„Puud ja metsad on kõige kallim aare, mida loodus on inimesele andnud“ (Plinius)

Puitkütus

Mõõtühikud, nendevahelised seosed. Olulisemad mõisted

Maht

m^3 – kuupmeeter,

tm – (m^3) tihumeeter – üks m^3 õhuvahedeta puitu. Võib arvestada koorega või koore-ta. Puidu ruumala (mahu-) ühik, millega arvestatakse ka puistu tagavara.

rm – ruumimeeter e riidakuupmeeter – üks m^3 puitu koos õhuvahedega (virnmaterjali mõõtühik). Selle asemel kasutatakse ka mõistet riidakuupmeeter ehk steer,

pm^3 e pm – puistekuupmeeter - ühe m^3 suuruses mahus (puistangus) vabalt sisalduv puitkütuse (tavaliselt hakkpuidu) kogus.

Soojushulk

1 kJ (kilodžaul) = 0,239 kcal (kilokalor),
1 kcal = 4,178 kJ.

Võimsus (soojushulk ajaühikus)

1 kW (kilovatt) = 860 kcal/h (kilokalorit tunnis),
1 kcal/h = 1,16 W.

Energia

1 kWh = 860 kcal,
1000 kcal = 1,16 kWh.

Tabel 1. Energiaühikute üleminekutegurid

Ühik	1 MJ	1 kWh	1 kgoe	Mcal
1 MJ	1	0,278	0,024	0,239
1 kWh	3,6	1	0,086	0,86
1 kgoe	41,868	11,63	1	10
Mcal	4,187	1,163	0,1	1

Märkused:

kgoe – kilogrammi õli ekvivalenti,
toe – tonni õliekvivalenti, 1 toe = 41868 kJ/kg ehk 11,63 MWh.

Ühikute enamkasutatavad eesliited

10^3 – kilo (k), tuhat (tuh),
10^6 – mega (M), miljon (mln),
10^9 – giga (G), miljard (mld),
10^{12} – tera (T), triljon,
10^{15} – peta (P), kvadriljon.

Biomass

Bioloogilist päritolu ja põllumajandusest (k.a taimsed ja loomsed), metsandusest ja nendega seotud tööstusharudest saadavate produktide, jäätmete ja jääkide aga ka tööstuslike ja olmejäätmete biolagunev osa.
Puit ja puitkütused on üks osa biomassist ja biokütustest.

Uuringud näitavad, et metsad on mõjutanud meie planeedi kliimat palju rohkem, kui seni arvati, ning nad mängivad üldse kliimamuutustes põhilist osa.

Kütuse ülemine kütteväärtus (ingl k higher heating value (HHV) või gross calorific value)

Kütuse ülemine kütteväärtus (HHV) on soojushulk, mis vabaneb ühe ühiku kütuse täielikul põlemisel hapnikus ja sisaldab veeauru kondenseerumissoojust.

Kütuse alumine kütteväärtus (ingl k lower heating value (LHV) või net calorific value)

Kütuse alumine kütteväärtus (LHV) on soojushulk, mis vabaneb ühe ühiku kütuse täielikul põlemisel hapnikus, kusjuures soojushulk ei sisalda veeauru kondenseerumissoojust. LHV sõltub kütuse kuivaine (v.a mineraalid) sisaldusest ja niiskusest. Mida suurem on kütuse mineraalide sisaldus (tuhasus) ja niiskus, seda madalam on LHV.

Tabel 2. Biomassi liikide kuivaine keskmised kütteväärtused, (niiskusel 0%)

Biomassi liik	HHV GJ/t	LHV MWh/t	GJ/t	MWh/t
Okaspuu (kuusk)	20,2	5,61	18,8	5,22
Lehtpuu (pöök, tamm)	19,8	5,50	18,4	5,11
Paju (energiavõsa)	19,7	5,47	18,4	5,11
Viljapõhk	18,5	5,14	17,2	4,78
Hein	18,4	5,11	17,1	4,75
Rapsikook	21,8	6,06	20,0	5,56

Allikas: M. Kaltschmitt, H. Hartmann, Energie aus Biomasse, Springer 2001.

Sagedamini kasutatavad biomassi ühikute vahelised üleminekutegurid

1 PJ = 0,278 TWh = 0,024 Mtoe = 139 000 tm (m^3) puitu = 5 900 ha SRC*,

1 TWh = 3,6 PJ = 0,086 Mtoe = 500 000 tm (m^3) puitu = 21 400 ha SRC,

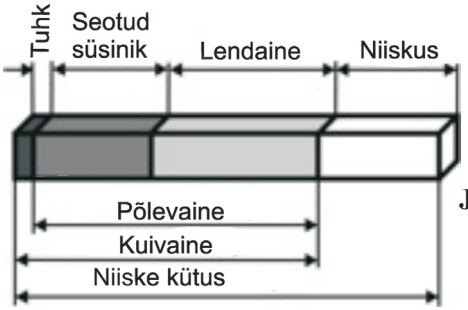
1 Mtoe = 41,868 PJ = 11,63 TWh = 5,8 mln tm (Mm^3) puitu = 248 500 ha SRC,

1 Mln tm (Mm^3) puitu = 0,172 Mtoe = 7,19 PJ = 2 TWh = 42 800 ha SRC,

1 Mha SRC = 4 Mtoe = 168,3 PJ = 46,8 TWh = 23,4 mln tm (Mm^3) puitu,

*SRC = kiiresti kasvavad kultuurid (ingl k. - *short rotation coppices*), eeldusel, et saak on 9 t kuivainet hektarilt aastas.

Puit kui kütuste lähteaine, selle omadused



Joonis 1. Puitkütuse koostis

Puit, täpsemalt puidurakkude kest, koosneb põhiliselt tselluloosist, ligniinist ja hemitselluloosist. Ligniin on tänu suurele süsiniku- ja vesinikusisaldusele kõrgema küttevääртusega kui tselluloos ja hemitselluloos. Puit sisaldab vähesel määral ka tõrva, vaikusid ja fenoole, mis peale puitkütuse põlemist teatud tingimustes võivad suitsu(korstna)gaasidest külmadele kütte- või korstnapindadele raskesti eemaldatavaid sadestisi moodustada.

