

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Pendugaan Sisa Umur Pakai Kayu Komponen *Cooling Tower* di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Unit II Kamojang

Effendi Tri Bahtiar

Bagian Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu - Departemen Hasil Hutan
Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga Bogor - Jawa Barat 16680, E-mail: bahtiar_et@yahoo.com

Naresworo Nugroho

Bagian Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu - Departemen Hasil Hutan
Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga Bogor - Jawa Barat 16680, E-mail: naresworo@yahoo.com

Arinana

Bagian Teknologi Peningkatan Mutu Kayu - Departemen Hasil Hutan
Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga Bogor - Jawa Barat 16680, E-mail: arinanaiskandaria@yahoo.co.id

Atmawi Darwis

Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati
Kampus ITB Jatinangor - Jawa Barat. 45363, E-mail: atmawidarwis@yahoo.com

Abstrak

*Struktur cooling tower di PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi) Unit II Kamojang dibangun pada tahun 1988 dengan kayu sebagai komponen utamanya. Setelah 23 tahun umur pakainya, dirasa perlu dilakukan evaluasi sisa umur pakai sebagai salah satu bahan pertimbangan untuk memutuskan perobohan atau perpanjangan pemakaiannya. Evaluasi dilakukan melalui beberapa tahap yaitu: identifikasi jenis kayu dan keberadaan sisa bahan pengawet, pengukuran kedalaman kerusakan, pengujian sifat fisis mekanis, dan pemodelan matematis yang diturunkan dari uji creep dan pengurangan luas penampang kayu. Identifikasi memperlihatkan bahwa kayu yang dipergunakan untuk komponen utama cooling tower di PLTP Unit II Kamojang adalah redwood (*Sequoia sempervirens*) yang diawetkan dengan CCA (Chromated Copper Arsenat). Kerusakan telah terjadi sedalam 2,95 mm, namun secara umum masih memiliki tegangan ijin yang lebih tinggi daripada persyaratan NDS2005. Penelitian ini telah menghasilkan model terbaik yang dapat dipergunakan untuk menduga sisa masa pakai kayu komponen cooling tower di PLTP Unit II Kamojang dengan koefisien determinasi sebesar 86,84%.*

Kata-kata Kunci: Creep, kayu, cooling tower, model, sisa masa pakai.

Abstract

*Cooling tower in PLTP (Geothermal Power Plant) Unit II Kamojang was built in 1988, using solid wood as its main komponen. It is 23 years old nowadays, and should be evaluated to estimate its remaining lifetime. The evaluation conducted as scientific consideration for the company to decide whether the cooling tower should be deconstruct or maintain to lengthen their lifetime. Some steps were conducted to estimate the remaining lifetime, namely: identification of wood species and the preservative remaining, measuring the depth of damages, measuring the physical and mechanical properties, and mathematical modelling which construct from creep testing and area reduction. This research show that the cooling tower was built with redwood (*Sequoia sempervirens*) which were treated with CCA (Chromated Copper Arsenat) preservative. The damage was happened until 2,95 mm depth, but the mechanical properties was commonly still better than NDS 2005 requirement. The research result mathematical equation which is suitable to predict the remaining lifetime of wood component in PLTP Unit II Kamojang with coefficient of determination 86,84%.*

Keywords: Creep, cooling tower, model, remaining lifetime, wood.

1. Pendahuluan

Kayu merupakan salah satu bahan bangunan dari material organik yang telah disediakan alam. Sebagai material organik, kayu menjadi pilihan tepat untuk *green and sustainable construction* karena memiliki siklus alamiah tertutup akibat kemampuannya untuk terdekomposisi oleh faktor-faktor lingkungan. Kayu telah digunakan sebagai komponen *cooling tower* bahkan sejak pertama kali konstruksi tersebut diperkenalkan di dunia karena berbagai keunggulannya antara lain mempunyai kekuatan yang tinggi dibandingkan berat jenisnya, mempunyai daya tahan tinggi terhadap pengaruh kimia dan listrik, dapat segera diganti, dan mudah dikerjakan. Namun demikian, dekomposisi kayu oleh faktor fisis, mekanis, kimia, dan biologi selama jangka waktu penggunaannya mengakibatkan degradasi mutu dan kekuatan kayu yang pada akhirnya mengurangi umur pakai kayu tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan metode evaluasi yang memadai untuk menduga sisa umur pakai kayu yang dipergunakan sebagai komponen *cooling tower* di PLTP unit II Kamojang. *Cooling tower* PLTP Unit II Kamojang dibangun pada tahun 1988 sehingga saat ini telah berumur 23 tahun, sudah mendekati umur rencananya yang ditetapkan sebesar 25 tahun.

2. Bahan dan Metode

Bahan yang dipakai dalam penelitian ini adalah kayu yang diambil dari komponen struktural *cooling tower*. Sampel tersebut merupakan komponen yang belum pernah diganti sejak pembangunannya pada tahun 1988. Pengujian yang dilakukan meliputi:

2.1 Identifikasi jenis kayu

Identifikasi kayu menggunakan *chart keys* untuk kayu dari daerah subtropis (Core *et. al.*, 1979), atau pedoman identifikasi jenis kayu (Mandang *et. al.*, 2002) untuk kayu-kayu tropis. Photo SEM dengan perbesaran 100x digunakan sebagai bantuan awal. Proses photo SEM meliputi tiga tahapan yaitu preparasi sampel, *coating*, dan pemotretan.

2.2 Identifikasi keberadaan bahan pengawet

Keberadaan bahan pengawet diuji melalui penetrasi boron dan tembaga, yaitu:

- a. Uji Penetrasi Boron: Pereaksi A terdiri atas 2 g ekstrak kurkuma dalam 100 ml alkohol disemprotkan pada contoh uji. Sampel dibiarkan 10-15 menit, lalu pada lokasi yg 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 yg timbul pada lokasi penyemprotan.

- b. Uji Penetrasi Tembaga: Pereaksi A berupa 1 bagian amonia pekat dalam 6 bagian aqua destilata disemprotkan pada contoh uji. Sampel dibiarkan 10-15 menit, lalu pada lokasi yang sama disemprotkan pereaksi B yang terdiri atas 5 g asam rubianat dalam 900 ml alkohol lalu ditambahkan 100 ml aseton. Adanya unsur tembaga ditunjukkan oleh warna biru kehitaman yang timbul pada lokasi penyemprotan.

2.3 Pengukuran degradasi mutu dan kekuatan kayu

Degradasi mutu dan kekuatan kayu dievaluasi melalui pengamatan photo SEM, pengukuran degradasi berat jenis, pengukuran sifat mekanis, dan pengujian rangkak (*creep*).

