

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

Hutan memiliki peran yang aktif dalam siklus karbon global dan iklim, namun sejarah pertumbuhannya kurang dikarakterisasi dibandingkan ekosistem yang ada di planet ini. Pohon merupakan kandidat utama yang dapat mengekstraksi arsip *paleoclimate*, terdistribusi luas dan mampu hidup lebih dari 1400 tahun (Chambers *et al.*, 1998).

Kondisi iklim disimpan dan direkam secara permanen dalam struktur biomasa, sehingga pohon dapat memantau keadaan lingkungan dalam struktur lingkaran pohon (Fritts, 1976). Hal ini dapat dikaji dalam studi dendrokronologi yang mengaitkan hubungan antara pohon dengan iklim maupun kondisi ekologi setempat. Pohon beradaptasi agar mampu bertahan hidup, tetapi dengan pola iklim dan kondisi lingkungan yang abnormal dapat menyebabkan stres pada pohon. Proses regenerasi dan terjadinya perubahan secara mendadak ataupun bertahap akan mempengaruhi pertumbuhan anakan pohon. Kegagalan dalam memahami interaksi perubahan iklim dan fisiologi pohon dapat menyebabkan kepunahan pada beberapa spesies pohon (Pumijumnong, 2012).

Menurut Stahle *et al.* (1999) dan Worbes (1999), dendrokronologi dengan menggunakan lingkaran tumbuh untuk menentukan umur pohon telah memberi kontribusi besar terhadap pemahaman dinamika hutan dan potensi hasil suatu daerah di berbagai negara. Kajian dendrokronologi cukup jarang dilakukan di daerah tropis karena informasi pada dinamika populasi pohon tropis kurang bernilai terhadap industri kehutanan, pelaku konservasi, dan pemilik lahan. Hayden (2008) menambahkan bahwa prasyarat dalam memperoleh informasi dinamika populasi harus mengetahui periodisitas lingkaran tumbuh pohon sehingga dapat dinyatakan sebagai lingkaran tahun.

Dendrokronologi telah digunakan secara luas untuk memahami hubungan antara pertumbuhan radial dan lingkungan masa lalu, iklim di masa lalu, serta bidang hidrologi (Fritts and Swetnam, 1989; Fritts and Dean, 1992), dapat digunakan untuk menentukan umur (Keeley, 1993), rekonstruksi *paleoenvironment* (Nash, 2002), pemodelan pengaruh iklim (Rybníček *et al.*,

2009), memahami perubahan komunitas hutan (Guindon and Kit 2012), mengestimasi sequestrasi karbon (Bascricttoet *et al.* 2004; Martinelli, 2004) yang akan dijabarkan pada bab V.

Bagaimanapun, iklim bukan merupakan faktor satu-satunya yang mempengaruhi variasi lingkaran pohon. Guindon and Kit (2012) mengungkapkan bahwa lebar lingkaran pohon *Abies lasiocarpa* menunjukkan korelasi yang lemah terhadap iklim setempat, namun menunjukkan tingkat sensitifitas yang tinggi terhadap iklim mikro. Selain itu, Pumijumnong dan Wanyaphet (2006) juga menyatakan bahwa variasi antara individu pohon *P. merkusii* dan *P. kesiya* lebih dipengaruhi oleh kelembaban tanah dibandingkan curah hujan dan suhu.

Namun demikian, informasi tentang respon pertumbuhan pohon terhadap iklim sangatlah penting untuk memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang peran iklim di masa lampau dan yang akan datang terhadap ekosistem (Susatya and Yansen, 2016).

## 1. Definisi

Kata dendrokronologi berasal dari bahasa Yunani, yaitu *dendron* yang berarti kayu atau pohon, dan *chronology* yang merupakan salah satu cabang ilmu sains yang berhubungan dengan waktu dan penanggalan dari suatu kejadian (Fritts, 1976), sehingga didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari karakteristik lingkaran tumbuh pohon untuk mengetahui kronologi atau kejadian yang terjadi di suatu daerah.

Pohon merupakan salah satu organisme yang terpengaruh oleh iklim. Lingkaran tumbuh yang merupakan komponen pohon dapat merekam perubahan iklim sehingga dapat dijadikan sebagai sumber informasi *paleoclimatic* atau yang disebut proxy iklim yang dapat digunakan untuk merekonstruksi iklim. Proxy iklim merupakan indikator iklim yang dapat terekam oleh sediment danau, lapisan es, lingkaran tumbuh/lingkar tahun pohon, dan lain-lain (Le Treut *et al.*, 2007).

Analisa lingkaran pohon merupakan salah satu metode penting dalam menentukan umur dan mendokumentasikan (merekam) tren pertumbuhan pohon jangka panjang (Brandez *et al.*, 2016). Pada awalnya *dendrochronology* digunakan untuk menentukan umur pohon (Stokes and Smiley, 1968). Grissino

(2003) menambahkan bahwa hingga saat ini aplikasi *dendrochronology* semakin banyak digunakan, contohnya saja untuk menganalisis kejadian di masa lalu (rekonstruksi iklim, hidrologi, kebakaran hutan, serangan serangga, arkeologi, dan lain-lain).