Puidu kui kütuse omadusi mõjutavad terve rida iseloomulikke tunnuseid. Need on keemiline koostis (st keemiliste elementide süsiniku (C), vesiniku (H), lämmastiku (N), väävli (S) ja kloori (Cl) sisaldus), küttevääртus, niiskus, tihedus, lendosade sisaldus (lendaine), kõvadus, seotud süsiniku ehk koksi sisaldus, tuhasus ja tuha koostis, tuha sulamise karakteristikad ning mehaaniliste lisandite, tolmu ja seeneeoste olemasolu. Hakkpuitu tehakse sageli erinevat liiki puudest ja puu erinevatest osadest, mistõttu sedalaadi kütuste omadustes võib olla suuri erinevusi.

Tabel 3. Puidu elementkoostis

Element, % kuivaines	Puit	Koor
C	48 – 50	51 – 66
H	6,0 – 6,5	5,9 – 8,4
O	38 – 42	24,3 – 40,2
N	0,5 – 2,3	0,3 – 0,8
S	0,05	0,05
Cl	< 0,01	0,01 – 0,03

Värskelt langetatud puust moodustab umbes poole vesi (Joonis 1). Teise poole moodustab kuivaine, milles sisaldub keskmiselt 85% lendainet, 14,5% koksi (süsinikku) ja 0,5% tuhka.

Kui puu põleb, muutuvad ta koostisosad veeauruks (H_2O), süsinikdioksiidiks (CO_2), lämmastikoksiididekes (NOx), vääveldioksiidiks (SO_2) ja tuhaks. Puidu väävlisisaldus on väga väike ega ületa 0,05%, mis annab talle aga selge eelise fossiilkütuste (v. a maagaas) ees.

Metsa ja puidu tähtsus inimkonna ajaloos on väga suur, koguni põhjapanev.

Puitkütuse niiskus, kütteväärtus ja nendevaheline sõltuvus

Puidu niiskus koosneb välisest e mehaanilisest ja sisemisest e hügroskoopsest niiskusest. Väline niiskus eraldub puidust loomuliku kuivamise teel õhus.
Sisemine niiskus eraldub täielikult puidu kuivatamisel temperatuuril üle 100 ºC. Puidu sisemine niiskus on ca 15%. Puitkütuste niiskus võib erineda suurtes piirides. Mööblitööstuse jäätmete suhteline niiskus on 8 – 12%, kuid raiejäätmete niiskus 45 – 55%.
Niiskus ei mõjuta ainult puitkütuse kütteväärtust, vaid ka ladustamise tingimusi, põlemise temperatuuri ja suitsugaaside mahtu.
Puidu niiskuse võib leida märja massi (ka tarbimisaine ehk kütus sellisena, nagu ta saabub katlamajja) ja kuivaine (kuiva massi) kohta. Mõnikord jaotatakse puit niiskuse järgi kolme kategooriasse:

Õhukuiv (õhkkuiv) – 20 (25), %,
Poolkuiv – 21 – 33 (26 – 50), %,
Toores – üle 33 (üle 50), %,
kus esimene arv näitab suhtelist niiskust tarbimisaine ja teine (sulgudes) kuivaine kohta ja viimane leitakse valemiga:

$$W^k = \frac{M - M_1}{M_1} \times 100\%$$

Suhteline niiskus tarbimisaine kohta leitakse valemiga:

$$W^t = \frac{M - M_1}{M} \times 100\%$$

kus M – märja puidu (tarbimisaine) mass, kg,
M_1 – kuiva puidu (puidu kuivaine) mass, kg.

Üleminekul ühelt niiskuse väärtuselt teisele kehtib seos:

$W^k = 100\ W^t / (100 - W^t)$.

Neist esimene mõiste leiab rakendamist rohkem puiduteaduses ja puidu mehhaanilise töötlemise valdkonnas, teine aga energeetikas ja tselluloositööstuses. Puitkütuse **tarbimisaine alumine kütteväärtus** sõltub ainult niiskusest ja tuhasusest ning selle arvutamiseks kasutatakse valemit:

$Q_a = 18900 - 214W^t - 189A^t$,

kus 18900 – puitkütuse kuivaine alumine kütteväärtus on kõigil puuliikidel peaaegu sama, J/kg,
W^t – tarbimisaine niiskus, %,
A^t – tarbimisaine tuhasus, %.

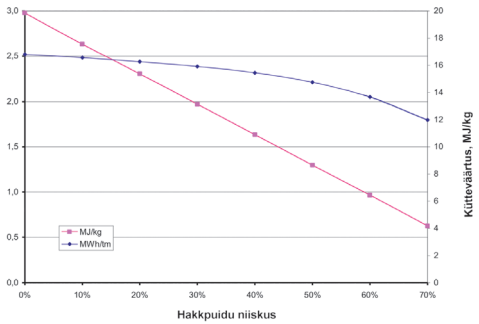
Puitkütuse tarbimisaine koosneb ballastainest (niiskus + tuhk) ja põlevainest.

Puidu niiskuse ja kütteväärtuse vaheline sõltuvus

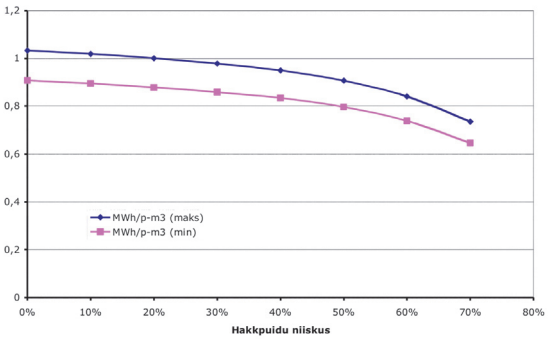
Tabel 4. Puidu kütteväärtuse sõltuvus tarbimisaine niiskusest ja tuhasusest

Niiskus, W^t, %	Kütteväärtus Q_a , kWh/kg, vastavalt tarbimisaine tuhasusele A^t, %				
	1	2	3	4	5
25	3,79	3,75	3,71	3,67	3,63
30	3,49	3,46	3,42	3,38	3,34
35	3,19	3,16	3,13	3,09	3,06
40	2,90	2,86	2,83	2,80	2,77
45	2,60	2,57	2,54	2,51	2,48
50	2,30	2,27	2,25	2,22	2,19
55	2,00	1,98	1,96	1,93	1,91
60	1,71	1,68	1,66	1,64	1,62
65	1,41	1,39	1,37	1,35	1,33
70	1,11	1,09	1,08	1,06	1,05

Hakkpuit



Joonis 2. Hakkpuidu alumise kütteväärtuse sõltuvus niiskusest tarbimisaine kg ja tihumeetri kohta



Joonis 3. Tüvestest valmistatud hakkpuidu energiasisalduse tüüpiline vahemik, MWh puistekuupmeetri kohta

Mets on õrn keskkond. Sealsed taimed ja loomad võlgnevad oma olemasolu looduslikule tasakaalule, milles on oma koht ka inimesel, kui ta peab lugu väljakujunenud reeglitest.