2.3.1 Photo SEM

Photo SEM dengan perbesaran 100x pada tepi dan tengah kayu dilakukan untuk mendapatkan kerusakan struktur anatomi kayu. Sampel diambil dari bagian tengah dan tepi seperti disajikan pada **Gambar 1**. Degradasi diduga terjadi pada bagian tepi, sedangkan bagian tengah sebagai kontrol yang diasumsikan tidak terdegradasi. Evaluasi selanjutnya dilakukan dengan mengukur persentase luas dinding sel terhadap luas total contoh uji yang diolah menggunakan software ImageJ versi 1.45s.

2.3.2 Degradasi berat jenis kayu

Kedalaman kerusakan kayu ditentukan dengan cara mengukur degradasi berat jenis kayu pada berbagai kedalaman. Kayu ditimbang dan diukur volumenya, kemudian diserut. Setelah diserut, kayu ditimbang dan diukur lagi volumenya sehingga dapat diperoleh berat jenis pada setiap kedalaman berdasarkan rumus:

$$\rho_i = \frac{W_i - W_{(i-1)}}{V_i - V_{(i-1)}} \quad (1)$$

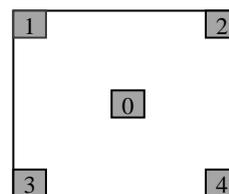
dimana:

r_i : berat jenis kayu pada kedalaman ke- i

W_i : berat kayu pada kedalaman ke- i

V_i : volume kayu pada kedalaman ke- i

Apabila berat jenis kayu lebih rendah dari kontrolnya (bagian tengah) maka di titik tersebut dianggap terjadi kerusakan. Kedalaman kerusakan ditentukan sebagai titik temu ketika berat jenis kayu sama atau lebih besar dari kontrol.



Gambar 1. Pengambilan sampel untuk photo SEM

2.3.3 Sifat mekanis kayu

Pengukuran sifat mekanis kayu sampel dilakukan berdasarkan *British Standard* (BS 373-1957). Tegangan ijin kayu diturunkan dari pengolahan nilai-nilai hasil pengujian dengan rumus:

$$F_i = \frac{\bar{F}_i - 1,645s_i}{A_F} \quad (2)$$

dimana:

F_i = tegangan ijin

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

s_i = standar deviasi hasil pengujian

A_F = faktor penyesuaian (sesuai dengan Tabel 5 ASTM D2915-03)

i = lentur (b), tarik sejajar serat ($t//$), tekan sejajar serat ($c//$), tekan tegak lurus (c^\wedge), geser sejajar serat (s)

Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan dengan tegangan ijin standar yang ditetapkan NDS 2005. Nilai-nilai yang lebih rendah dari standar menunjukkan terjadinya kerusakan pada kayu.

2.3.4 Pengujian rangkak (*creep*)

Pengujian rangkak (*creep*) untuk menentukan penurunan kekuatan kayu akibat beban jangka panjang. Pengujian rangkak diawali dengan pengujian lentur statis pada 9 (sembilan) sampel berukuran 2 x 2 x 30 cm untuk mendapatkan rata-rata besaran defleksi pada saat patah. Selanjutnya 5 (lima) sampel yang lain diberikan beban tetap dengan konfigurasi lentur *one point loading*. Beban yang diberikan pada masing-masing sampel yaitu 5 kg, 15 kg, 20 kg, 30 kg, dan 40 kg. Besarnya defleksi diukur per 10 menit pada setengah hari ke-1, per 30 menit pada setengah hari berikutnya, per 1 jam pada setengah hari ke-2, per dua jam pada setengah hari berikutnya, dan selanjutnya per 6 jam sampai hari ke-10. Data waktu dan defleksi diplotkan pada diagram Cartesius dan dicari hubungannya melalui regresi liner sederhana dengan transformasi logaritmik.

2.4 Sisa masa pakai kayu

Pendugaan sisa umur pakai kayu ditentukan melalui perhitungan mekanika teknik yaitu membandingkan sisa kekuatan dan sisa luas penampang dengan beban aktual yang diterima saat ini. Pendekatan teoritis dilakukan terlebih dahulu dengan menurunkan formula-formula yang selanjutnya diaplikasikan untuk menduga sisa umur pakai kayu.

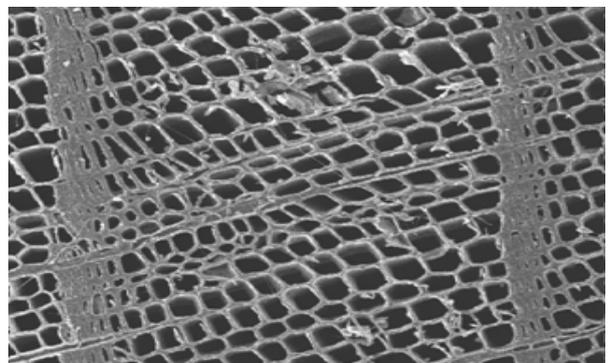
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Identifikasi kayu

Hasil photo SEM dengan perbesaran 100x disajikan pada **Gambar 2**. **Gambar 2** memperlihatkan perbedaan yang sangat mencolok dari kayu awal dan kayu akhir yang merupakan salah satu ciri yang lazim ditemui pada kayu-kayu yang tumbuh di daerah subtropis dengan empat musim. Oleh karena itu, sebagai pedoman identifikasi digunakan *chart keys* untuk kayu-kayu softwood dari daerah subtropis (Core, *et al* 1979). Ciri-ciri khusus yang tampak pada kayu sampel antara lain:

- Pola lingkaran tumbuh: transisi tampak dengan jelas. Lingkaran tumbuh lebar pada pertumbuhan sekunder, hingga sempit pada pohon tua. Tekstur agak kasar.
- Sel jari-jari *uniseriate*, tetapi penampakkannya kasar. *Tracheid* jari-jari tidak ditemukan.
- Ujung dinding sel parenkim jari-jari halus.
- Parenkim *longitudinal* banyak, muncul di semua lingkaran tumbuh
- Ciri lain: kayu berserat lurus dan mudah *split*.

Berdasarkan ciri-ciri tersebut, kayu komponen *cooling tower* di PLTP Unit 2 Kamojang diduga adalah Redwood (*Sequoiia sempervirens*). Kayu ini terkenal sangat awet dan tahan terhadap serangan jamur dibanding kayu-kayu lain yang berasal dari subtropik karena memiliki kandungan zat ekstraktif tinggi (Kuo dan Arganbright, 2009). Karena keawetannya tersebut, maka Redwood sering digunakan untuk *cooling tower*, decking, tangki air, silo, dan furniture outdoor. Redwood juga memiliki keunggulan untuk komponen *cooling tower* karena stabilitas dimensinya yang tinggi Cown (2008) melaporkan bahwa Redwood dari pohon tua memiliki kembang susut sebesar 2,6% pada arah radial dan 4,4% pada arah tangensial, sedangkan yang dari pohon muda sebesar 2,2% (radial) dan 4,9% (tangensial). Kayu Redwood



Gambar 2. Photo SEM sampel dengan perbesaran 100x (1,32 mm x 1 mm)

(*Sequoia sempervirens*) termasuk kayu ringan (BJ = 0,38 – 0,40), berkekuatan rendah, dan mudah mengalami *split*. Namun Redwood merupakan salah satu kayu awet bahkan sangat awet (FPL, 1999) sehingga banyak dipergunakan untuk komponen cooling tower, bahkan sejak konstruksi tersebut diperkenalkan di dunia (Neubrech, 1937).