Rekonstruksi iklim di masa lampau dapat diselesaikan melalui beberapa tahap: (1) membandingkan data dari badan meteorologi dengan lebar lingkaran tumbuh yang dihasilkan selama periode waktu yang sama; (2) membuat sebuah persamaan statistik untuk hubungan antara keduanya; (3) mengganti lebar lingkaran pohon pada persamaan untuk memperoleh perkiraan statistik dari iklim pada tahun sebelumnya. Dengan demikian, perkiraan iklim dari lingkaran pohon bisa menggantikan data meteorologi dan menyediakan informasi berharga tentang periode dan area dimana informasi meteorologi tidak tersedia (Fritts, 1976).

## 2. Sejarah

### a. Dendrokronologi di Bagian Barat Amerika Utara

Studi tentang lingkaran pohon secara sistematis di Amerika Utara bagian barat dimulai oleh seorang ahli Astronomi, Andrew Ellicott Douglass. Investigasi Douglass dimulai pada tahun 1901 berdasarkan pernyataan: bahwa lingkaran pohon mencerminkan ketersediaan nutrisi dan makanan pada saat pertumbuhan. Jumlah makanan yang tersedia sangat bergantung pada besarnya jumlah kelembaban yang ada, khususnya pada daerah yang beriklim lebih kering dengan kuantitas kelembaban terbatas dan pertahanan pohon menghadapi kekeringan dibandingkan berkompetisi dengan vegetasi. Dengan demikian, lingkaran pohon akan mencerminkan tingkat curah hujan dan dijadikan alat pengukur curah hujan. Metode ini akhirnya menghasilkan kurva pertumbuhan pertama pada spesies Pinus (Douglass, 1914 ; Schweingruber, 1988 ; Cook dan Kairiukstis, 1989).

Hasil *cross-dating* pertama didapatkan Douglass pada tahun 1904 ketika ditemukan pola lingkaran tumbuh pada tunggul pohon yang telah mati dan memverifikasi umur pohon tersebut kepada orang yang membersihkan lahan tersebut. Pada dekade selanjutnya Douglass melanjutkan studi lingkaran tumbuhnya yang dijadikan sebagai indikator iklim dan menghasilkan kurva

pertumbuhan yang panjang. Pada akhirnya ia sukses melakukan proses *cross-dating* pada pohon hidup di sepanjang area Arizona tenggara.

b. Dendrokronologi di bagian timur Amerika Utara

Studi dendrokronologi pertama di area ini, tepatnya di New York, dilakukan oleh Stewart pada spesies *Quercus* tahun 1913. Dari hasil penelitian tersebut ditemukan korelasi antara lingkaran tahun dengan curah hujan bulan Juni hingga Juli, namun tidak ada korelasi dengan suhu (Cook dan Kairiukstis, 1989). Selanjutnya Marshall (1927) menghubungkan antara rata-rata pertumbuhan radial tahunan spesies *Tsuga* dengan data curah hujan tahunan yang dikoleksi di Massachusetts. Berdasarkan laju pertumbuhannya di area yang cukup kering, didapatkan koefisien korelasi sebesar 0.70, sedangkan di area yang tidak kering hanya didapatkan korelasi sebesar 0.06.

Kemudian seorang ahli dendrokronologi bernama Lyon melakukan penelitian di area New Hampshire pada spesies yang sama tahun 1935. Dalam penelitian tersebut diperoleh dua penampang melintang hemlock (*Tsuga*) untuk dilakukan proses *cross-date* dan konstruksi kronologi lebar lingkaran tumbuh rata-rata. Hasil menunjukkan bahwa kronologi yang diduplikatnya cocok dengan seri Vermont milik Douglass. Selain itu, ditemukan variasi tahunan pada seri kronologi nya serta menunjukkan kecocokan dengan curah hujan total bulan April-Agustus pada tahun 1857-1927.

Keberhasilan penelitian awalnya membuat Lyon memperluas penelitiannya pada enam kronologi lokasi hemlock dari Vermont dan New Hampshire tahun 1936. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat hasil *cross-dating* yang sangat cocok diantara keenam kronologi tersebut, meskipun terdapat diversitas pada masing-masing lokasi. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa spesies tersebut merespon terhadap kekeringan fisiologis pada musim pertumbuhan.

c. Dendrokronologi di Eropa

Penelitian dendrokronologi di Eropa memiliki sejarah yang panjang. Stallings (1937) menyatakan bahwa pada awal abad ke-15, Leonardo da Vinci menemukan

hubungan antara lingkaran tumbuh dan curah hujan. Selanjutnya de Monceau mengidentifikasi jaringan kayu yang terbentuk pada tahun 1758. Hill yang kemudian pada tahun 1770 mempublikasi bukunya dan menjelaskan tentang 'lingkaran musim' yang terdiri dari kayu awal dan kayu akhir. Sebelum tahun 1828, Mirbel menemukan adanya signifikansi kambium. Dengan keterbatasan aplikasi yang masih tradisional, studi ini semakin ekstensif mempelajari dampak polusi industri terhadap lingkungan. Sudah lebih dari 100 tahun analisis lingkaran pohon digunakan untuk mengetahui kerusakan hutan akibat polusi udara.

