

KUNSTMATIG HOUTDROGEN

11750111

Kunstmatig houtdrogen

Ir. L.B. Comvalius
Paramaribo – Suriname
ISBN: 99914-682-0-X

Grafische verwerking: Office World

©2007 Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur.

Hoewel aan de samenstelling van de inhoudelijke tekst door de auteur veel zorg werd besteed, kan noch de redacteur noch de uitgever aansprakelijkheid aanvaarden voor de eventuele schade, die in deze publicatie zou kunnen voortvloeien.

VOORWOORD

Dit boek werd samengesteld om de technologische kennis van onze houtbewerkende en verwerkende industrie op het gebied van houtdrogen, zowel het wind- en kunstmatig drogen te optimaliseren.

De landelijke houtdroogcapaciteit van ca. 3.000 m³ per jaar tegen de achtergrond van het aantal van 72 operationele zagerijen en de jaarlijkse nationale rondhoutproductie van 150.000 m³, is feitelijk beperkt.

Houtdrogen, respectievelijk gedroogd hout heeft een toegevoegde kwaliteits- en gebruikswaarde en zal in de naaste toekomst op ruimere schaal ingang moeten vinden om de internationale concurrentie met elders gedroogd kwaliteitshout te kunnen weerstaan.

Willen wij de jaarlijkse bijdrage van de houtsector aan de nationale economie verbeteren en vergroten, dan is het geboden om minder rondhout te exporteren en ons te concentreren op meer lokale bewerking en verwerking tot semi- en eindprodukten.

Ik hoop dat deze handleiding een stimulans mag zijn voor degenen die binnenkort het proces van kunstmatig houtdrogen willen aanvangen en voor de bedrijven die al zijn begonnen met professioneel houtdrogen.

Deze publikatie draag ik tevens op aan het Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek in Suriname (CELOS) bij de herdenking van haar 40-jarig Jubileum in 2007.

Mijn speciale dank voor textuele correctie gaat uit naar mevrouw L. Amatredjo en E. Boerenveen voor het fotograferen van zijn drooginstallaties en logistieke ondersteuning.

L.B. Comvalius

Paramaribo, augustus 2007.

INLEIDING

De reden voor het drogen van gezaagd hout is feitelijk het handhaven of het verbeteren van de kwaliteit van het produkt ten behoeve van het gebruik door de consument.

Ongedroogd (nat) hout is voor vele toepassingen een niet geschikt materiaal. De aard van het materiaal hout zal tijdens het drogen veranderen, wat inhoudt dat zijn eigenschappen ook daardoor anders zullen worden.

Zo zal de houtsoort Mora in natte toestand een maximale buigsterkte van 94 N.mm^{-2} bezitten, terwijl dat bij een vochtgehalte van 12% circa 168 N.mm^{-2} bedraagt.

In wezen heeft gedroogd hout een aantal directe economische voordelen, zoals de reductie van energiekosten bij latere verwerking tot eindprodukten, verhoogde marktprijs en minimaliseren van biologische degradatie in het gebruik.

Vers geveld hout bevat veel water waardoor het materiaal relatief zacht is en daardoor instabiel voor verschillende toepassingen. Het hout is vanwege het hoge vochtgehalte dan ook gevoeliger voor aantasting door schimmels en insecten.

In gedroogde toestand is het materiaal hout duurzamer, gemakkelijker handelbaar en dimensioneel stabiel in gebruik. De stijfheid of elasticiteitsmodulus, de buig- en druksterkte zijn eigenschappen die in goed gedroogd hout aanzienlijk hoger zullen liggen dan in nat hout.

INHOUD

Houtdrogen

VOORWOORD

INLEIDING

1. Algemene begrippen	<i>1</i>
1.1 Drogen en klimatiseren	<i>1</i>
1.2 Vochtgehalte en vochtgehaltebepaling	<i>2-6</i>
1.3 Vezelvezadiging	<i>6</i>
1.4 Houtdichtheid	<i>7</i>
1.5 Krimpen	<i>7</i>
1.6 Materiaalvorming en droogdefecten	<i>9-10</i>
2. Basiscondities droger en droogproces	<i>12</i>
2.1 Droger	<i>12-13</i>
2.2 Warmte (energie)	<i>13-15</i>
2.3 Energiedragers	<i>15-16</i>
2.4 Relatieve luchtvochtigheid	<i>16-20</i>
2.5 Luchtsnelheid en luchtcirculatie	<i>21-22</i>
2.6 Ordening van houtpakketten	<i>23-25</i>
3. Theoretische achtergrond kunstmatig drogen	<i>26-27</i>
4. Het droogproces en de empirische benadering	<i>28</i>
4.1 Temperatuur (θ)	<i>28</i>
4.2 Relatieve luchtvochtigheid (Rv)	<i>28-31</i>
4.3 Luchtsnelheid (v)	<i>31-34</i>
4.4 Houtsoort	<i>34-35</i>
4.5 Houtafmetingen	<i>36-40</i>
5. Enkele typen conventionele houtdrogers ("kilns")	<i>41</i>
5.1 Luchtinput en luchtcirculatie typen	<i>41-43</i>
5.2 Geklimatiseerde drogers	<i>44-45</i>
5.3 Drogers met ontvochtigers	<i>46-50</i>
5.4 Met aardgas gestookte drogers	<i>51</i>
5.5 Via zonne-energie verwarmde drogers	<i>51-53</i>
6. Basisopbouw van een houtdrooginstallatie	<i>54</i>

7. Niet-conventionele houtdroogmethoden	55
7.1 Drogen bij temperaturen > 100 °C	56
7.2 Drogen in persen bij hoge temperaturen	57
7.3 Hoogfrequent (elektrische frequentie) drogen	57-58
7.4 Drogen in vacuüm (verminderde druk)	59-60
7.5 Drogen in oplosmiddelen	61-62
7.6 Materiaalkeuze bij de opbouw van houtdrogers	63-64
8. Oorzaken van defecten in gedroogd hout	65-70
9. Onjuist drogen	71-73
10. Sturing van het kunstmatig houtdroogproces	74
10.1 Droogspanning en "stress relief"	74-75
10.2 Procescontrole en klimaatregeling	75-77
10.3 Klimaatregeling bij ontvochtigers	77
10.4 Slotopmerkingen	77-83
Literatuur	84-87
Bijlage I. Houtsoorten in de tekst	88-89
Bijlage II. Surinaamse molenhoutsoorten	90-94
Bijlage III. Eenheden en Griekse lettertekens	95
Bijlage IV. Aanvulling controle-apparatuur	96-97
Bijlage V. Aanvulling dehumidificatiedroging	98
Bijlage VI. Droogschema's	99-103

1.1. Drogen en klimatiseren

Evenwichtsvochtgehalte ($\chi\phi$ of Ev)

Het is algemeen bekend, dat pas gekapt of geveld hout niet geschikt is voor direct gebruik. Het hout bevat namelijk nog teveel vocht (water) en zal dit water van nature willen kwijtraken. Hout is een organisch en hygroscopisch (vochtaantrekkend) materiaal. Het hout zal zijn vochtgehalte in evenwicht willen brengen met dat van de omringende atmosfeer dus met de heersende temperatuur en luchtvochtigheid.

Wanneer dit evenwicht is bereikt, spreken wij van evenwichtsvochtgehalte van hout of ook wel afgekort $\chi\phi$ of Ev. Binnen een houtsoort vertoont het evenwichtsvochtgehalte bij een bepaalde Rv (relatieve luchtvochtigheid) een zekere spreiding. De gemiddelde Ev's voor de vele houtsoorten kunnen daarom sterk van elkaar verschillen.

Het evenwichtsvochtgehalte ligt bij een gelijke Rv bij vochtafgifte (*desorptie*) hoger dan bij vocht opneming (*adsorptie*). Dit verschil in gedrag onder overigens gelijke omstandigheden heet *hysteresis* en is in het algemeen het grootst in het Rv-gebied van 50%-90%.

Het natuurlijk water(vocht)verlies gaat gepaard met veranderingen van de houtafmetingen en normaliter met krimpen, scheuren, kromtrekken en splijten. Het drogen van hout is een fysisch verschijnsel waarbij water aan het materiaal wordt onttrokken onder toevoer van een zekere hoeveelheid warmte. Dit proces van warmtestofwisseling heeft andere fysische verschijnselen tot gevolg. Hout dat gedroogd is tot dit gewenste evenwicht zal geen verdere structuurverandering vertonen.

Drooghout heeft een betere trek- en druksterkte en is beter geschikt als constructiemateriaal. Als hout eenmaal droog is, zal het ook niet meer door schimmels en of boorders (insecten) worden aangetast (in bepaalde situaties kunnen wel drooghoutboorders optreden). Drogen is dus het onttrekken van water of het kwijtraken van overtollig water onder natuurlijke of geforceerde condities.

De term klimatiseren is feitelijk synoniem met drogen. Klimatiseren of ook wel lucht- of winddrogen vindt plaats bij betrekkelijk lage temperaturen (35°C – 50°C) en luchtsnelheden van 6,0 – 9,0 m/minuut.

1.2. Vochtgehalte en vochtgehaltebepaling (χ of V)

Voor het drogen van hout dient het werkelijk vochtgehalte in een daartoe geschikt monster of monsters te worden bepaald en uitgedrukt in een percentage (%) van de massa van datzelfde gedroogde houtmonster.

De algemene formule hiervoor luidt:

Natgewicht (N) – Drooggewicht (D) = Vochtgewicht (Vg)

$$\frac{N - D}{D} \times 100 = V \text{ (Vochtgehalte) in \%}$$

Voorbeeld: N = 40 g; D = 20 g
 V = (40 – 20) / 20 x 100 = 100%

Voor dit doel dienen kleine houtmonsters in een daartoe geschikte labo-droogoven (103°C ±2°C) te worden gedroogd, totdat deze na herhaald wegen geen gewichtsverlies meer vertonen.

Elektrische vochtmeters worden ook gebruikt en deze zijn snel in weergave doch minder nauwkeurig dan de ovenmethode.

Voor de meeste stoffen is het (berekend) vochtgehalte gebaseerd op het natgewicht van het materiaal, doch voor hout is dat op het drooggewicht. Om die reden kan bij zeer lichte houtsoorten (laag volumieke massa) in natte toestand, het vochtgehalte hoger zijn dan 100%.

Pas geveld “Groenhart” heeft bijvoorbeeld een vochtgehalte van ca. 35%, terwijl voor “Balsa” het vochtgehalte meer dan 600% kan bedragen. Beide houtsoorten komen voor in tropisch Zuid Amerika.

Weerstandstypen

Deze meters meten niet direct het houtvochtgehalte, doch een van de houtelektrische eigenschappen, welke in relatie staat tot de aanwezigheid van vocht in het hout.

Droog hout is bekend als een goede isolator en daarom met een hoge elektrische weerstand. Water is echter een goede elektrische geleider, waardoor veel vocht in het materiaal resulteert in een lage weerstand voor elektrische stroom.

De weerstandsmeters zijn gewoonlijk uitgerust met twee (2) pen- of bladelektroden, die in het hout worden gedrukt. Het instrument meet de weerstand van elektrische stroom tussen twee (2) elektroden en zet deze direct om in een procentueel vochtgehalte, af te lezen op de meterscherm (type Ohm-meter met naaldaanwijzing of als digitale LCD-aanwijzing). Er zijn twee typen elektrodepennen die voor de vochtmeting in hout worden gebruikt. De standaard penelektroden zijn kort en penetreren van 6-8mm in hout en meten daardoor de natste zone, die bereikbaar is.

De hamerelektrode heeft langere, geïsoleerde pennen waarvan de punten bloot zijn. Deze elektroden kunnen op variabele diepten in het hout worden geslagen en meten dan het vochtgehalte tussen de twee blote penpunten. In de praktijk is het gebruikelijk om de pennen tot op 1/3 van de houtdikte in te slaan en daardoor het gemiddelde vochtgehalte van de dwarssectie van het materiaal vast te stellen.

Als de houtvezels goed vochtig zijn, is de elektrische weerstand op zijn laagst of tussen 25-30% vochtgehalte. Boven dit punt wordt de weerstandsvochtmeter onnauwkeurig omdat er dan weinig of geen verandering is in weerstandvermogen boven het vezelverzadigingspunt (VVP).

Beneden ca. 8% vochtgehalte neemt de weerstand van hout voor de doorgang van elektriciteit zo hoog toe dat de meeste weerstandsmeters niet in staat zijn een dergelijk hoge weerstand nauwkeurig genoeg te meten.

Voor de praktische toepassing van kwaliteitshout is het vochtgehaltegebied van 8-25% echter het meest relevant en adequaat.

Conductiviteit en capaciteitstypen

Vochtmeters welke elektriciteitsverlies (conductiviteit) benutten of een combinatie van capaciteit en conductiviteit als elektrische voeding voor de indirecte meting van het houtvochtgehalte, zijn in de USA zeer populair. Deze vochtmeters hebben plaaielektroden die niet in het houtoppervlak penetreren en kunnen het houtvochtgehalte alleen aan het houtoppervlak meten. De meetresultaten worden echter sterk beïnvloed door de mate van de volumieke massa en door het vochtgradient in het materiaal.

Bepaalde typen van deze meters kunnen voor de houtvolumieke massa echter vooraf worden gekalibreerd. Door het ontbreken van penelektroden op deze meters zijn die meer geschikt voor de inspectie van gebruiksklaar hout, met name kozijn- en meubelhout waarin geen boorgaatjes mogen voorkomen.

Vochtgehaltebemonstering van een partij te drogen hout

De vochtgehaltemeting van hout dat in gebruik is, heeft vaak betrekking op een specifiek stuk materiaal, doch bij het drogen van een grote partij zal dat voor het werkelijk vochtgehalte onvoldoende zijn.

De standaardmethode om de droging van een partij hout in een droogproces te bepalen, is het trekken van zes (6) verschillende monsters (steekproefbemonstering) uit de partij en het vochtgehalte volgens de oventdroge methode te bepalen. De monsters (teststalen) worden daarna aan de kopeinden afgedicht, gewogen en samen met de te drogen pakketten in de droogkamer geplaatst.

Op basis van het gewicht en het vochtgehalte van de monsters is het dan eenvoudig om verder het vochtverlies van de monsters periodiek door herwegen vast te stellen.

Het theoretisch drooggewicht van elke teststaal zal dan aan de hand van het voorgaande als volgt kunnen worden gecalculleerd:

$$D = \frac{N}{Vg / 100 + 1}, \text{ waarbij}$$

D = drooggewicht van teststaal

N = natgewicht van teststaal
Vg = vochtgehaltepercentage

Met behulp van deze lineaire vergelijking zal het vochtgehalte van de teststalen middels herwegen op elke gewenste tijdstip in het droogproces, kunnen worden bepaald. Theoretisch kan op grond van de voorgaande vergelijking het einddrooggewicht van de teststalen voor het einde van het droogproces als volgt worden gecalculeerd. Hierbij moet het natgewicht, het vereiste eindvochtgehalte en het initieel vochtgehalte bekend zijn:

$$W_d = \frac{W (100 + MC_d)}{(100 + MC_w)}, \text{ hierin is}$$

W_d = einddrooggewicht bij vochtgehalte MC_d
W = natgewicht van de teststaal
MC_w = vochtgehalte (%) van ongedroogde stalen
MC_d = vereiste vochtgehalte (%) aan het eind van het droogproces

De droging kan dan eventueel worden voortgezet totdat de monsterstalen het gewenste vochtgehalte hebben bereikt.

Sommige experts vinden het aantal van zes (6) teststalen niet voldoende of representatief genoeg voor grote houtpartijen van 100 m³ en meer. Uitbreiding echter van het aantal teststalen om een goed beeld van het droogproces te verkrijgen is statistisch aan te bevelen. Voor een partij hout tot 25 m³ zijn de zes (6) monsters voldoende. Bij grote variaties van het eindvochtgehalte rondom het gemiddelde is het verstandig om het aanbevolen droogschema aan te passen door meer waarnemingen tijdens het proces te doen en aan het eind altijd na te gaan of het toegepast regime tot het gewenste vochtgehalte heeft geleid.

1.2.1 Initieel vochtgehalte (χ_b)

Het beginvochtgehalte is het vochtgehalte aan het begin van het droogproces. Deze kan variëren van zeer hoog bij vers gekapt hout, afhankelijk van de houtsoort tussen 50% en 180%, tot laag 20% - 25% bij zogenaamd luchtdroog hout.

1.2.2 Eindvochtgehalte (χ_e)

Dit is het gemiddelde vochtgehalte, dat middels de droogbehandeling wordt bereikt. De hoogte ervan is afhankelijk van de gebruiksdoelen van de houtsoort.

1.3. Vezelvezadiging (χ_{98} of VVP)

Het vocht(water) in het hout komt voor in twee vormen:

- a) vrijwater of capillair water tussen de celwanden
- b) gebonden water voorkomend in de celwanden zelf.

Wanneer al het “vrije” water tussen celwanden is verwijderd (de wanden van het houtweefsel zijn dan nog geheel met water verzadigd), spreken we van vezelvezadigingspunt (VVP).

In de houtdrogerij speelt het VVP een zeer belangrijke rol, omdat vanaf dit punt het echte houtdrogen begint. Lange tijd werd aangenomen, dat het VVP lag tussen 24% en 25% vochtgehalte (V).

Als een monster (stukje) hout derhalve een gemiddeld vochtgehalte (V) van 50% heeft, zal circa de helft van de totale hoeveelheid water (gehalte) in de vorm van “vrijwater” zijn en de andere helft “gebonden” in de celwanden. Er bestaat echter geen eenduidigheid over het VVP van de verschillende houtsoorten (op grond van onderzoeksmethodiek en lokatie).

Het Amerikaanse ministerie van Landbouw (sector Bosbouw) hanteert een gemiddelde van 30% vochtgehalte voor het VVP bij alle houtsoorten.

Voor onze doeleinden zullen wij voortaan hetzelfde gemiddelde VVP van 30% handhaven. Het vezelvezadigingspunt kan ook worden gezien als het vochtgehalte, waarbij de maximale zwelling bij adsorptie wordt bereikt of het vochtgehalte waarbij de krimp begint.

Indien het vochtgehalte (V) hoger is dan het VVP zal het water gemakkelijker uit het hout verdwijnen, terwijl bij het VVP zelf en lager daarvan de droogweerstand voor elke houtsoort zal toenemen.

1.4. Houtdichtheid (ρ)

Dit is de verhouding van de massa van het hout in geheel droge toestand tot het volume in natte toestand of:

$$\frac{M.droog}{Vol.nat} = \rho$$

Boven het VVP is het houtvolume praktisch constant omdat vochtveranderingen dan geen krimp of zwel meer zal veroorzaken. Het dichtheidsgetal voor hout varieert tussen 0,3-1,2 en is feitelijk een onbenoemde grootheid. In het algemeen spreekt men van *volumieke-massa* van hout en niet van *dichtheid*. In wat oudere literatuur van voor 1960, komt men de uitdrukking "volumieke dichtheid" tegen, hetgeen hetzelfde is als dichtheid.

1.5. Krimpen

Van groot belang in het droogproces van hout, is ook het begrip krimp. De krimp die plaatsvindt in het droogproces van vers (green) hout naar het VVP is betrekkelijk gering. In het algemeen vindt de meeste krimp plaats beneden het VVP (Tabel 1).

In de praktijk betekent dit het volgende:

- rondhout dat gedroogd wordt, zal altijd radiale krimp (scheuren) vertonen;
- tangentiale krimp bij gezaagd hout is bijna tweemaal groter dan radiale krimp; (zie voorbeelden kwartiers en dos of vlakgezaagd).

Tabel 1. Krimpwaarden van enkele lokale houtsoorten

Houtsoorten	β_t (%)	N	β_r (%)	N	β_{vol} (%)	β_t / β_r (%)	Krimp-coeff. (%)
1 Bergigronfolo	6,3	32	3,1	32	9,4	2,0	0,46
2 Gerikabisi	7,2	32	4,8	32	12,0	1,5	0,76
3 Kimboto	11,0	32	7,6	32	18,6	1,4	0,70
4 Redisali	9,4	22	5,7	24	15,1	1,6	0,71

5	Pegrekupisi	9,3	15	6,6	23	15,9	1,4	0,56
6	Titei-udu	10,9	35	5,6	40	16,5	1,9	0,51
7	Pikinmisiki	9,8	25	6,0	43	15,8	1,6	0,54
8	Heigron gronfolo	9,1	23	5,1	20	14,2	1,8	0,51
9	Babun	8,2	47	4,7	46	12,9	1,7	0,49
10	Makakabisi	5,2	30	3,6	42	8,8	1,4	0,40
11	Bofru-udu	9,9	31	5,1	32	15,0	1,9	0,52
12	Redi jakanti	6,4	31	3,3	32	9,7	1,9	0,36
13	Mawsikwari	6,6	31	3,3	32	9,9	2,0	0,33
14	Sawari	8,3	16	3,6	16	11,9	2,3	0,49
15	Pakuli	10,0	31	6,2	24	16,2	1,6	0,75
16	Tamarinprokoni	6,9	32	3,7	32	10,6	1,9	0,48
17	Redifungu	10,3	32	6,4	32	16,7	1,6	0,78
18	Wetifungu	9,4	32	4,5	32	13,9	2,1	0,59

- β_t – tangensiale krimp
 β_r – radiale krimp
 β_{vol} – volumetrische krimp
N – aantal proefstalen per soort

Krimpen of het verkleinen in omtrek of volume van een stuk hout is het gevolg van vocht(water) verlies beneden het VVP.

De drogeroperator (Kiln-operator) dient in dit verband te weten dat een vlak of dos gezaagd stuk hout sneller droogt dan een kwartiers gezaagd stuk. "Dos" gezaagd hout bevat aan het oppervlak meer open cellen voor de waterafgifte naar buiten. Het drogen van hout gebeurt van buiten naar binnen en het is duidelijk dat er een vochtverschil (*gradient*) zal ontstaan tussen de binnen- en buitenlagen van het materiaal.

Of het water(vocht) door middel van capillaire of hygroscopische stroming uittreedt (binnen naar buiten), er zal normaliter een vochttransportverschil bestaan tussen de natte kern en de drogere buitenlagen (vochtgradient).

In een droger zal het water in de buitenste lagen van het materiaal worden omgezet in waterdamp en middels de warme luchtstroom worden meegenomen en afgevoerd.

Krimp in de buitenste lagen van een stuk hout vindt plaats voordat de kern tijd heeft gehad om voldoende te drogen. Als gevolg hiervan zullen spanningen in het materiaal optreden. Bij voortzetting van het

droogproces zal aan de omtrek een laag met trekspanning en aan de binnenkant een laag met drukspanning ontstaan. In de praktijk zien wij dit als ongelijke krimp. De ongelijke krimp tijdens het drogen van hout in radiale en tangentiële richting veroorzaakt kwaliteitsvermindering (schade-effecten).

Het hoofddoel daarom van droogschema's (Kiln-schedules) is om zo kort mogelijk te drogen en zo min mogelijk kwaliteitsvermindering van het materiaal te veroorzaken.

De meest voorkomende schade-effecten bij het drogen van zachte houtsoorten zijn:

- schotel (cupping)
- verbuiging (bow)
- kromtrekken (spring)
- scheluw (twist).

Krimp als zodanig kan niet worden voorkomen, doch wel de effecten daarvan. Samenvattend kan het volgende over krimpverschijnselen worden gesteld:

- in een gegeven stuk hout (ongeacht de soort) is de tangentiële krimp altijd het grootst;
- radiale krimp is gemiddeld de helft van de tangentiële krimp;
- axiale (lengte) krimp is te verwaarlozen.

De relatie tussen krimp en vochtgehalte is in essentie lineair, zodat de bepaling van de krimp tussen twee vochtgehalten als de waarden van vers tot ovedroog bekend zijn vrij eenvoudig.

$$\text{Percentage (\% krimp)} = \frac{\text{afname in dimensie of volume}}{\text{oorspronkelijke dimensie of volume}} \times 100$$

1.6. Materiaalvervorming en droogdefecten

De totale krimp in een stuk hout is proportioneel (evenredig) met de hoeveelheid water verwijderd uit de celwanden van dat stuk hout.

De totale krimp echter is niet evenredig met het verschil tussen versgezaagd (green) en eindvochtgehalte (χ_e), maar evenredig met het verschil tussen vezelvezadigingspunt (VVP) en het eindvochtgehalte. Met andere woorden: hout gedroogd van 30% naar 19%

vochtgehalte, zal minder gebreken vertonen dan hout gedroogd van 25% naar 12%.

In de praktijk van het drogen blijkt deze stelling niet helemaal waar te zijn, met name om het volgende: als het gemiddelde vochtgehalte in een stuk hout lager is dan 25% en het oppervlak slechts 15% vocht aangeeft, kan de kern nog steeds 35% vocht bevatten. Drogen tot vezelvezadiging zal in dit geval onvermijdelijk leiden tot gebreken.