Halupuu

Tabel 5. Eri puuliikidest halupuude keskmised küttevääртused sõltuvalt niiskusest

Puuliik	Küttevääртus vastavalt niiskusele	Niiskus	Energiasisaldus	
	kWh/kg	%	MWh/pm^3	MWh/rm
Mänd	4,15	20	0,810	1,360
Kuusk	4,10	20	0,790	1,320
Kask	4,15	0	1,040	1,750
Kask		10	1,030	1,730
		20	1,010	1,700
		30	0,990	1,660
		40	0,970	1,620
		50	0,930	1,550
Lepp, (s.h must lepp)	4,05	20	0,740	1,230
Haab	4,00	20	0,790	1,330
Segalehtpuu		0	0,790	1,330
Segalehtpuu (leppa 50% ja haaba 50%)		10	0,780	1,310
		20	0,760	1,280
		30	0,740	1,250
		40	0,720	1,200
		50	0,680	1,140
Segaokaspuu (mändi 50% ja kuuske 50%)		0	0,830	1,380
		10	0,810	1,360
		20	0,800	1,340
		30	0,780	1,310
		40	0,760	1,270
		50	0,720	1,200

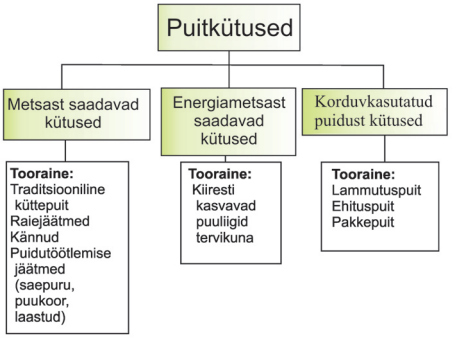
Umbes 400 miljonit aastat tagasi hakkasid maismaal kasvama esimesed vetikatest arenenud taimed. Ajapikku kasvasid need suuremaks ja neist arenesid ligikaudu 395-345 miljonit aastat tagasi esimesed puukujulised taimed.

Ameerika Ühendriikides on loodusuurijad avastanud metsa, mis on vähemalt 10 000 aastat vana.

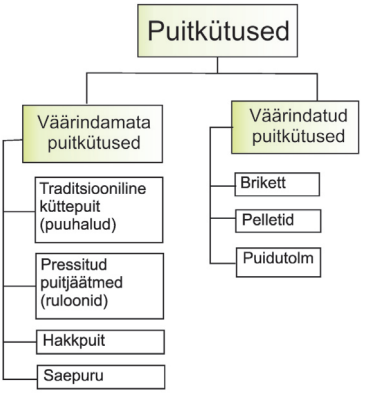
Puitkütuste liigid

Puitkütuseid võib liigitada tooraine päritolu järgi (vt Joonis 4) metsast ja energiametsast saadavateks ning korduvkasutatud puidust kütusteks. Kui metsast ja energiametsast saadavaid kütuseid võib pidada loodussõbralikeks kütusteks, siis korduvkasutusega puitkütused seda kindlasti ei ole. Nad on tavaliselt immutatud ja värvitud ning sisaldavad mitmesuguseid lisandeid (metall, klaas, plastik jne), seetõttu on nende töötlemine komplitseeritud. Lisandite tõttu tuleb sellise materjali peenestamiseks kasutada puiduhakkurite asemel purusteid ning kõrgendatud nõuded on ka põletusseadmetele ja põlemisproduktidele.

Teiseks võimaluseks puitkütuseid liigitada on vääristamise astme järgi (vt Joonis 5). Vääristamata kütusteks loetakse selliseid, mida töötlemise käigus on vaid peenestatud või pakitud, kuid mille mehhaanilised omadused on jäänud muutmata. Vääristamata puitkütusteks on traditsiooniline küttepuit, hakkpuit, pressitud puidujäätmed ja puidutöötlemise jäätmed (saepuru ja laastud). Vääristatud puitkütuste tüüpilisteks esindajateks on puitbrikett ja pelletid (puitgraanulid).



Joonis 4. Puitkütuste liigitus tooraine päritolu järgi



Joonis 5. Puitkütuste liigitus vääristamise astme järgi

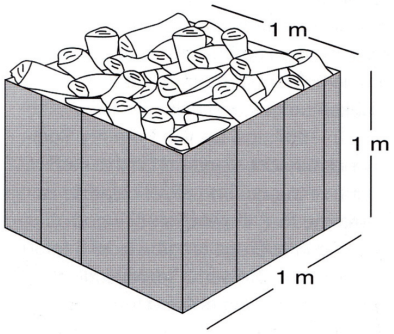
Puitkütuse liikide koguse hindamise ülemineku tegurid

Olenevalt virnastatud materjali liigist kasutatakse puidu koguse arvutamiseks veel järgmisi kordajaid:

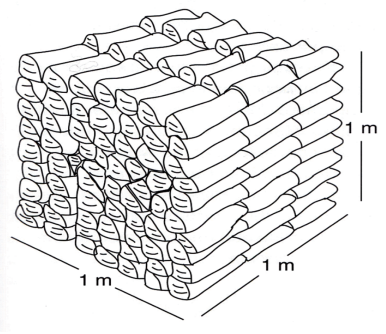
Peenhagu pikkusega kuni 2 m, 1 rm = 0,1 tm;
Hagu pikkusega 2 – 4 m, 1 rm = 0,12 tm;
Hagu pikkusega 4 – 6 m, 1 rm = 0,2 tm;
Saepuru, 1 pm^3 = 0,25 tm;
Halupuu pikkusega 1 m, 1 rm = 0,7 tm.