Morisson (2008) melaporkan bahwa kayu merupakan material yang paling ekonomis digunakan untuk *cooling tower* berukuran besar dengan masa pakai cukup panjang dibandingkan beton, metal, atau fiberglass. Penggunaan kayu untuk komponen *cooling tower* dapat menghemat ±40% biaya karena menghasilkan kombinasi yang optimal antara konsumsi air, efisiensi thermal, efisiensi elektrik, dan konsumsi energi. Efisiensi ini diperoleh dari berkurangnya kebutuhan energi pembangkit, efisiensi penggunaan air, berkurangnya biaya operasi, yang pada akhirnya menghasilkan energi secara lebih ramah lingkungan. Seperti pada umumnya kayu, diffusivitas thermal redwood rendah karena konduktivitas thermalnya rendah dibandingkan berat jenis dan kapasitas thermalnya. Sifat-sifat thermal dan electrical kayu diuraikan oleh FPL (1999) sebagai berikut:

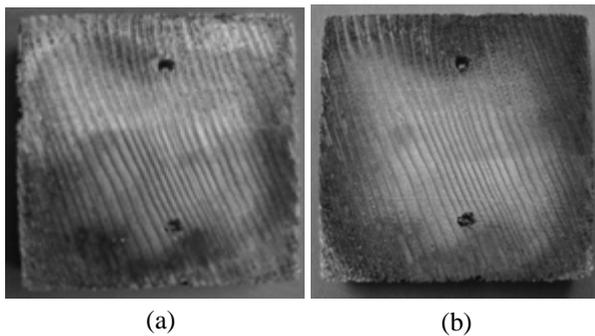
- a. Nilai diffusivitas thermal kayu berkisar $0,161 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, sangat rendah dibandingkan material struktur lainnya (baja = $12,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, mineral wool = $0,645 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).
- b. Redwood bersifat isolator termal yang baik dengan nilai *thermal conductivity* sebesar $0,12 \text{ W/M.K}$ dan *thermal resistivity* $8,5 \text{ W/m.K}$.
- c. Kayu memiliki sifat unggul untuk komponen cooling tower terkait sifat higroskopisitasnya. Seperti material pada umumnya, peningkatan suhu menyebabkan kayu memuai, tetapi peningkatan suhu juga menimbulkan berkurangnya kadar air kayu sehingga dimensi kayu menyusut. Sifat ini menyebabkan dimensi kayu lebih stabil akibat perubahan suhu daripada material struktur lainnya. Nilai *thermal expansion coefficient* kayu sangat kecil yaitu $4,5 \times 10^{-6} - 3,1 \times 10^{-5}$ per K.
- d. Kayu merupakan isolator listrik yang baik dengan nilai *electric resistivity* $1 - 10 \text{ kW}$.

FPL (1999) juga melaporkan bahwa kayu memiliki ketahanan tinggi terhadap asam ringan dan larutan garam-garam asam seperti yang banyak terkandung di sumber-sumber air panas. Tidak seperti komponen beton, bahan-bahan terkikis dari kayu sangat sedikit dan tidak bersifat korosif terhadap logam. Setelah didinginkan di menara pendingin kayu, air dapat diinjeksikan lagi ke dalam tanah karena zat asing terlarut sangat sedikit. Karena sifat-sifat tersebut di atas, kayu redwood paling populer digunakan sebagai komponen utama *cooling tower* di seluruh dunia.

Pohon redwood umumnya dipanen setelah berumur ratusan tahun dan berukuran raksasa (tinggi rata-rata 61 m, bahkan lebih) sehingga keawetannya sangat tinggi. LTA (2012) melaporkan bahwa dari 147 pohon *redwood* yang tercatat memiliki tinggi lebih dari 110 m, saat ini tinggal 41 pohon yang masih hidup. Karena umur layak terbang yang sangat panjang tersebut, ketersediaan kayu redwood terus-menerus berkurang dan menjadi pohon langka yang masuk kategori *vulnerable A2acd* dalam *The IUCN Red List of Threatened Species* (2011). Oleh karena itu semakin sulit mencari kayu redwood untuk *sparepart* dan *replacement* komponen cooling tower. Pilihan terbaik untuk mempertahankan bangunan *cooling tower* di PLTP Kamojang adalah dengan pengecekan berkala kelayakan pakai dan perawatan berkala kayu redwood yang telah ada hingga tercapai umur pakai optimumnya serta mencari jenis-jenis kayu lokal untuk alternatif *sparepart*. Beberapa kayu lokal seperti keruing telah digunakan untuk komponen pengganti. Keruing (*Dipterocarpus spp*) sangat kuat (kelas kuat I-II PKKI NI-5 1961) dibandingkan redwood namun berat jenisnya sangat tinggi (BJ=0,51-1,01) sehingga memberikan beban berat sendiri yang lebih besar daripada yang direncanakan. Selain itu kayu keruing cepat mengalami retak dan pecah akibat perubahan kadar air yang berulang-ulang dan terus-menerus. Beberapa kayu lokal lain yang memiliki sifat hampir serupa redwood antara lain tusam (*Pinus merkusii* Jungh. et de Vriese) dapat direkomendasikan sebagai alternatif pengganti redwood. Kayu tusam memiliki sifat-sifat yang menguntungkan antara lain berat jenis sedang (BJ=0,49-0,69), kekuatan sedang (kelas kuat III PKKI NI-5 1961), permukaan licin, tekstur halus, homogen, arah serat lurus, berserat panjang, mudah dikerjakan dan dikeringkan, serta nilai kembang susun sedang (4,9% arah radial). Namun demikian kayu tusam perlu diberi perlakuan untuk menghindari sifat-sifatnya yang kurang menguntungkan antara lain banyak mata kayu, mudah mengalami pewarnaan, dan kelas awet rendah. Kekurangan tersebut dapat diatasi dengan melakukan pemilahan (*grading*) dan memberikan bahan pengawet kayu. Kayu tusam mudah diawetkan dan mempunyai daya fiksasi yang tinggi terhadap pengawet CCA (*Chromated Copper Arsenat*) (Nugroho, 1994).

