

## 2. PUIT

**Puit on puittaimede (puude, põõsaste) tüve ja okste põhiosa, mis koosneb peamiselt puitunud rakkudest.**

Puidurakkude kest koosneb põhiliselt tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist. Ligniin annab puidule mehaanilise tugevuse. Männi-, kuuse- ja kasepuidu kuivaines on tselluloosi 40...45%, hemitselluloosi 25...40%. Ligniini sisaldus okaspuude kuivaines on 24...33%, lehtpuudes 16...25%. Puidu kütteväärtusest langeb *ca* 40% ligniinile.

Metsas kasvava puu kogumahust saadakse puitu 59...69% (okaspuud), oksad, kännud ja koor moodustavad 31...41%. Puu biomassi jagunemine tüve, koore, okste ja lehtede (okaste) vahel sõltub suuresti puu liigist ja vanusest.

Puidu biomassi kui taastuvat vaadeldakse tänapäeval nii stabiilse energiaallikana kui ka toorainena keemiatööstusele. Ülemaailmse energeetika nõukogu andmetel (selle sajandi alguses) kasutati puitu maailmas  $1,9 \cdot 10^9$  (miljardit)  $m^3$ , puidujäätmeid aga 300 miljonit  $m^3$ .

Ülemaailmse energeetika nõukogu andmetel kasutati biomassi puiduna 1,9 mld  $m^3$ , puidujäätmetena 300 mln  $m^3$ . Euroopa Liidu riikides kaetakse keskmiselt 3,5% energiavajadusest biomassi arvelt, mõnedes maades on see näitaja aga tunduvalt kõrgem: 23% Soomes, 18% Rootsis ja 12% Austrias.

Maaülikooli andmetel on 2,27 mln ha ehk 51,5% Eesti pindalast kaetud metsaga, mille kasvav varu on *ca* 449 mln  $m^3$ . Vastavalt metsanduse arengukavale (2001–2010) võiks lubatav raiemaht ulatuda 13,1 mln  $m^3$ -ni. Sellest võiks kütusena kasutada 5 mln  $m^3$ , statistikaameti andmetel on küttepuude kogus *ca* 3 mln  $m^3$  aastas.

**Puidujäätmed** tekivad nii metsa ülestöötamisel (raiejäätmed) kui ka puidu töötlemisel (puidutöötlemisjäätmed).

Toormaterjalist läheb saagimisel puidutöötlemisjäätmeteks 35...40%, vineeri tootmisel kuni 60% ja mööblitööstuses 60...70%. Puidutöötlemisjäätmete hulka loetakse ka koor, saepuru ja hõövlilaastud.

Kateldes ja ahjudes kasutatavate puidust biokütuste liigid:

- *Halupuit* – tarbepuiduks sobimatutest tüvedest või nende osadest saetud ja lõhutud kindla pikkusega (1; 0,75; 0,5; 0,33 või 0,25 m) halud.
- *Hakkpuit* – spetsiaalse hakkuriga tarbepuiduks sobimatutest tüvedest, laasitud tüvedest, raie- või puidutöötlemisjäätmetest saadud peenestatud kütteaine (keskmine tüki pikkus 25...40 mm).
- *Puidubrikett* – peenestatud ja kuivatatud tootmisjäätmetest kõrge rõhu all (70...200 MPa) sideaineta pressitud, tihedad, korrapärase kujuga tooted. Külje pikkus või läbimõõt on 50...80 mm. Briketi keskel võib olla ava läbimõõduga 10...20 mm. Mõõtmised võivad olla ka samad mis turfabriketil –  $180 \times 75 \times 35$  mm.
- *Puidupelletid ehk graanulid* – kuivatatud ja peenestatud puidujäätmetest pressitud peened (sõrmejämehused) pulgad või kuubid.
- *Puusüsi* – suure süsinikusisaldusega (*ca* 80%) ning kõrge kütteväärtusega (27...31 MJ/kg) aine, mis tekib puidu kuumutamisel õhu juurdepääsuta või vähese juurdepääsu korral.
- *Puugaas* – puidu termilisel lagunemisel (kuumutamisel ilma õhu juurdepääsuta) või gaasistamisel saadav põlevgaas kütteväärtusega 4,5...15 MJ/ $m^3$ . Eristatakse kahte liiki: generaatorgaas, mille peamiseks põlevosaks on CO, ja vesigaas, mille põlevosa moodustavad CO ja H<sub>2</sub>.