Tabel 6. Halupuu mõõtühikute vahelised sõltuvused

Mõõtühik	Puistekuup-meeter, pm^3	Ruumimeeter, rm	Tihumeeter, tm (m^3)
Puistekuupmeeter, halu pikkus 33 cm	1	0,60	0,40
Ruumimeeter, halu pikkus 33 cm	1,68	1	0,67
Ruumimeeter, halu pikkus 100 cm	1,55	1	0,62
Tihumeeter	2,50	1,50	1



Joonis 6. Halupuude puistekuupmeeter



Joonis 7. Ruumimeeter laotud halupuid, halu pikkus 33 cm

1 tm toorpuidu energiasisaldus on ~2 MWh ja 1 pm^3 segahakkpuidu energiasisaldus on ~0,9 MWh.

Pelletid

Enamasti saepurust või peenendatud puidust kõrge surve all pressitud pulgakesed läbimõõduga 6-12 mm ja pikkusega 15-50 mm. Pelletite puistetihedus 550 – 700 kg/pm^3, kuid pelleti enda tihedus on 1,1-1,2 g/cm^3, sõltuvalt valmistusseadme tüübist. Pelletite niiskus on tavaliselt 7-9% ja kütteväärtus kuni 5,0 kWh/kg. Pelleteid võib kvaliteedi parandamiseks röstida ehk torrefitseerida umbes 250 - 300° C juures 30-60 minuti jooksul, mille käigus väheneb lendosiste sisaldus, kaob praktiliselt niiskuseimavus (suureneb hügrofoobsus) ja suureneb oluliselt mahuline energiatihedus 15-19 GJ/pm^3, kusjuures tavalistel pelletitel on see vahemikus 7,5 – 10 GJ/pm^3.

Torrefitseeritud puitpelletite keskmine puistetihedus on 750 - 850 kg/pm^3 ja tarbimisaine alumine kütteväärtus on 19 - 22 MJ/kg (5,2-6,1 kWh/kg)

Puitkütuste standardid ja kvaliteedinõuded

Kütuste klassifitseerimise näiteid

Enamkasutatavate biokütuste klassifitseerimiseks on enamik kütuse kvaliteedi näitajaid jagatud vahemikeks, mille ulatuses kütuse vastav omadus võib kõikuda tarbijale ebaolulistes piirides. Näiteks hakkpuidu niiskuse klass M20 näitab, et tarbimiskütuse niiskus ei tohi ületada 20%.

Järgmine niiskuseklass M30 määrab tarbimiskütuse niiskuse piirideks 20 – 30%. Samal põhimõttel tähistatakse ka kütuse teiste omaduste klasse.
Iga tarbijagrupp ja põletusseadmete tüüp vajab või eelistab teatud omadustega kütuseid. Mida väiksemad on põletusseadmed, seda kvaliteetsemat kütust oleks seal vajalik või otstarbekas kasutada. Kodutarbijatele soovitatava kõrgekvaliteediliste puitbrikettide ja puitpelletite omadused peaksid üldjuhul vastama toodud tabeli (vt Tabel 7) andmetele.

Tabel 7. Kõrgekvaliteediliste puitpelletite kvaliteediklassid kodutarbijatele

Päritolu	Keemiliselt töötlemata puit ilma kooreta
Niiskus	M10 (alla 10%)
Mehaaniline püsivus	DU97.5 selle näitaja määramise testis peab jääma terveks > 97,5% pelletitest kaalu järgi
Peenfraktsiooni sisaldus	F1.0 või F2.0 (alla 3,15 mm peenfraktsiooni sisaldus alla 1% või 2%)
Mõõdud	D06 või D08 (pelleti diameeter 6±0,5 mm ja pikkus alla 5 diameetri või pelleti diameeter 8±0,5 mm ja pikkus alla 4 diameetri) Kuni 20% pelletite kaalust võib olla pikkusega 7,5 diameetrit
Tuhasus	A0.7 (< 0,7% kuivaines)
Väävlisisaldus	S0.05 (< 0,05% kuivaines)
Lisandid	< 2% kuivaine massist võib sisaldada muud biomassipõhist keemiliselt töötlemata materjali, mille tüüp ja sisaldus peavad olema näidatud
Alumine küttevääртus	E4.7 (> 4,7 kWh/kg = 16,9 MJ/kg)

Kaugkütte katlamajade ja teiste suuremate kütusetarbijate nõuded kütuse omadustele sõltuvad kasutatavate põletusseadmete, transportööride ja hoidla konstruktsioonilistest iseärasustest ja kasutusviisist. Näiteks, kui kodutarbijale on üldreeglina sobivaim võimalikult kuivem kütus, siis katlamajja võib olla paigaldatud katel, mille kolde ehitus eeldab niiske kütuse kasutamist.

Vääristamata naturaalsete puitkütuste väga tähtsaks näitajaks on kütuseosakese suuruste vahemik, mis kajastub juba kütuse kaubandusliku vormi nimetuses ja määrab suures

osas ka põletustehnoloogia.

Hakkpuidu tüüpiliseks klassiks osakeste suuruse järgi võib lugeda klassi P45, mille korral osakeste jaotus kütuses oleks järgmine:

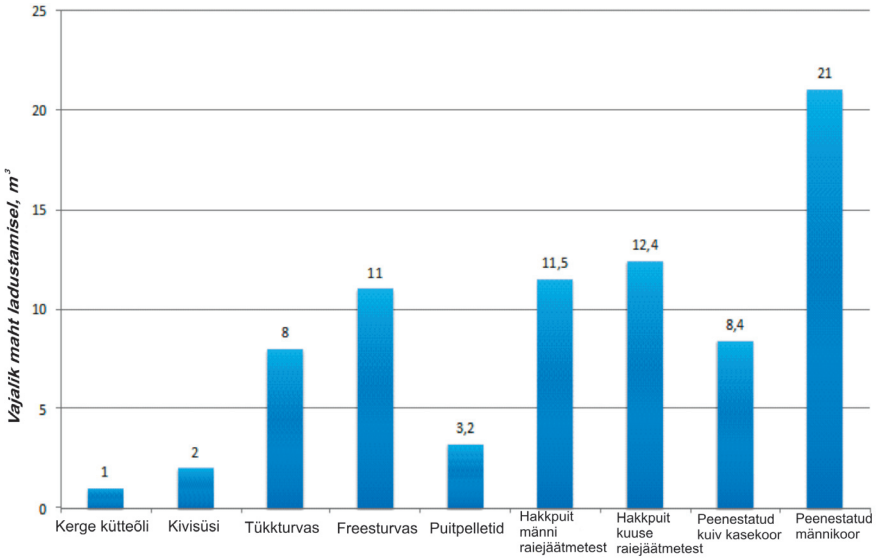
- *peenfraktsioon* – alla 5% kütuse massist on osakesed suurusega kuni 1 mm;
- *põhifraktsioon* – vähemalt 80% kütuse massist on osakesed suuruse vahemikus 3,15 mm ≤ P ≤ 45 mm;
- *jäme fraktsioon* – alla 1% osakeste massist võivad olla suuremad kui 63 mm.