1.6.1 Korstverharding (case hardening)

De toestand van een stuk drooghout, waarbij het oppervlak droog is en de binnenkant (kern) nog nat is, noemen wij "case hardening". Dit verschijnsel veroorzaakt in het hout inwendige trekspanning. Als hieruit een "monster" hout in de vorm van een stemvork wordt gesneden, zullen de buitenlagen naar binnen toe buigen. De monsters hiervoor moeten ½" dik zijn en circa 1" van het kopse eind af worden gezaagd (Fig. 1 en 1A).

In geval een stuk hout met een gestadige afname van het VVP naar de kern toe wordt gedroogd en vervolgens met veel vocht wordt geconditioneerd (stress relief), kan omgekeerde trekspanning optreden waarbij de "vork" naar buiten toe zal buigen (Fig. 1). Indien er geen "case hardening" optreedt, zullen de benen van de "vork" horizontaal (recht) verlopen.

De bovenomschreven testmethode is indicatief voor een partij hout dat "goed" of "slecht" werd gedroogd.

"Case hardening" komt veelvuldig voor bij het drogen van hardhout en dient te worden voorkomen, omdat de konsekwenties hiervan in constructiewerken ernstig kunnen zijn.

1.6.2 Andere droogdefecten of gebreken

Vermeldenswaard zijn:

- honinggraatvorming (honeycomb)
- ineenzakking (collaps).

Bij "honeycomb" gaat het om kleine aan het oppervlak onzichtbare gaten, na doorzagen van een monster worden deze gaten pas zichtbaar.

"Collaps" is het in elkaar klappen van celweefsel tijdens het drogen, waardoor het materiaal duidelijk zichtbare vervormingen vertoont.

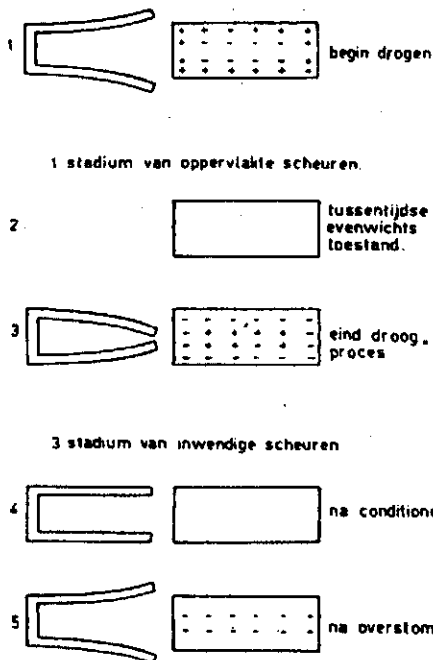


Fig. 1. Het spanningsbeeld van een stuk hout in de verschillende stadia tijdens het kunstmatig drogen.

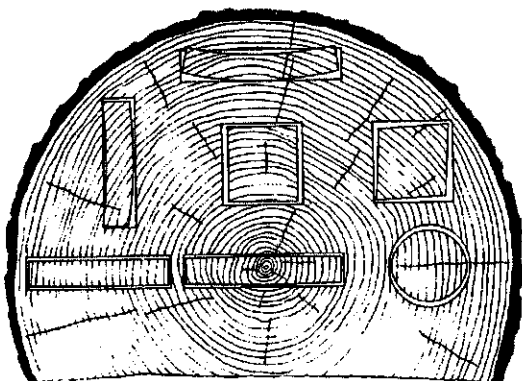


Fig. 1A. Krimp en vervorming van hout.

Ten gevolge van de anisotrope krimp speelt de plaats waar het hout uit de stam is gezaagd, een belangrijke rol bij de vervorming door krimp (Foto For.Prod.Lab. Madison, USA).

2. Basiscondities droger en droogproces

2.1. Droger

De volgende fysische factoren in de droger zijn bepalend voor het kunstmatig houtdroogproces:

- a) temperatuur of warmte (energie)
- b) vochtigheid (relatief)
- c) luchtsnelheid en luchtcirculatie
- d) snelheid van intern vochttransport in de houtweefsels.

Als wij voor de verdere uitleg aannemen, dat in de praktijk in een van deze factoren een verandering plaatsvindt, dan zou zich het volgende kunnen afspelen:

- Warmte: verhoging van de temperatuur zal de vochtverdamping versnellen en de droogtijd verkorten; verlaging van de temperatuur leidt tot vermindering van de verdamping en daardoor tot het verlengen van de droogtijd.
- Vochtigheid (relatief): verhoging van de relatieve luchtvochtigheid (R_v), dus meer vocht in de lucht zal de verdamping vertragen en de droogtijd doen toenemen; vermindering van de R_v bevordert de verdamping en leidt tot verkorting van de droogtijd.
- Luchtcirculatie en luchtsnelheid: verhoging van de luchtsnelheid zal de verdamping doen toenemen en de droogtijd verminderen; vermindering van de luchtcirculatie leidt tot vertraging van de vochtverdamping en daarom tot verlenging van de droogtijd.

De meeste Noordamerikaanse en Noordepese naaldhoutsoorten zullen een straffe droogschema, inclusief hoge temperaturen kunnen verdragen (zelfs boven het kookpunt van water).

Het te volgen droogschema voor harde tropische houtsoorten is gecompliceerder. Deze houtsoorten dienen betrekkelijk langzaam te worden gedroogd volgens een zogenaamde milde schema (Procescontrole).

Gelet op de bovenstaande fysische droogfactoren, zou de conclusie kunnen worden getrokken dat het drogen door één van de volgende drie ingrepen kan worden versneld, met name:

- temperatuurverhoging in de droger;
- vermindering van de relatieve luchtvochtigheid;
- vergroting van de lichtsnelheid.

In de houtdrogerij echter is een droogschema, traditioneel een gecombineerde balans van alle drie ingrepen. Opgemerkt moet worden, dat in de praktijk het vergroten van de lichtsnelheid de minst economische is en deze ingreep procesmatig (vaak een door de fabrikant vastgestelde grootheid) zoveel mogelijk achterwege dient te worden gelaten.

Naast de bovengenoemde fysische factoren zijn voor het te drogen materiaal zelve de volgende houteigenschappen in het droogproces van belang:

- houtafmetingen
- radiale en tangentiële krimp
- diffusiesnelheid
- druk- en trekhout
- draadverloop (schuin- en kruisdraad).

2.2. Warmte (energie)

Er zijn verschillende energiedragers c.q. warmtemedia toepasbaar om hout kunstmatig te drogen. In deze handleiding beperken wij ons om de meest relevante warmtemedia globaal toe te lichten.

- zonne-energie
- verzadigde stoom
- heetwater
- aardgas
- electriciteit
- afvalhout en minerale afvalolie.

Deze energiedragers worden in paragraaf 2.3 behandeld.

Het drogen van hout is een proces waarbij water uit het hout moet worden verdampt. De waterverdamping bij het droogproces eist de meeste hoeveelheid warmte (energie) op.

De toegevoerde warmte dient echter niet alleen voor de verdamping van het water, doch ook voor de volgende procesfactoren:

- opwarming van de droogkamer en de apparatuur daarin;
- opwarming van de houtstapel(s), bestaande uit water en hout;
- opwarming van de lucht in de droger tot de vereiste temperatuur om de gewenste relatieve luchtvochtigheid (Rv) te bereiken;
- opwarming van de aangezogen verse lucht.

Een deel van de toegevoerde warmte dient ook ter compensatie van de volgende verliezen:

- afgifte van warme vochtige lucht;
- uitladen van de pakketten hout uit de droger;
- ongewenste drogerlekkages.

De totale vereiste hoeveelheid warmte (energie) is uiteindelijk afhankelijk van de droegergrootte, het type droger, de soort toegepaste energie en de houtsoort (fysische eigenschappen).

De totale hoeveelheid benodigde energie voor een droger wordt uitgedrukt in kW/m³ gedroogd hout. De globale energie-efficiëntie voor hardhoutdrogers bedraagt ca. 40%. Dit betekent het volgende. Voor de verdamping van 1 kg (1 liter) water uit een massa van 1 m³ hout met een vochtgehalte dichtbij het VVP zal circa 2,5 kW aan energie benodigd zijn.

Indien de verblijfstijd van de soort hout bekend is, het begin- en eindvochtgehalte alsmede het drooggewicht van de houtsoort, kan de hoeveelheid energie als volgt worden berekend:

Voorbeeld Wana-hout:

Gemiddeld ovendrooggewicht Wana	550 kg/m ³
Vochtextractie van 60% naar 15%	45% of 247,5 kg water/m ³ (550 x 0,45)
Verblijfstijd in de droger	20 dagen
Droger capaciteit	200 m ³ (2 charges/mnd.)
Hoeveelheid te verdampen water	49.500 kg (200 x 247,5)

Bij een efficiency van 40% is de:

Energie-consumptie $49.500 \times 2,5$ kW	123.750 kW
Gemiddeld energieverbruik / uur	258 kW of
Voor elke m^3 / uur	1,3 kW of
Voor elke liter water	2,5 kW

Hierbij moet het motorvermogen van de ventilatoren worden bijgeteld (ca. $0,05$ kW/ m^3).

Bij deze redenering is uitgegaan van een met opgewekte stoom gestookte droger (warmte tegen lage kosten). De benodigde energie in kW voor een even grote droger, doch volgens de warmtepomp-methode gestookt, zal ca. 30-40% lager zijn.

Wereldwijd worden er tien (10) verwarmingsmedia toegepast voor het drogen van hout. Voor ons doel (het drogen van tropische middel en harde houtsoorten waarbij lage droogtemperaturen zijn gewenst) komen de volgende opwarmingsmethoden in aanmerking:

- lagedruk stoom (85 °C)
- elektrische warmtepomp (75 °C)
- afvalwarmte uit houtafval (80 °C)
- warmte uit minerale afvalolie (85 °C).

2.3. Energiedragers

- Opwarming door middel van lagedruk stoom betekent dat de stoom eerst dient te worden opgewekt, waarvoor in de meeste gevallen afvalhout, afvalolie of gas in een fornuis wordt gestookt en de warmte gebruikt om in een heetwaterketel (boiler) stoom te produceren.

Met lagedruk stoom wordt bedoeld een stoomdruk van 15 psi (103 kPa) van 120 °C. Voor het verkrijgen van de lagere werktemperaturen (65 °C- 85 °C) wordt de stoom in warmtewisselaars geleid en gedeeltelijk afgekoeld.

- Bij het warmtepompsysteem of dehumidificatie wordt de aanwezige warmte van ca. 27 °C of daartoe middels een elektrische vóórverhitter opgewekte warmte, door speciale ventilatoren over het hout geblazen. De warme vochtige

lucht wordt stapsgewijs in een koelsysteem (condensator) gekoeld tot 15 °C en de gewonnen warmte ($t = 12$ °C) opnieuw gebruikt voor de luchtverwarming in de droger.

De totale koelcapaciteit van de condensator en het geïnstalleerd elektrisch vermogen worden bij dit systeem omgezet in warmte dat kan oplopen tot ca. 75 °C en aan de droogkamer afgestaan.

De "input-energie" efficiency bij dit systeem is hoog, omdat feitelijk gewonnen warmte niet verloren gaat, doch telkens wordt hergebruikt (Wet uit de thermodynamica).

- Bij de directe toepassing van afvalhout zonder stoom- of drukketel gaat het om de input (injectie) van hetelucht uit de afgassen van de houtverbranding. De efficiency van dit systeem is in hoge mate afhankelijk van het beginvochtgehalte van het afvalhout en het in de droogkamer toegepaste ventilatiesysteem. De droogkamer dient bij dit systeem continu te worden geventileerd om de Rv in balans te houden. Toepassing van dit systeem vindt ook alleen plaats in bedrijven waar grote hoeveelheden afvalhout vrijkomt. De investeringskosten voor deze hetelucht-injectie systemen zijn hoger dan voor een lagedruk stoomunit.
- In het geval van minerale afvalolie worden de verbrandingsgassen van een oliebrander via een kanaal direct in de droger geïnjecteerd. Boven in dit kanaal is een smalle gleuf aangebracht die zodanig wordt afgesteld, dat de droger over de gehele lengte gelijkmatig wordt opgewarmd.

2.4. Relatieve luchtvochtigheid

Onder relatieve luchtvochtigheid (Rv) wordt verstaan de hoeveelheid waterdamp die een hoeveelheid lucht van bepaalde temperatuur en druk bevat in relatie tot de hoeveelheid waterdamp die deze hoeveelheid lucht maximaal kan bevatten.

Korter gezegd, de Rv is de verhouding tussen de heersende of partiële waterdampdruk en de verzadigingsdruk. Als verhoudings-

getal wordt de Rv uitgedrukt in % of in een getalswaarde tussen 1 en 0 waarbij 1 = 100%, het maximale dampdrukgehalte.

Voor de verdere uitleg en empirische doeleinden wordt de relatie waterdamp en lucht in onderstaande formule weergegeven (Madison Wood Research Laboratory – USA).

$$W_v = \frac{e h s}{346,5 + 0,754 t}$$

Hierin is:

W_v = gewicht aan waterdamp in een mengsel lucht en waterdamp van 1 m³

e = dampspanning in mm kwik bij temperatuur “t”

h = relatieve luchtvochtigheid

s = soortelijk gewicht van water

t = “drogebol”-temperatuur in °C

voor droge lucht is $W_v = 0$

voor droge lucht is $h = 0$

voor verzadigde lucht is $h = 1$

Deze gecompliceerd lijkende formule geeft aan dat het gewicht aan water per m³ in een mengsel lucht en waterdamp een functie is van de relatieve luchtvochtigheid (Rv of h). Uit deze formule volgt ook dat droge lucht in feite zoveel vocht kan bevatten totdat deze (totaal) verzadigd is geraakt (100%). Een mengsel van waterdamp en lucht is geen chemische, maar een mechanische binding bepaald door temperatuur en druk.

Het dampdrukverschil tussen het natte houtoppervlak en de dampspanning van de omringende lucht noemt men “drijvende kracht”.

Als de omringende lucht volledig is verzadigd ($R_v = 100\%$), vindt geen verdamping van vocht uit hout plaats. Bij gedeeltelijke verzadiging van de omgevingslucht, zal wel verdamping plaatsvinden.

Hoe groter het dampdrukverschil, des te groter de verdamping van het natte houtoppervlak. Hoe lager de Rv en hoe natter het houtoppervlak, des te groter zal het dampdrukverschil zijn (drijvende kracht) en het hout sneller opdrogen.

In de praktijk van het drogen, wordt het dampdrukverschil vergroot door:

- verhoging van de temperatuur (t) in de droger en
- verlaging van de relatieve luchtvochtigheid (h).

De luchtsnelheid werd voor bovenstaande uitleg van de Rv als constant aangenomen.

Hoe wordt nu de temperatuur en de Rv in de droogkamer gemeten en geregeld? De omgevingstemperatuur in conventionele droogkamers wordt met behulp van de drogebolthermometer gemeten. Dit is een gewone (kwik)thermometer of elektronische meter met digitale "vertaling".

De nattebolthermometer meet echter de omgevingswarmte minus de plaatsgevonden verdampingswarmte (de verloren warmte als gevolg van vochtverdamping) van de langsstromende lucht.

De nattebolthermometer is een speciaal soort ontworpen temperatuurmeter. De thermometer is omgeven door een speciale soort stuk katoen (kousje) die vocht absorberend is. De thermometer is ondergebracht boven een bak water van constant niveau waarbij het "kousje" het water net niet raakt. Door middel van capillaire werking en de heersende Rv zal een kleine hoeveelheid water door het "kousje" van de natte bol worden opgezogen. Voor de verdamping van deze dunne waterlaag is warmte nodig: de verdampingswarmte.

De opstelling dient zodanig te zijn dat warmtestraling of geleiding naar de nattebol wordt voorkomen, zodat de verdampingswarmte uitsluitend door de langsstromende lucht wordt geleverd. De nattebol zal als gevolg van verdamping van een deel van het opgezogen water afkoelen en zo een andere temperatuur dan de drogebol aangeven (natteboltemperatuur).

De dunne waterlaag op het kousje koelt af tot een temperatuur die bij de heersende drogebol temperatuur overeenkomt met de verzadigingsdruk van de in de lucht aanwezige waterdamp (de partiële waterdampdruk).

De natteboltemperatuur is op grond van de relatie "verzadigingsdruk" en partiële "waterdampdruk" een direct afhankelijke van de drogebol temperatuur en de Rv. De Rv kan ook direct uit de voorgaande relatie droge- en natteboltemperatuurverschil worden afgeleid (*psychrometrische meting*).

Registratie van de drogebol en nattebol temperatuurverschillen en de daarbij behorende Rv's vinden bij moderne drogers op een psychrometrische grafiek (Mollierdiagram) plaats (Fig. 2).

In een psychrometrische grafiek is de drogeboltemperatuur op de X-as en het verschil tussen droge- en natteboltemperatuur, het psychrometrisch verschil, op de Y-as aangegeven. Lijnen van constante Rv's zijn in de grafiek opgenomen (methode Sprung). De grafieken zijn meestal berekend voor luchtsnelheden van 2 m/s of 1 m/s.

Voor de samenstelling en het uittesten van droogschema's zullen de factoren, temperatuur, Rv en Ev (evenwichtsvochtgehalte) als leidraad moeten dienen in plaats van droge- en nattebol waarnemingen. De reden hiervoor is dat er tussen de Rv en het Ev bij het opzetten van een droogschema een veel betere relatie bestaat.

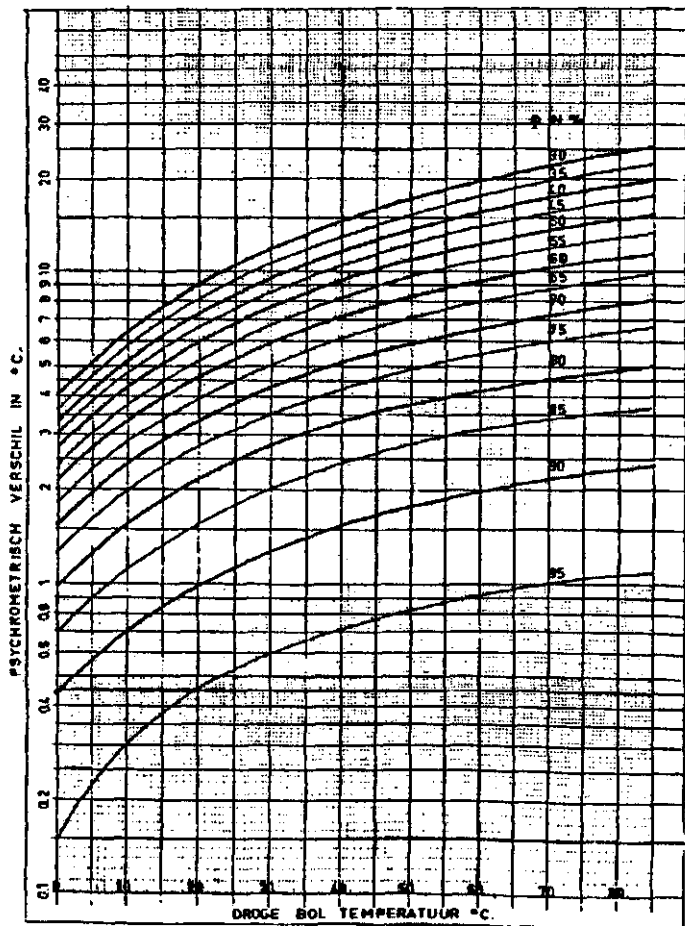


Fig. 2. Psychrometrische grafiek voor het bepalen van de relatieve vochtigheid met behulp van een psychrometer volgens Assmann. Geldig voor luchtsnelheden van tenminste 2 m/s langs de thermometers.

2.5 Luchtsnelheid en luchtcirculatie

In een houtdroger is de luchtsnelheid van de aangevoerde lucht maatgevend voor een goed droogproces, te weten:

- om voldoende warmte aan te voeren naar en tussen de houtstapels;
- aanvoer van voldoende lucht om de noodzakelijke verdamping te bewerkstelligen.

In de praktijk is gebleken dat een minimum hoeveelheid aangevoerde lucht (< 30 m/min of $0,5$ m/s) niet voldoende is voor een versneld droogproces. De lucht die over een nat stapel hout wordt geleid, zal normaliter gedeeltelijk in temperatuur dalen (afkoelen).

Als een stapel hout in een droger een pakketbreedte heeft van bijvoorbeeld $3,0$ m, de inlaat luchtsnelheid 30 m/min, de inlaat luchttemperatuur 82 °C en de uitlaat luchttemperatuur 76 °C, dan zal de mate van afkoeling over de stapel 2 °C/m bedragen $((82-76)/3)$.

Het effect hiervan op de Rv moet ook in beschouwing worden genomen. Met een te lage inlaat luchtsnelheid zal de lucht over de houtstapel snel met vocht verzadigd raken en het droogproces daardoor vertragen. Een grote temperatuurdaling over de houtstapels is derhalve ongewenst.

In de praktijk gelden de volgende aangepaste luchtsnelheden in relatie tot de pakketbreedte:

Pakketbreedte	Minimale luchtsnelheid
1,80 – 2,10 m	60 – 75 m/min
2,40 – 2,70 m	120 m/min
2,70 – 3,00 m	180 – 275 m/min

Intermezzo:

Voor de demonstratie van de luchtcirculatie-efficiency in een droger werd onderstaand voorbeeld uitgewerkt:

- vereiste luchtsnelheid: 120 m/min
- pakketbreedte: 2,70 m (9')
- aantal ventilatoren: 4 stuks

- dikte te drogen planken: 1 3/4"
- dikte stapellatten: 3/4"
- stapelhoogte (pakketten): 4,12 m

De stapel bevat 65 lagen hout en 64 uitsparingen voor lucht-circulatie. Het beschikbare luchtcirculatie-oppervlak per strekkende "ft" hout is:

$$\frac{64 \times 3/4''}{12''} = 4 \text{ ft}^2$$

Als de ventilatoren (blowers) een totale opbrengst van 30.000 CFM (850 m³/min) hebben en op 3,0 m (10') afstand van elkaar zijn geschakeld, zal elke ventilator een hoeveelheid lucht voldoende voor elke 10' lengte hout of voor elke tussenlaag van 40 ft² (10 x 4 ft²) moeten produceren.

Bij een globale ventilator-efficiency van 50%, zal de netto luchtsnelheid voor elk houtpakket zijn:

$$\frac{30.000 \times 0,5}{40} = 375' \text{ per min. (ca. 114 m per min.)}$$

In de praktijk blijkt deze eenvoudige calculatie te voldoen voor luchtsnelheden van 100-120 m per minuut. Afwijkingen echter van 10% of meer zijn mogelijk vanaf de onderste tot de bovenste pakketlaag of vanaf het ene einde tot het andere einde van een stapel.

De lucht die door de houtstapels instroomt, zal in zekere mate afkoelen en daardoor de Rv aan de luchtuitlaatzijde toenemen.

Hoe hoger de luchtcirculatie, des te minder het effect van afkoeling zal zijn. Dit probleem is in moderne drogers opgelost door de draairichting van de ventilatoren periodiek te keren. Voor hardhout wordt een 12-uurs wisseling van de draairichting aanbevolen. De periodieke wisseling van draairichting bevordert tevens een gelijkmatige warmte- en vochtverdeling in de droogkamer.

2.6 Ordening van houtpakketten

- Stapelen en vullen van de droogkamer met hout.

De houtstapeling in een "kiln" dient volgens vastgestelde normen plaats te vinden teneinde een gelijkmatige verdeling van de luchtcirculatie te bevorderen. Vooraf dienen houtpakketten van een bepaalde hoogte, lengte en breedte te worden samengesteld. Deze pakketten worden dan vervolgens aan de hand van bepaalde regels in de "kiln" gestapeld. Indien de stapeling volgens het boekje heeft plaats gehad, zullen ongewenste droogeffecten (o.a. korstverharding) worden vermeden.

Voor de stapeling in de droogkamer zijn twee (2) methoden gangbaar:

- complete pakketten: kleine naast elkaar geplaatste pakketten;
- compositie pakketten: naast en op elkaar in twee rijen gestapelde pakketten (Fig. 3).

- Afmeting van de pakketten c.q. stapelhoogte.

Uit praktische overwegingen zijn de afmetingen van houtpakketten gelimiteerd. Voor wat betreft de hoogte van de stapel, wordt op grond van veiligheid niet meer dan twee (2) pakketten op elkaar aanbevolen (4,8 m hoogte max.).

Hardhout:

Bij relatief lage luchtsnelheden (60-90 m/min. normaal voor hardhout) enkel gestapeld en met omkeerbare luchtcirculatie, wordt de volgende pakketafmeting aanbevolen:

- breedte 2,10 m
- hoogte 2,40 m (max.).

Voor medium luchtsnelheden (90-120 m/min.), enkel of dubbel gestapeld en omkeerbare luchtcirculatie, wordt een pakketafmeting aanbevolen van:

- breedte 2,40 m
- hoogte 3,60 m (max.).

Zachthout:

In grote Noordamerikaanse drogerijen wordt de volgende afmetingen voor pakketten toegepast:

- breedte 2,70 m
- hoogte 4,00 m (gemiddeld).

In sommige gevallen worden pakketten van 1,50 m (h) x 1,50 m (b) twee naast elkaar en drie op elkaar gestapeld.