Lebih dari 10 hingga 15 tahun terakhir, polusi dalam rentang waktu yang lama dan dalam jumlah yang cukup besar menjadi masalah yang semakin serius. Hal inilah yang menjadi pusat permasalahan di Eropa dan Amerika utara. Namun perkembangan terakhir dalam studi ini tidak hanya menjadikan lingkaran pohon sebagai pengukur vitalitas pohon, tetapi juga densitas lingkaran pohon dan kandungan logam berat di lapisan xilem (Cook dan Kairiukstis, 1989).

Pada awal pertengahan abad ke-19, beberapa ahli botani seperti Moldenhawerof Kiel, Mirbeldan Tubingen menjelaskan ilmu anatomi dan fisiologi merupakan dasar dari studi lingkaran pohon. Theodor Hartig pada tahun 1805-1880 kemudian menambahkan bahwa kedua ilmu tersebut mempunyai konsep yang jelas dalam perkembangan lingkaran pohon. Kemudian Robert Hartig mengabdikan dirinya dalam penelitian anatomi dan ekologi lingkaran pohon pada tahun 1869-1901. Di akhir abad ke-19, ia juga mengembangkan penelitian tentang hujan es dan kerusakan pohon akibat serangga.

Pada tahun 1941, seorang ahli botani yang bernama Huber memberikan dasar untuk mengembangkan studi lebih lanjut dan aplikasi sistematis untuk metode yang digunakan di Eropa. Ia menyatakan bahwa tidaklah cukup jika studi dendrokronologi hanya bergantung pada lingkaran tumbuh yang sempit. Oleh karena itu ia memperkenalkan uji statistik suatu kesamaan (koefisien variasi paralel) untuk mendukung hasil *cross-dating*. Pada akhirnya banyak uji statistik lain yang berkembang berdasarkan koefisien korelasi.

Salah satu kronologi yang dikembangkan di Eropa adalah spesies *Quercus* yang meliputi kayu subfossil alami. Kronologi ini dan beberapa kronologi lain sangat berguna dalam bidang arkaeologi, arsitektur, sejarah seni, dan proses

geomorfologi seperti perubahan yang terjadi di lembah sungai. Lebih lanjut, kronologi dari spesies *Quercus* Eropa yang panjang dapat digunakan sebagai standar untuk kalibrasi metoda pengukuran radiokarbon.

Di sisi lain, studi dendroklimatologi masih sangat sedikit dikembangkan di Eropa, karena banyak hal penting yang perlu dipertimbangkan. Meskipun area Mediterranean di Eropa sangat kaya akan spesies pohon, namun hanya sedikit yang dapat digunakan untuk studi ini, karena kebanyakan pohonnya hanya berumur pendek (Cook and dan Kairiukstis, 1989).

#### d. Dendrokronologi di USSR

Di area ini, studi yang lebih awal dikembangkan adalah dendroklimatologi, yaitu pada spesies *Robinia pseudoacacia* oleh Shedov pada tahun 1882. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lebar lapisan kayu tahunan tergantung pada tingkat besarnya curah hujan per tahun, dan lapisan yang paling sempit terbentuk pada tahun yang mengalami kekeringan. Pada awal periodisitas variasi lingkaran pohon, tampak terjadinya kekeringan pada tahun 1882 dan 1891 yang akhirnya terbukti benar. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa adanya kemungkinan yang tinggi dari metode dendrometrik untuk merekonstruksi iklim di masa lalu.

Selanjutnya pada tahun 1934, Zaozersky mempelajari tentang signifikansi informasi lingkaran pohon yang merupakan solusi masalah hidrologi dan merupakan metode yang sangat berguna dalam pengambilan sampel. Selain itu, metode ini memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif tentang faktor lingkungan yang mempengaruhi variabilitas lingkaran tumbuh tahunan (Cook and dan Kairiukstis, 1989).

Pada tahun 1950-1960 pengembangan penelitian dendrokronologi semakin intensif, dimana metode dendroklimatologi semakin dipopulerkan oleh Rudakov. Dia menyarankan untuk membuang data rata-rata untuk estimasi tren waktu pada seri lebar lingkaran tumbuh. Pada tahun 1954, seorang peneliti Rusia yang bernama Galazy mengaplikasikan metode dendro secara ekstensif untuk merekonstruksi iklim dan dinamika pepohonan bagian atas di Transbaikal. Pada tahun selanjutnya ia merekonstruksi penanggalan level air yang tinggi di danau Baikal.

Kemajuan dendrokronologi pun semakin pesat karena mulai digunakan dalam bidang sejarah, yaitu penanggalan sejarah serta monumen dan peninggalan arsitektur. Labor Dendrokronologi pertama dibangun di *Institute of Archaeology of The USSR Academy of Science* pada tahun 1959. Para peneliti di institusi tersebut mempelajari tentang kepastian penanggalan bangunan kayu dari abad pertengahan di daerah Barat Laut Uni Soviet. Sampai sekarang, laboratorium tersebut terdiri dari 800 sampel kayu yang dikoleksi dari 18 kota Rusia lama, 12 monumen kuno, dan ada juga yang berasal dari pohon yang hidup. Pada tahun 1977, Kolchin dan Chernych bahkan memperoleh kronologi lingkaran pohon yang berumur 1200 tahun (Cook dan Kairiukstis, 1989).