Nagu jaotusest näha, määratleb klassifikatsioon peenfraktsiooni ja suurte tükkide sisaldust kütuses, sest mõlemad kõrvalekalded põhifraktsiooni mõjutavad kütuse konveierite tööd ja samuti ka kütuse põlemist koldes.

Tabel 8. Erinevate puitkütuste omaduste võrdlus

	Tarbimis-kütuse niiskus, %	**Kuivaine tuhasus, %**	**Tarbimisaine alumine küt-teväärtus, MJ/kg**	**Tarbimisaine energiasi-saldus, MWh/pm^3**	**Tarbimisaine puistetihedus, kg/pm^3**
Hakkpuit raiejäät-metest	50 – 60	1 – 3	6 – 9	0,7 – 0,9	250 – 400
Hakkpuit kogupuust	45 – 55	1 – 2	6 – 9	0,7 – 0,9	250 – 350
Hakkpuit tüvestest	40 – 55	0,5 – 2	6 – 10	0,7 – 0,9	250 – 350
Hakkpuit kändudest	30 – 50	1-3	6-11	0,8 – 1,0	200 – 300
Okaspuu koor	50 – 65	1 – 3	6 – 9	0,5 – 0,7	250 – 350
Kase koor	45 – 55	1-3	7 – 11	0,6 – 0,8	300 – 400
Hakkpuit saagimis-jäätmetest	45 – 60	0,5-2	6-10	0,5 – 0,8	250 – 350
Saepuru	45 – 60	0,4 – 0,5	6 – 10	0,45 – 0,7	250 – 350
Höövli-laastud	5 – 15	0,4 – 0,5	13 – 16	0,45 – 0,55	80 – 120

Kui meri katab umbes kolm neljandikku meie planeedi pinnast, siis metsad hõlmavad peaaegu kolmandiku maismaast.



Joonis 8. Erinevate kütuste ladustamiseks vajalik maht.

Tabel 9. Halupuude kvaliteediklassid Soome näitel (vt ka Joonis 9)

Parameeter	1. klass	2. klass	3. klass
Puuliik			
Kask	Ainult kask	Kuni 5% teisi lehtpuid	Kuni 10% teisi lehtpuid kuni 10% haaba
Sega lehtpuu	Haaba ei lubata		
Haab	Teisi lehtpuid piiratult	Teisi lehtpuid piiratult	Teisi lehtpuid piiratult
Pikkus	33/50±2 cm		
(25±1 cm)	33/50±4 cm		
(25±3 cm)	33/50±6 cm		
(25±4 cm)			
Halu paksus	4 – 10 cm	4 – 12 cm	4 – 15 cm
Niiskus	≤ 20%	≤ 25%	≤ 30%
Teiste puuliikide sisalduse piirangud	≤ 5%	≤ 15%	≤ 25%
Hallitus	Ei lubata	Lubatakse üksikuid hallitustäppe	Lubatakse vähest hallituse esinemist
Pehkinud või mädanenud kohti	Ei lubata	Kõva mädanikku ≤5%	Kõva mädanikku ≤5% Pehmet mädanikku ≤1%

Joonis 9. Halupuude kvaliteedinäited (Soome), Työtehoseura foto.

Puidu kütusteks vääristamise tehnoloogiad

Kuigi peamiseks puitkütuseliigiks eramajapidamistes on jäänud traditsiooniline küttepuit halupuudena, on erametsade majandamisel oluliseks tuluallikaks muutumas ka hakkpuidu tootmine. Hakkpuitu tarbivate katlamajade ja koostootmisjaamade rajamine on selliste kütuste järele loonud stabiilse nõudluse. Esimese tõuke puitkütuste tootmiseks sobilike tehnoloogiate arendamiseks Põhjamaades andis 1970-ndate aastate naftakriis, mis sundis importkütustest sõltuvaid tööstusriike kasutusele võtma oma taastuvate kütuste varusid. Tehnoloogiate täiustamisele tänapäeval aitavad kaasa rahvusvahelised kokkulepped kasvuhoonegaaside emissiooni piiramiseks ja taastuvate kütuste kasutamist soodustavad maksud. Pikaajalise teadus- ja arendustegevuse tulemusel on nüüdseks puitkütuse tootmise tehnoloogiad hästi välja arendatud ja neist mitmed sobivad kasutamiseks ka Eestis.

Kogupuu tehnoloogia

Harvendusraiel kasutatava tehnoloogia eesmärgiks on ühe tehnoloogilise võttega tuua metsast välja nii saepalk, paberipuu kui ka küttepuu. Erinevalt traditsioonilistest metsaraiest jäetakse selliste tehnoloogiate korral langetatud puud laasimata ja nende lõplik töötlemine toimub vahelaos.

Joonis 10. Ladustatud raiejäätmed ja küttepuit, P. Muiste foto.

Arvestades peenpalgi ja paberipuu madalate hindadega viimastel aastatel, võib olla otstarbekas töötlemisel eraldada vaid kaks sortimenti — traditsiooniline küttepuit ja raiejäätmed hakkpuidu tootmiseks (Joonis 10).

Laasitud oksad on kuivamiseks otstarbekas ladustada ja hakkida pärast okaste ja leh-tede varisemist. Tehnoloogia sobib kasutamiseks talumetsades, sest kasutatakse odavaid seadmeid — raieks mootorsaage ja puidu koondamiseks vintsiga varustatud põllumajandustraktoreid. Meetodi puuduseks on madal tootlikkus ja lohistamisel materjali saastumine mullaga, kui töid tehakse külmumata pinnasel.