## 2.1. Mõõtühikuid

**Tihumeeter** (lüh tm) – puidu ruumala ühik, millega arvutatakse puistu tagavara ja puitmaterjali. Võrdub vaheruumideta  $1 \text{ m}^3$  ruumalaga puidukogusega.

**Ruumimeeter** (lüh rm) –  $1 \text{ m}^3$  virnastatud peenemat metsamaterjali koos vaheruumidega.

Olenevalt virnastatud materjali liigist kasutatakse puidu koguse arvutamiseks järgmisi kordajaid:

Tabel 2.1

### Virnastatud materjali koguse arvutamise kordajad

peenhagu pikkusega kuni 2 m	0,1
hagu pikkusega 2...4 m	0,12
hagu pikkusega 4...6 m	0,2
saepuru	0,25
halupuu pikkusega kuni 1 m	0,70

Näiteks 1 ruumimeeter lõhutud halge on võrdne 0,7 tihumeetriga.

Puiduhakke puhul sõltub eelmainitud kordaja väärtus hakkuri tüübist ja puidujäätmete liigist ning võib muutuda piirides 0,35...0,45 (keskmine 0,4).

## 2.2. Puidu elementaarkoostis

Puu biomassi, sellisel kujul nagu ta saabub tarbijale, nimetatakse tarbimiskütuseks ehk tarbimisaineks (vaata peatükk 2.4).

$$C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + W^t + A^t = 100\% \quad (2.1)$$

Niiskuseta biomass on kütuse kuivaine (indeks  $k$ ):

$$C^k + H^k + O^k + N^k + S^k + A^k = 100\% \quad (2.2)$$

Niiskus- ja tuhavaba kütust nimetatakse kütuse põlevaineks (indeks  $p$ ):

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p = 100\% \quad (2.3)$$

Kütuse ümberarvutamisel ühelt koostiselt teisele kasutatakse ümberarvustegureid (tabel 2.1). Tüvepuidu põlevaine koostis (tabelid 2.2 ja 2.3) on üllatavalt stabiilne, erinevatel puuliikidel praktiliselt ühesugune. Erinevused ei ületa analüüsi vea piire.

Tabel 2.2

### Tüvepuidu põlevaine koostis % [7]

Puuliik	$C^p$ %	$H^p$ %	$O^p$ %	$N^p$ %	Lendosiste sisaldus %	Kütteväärtus MJ/kg
Okaspuu	51,0	6,15	42,25	0,6	85	19,079
Lehtpuu	50,5	6,10	42,80	0,6	85	18,660
Segapuu	51,0	6,10	42,30	0,6	85	18,870

Soojustehnilistes arvutustes võib ilma erilise veata kasutada tüvepuidu põlevaine keskmist koostist:

$$C^p = 51\%, H^p = 6,1\%, O^p = 42,3\% \text{ ja } N^p = 0,6\%$$

Puidu väävlisisaldus on väike – kuni 0,05%.

Küttepuidu tarbimisaine koosneb ballastainest (niiskus + tuhk) ja põlevainest.

Tähtsamate Soomes kasvavate puude põlevaine koostis ja tuhasisaldus

Puuliik või puu osa	C <sup>p</sup> %	H <sup>p</sup> %	O <sup>p</sup> ja N <sup>p</sup> %	Tuhasisaldus %
Mänd	50,6	6,2	43,2	0,6
Kuusk	51,5	6,2	42,3	0,4
Kask	51,0	6,2	42,8	0,5
Haab	49,2	6,1	44,7	0,6
Lepp	51,1	6,2	43,7	0,7
Kuuse koor	50,6	5,9	40,7	2,8

### 2.3. Puidu niiskus

Niiskus on puu biomassi kui kütuse kahjulik komponent, mis vähendab kütteväärtust, suurendab põlemisgaasi mahtu ja halvendab süttimist.