Er bestaat in wezen een wederkerige relatie tussen de lichtsnelheid en de wijze van houtstapelning in de droogkamer. Hoewel de meeste "kilns" zijn ontworpen om een efficiënte luchtstroming te bevorderen, zal een slechte stapeling deze efficiency teniet doen.

Een gelijkmatige luchtcirculatie wordt ook verhinderd bij grote openingen in of tussen de stapels. Lucht volgt de weg van de minste weerstand en zal gemakkelijker door de grote gaten stromen dan tussen de smalle openingen van boven elkaar gelegen houtlagen (Fig. 3A).

➤ Stapellatten of tussenlatjes.

Deze latjes scheiden de afzonderlijke houtlagen van elkaar bij de formatie van een pakket en zijn van grote invloed op het droogproces. Door de toepassing van deze latjes tussen de lagen is de inwerking (stroming) van lucht en warmte mogelijk en vervolgens verdamping van vocht uit het hout.

De dikte van de latjes varieert van ½" – 1" en de breedte van 1½" – 3½". In het verleden zijn hiervoor verschillende materiaalsoorten (kunststof en aluminium) beproefd, doch wereldwijd wordt in hoofdzaak gezaagde houten latjes toegepast.

Voor een 2,40 m breed pakket worden minimaal 4 tussenlatjes op 60 cm afstand vanaf het midden van het pakket en dwars op de lengterichting van het pakket geplaatst. De latten dienen niet alleen dwars op de lengterichting te staan, doch in het pakket ook verticaal boven elkaar te liggen (Fig. 3).

Scheluwgetrokken of gebogen hout na het drogen, is vaak een gevolg van het onjuist of slordig plaatsen van de stapellatten. Nat hout moet worden beschouwd als een plastisch, vervormbaar materiaal dat onder schuinwerkende krachten bij temperatuurverhoging kan verbuigen.

Bij hardhoutstapelning moet de laatste pakketlat enigzins voorbij het kopse eind van de laag uitsteken (indien nodig brede latten gebruiken). Het juist plaatsen van de stapellatten is van groot belang

op het droogproces. Voor lokale drogerijen (Suriname) worden de volgende standaardmaten voor tussenlatjes aanbevolen:

- breedte 1½"
- dikte ¾"

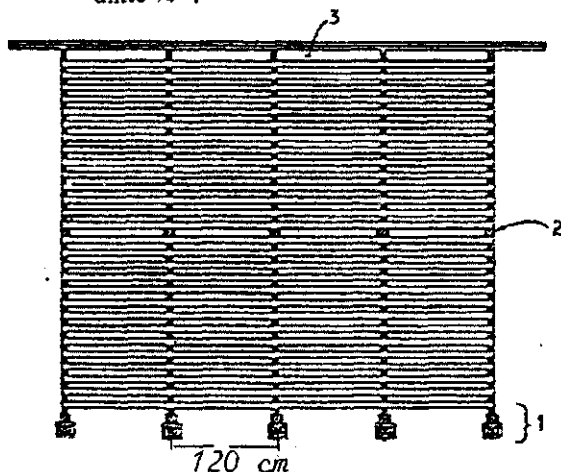


Fig. 3. Methode van dubbele stapeling in een houtdroger.

1. vrije ruimte van 25cm boven de drogervloer.
2. stapelbalken van 4"x4" direct onder stapellatten.
3. ruimte van 6" tussen drogerdak en houtstapel.

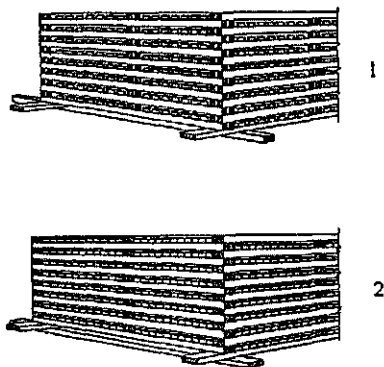
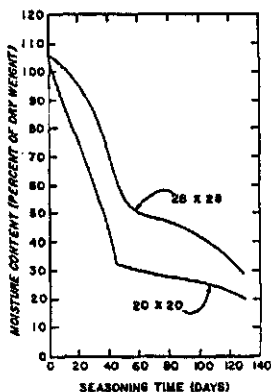


Fig. 3A. Effect van houtstapeling op het droogproces.

1. correcte stapeling.
2. slechte stapeling (onvoldoende ruimte voor verticale ventilatie).

3. Theoretische achtergrond kunstmatig drogen

Bij het houtdroogproces is er een “drijvende kracht” aanwezig die de verdamping van water uit het hout bewerkstelligt. Hiervoor treden drie mechanismen in werking:

- capillaire vochtstroming
- diffusie van “gebonden water”
- dampdiffusie
- droogfase 1.
- droogfase 2.
- droogfase 3.

Als we te maken hebben met een houtsoort die een hoog vochtgehalte heeft, zal fase 1 bestaan uit het reguleren van de vochtverdamping daaruit. De watertoevoer naar het houtoppervlak zal betrekkelijk snel plaatsvinden en het vochtgehalte daar toenemen. De mate van verdamping wordt in een dergelijke situatie bepaald door de D_b (drogebol) – en N_b (nattebol)-temperaturen, de luchtsnelheid en het dampdrukverschil in de droger.

In de 2^e fase zal het vochtgehalte (V) aan het houtoppervlak beneden het vezelvezadigingspunt (VVP) dalen, terwijl in de kern het VVP nog hoog is. Het drogen in de kern vindt dan plaats via capillair transport en in de oppervlaktezones door dampdiffusie. Naarmate het vezelvezadigingspunt in het hout zich naar de kern toe verplaatst, des te meer de droogweerstand zal toenemen. De mate van verdamping wordt dan bepaald door de mate van vochtdiffusie vanaf het VVP naar het houtoppervlak.

In fase 3 die vrijwel gelijk is aan de tweede, vindt de droging uitsluitend plaats via dampdiffusie. In deze fase zal niet alleen het oppervlak maar ook de kern voldoende beneden het VVP dalen. Als het vochtgehalteverschil (ΔV) tussen kern en oppervlak kleiner wordt, zal de droogweerstand toenemen en de droogsnelheid verminderen.

Het dampdrukverschil in de droger in relatie tot het droogproces wordt uitgedrukt in mbar (millimeter kwikdruk of millibar). De droogweerstand is door de onderzoekers Bramhill & Wellwood in een model uitgewerkt:

$$R = \frac{(P_d - P_w) \Delta t}{\Delta V}, \text{ waarin}$$

R = droogweerstand in mbar/h (mbh)
(1000 mbar = 100 kPa)

P_d = dampdruk van water bij D_b -temperatuur in mbar

P_w = dampdruk van water bij N_b -temperatuur in mbar

Δt = verlopen tijd in uren

ΔV = vochtgehalteverschil

Voor de begrippen D_b (drogebol) en N_b (nattebol) wordt naar paragraaf 2.4 verwezen.

De volgende conclusies kunnen uit bovenstaande relatie worden getrokken. De mate van droging beneden het kookpunt van water, de tweede fase van het drogen en zelfs de derde fase blijken evenredig te zijn met het verschil in dampdrukken van de “droge-” en “nattebol” in de kiln.

Zowel de diffusie-coëfficiënt als de daarbij behorende factor “droogweerstand” (R) zijn functies van het vochtgehalte en kunnen praktisch worden herleid tot het gemiddelde vochtgehalte van een “kilnlading” hout. Deze verhouding varieert met de houtsoort en houtdikte en zal daarom voor elke houtsoort opnieuw moeten worden herleid.

Bij het opstellen van een droogschema (“kiln schedule”) voor een bepaalde houtsoort zal deze mathematische weergave van de droogweerstand niet voldoende zijn, doch slechts als uitgangspunt kunnen dienen waarbij ook het begin- en eindvochtgehalte van de houtsoort bekend moeten zijn.

Dit model is desondanks goed bruikbaar voor het experimenteren “trial and error” met “kiln schedules”, waarbij droogervaring van de “kiln-operator” een niet te onderschatten rol zal spelen.

4. Het droogproces en de empirische benadering

4.1 Temperatuur (θ)

Met betrekking tot de temperatuurinvloed op de droogtijd wordt soms de volgende lineaire verhouding aangehouden:

$$\text{a) } \frac{t_2}{t_1} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

Hierin is: t_1 en t_2 - tijdsduur temperatuurinvloed
 θ_1 en θ_2 - temperatuurwaarden in °C.

De gegeven lineaire betrekking geldt in het algemeen voor houtdrogers waarin de luchtsnelheden groter zijn dan 60m per minuut. Volgens sommige onderzoekers is de relatie t en θ ingewikkelder, omdat in tijd de functie een exponentionele is, namelijk:

$$\text{b) } \frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^n$$

waarbij waarden voor n tussen 1,5 en 2,5 zullen liggen.

Rijsdijk (TNO) heeft op grond van eigen berekeningen een grotere spreiding voor n geconstateerd, doch geeft een gemiddelde aan van 1,7 – 1,8 (Fig. 4). In feite betekent dit laatste dat de invloed van een hogere temperatuur op de droogsnelheid groter is dan de vermelde lineaire relatie (a) doet vermoeden.

4.2 Relatieve luchtvochtigheid (R_v)

In de praktijk van het houtdrogen zal men bij een partij hout met een hoog vochtgehalte in de beginfase, na het opwarmen een hoge R_v aanhouden. Naarmate het vochtgehalte daalt, wordt stapsgewijs de R_v verlaagd tot uiteindelijk het gewenste eindvochtgehalte is bereikt. De praktijk leert daarbij welke R_v -waarden men het beste kan kiezen en bij welke vochtgehalten of na hoeveel drooguren de R_v kan worden verlaagd.

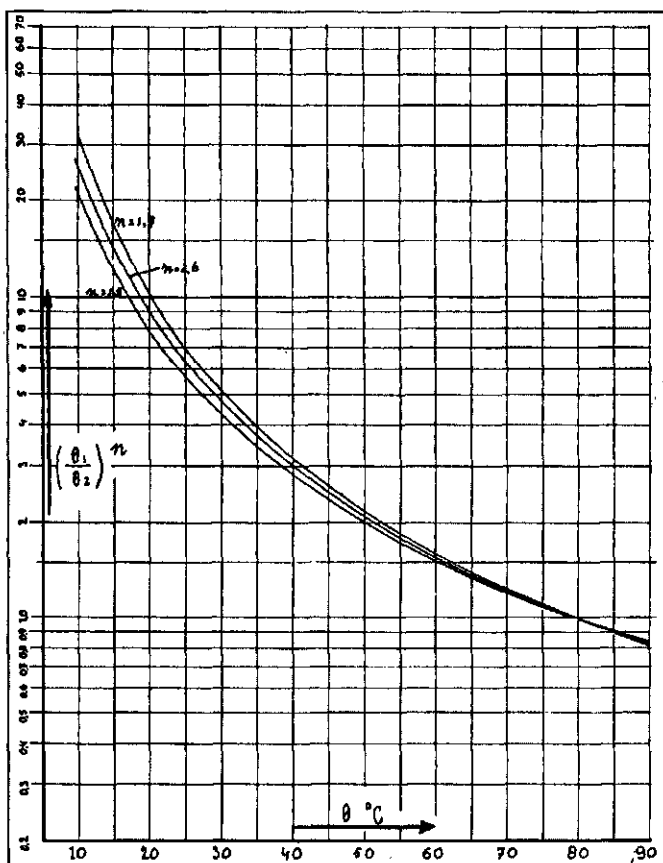


Fig. 4. Verlengingsfactor van de droogtijd bij lagere temperaturen, uitgaande van $\theta_1 = 80^{\circ}\text{C}$ volgens de formule:
 $t_2 = t_1 \left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)^n$, waarin $n = 1,5 ; 1,6 ; 1,7$.

Op deze experimentele wijze kan men zijn eigen droogschema('s) voor diverse houtsoorten opbouwen. De relatie tussen R_v en droogsnelheid tot het eindvochtgehalte bestaat in wezen uit een aantal fasen. Voor een gemakkelijk te drogen houtsoort en een hoog beginvochtgehalte kunnen wij drie fasen onderscheiden.

In de eerste fase is de waterverdamping te vergelijken met de verdamping aan een vrij wateroppervlak. Voor deze in het algemeen

zeer kortdurende fase, geldt een eenvoudige lineaire betrekking waarin de luchtsnelheid een belangrijke rol speelt.

Hoe lager de Rv in deze fase is en hoe hoger de luchtsnelheid, des te sneller het hout droogt. Als algemene formule voor deze geldt:

$\delta_1 = c (\theta_d - \theta_n) f(v) \text{ g/m}^2 \text{ s}$, waarin:

δ_1 = droogsnelheid
 c = constante van de houtsoort
 θ_d en θ_n = droge- en nattebol temperatuur
 v = luchtsnelheid
 f = diffusie-coëfficiënt.

Is in deze fase δ_1 constant, dan heeft een continue vochtstroming uit het hout naar het oppervlak plaats. Hoe langer deze vochtstroom in stand kan worden gehouden, hoe sneller het materiaal in deze periode droogt.

Aangezien voor iedere droger de luchtsnelheid een vast gegeven is, kan men de droogsnelheid δ_1 slechts veranderen door $(\theta_d - \theta_n)$ te veranderen, dus de Rv bij een gekozen θ_d te verlagen of te verhogen.

In de eerste droogfase en in het begin van de 2^e fase heeft vochttransport bij gemakkelijk te drogen soorten vooral plaats door capillaire werking. Daarna begint het vochttransport naar het oppervlak door diffusie van waterdamp steeds belangrijker te worden. Deze verschuivingen in transportvorm maken de tweede fase tot een fysisch moeilijk proces. In dit stadium beginnen in de buitenste lagen van het hout bovendien de bindingskrachten van het vocht in de vezel- of celwanden op te treden, die dan toenemen naarmate het vochtgehalte in deze vezelwanden verder beneden 20% daalt.

In de bovenomschreven formule van droogsnelheid heeft in de 2^e fase de luchtsnelheid (v) geen invloed meer en de lineaire relatie doet dan daarbij geen opgeld. Voor sneldrogende houtsoorten van geringe dikte-afmetingen heeft de luchtsnelheid nog invloed tot even boven het VVP (40% - 30% vochtgehalte).

De derde droogfase begint even beneden het vezelvezadigingspunt in het algemeen tussen ca. 25 - 20% vochtgehalte. Bij dun hout kan dit wat lager liggen dan bij dik hout.

Voor deze fase kan de volgende lineaire relatie gelden:

$$\delta_3 = k_3 (\chi - \chi_\varphi) \text{ g/m}^2 \text{ s, waarin:}$$

$\delta_3 =$ droogsnelheid

$\chi =$ heersende houtvochtgehalte

$\chi_\varphi =$ evenwichtsvochtgehalte (Ev) bij gestelde droogklimaat.

In deze langzaam verlopende droogfase neemt de constante k_3 toe met een afnemende R_v tot een maximum is bereikt. Daarna neemt k_3 weer af. Door het verlagen van de R_v wordt χ_φ wat lager en de factor $(\chi - \chi_\varphi)$ iets groter. Het drogen in deze fase vindt heel langzaam plaats, waarbij het asymptotisch benaderen van χ_φ de meeste tijd vergt en daarom moet worden vermeden.

4.3 Luchtsnelheid (v)

In par. 2.1 werd reeds het een en ander gezegd over de invloed van de luchtsnelheid op het droogproces. De invloed van de luchtsnelheid is het grootst bij hoge beginvochtgehalten en bij sneldrogende houtsoorten. Deze is ook belangrijk naarmate het te drogen materiaal dunner is. Om deze reden wordt in fineerdrogers met hoge snelheden gewerkt (via openingen van zgn Düsenkasten) en vlak over het fijner met snelheden van 20 m/s en meer. Bij vochtgehalten in de buurt van het vezelvezadigingspunt wordt de invloed van de luchtsnelheid zelfs zeer gering bij langzaam drogende tropische houtsoorten (Fig. 5 en 5a).

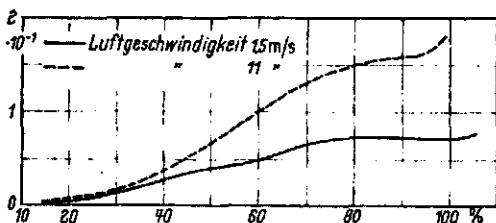
In de eindfase van het droogproces is de droogsnelheid afhankelijk van de dampdiffusieweerstand in het hout. De dampdiffusieweerstand is in hoofdzaak een afhankelijke van de temperatuur en in mindere mate van de R_v . Zoals in par. 2.1 werd gesteld, is de luchtsnelheid in economische zin gelimiteerd. Boven 180-240 m/min gaan de ventilator (energie)kosten sterk omhoog. Kollman & Schneider hebben voor de relatie luchtsnelheid versus motorvermogen onderstaande relatie uitgewerkt:

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{2.4}, \text{ hierin is:}$$

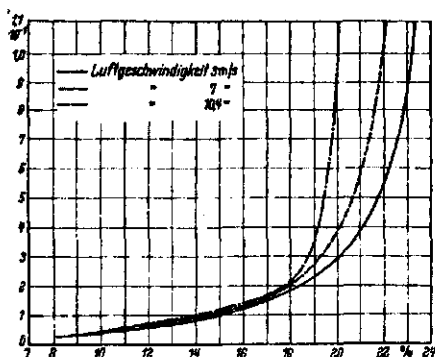
- A = motorvermogen in kW
V = luchtsnelheid in m/s.

Dit betekent dat bij vergroting van de luchtsnelheid boven het optimum, het motorvermogen of de ventilatorverbruikskosten exponentieel zal toenemen.

Boven de 180 m per minuut zullen de ventilatorkosten 4 tot 5 maal oplopen. Bij vochtgehalten van ca. 40% en lager heeft de luchtsnelheid vrijwel geen invloed meer op de droogsnelheid en wordt in het algemeen onafhankelijk van de grootte van de droger een maximale luchtsnelheid van 180 m per minuut aangehouden.



- a. Invloed van de luchtsnelheid op de droogsnelheid van met water verzadigd Beuken, waarvan de kopse einden dampdicht waren afgesloten. Bij een vochtgehalte van 40 à 30% is de invloed van de luchtsnelheid vrijwel verdwenen. $\theta_d = 65^\circ\text{C}$; $R_v = 70\%$.



- b. Invloed van de luchtsnelheid op de droogsnelheid van Beuken met een begin vochtgehalte van 23%. Tijdens het verdampen van het vocht aan het houtoppervlak is nog een invloed merkbaar, daarna bij 18% niet meer. $\theta_d = 65^\circ\text{C}$; $R_v = 70\%$.

Fig. 5. De invloed van de luchtsnelheid op de droogsnelheid van Beuken proefstukken van 45x10x2cm; a voor nat hout, b voor luchtdroog hout. Uit: Kollman, F.U. Schneider, A., 1960: Der Einfluss der Belüftungsgeschwindigkeit auf die Trocknung von Schnittholz mit Heissluft-Dampf-Gemischen. Holz als roh- und Werkstoff 18 (3), 81/94.

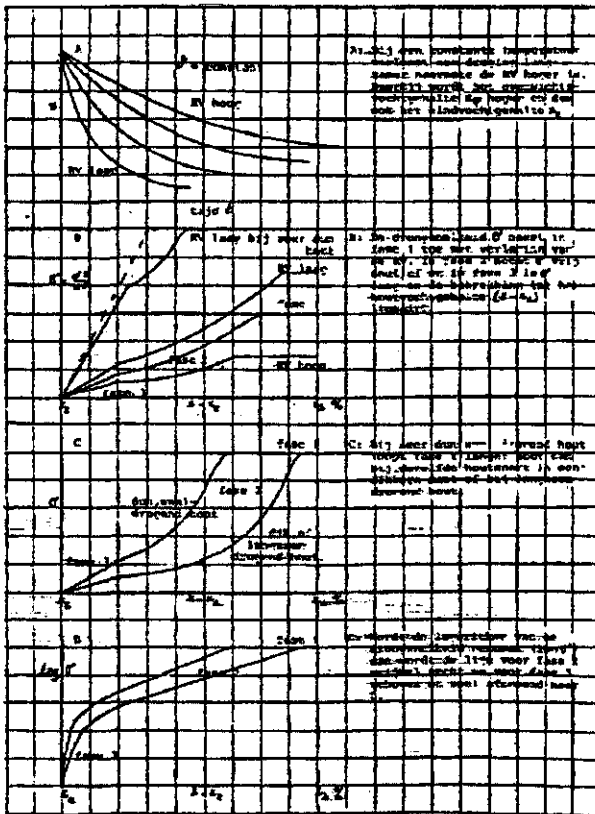


Fig. 5A. Schematisch verloop van een droging.

4.4 Houtsoort

De houtsoort met zijn aan de soort eigen fysische en chemische eigenschappen is cruciaal bij het kunstmatig drogen.

Er zijn "snel en gemakkelijk" drogende houtsoorten, doch ook "matig langzaam", "zeer langzaam" en "moeilijk" te drogen soorten. Snel en langzaam in dit kader hebben betrekking op een lagere of hogere vochtdiffusieweerstand bij het transport van vocht door het hout.

De begrippen “gemakkelijk” en “moeilijk” duiden op geringe of grote kans op beschadiging of vervorming van het hout tijdens het drogen (krimp, collaps, etc.).

De diffusieweerstand neemt in het algemeen toe met de toename in volumieke massa c.q. dichtheid. Hoe zwaarder de soort, hoe langzamer hij zal drogen. Binnen één houtsoort kan alsgevolg van groeiringsbreedte, de volumieke massa en daardoor de diffusieweerstand sterk verschillen. Hoe smaller de groeiringen zijn, des te groter het procentueel aandeel van het ringporige vroegehout op de totale massa en hoe lichter ook het hout.

Eikensoorten met bijvoorbeeld brede groeiringen zijn taaier, zwaarder en drogen langzamer dan eiken met zeer smalle groeiringen (Houtsoorten: Info voor de praktijk – Houtinstituut TNO 1977, Delft).

De relatie volumieke massa tot diffusieweerstand geldt niet voor alle soorten. Andere factoren die de droging van een soort kunnen beïnvloeden zijn bijvoorbeeld wasachtige, slijmachtige stoffen en harsen in het hout. Redwood (*Sequoia sempervirens*) een lichte houtsoort ($\rho = 0,35 - 0,45$) droogt heel moeilijk vanwege grote hoeveelheden hars- en wasachtige stoffen in het hout. De aanwezigheid van grote hoeveelheden wasachtige en slijmachtige stoffen in Wana (*Ocotea rubra*) is er de oorzaak van dat deze middelzware houtsoort ($\rho = 0,55 - 0,75$) slechts in dikten van 2,5cm te drogen is. In grotere dikten is de kern van deze houtsoort heel moeilijk en vrijwel niet te drogen.

Afzettingen van kalkdeeltjes in houtsoorten zoals Iroko (*Chlorophora excelsa*) en Abachi (*Triplocton scleroxylon*) werken remmend op de vochtdiffusie en bemoeilijken daardoor het droogproces. Zware houtsoorten zoals Afromosia (*Pericopsis elata*) en Basralokus (*Dicorynia paraensis*) daarentegen zijn naar verhouding snel te drogen (anatomisch monotoon).

De diffusieweerstand van een houtsoort en daarmee gerelateerde droogsnelheid moeten altijd aan de hand van de anatomische structuur van de betreffende soort worden beschouwd. Voorts de aanwezigheid van thyllen, tylose en gomachtige stoffen in de vaten en ook de structuur van het straalweefsel.

4.5 Houtafmetingen

De invloed van de houtdikte op de droogtijd wordt door de volgende lineaire vergelijking weergegeven:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^n$$

t = droogtijd

d = houtdikte

Deze lineaire vergelijking is echter ook globaal omdat verschillende onderzoekers voor $n = 1,2$, een andere waarde hebben bepaald. Bij niet te grote verschillen in dikte zal met $n = 1,5 - 1,7$ een redelijke benadering van de droogtijd mogelijk zijn. In de volgende tabel zijn voor diverse waarden van n de droogtijdtoename volgens de gegeven formule berekend:

d in mm	n-waarden			
	1,25	1,50	1,70	2,00
25	1,00	1,70	2,00	1,00
50	2,40	2,80	3,20	4,00
75	4,00	5,20	6,50	9,00
100	5,70	8,00	10,60	16,00

Deze waarden kunnen ook uit de bijgaande grafiek (Fig. 6) worden afgeleid.

Behalve sneldrogende houtsoorten zoals *Populieren*, *Abachi*, *Berken* en *Beuken* bij welke een wat lagere waarde voor n een betere uitkomst kan geven, bestaan er matig snel, langzaam drogende houtsoorten (*Teak*, *Afzelia*, *Merbau*, etc.). Voor deze laatste groep zal de waarde van n aan de hoge kant of dichterbij de waarde 2 liggen.

Over de invloed van de houtbreedte op de droogtijd wordt in de literatuur weinig vermeld. Onderzoek binnen TNO (Rijsdijk/Dijkstra) naar de voornoemde invloed, heeft uitgewezen dat de droogtijd evenredig toeneemt met de houtbreedte en wel tot een bepaalde maximum breedte (Fig. 7).