Tüvestehakke tehnoloogia

Noore metsa valgustusraiel või ka küpseva metsa harvendusraiel võib saadav likviidse puidu kogus olla nii väike, et otstarbekam on kasutada kogu raiutav materjal hakkpuidu tootmiseks. Laasimata peentüvedest toodetud hakkpuitu nimetatakse tüvestehakkeks ehk kogupuu hakkeks.

Joonis 11. Akumuleeriva lõikepeaga harvester, P. Muiste foto.

Valgustusraiet tehakse talumetsades ta-valiselt käsitsi, kas võsasae või mootorsaega. Suurtootmises ja ka erametsade suurematel lankidel on langetamiseks hakatud kasutama harvesterile paigaldatavat akumuleerivat lõikepead ehk kogumispead (Joonis 11). See võimaldab koondada lõigatavad peentüvede kimpudeks ja sellega märgatavalt tõsta tööviljakust. Lõikeseadmeks on giljotiini põhimõttel töötav lõiketera.

Tüveste koondamiseks kasutatakse forvarderit või metsaveoks kohandatud põllumajandustraktorit (Joonis11). Kogutud materjal on soovitav ladustada ja hakkida alles siis, kui on tekkinud nõudlus hakkpuidu järele. Puidu säilitamine suurtes kuhjades kindlustab kütuse väiksema niiskuse ja sellega kõrgema küttevääртuse (Joonis 13). Kuivamisel okkad ja lehed varisevad ning seetõttu väheneb ka mineraalainete kadu metsast.

Joonis 12. Tüveste kogumine harvendusraiel, P. Muiste foto.

Hakkpuit raiejäätmetest

Raiejäätmete kogumine ja töötlemine on töömahukas, sest need on väikese mahukaaluga ja langil hajutatud. Väikese energiasisalduse tõttu on ka transport kallis ja majanduslikult tasuv veokaugus piiratud. Seetõttu raiejäätmetest hakkpuidu tootmine nõuab hoolikalt läbimõtlemist. Pehme pinnasega lankidel tuleks raietööd planeerida talveks, et vältida laasitud okste kasutamist oksapadjana kokkuveoteedel. Mulla ja kividega segunenud

Kõige esimeste inimeste jaoks olid mets ja puud põhiline pelgupaik, mis aitas vaenulikus keskkonnas ellu jääda. Ilma puiduta, mille välk äikese ajal süütas, poleks inimene õppinud tundma ja säilitama tuld.

materjal hakkpuidu tootmiseks ei sobi. Raiejäätmete kogumine on hõlpsam, kui raie käigus laasitud oksad ning ladvad paigutada kokkuveoteede kõrvale vaaludesse või hunnikutesse (Joonis 14). Selliselt ladustatud puidu küttevääртus on 10 – 15% kõrgem.

Joonis 13. Veekindla paberi alla ladustatud raiejäätmed, P. Muiste foto.

Joonis 14. Raietööde käigus soovitatakse likviidne puit ja laasitud oksad paigutada eraldi, P. Muiste foto.

Enamkasutavad tehnoloogiad hakkpuidu tootmiseks on järgmised:

- *raiejäätmete hakkimine langil,*
- *raiejäätmete hakkimine vahelaos* (levinuim Põhjamaades, sobib ka Eestile)
- *raiejäätmete hakkimine lõpplaos* (transport töötlemata kujul või tihendatult).

Põhjamaades on kõige levinumaks vahelaos hakkimise meetod ja seda võib pidada sobivaimaks ka Eesti tingimustes. Vahelaos hakkimisel koondatakse raiejäätmed tavalise metsaveotraktoriga, mille veokast kandevõime paremaks äraka-sutamiseks on laiemaks ehitatud. Tee äärde kõrgetesse kuhjadesse veekindla kattepaberi alla kuivama kogutud raiejäätmete (Joonis 13) hakkimine toimub järgmisel talvel (Joonis 15) ja vedu kas konteiner- või hakkpuidu transpordiks kohandatud eriveokiga.

Joonis 15. Raiejäätmete hakkimine konteinerisse, P. Muiste foto.

Lehtpuud tuleb maha lasta vanal kuul ja põhja poole, siis peavad hästi mädanemisele vastu. (Risti)

Uudseks tehnoloogiliseks lahenduseks raiejäätmete veokulude vähendamiseks on nende kokkupressimine enne transporti (Joonis 16). Oksarullide (ruloonide) transpordiks saab kasutada olemasolevaid metsaveotraktoreid ja –autosid, neid on lihtne ladustada ja kuivatada ning hakkimiseks saab kasutada suure tootlikkusega alalisi seadmeid. Tõhus logistika võimaldab suurendada varumispiirkonda, mis eriti oluliseks muutub suurte elektrijaamade kütusega varustamisel. Selliste masinate kasutamine erametsades eeldab metsaomanike head koostööd, sest üksikute väikeste lankide puhastamiseks pole otstarbekas seda tehnoloogiat rakendada.

Joonis 16. Raiejäätmete pallimine, P. Muiste foto.

Kändude juurimine

Seni kasutamata ressursiks on kännud, mille kasutamine võib muutuda majanduslikult tasuvaks kütuste hindade tõusu korral. Kändude juurimiseks kasutakse ekskavaatoreid (Joonis 17), kogumiseks forvardereid ja transpordiks maanteel kinnise kastiga veoautosid. Juuritud kännud on soovitav mõneks kuuks ladustada (Joonis 18), et kännud kuivaksid ja puhastuksid mineraalainest tuule ja vihma mõjul. Kändude peenestamine toimub terminalides purustitega, sest lisandiks olevate kivide ja mulla tõttu hakkureid ei saa kasutada. Lisandid tekitavad probleeme ka kütuse põletamisel, sest suureneb tuhasisaldus ja tekib kolde restide šlakiga kattumise ning ummistumise oht.