3.2 Identifikasi bahan pengawet

Identifikasi sisa-sisa bahan pengawet pada kayu *redwood* komponen *cooling tower* menunjukkan keberadaan pengawet yang memiliki kandungan tembaga (*Copper*) tanpa kandungan boron. Keberadaan senyawa tembaga ditunjukkan oleh perubahan warna kayu bagian tepi menjadi lebih gelap setelah diuji penetrasi tembaga (**Gambar 3**), sedangkan perubahan warna tidak terjadi pada sample yang diuji penetrasi boron. Berdasarkan kondisi tersebut, diduga kayu telah diawetkan dengan pengawet CCA. Pengawet CCA terkunci dalam dinding sel kayu sehingga cukup tahan



Gambar 3. Perubahan warna kayu setelah uji penetrasi tembaga: a. sebelum pengujian; b. setelah pengujian (bagian tepi menjadi lebih gelap)

mengatasi pelunturan oleh limpasan air yang terus-menerus. Namun perlu diperhatikan pula bahwa saat ini CCA termasuk bahan pengawet kayu yang dilarang penggunaannya (Ahn et al., 2008). Negara-negara Eropa melalui The Commission of The European Community telah melarang penggunaan CCA sejak tahun 2003 dengan dikeluarkannya *Directive 2003/2/EC* (EC 2003). Selanjutnya US EPA (United States Environmental Protection Agency) menyusul melarang penggunaan CCA untuk perumahan di Amerika Serikat yang berlaku secara efektif sejak 31 Desember 2003 (Wormel 2011), APVMA (Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority) di Australia sejak Maret 2006. Sedangkan di Indonesia, CCA termasuk dalam salah satu pestisida yang dilarang berdasarkan Surat Keputusan Menteri Pertanian RI No. 326/Kpts/TP.270/4/1994 tanggal 24 April 1994 perihal pencabutan pendaftaran dan izin pestisida yang mengandung kaftapol dan arsen. Sebagai alternative penggantinya disarankan untuk digunakan ACQ, Borates, Copper Azole, Cyproconazole, Propiconazole, atau ACC (*Acid Copper Chromate*).

3.3 Degradasi mutu dan kekuatan kayu

3.3.1 Degradasi dinding sel kayu

Sebagai bahan alam yang disediakan oleh pohon, kayu tersusun dari sel-sel. Bagian sel yang berfungsi menahan beban adalah dinding sel kayu. Oleh karena itu proporsi dinding sel menentukan besarnya kekuatan kayu. Semakin besar proporsi dinding sel, pada umumnya kekuatan kayu meningkat. Hasil photo SEM

dengan perbesaran 100x disajikan pada **Gambar 4a** (1-4 = tepi, 0 = kontrol) sedangkan sketsa pengukuran luas rongga sel disajikan pada Gambar 4B (1-4 = tepi, 0 = kontrol). Selanjutnya hasil pengukuran persentase luas dinding sel pada setiap photo SEM disajikan pada **Tabel 1**. Seperti terlihat pada **Tabel 1**, persentase luas dinding sel kontrol lebih tinggi daripada bagian tepinya. Dinding sel merupakan satu-satunya komponen kayu yang mampu menahan beban, sehingga proporsi dinding sel dalam kayu menjadi faktor kunci penentu kekuatan kayu. Semakin besar persentase luas dinding sel maka kekuatan kayu dipastikan meningkat pula. Berkaitan dengan berkurangnya proporsi dinding sel kayu pada bagian tepi, dapat dipahami bahwa telah terjadi degradasi mutu kayu pada bagian tersebut.

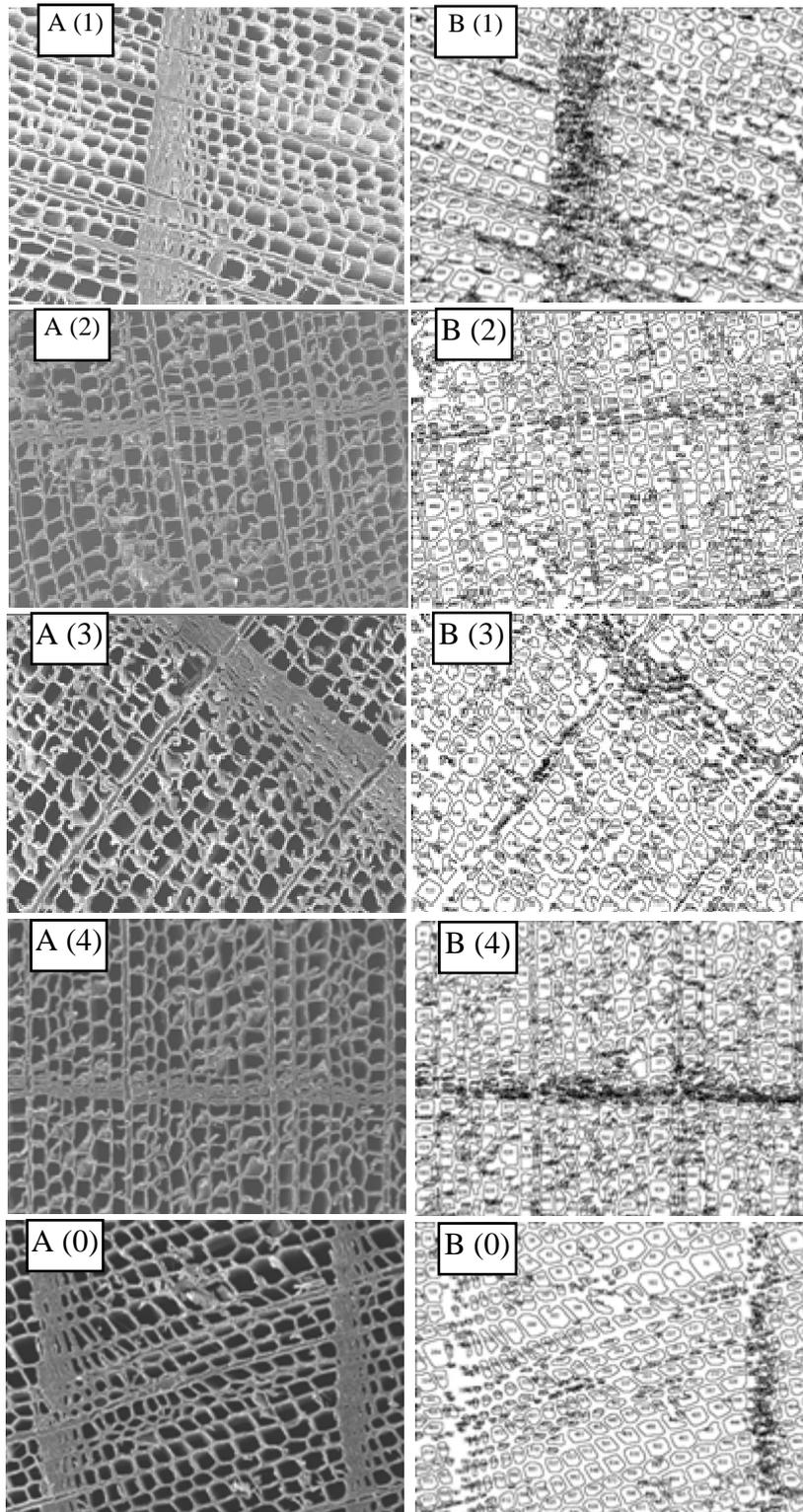
Tabel 1 memperlihatkan bahwa dinding sel bagian tepi pada umumnya telah terdegradasi sehingga proporsinya lebih rendah daripada bagian tengahnya (kontrol). Degradasi ini dapat disebabkan oleh pengaruh fisis mekanis, biologis, ataupun kimia. **Gambar 5a** memperlihatkan retak-retak dan pecah-pecah yang terjadi pada sel-sel kayu redwood bagian tepi akibat *split* (belah) pada lamella tengah, sedangkan **Gambar 5b** menunjukkan terkikisnya dinding sel sekunder kayu. Pengamatan degradasi dinding sel ini dilanjutkan dengan mengukur berat jenis kayu pada setiap kedalaman untuk memperoleh seberapa dalam kerusakan telah terjadi.