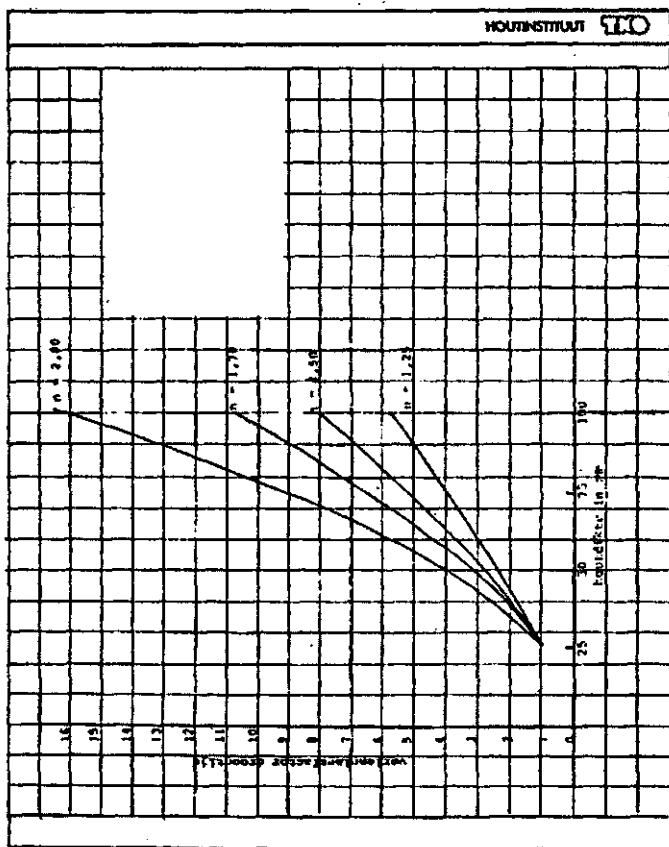


Fig. 6. Verlengingsfactoren bij toepassen van de formule $(t_2 / t_1) = (d_2 / d_1)^n$, voor verschillende waarden voor n en houtdikten van 25, 50, 75 en 100mm.

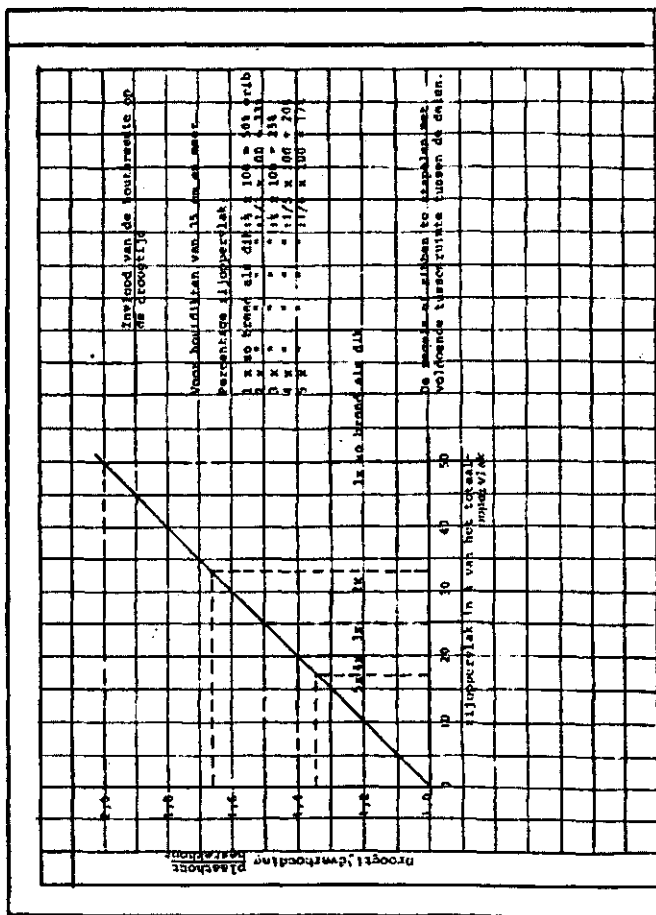


Fig. 7. Invloed van de houtbreedte op de droogtijd.

Tabel 2. Aanbevolen of vereiste eindvochtgehaltes voor houtdikten tot 52mm.

Soort toepassing	Gemiddelde eindvochtgehaltes in %
Parket	8
Binnendeur kozijnen	8
Meubelhout	10
Binnenschroten Plint- en omtimmering Traphout	13
Hout voor buitendeuren (loof- en naaldhout)	13
Hout voor ramen en glas Latten	14
Schroten voor buitenwerk	16
Hout voor draaiwerk	17

Tabel 3. Aanbevolen of vereiste maximum eindvochtgehalte voor hout in bewerking met een dikte van > 52mm.

Houtsoort/-toepassing	Maximum eindvochtgehalte in %	
	rand	kern
Montage-kozijnen voor binnen (incl. binnendeurkozijnen)	12	16
Hout voor geveltimmerwerk	14	16
Donkerrode Meranti, Sipo, Abarco, Makoré, Hemlock, Oregon pine, Vuren/Grenen voor montagekozijnen	14	18
Hout voor kozijnen in ruwbouw, afhankelijk van afwerking en krimp (o.a. Wana)	17 (of 14)	21 (of 18)
Iroko, Teak, Alerce, Redwood afzelia, Merbau, Basralocus, Wana, Rode lokus voor montagekozijnen	17	21
Met buitenbeits af te werken kozijnhout (naald- en loofhout)	14	18

Intermezzo:

Eindvochtgehalte.

Het eindvochtgehalte van een te drogen houtsoort (gewenst of voorgeschreven) is afhankelijk van het gebruiksdoel en dient zodanig te worden gekozen dat het in evenwicht is met het gemiddelde vochtgehalte (V) onder de toe te passen omstandigheden. Bijgaande overzichten (Tabel 2 en 3) geven voor een aantal produkten en produktonderdelen de gewenste of vereiste (experimenteel vastgesteld) eindvochtgehalten weer.

5. Enkele typen conventionele houtdrogers ("kilns")

Uitgaande van de technische ontwikkelingen van kunstmatige houtdrogers vanaf de vorige eeuw kunnen deze worden onderscheiden in:

5.1 Type luchtinput en luchtcirculatie methoden.

- drogers met natuurlijke ventilatie
- drogers met geforceerde luchtcirculatie en droogtemperaturen tot 100 °C

5.2 Geklimatiseerde drogers met temperaturen tussen 35 °C en 50 °C.

5.3 Dehumidificatie drogers (ontvochtigers) met geforceerde luchtcirculatie bij temperaturen tot 75 °C.

5.4 Met aardgas opgewarmde drogers.

5.5 Via zonne-energie verwarmde drogers.

5.1 Luchtinput en luchtcirculatie methoden

-Drogers met natuurlijke ventilatie ("natural draft")

Deze type drogers zijn de eerst bekende en werden aan het begin van de vorige eeuw gebouwd. Het principe van deze drogers is gebaseerd op het feit dat hete lucht lichter is dan koude lucht. Hete lucht stijgt namelijk gemakkelijker op en brengt zichzelf in werveling. Aangezien de werveling of circulatie niet door schoepen of bladen van een ventilator wordt opgewekt, spreken wij van natuurlijke ventilatie of "natural draft".

Deze type drogers (Fig. 8) zijn zeer eenvoudig ingericht. Het nadeel echter van deze type drogers is de lage luchtsnelheid en het ontbreken van een uniforme luchtverdeling over en tussen de houtstapels.

In de praktijk zullen deze "drogers" het best functioneren in gevallen waar een hoge droogtemperatuur wordt toegepast, doch een

middelmatig vochtgehalte in het materiaal wordt vereist. De droger is zoals uit de figuur valt af te leiden aan de onderzijde voorzien van warmtewisselaars (onder de houtstapel) waardoor warme lucht via een centrale kanaal opstijgt en zo de houtstapel opwarmt. Door de onzekerheden van voldoende lucht- en warmtecirculatie werd naderhand door verschillende fabrikanten modificaties in het "trek-systeem" aangebracht (stoominjectie in het centrale kanaal en oscillerende enkelbladsventilatoren).

-Drogers met geforceerde luchtcirculatie (in lijn geschakelde ventilatoren)

In 1926 beschreef R. Thelen (Universiteit van Madison, USA) deze type droger als volgt.

Over de volle lengte van de droogkamer werden een aantal bladventilatoren gemonteerd. De ventilatoren werden in het midden van de droogkamer onder de houtstapels gemonteerd (Fig. 9). Elke ventilator was in een aparte kamer geïnstalleerd om lucht in de gewenste richting te blazen (zgn. plenum kamers met links- of rechtsdraaiende rotoren) en om hierdoor een geforceerde circulatie te creëren. De in het boek van Thelen beschreven type ventilator werd toen door de fabrikant "Moore Dry Kiln Co., USA" gebouwd.

Nog steeds wordt in de meeste conventionele drogers het systeem van oscillerende (links en rechts draaiende) ventilatoren toegepast. Later werd het systeem van de luchtcirculatie in de ventilator-kamers verbeterd door het aanbrengen van *smoorplaten*.

Het idee van de smoorplaten was om extra turbulentie in de droogkamer te bevorderen. Het systeem werd in de jaren 40 door "Moore Dry Kiln" verder verbeterd door de ventilatoren periodiek links of periodiek rechts te schakelen. Dit systeem vormt nog steeds het basisprincipe van de "Moore Kilns". In het begin werden de ventilatoren van 72" \varnothing op 2,40m afstand van elkaar op de aandrijfjas gemonteerd.

Sinds 1971 wordt in de "Moore Kilns" de ventilatoren op 3,0m van elkaar gemonteerd; dit om onderlinge weerstand en asvibratie te verminderen.

-Drogers met dwars geforceerde luchtcirculatie

Dwarse luchtcirculatie drogers betekent, dat de lucht daadwerkelijk dwars over de houtstapel moet kunnen circuleren. Bij deze drogers zijn de ventilatoren dwars op de lengte richting van de stapels gemonteerd (Fig. 10). In sommige drogers wordt slechts één ventilator gemonteerd. De opstelling moet echter zodanig zijn dat zowel de linker- als de rechterzijde van de houtstapels voldoende worden belucht.

Luchtopbrengst, installatiehoek en ventilatorafstanden bij dit type drogers zijn cruciaal voor de kwaliteit van het gedroogde materiaal. Bij dit type drogers wordt soms een voorverwarmer (pre-heater of boostercoil) tussen of aan de voorzijde van de houtstapel geïnstalleerd om de inkomende koude lucht op te warmen.

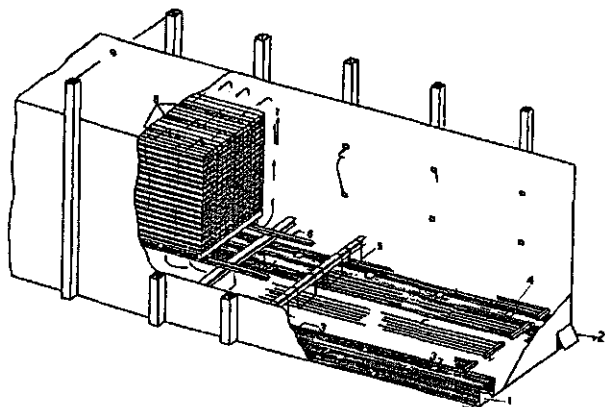


Fig. 8. Droger met verticale natuurlijke ventilatie

Energetisch: lagedruk stoom

1. aanvoerkanaal voor verse lucht
2. deur luchtaanvoerkanaal
3. verse luchtaanvoerkanaal
4. warmtewisselaars
5. condensator hangers
6. aanvoerrail van houtpakketten
7. richting luchtcirculatie
8. verticale opwarming van houtpakketten
9. afvoerkanalen vochtige lucht.

5.2 Geklimatiseerde drogers met temperaturen tussen 35 °C en 50 °C.

Als nat hout in een luchtige stapeling in een ruimte, op enige hoogte boven de vloer staat, ontstaat door vochtverdamping een afkoeling van de lucht in de houtstapel. Door deze afkoeling wordt de lucht in de stapel zwaarder dan de lucht in de omgeving waardoor deze uit de stapel zakt. Deze uit de stapel zakkende lucht trekt omgevingslucht achter zich aan de stapel in. Op deze wijze ontstaat een luchtstroom in verticale richting van boven naar beneden door de houtstapel, waarbij het hout vocht afgeeft aan de langsstromende lucht en derhalve droogt.

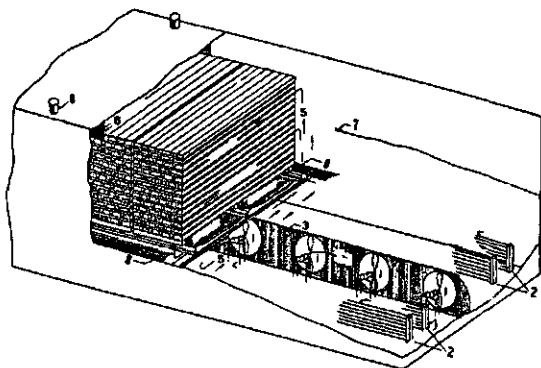


Fig. 9. Droger met geforceerde luchtcirculatie

Energetisch: lagedruk stoom

1. ventilatoren onder de houtstapels
2. warmtewisselaars
3. smoorplaten van ventilatoren
4. houtpakketten
5. luchtcirculatie
6. smoorplaat
7. drogebol thermometer
8. afvoerkanal vochtige lucht
9. looppad.

Bij de bestudering van het drogen van hout in de buitenlucht kwamen Prochaska en Rijdsijk (TNO-CHT) in 1959 op de gedachte om het bovenomschreven principe praktisch te benutten en hout op een eenvoudige en goedkope manier te drogen. Het eerste ontwerp voor dit systeem van drogen vond in TNO verband plaats. Het verwarmingssysteem van deze droger werd rondom de houtstapel

achter een convectorschot aangebracht, waardoor de warme lucht van boven naar beneden in de richting van de natuurlijke luchtstroom door de houtstapel kon instromen (Fig. 11). Onder het convectorschot werd voldoende ruimte gelaten, zodat de warmte de lucht weer kon aanzuigen en zo voor een luchtcirculatie zorgen. De afvoer van vochtige lucht vond plaats onder de houtstapel.

In feite was dit systeem tegengesteld aan oudere systemen waarbij juist onder de houtstapel verwarmingsbuizen werden ondergebracht, die een verticale luchtstroom van beneden naar boven forceerden (Natural draft). Deze drogers met natuurlijke opwaartse luchtstroming, zijn niet meer in gebruik.

Doordat het systeem van drogen in geklimatiseerde ruimten in de zestiger jaren bij de Nederlandse houtverwerkende industrie weerklink vond, werd deze verder door *Rijdsijk en Dijkstra* ontwikkeld tot de huidige vorm (Fig. 12). De droger bestaat uit een goed geïsoleerde en dampdichte ruimte met een vlak plafond. Langs de wanden zijn twee verwarmingsbuizen op 15cm boven de vloer gemonteerd, waarin heetwater stroomt. In een van de lange wanden is in de beide beneden hoeken een luchtinlaatopening aangebracht en in dezelfde wanden de afvoer voor vochtige lucht.

De droging van het hout verloopt vertikaal van boven naar beneden tengevolge van de in deze richting geleide luchtstroom. De snelheid van de luchtstroom is meestal 6,0-9,0 m/min, die in stand wordt gehouden door een laaggeplaatste verwarmingselement achter een luchtgeleidings- of convectorschot.

Vanwege de verticale luchtstroom is de breedte van het te drogen hout gelimiteerd tot 25cm. Bij bredere houtmaten wordt de weg, die het vocht uit het hout in horizontale richting via dampdiffusie tot de aangrenzende verticale luchtstroom moet afleggen, te lang. De droging zal hierdoor steeds trager verlopen en langer dan gewenst duren.

Bij een klimaatinstelling van 40 °C en 60% Rv zijn de elektroden voor de metingen in het midden van de droger (in het plafond) boven de houtstapel gemonteerd. Voor de waterverwarming werd aardgas gebruikt, waardoor per m³ aardgas ca. 7 liters water kon worden onttrokken. Het energieverbruik van de warmwater circulatiepomp bedroeg 0,005 kWh/m³ hout.

5.3 Drogers met ontvochtigers (dehumidificatoren)

Het systeem van ontvochtigers voor hout werd in 1965 door Ullevalseter van de LU-Vollebekk in Noorwegen ontwikkeld. De methode is bijzonder geschikt voor energie-schaarse gebieden en wordt daarom hier in extenso behandeld.

In principe is de ontvochtiger een normaal koelaggregaat dat bestaat uit een koelgedeelte waarin de rond te pompen koelvloeistof verdampt. Voorts een compressor en een condensor waarin de tot vloeistof gecomprimeerde damp zijn warmte afgeeft (Fig. 13).

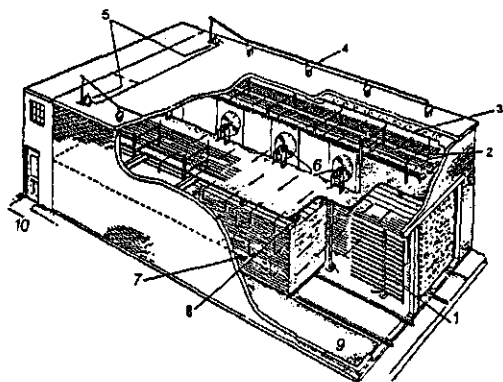


Fig. 10. Droger met dwarse luchtcirculatie

1. voorverwarmer ("booster")
2. warmtewisselaars
3. stoomsproei pijp
4. automatisch ventilatiesysteem
5. motoren voor automatische ventilatie en vochtregeling
6. omkeerbare ventilatoren, boven de houtstapels
7. controle sensoren
8. scharnierende smoorplaat
9. looppad in de droger
10. toegangsdeur.

Voor het verdampen van de koelvloeistof in het koelgedeelte of verdampers is verdampingswarmte nodig, die aan de omgeving wordt onttrokken. De buizen van de verdampers koelen hierdoor sterk af en

de damp vervolgens via de compressor weer tot vloeistof samengeperst. Dezelfde hoeveelheid warmte die voor de verdamping van de koelvloeistof nodig was, komt dan als condensatiewarmte weer vrij.

Een in de ontvochtiger gebouwde ventilator zorgt voor een luchtstroom langs de verdamer, die na het passeren van de condensor het apparaat weer verlaat. Deze luchtstroom voert tevens de warmte van de compressor af. Op deze wijze wordt alle elektrische energie die als warmte vrijkomt, in de luchtstroom meegenomen (par. 2.3 Principe warmtepomp).

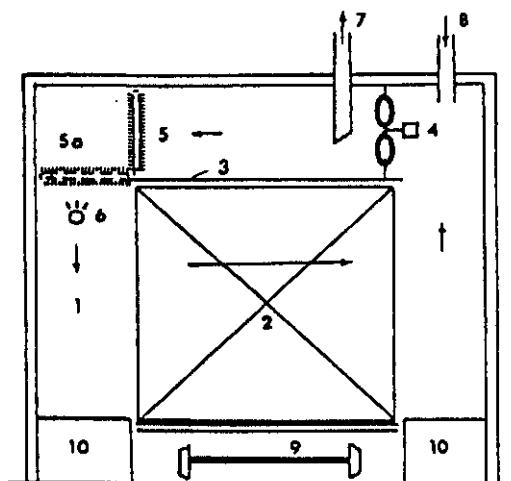


Fig. 11. Schema van een houtdroger met neerwaartse luchtcirculatie.

1. geïsoleerde kamer
2. houtstapel
3. tussenplafond
4. ventilatoren
- 5/5a. verwarmingsregisters
6. sproeibuis
- 7/8. afvoer vochtige lucht / aanvoer verse lucht
9. lorriewagen
10. vloerverhoging

Als vochtige warme lucht langs de verdamer wordt gezogen, zal de lucht op de koude buizen condenseren, m.a.w. ligt het dauwpunt van de langs de verdamer stromende lucht hoger dan de temperatuur

1. verdamper: geeft koelte af
2. wateropvangbak + afvoer
3. condensator: geeft warmte af
4. restrictie
5. compressor
6. ventilator

In het algemeen zal de Rv van een klimaat in een houtdrooginstallatie, werkend met ontvochtigers bij lagere temperaturen verlopen tusschen ca. 90% - 80% aan het begin en bij zeer nat en snel te drogen hout tot ca. 40% - 35% aan het einde van het droogproces.

Deze typen drogers (Fig. 14) zijn in de afgelopen 20 jaren in conceptie sterk verbeterd, waardoor een beter energierendement wordt gehaald. In aanschaf zijn deze drogers ca. 40% goedkoper dan de conventionele typen en zouden in de "dry ends" niveau's van de Surinaamse bosbouwgebieden goede diensten kunnen bewijzen*.

In een belangrijk gedeelte van het droogproces zal de Rv dalen tussen 70% en 45% wat neerkomt op een vochtonttrekking van 2 tot 3 liters water per uur per kW compressorvermogen.

Bij langzaam drogende houtsoorten zal de gemiddelde vochtproductie dichter bij 2 liters water per uur of zelfs daar beneden liggen en bij vlug drogende soorten dichter bij 3 liters per uur per kW. Houtontvochtigers worden geleverd in een reeks capaciteiten met compressorvermogens van ca. 1 kW tot meer dan 25 kW.

Voor ontvochtigers kan uit de gemiddelde vochtonttrekking per kW-compressorvermogen, de houtdichtheid en het aantal m³ hout dat per compressorvermogen wordt gedroogd, de theoretische droogsnelheid in % per uur worden berekend. Uit het verschil tussen begin- en eindvochtgehalte en de droogsnelheid kan een schatting worden gemaakt van de droogtijd. Hierbij moet nog rekening worden gehouden met de totale tijdsduur waarin de compressor door de hygrostaat is uitgeschakeld. Deze tijd moet bij de geschatte droogtijd worden bijgeteld en zal van geval tot geval uit ervaring moeten volgen.

Bij zeer langzaam drogende houtsoorten en/of grote diktematen (met name tropische soorten) zal de compressor bij het bereiken van wat lagere vochtgehalten in het hout veel vaker stilstaan dan bij snel

* Het CELOS bezit een eenvoudige dehumidificator voor experimentele doeleinden.

drogende houtsoorten in geringe diktematen. De omrekening van de gemiddelde vochtonttrekking tot de droogsnelheid in % per uur (Rijdsijk/Comvalius-TNO**) kan volgens bijgaande grafiek geschieden (Fig. 15).

Ter illustratie hiervan volgt onderstaand voorbeeld:

Houtsoort:	Beuken
Vochttraject:	40% naar 12%
Vochtonttrekking (pm):	2,8 ltrs water/uur/kW-compressorvermogen
Houtdichtheid:	580 kg/m ³
Volume hout/kW vermogen:	10 m ³

Uit de grafiek volgt een droogsnelheid van 0,048% per uur.
De droogtijd bedraagt derhalve $(40\% - 12\%) / 0,048 = 583$ uren.

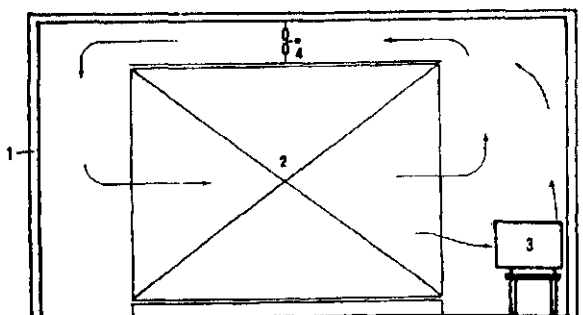


Fig. 14. Principe schets van een droogkamer, werkend met een ontvochtiger.

1. geïsoleerde wand
2. houtpakket
3. ontvochtiger
4. ventilatoren

Pijlen geven de richting aan van luchtcirculatie.

Het energieverbruik per m³ te drogen hout kan uit bovenstaande informatie eveneens worden herleid:

Volume te onttrekken water per m ³ (28x5,80) =	162 liters
Gemiddelde onttrekking per kW =	2,8 liters
Benodigd aan energie per m ³ Beuken 162/2,8 =	~ 58 kWh.

** Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek - Nederland, Delft.

Voor de totale hoeveelheid benodigde energie moeten de vermogens van de ventilatoren in de droogruimte en die in de ontvochtiger worden bijgeteld. Deze vermogens liggen in de praktijk tussen 0,05-0,10 kW per m³ hout. Bij een droogtijd van 583 uren, wordt door de ventilatoren ca. 29 kWh (583x0,05) aan vermogen opgenomen. Voor de droging is totaal aan energie nodig 58+29=87 kWh per m³ hout. Zie ook het voorbeeld uit par. 2.2.

5.4 Met aardgas (methaangas) gestookte drogers

Na de ontdekking van grote hoeveelheden aardgas (methaangas) in West Europa (Slochteren) en ontwikkeling van speciale branders voor deze brandstof, gingen een aantal houtdrogerijen over tot toepassing van dit gas. Het gas was relatief goedkoop (industrietarief) en schoner in gebruik dan de andere fossiele brandstoffen, terwijl de technische omschaking weinig problemen gaf.