Kemudian metode dendrokronologi ini berlanjut dalam mempelajari siklus dinamika ekosistem hutan dan proses alam yang berbeda, rekonstruksi iklim dan fenomena katastrofik, serta evaluasi manajemen hutan. Salah satunya adalah Olenin yang menggunakan analisis lingkaran pohon untuk penelitian dinamika siklus hutan di daerah lereng barat Urals dan timur Rusia pada tahun 1976.

Penelitian dendrokronologi juga telah dikembangkan di daerah Lithuania sejak tahun 1953. Para peneliti di laboratorium dendroklimatokronologi di *Institute of Botany of the Academy of Sciences* banyak mempelajari dendrokronologi di bagian negara Eropa dari USSR, Siberia dan *Far east*. Dalam penelitiannya, banyak mengemukakan tentang hubungan pertumbuhan pohon dengan fenomena astrofisika-geofisika dan faktor hidroklimatik, serta mempelajari siklus dalam pertumbuhan pohon, merekonstruksi kandungan radiokarbon dari atmosfer bumi, dan mengestimasi efektifitas manajemen pohon.

e. Dendrokronologi di belahan bumi bagian selatan

Studi dendrokronologi di bagian selatan ini cukup terlambat dibandingkan di area lain dan banyak kronologi yang dikembangkan hanya selama 10 hingga 15 tahun terakhir, karena hanya memiliki sedikit dataran dan jumlah populasi, serta keterbatasan tentang pengetahuan ekologi dan botani di daerah tersebut.

Di bagian selatan bumi ini, dendrokronologi pertama berkembang di daerah Amerika selatan oleh Schulman (1956) dengan mempublikasi kronologi pertama Amerika selatan pada spesies *Austrocedrus chilensis* dan *Araucaria*

*araucana* dari Argentina. Kemudian penelitian ini dilanjutkan dengan pengembangan 32 kronologi pada spesies dan *A.chilensis*, *A. araucana*, dan *Pilgerodendron uviferum*, namun hanya dua rekonstruksi *paleoclimate* yang dipublikasi karena keterbatasan analisis iklimnya. Setelah banyaknya penelitian yang dilakukan di Amerika selatan, daerah Afrika selatan pun juga ikut mengembangkan kronologi.

Namun sayangnya penelitian di Afrika selatan juga mengalami hambatan karena sedikitnya pohon yang mampu menghasilkan lingkaran pohon. Beberapa anomali yang terbentuk pada lingkaran pohonnya yaitu tidak jelasnya batas antara kayu awal dan kayu akhir yang dihasilkan, serta banyaknya lingkaran tumbuh yang berhimpit (*wedging ring*), umur pohon yang pendek, dan langkanya spesies yang memiliki potensi dalam analisis dendrokronologi. Oleh karena itu, penelitian terus dilanjutkan sehingga disimpulkan bahwa genus *Podocarpus* dan *Widdringtonia* sangat berpotensi untuk dikembangkan kronologinya, seperti *W. cedarbergensis* yang berhasil menghasilkan kronologi hingga 413 tahun.

Australia adalah area di bagian selatan yang kemudian ikut mengembangkan studi dendro. Kronologi yang berhasil dikembangkan yaitu pada spesies *Nothofagus gunnii* dari Tasmania. Penelitian ini diikuti oleh beberapa penelitian di zona gersang pada spesies konifer *Callistris*, dan disimpulkan bahwa lebar lingkaran tumbuh tergantung pada curah hujan. Potensi terbesar dendrokronologi di Australia didapatkan dari genus *Arthrotaxis*, *Phyllocladus* dan *Lagarostrobos* dan menghasilkan banyak kronologi, dimana salah satu kronologinya mencapai 2000 tahun yang juga digunakan dalam mempelajari isotop karbon. Namun setelah itu ditemukan kayu yang tertimbun dengan umur mencapai 8000 tahun, dan sangat berpotensi dalam pengembangan sejarah kronologi yang panjang, yang kemudian dibandingkan dengan spesies *Quercus* dan *Pinus bristlecone* dari belahan bumi utara.

Area selanjutnya tempat studi dendrokronologi dikembangkan adalah Selandia baru. Pada awalnya pengembangan kronologi tidak langsung berhasil. Namun pada pertengahan tahun 1970, sebanyak 65 kronologi sukses dikembangkan, dan ada yang mencapai 1500 tahun, yaitu pada spesies *Libocedrus bidwillii*. Menyusul kemudian pengembangan studi dendro pada spesies *A. australis* yang

menghasilkan delapan kronologi modern dan satu kronologi subfossil. Kehadiran sejumlah besar kayu yang tertimbun memberikan peluang terhadap perkembangan kronologi lingkaran pohon subfossil yang panjang.