Puidu niiskuse määramiseks võetava proovi kogus oleneb kütuseosakeste suurusest ja kaalumise täpsusest. Kui kaalumise täpsus on 0,01 g, siis võetakse kaks kaalutist 30...100 g, kui aga kaalumise täpsus on 0,1 g, siis võetakse kaks kaalutist alates 200...400 g. Proov kuivatatakse ringleva õhuga kuivatuskapis 105 ± 2 °C juures püsiva massini. Tavaliselt piisab selleks 16 tunnist, kui kihi paksus on väiksem kui 30 mm. Proove ei kuivatata üle 24 tunni. Kuivad proovid tuleb enne märgade proovide paigaldamist kuivatuskapist välja võtta. Pärast kuivamist jahutatakse proovid eksikaatoris ja kaalutakse.

Niiskuse määramisel peab olema kindel, et nõud ei ima niiskust ja on kuumutuskindlad.

Niiskusesisaldus arvutatakse valemist

$$M^t = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \quad (2.4)$$

kus  $M^t$  – puidu tarbimisaine niiskusesisaldus %,

$m_1$  – märja proovi kaal g,

$m_2$  – kuiva proovi kaal g.

Kahe paralleelproovi määramistulemus ei tohiks erineda rohkem kui 1/50 keskmisest, või määramist tuleb korrata. Lõpptulemuseks antakse kahe paralleelproovi keskmine 0,1%-lise täpsusega.

Kasutatakse mõisteid absoluutne niiskus:

$$W_a = \frac{M - M_1}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

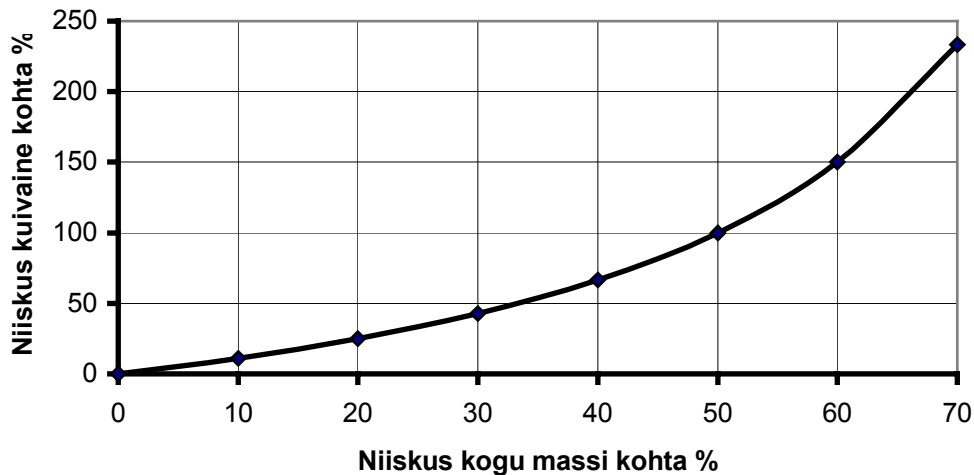
suhteline ehk tarbimisaine niiskus:

$$W_t = \frac{M - M_1}{M} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

kus  $M$  – niiske puidu mass kg,

$M_1$  – kuiva puidu mass kg.

Nende niiskuste võrdlemiseks võib kasutada graafikut joonisel 2.1.



**Joonis 2.1.** Absoluutse ja suhtelise niiskuse võrdlus

Puidu niiskus koosneb välisest ehk mehaanilisest ja sisemisest ehk hügrokoopsest niiskusest. Väline niiskus eraldub puidust loomulikult kuivamisel õhus. Hügrokoopne niiskus eraldub täielikult puidu kuumutamisel üle 100 °C. Puidu hügrokoopne niiskus on *ca* 15%.

Mõnel puhul jaotatakse puit niiskuse järgi kolme kategooriasse:

- õhukuiv                   20 (25)%,
- poolkuiv                 21 (26)...33 (50)%,
- toores                    üle 33 (50)%,

kus esimene arv näitab tarbimisaine niiskust, sulgudes olev arv absoluutset niiskust. Tähtsamate puuliikide toore puidu niiskus on toodud tabelis 2.4.

*Tabel 2.4*

**Toore puidu niiskus  $W^t$  %**

Puuliik	Tüvi	Kogu puu koos lehtedega	Kogu puu ilma lehtedeta	Noored puud	Tüvi
Mänd	50...60		55		45...60
Kuusk	48...57		55		40...60
Sookask	42...50	45	43	46...48	35...50
Hall lepp	50...50	54	52		45...50
Haab		47			35...50
Paju				48...60	
Pappel				49...63	

Toore puidu niiskus on piirides 40...60%. Niiskust mõjutavateks teguriteks on aasta-aeg, kasvukoht, puu liik ja iga.