Tegenwoordig stoken vrijwel alle houtdrogerijen in West Europa hun drogers met dit gas (indirect via stoomopwekking en heetwaterketels). De energie-inhoud van het methaangas is iets lager dan van de gebruikelijke fossiele brandstoffen, doch efficiënter in stookeenheden (bovengrens 31,7 MJ; benedengrens 35,3 MJ). Bij een gemiddelde droogtemperatuur van 60-65 °C halen de drogerijen in West Europa met 1 m³ aardgas ca. 8 liters water uit 1 m³ loofhout (*Eiken*, nominale droogkosten per m³, ca. Euro 161).

5.5 Via zonne-energie verwarmde drogers

De energieflux van de zon aan de evenaar bedraagt per jaar ca. 800 kJ/cm². Dit betekent dat er voldoende goedkope energie aanwezig is in de tropen om nat hout versneld te drogen. In technologische zin moeten een aantal omwegen worden bewandeld om deze vorm van energie (elektromagnetische straling) in bruikbare energie om te zetten. De energie van de zon bestaat uit twee componenten nl: directe en diffusie straling.

Praktisch kan slechts van de directe straling gebruik worden gemaakt middels zonnecellen of zonnecollectoren om de energie te

vangen. Bij zonnecellen wordt de instraling omgezet in fotovoltaïsche energie (gelijkstroom bij lage spanning) en deze in een cel opgeslagen. De uit zonnecellen opgebouwde panelen hebben echter een laag rendement (10-15%) voor wat betreft de energie-opslagcapaciteit (vermogen).

Gegeven een paneel van 100 cm^2 oppervlak (O).
 Intensiteit van de instraling $0,5 \text{ Wh/cm}^2$ (R).
 Het vermogen van dit paneel/dag wordt $(O \times R \times I) = 100 \times 0,1 \times 0,5$ of 5 Wh aan electriciteit.

In de praktijk zal de opgewekte gelijkstroom ook eerst in wisselstroom moeten worden omgezet en voor de behoefte van een droger vele panelen aan elkaar moeten worden geschakeld.

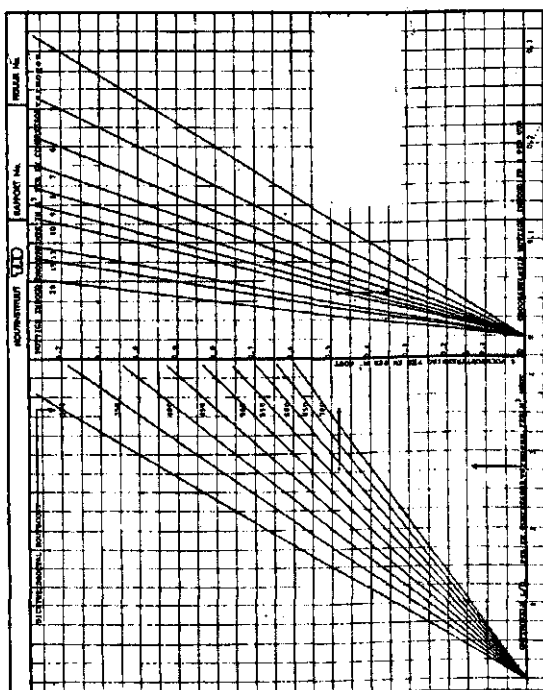


Fig. 15. De herleiding van de gemiddelde vochtonttrekking per kW compressorvermogen via het dichtheidsgetal van het te drogen hout en de vulling van de droogruimte tot de droogsnelheid van de partij hout in % per uur.

Een zonnecollector voor toepassing in de houtdrogerij biedt meer mogelijkheden. Bij een collector wordt de ingestraalde warmte direct geabsorbeerd waardoor de collector heet wordt en de warmte aan een medium, bijvoorbeeld circulerend water afgestaan. Het rendement van dit systeem ligt rond de 35%.

Als de collector is opgebouwd uit concentrische spiegels en roterend is geschakeld met de zonnestand, kan een beter rendement worden gehaald. Ook bij dit systeem zal energie moeten worden opgeslagen om de "nachturen" van het drogen te ondervangen. Afhankelijk van het type en aantal collectorspiegels kunnen temperaturen van meer dan 1000 °C in het centrum worden gehaald. In India en Indonesië zijn experimentele houtdrogers opgezet werkend op zonne-energie volgens de fofovoltaïsche methode.

6. Basisopbouw van een houtdrooginstallatie

In Fig. 11 is het basisprincipe van een moderne droger met geforceerde luchtcirculatie weergegeven. De droger bestaat uit een goed geïsoleerde kamer (1) waarin het te drogen hout (2) wordt geplaatst onder een tussenplafond (3). In de ruimte tussen plafond (3) van de kamer zijn aan één zijde ventilatoren (4) in een geheel gesloten ventilatorschot geplaatst. De ventilatoren blazen lucht, dwars op de lengterichting van de houtstapel. Aan de andere zijde van het tussenplafond is een verwarmingsregister (5/5a) aangebracht. Dit register kan staand of liggend (5a) in de ruimte tussen het lage plafond en de drogerwand worden geïnstalleerd. Voor de vochtbalans is sproeistoom nodig die via de sproeier (6) plaatsvindt*. De toevoer van verse buitenlucht en de afvoer van vochtige lucht heeft plaats via de buizen (8 en 7), die in de hartlijn van elke ventilator is aangebracht. Afvoerbuis of -koker (7) ligt in het overdrukgebied van de ventilatoren en de inputkoker (8) in het onderdrukgebied. De kokers zijn van een klepmechanisme voorzien waarmee de afvoer en toevoer van lucht proportioneel wordt geregeld.

In de geschetste opstelling wordt de af te voeren vochtige lucht met kracht in de afvoerkoker gedrukt en naar buiten geblazen. Door de optredende onderdruk in de droger zal via de toevoerkoker (8) aan de onderdrukzijde van de ventilator verse lucht worden aangezogen. De houtstapels worden gewoonlijk op lorries in de droger gereden. De lorie heeft een gesloten vloer (9) waarop de houtpakketten worden gestapeld. In het getekend model bevindt zich aan weerszijden van de lorrievloer een gesloten verhoging (10). Samen met de lorrievloer moet de verhoging voorkomen dat ventilatorlucht onder de houtstapel doorstroomt.

* In de moderne dehumidificatie drogers wordt geen extra vocht aan het te drogen hout toegevoegd!

7. Niet-conventionele houtdroogmethoden

- 7.1 Drogen bij temperaturen $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 7.2 Drogen in persen bij hoge temperaturen.
- 7.3 Hoogfrequent (elektrische frequentie) drogen.
- 7.4 Drogen in vacuum (verminderde druk).
- 7.5 Drogen in oplosmiddelen (solvent drying).

De laatste drie methoden worden om economische redenen nog weinig toegepast. Voorts behoeven enkele van de technieken de nodige procesaanpassingen om commercieel te kunnen concurreren. In dit boek zullen niet alle vermelde methoden worden behandeld, doch slechts de meest relevante in beschouwing genomen en andere zijdelings besproken.

Ruim 50 jaar geleden werden commerciële houtdrogers slechts ingedeeld naar de wijze waarop de luchtcirculatie in de droger plaatsvond. Als energiebron werd in hoofdzaak afvalhout dat in voldoende mate aanwezig was, gebruikt om stoom op te wekken. In de jaren 50 stegen de hout- en loonkosten, terwijl aardgas en stookolie als goedkope energie voor de industrie ter beschikking kwamen.

De oliecrisis van 1973 bracht verandering in deze situatie, zodat vele drogerijen weer op afvalhout moesten omschakelen en technieken gingen ontwikkelen om de energie-efficiency te verbeteren.

De volgende droogmethoden worden (nog) niet alle op commerciële schaal toegepast, doch zullen vanwege hun technologische mogelijkheden worden besproken.

Hiertoe kan het volgend onderscheid worden gemaakt:

1. drogen bij temperaturen $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. drogen in persen bij hoge temperaturen ($165\text{ }^{\circ}\text{C}$)
3. hoogfrequent elektrisch drogen
4. drogen in vacuum
5. drogen in oplosmiddelen.

7.1 Drogen bij temperaturen > 100 °C

Bij deze methode kunnen wij 2 werkwijzen onderscheiden:

- a) drogen in een damp- en luchtmengsel
- b) drogen in een stoommilieu.

Drogen in een damp-luchtmengsel

Voor het drogen in een damp-luchtmengsel wordt de natteboltemperatuur beneden 100 °C gesteld en dat van de drogebol* boven 100 °C. Deze methode werd experimenteel alleen op naaldhout toegepast. In Canada, Rusland en Duitsland zijn verschillende experimenten volgens deze methode uitgevoerd. De gekozen werkteperatuur ligt meestal tussen 110-120 °C.

Recent (1995) werd in het kader van een gezamenlijk Europees onderzoek de houtsoort Grenen (*Pinus silvestris*) volgens bovenstaande methode (110 °C) in het Centrum voor Houttechnologie TNO, gedroogd. De droogtijd bedroeg ongeveer de helft van die bij de conventionele droogmethode van 65 °C. De experimenten binnen dit Centrum zijn voortgezet en de resultaten in 1997 gepubliceerd.

Drogen in een stoommilieu

In een stoommilieu zal afhankelijk van de gekozen drogeboltemperatuur zich een bepaald evenwichtsvochtgehalte instellen. Bij 104 °C bedraagt dit evenwicht ca. 12%; bij 107 °C 9% en bij 113 °C 6%. De droging verloopt heel snel doordat in het hout (hoog vochtgehalte) het "vrijwater" kookt en verdampt. Bij het dalen van het houtvochtgehalte beneden het vezelvezadigingspunt stijgt de houttemperatuur langzaam tot in de buurt van de heersende stoomtemperatuur. De droging verloopt nog sneller dan bij de onder a) vermelde methode en wordt zowel bij naald- als loofhout (soorten met open vatsysteem) toegepast. Het proces heeft plaats in dampdichte drogers of ketels, die geschikt zijn voor een overdruk van tenminste 0,5-1,0 kPa.

De te gebruiken installatie moet corrosiebestendig zijn tegen zuren en zure harsen uit de houtmassa. Bij beide methoden is het gevaar voor scheuren en collaps (ook bij hoge vochtgehalten) heel groot. Het hout krijgt meestal een donkere kleur terwijl bij naaldhout het percentage losse kwasten na het drogen aanzienlijk toeneemt.

* zie Procescontrole en procesregeling.

7.2 Drogen in persen bij temperaturen > 150 °C

Het drogen van hout in persen heeft vooral bekendheid gekregen door toepassing hiervan in de Deense parketindustrie. In deze gaat het om het drogen van Beuken "parketfriezen" (regels) met de afmetingen 61 x 7,5 x 3,0 cm.

Het principe van deze methode is als volgt.

Bij een druk van 1200 kPa en een plaattemperatuur van 165 °C worden Beuken (*Fagus sylvatica*) parketfriezen met een beginvochtgehalte van 80-85% in 120-135 minuten gedroogd tot een eindvochtgehalte van 1% á 3%. Na deze behandeling wordt het hout in autoclaven gebracht, vervolgens vacuum getrokken en stoom in de ketel toegelaten. Na een verblijftijd van ca. 4,5 uur in de autoclaaf heeft het hout een vochtgehalte van 7 tot 8% bereikt. Dit is het gewenste eindvochtgehalte voor vloerhout in Denemarken.

De methode omvat een betrekkelijk korte behandelingstijd van ca. 7 uren, terwijl de stabiliteit van het hout aanzienlijk wordt verbeterd (hogere buigsterkte, gelijke hardheid, gelijke breedtemaat en hoger droogrendement). Het nadeel van deze snelle droogmethode is dat de installatie duur is in aanschaf en alleen geschikt voor houtsoorten met open vaten (vrij van thyllen).

7.3 Hoogfrequent elektrisch drogen

Het principe om hout in een hoog frequent elektrisch wisselveld te drogen, wordt al ruim 70 jaar toegepast. Het hout wordt in feite opgewarmd door het in hout aanwezige water. In een hoog frequent opgewekt elektrisch veld worden de asymmetrisch gebouwde watermoleculen sterk geslingerd, waarbij door hoge wrijvingen warmte ontstaat (Fig. 17). De ontstane warmte wordt in dit geval niet door geleiding of straling in het hout gebracht, maar in het materiaal zelf opgewekt door wrijvingsenergie.

De opwarming vindt het sterkst in de houtdelen plaats met het hoogste vochtgehalte (normaliter het kernhoutgedeelte). De droogtemperatuur in het hout volgens deze methode, loopt snel op tot 100 °C-110 °C en daardoor de waterdampspanning met snelle verplaatsing van vocht naar het oppervlak.

In de jaren '60 kwamen de eerste commerciële typen hoogfrequente elektrische drogers op de markt in verschillende capaciteiten met

frekwenties van ca. 13,5 MHz. Hoewel met deze drogers zeer korte droogtijden worden gehaald (2 tot 5 uren/m³) kunnen hiermee alleen houtsoorten met een open vatsysteem of soorten met geringe krimpwaarden worden gedroogd. De aanschafkosten van dit type droger zijn hoog en de droogkosten een factor 3 hoger dan het drogen volgens de conventionele methoden.

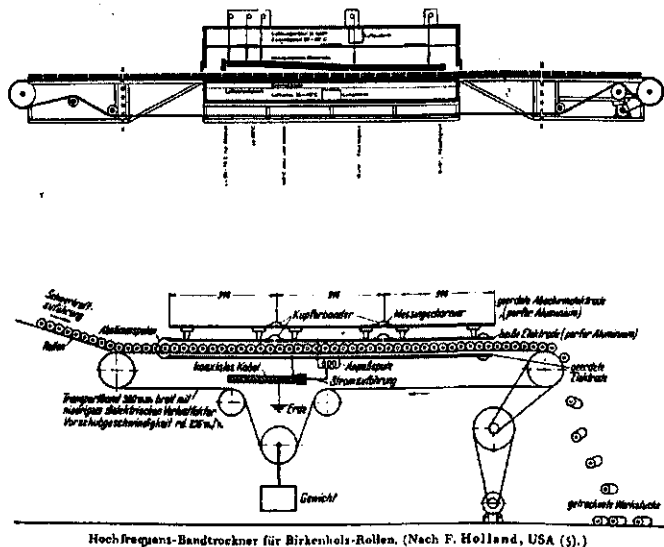
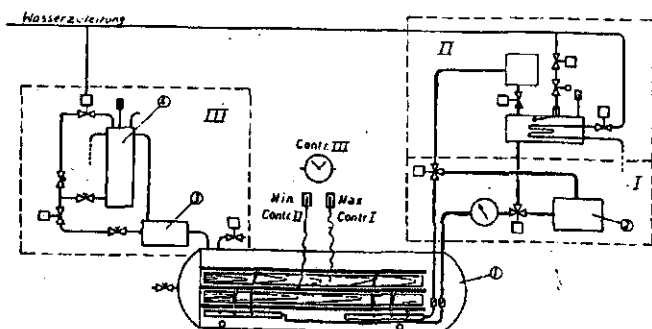


Fig. 17. Twee schema's van een hoog frequent banddroger.

7.4 Drogen in vacuum of bij verminderde druk

Deze methode is gebaseerd op het fysisch verschijnsel dat bij een onderdruk (vacuum) gelijk aan de waterdampspanning bij een bepaalde gekozen temperatuur, water gaat koken. Onder atmosferische druk (1013 mbar) gebeurt het koken van water bij 100 °C. Bij deze methode gebeurt feitelijk niets anders, alleen wordt het kookpunt door onderdruk verlaagd en wordt het hout niet bij 100 °C gedroogd, maar bij 50 °C of 60 °C. Onder deze omstandigheden bereikt men bij hout met een hoog beginvochtgehalte een temperatuur die gelijk is aan de koelgrenstemperatuur van de lucht. Om de droging te versnellen, wordt de temperatuur in de droger 10 °C – 15 °C hoger opgevoerd dan de gekozen “kooktemperatuur” bij de heersende onderdruk. Hierdoor werkt men weer in oververhitte stoom (hfdst 7.1b). Voor deze methode van drogen is een vacuum-drukketel nodig, een warmteconvactor, een condensor en een vacuumpomp. Dit type droger is door Pagnozzi (Italië) ontworpen en wordt door Maspell S.A. op de markt gebracht (Fig. 18). In het door Maspell op de markt gebrachte systeem, wordt het hout in eerste instantie bij atmosferische druk continu opgewarmd tot ca. 60 °C en daarna de temperatuur geëgaliseerd met de keteltemperatuur. Tijdens deze opwarmtijd kan geen vocht uit de ketel ontsnappen waardoor het vochtgehalte van het houtoppervlak hoog blijft.

Het materiaal kan in deze fase ook niet scheuren of kromtrekken. Hierna wordt in de ketel een hoog vacuum (59 mbar) getrokken waardoor het vocht in het houtoppervlak bij die verlaagde druk gaat koken. Het vocht verdampt dan snel en via de vacuumpomp afgevoerd. Het vacuumentrekken gaat door totdat de temperatuur zover is gedaald en er geen water meer kan verdampen. Hiermee is dan het dauwpunt voor de betreffende temperatuur en druk bereikt en feitelijk de droogcyclus bij verminderde druk. Na het aflaten van de druk wordt het hout opnieuw tot ca. 60 °C opgewarmd. Deze werkwijze leidt ook tot korte droogtijden en speciaal bij houtsoorten met geringe tot matige diffusieweerstand. Voor bepaalde houtsoorten echter levert deze methode in vergelijking met de conventionele droogmethoden geen tijdwinst op.



Allgemeine schemazeinang eines Pagnozzi -- vakuum -- trockners
 I- heizungssystem. II- kühlssystem. III- vakuum-pumpsystem.
 1- autoklav. 2- kessel. 3- vakuum-pumpe. 4- kondensator

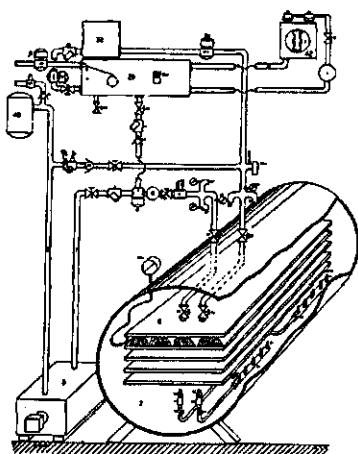


Fig. 18. Principe- en leidingschema van een vacuümdroger vlg's Pagnozzi.

7.5 Drogen in oplosmiddelen

Deze methode van houtdrogen ook wel bekend als "solvent drying" is gebaseerd op het onttrekken van vocht uit het hout met behulp van een oplosmiddel waarmee water goed mengbaar is.

Het natte hout wordt langdurig met een "hydrofiel" oplosmiddel (aceton, alcohol of ethylacetaat) overgoten totdat het vocht in het hout bijna geheel door het oplosmiddel is vervangen. De praktische uitvoering van deze methode is weergegeven in figuren 19 en 20. In een roestvrijstalen tank wordt het hout horizontaal met een tussenruimte van 6,0cm geplaatst.

Onder in de tank bevindt zich het rond te pompen oplosmiddel dat daar opgewarmd wordt tot eigen kookpunt (aceton 55 °C). Het warme oplosmiddel wordt met sproeiers boven het hout verneveld en deze stroomt over het houtoppervlak terug in de tank. Als gevolg van concentratieverschillen tussen mengsel en houtoppervlak wordt in een continue stroom vocht aan het hout onttrokken en vindt indringing plaats van oplosmiddel in het hout. Met het mengsel wordt ook de in water oplosbare inhoudstoffen geëxtraheerd. Het sproeien wordt voortgezet tot het gewenste eindvochtgehalte in het hout is bereikt. Het eindvochtgehalte wordt bepaald door het watergehalte van het versproeide oplosmiddel te bepalen.

Als het oplosmiddel veel water bevat, dan verkrijgt men een milde droging en een hoog eindvochtgehalte. Aan het begin van het droogproces werkt men dan ook met een hoog watergehalte in het mengsel en verlaagt dit tijdens het droogproces regelmatig totdat het watergehalte is bereikt, waarmee het gewenste eindvochtgehalte wordt verkregen. Het droogproces wordt beëindigd door het oplosmiddel uit de tank af te voeren, restant oplosmiddel uit hout te verdampen en terug te winnen. Daarna ondergaat het hout nog een stoombehandeling om eventuele spanningen in het materiaal weg te werken.

Uit het eindmengsel wordt het oplosmiddel teruggewonnen, het water afgescheiden en de in het residu opgeloste inhoudsstoffen gedestilleerd. Afhankelijk van de houtsoort kunnen deze inhoudsstoffen bestaan uit: harsachtige stoffen, terpentijn, looistoffen of tanninen. Deze methode van drogen leidt ook tot zeer korte droogtijden, doch werd nooit op grote schaal toegepast. Het meest

sprekende voorbeeld betreft het drogen van Redwood van ca. 200% vochtgehalte tot ca. 10% in een week. Normaliter dient Redwood* vooraf ca. 1 jaar "winddroog" te worden opgeslagen alvorens kunstmatig te worden gedroogd.

Naast deze methode van drogen (solvent drying) bestaat een vorm waarbij men gebruik maakt van het verschijnsel dat sommige oplosmiddelen in een bepaalde verhouding met water een verlaging van het kookpunt veroorzaken (het azeotropisch kookpunt). Met deze wijze van drogen, ook korte droogtijden, wordt nog geëxperimenteerd.

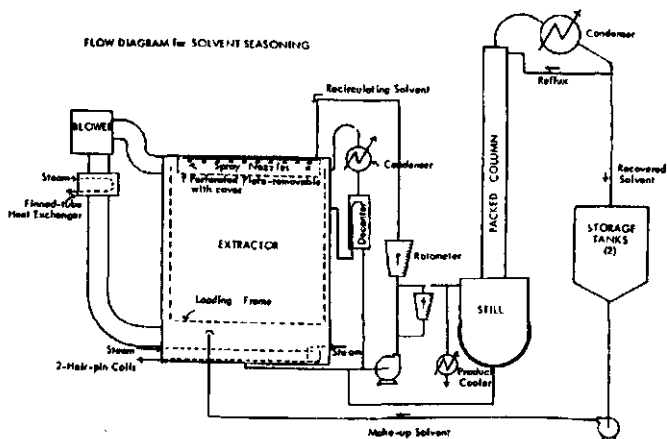


Fig. 19. Schema van een droger, werkende met oplosmiddelen.

* *Sequoia sempervirens*

7.6 Materiaalkeuze bij de opbouw van houtdrogers

De materiaalkeuze van een houtdroger is belangrijk aangezien in het vochtige drogermilieu, materiaalcorrosie kan optreden.

De plafondwanden worden tegenwoordig bijna uitsluitend in een soort "cassette"-uitvoering geleverd. Deze cassettes zijn dan vervaardigd uit dubbelwandig aluminiumplaten met daartussen een warmte-isolatiemateriaal. Het isolatiemateriaal bestaat vaak uit een deken van minerale wol (glaswol, steenwol) of platen van polyurethaanschuim. Een isolatie bestaande uit polystyreen is niet aan te bevelen omdat dit materiaal bij temperaturen van 60 °C en hoger sterk zal krimpen en de isolatiewaarde van de "cassette" met de tijd doen verminderen.

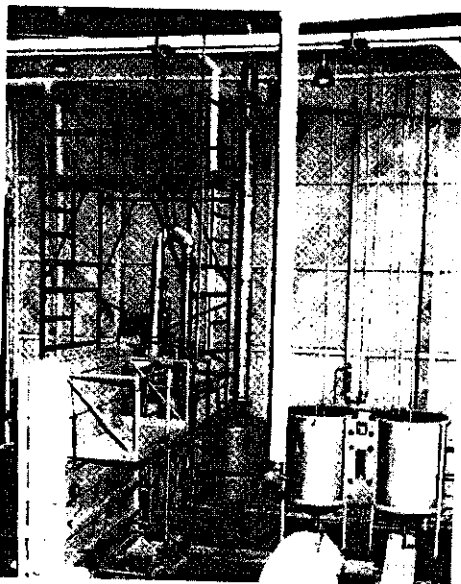


Fig. 20. Laboratoriumopstelling van een droger, werkende met oplosmiddelen.

Van de inbouw delen zijn het tussenplafond, de ventilatoren, de luchttoe- en afvoerkokers en de sproeier in het algemeen uit aluminium vervaardigd. Een betere uitvoering van de stoomsproei-buis is van roestvrijstaal.

De moderne verwarmingsregisters zijn van bimetaal vervaardigd (inwendig van staal en de uitwendige ribben van aluminium). Als de ribben van staal zijn gemaakt, moet condensatie op het register worden voorkomen, dit register moet dan altijd warmer zijn dan het klimaat in de droger.

Omdat de genoemde onderdelen van de droger alle uit vrijwel zuiver aluminium zijn vervaardigd, moeten andere uit koper bestaande onderdelen worden vermeden. Koper veroorzaakt namelijk elektrochemische corrosie van aluminium. Hoewel duurder in aanschaf zouden alle onderdelen eventueel van roestvrij staal kunnen worden vervaardigd of van cadmiumstaal.