3.3.2 Pengukuran kedalaman kerusakan

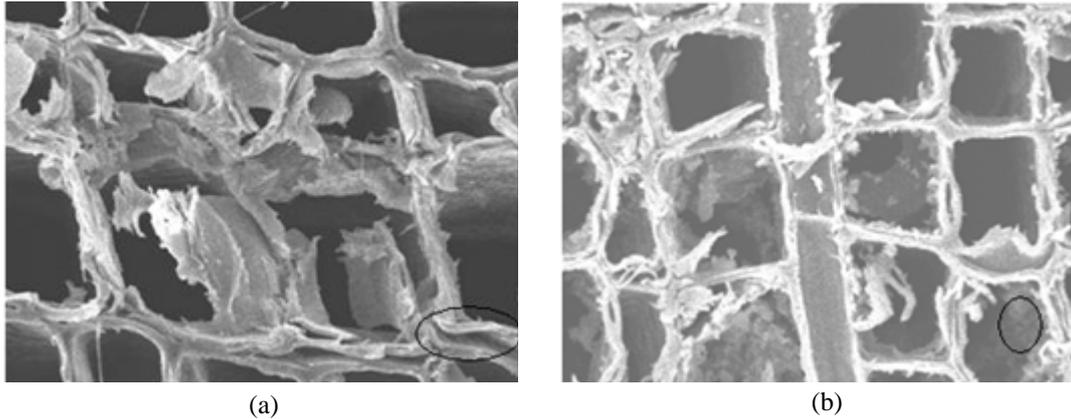
Berat jenis kayu pada setiap kedalaman diukur dalam kondisi basah (kadar air $91\% \pm 13\%$), dan hasilnya disajikan pada **Gambar 6**. Seperti terlihat pada **Gambar 6**, kayu *Redwood* telah mengalami degradasi sedalam 2,95 mm. Sampai batas tersebut berat jenis kayu lebih rendah daripada kontrolnya. Kayu bagian tengah (sisa serutan) bertindak sebagai kontrol. Serutan pertama cenderung lebih tinggi daripada serutan berikutnya karena pengendapan kotoran pada permukaan kayu. Oleh karena itu ekstrapolasi linier dilakukan mulai serutan kedua. Penurunan berat jenis pada kayu bagian tepi ini memperlihatkan terjadinya kerusakan pada skala selular terutama pada dinding sel.

Tabel 1. Persentase luas dinding sel kayu *Redwood* komponen *cooling tower* PLTP unit 2 Kamojang

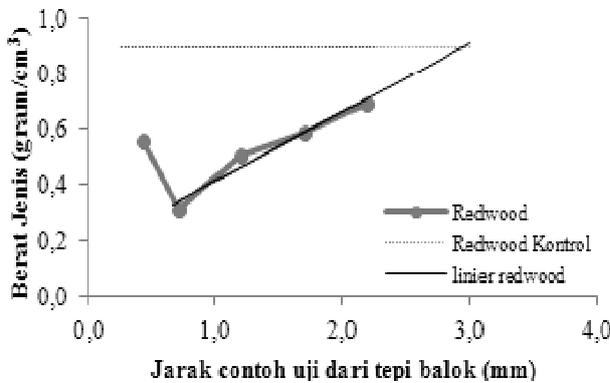
Jenis Kayu	Tepi1 (A1)	Tepi2 (A2)	Tepi3 (A3)	Tepi4 (A4)	Rataan Tepi	Kontrol (A0)
Redwood	50,24%	47,71%	46,78%	48,21%	48,23%	51,41%



Gambar 4. Foto SEM (1,32 mm x 1 mm) (A1-A4 = tepi; A0 = kontrol) dan Sketsa Luas Rongga Sel (B1-B4 = tepi; B0 = kontrol)



Gambar 5. Photo SEM (264 mm x 198 mm) (a) *Split* pada lamella tengah membentuk rongga baru (b) Pengikisan pada dinding sel sekunder



Gambar 6. Berat Jenis kayu sampel pada berbagai kedalaman

Kerusakan dinding sel kayu, akibat penggunaan jangka panjang pada bangunan *cooling tower* dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain: (a) limpasan air yang terus menerus mengikis dinding sel kayu sehingga terjadi abrasi pada permukaannya (b) variasi thermal dan kadar air antar bagian kayu menimbulkan regangan dan tegangan internal yang pada akhirnya menghasilkan rongga baru berupa retak-retak dan pecah, (c) Sinar UV dari matahari dalam jangka panjang dapat mendegradasi komponen dinding sel kayu. Kondisi lingkungan pemakaian sangat berpengaruh terhadap umur pakai kayu. Kombinasi faktor-faktor lingkungan yaitu radiasi ultra violet (UV) dari sinar matahari, perubahan suhu dan kadar air, serta abrasi oleh debu dan partikel yang diterbangkan angin menyebabkan degradasi kayu. Air merupakan salah satu musuh utama dari kayu untuk penggunaan di luar ruangan. Baik dalam bentuk cair ataupun uap, perubahan kadar air dapat mengakibatkan perubahan dimensi berupa kembang/susut dan degradasi pada lapisan finishing (cat, varnish, dll). Peristiwa kembang susut dalam jangka panjang atau berulang-ulang lebih lanjut mengakibatkan retak-retak, belah, dan pecah. Aliran air juga menyebabkan erosi pada permukaan kayu. Erosi pada permukaan kayu, pada umumnya terjadi dengan lambat. William, et al (2001)