Puu eri osade niiskuse erinevust illustreerib tabel 2.5. Tavaliselt kuivatatakse puitu enne kasutamist. Vabas õhus kuivatatud puit sisaldab 20...25% niiskust. Katuse all kuivanud puidu niiskus on 15...20%. Kuivatites võib saada absoluutselt kuiva puitu.

Puu eri osade niiskus %

Puu osa	Mänd	Kuusk	Kask	Lepp	Haab
Tüvi	45...50	40...60	45 (35...50)	54	47
Oksad	50...56	42...46	41 (39...44)	57.5	45
Latv	60	60			
Koor:					
korp			(15...20)		
niin	35...65	45...65	(50)		
Kogu puu			47	55	48

## 2.4. Puidu tihedus

Puidu iseloomustamiseks kasutatakse järgmisi tiheduse mõisteid:

- tihedus normiks seatud (standardisel) niiskusel, s.o absoluutsel niiskusel 12%:  $\rho_{12}$ , kg/m<sup>3</sup>;
- puitunud rakkude (aine) tihedus, mis on võrdne kõikidel puuliikidel:  $\rho = 1530$  kg/m<sup>3</sup>;
- absoluutselt kuiva puidu tihedus, kus  $m_0$  on absoluutselt kuiva puidu ( $W^t = 0\%$ ) mass,  $V_0$  absoluutselt kuiva puidu maht:  $\rho_0 = m_0/V_0$ , kg/m<sup>3</sup>;
- niiske puidu tihedus, kus  $m^t$  on puidu mass niiskuse  $W^t$  juures,  $V^t$  puidu maht niiskuse  $W^t$  juures:  $\rho^t = m^t/V^t$ , kg/m<sup>3</sup>.

Tüvepuidu tihedus sõltub puuliigist, niiskusest ja paisumise (tursumise) tegurist  $K_p$ . Puit tõmbub kuivades kokku keskmiselt 10...20% ja paisub niiskudes piki kiudu keskmiselt 0,1%, radiaalselt 3...5% ja tangentsiaalselt 6...10%.

Venekeelses kirjanduses jagatakse puuliigid sõltuvalt teguri  $K_p$  väärtusest kahte gruppi:

- esimene grupp  $K_p = 0,6$  kask, pöök, valgepöök, lehis;
- teine grupp  $K_p = 0,5$  kõik ülejäänud puuliigid: tamm, vaher, haab, lepp, paju jne.

Esimesele grupile saab tüvepuidu tihedused arvutada järgmiste valemitega:

$$\rho_t = 0,957 \frac{100}{100 - 0,4W^t} \rho_{12}, \text{ kui } W^t < 23\% \text{ ja} \quad (2.7)$$

$$\rho_t = 0,8 \frac{100}{100 - W^t} \rho_{12}, \text{ kui } W^t > 23\%, \quad (2.8)$$

teisele grupile aga valemitega

$$\rho_t = 0,946 \cdot \frac{100}{100 - W^t} \rho_{12}, \text{ kui } W^t < 23\% \text{ ja} \quad (2.9)$$

$$\rho_t = 0,823 \cdot \frac{100}{100 - W^t} \rho_{12}, \text{ kui } W^t > 23,5\% \quad (2.10)$$

Erinevate puuliikide tihedused normiks seatud niiskusel, samuti absoluutselt kuiva puidu tihedused on toodud tabelis 2.6.

Tabel 2.6

**Puuliikide tihedus kg/m<sup>3</sup> (tüvepuit)**

<b>Puuliik</b>	<b><math>\rho_0</math>, absoluutselt kuiv puit</b>	<b><math>\rho_{12}</math>, normiks seatud niiskusel</b>
Lehis	630	660
Mänd	470	500
Tamm	650	690
Vaher	650	690
Kask	600	630
Lepp	490	520
Haab	470	495
Pärn	470	495
Paju	430	455
Pirn	670	710

Analoogilised valemid on koostatud ka koore tiheduse arvutamiseks erinevatel niiskustel. Tabelis 2.7 on toodud mõne puuliigi koore tihedused.