Meskipun penelitian dendrokronologi banyak dilakukan di daerah subtropis, namun penelitian di daerah tropis di belahan bumi selatan juga mulai dikembangkan. Masih banyak ditemukan sejumlah kesulitan dalam mengaplikasikan teknik ini pada area dengan iklim yang seragam, seperti dalam hal memastikan lingkaran tumbuh terbentuk secara tahunan atau tidak. Berlage (1936) meneliti tentang lingkaran tumbuh di Jawa pada spesies *Tectona grandis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lingkaran tumbuh yang terbentuk berkorelasi dengan curah hujan.

Pada daerah tropis di Australia, proses *cross-dating* telah dilakukan pada beberapa spesies pohon dan korelasi antara lebar lingkaran tumbuh dengan curah hujan telah diobservasi pada *Araucaria cunninghamii*, *Callitris columellaris*, *C. macleayana*, *Diospyros* sp., dan *Pisonia grandis*. Namun tidak ada kronologi yang dihasilkan. Sementara itu, penelitian juga dilakukan di daerah Amerika selatan, tepatnya di Argentina bagian utara menghasilkan empat kronologi yang bagus serta korelasi pendahuluan dengan iklim yang menjanjikan dari spesies *Juglans australis* dan *Cedrela angustifolia*.

### **3. Prinsip Dasar dan Konsep Dendrokronologi**

Adapun prinsip dasar dalam kajian dendrokronologi adalah pemilihan area yang cenderung memiliki iklim yang sensitif (Fritts, 1976). Menurut Cook dan Kairiukstis (1989), terdapat beberapa prinsip penting dalam kajian dendrokronologi, yaitu :

#### **1. Prinsip uniformitarian**

Dalam prinsip ini dinyatakan bahwa proses fisika dan biologi yang berhubungan dengan lingkungan di masa sekarang beserta variasinya dalam pertumbuhan pohon, telah menjalankan fungsinya di masa lampau. Begitu juga dengan variasi cuaca dan pola iklim yang ada sekarang, juga telah terjadi di masa lalu. Oleh karena itu, sangatlah penting bahwa seluruh rentang variabilitas iklim yang terjadi di masa lalu harus dimasukkan ke dalam pengambilan sampel di masa sekarang.

Dengan demikian, banyak ahli dendrokronologi yang memprediksi iklim di masa depan berdasarkan laporan di masa lampau. Pemeriksaan kondisi iklim di masa lalu menggunakan data dan bukti independen dari suatu lingkaran tumbuh sangat mendukung dalam validitas prinsip uniformitarian dalam studi dendrokronologi.

## 2. Prinsip faktor-faktor pembatas

Faktor yang sama yang membatasi pertumbuhan pohon akan memberikan tingkat dan durasi yang bervariasi dari tahun ke tahun. Jika salah satu faktor berubah sehingga tidak lagi membatasi pertumbuhan, maka laju pertumbuhan pohon akan meningkat hingga faktor lainnya membatasi pertumbuhan.

Adapun faktor pembatas yang mempengaruhi pertumbuhan pohon diantaranya adalah faktor lingkungan berupa curah hujan dan temperatur, karena lebar cincin merupakan fungsi dari dua variabel tersebut. Prinsip seperti ini sangat penting dalam kajian dendrokronologi karena lebar lingkaran tumbuh bisa di *cross-date* jika terdapat satu atau lebih faktor pembatas yang berlangsung lama. Prinsip ini menyiratkan bahwa lingkaran tumbuh yang sempit akan memberikan informasi yang lebih penting pada kondisi iklim yang terbatas dibandingkan lingkaran tumbuh yang lebar. Selama periode ketika tampak lingkaran tumbuh yang lebar, faktor pembatas menjadi terbatas terhadap derajat yang berbeda dari pohon, tergantung kondisi lokal, posisi ekologi di suatu lokasi dan berbagai faktor non-iklim lainnya.

## 3. Prinsip besaran aspek ekologi

Setiap spesies bergantung pada faktor hereditas yang merupakan faktor penentu fenotip, yang tumbuh dan bereproduksi pada rentang habitat tertentu. Faktor inilah yang disebut besaran aspek ekologi (*ecological amplitude*). Beberapa spesies tumbuh pada habitat yang luas karena hereditasnya membutuhkan amplitudo ekologi yang besar. Di sisi lain ada beberapa spesies yang terbatas pada lokasi tertentu karena memiliki besaran aspek ekologi yang sempit. Sebagai contoh pada spesies *Pinus radiata* dan *Sequoiadendron giganteum* yang hanya dapat ditemukan pada besaran aspek ekologi yang lebar dan menjadi terbatas pada faktor alam setempat disebabkan adanya isolasi faktor geografis.