De vloer van de droogkamer en de verhogingen in de vloer zijn altijd van beton, eventueel voorzien van een isolatielaag (breuksteen, slakken of polyurethaan).

8. Oorzaken van defecten in gedroogd hout

Defecten in gedroogd hout kunnen zich om vier redenen voordoen en wel tengevolge van:

1. de houteigenschappen
2. groeispanningen
3. natuurlijke houtgebreken
4. onjuist drogen.

Hout wordt in zijn kwaliteit gewaardeerd naar het voorkomen van zijn natuurlijke gebreken. Voor het kunstmatig drogen is het daarom van belang van de beste kwaliteit uit te gaan. Bij mindere kwaliteiten zal men normaliter meer natuurlijke gebreken tegenkomen, waardoor het drogen ervan moeilijker zal zijn. Het is in dit verband noodzakelijk die gebreken te kennen en de gevolgen daarvan op het te drogen hout.

Krimpen

Andere defecten en vervormingen alsgevolg van verschillen in tangentiale en radiale krimp zijn gerelateerd aan de fysische houteigenschappen (anisotrope krimpverschijnselen). De werkelijke grootte, niet de verhouding, en het verschil van de krimp in beide richtingen, zijn te gebruiken als aanwijzing voor de te verwachten graad van vervorming.

Naarmate het eindvochtgehalte van het gedroogde hout laag is, zal het verschil tussen radiale en tangentiale krimp groter zijn. Dit verschil geldt voor vrijwel alle houtsoorten. Bij houtsoorten met geringe krimpwaarden (< 1%) is dit verschil zó gering dat meestal slechts een zeer lichte vervorming optreedt bij het drogen tot lage vochtgehalte (< 10%).

Als voorbeelden van houtsoorten met een zeer geringe krimp kunnen hier worden genoemd: *Alerce, Redwood, Afzelia, Iroko, Honduras mahonie, Muninga en Teak.*

Houtsoorten met grote krimpwaarden zijn bijvoorbeeld: *Beuken, Essen, Keroewing, Red lauan, Wana, Fungu, Sali en Bruinhart.* Het kromtrekken bij het drogen van ongekantrecht en gekantrecht hout in grote diktematen is daarom niet een gevolg van onjuist drogen.

Groeispanningen

In vers (green) geveld hout zijn de wanden van het dunwandig weefsel, het parenchym, in de eerste plaats en daarnaast ook de dunwandige tracheidale elementen in bepaalde houtsoorten vaak nog zeer week. Er zijn daarom geringe krachten nodig om deze weefsels sterk te vervormen. Dit leidt bij het versneld drogen van pas geveld en gezaagd hout tot collaps en scheuren.

In een pas gevelde stam heersen vaak groeispanningen (naald- en loofhout) die zo sterk kunnen zijn dat de stam bij het vellen openscheurt. Blijft een stam na het vellen echter een tijdje liggen voordat hij wordt verzaagd, dan krijgen de groeispanningen de tijd om te verdwijnen. Dit is ook het geval met versgezaagd hout voordat deze kunstmatig zal worden gedroogd.

Het verdwijnen van genoemde spanningen op een dergelijke wijze, noemen wij relaxen. Het verdient daarom aanbeveling om vers geveld en gezaagd hout enige tijd te laten liggen, zodat het de tijd krijgt om te relaxeren. Buitendien verliest het hout daardoor een gedeelte van het aanwezige vocht en zal het versneld drogen relatief minder energie vergen.

Natuurlijke houtgebreken

De vervormingen bij het drogen tengevolge van natuurlijke gebreken in hout, kunnen als volgt worden gegroepeerd:

- a) reactiehout
- b) schuin draadverloop en draaigroei
- c) kwasten en het draadverloop eromheen
- d) sterke kruisdraad
- e) golvende en warrige draad.

a) Reactiehout

Onder reactiehout verstaat men het *drukhout* dat in naaldhout en het *trekhout* dat in loofhout kan voorkomen. Het is een houtweefsel dat de boom vormt als reactie op een verstoring of een hinder in zijn normale rechtstandige groei.

Een boom die bijvoorbeeld scheef is gezakt door een grondverschuiving zal daarop reageren door zich weer op te richten om de top omhoog te krijgen. Dit doet de naaldboom door vaak vrij veel bijzonder hout, het *drukhout*, aan de naar de aarde toe gerichte zijde te vormen en zo de boom als het ware weer op te bouwen. De boom wordt ter plaatse krom en door de eenzijdige vorming van veel reactiehout komt het hart excentrisch te liggen.

De loofboom reageert hierop door van de aarde af gerichte zijde eveneens bijzonder hout te vormen en in dit geval *trek hout*. Ook andere natuurinvloeden kunnen op een boom inwerken, waardoor reactiehout wordt gevormd (scheve kroon bij randbomen van een bosopstand of bomen op een steile helling en eenzijdige winddruk). Het probleem van reactiehout bij het drogen is de optredende afwijkende krimp.

Reactiehout krimpt in lengterichting (longitudinaal) veel meer dan het normale hout en dwars op de lengterichting (transversaal) minder. Reactiehout komt veel voor, maar vaak slechts in zo geringe mate dat dit niet tot vervormingen leidt. Anderzijds reageren niet alle boomsoorten in de natuur even sterk op genoemde uitwendige verstoringen door het vormen van reactiehout. De redenen waarom dit niet gebeurt, zijn nog onbekend. Om van een partij hout waarin veel reactiehout voorkomt zoveel mogelijk over te houden, doet men er het beste aan om dit langzaam te drogen (bijv. in een open loods) met verzwaring op de stapel om het zo goed mogelijk vlak te drukken. Deze verzwaring kan eenvoudig worden gerealiseerd door een of meerdere pakketten op de stapel met reactiehout te plaatsen.

b) Schuin draadverloop en draaigroei

In normale rechte stammen met rechtdradig hout komt schuindraadverloop vaak voor in de voet van de stam. Met name in het gedeelte waar vele stammen breed uitlopen en overgaan in het wortelstelsel is dit een normaal verschijnsel. Bij boomsoorten met een vlak wortelstelsel (Beuken, Vuren en vele tropische houtsoorten) komt dit verschijnsel meer voor dan bij houtsoorten met een penwortel (Eiken, Grenen). Deze vorm van schuin draadverloop treft men vaak aan een uiteinde van het gezaagd hout. Het schuine draadverloop veroorzaakt een op de lengterichting van het gezaagde hout wat schuin gerichte krimp, waardoor dit gedeelte bij het drogen vaak krom of scheluw trekt.

In een normale boom loopt het longitudinaal gerichte weefsel ongeveer evenwijdig met de lengterichting van de stam. Bij draaigroei loopt dit weefsel in een spiraal om de centrale as van de stam. De spiraal kan zowel links- als rechtsdraaiend zijn.

Bij ontbast rondhout van bepaalde houtsoorten met gewoonlijk een rechte draad is draaigroei duidelijk te herkennen aan de schuine richting van de droogscheurtjes in het oppervlak van het hout. Eenzelfde beeld wordt bij stammen van tropische houtsoorten met kruisdradig hout aangetroffen, hetgeen hier echter inherent is aan de aanwezigheid van kruisdraad.

Boomstammen met een duidelijke draaigroei leveren hout dat bij het drogen altijd scheluw trekt en voor de normale toepassing onbruikbaar is.

c) Kwasten en het draadverloop eromheen

In het jeugd stadium van gezonde bomen zullen deze hun takken tijdens de lengtegroei van de boom in het algemeen vrij snel verliezen. De functie van deze takken en hun bladeren houdt door lichtgebrek meestal spoedig op waardoor de takken afsterven. De boom sluit het weefsel naar de tak af waarna de afgestorven tak door schimmels en insecten wordt aangetast, bros wordt en afbreekt. Bij de meeste loofbomen breekt het nog dunne takje direct bij de stam af, het stompje wordt door het cambium overgroeid en bij de verdere diktegroei is niets meer te merken van de tijdelijke aanwezigheid van een takje. Vlak bij het hart van de boom vindt men later slechts de kleine, goed met het stamhout vergroeide kwastjes terug.

Bij naaldhout (o.a. *Pinus caribae* / *P. hondurensis*) verloopt de takafstoting vaak moeilijker, de dode tak breekt verder van de stam af en het duurt lang voordat de takstomp geheel is overgroeid. In het stamhout ontstaat een stuk vaste of vergroeide kwast en een stuk dode, losse kwast (Fig. 21). Zolang de tak leeft, wordt elk jaar of elke groeiperiode ook in de tak een groeiring gevormd, die doorloopt in de groeiring van de stam. Dit ombuigen van de groeiringen veroorzaakt warrigheid om de kwast in de stam. Bovendien moet het in de lengte gerichte stamweefsel om de takingroei heenbuigen, hetgeen bij dikkere takken vaak tot vrij ver van de takingroei in de stam merkbaar is. Bij het drogen van dergelijk hout kunnen hierdoor vervormingen ontstaan. In een vergroeide kwast ontstaat door het drogen vaak een scheur in het kopse vlak van de kwast.

Bij de dode kwasten ontstaat ruimte tussen de kwast en het omringende hout tengevolge van verschillen in krimp. Hierdoor gaan deze kwasten loszitten en kunnen uit het hout vallen.

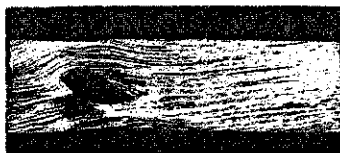
d) Sterke kruisdraad

Bij een vrij groot aantal tropische houtsoorten (o.a. *Wana, Kwari, Zwarte kabbes, Rode kabbes en Mora*) komt een zwakke tot vrij sterke kruisdraad voor. Deze ontstaat door een periodiek van richting wisselen van het longitudinaal gericht weefsel, van spiraalsgewijs links naar rechtsdraaiend. Wijkt de draairichting sterk af van de longitudinale, dan heeft men te maken met een sterke kruisdraad.

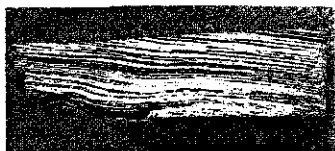
Bij het drogen van dergelijk hout kunnen als het ware schuin door het gezaagde hout lopende "kopscheurtjes" ontstaan alsgevolg van het grote verschil in transversale krimp tussen de gedeelten met verschillend draadverloop. Dit soort beschadiging is niet te voorkomen en men bemerkt dit pas bij het verwerken van reeds gedroogd hout.

e) Golvende en warrige draad

Deze afwijkingen (golvende en warrige draad, slingerend hart) van de rechte draad van het longitudinaal en evenwijdig aan de lengte-as van de stam gerichte weefsel, kunnen bij het drogen gemakkelijk tot krom en/of scheluw trekken van het hout leiden. De beste methode om dergelijk hout te drogen, is het in een open loods of in de buitenlucht voor te drogen en daarna volgens een milde droogschema versneld na te drogen tot het gewenste eindvochtgehalte. Bij een aantal houtsoorten (*Essen, Tamme kastantje, Sali, Bruinhart, Slangenhout, etc.*) wordt een golvende draad soms zeer gewaardeerd om de decoratieve tekening. Houtsoorten met warrige draad zijn bijvoorbeeld *Gronfolo* en *Kwari*-soorten.



a



b

Fig. 21 a en b.

- a. Dode takstomp in een stuk gekloofd Grenen. De takstomp vormt een losse kwast in gezaagd hout. Het verloop van de draad om de takingroei heen is door het kloven duidelijk zichtbaar geworden.
- b. Op 7cm van de takingroei was het draadverloop nog merkbaar.

Door het kiezen van een temperatuur en of een relatieve luchtvochtigheid, die niet aansluit bij de toestand waarin het te drogen hout op dat moment verkeert, kan goed hout bij het kunstmatig drogen, toch worden beschadigd.

Ook als in dit hout geen van de eerder genoemde gebreken wordt aangetroffen, kan door een onjuiste combinatie van droogfactoren zich droogschade voordoen. Deze beschadigingen kunnen zijn: oppervlaktescheuren, kopsescheuren, inwendige scheuren en collaps.

Oppervlakte- en kopsescheuren

Door het kiezen van een te scherp droogklimaat in de beginfase van het drogen, ontstaan er droogscheuren. Daarbij is vrijwel altijd de R_v van het droogklimaat te laag gekozen voor de vigerende toestand van het hout. Houtsoorten met grote krimpwaarden zijn het meest gevoelig voor kopse scheuren, maar ook bij soorten met gunstiger krimpwaarden kunnen kopse scheuren gemakkelijk voorkomen.

Deze scheuren zijn het gevolg van de zeer gemakkelijke en snelle verdamping van vocht via het kopse vlak (open vaten). In het kopse vlak wordt het evenwichtsvochtgehalte ($\chi\phi$) met de daarbij behorende krimp sneller bereikt dan in het langsvlak. Binnen in het hout echter is het vochtgehalte nog erg hoog en in dat geval nog niet aan krimpen toe.

In het algemeen is rechtdradig hout in de radiale richting gemakkelijker te kloven, omdat de zwakste plaatsen in het hout worden gevormd door de contactvlakken tussen het longitudinale gerichte weefsel en de radiaal lopende houtstralen. Bij het krimpen van hout ontstaan in diezelfde contactvlakken ook de grootste spanningen. Bij het ontstaan van kopse scheuren zullen deze in het meeste geval langs de stralen lopen. Ook langsscheuren in het houtoppervlak beginnen bij de stralen en hetzelfde geldt voor de fijne haarscheuren in het hout bij buitenexposities.

Kopsescheuren ontstaan niet alleen in nat hout, maar ook bij luchtdroog hout in een open loods (vochtgehalte 25-30%) dat in een binnenklimaat wordt gebracht. Na enkele dagen vertonen zich kopscheurtjes, radiaal langs de stralen lopend met soms nogal

willekeurig verlopende dwarsscheurtjes daartussen. Bekend zijn de kopscheuren bij Eiken, Krapa, Jaboti, Kwari, Wana, Walaba, etc. Het ligt voor de hand om kopscheuren bij hiervoor gevoelige houtsoorten tegen te gaan door aansluitend op het afkorten van het hout, de verse kopse zaagvlakken af te dichten. De afdichting is bedoeld om vochtverdamping via het kopse vlak te beperken, doch niet om dit in totaliteit af te remmen. Geschikte afdichtmiddelen zijn o.a.: Mobilcer A, Mobilcer M en watergedragen PVAC-lijm of verfsoorten op latexbasis. Een eenmaal in het kopse vlak aanwezige scheur zal door het vochtverlies van het hout altijd dieper intrekken, ook al is de scheur na het ontstaan, afgedicht.

Collaps

Bij droogtemperaturen boven de 40 °C en zelfs even boven 35 °C kan "collaps" in daarvoor gevoelige houtsoorten optreden. Het is een duidelijke typische vervorming van een stuk hout dat naar het midden toe dunner en aan de buitenzijde dikker is geworden. "Collaps" kan slechts optreden indien het hout in zeer natte of verse toestand verkeert en in een versneld tempo wordt gedroogd.

Als bovengrens voor het vochtgehalte wordt meestal ca. 80% opgegeven. Voor enkele houtsoorten echter ligt de bovengrens op 120% vochtgehalte. Als laagste grens waarbij "collaps" kan optreden, wordt 40-35% vochtgehalte aangehouden.

De vervorming begint feitelijk reeds bij een vochtgehalte ver boven het vezelvezadigingspunt, waarbij nog geen sprake kan zijn van de normale krimp van het hout. De celdeformatie bij "collaps" hangt samen met onderdrukken, die tijdens het drogen in het celweefsel optreden.

Bij houtsoorten met dunwandige cellen waarin het transport van vrij water heel moeilijk plaats heeft, wordt de kans op "collaps" vergroot. De dunwandige cellen zijn in natte toestand weinig stevig en worden bij hogere temperaturen nog slapper. Hogere temperaturen veroorzaken bovendien ook grotere onderdrukken in de *lumina* van de cellen en vezels. In het algemeen zijn het daarom de *parenchymweefsels* die bij celcollaps deformereren.

Zeer collapsgevoelige houtsoorten zijn bijna alle Eucalyptus- en Eiken-soorten. Voorts de Europese houtsoorten: Iepen, Noten, Beuken en Grenen. Bij de tropische houtsoorten: Keroewing en Yan (*Dipterocarpus sp.*), Rode meranti (*Shorea sp.*) en Imbuia (*Ocotea*

porosa) uit Brazilië werd tijdens droogproeven (TNO-CHT) collaps gevonden.

In sommige gevallen kan collaps gedeeltelijk door een stoombehandeling worden opgeheven. Deze behandeling wordt uitgevoerd wanneer het hout een vochtgehalte van 18-15% heeft bereikt en afhankelijk van de houtsoort en de mate van de vervorming van enige uren tot meer dan een dag.

Inwendige scheuren

Bij een onjuist ingesteld droogproces kan het voorkomen dat het hout na drogen er uiterlijk prima uitziet, doch inwendig toch scheuren vertoont. De oorzaak hiervan is het instellen van een veel te scherp droogklimaat op een moment dat het hout in de kern nog een vrij hoog vochtgehalte heeft.

Bij een gemiddelde vochtgehalte van 25% - 30% tijdens het droogproces, wordt vaak overgeschakeld op een scherper droogregiem. Het hout kan echter door verschillende oorzaken (o.a. hoger beginvochtgehalte) een te steile vochtgradient hebben gekregen met het gevolg van extra inwendige spanningen.

Als het gemiddelde houtvochtgehalte 30% is, mogelijk ontstaan uit een hoog kernvochtgehalte terwijl het randvochtgehalte bijv. 13% bedraagt, zal de rand in dat geval niet veel meegeven bij het krimpen in de kern. Het weefsel in de kern zal daarom alle krimp en spanningen moeten opvangen.

Als het droog- en krimpproces in de kern vervolgens te snel verloopt, zal de trekspanning toenemen en de weefsels doen scheuren. Hierdoor ontstaan inwendige scheuren, radiaal langs de stralen (Fig. 22 en 23). Om deze vergissingen bij het droogproces te voorkomen, wordt aangeraden vooraf een goede analyse te maken van kern- en randvochtgehalten naast het gemiddelde vochtgehalte. Kern- en randvochtgehalten dienen tijdens het droogproces ook afzonderlijk te worden gevolgd.

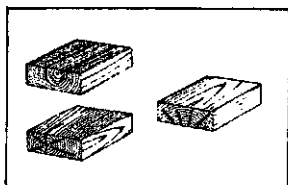


Fig. 22. Kopse scheuren bij het droogproces

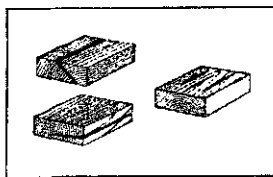


Fig. 23. Langse scheuren bij het droogproces

10.1 Droogspanning en stress relief

Tijdens het droogproces van een nat stuk hout zal deze aan de buitenzijde vocht afstaan, dat van binnenuit vertraagd wordt aangevoerd. Indien het droogproces zodanig wordt gestuurd dat de verdamping aan het oppervlak vrijwel gelijk is aan de aanvoer van binnen, dan verloopt een dergelijk regiem zeer langzaam.

Bij het drogen in droogkamers met een geforceerde luchtcirculatie is het om economische redenen van belang het droogproces juist snel door te voeren. Het oppervlak van het te drogen hout zal in korte tijd een laag vochtgehalte bereiken (p.m. 10%) met alsgevolg een sterke krimp en daarmee een grote spanning. Het spanningsbeeld is in Fig. 1 weergegeven.

De sterke krimp van de buitenlaag ondervindt een grote weerstand van het meer naar de kern toe gelegen nog natte, niet krimpnd hout. De buitenzijde van het hout wordt hierdoor als het ware opgerekt en komt onder trekspanning te staan. Het middengedeelte naar de kern toe ondervindt een drukspanning (stadium 1). Is in dit stadium het klimaat te scherp gekozen, m.a.w. de optredende *trekspanning* is te groot om door de deformatie van het weefsel aan het oppervlak te worden opgevangen, dan breekt het weefsel en er ontstaan *oppervlaktescheuren*. Gebeurt dit niet, dan wordt met het ingestelde klimaat verder gedroogd waarbij het verdampingstraject zich iets naar binnen in het hout verplaatst, het vochtgehalte afneemt en de krimp langzaam in de richting van de kern trekt.

Hierna begint het kerngedeelte te drogen en te krimpen, de drukspanning in de kern verdwijnt en de trekspanning aan de buitenzijde wordt opgeheven (stadium 2). Na een moment van evenwicht zal het spanningsbeeld omslaan. De opgerekte, droge en stug geworden buitenzijde blijft dan in dezelfde toestand en ondervindt van de zich samentrekkende kern een drukspanning. De kern komt in deze situatie onder een trekspanning te staan (stadium 3).

Als in dit stadium het droogklimaat te vroeg en/of te veel verscherpt wordt om de afname in droogsnelheid zoveel mogelijk op te vangen, dan kan de trekspanning in de kern te groot worden waardoor het weefsel scheurt en inwendige scheuren ontstaan. Aan het einde van het droogproces is het spanningsbeeld van stadium 3 aanwezig. Deze droogspanning is eenvoudig op te heffen door het hout enige uren aan een wat hogere temperatuur dan die van het droogproces zelf en een hoge R_v bloot te stellen, waardoor het hout aan de droge stugge en opgerekte buitenzijde weer vochtig en soepel wordt. Zodoende kan het weefsel toegeven aan de heersende drukspanning en deze daardoor uit het hout verdwijnen. Deze fase is de zogenaamde conditioneringsperiode of "stress relief" (stadium 4).

Houdt men deze behandeling te lang aan, dan ontstaat aan het oppervlak een plastische vervorming van de houtvezels doordat deze te sterk opzwellen. Nadat het vochtgehalte in het hout is geëgaliseerd, is door deze vervorming in de kern een drukspanning ontstaan (stadium 5). Het omschreven spanningsbeeld kan met behulp van de zogenaamde vorkproefjes zichtbaar worden gemaakt.

Het verschijnsel "droogspanning" komt niet alleen voor in drogers met geforceerde luchtcirculatie, maar ook in geklimatiseerde drogers en die met ontvochtigers. Indien deze type drogers niet met een stoomsproeisysteem zijn uitgerust, zal conditionering niet mogelijk zijn met alle nadelige gevolgen voor het gedroogde hout.

10.2 Procescontrole en klimaatregeling bij geforceerde luchtcirculatie

Bij de procescontrole is het voor de gebruiker van de droger feitelijk alleen van belang te weten hoe goed of slecht een bepaalde functie-instelling, bijvoorbeeld temperatuur kan worden vertaald in een regelfunctie. De apparatuur daarvoor kan bestaan uit eenvoudige proportionele tot volautomatische (elektronische) regelaars die vooraf kunnen worden ingesteld (set points).

Heeft men gekozen voor eenvoudige proportionele regelaars voor de regeling van de droge- en nattebol temperatuur, de psychrometrische regeling, dan zal men tijdens het gehele droogproces in totaal 3 tot 4 keren het droogklimaat moeten veranderen door een instelknop te verstellen. Het droogproces wordt in het algemeen geleid aan de hand van een droogschema waarop de gewenste temperaturen in

samenhang met het vochtgehalte van de te drogen houtsoort zijn vermeld.

Het vochtgehalte van het hout in de droger is eenvoudig te volgen door periodieke elektrische metingen daarvan. Voor deze metingen worden vaste meetpunten in het te drogen hout aangebracht (10 tot 12 aansluitingen). De weergave van de resultaten vindt analog of digitaal plaats op de buiten de droger opgestelde meter. De elektrische of elektronische vochtmeter is meestal van het type met geïsoleerde elektroden, dat daarnaast als een gewone vochtmeter in het bedrijf kan worden gebruikt en is voorzien van een temperatuurcorrectie. Bij een "build in/on line" volautomat worden de regelfuncties automatisch periodiek bijgesteld en gecorrigeerd. In deze automaat is een vierstanden corrector opgenomen voor de temperatuurcorrectie naar houtsoort. Voorts zijn in deze regelaars de temperatuur en het evenwichtsvochtgehalte met elkaar geïntregeerd, zodat langzamer kan worden opgewarmd en geen "run off" kan plaatsvinden.

Het klimaat in de conventionele drogers kan op twee manieren worden geregeld en bijgestuurd (zie ook hfdst 4). Zoals reeds gesteld, is de Rv bij het drogen de belangrijkste factor die bepaalt hoe laag het evenwichtsvochtgehalte van het hout ($\chi\phi$) uiteindelijk zal worden. Uit de psychrometrische regeling (natte- en drogebol) is de Rv gemakkelijk bij te sturen en daarmee het uiteindelijk evenwichtsvochtgehalte.

Een andere methode is de sturing van de Ev via een 1mm dikke houtspaan, geklemd in een daarvoor speciaal ontworpen elektrode. De houtspaan-regelaar wordt in de droger aangebracht en deze neemt snel een vochtgehalte aan dat in evenwicht is met het heersende klimaat. Het vochtgehalte van de spaan en van de partij hout worden continu elektrisch gemeten en vergeleken. Het droogproces wordt in dit geval geleid door vergelijking van het gemiddelde houtvocht- en het spaanvochtgehalte, waarbij beneden 30% houtvochtgehalte een van te voren in te stellen verhouding tussen hout- en spaanvochtgehalte wordt aangehouden.