Tabel 2.7

**Puukoore tihedus kg/m<sup>3</sup>**

<b>Puuliik</b>	<b><math>\rho_0</math>, absoluutselt kuiv koor</b>	<b><math>\rho_{12}</math>, normiks seatud niiskusel</b>
Mänd	652	680
Kuusk	715	730
Kask	736	745

Tabelis 2.8 on aga veel eraldi vaadeldud niint ja korpa (koore osi).

Tabel 2.8

**Puukoore osade tihedus kg/m<sup>3</sup>**

<b>Puuliik</b>	<b>Niin</b>	<b>Korp</b>
Mänd	808	296
Kuusk	927	638
Kask	847	524

## 2.5. Puidu kütteväärtus

Puidu kütteväärtus on soojushulk, mis eraldub 1 kg puidu täielikul põlemisel. Kui põlemisel tekki veeaur kondenseeruks ja vabastaks ka kondensatsioonisojuse, siis vaadeldav soojushulk oleks ülemine kütteväärtus  $Q_{ii}^t$  MJ/kg. Kui aga tekki veeaur ei kondenseeru, on tegemist alumise kütteväärtusega  $Q_a^t$  MJ/kg. Suitsugaas lahku harilikult katelseadmest veeauru kondenseerumise temperatuurist kõrgemal temperatuuril. Puidu kui väävlivaese kütuse puhul oleks aga kondensatsioonisojuse kasutamine mõttekas.

Lähtudes tarbimisaine elementaarkoostisest, on võimalik ka kütteväärtusi arvutada.

Ülemine kütteväärtus kJ/kg:

$$Q_{ii}^t = 340 C^t + 1260 H^t - 109 O^t \quad (2.11)$$

Alumine kütteväärtus kJ/kg:

$$Q_a^t = 340 C^t + 1260 H^t - 109 O^t - 25W^t \quad (2.12)$$

Kuna tüvepuidu põlevaine koostis on üllatavalt stabiilne, saab kõigi puuliikide puhul rääkida praktiliselt püsivast ja võrdsest põlevaine kütteväärtusest  $Q_a^p = 18,9$  MJ/kg. Tarbimisaine kütteväärtus sõltub aga ainult niiskusest ning tuhasisaldusest ja on arvutatav valemiga

$$Q_a^t = 18900 - 214W^t - 189A^t, \quad (2.13)$$

kus  $A^t$  on tarbimisaine tuhasisaldus.

Erinevate puuliikide puidu kuivaine keskmised kütteväärtused on toodud tabelis 2.9. Selleks et võrrelda puu eri osade kütteväärtusi ja näha tendentse puidu jäätmete (koor, oksad, ladvad, kännud) kasutamisel, on koostatud tabel 2.10.

Tabel 2.9

**Puuliikide keskmine kütteväärtus MJ/kg**

<b>Puuliik</b>	<b>Puidu kuivaine alumine kütteväärtus</b>
Kask	19,4
Kuusk	19,0
Mänd	19,4
Lepp	18,5
Haab	18,4
Puuliikide keskmine	18,9

Tarbimisaine kütteväärtuse arvutamiseks soovitatakse valemit

$$Q_a^t = Q_a^k (1 - W^t / 100) - 2,44W^t / 100, \quad (2.14)$$

kus  $W^t$  on tarbimisaine niiskus protsentides.

Puidu kütteväärtused MJ/kg

Puuliik	Kuivaine alumine kütteväärtus $Q_a^k$	Puuliik	Kuivaine alumine kütteväärtus $Q_a^k$
Mänd:		Kuusk:	
kogu puu	19,0...20,4	kogu puu	19,2...19,9
tüvepuit	18,7...19,3	tüvepuit	18,0...19,0
koor	18,4...20,7	koor	17,8...19,8
oksad	19,4...20,5	oksad	19,8
latv	18,25	latv	18,6...19,8
okkad	20,0...21,1	okkad	19,8...20,0
Kask:		kännud	19,0
kogu puu	19,1...19,6	Lepp:	
tüvepuit	17,4...19,4	tüvepuit	18,7
korp	28,4...29,3	Haab:	
niin	17,1...18,4	tüvepuit	18,5
oksad	18,4...19,8		

## 2.6. Süttimistemperatuur, lendosised ja koks

Põlevaine süttib vaid siis, kui ta on kuumutatud teatava temperatuurini, mida nimetatakse selle aine süttimistemperatuuriks. Puit süttib temperatuuri piirides 240...270 °C. Enne puidu süttimist aga algab tema orgaanilise osa lagunemine, mis jätkub väga kõrgete temperatuurideni. Selle tulemusena eralduvad gaasilised produktid – puidu lendosised.