melaporkan bahwa pada kondisi normal di daerah temperate kedalaman erosi permukaan hanya mencapai 6 – 12 mm per 100 tahun. Pada penelitian ini ditemukan erosi telah terjadi sedalam 2,95 mm setelah pemakaian selama 23 tahun atau sekitar 12,8 mm selama 100 tahun, sedikit lebih tinggi dibandingkan di daerah temperate. Panas mendegradasi selulosa dan hemiselulosa pada dinding sel kayu, mereduksi kekuatan dan membuat permukaan kayu tampak lebih gelap. Sinar matahari, melalui sinar UV juga mendegradasi kayu berupa pembentukan radikal bebas yang mendegradasi polimer kayu (Shupe, et al, 2010). Degradasi UV mungkin hanya terjadi pada lapisan tipis di permukaan kayu, tetapi kombinasinya dengan abrasi permukaan oleh air dan angin dapat menyebabkan pengurangan luas penampang yang cukup serius. Sinar UV mengubah warna kayu menjadi abu-abu hingga coklat. Degradasi kayu oleh faktor abiotik pada umumnya lebih jarang terjadi dibandingkan faktor biotik. Namun kondisi lingkungan pemakaian di PLTP Unit II Kamojang yang selalu basah dengan kandungan sulfur tinggi mengakibatkan ketiadaan organisme biologis perusak kayu sehingga kerusakan akibat faktor abiotik lebih dominan daripada biotik. Sulfur di dalam air bereaksi menghasilkan Sulfur dioksida (SO₂) yang bersifat antioksidan, antimikroba, dan beracun bagi jamur. Selain itu, kandungan H₂S yang tinggi membuat air bersifat lebih asam sehingga organisme perusak kayu tidak tumbuh dengan baik.

3.3.3 Degradasi sifat mekanis kayu

Evaluasi sifat mekanis kayu meliputi pengujian lentur, tarik sejajar serat, tekan sejajar serat, tekan tegak lurus serat, dan geser sejajar serat. Pengujian menggunakan peralatan Universal Testing Machine (UTM) Merk Instron 3369 dan mengacu pada British Standard BS 373-1957. Nilai-nilai tegangan ijin hasil pengujian dibandingkan dengan nilai standar NDS 2005 disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Tegangan ijin kayu hasil pengujian dibandingkan NDS2005 REDWOOD Select Structural

Kriteria	F_b	$F_{t//}$	F_s	F_{c^A}	$F_{c//}$	E	MOE	
							E_{min}	
Hasil Pengujian Redwood (kg/cm ²)	123	158	12	11	105	38611		29568
Jumlah sampel (n)	9	5	3	12	12	9		9
REDWOOD Select structural (kg/cm ²) (NDS, 2005)	77	44	11	30	77	77338		28123

Pada Tabel 2 terlihat bahwa nilai tegangan ijin kayu hampir semuanya masih di atas standar, kecuali tekan tegak lurus serat dan Modulus Elastisitas (MOE)-nya. Kekuatan tekan tegak lurus serat kayu Redwood lebih rendah hingga hampir 1/3 kali dari REDWOOD select structural, sehingga harus berhati-hati apabila kayu tersebut digunakan untuk tumpuan. Pemeriksaan berkala harus dilakukan pada setiap tumpuan. Selain itu MOE kayu juga lebih rendah daripada standar. dengan demikian kondisi material kayu saat ini cukup kuat tetapi kurang kaku sehingga struktur akan melendut lebih besar daripada rencana. Namun tambahan lendutan ini tidak menyebabkan keruntuhan struktur sehingga sampai saat ini masih tetap aman digunakan.

3.3.4 Pengujian rangkak (creep)

Kayu memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam menahan beban tiba-tiba daripada beban jangka panjang. Semakin panjang jangka waktu pembebanan, maka beban maksimum yang masih bisa diterima kayu akan semakin kecil. Grafik hasil pengujian rangkak pada kayu Redwood disajikan pada Gambar 7. Gambar 7 memperlihatkan bahwa defleksi meningkat pada jangka waktu pembebanan yang semakin panjang meskipun besarnya beban yang diberikan adalah tetap. Defleksi juga lebih besar pada beban tinggi dibanding beban yang lebih rendah. Pendekatan regresi linier sederhana dengan transformasi logaritmik menghasilkan Persamaan 3, 4, 5, 6, dan 7 yang memiliki signifikansi model yang sangat nyata dengan koefisien determinasi berkisar antara 82,5% - 87,6%. Dengan demikian persamaan-persamaan tersebut (Persamaan 3, 4, 5, 6, dan 7) berturut-turut dapat digunakan untuk menduga besarnya defleksi pada pembebanan 5 kgf, 15 kgf, 20, kgf, 30 kgf, dan 40 kgf dalam jangka waktu yang ditentukan.

$$y = 0,617\text{Ln}(T) + 0,403 \tag{3}$$

$$y = 0,881\text{Ln}(T) + 0,997 \tag{4}$$

$$y = 1,285\text{Ln}(T) + 0,325 \tag{5}$$

$$y = 1,158\text{Ln}(T) + 1,039 \tag{6}$$

$$y = 2,119\text{Ln}(T) + 0,525 \tag{7}$$

dimana :

y : defleksi (mm)

T : jangka waktu pembebanan (jam)

3.4 Pendugaan sisa masa pakai kayu

Pendugaan sisa masa pakai kayu diawali dengan pengujian lentur statis dengan beban tunggal di tengah bentang sesuai dengan standar BS373-1957. Nilai besaran yang diperlukan pada tahapan ini adalah defleksi pada saat patah. Hasil pengujian lentur 9 (sembilan) sampel kayu pada bentang 28 cm memperlihatkan bahwa rata-rata defleksi pada beban patah adalah 10,3 mm. Defleksi sebesar 10,3 mm tersebut berdasarkan Persamaan 3, 4, 5, 6, dan 7 masing-masing dapat dicapai pada jangka waktu 1036 tahun; 4,36 tahun; 0,27 tahun; 0,34 tahun; dan 0,011 tahun untuk pembebanan 5 kgf, 15 kgf, 20 kgf, 30 kgf, dan 40 kgf. Dalam diagram kartesius besarnya beban tetap yang diperlukan agar sampel patah pada jangka waktu pembebanan tertentu disajikan pada Gambar 8. Gambar 8a dibuat dengan skala absis linier, sedangkan Gambar 8b skala absis logaritmik untuk memudahkan pengamatan.