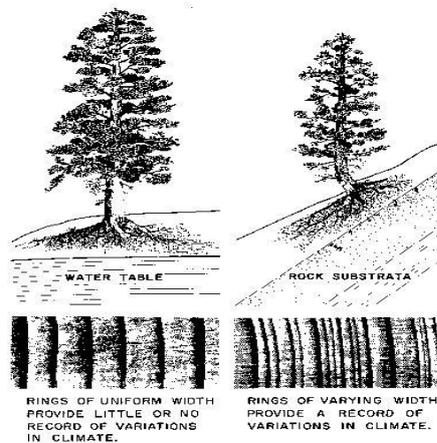
Faktor pembatas pertumbuhan pohon dekat hutan gersang adalah kekeringan, sementara pohon yang tumbuh di daerah ketinggian ataupun pada garis lintang yang tinggi dipengaruhi oleh temperatur yang rendah. Spesies yang berbeda-besaran aspek ekologi akan dipengaruhi oleh faktor iklim yang sama jika individu pohon tumbuh pada habitat yang sebanding dalam hal amplitudo ekologi. Contohnya, spesies yang hidup di bagian utara atau pada elevasi yang tinggi dengan spesies yang hidup di bagian selatan atau pada elevasi yang rendah, dimana jika keduanya mendekati batas gersangnya akan menunjukkan respon yang sama pada kekeringan meskipun akan memberikan respon yang berbeda pada jumlah kelembaban yang berbeda.

#### 4. Prinsip pertumbuhan pohon agregat

Pada prinsip ini dijelaskan bahwa sederetan pertumbuhan pepohonan dapat didekomposisi menjadi kumpulan faktor-faktor aspek lingkungan, baik manusia dan alam yang mempengaruhi pola-pola pertumbuhan di sepanjang waktu.

#### 5. Prinsip pemilihan lokasi

Para ahli dendrokronologi harus memperkirakan faktor pembatas dan prinsip amplitudo ekologi ketika melakukan penelitian dalam rangka memastikan lokasi tempat pengambilan sampel. Dengan demikian, dalam mempelajari lingkartumbuh dan kekeringan, sangatlah penting untuk mengoleksi pohon yang hidup di lokasi yang paling kering (Gambar 1).



Gambar 1. Perbedaan lingkaran tumbuh pohon yang berada di daerah yang tercukupi air dengan pohon yang tumbuh di atas permukaan berbatu (Fritts, 1976).

Terjadinya kekeringan memberi pengaruh terhadap aktivitas kambium secara tidak langsung, karena metabolisme di daun menjadi berkurang, sehingga berpengaruh terhadap pengurangan tajuk dan aktivitas transportasi. Di sisi lain, beberapa ahli juga mengatakan bahwa kekeringan ini memberikan dampak langsung terhadap aktivitas kambium, dikarenakan berkurangnya potensi air dalam jaringan meristem kambium (Larson, 1964 ; Zahner, 1968).

Di sisi lain, dalam mempelajari temperatur sampel sebaiknya dikoleksi pada daerah dengan elevasi atau derajat lintang yang tinggi. Pada daerah subtropis dan daerah dengan iklim lembab, hanya pohon yang berada di lokasi lingkungan ekstrim yang mudah di *crossdate* dan dilakukan analisis dendroklimatologi pada lingkaran tumbuh pohon. Dengan demikian, sampel harus dipilih berdasarkan aspek lingkungan yang sensitif sehingga diperoleh lingkaran tumbuh yang dapat dianalisis, dimana spesies yang bersifat sensitif terhadap kondisi kering akan ditemukan pada daerah dengan kondisi curah hujan terbatas.

#### 6. Prinsip penentuan umur (*crossdating*)

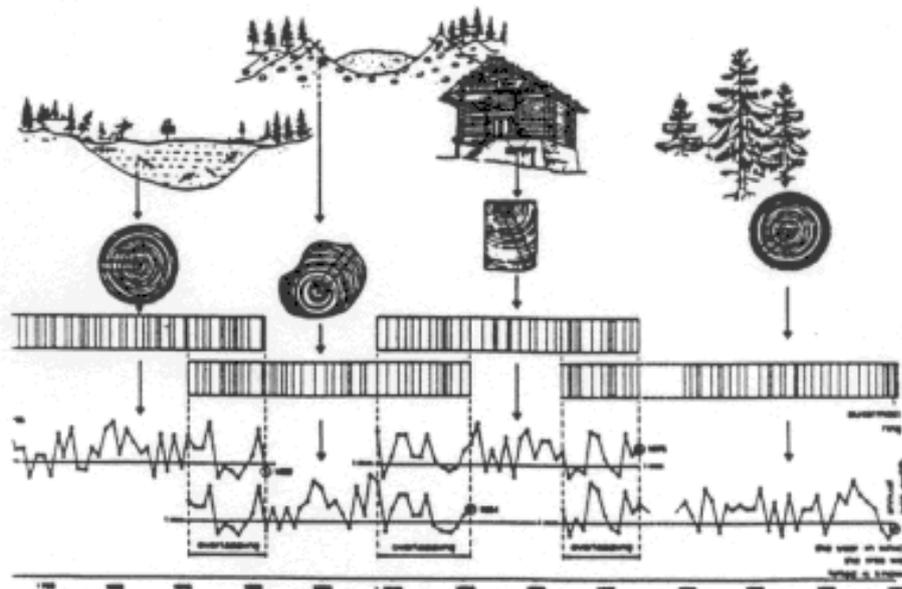
*Crossdating* adalah prinsip yang paling penting dalam studi dendrokronologi yang merupakan kontrol pengukuran dalam proses analisis dendrokronologi, sehingga berperan dalam memastikan dan mencocokkan umur yang tepat bagi setiap lapisan lingkaran tumbuh. Prinsip dari *crossdating* ini meliputi proses pencocokan pola lingkaran tumbuh pada beberapa spesimen untuk memeriksa sinkronisasi, mengenali jika terdapat kemiripan, menduga adanya lingkaran tumbuh yang hilang ataupun lingkaran tumbuh palsu, menguji inferensi dengan memeriksa struktur lingkaran pohon pada spesimen lainnya dengan hati-hati, dan akhirnya membentuk kronologi di suatu daerah.

