood Construction ASD/LRFD*. Amerika Serikat: American Forest and Paper Association.
- [ASTM] American Society for Testing and Materials. 2003. *Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber ASTM D2915-03*. Amerika Serikat: American Society for Testing and Materials.
- Badrauddin IS, Suswanto B, Soegihardjo H. 2013. Studi perbandingan beberapa bentuk penampang bresing anti tekuk pada struktur bangunan baja akibat beban gempa dengan menggunakan software Midas Fea. *J Tek Pomits* 1(1):1-6.
- Bahtiar ET, Nugroho N, Arinana, Darwis A. 2012a. Pendugaan sisa umur pakai kayu komponen *cooling tower* di Pembangkit Listrik Tenaga Panas

- bumi (PLTP) unit II Kamojang. *J Tek Sipil* 19:103-114
- Bahtiar ET, Arinana, Kurniawan MA. (2012b). Indeks kondisi bangunan dan pendugaan sisa masa pakai kayu komponen rumah sederhana di Alam Sinar Sari – Bogor. *J Ilmu Teknol Hasil Hutan* 5(2):15-22.
- [BSH] British Standard House. 1957. *Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*, BS-373:1957. London: British Standard House.
- Fengel D, Wegener G. 1995. *Division of Wood Chemistry and Ultrastructure Research*. Berlin: University of Munich.
- [FPL] Forest Products Laboratory. 2010. *Wood Handbook- Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190. Madison : US Departement of Agriculture.
- Hoadley BR. 1990. *Identifying Wood Accurate Results with Simple Tools*. Connecticut: The Taunton Press.
- Mardikanto TR, Karlinasari L, Bahtiar ET. 2011. *Sifat Mekanis Kayu*. IPB Press. Bogor.
- Porter T. 2006. *Wood Identification and Use Revised and Expanded*. Cambridge: GMC Publication.
- Morisson F. 2008. Living in a material world: proper selection of the materials of construction for cooling towers in commercial HVAC and industrial application. *CTI Journal* 29(1):8-33.
- Porter T. 2006. *Wood Identification and Use Revised and Expanded*. East Sussex: Guild of Master Craftsman.
- Stanford HW. 2003. *HVAC Water Chillers and Cooling Towers Fundamentals, Application, and Operation*. New York: Marcel Dekker.
- Riwayat naskah:
Naskah masuk (*received*): 12 Agustus 2015
Diterima (*accepted*): 25 November 2015