Seperti terlihat pada Gambar 8, regresi linier sederhana dengan transformasi logaritmik berhasil mendapatkan Persamaan 8 yang memiliki koefisien determinasi yang cukup tinggi (R²=86,84%) sehingga cukup baik untuk menduga besarnya beban patah pada jangka waktu pembebanan tertentu.

$$P = -2,952\text{Ln}(T) + 22,912 \tag{8}$$

dimana :

P : beban patah (kg)

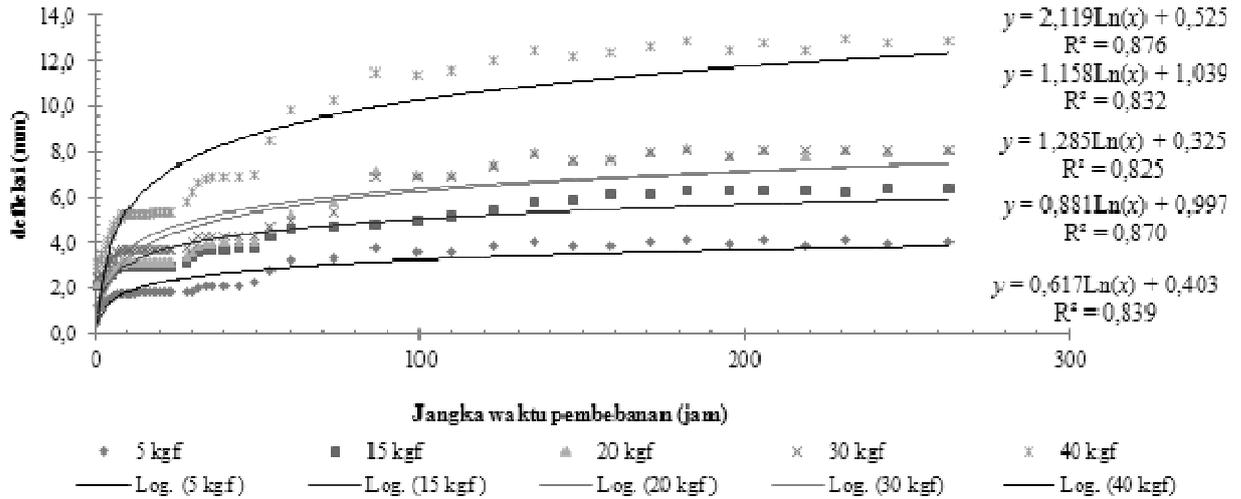
T : jangka waktu pembebanan (tahun)

Nilai rata-rata beban patah hasil pengujian lentur statis 9 (sembilan) sampel sebelumnya adalah 100 kgf, sehingga Persamaan 8 dapat disajikan menjadi Persamaan 9:

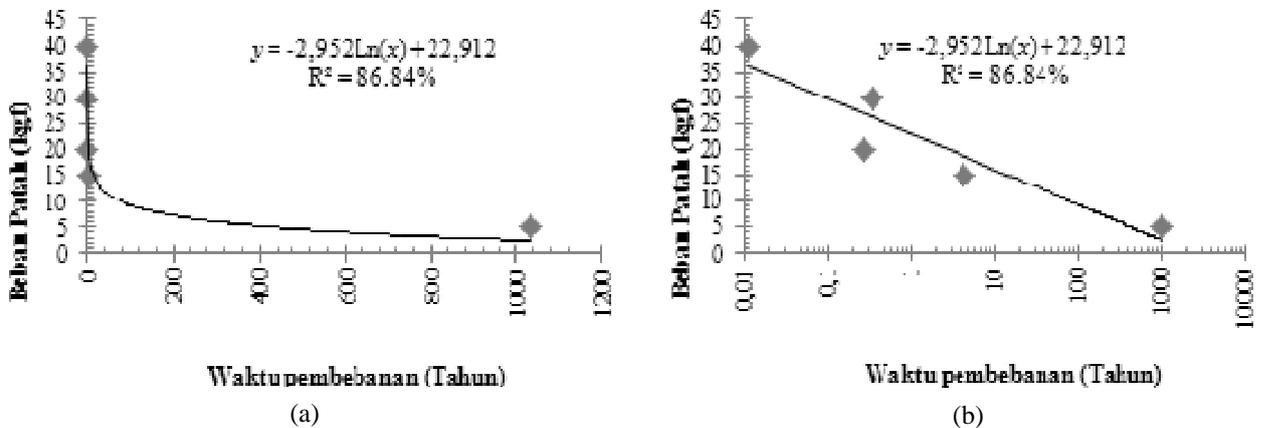
$$K = \frac{P}{P_{maks}} = -0,02952 \text{Ln}(T) + 0,22912 \tag{9}$$

Dimana K adalah rasio beban patah pada beban jangka panjang dengan beban maksimum pada pengujian lentur statis dengan UTM Instron. Nilai K equivalen dengan rasio tegangan maksimum pada jangka panjang dengan Modulus of Rupture (S_R) hasil pengujian statis, sehingga Persamaan 9 dapat diubah menjadi Persamaan 10:

$$T = \text{Exp} \left(\frac{0,2291 - \frac{P}{P_{maks}}}{0,02952} \right) = \text{Exp} \left(\frac{0,2291 - \frac{\sigma}{S_R}}{0,02952} \right) \tag{10}$$



Gambar 7. Kurva pengujian rangkai creep kayu Redwood



Gambar 8. Kurva waktu pembebanan vs beban patah (a) skala linier (b) skala logaritmik

Nilai rata-rata MOR hasil pengujian 9 (sembilan) sampel kayu Redwood adalah 292 kg/cm², sehingga **Persamaan 10** dapat disederhanakan menjadi:

$$T = \text{Exp} \left(\frac{66,8972 - \sigma}{8,6190} \right) \quad (11)$$

Persamaan 11 sudah bisa digunakan untuk menduga sisa umur pakai kayu yang menerima tegangan lentur sebesar s kg/cm². Namun persamaan tersebut mempertimbangkan degradasi kekuatan kayu saja, padahal luas penampang efektif kayu juga berkurang seiring dengan berjalannya waktu. Luas penampang efektif merupakan salah satu faktor penentu besarnya beban maksimum yang dapat diterima material, sehingga pengurangan luas penampang harus diperhitungkan pula.

Seperti disampaikan sebelumnya, kerusakan kayu Redwood telah terjadi hingga kedalaman 2,95 mm akibat beban tetap selama jangka waktu 23 tahun. Jika laju degradasi ini diasumsikan linier, maka akan terjadi penurunan momen inersia (I) penampang sebagai fungsi dari waktu (**Persamaan 12**).

$$I = \frac{\left(b - \frac{2,95T}{23}\right) \left(h - \frac{2,95T}{23}\right)^3}{12} = \frac{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^3}{12} \quad (12)$$

dimana:

- I = momen inersia (cm⁴)
- b = lebar penampang balok (cm)
- h = tinggi penampang balok (cm)
- T = waktu (tahun)

Dengan demikian rasio momen inersia pada waktu mendatang (I_{nantu}) dengan momen inersia pada kondisi mula-mula (I_{kini}) dapat disajikan pada **Persamaan 13**:

$$I = \frac{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^3}{bh^3} \quad (13)$$

Secara umum, tegangan lentur lazim disajikan dalam **Persamaan 14**:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (14)$$