Lingkaran tumbuh tahunan dapat diidentifikasi dan dilakukan *crossdate* melalui jari-jari batang. Variasi karakteristik lingkaran tumbuh, khususnya lebar lingkaran tumbuh diperiksa dan disinkronkan pada semua sampel di wilayah tertentu. Jika ditemukan kovariansi yang cukup diantara lingkaran tumbuh pada pohon yang berbeda, dan ukuran sampel tersebut cukup besar, tahun dimana lingkaran tumbuh terbentuk dapat dipastikan dengan benar.

Selama satu tahun saat terjadi iklim yang ekstrim, pohon terkadang tidak membentuk lingkaran tumbuh di semua bagian batang, yang kemudian terbentuk hanya sebagian atau bahkan tidak ada di sepanjang jari-jari batang. Pada waktu yang bersamaan juga terjadi perubahan struktur sel pada pertumbuhan tahunan yang bentuknya menyerupai batas lingkaran tahun yang asli. Struktur tersebut kemudian dinamakan pita pertumbuhan antar tahun atau yang dikenal lingkaran tumbuh palsu (*false rings*).

Setelah dilihat proporsi lingkaran tumbuh dari posisi yang berbeda dari batang pohon, dan ditemukan lingkaran tumbuh hilang atau palsu pada jari-jari pohon yang mirip dengan lingkaran tumbuh tahunan, variasi lebar lingkaran tumbuh pada spesimen tersebut tidak bisa di crossdate dengan tepat. Pada intinya, jika ditemukan banyak lingkaran tumbuh hilang dan palsu, tingkat sensitivitas dan korelasi lingkaran tumbuh antar pohon menjadi rendah, penanggalan menjadi kurang tepat dan sampel menjadi kurang berpotensi dalam menjadi rujukan studi dendrokronologi.

Adapun prinsip crossdating dapat dilakukan dengan cara mencocokkan pola kayu yang digunakan dalam industri furniture dengan pola lingkaran tumbuh pada pohon fosil ataupun pohon besar yang masih hidup (Gambar 2).



Gambar 2. Crossdating menggunakan pohon hidup dan pohon fosil yang memungkinkan pembentukan referensi kronologi yang panjang (Schweingruber, 1988).

### 7. Prinsip sensitivitas

Pemeriksaan lingkaran tumbuh di bawah mikroskop dapat memberikan petunjuk seberapa sering iklim membatasi pertumbuhan pohon. Semakin banyak pertumbuhan pohon dibatasi oleh faktor lingkungan, semakin banyak pohon menunjukkan variasi lebar lingkaran tumbuh. Ahli dendrokronologi menyebutkan variabilitas ini sebagai *sensitivity* dan tidak adanya atau kurangnya variabilitas ini disebut *complacency*.

Fluktuasi yang terjadi pada lebar lingkaran tumbuh dapat diperkirakan secara kualitatif dengan pemeriksaan secara langsung atau juga bisa dihitung dari suatu pengukuran lebar yang diekspresikan dalam bentuk statistik yang disebut 'sensitivitas rata-rata', yang merupakan sebuah pengukuran perbedaan relatif pada lebar diantara lingkaran tumbuh yang berdekatan.

### 8. Prinsip repetisi/replikasi

Sejumlah spesimen harus diperiksa dan dilakukan *crossdate* pada wilayah tertentu untuk menghindari adanya kemungkinan lingkaran tumbuh yang hilang pada satu individu tertentu dalam tahun yang sama atau adanya lingkaran tumbuh palsu yang mirip dengan lingkaran tahun. Verifikasi lebih lanjut dapat diperoleh ketika beberapa sampel diteliti secara independen dan dibandingkan, kemudian tidak ditemukan perbedaan antara sampel-sampel tersebut.

Sebagai tambahan, rata-rata pengulangan pengukuran dari banyak pohon menunjukkan estimasi terbaik dari sinyal iklim, dikarenakan variasi pertumbuhan yang berhubungan dengan variasi iklim sehingga diperlukan data rata-rata dari beberapa pengukuran sampel. Selain itu, sejumlah efek faktor non-iklim yang menyebabkan adanya perbedaan antar individu dan satu lokasi dengan lokasi lain dapat diminimalisasi dengan proses merata-ratakan data pengukuran.