Puidu termiline lagunemine algab temperatuuridel 150...160 °C. Kütuse termilisest lagunemisest (kuumutamisel temperatuurini 850 ± 10 °C) tekkinud massikadu loetakse tinglikult kütuse lendosiste sisalduseks. Puidu lendosiste sisaldus on 80...85%. Põhilised puidu lenduvad komponendid on CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ja H<sub>2</sub>O. Põlemisel järelejäänud tahke mass on koks, mis koosneb peamiselt süsinikust.

Lendosiste hulk ja koksi siseehitus on oluline kütuse põlemise korraldamisel kolletes, sellest sõltub ka kütuseosakeste põlemiskiirus.

Suure lendosiste sisaldusega puit süttib hästi ning tema põlemisel pole vaja põlemise stabiliseerimiseks kasutada erivõtteid, nii nagu lendosistevaeste kütuste puhul.

## 2.7. Tuhk

Tuhk on kütuse täielikul põlemisel tekkinud tahke jääk. Tuhk jagatakse sisemiseks ja välimiseks tuhaks. Sisemiseks tuhaks loetakse puidu kiudaines sisalduvaid mineraalseid ühendeid, mis peegeldavad pinnase koostist, milles puu kasvas. Välimine tuhk aga on seotud mineraalsete ühenditega, mis sattusid puidu biomassi tema töötlemisel, ladustamisel ja transpordil. Eri-nevate puuliikide ja nende osade tuhasus on toodud tabelis 2.11.



Tabel 2.11

Erinevate puuliikide puidu kuivaine tuhasus  $A_k$ , %

Puuliik	Tüvi	Koor	Oksad, juured
Mänd	0,2...0,7	1,4...2,2	0,3...0,7
Kuusk	0,2	2,3	0,3...0,4
Kask	0,2...0,4	2,4	0,3...0,6
Haab	0,2...0,3	2,7	0,3

Katelseadmete arvutamisel võiks tüvepuidu kuivaine tuhasuse võtta võrdseks 1%-ga.

Tabel 2.12

## Puidutuha keemiline koostis %

CaO	37...58	K <sub>2</sub> O	3...29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1...8	MgO	5...16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1...5	SiO <sub>2</sub>	3...22
Na <sub>2</sub> O	0,5...3	SO <sub>3</sub>	1...4

Tuha keemiline koostis sõltub suuresti puu kasvukohast, liigist, aga ka sellest, milliseid puuosi me kasutame – kas ainult tüvepuitu, koorega tüvepuitu või ka oksti ja juuri. Seega võib puidutuha keemiline koostis olla üsnagi erinev. Siinjuures tuleb märkida seda, et *ca* 50% K<sub>2</sub>O on vees lahustuv. Väevli olemasolule viitab ka 1...4% SO<sub>3</sub> sisaldus tuhas. Tuhk on realselt kasutatav põlluväetisena.

Tahkete biokütuste sulamiskarakteristikute määramise uus meetodika CEN/TS 15370-1:2006 toob sisse mõiste kokkutõmbumise algtemperatuur (*shrinkage starting temperature SST*) – tuhast katsekeha maht kahaneb 550 °C juures 95%-le originaalkatsekeha mahust.

Sulamistemperatuuri järgi kuulub puutuhk raskesti sulavate tuhkade klassi:

- tuha deformatsioonitemperatuur  $t_{DT} = 1150...1290$  °C,
- poolsfääri temperatuur  $t_{HT} = 1230...1500$  °C,
- tuha sulamistemperatuur  $t_{FT} = 1250...1650$  °C.

Puidu väike tuhasisaldus, pulbriline tuhk, mis kergesti vajub läbi kitsaste avadega resti ning tuha kõrged sulamistemperatuurid viitavad heale energeetilisele kütusele.