Dimana c adalah centroid, yaitu setengah dari tinggi penampang balok sehingga rasio tegangan lentur yang bisa ditahan setelah pemberian beban dalam jangka waktu tertentu dibandingkan dengan nilai saat ini adalah:

$$\frac{\sigma_{nanti}}{\sigma_{kini}} = \left(\frac{M \frac{(h - 0,1283T)}{2}}{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^3} \right) / \left(\frac{M \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} \right) \tag{15}$$

yang dapat disederhanakan menjadi **Persamaan 16**:

$$\frac{\sigma_{nanti}}{\sigma_{kini}} = \frac{bh^2}{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^2} \tag{16}$$

Selanjutnya dengan mengkombinasikan **Persamaan 9** dengan **Persamaan 16** dapat diperoleh rasio kekuatan kayu nanti dibandingkan kini adalah:

$$K = \frac{P}{P_{maks}} = \frac{\sigma}{S_R} = \frac{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^2}{bh^2} (0,2291 - 0,02952\text{Ln}(T)) \tag{17}$$

Dan tegangan lentur maksimum yang masih dapat diterima dalam jangka waktu tertentu di masa datang adalah:

$$\sigma = 292 \frac{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^2}{bh^2} (0,2291 - 0,02952\text{Ln}(T)) \tag{18}$$

Untuk balok dengan ukuran penampang mula-mula 4,5 cm x 9,5 cm, **Persamaan 18** dapat didaftar dalam bentuk **Tabel 3**.

Tabel 3. Tegangan lentur yang masih dapat ditahan kayu Redwood dalam setiap jangka waktu pembebanan

Waktu Pembebanan (Tahun)	s (kgf/cm ²)	Waktu Pembebanan (Tahun)	s (kgf/cm ²)
1	63,25	11	23,01
2	54,39	12	21,01
3	48,35	13	19,16
4	43,57	14	17,45
5	39,54	15	15,85
6	36,02	16	14,37
7	32,90	17	12,99
8	30,08	18	11,71
9	27,52	19	10,52
10	25,17	20	9,41

Tabel 3 dapat dibaca sebagai sisa umur pakai kayu Redwood apabila diketahui besarnya tegangan lentur maksimum (s) yang diterima kayu pada titik-titik

kritisnya, sebagai contoh: kayu Redwood komponen cooling tower (ukuran penampang 4,5 cm x 9,5 cm) yang menerima beban lentur sebesar 25,17 kg/cm² masih aman digunakan sampai 10 tahun mendatang.

3. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa:

1. Identifikasi kayu memperlihatkan bahwa kayu yang digunakan untuk komponen cooling tower di PLTP Unit II Kamojang adalah Redwood (*Sequoia sempervirens*) yang telah mendapat perlakuan pengawetan dengan CCA (*Chromated Copper Arsenat*)
2. Kerusakan kayu telah terjadi sedalam 2,95 mm, yang dominan disebabkan oleh faktor abiotik.
3. Kayu Redwood yang telah dipakai selama 23 tahun sebagai komponen menara pendingin secara umum masih memiliki nilai tegangan ijin lebih tinggi daripada yang dipersyaratkan NDS 2005, kecuali kekuatan tekan tegak lurus serat dan MOE-nya.
4. Estimasi sisa masa pakai kayu Redwood komponen menara pendingin di PTLP Unit II Kamojang dapat dilakukan melalui persamaan:

$$\sigma = 292 \frac{(b - 0,1283T)(h - 0,1283T)^2}{bh^2} (0,2291 - 0,02952\text{Ln}(T))$$

dimana b dan h adalah lebar dan tebal kayu mula-mula (cm), s adalah tegangan aktual yang terjadi di lapangan (kg/cm²); dan T adalah sisa masa pakai kayu (tahun).

Daftar Pustaka

Ahn, S.H., Oh, S.C., Choi, I.G., Kim, H.Y., and Yang I. 2008, Efficacy of Wood Preservatives Formulated from Okara with Copper and/or Boron Salts, *J. Wood Sci.* 54: 495-501.

Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority, 2003, *Arsenic Timber Treatments (CCA and Arsenic Trioxide): Review Scope Document*, Canberra, Australia.

British Standards, 1957, *Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*, BS-373:1957, London: British Standard House, Decorporated by Royal Charter.

Core, H.A., Côté, W.A., and Day, A.C. 1979, *Wood Structure and Identification*, Syracuse University Press.

- Cown, D. 2008, Redwood in New Zealand - an end-user Perspective, *NZ Journal of Forestry*, 52 (4): 35-41.
- Forest Products Laboratory, 1999, *Wood handbook-Wood as an Engineering Material*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2011, *The IUCN Redlist of Threatened Species*, <http://www.iucnredlist.org/apps/redlist/details/34051/0>. diakses tanggal: 16 Januari 2012.
- Kuo, M.L., and Arganbright, D.G., 2009, *Cellular Distribution of Extractives in Redwood and Incense Cedar - Part I*, Radial Variation in Cell-Wall Extractive Content, *Holzforchung*, 34(1): 17-22.
- Landmark Trees Archive, 2012, *Tallest Coast Redwoods*, <http://www.landmarktrees.net/redwoods.html> diakses 16 Januari 2012.
- Mandang, Y.I., and Pandit, IKN., 2002, Pedoman Identifikasi Jenis Kayu di Lapangan, Yayasan Prosea, Bogor.
- Morisson, F., 2008, Living in a Material World: Proper Selection of the Materials of Construction for Cooling Towers in Commercial HVAC and Industrial Applications, *CTI Journal* 29(1): 8-33.
- Neubrech, W.L. 1937, California redwood (*Sequoia sempervirens*) and its uses. U.S. Govt. print. off. USA.
- Nugroho, N., 1994, *Studi Pemanfaatan Jenis-jenis Kayu Indonesia sebagai Bahan Konstruksi Menara Pendingin (Cooling Tower)*, Thesis, Program Studi Ilmu Pengetahuan Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- Shupe, T., Lebow, S., Ring, D., 2010, *Causes and Control of Wood Decay*, Degradation and Stain, LSU Ag Center Reseach Center and Extension, USA.
- The Commission of The European Communities, 2003, Commission Directive 2003/2/EC of 6 January 2003 Relating to Restrictions on the Marketing and use of Arsenic (Tenth Adaptation to Technical Progress to Council Directive 76/769/EEC), *Official Journal of the European Communities*, 9.1.2003. L4:9-11.
- William, R.S., Knaebe, M.T., Evans, J.W., and Feist, W.C., 2001, Erosion Rate of Wood During Natural Weathering. Part III. Effect of Exposure Angle on Erosion Rate Wood and Fiber Scicence. 33(1): 50-57
- Wormell, L., 2011, *Chromated Copper Arsenat (CCA)*, [US EPA] United Stated Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/oppad001/reregistration/cca/>. Diakses tanggal 1 Februari 2012.