Baik repetisi ataupun replikasi dalam proses sampling beberapa *core* dalam satu pohon, dapat menggunakan perbandingan statistik dari variabilitas yang terjadi pada pohon yang sama. Pengukuran variabilitas ini menunjukkan informasi yang sangat penting yaitu bagaimana faktor lokasi dan iklim mengontrol perkembangan pohon.

Jika faktor iklim berperan besar dalam membatasi pertumbuhan, semua sampel replikasi dalam satu pohon akan menunjukkan variasi lebar lingkaran tumbuh yang hampir sama dan sampel akan lebih muda di *crossdate*. Sedangkan jika faktor iklim tidak membatasi pertumbuhan pohon, sampel replikasi pada pohon yang sama akan menghasilkan ukuran lingkaran tumbuh yang berbeda. Selain itu, adanya perbedaan pertumbuhan di sisi yang berlawanan pada pohon yang sama dapat disebabkan oleh variasi dari struktur tegakan hutan, batang yang ramping dan kompetisi antar pohon yang berdekatan. Sejumlah besar replikasi sampel sangatlah penting untuk menghasilkan kronologi yang bagus dari suatu lokasi.

#### 9. Prinsip standarisasi

Standarisasi adalah prosedur dasar dalam analisis dendrokronologi. Lebar lingkaran tumbuh bervariasi tidak hanya dengan fluktuasi kondisi lingkungan, tetapi juga karena perubahan sistematis pada umur pohon, tinggi batang dan produktivitas suatu lokasi. Pada studi variasi lebar lingkaran tumbuh yang berkorelasi dengan iklim, sangatlah mudah untuk mengestimasi perubahan sistematis pada lebar lingkaran tumbuh yang berhubungan dengan umur, yang kemudian akan disingkirkan dari data pengukuran. Koreksi lebar lingkaran tumbuh untuk merubah umur dan geometri pohon ini dikenal sebagai proses *standarisasi*, dan nilai transformasinya disebut *indeks lebar lingkaran tumbuh*.

Indeks tersebut secara umum tidak menghasilkan trend yang linier, nilai rata-ratanya adalah 1. Indeks standarisasi suatu individu pohon adalah rata-rata yang akan digunakan untuk memperoleh nilai kronologi rata-rata (*indeks standarisasi rata-rata*) tempat sampel dikoleksi.

#### 10. Prinsip model pertumbuhan dan hubungannya dengan lingkungan

Dugaan tentang lingkungan dan iklim di masa lampau didasarkan pada model bagaimana lingkungan mempengaruhi pertumbuhan. Model tersebut bisa dalam bentuk pernyataan, persamaan, atau diagram yang mempresentasikan fakta dan hubungan dasar antara keduanya yang dapat berfungsi untuk mengilustrasikan suatu fenomena. Prinsip model pertumbuhan tersebut dapat bervariasi antara

gagasan yang paling mudah hingga turunan persamaan yang benar-benar kompleks yang berasal dari literatur, observasi lapangan, dan eksperimen sehingga dapat digunakan dalam berbagai cara.

Suatu model pertumbuhan dapat direvisi berulang kali ketika ditemukan fakta yang tidak konsisten atau yang bertentangan dengan data. Model yang berbentuk persamaan matematik ataupun statistik dapat berfungsi sebagai deskripsi yang objektif dan tepat dari hubungan antara input dan output suatu sistem.

Beberapa ahli dendrokronologi berfikir bahwa lingkaran tumbuh pohon di daerah kering dapat disebabkan oleh kelembaban tanah selama periode tumbuh. Sedangkan ahli yang lain menyatakan bahwa pohon yang tumbuh di daerah ketinggian akan membentuk model pertumbuhan yang sederhana dan merujuk langsung pada faktor temperatur selama periode tumbuh. Kedua model tersebut, khususnya kasus daerah kering, sangatlah sederhana. Keduanya memberikan perkiraan yang bagus pada saat itu, namun seiring berkembangnya pengetahuan dan teknik statistik semakin baik, maka model pertumbuhan ini pun semakin kompleks.

#### 11. Prinsip kalibrasi dan verifikasi

Unit lingkaran tumbuh dapat dikalibrasi menggunakan variabel lingkungan. Hal ini dapat diselesaikan dengan membuat model statistik atau koefisien model yang menyerupai hubungan sebenarnya, kemudian digunakan dalam indeks lingkaran tumbuh untuk merekonstruksi iklim periode awal, dimana lebar lingkaran tumbuh tersedia, namun tidak ada catatan iklim di masa lalu. Hubungan statistik tersebut akan menghasilkan kalibrasi yang berasal dari hubungan sebab-akibat antara pertumbuhan dan iklim atau bahkan menghasilkan efek korelasi. Korelasi tersebut sangat berguna dalam merekonstruksi iklim di masa lampau.

Rekonstruksi berasal dari lingkaran tumbuh yang dibandingkan dengan kondisi lingkungan aktual untuk memverifikasi keakuratan suatu perkiraan. Verifikasi adalah proses yang sangat penting untuk membuktikan bahwa variasi rekonstruksi adalah benar adanya. Catatan di masa lalu, informasi *paleoclimatic*

secara kualitatif, dan data-data lain tentang masa lampau juga dapat berfungsi sebagai pemeriksaan tambahan.