10.3 Klimaatregeling bij ontvochtigers

In droogruimten met ontvochtigers (5.1) wordt in de meeste gevallen het klimaat geregeld door de thermostaat en hygrostaat die aan de luchtinlaatzijde van de ontvochtiger zijn gemonteerd. Deze opstelling biedt echter geen mogelijkheid om het klimaat in de droogruimte zelf onder controle te houden en bij te regelen. De voorziene thermostaat reageert slechts op een in te stellen maximum waarde en dient feitelijk meer als temperatuur beveiliging van het apparaat. De hygrostaat schakelt de compressor uit wanneer de Rv aan de luchtintreezijde van de ontvochtiger beneden een ingestelde waarde komt. Het klimaat van de houtstapel aan de luchtintreezijde zal echter op deze wijze niet kunnen worden geregeld en gestuurd.

De klimaatregeling en sturing moeten aan de luchtintreezijde van de houtstapel plaatsvinden en niet aan de luchtinlaatzijde van de ontvochtiger. Hiervoor is het noodzakelijk in de droger aan de luchtinlaatzijde van de houtstapel een hygro- en thermostaat aan te brengen en deze in het regelcircuit van de ontvochtiger op te nemen. De laatste jaren hebben fabrikanten dit euvel opgelost door speciaal voor ontvochtigers volautomaten op de markt te brengen waarmee de klimaatregeling zoals in drogers met geforceerde luchtcirculatie kan plaatsvinden. De volautomaat verzorgt de klimaatregeling conform ingestelde waarden automatisch en commandeert daartoe de ontvochtiger.

10.4 Slotopmerkingen

1. Voorbehandeling van te drogen hout.
2. Opslag en behandeling van gedroogd hout.

1. Voorbehandelingen

Vanaf de beginperiode van het drogen van hout bij temperaturen boven 40 °C, werd onderzoek gedaan naar voorbehandelingen om het drogen sneller en zonder kwaliteitsverlies te doen plaatsvinden. Het verminderen van de krimp, het krom- en scheluwtrekken namen hierbij eveneens een belangrijke plaats in. De meest succesvolle en oudste methode van voorbehandeling is het "voorstomen".

Bekende voorbehandelingsmethoden zijn:

- a. extractie met chemicaliën
- b. bevroren
- c. voorstomen.

a. Extractie met chemicaliën

Deze methode omvat het aanbrengen van een zoutoplossing of organisch oplosmiddel op het oppervlak van vers gezaagd hout. Het aangebrachte middel zal in de buitenlaag van het hout diffunderen en naarmate de concentratie inwendig toeneemt, zal het houtvochtgehalte aan de buitenzijde afnemen.

Omdat een zoutoplossing een lagere waterdampspanning heeft dan gewoon water, ontstaat in de lucht grenzend aan het oppervlak met de zoutoplossing een lagere R_v dan boven een nat houtoppervlak heerst. Deze R_v staat in een wederkerige relatie met het in oplossing gebrachte zout en zal zich aanpassen aan de heersende concentratie van de zoutoplossing.

Een zoutoplossing op het houtoppervlak toegepast, zal het snel uitdrogen van dat oppervlak in een droge omgeving afremmen en daarbij vocht uit het hout zelf naar het oppervlak trekken. Het ontstaan van scheuren wordt hierdoor tegengegaan en ontstaat er een wat minder steile vochtgradient in het hout. Het in het hout gediffundeerde zout zal tevens een vermindering van de krimp tot gevolg hebben. Deze diffusieprocessen duren in het algemeen veel te lang (1 tot 2 maanden) en betekenen geen reële tijdwinst in een geïntegreerd proces.

Voorts zullen de toe te passen chemicaliën aan de volgende eisen moeten voldoen:

- gemakkelijk in water oplosbaar
- in oplossing niet te visceus
- klein van moleculaire structuur
- boven de verzadigde oplossing een R_v van 70-75% niet overschrijden
- chemisch bij hogere temperaturen inert
- verlijmbaarheid en afwerking van het hout niet beïnvloeden
- geen biodegradatie van het behandelde hout in een buitenexpositie bevorderen.

Bekende chemicaliën voor deze wijze van voorbehandeling zijn o.a.: keukenzout, ammoniumnitraat, ammoniumsulfaat, calciumnitraat, invert suiker, ureum en combinaties van deze stoffen.

Hoewel veel duurder en procesmatig ingewikkeld, wordt ook wel polyethyleenglycol als voorbehandelingsmiddel gebruikt.

In een met een brandvertragend middel (kwartenaire fosfaatverbindingen) geïmpregneerd hout, treedt eenzelfde als hiervoor beschreven verschijnsel op (L.B. Comvalius, "Het impregneren van Vuren en donkerrode Meranti met een viertal brandvertragende zouten", TNO-CHT, 1974).

Komt op deze wijze behandeld hout in een vochtige omgeving of wordt in de ruimte waarin het behandeld hout is verwerkt, de Rv hoger dan ca. 80%, dan wordt het houtoppervlak weer vochtig. Het zout trekt vocht aan en zal bij een Rv boven 80% vervloeien. Het impregneren van hout met een brandvertragend middel wordt soms voor bepaalde toepassingen in openbare gebouwen voorgeschreven.

b. Bevriezen

Het bevroren van vers gezaagd hout om de krimp en collaps tijdens het droogproces te beperken, werd ruim 40 jaar geleden door Amerikaanse onderzoekers onderzocht.

In deze voorbehandeling wordt het hout bij een ruimtetemperatuur van -25 tot -28 °C totaal bevroren, zodat de kern een inwendige temperatuur van -18 tot -20 °C verkrijgt. Bij het drogen van het ontdooid hout wordt algemeen ervaren, dat de kans op collaps en het ontstaan van oppervlaktesccheuren afneemt. Dit geldt echter niet voor alle houtsoorten. Soorten met een redelijk hoge tanningehalte, reageren beter op de vriesbehandeling dan soorten zonder tannine. Voor de houtsoorten Black cherry (*Prunus serotina*), American elm (*Ulmus americana*) en Redwood (*Sequoia sempervirens*) werd in het Amerikaans onderzoek een duidelijke krimpductie geconstateerd. Nederlands onderzoek (TNO) van de invloed van het bevroren van o.a. nat Redwood (80% vocht) gaf andere resultaten te zien. Deze houtsoort vriest bij -18 °C stuk op het tangentiale of dosse vlak bij een houtdikte van 3,5cm en meer. De dos gezaagde proefstukken van deze houtsoort waren na bevroren kromgetrokken. Collaps trad bij het ontdooide hout niet op, wel werd een geringe volumekrimp na het drogen waargenomen.

Zowel de extractie- als de bevroeringsmethoden hebben als voorbehandeling tot het droogproces in de loop der jaren geen grootschalige toepassing gevonden.

c. Voorstomen

Het voorstomen van hout is een algemeen bekende methode en heeft vaak een ander doel dan een voorbehandeling tot het kunstmatig droogproces.

Het stomen van hout vindt meestal plaats in stoomputten (betonnen of metalen bakken), die in de grond of op begane grond zijn gebouwd. De putten zijn altijd van een goedsluitend deksel voorzien.

Het te stomen hout wordt in de put op bokken vrij van de bodem gestapeld en vervolgens verzadigde stoom in de put geblazen. Doordat de put niet is uitgerust met een ventilator, zoekt de stoom haar eigen weg om het hout tot ca. 100 °C op te warmen. Een andere methode om het hout te stomen, is het opwarmen van een laag water in de put met verwarmingsbuizen of het inblazen van oververhitte stoom in de laag water. Boven de waterlaag ontstaat dan verzadigde damp waarin het te stomen hout staat. Tijdens de gehele behandeling, variërend van ½ tot 72 uren mag het hout niet in water komen te staan.

De Fransen passen bij Eiken- en Beukenhout een speciale stoombehandeling toe, die "dessevage des bois" wordt genoemd. Het gezaagde hout wordt in dit geval gestapeld zoals bij het droogproces en in een stoomput geplaatst. Het stomen vindt plaats door het inblazen van verzadigde lucht van 60 °C tot 70 °C. In de regel wordt dan 18 uren per cm houtdikte "gestoomd" (Villiere). Volgens deze Franse methode verloopt de droging hierna sneller en het werken neemt aanzienlijk af: "tuer nerf du bois".

Effecten van voorbehandeling

Verminderen van groeispanningen

In sommige houtsoorten komen vaak sterke groeispanningen voor en wel zodanig dat de stammen bij de kap al tot enkele meters openscheuren (Beuken, Krapa, Walaba). Het verminderen of wegnemen van deze groeispanningen in gezaagd hout is van groot belang om vervormingen tijdens het drogen te limiteren.

Gonet (1970, 1973) heeft aangetoond dat door een stoombehandeling bepaalde groeispanningen inderdaad kunnen worden opgeheven. Uit de onderzoeksgegevens van Gonet blijkt dat voor

38mm Beuken een stoomperiode van 24 uren reeds voldoende zal zijn om de groiespanningen in dit vers gezaagd hout, praktisch weg te werken. Tijdens de eerste uren van het stomen, kunnen de inwendige houtspanningen zodanig toenemen dat dit tot scheuren leidt. Volgens de gegevens van Gonet houden deze spanningen echter niet lang aan en nemen snel weer af.

Kleurbeïnvloeding

Bij sommige houtsoorten wordt een stoombehandeling toegepast speciaal om de kleur van het hout te beïnvloeden. Tijdens het stomen van van Beuken verkleurt het hout van rose naar rood toe. De kleurverandering is afhankelijk van de duur van het stomen en zal deze voor Beuken na 72 uren donkerrood en na 96 uren donker naar paarsrood zijn. Voor praktische toepassingen wordt Beukenhout normaliter tot maximaal 72 uren gestoomd.

Noten- en lepenhout worden gestoomd om het spinthout bij te kleuren, waardoor het kleurverschil met het kernhout geringer wordt en het spint dan ook kan worden gebruikt. Het echte Mahoniehout (*Swietenia sp.*) wordt soms gestoomd om een gelijkmatiger donkerrode kleur te verkrijgen.

Invloed op de krimp

De onderzoeker Kubinsky heeft veel onderzoekswerk verricht naar de invloed van het stomen op de krimp van hout. Deze constateerde dat na een stoombehandeling van ca. 6 uren in algemene zin de tangentiale krimp afneemt en de radiale krimp toeneemt. De veranderingen in krimpwaarden zijn voor de verschillende houtsoorten ook verschillend. Naarmate de duur van het stomen toeneemt, zal de tangentiale krimp toenemen in plaats van afnemen en de radiale krimp alsmar groter worden.

Hoewel de krimp de neiging vertoont om door het stomen toe te nemen, wordt het verschil tussen tangentiale en radiale krimp gunstiger. Het stomen als zodanig heeft niet een direct negatieve invloed op de krimp. Het voorstomen bij de fabricage van fineerplaten heeft ook een ander doel dan het verminderen van de krimpwaarden.

Invloed op het droogproces

Verskillende onderzoekers w.o. Ecklund (1961), Comstock (1965), Kinninmonth (1971) en Simpson (1975) hebben aangetoond dat een kortdurende stoombehandeling het droogproces bij verschillende houtsoorten positief beïnvloed. Het drogen gaat sneller na het stomen en de droogtijd wordt korter zonder noemenswaardig kwaliteitsverlies.

De behandelingsduur behoeft uit eigen ervaring bij vele houtsoorten niet langer dan $\frac{1}{2}$ tot maximaal 4 uren te duren. Voor elke houtsoort zal echter de optimumtijd dienen te worden uitgezocht teneinde ongewenste veranderingen in chemische, fysische en mechanische eigenschappen te voorkomen.

2. Opslag en behandeling van gedroogd hout

Wanneer eenmaal kunstmatig gedroogd hout in de buitenlucht komt te staan, zal het altijd vocht opnemen om in evenwicht te komen met het heersende buitenklimaat. In feite wordt hiermee een stuk van het verrichte drogerijwerk teniet gedaan. Het is dus zaak dit te voorkomen en gepaste maatregelen te nemen.

In geval het gedroogde materiaal niet direct naar de bestemming kan worden afgevoerd, dan zal de tijdelijke opslag moeten bestaan uit het inpakken in een stevige waterdichte folie. De partij zal om condensatievorming onder de folie te voorkomen óf in de schaduw (uit de zon) óf onder dak dicht op en aan elkaar moeten worden opgeslagen (koud tegen elkaar). Deze werkwijze moet absoluut als een tijdelijke worden beschouwd. Bij langdurige opslag op deze wijze zal onder folie een hoge Rv ontstaan (90-95%) met kans op schimmelvorming in de houtpakketten.

Gaat het om grote partijen gedroogd hout, die regelmatige vrijkomen om tijdelijk te worden opgeslagen, dan wordt aanbevolen om een gesloten opslagruimte in te richten. In een dergelijke ruimte zal slechts de Rv moeten worden bewaakt om te voorkomen dat het vochtgehalte van het materiaal niet verandert. Een gunstige Rv voor de opslag kan worden gevonden uit de hysteresigrafieken van de betreffende houtsoorten (kruising van vochtgehaltelijijn en adsorptielijn). Zie hiervoor ook de tabellen van gewenste of vereiste eindvochtgehalten.

De Rv in de opslagloods kan worden beheerst met behulp van een ontvochtiger (tropen) of via een geringe verwarming (sub-tropen) van de ruimte. In beide gevallen zal een goede hygrostaat met de sensor op ooghoogte gemonteerd, het klimaat bewaken.

Voor zij die het geloofden en trouw bleven.

El Mina-Afrika 1647.

Het fort werd in 1637 door Maurits van Nassau met een in Recife-Brazilië samengesteld vloot op de Portugezen veroverd. Hiermee werd het sein gegeven om wij van de "Ashantistam" uit ons stamland te exporteren en te exploiteren.

Gracias abuela Amalia, tia Jo Y descansar en paz.

Leon.

Literatuur

- 1 Anderson, A.B., 1966. Solvent drying dividend with Ponderosa pine. Forest Product Journal 15. USA.
- 2 Beall, F.C. and Spoerke, G.R., 1973. Degrade of Oak lumber as influenced by drying. Forest Product Journal 11. USA.
- 3 Bena, P., 1960. Essences Forestières de Guyana. Bur.Agric.et Forestal Guyanais. Paris, France.
- 4 Berni, C.A., Bolza, E. and Christensen, F.J., 1979. South American Timbers, the characteristics, properties and uses of 190 species. CSIRO. Melbourne, Australia.
- 5 Bramhall, G., Mackay, J.F.G. and Salamon, M., 1980. Kiln drying of lumber: Fifteen Questions and Answers. Western Forest Products Lab., SP-3R. Vol. IX. Canada.
- 6 Cech, M.Y. and Huffman, D.R., 1974. High temperature drying of mixed spruce, Jack pine and Balsam fir. Canadian Forest Service, 1337. Canada.
- 7 Centre Technique Forestier Tropical, 1971. Essais technologiques des bois de Guyana. Internal report, vol. 1. France.
- 8 Centre Technique Forestier Tropical, 1976. Essais technologiques des bois de Guyana. Internal report, vol. 2. France.
- 9 Cooper, G.A. and Barham, S.H., 1972. Prefreezing effects on three hardwoods. Forest Products Journal, 22. USA.
- 10 Cooper, G.A., Erickson, R. and Haygreen, J., 1970. The drying behaviour of prefrozen black walnut. Forest Product Journal, 290. USA.
- 11 Czepek, E., 1965. Aus der Praxis der Hochfrequenz Holz Trocknung Beil. Holzzentralblatt, 63. Germany.
- 12 Erickson, R., Damarec, L., Johnston, P. and Morton, E., 1971. Prefreezing alone and combined with presteaming in the drying of Redwood dimension. Forest Product Journal, 21. USA.

- 13 Evertsen, J., Knagg, O., Osea, J., 1997. Timber drying and kiln operations. Technology skills for the timber industry.
- 14 F.A.O., 1970. Estudio de preinversion para el desarrollo forestal maderas del area del proyecto. FAO Report SF; 82 VEN 5. Rome, Italy.
- 15 Gefahrt, J., 1972. Holzrocknung mit Hoch-frequenz. I, II, III. Holz und Kunststoff-verarbeitung. 460/63, 582/88. Germany.
- 16 Glazewski, J.A. and Eckelman, C.A., 1971. Azeotropic destillation drying of wood with Polar and non-Polar solvents. *Holzforschung*, 25. Germany.
- 17 Gonet, B., 1970. Einfluss des Dämpfens auf die Relaxion der Spannungen in Rotbuchenholz. *Holztechnik* 11/2. Germany.
- 18 Gonet, B., 1973. Der Einfluss des Dämpfens auf die Eigenschaften von Rotbuchenholz. *Holztechnik* 14/2. Germany.
- 19 Hering, C. und Eppinger, R., 1976. Die Schnittholzcondensations trocknung. *Holz Zentralblatt* 5. Germany.
- 20 Hittmeier, M.E., Comstock, G.L. and Hann, R.A., 1967. Press-drying nine species of wood. *Forest Product Journal* 18/9. USA.
- 21 Houtinstituut TNO. Laming, P.B., Rijdsijk, J.F., Verwijs, J.C., 1977. Houtsoorten Informatie voor de praktijk. Delft, Nederland.
- 22 Huffman, D.R., Pfaff, F. and Shah, S.M., 1972. Azeotropic drying of Yellow birch and hard maple lumber. *Forest Product Journal*, 22/8. USA.
- 23 Keenan, F.J. and Tejada, M., 1984. Tropical timber for building materials in the Andean group countries of South America. International Development Research Centre, IDRC-TS 49e. Ottawa, Canada.
- 24 Kleemans, P.A.M., 1967. Onderzoek naar de relatie vochtgehalte en vorstbeschadiging bij Red wood. Houtinstituut TNO, IR-H-67/XXV. Delft, Nederland.

- 25 Kleemans, P.A.M., 1967. Onderzoek naar het drogen van bevroren Red wood. Houtinstituut TNO, IR-H-67/XXV. Delft, Nederland.
- 26 Kollman, F.F.P. and Coté, W.A., 1968. Principles of Wood Science and Technology. Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.
- 27 Kröll, K., 1951. Die Bewegung der Feuchtigkeit in Nadelholz während der Trocknung Bei Temperaturen um 100 °C. Holz Als Roh-und Werkstoff, 9: 1976-181.
- 28 Kubinsky, E. and Ifju, G., 1974. Influence of steaming on the properties of Red oak II. Changes in shrinkage and related properties. Wood science 7/2. USA.
- 29 Kühne, H., 1974. Spezial Verfahren der Holz-trocknung. Schweiz. Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung Referat.
- 30 Lempelius, J., 1969. Die Schnittholz-Trocknung. Robert Hildebrand. Oberboihingen. Germany.
- 31 Mainieri, C. and Chimelo, J.P., 1989. Fichas de características das madeiras Brasileiras. IPT Publication 1971. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Division de Madeiras. Sao Paulo, Brazil.
- 32 Malmquist, L. und Noack, D., 1960. Utersuchungen über die Trocknung empfindlicher Laubhölzer in reinem Heiszdampf (ungesättigter Wasserdampf) bei Unterdruck. Holz als Roh and Werkstoff, 5. Germany.
- 33 Panshin, A.J. and de Zeeuw, C., 1973. Textbook of Wood Technology. Michigan State University and State University College of Forestry at Syracuse University, Third Edition.
- 34 Pratt, G.H., 1974. Timber drying manual. London, England.
- 35 Queméré, Y., 1976. Caractéristiques des séchoirs à bois parpompe de chaleur, distribués sur le marché. Centre Technique du Bois. Paris, France.
- 36 Queméré, Y., 1976. La régulation des séchoirs à bois par pompe de chaleur. Centre Technique du Bois. Paris, France.

- 37 Rijsdijk, J.F. and Laming, P.B., 1994. Physical and Related Properties of 145 Timbers. Information for Practice. Kluwers Academic Publishers - the Netherlands.
- 38 Schneider, A., 1973. Zur konvektionstrocknung von Schnittholz bei extrem hohen Temperaturen. Holz als Roh und Werkstoff, 30/31. Germany.
- 39 Seth, K.K., Anderson, A.B. and Wike, C.R., 1965. Solvent drying of California Red wood. Forest Product Journal 7. USA.
- 40 Simpson, W.T., 1975. Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. Wood Science 7/3. USA.
- 41 Steinhagen, H.P., 1974. Effect of kiln air velocity at various moisture content levels on drying rate of 4/4 Yellow polar sapwood. Forest Product Journal 24/4. USA.
- 42 Stevens, W.C. and Pratt, G.H., 1961. Kiln operators' handbook. London, England.
- 43 Terazawa, S. and Hayash, K., 1974/1977. Studies on collapse of water saturated Balsa wood. Journal of Japanese Wood Research Society 20,5/23,1.
- 44 Ullevalseter, O., 1966. Lumber drying by condensation with the use of refrigerated dew points. Institute of Wood Technology 1432/As-NLH. Norway.
- 45 Ullevalseter, O., 1966. Lumber drying by the dehumidification technique. Norsk Skog-industri. Norway.
- 46 Vaget, H., 1961. Kontinuierliches Holzrocknen in Hochfrequenz feld. Holz Zentralblatt 51. Germany.
- 47 Villiere, A., 1953. Sechage des bois. Centre Technique du Bois. Paris, France.
- 48 Villière, A., 1973. L'emploi des appareils frigorifique pour la séchage des bois. IUFRO/V Congress.
- 49 Villière, A., 1974. L'emploi des appareils frigorifiques pour le séchage des bois. Bois et Forestier Tropical 155. France.

Bijlage I.

Houtsoorten in de tekst

Handelsnaam	Herkomst	Botanische naam
Abachi	Colombia	<i>Triplocton scleroxylon</i>
Acapu / Wacapu	Guianas & Brazilië	<i>Vouacapoua americana</i>
Afromosia	Afrika	<i>Pericopsis elata</i>
Afzelia	Afrika	<i>Afzelia africana</i>
Alerce	Chili	<i>Fitzroya patagonica</i>
Amerikaanse elm	Noord Amerika	<i>Ulei americana</i>
Angelim	Guianas & Brazilië	<i>Hymenolobium flavum</i>
Angelin	Guianas & Brazilië	<i>Andira coriacea/A. inermis</i>
Angélique	Guianas & Brazilië	<i>Dicorynia paraënsis/D. guianensis</i>
Arisauro	Guianas & Brazilië	<i>Vatairea guianensis</i>
Assao	Guianas & Brazilië	<i>Pithecellobium pedicellare</i>
Bacuri	Guianas & Brazilië	<i>Platonia insignis</i>
Beuken	Amerika & Europa	<i>Fagus silvatica</i>
Black cherry	Noord Amerika	<i>Prunus serotina</i>
Buracca	Guianas & Brazilië	<i>Parinari campestris</i>
Caqui	Guianas & Brazilië	<i>Caryocar glabrum</i>
Carapa	Guianas & Brazilië	<i>Carapa guianensis</i>
Dukaria	Guianas & Brazilië	<i>Sacoglottis guianensis</i>
Envira	Guianas & Brazilië	<i>Xylopia aromatica</i>
Essen	Amerika & Europa	<i>Fraxinus excelsior</i>
Honduras mahoni	Midden Amerika	<i>Swietenia macrophylla</i>
Imbuia	Brazilië	<i>Ocotea porosa</i>
Iroko	West Afrika	<i>Chlorophora excelsa</i>
Jaboti / Cambara	Guianas & Brazilië	<i>Erisma uncatum</i>
Jatoba	Guianas & Brazilië	<i>Hymenaea courbaril</i>
Keroewing	Maleisië / Sabah	<i>Dipterocarpus sp.</i>
Kimboto	Guianas & Brazilië	<i>Pouteria ptychandra</i>
Makoré	West Afrika	<i>Tiechemella heckelii</i>
Mandio	Guianas & Brazilië	<i>Qualea albiflora</i>

Mora	Guianas & Brazilië	<i>Mora excelsa</i>
Muninga	Afrika	<i>Pterocarpus angolensis</i>
Pitch pine	Midden & Zuid Amerika	<i>Pinus sp.</i>
Quaruba	Guianas & Brazilië	<i>Vochysia sp.</i>
Red lauan	Fillepijnen	<i>Shorea negrosensis</i>
Red meranti	Maleisië / Sabah	<i>Shorea curtisii/S. pauciflora</i>
Red wood	Noord Amerika	<i>Sequoia sempervirens</i>
Sali	Guianas & Brazilië	<i>Tetragastris altissima</i>
Teak	Afrika & Azië	<i>Tectona grandis</i>
Timborana	Guianas & Brazilië	<i>Newtonia suaveolens</i>
Virola	Guianas & Brazilië	<i>Virola surinamensis</i>
Walaba / Apa	Guianas & Brazilië	<i>Eperua falcata</i>
Wana / Determa	Guianas & Brazilië	<i>Ocotea rubra/Nectandra rubra</i>

Bijlage I.