Joonis 17. Kändude juurimine, P. Muiste foto

Kännust tuntakse puuraiujat! *Märg puu ei põle ilmaski hästi.*

Eesti vanasõnad

Tavaliselt leiab erametsadest toodetud hakkpuit kasutamist suurtes katlamajades. Halupuude tootmises viimastel aastakümnetel olulisi muutusi pole toimunud. Uuenduseks on viimastel aastatel olnud vaid see, et masinaid on rohkem hakatud kasutama küttepuu palkide järkamiseks, pakkude lõhkumiseks ja halgude laadimiseks

Joonis 18. Ladustatud kännud
P. Muiste foto

Halupuude lõhkumise seadmed

Põhiliseks küttematerjaliks maakodude ahjudes, kaminates ja pliidi all jäävad puuhalud. Puude lõhkumine võib olla küll meeldivaks ajaviiteks ja kehaliseks koormuseks, kuid suuremate koguste talveks varumine on siiski raske füüsiline töö. Inimene püüab võimaluse korral oma tööd kergemaks teha ja selleks on välja mõeldud mitmesuguseid halupuude lõhkumise masinaid.

Kõige lihtsama konstruktsiooni ja madalama hinnaga on kiilkoonusega halumasinad. See kinnitatakse kolmepunktiliselt traktori rippmehhanismi külge ja käitatakse traktori jõu võtuvõllilt kardaanvõlli kaudu või elektrimootoriga. Sageli on halumasin kombineeritud ketas- või kettsaega (vt Joonis 19) ja selline seade võimaldab halupuud valmis teha.

Joonis 19. Halumasin Japa 100 kiilkoonuse ja ketassaega, www.japa.fi

Sama tootlikkusega, kuid mugavamad kasutada on hüdraulilise ajamiga halumasinad (vt Joonis 20). Võrreldes kiilkoonusega halumasinatega on nende hind kõrgem.

Joonis 20. Hüdraulilise ajamiga halumasinad, P. Muiste fotod

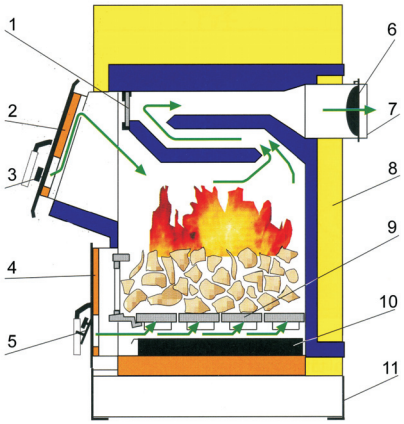
Toodetakse ka halumasinaid, mis on ette nähtud küttepuude üheaegseks tükeldamiseks, lõhkumiseks ja pealelaadimiseks traktorikärule (Joonis 20). Masin kinnitatakse traktori rippmehhanismi külge ja käitatakse traktori jõuvõtuvõllilt. Ülekanne peab olema varustatud kaitsesiduriga. Ajamiks võib olla ka elektrimootor. Arvestades suurt tootlikkust ja kõrget hinda ei otstarbekas sellist masinat osta ühe talu vajaduste rahuldamiseks. Kiiresti tasub ta end ära aga küttepuude müügiks ettevalmistamisel.

Joonis 21. Kombineeritud halumasin Japa 355, www.japa.fi

Puitkütuse põletamise tehnoloogiad ja seadmed

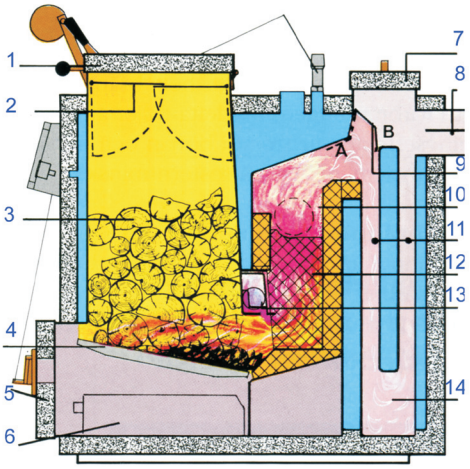
Ühepereelamute, talude ja väikemajade jaoks sobivad puitkütusekatlaid on traditsiooniliselt jagatud järgmiselt:

- ülemise põlemisega katlad (Joonis 22),
- alumise põlemisega katlad (Joonis 23),
- pöördpõlemisega katlad (Joonis 24 ja 25),
- pelletikatlad (Joonis 26 ja 27).



1 – eemaldatav ekraan
2 – täiteluuk
3 – sekundaarõhu klapp
4 – alumine (tuha-) luuk
5 – primaarõhu klapp
6 – pöördsiiber
7 – suitsutoru
8 – isolatsioon
9 – rest
10 – tuhapann
11 – sokkel

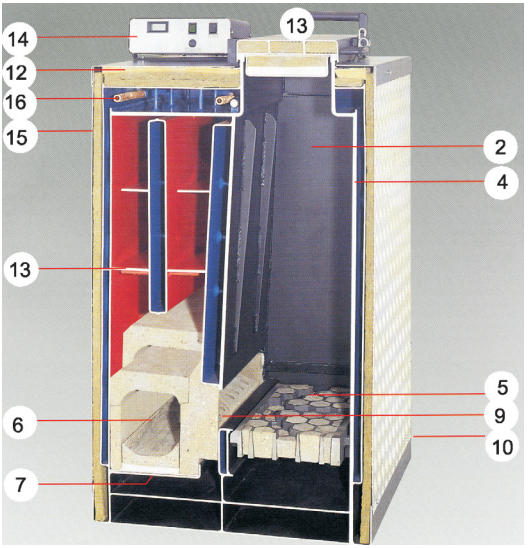
Joonis 22. Ülemise põlemisega halupuukatel Austria firmalt Eder.



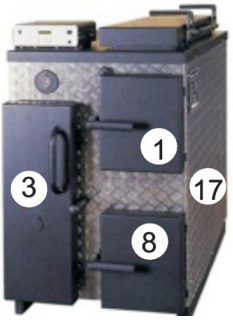
Joonis 23. Alumise põlemisega katel Arimax, HÖGFORS LÄMPÖ OY, Soome.

1 – täiteluuk
2 – ekraanid
3 – kütuse punker
4 – rest
5 – alumine teenindusluuk koos primaarõhu reguleerimise klapiga
6 – tuhasahtel
7 – puhastusluuk
8 – pöördsiiber
9 – siiber süütamise hõlbustamiseks
10 – järelpõlemiskamber
11 – suitsukäigud
12 – keraamiline vooder
13 – sekundaarõhk
14 – puhastusluugi koht katla küljel

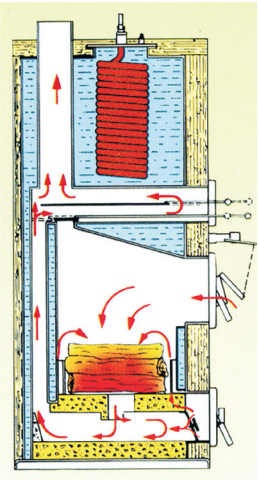
Mets, nagu iga teinegi looduskeskkond, moodustab taimede ja loomade koosluse, mille eluspüsimine on vastastikuses sõltuvuses. Igaüks neist on lüliks ahelas, mis on kogu keskkonna ladusaks toimimiseks vältimatu.