Houtsoorten in de tekst

Handelsnaam	Herkomst	Botanische naam
Abachi	Colombia	<i>Triplocton scleroxylon</i>
Acapu / Wacapu	Guianas & Brazilië	<i>Vouacapoua americana</i>
Afromosia	Afrika	<i>Pericopsis elata</i>
Afzelia	Afrika	<i>Afzelia africana</i>
Alerce	Chili	<i>Fitzroya patagonica</i>
Amerikaanse elm	Noord Amerika	<i>Ulei americana</i>
Angelim	Guianas & Brazilië	<i>Hymenolobium flavum</i>
Angelin	Guianas & Brazilië	<i>Andira coriacea/A. inermis</i>
Angélique	Guianas & Brazilië	<i>Dicorynia paraënsis/D. guianensis</i>
Arisauro	Guianas & Brazilië	<i>Vatairea guianensis</i>
Assao	Guianas & Brazilië	<i>Pithecellobium pedicellare</i>
Bacuri	Guianas & Brazilië	<i>Platonia insignis</i>
Beuken	Amerika & Europa	<i>Fagus silvatica</i>
Black cherry	Noord Amerika	<i>Prunus serotina</i>
Buracca	Guianas & Brazilië	<i>Parinari campestris</i>
Caqui	Guianas & Brazilië	<i>Caryocar glabrum</i>
Carapa	Guianas & Brazilië	<i>Carapa guianensis</i>
Dukaria	Guianas & Brazilië	<i>Sacoglottis guianensis</i>
Envira	Guianas & Brazilië	<i>Xylopia aromatica</i>
Essen	Amerika & Europa	<i>Fraxinus excelsior</i>
Honduras mahoni	Midden Amerika	<i>Swietenia macrophylla</i>
Imbuia	Brazilië	<i>Ocotea porosa</i>
Iroko	West Afrika	<i>Chlorophora excelsa</i>
Jaboti / Cambara	Guianas & Brazilië	<i>Erismia uncatum</i>
Jatoba	Guianas & Brazilië	<i>Hymenaea courbaril</i>
Keroewing	Maleisië / Sabah	<i>Dipterocarpus sp.</i>
Kimboto	Guianas & Brazilië	<i>Pouteria ptychandra</i>
Makoré	West Afrika	<i>Tiechemella heckelii</i>
Mandio	Guianas & Brazilië	<i>Qualea albiflora</i>

Mora	Guianas & Brazilië	<i>Mora excelsa</i>
Muninga	Afrika	<i>Pterocarpus angolensis</i>
Pitch pine	Midden & Zuid Amerika	<i>Pinus sp.</i>
Quaruba	Guianas & Brazilië	<i>Vochysia sp.</i>
Red lauan	Fillepijnen	<i>Shorea negrosensis</i>
Red meranti	Maleisië / Sabah	<i>Shorea curtisii/S. pauciflora</i>
Red wood	Noord Amerika	<i>Sequoia sempervirens</i>
Sali	Guianas & Brazilië	<i>Tetragastris altissima</i>
Teak	Afrika & Azië	<i>Tectona grandis</i>
Timborana	Guianas & Brazilië	<i>Newtonia suaveolens</i>
Virola	Guianas & Brazilië	<i>Virola surinamensis</i>
Walaba / Apa	Guianas & Brazilië	<i>Eperua falcata</i>
Wana / Determa	Guianas & Brazilië	<i>Ocotea rubra/Nectandra rubra</i>

Bijlage II.

Surinaamse molenhoutsoorten

Lokale naam	Botanische familie & boomsoorten
	ANACARDIACEAE
Slangenhout / Snek'-udu	<i>Loxopterygium sagotii</i>
	ANNONACEAE
Pedrekupisi	<i>Xylopia aromatica/ X. longifolia/X. nitida</i>
	APOCYNACEAE
Kromantikopi	<i>Aspidosperma cruentum/ A. album/A. helstonei</i>
Bergibita	<i>Geissospermum sericeum</i>
Mapa (Sokosoko)	<i>Parahancornia fasciculata</i>
	BIGNONIACEAE
Gubaja	<i>Jacaranda copaia</i>
Groenhart / Grinati	<i>Tabebuia serratifolia</i>
	BOMBACACEAE
Barmani	<i>Castostemma fragans</i>
	BURSERACEAE
Tingimoni	<i>Protium decandrum/P. tenuifolium/ P. polybotryum/P. heptaphyllum</i>
Redisali	<i>Tetragastris altissima/ T. panamensis</i>
	CARYOCARACEAE
Sawari	<i>Caryocar glabrum/C. nuciferum/ C. microcarpum</i>

	CELASTRACEAE
Kopi	<i>Goupia glabra</i>
Sowtumeti	<i>Maytenus myrsinoides</i>
	CHRYSOBALANACEAE
Kwepi	<i>Licania laxiflora</i>
Fungu	<i>Licania majuscula</i>
Anawra	<i>Licania heteromorpha</i>
Redifungu	<i>Parinari camprestris</i>
	CLUSIACEAE
Kurali/Koerli	<i>Callophyllum longifolium/</i> <i>C. brasiliense</i>
Pakuli/Gerati	<i>Platonia insignis</i>
Mataki/Mani	<i>Symphonia globulifera</i>
	COMBRETACEAE
Djindja-udu	<i>Buchenavia capitata</i>
Busi-amandra	<i>Terminalia dichotoma</i>
	EUPHORBIACEAE
Foman	<i>Chaetocarpus schomburgkianus</i>
Possentri	<i>Hura crepitans</i>
Ajo-ajo/Suradanni	<i>Hyeronima alchorneoides</i>
Basrabebe/Manbebe	<i>Alchorneopsis trimera</i>
	FLACOURTIACEAE
Kaaiman-udu/Pintokopi	<i>Laetia procera</i>
	HUMIRIACEAE
Bofru-udu	<i>Sacoglottis cydonioides</i>
Meri/Blakaberi	<i>Humiria balsamifera</i>
	ICANICACEAE
Jakanta	<i>Poraqueiba guianensis</i>

	LAURACEAE
Pisi	<i>Nectandra pisi/Ocotea splendens</i>
Wanapisi	<i>Ocotea oblonga</i>
Wetipisi	<i>Ocotea globifera/O.petalanthera</i>
Blakapisi	<i>Nectandra grandis/Ocotea glomerata</i>
Kanerpisi	<i>Licaria guianensis</i>
Zilverpisi	<i>Ocotea guianensis</i>
Wana	<i>Ocotea rubra/Nectandra rubra</i>
Kaner'ati	<i>Licaria canella/L.cayennensis</i>
	LECYTHIDACEAE
Ingipipa	<i>Couratari guianensis/C. gloriosa/ C.multiflora</i>
Inginoto	<i>Bertholletia excelsa</i>
Kwatapatu	<i>Lecythis zabucajo</i>
Titei-udu	<i>Lecythis chartacea/L. simiorum</i>
Heigron manbarklak	<i>Eschweilera subglandulosa</i>
	LEGUMINOSAE (MIMOSOIDEAE)
Agrobigi	<i>Parkia nitida</i>
Busitamarin	<i>Hydrocherea corymbosa/ Pithecellobium spp.</i>
Pikinmisiki	<i>Newtonia suaveolens</i>
Prokoni	<i>Inga alba</i>
Kwatakama	<i>Parkia pendula/Inga pendula</i>
Sopo-udu	<i>Abarema jupunba/Pithecellobium jupunba</i>
Swietbonki	<i>Inga spp. (21 species)</i>
Donsedre	<i>Cedrelinga cateniformis</i>
Tamarinprokoni	<i>Pithecellobium pedicellare</i>
	LEGUMINOSAE (PAPILIONOIDEAE)
Arumata	<i>Clathrotrophis brachypetala</i>
Busimahoni	<i>Martiodendron parviflorum</i>
Makakabisi	<i>Hymenolobium flavum</i>
Kunatepi	<i>Platymiscium trinitatis/P. ulei</i>

Redidjedu	<i>Sclerolobium albiflorum</i>
Redikabisi	<i>Andira inermis/A. coriacea</i>
Blakakabisi	<i>Diplotropis purpurea</i>
Isri-ati	<i>Swartzia prouacensis</i>
Gerikabisi	<i>Vatairea guianensis/V. speciosa</i>
Tonka	<i>Dipteryx odorata/D. punctata</i>
Jongokabisi	<i>Vataireopsis speciosa</i>
Gandu	<i>Swartzia tomentosa</i>
	LEGUMINOSAE (CEASALPINIODEAE)
Djedu	<i>Sclerolobium guianense</i>
Djadidja	<i>Sclerolobium melinonii</i>
Basraloksi	<i>Dicorynia guianensis</i>
Walaba	<i>Eperua spp.</i>
Broinati	<i>Vouacapoua americana</i>
Rediloksi	<i>Hymenaea courbaril</i>
Mora	<i>Mora excelsa</i>
Purperhart/Alastan	<i>Peltogyne pubescens/P. venosa</i>
	MELIACEAE
Sedre/Ceder	<i>Cedrela odorata</i>
Krapa	<i>Carapa guianensis/C. procera</i>
Sorosali	<i>Trichilia micrantha/T. surinamensis</i>
	MORACEAE
Kaw-udu	<i>Bagaisa guianensis</i>
Manletre	<i>Manquira guianensis</i>
	MYRISTICACEAE
Brudu-udu	<i>Iryanthera sagotiana</i>
	OLACACEAE
Pataku-wana	<i>Chaunochiton kappleri</i>

	POLYGONACEAE
Mira-udu	<i>Triplaris surinamensis</i>
	SAPINDACEAE
Blaka-pintoloksi	<i>Talisa sylvatica</i>
	SAPOTACEAE
Batambali	<i>Ecclinusa guianensis</i>
Bolletri/Bortri	<i>Manilkara bidentata</i>
Djubortri	<i>Chrysophyllum priouri</i>
Kimboto	<i>Pouteria ptychandra</i>
Pintobortri	<i>Pouteria cladantha/P. cuspidata</i>
Blakalo-udu/Wetilo-udu	<i>Micropholis guianensis</i>
Jamboka/Jansnijder	<i>Pouteria guianensis</i>
Kwasiba	<i>Pouteria spp.</i>
	SIMAROUBACEAE
Sumaruba	<i>Simarouba amara</i>
	VOCHYSIACEAE
Bergigronfolo	<i>Qualea rosea</i>
Heigrongronfolo	<i>Ruizterania albiflora</i>
Gujabakwari	<i>Qualea dinizii</i>
Aprakwari	<i>Vochysia densiflora</i>
Wanakwari	<i>Vochysia tomentosa</i>
Wiswiskwari	<i>Vochysia guianensis</i>
Mawsikwari/Felikwari	<i>Erisma uncinatum</i>

Bijlage III.

In de tekst gebruikte eenheden en Griekse tekens

$$1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$$

$$1'' = 2,54 \text{ cm}$$

$$1' = 30,48 \text{ cm} = 0,3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ cf} = 0,028 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ g} = 1000 \text{ mg}$$

$$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$$

$$1 \text{ ton} = 1000 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kton} = 10^6 \text{ kg}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N/m}^2 \text{ (Newton)}$$

$$1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pascal}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm kwikdruk} = 1013,2 \text{ mbar (millibar)}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ aardgas} \approx 35,2 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ ton diesel/gasolie} \approx 45 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ ton zware stookolie} \approx 43 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ ton benzine/nafta} \approx 46 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ Joule}$$

$$\chi = \text{chi}$$

$$\varphi = \text{psilon (variant)}$$

$$\delta = \text{delta}$$

$$\Delta = \text{delta (variant)}$$

$$\Theta = \text{theta}$$

$$\rho = \text{rho}$$

$$\sigma = \text{sigma (variant)}$$

Aanvulling controle-apparatuur.

Drogebol en nattebol hygrometer

Voor de directe controle en bijsturing van het droogproces is het aan te bevelen om ongeacht de ingebouwde automatische sturing in moderne houtdrogers, de "kilnoperator" in staat te stellen om op een eenvoudige wijze het houtvochtgehalte, de droger temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid op elk gewenst tijdstip te kunnen waarnemen en bijsturen. De "operator" moet daartoe de voornoemde parameters kunnen analyseren óf voor bijstelling van de "setpoints" óf de automatisch werkende procesapparatuur.

Bij een juiste bemonstering van het droogproces middels voorgedroogde teststalen (10.2) kan het vochtgehalte van de houtlading in de droger periodiek worden ingeschat. Als eenmaal het beginvochtgehalte van de houtlading is vastgesteld en de teststalen in de houtpakketten zijn toegevoegd, kan door herhaald terugwegen van de stalen het verloop van het vochtgehalte tijdens het droogproces indicatief worden vastgesteld.

Een eenvoudige droge- en nattebol hygrometer zal evenwel dienst kunnen doen om het klimaat in de droger te controleren. Deze hygrometer bestaat uit twee kwikthermometers of twee spiritusglas-thermometers. De bol van een van de thermometers wordt middels een "katoentje" nat gehouden, terwijl de andere thermometer vrij in de luchtstroom is geplaatst (Fig. 24).

Er bestaat in wezen een tegengestelde relatie tussen de natteboldepressie en de relatieve luchtvochtigheid; hoe meer de natteboldepressie onder de drogebolweergave ligt, des te lager de R_v bij een bepaalde drogeboltemperatuur. Op basis van deze relatie zijn tabellen ontwikkeld waarmee de derde onbekende factor kan worden berekend als een van de andere factoren bekend is.

Voorbeeld:

Drogebol temperatuur = $80\text{ }^\circ\text{C}$

Nattebol temperatuur = $69,5\text{ }^\circ\text{C}$

De natteboldepressie is dan $(80-69,5) = 10,5\text{ }^\circ\text{C}$.

De R_v is derhalve 62%.

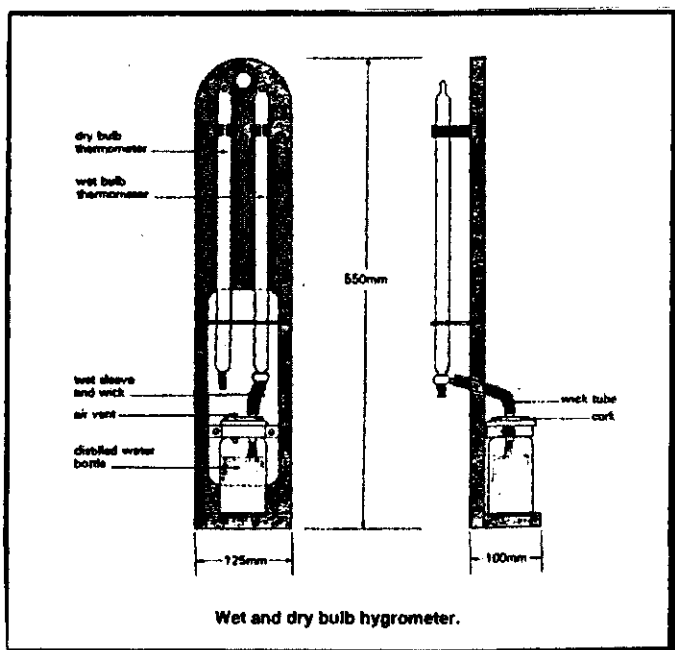


Fig. 24. Droge en nattebol thermometer.

Aanvulling dehumidificatiedroging.

Solaire dehumidificatiedrogers

Een belangrijke modificatie in het systeem van dehumidificatie droging van de afgelopen jaren is de incorporatie van een zonnecollector, ondergebracht in een speciaal kanaal in de droger. De functie van de collector is het verhogen en bijstellen van de droogtemperatuur tijdens het proces.

De modificatie houdt tevens in dat de compressor buiten de droogkamer is geplaatst en in het zonnecollectorkanaal een regelklep en ventilator met solenoïde-regeling zijn ingebouwd.

De warmtestraling bij dit systeem wordt zodanig geregeld dat na passage door de houtstapel een deel van de luchtstroom gestuurd wordt door de verdamper (condensor van de dehumidicator) naar het collectorkanaal waar de drogelucht wordt opgewarmd. De door de collector verwarmde lucht stroomt dan automatisch terug in de droger.

In het systeem is ook een warmte omloopkanaal tussen de collector en de drogerwand geconstrueerd. Bij een lagere temperatuur van de collector dan die in de droger, zal de regelklep worden afgesloten en gedehumidificeerde lucht naar de droger teruggevoerd. In geval de temperatuur in de collector hoger is dan die in de droogkamer, zal de regelklep het omloopkanaal afsluiten zodat de aanvoerlucht door de collector in voldoende mate wordt opgewarmd voor dat het aan de droogkamer wordt afgestaan.

De droogtijd met dit type droger is zoals bij zonne-energie afhankelijke systemen variabel, doch het eindresultaat bevredigend. Toepassing van dit type drogers vindt vooral plaats in Maleisië en Indonesië.

Bijlage VI.

Droogschema's.

Het droogproces van hout in een beheerst milieu, zoals in een kunstmatige drooginstallatie wordt in het algemeen geleid door een schema. Droogschema's zijn overzichtstabellen waarin de vereiste atmosferische condities in de droogkamer bij het droogproces op een zodanige wijze worden weergegeven dat de "operator" het drogen kan controleren en sturen. Als het droogproces automatisch wordt aangestuurd dan is het schema in de "microprocessor" voorgeprogrammeerd, zodat bij vochtveranderingen in de houtmassa het droogmilieu eveneens verandert teneinde aan het gewenste eindvochtgehalte te kunnen voldoen.

Het in de vorige paragrafen besproken "vochtgradiënt" is het criterium dat gehandhaafd dient te worden om het droogproces systematisch te continueren. De wijze waarop een "gradiënt" tot stand komt, is het manipuleren van de regelingen zodat de Rv in de droger overeenkomt met een gewenst eindvochtgehalte dat lager ligt dan het oorspronkelijk vochtgehalte in de houtmassa.

Het "gradiënt" kan op basis van de psychrometrische weergave waarop het evenwichtsvochtgehalte voor combinaties van drogeboltemperatuur en Rv zijn weergegeven, worden gecalculerd. Hoe lager de Rv, des te steiler het vochtgradiënt waardoor oppervlakte verdamping van het materiaal versneld plaatsvindt.

Het vochtgradiënt van een partij hout kan als volgt worden gecalculerd:

$$\text{Vochtgradiënt} = \frac{(\text{Vg}) - \text{houtvochtgehalte} (\%)}{(\text{Ev}) - \text{evenwichtsvochtgehalte} (\%)}$$

Bij een houtvochtgehalte van bijvoorbeeld 16% en een Ev van 12%, is het vochtgradiënt dan $16/12 = 1,3$.

Droogschema's werden al in de vorige eeuw na langdurig experimenten (trails and errors) voor diverse houtsoorten ontwikkeld en vormen thans de basis voor gecontroleerd, kunstmatig houtdrogen in gesloten kamers ("kilns").

In Engeland* werden in de loop der jaren 12 droogschema's ontwikkeld, van milde lage temperaturodroging (Schema A tot G) tot redelijk hoge temperatuur en sneldroogprocessen (Schema H tot M). De Engelse schema's zijn op basis van toenemende temperatuur en afnemende Rv voor het drogen van houtdikten tussen 25mm en 38mm geformaliseerd met aanpassingen voor houtdikten tot 75mm of meer.

De Amerikaanse benadering voor de droogschema's is meer gebaseerd op individuele houtsoorten van verschillende afmetingen en kwaliteitsgraad. Er bestaan echter ook Amerikaanse schema's die speciaal zijn ontwikkeld voor vochtgehaltecontrole systemen, tijdcontrole en hoge temperatuur systemen. Deze benadering heeft geleid tot het bestaan van honderden droogschema's die buiten het kader van deze publikatie vallen.

Moderne houtdrogers zijn ontworpen om de drogeboltemperatuur, de Rv (natteboldepressie) en luchtcirculatie gecontroleerd aan te sturen. Bij een goede bewaking en bij regeling van deze variabelen tijdens het droogproces, zullen die leiden tot een versnelde droging en kwaliteitsbehoud van het materiaal.

De hieronder opgenomen droogschema's zijn afgeleid van literatuurdata en van eigen ervaring met kunstmatig houtdrogen.

Standaard droogkamerschema's voor tropische hardhoutsoorten:

Droogschema A. Houtsoorten: Kwari's, Kurali.

		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
		drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	38-75mm nattebol (°C)	>75mm nattebol (°C)
Stadia	Hout Vg (%)					
1	vers	35,0	30,5	70	31,0	32,0
2	60	35,0	28,5	60	29,5	30,5
3	40	40,0	31,0	50	32,0	33,0
4	30	45,0	32,5	40	34,0	35,0
5	20	50,0	35,0	35	36,5	38,0
6	15	60,0	40,5	35	42,5	44,5

* Forest Products Research Laboratory & Forest Products Laboratory.

Droogschema B. Houtsoorten: Bolletri, Basralokus, Mora, Purperhart, Walaba

		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
					38-75mm	>75mm
Stadia	Hout Vg (%)	drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	nattebol (°C)	nattebol (°C)
1	vers	40,0	37,5	85	38,5	39,0
2	40	40,0	36,5	80	37,5	38,5
3	30	45,0	40,5	75	41,5	42,5
4	25	50,0	44,5	70	45,0	46,3
5	20	55,0	48,0	60	47,5	48,5
6	15	60,0	47,5	50	49,5	50,5

Droogschema C. Houtsoorten: Krapa, Tingimoni, Rode lokus, Mataki, Pakuli

		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
					38-75mm	>75mm
Stadia	Hout Vg (%)	drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	nattebol (°C)	nattebol (°C)
1	vers	40,0	37,5	85	38,5	39,0
2	60	40,0	36,5	80	37,5	38,5
3	40	45,0	40,5	75	41,5	42,5
4	35	45,0	39,5	70	40,5	41,5
5	30	45,0	38,5	65	39,5	40,5
6	25	50,0	42,0	60	43,0	44,0
7	20	60,0	47,5	50	49,0	50,5
8	15	63,0	48,5	40	50,5	52,5

Droogschema E. Houtsoorten: Barmani, Kromantikopi, Wana.

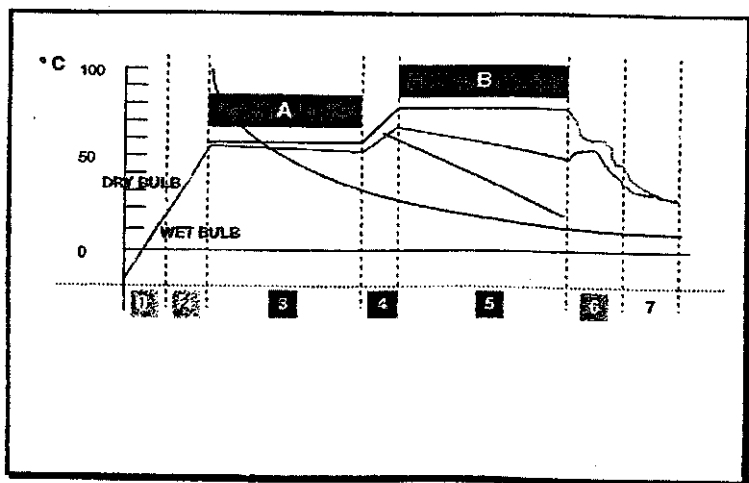
		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
					38-75mm	>75mm
Stadia	Hout Vg (%)	drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	nattebol (°C)	nattebol (°C)
1	vers	50,0	47,0	85	48,0	49,0
2		50,0	46,0	80	47,0	48,0
3		50,0	45,0	75	46,0	47,0
4		55,0	47,5	70	48,5	50,0
5		60,0	49,0	65	50,5	52,0
6		70,0	54,0	60	56,5	58,0
7		75,0	56,5	50	58,5	60,5

Droogschema G. Houtsoorten: Kaw-udu, Kimboto, Makakrapa

		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
					38-75mm	>75mm
Stadia	Hout Vg (%)	drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	nattebol (°C)	nattebol (°C)
1	vers	50,0	47,0	85	48,0	49,0
2	60	50,0	46,0	80	47,0	48,0
3	40	55,0	51,0	80	52,0	53,0
4	30	60,0	54,5	75	55,5	57,0
5	25	70,0	62,5	70	64,0	65,0
6	20	75,0	62,5	55	64,0	65,5
7	15	80,0	61,0	40	63,0	65,0

Droogschema H. Houtsoorten: Ceder, Pinus, Pisi's

		Schemacondities voor dikten tot 38mm			Modificatie voor grotere dikten	
					38-75mm	>75mm
Stadia	Hout Vg (%)	drogebol (°C)	nattebol (°C)	Rv (%)	nattebol (°C)	nattebol (°C)
1	vers	60,0	55,5	80	57,0	58,0
2	50	60,0	54,5	75	55,5	57,0
3	40	60,0	52,0	65	53,0	54,5
4	30	65,0	53,5	55	55,0	56,5
5	20	75,0	56,5	40	58,5	60,5



Grafische voorstelling van het droogproces.

- 1-2 Normale opwarmingsfase
- A-3 Droogfase boven VVP
- 4- Tussenfase van temperatuurcorrectie
- B-5 Droogfase beneden VVP (Ev)
- 6- Egaliseren van R_v en t
- 7- Afkoeling