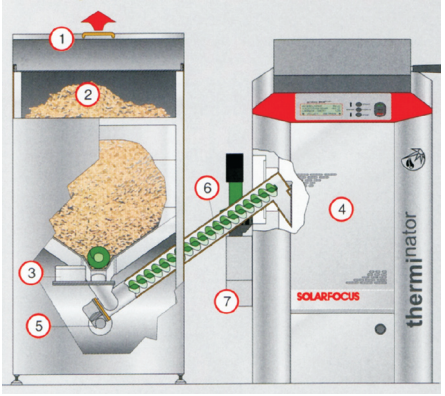
1, 3, 8, 13 – kütuse täite- ja teenindusluugid
2 – alt laienev kütuse šaht
4 – jahutatav šahti sein
5 – keraamiline rest
6 – keraamiline järelpõlemiskamber
7 – järelpõlemiskambri all paiknev õhu jaotus- ja reguleerimissüsteem
9 – avad põlevgaasidele
10 – suitsugaaside temperatuuri reguleerimisklapp (katla taga)
11 – suitsugaaside suunajad
12 – isolatsioon
14 – juhtimispaneel
15, 17 – katla välissein;
16 – sooja tarbevee soojusvaheti



Joonis 24. Pöördpõlemisega e kütuse eelgaasistamisega halupuukatel DRAGON Austria firmalt GRIM GmbH.

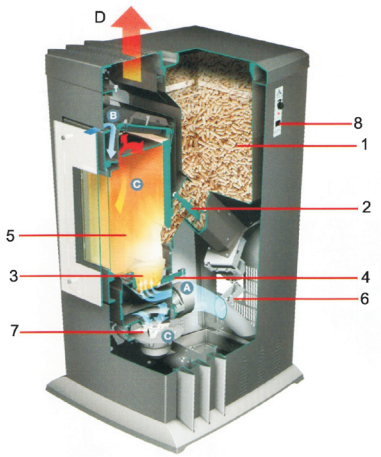


Joonis 25. Pöördpõlemisega katel EXONOM A25 BX MILJÖ Rootsi firmalt EURONOM, mille veemahutis paikneb spiraalne tarbevee soojusvaheti.



1 – kütuse täiteluuk
2 – kütusepunker
3 – kütuse pealeande reguleerimissiiber
4 – katel Therminator
5 – tigutransportööri ajam (mootor)
6 – kütuse tigutransportöör
7 – juhtimisplokk

Joonis 26. Pelletiküttesüsteem Austria firmalt SOLARFOCUS. Toodetakse viies võimsusvahemikus: 6 – 20 kW, 9 – 30 kW, 12 – 40 kW, 15 – 50 kW ja 18 – 60 kW.



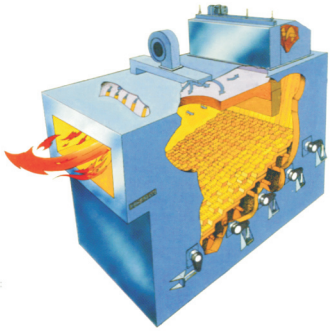
Pelletid laaditakse 32 kg mahuga pelletipunkrisse **1**, millest tigutransportööriga **2** antakse küttekoormusele vastav pelletikogus põletuspeasse **3**.
Põletuspeas olev kütus süüdatakse süüteseadmega **4**.
Kolderuumi **5** all paiknevasse põletuspeasse **3** juhitakse primaarõhk **A** läbi patenteeritud vooluhulga sensori **6**.
Sekundaarrõhu **B** optimeeritud kogus suunatakse kolderuumi ülaossa. Suitsugaasid **C** suunatakse suitsuimeja **8** abil korstnasse.
Käivitusnupu **8** abil süüdatakse kütus ja põlemisel eraldunud soojus antakse õhule **D** ning juhitakse köetavasse ruumi

Joonis 27. Austria firma RIKA pelletikamin PREMIO. Kamin on automaatse juhtimisega ja töötab küttevõimsuse piirides 2 – 6 kW.

Suuremate küttesüsteemide põletusseadmed

1 – keraamiline põlemiskamber
2 – malmist treppprest
3 – veega jahutatav korpus

Joonis 28. Arimax BioJet hakkpuidupõleti võimsusega 60 – 500 kW (Thermia OY, Soome).



Joonis29. Malekorras liigutatavate restielementidega kolle TRF, Rootsi firma KMW ENERGI AB, kuni 10 MW.

Puude jalamil, maapinnal oksaraagude ja varisenud lehtede all kihab elu. Metsaaluse ühelt hektarilt võib leida rohkem elusolendeid, kui on inimesi kogu maakeral.

Praktilisi näiteid

Puitkütuse tootmises vajalike teisenduste näiteid

Võimalus puitu kütteks varuda tekib juba valgustusraiel, kogused suurenevad veelgi harvendus- ja uuendusraiel. Andmed Lõuna-Soome metsade kohta näitavad, et kogu raieringi jooksul võib koguda raiejäätmeid kuni 310 tm/ha ehk 675 MWh/ha. Eestis tehtud mõõtmised on näidanud, et jäätmete energiasisaldus uuendusraiel on keskmiselt 145 MWh/ha ja harvendusraiel 42 MWh/ha.

Järgnevates tabelites (Tabel 10 kuni 13) mõned näited, kui palju võiks metsaraiel saada küttepuitu ja tööstuses kasutatavat tarbepuitu. Aluseks on võetud keskmised näitajad, hinnangu andmiseks mõne konkreetse langi kohta tuleks täpsustada metsaandmeid ja raiutava puidu sortimenti, arvesse võtta raieks kasutatavat tehnoloo-giat ja keskkonnakaitselisi piiranguid.

Tabel 10. Valgustusraie noorendikus. Toodang: kogupuu hake.

Puistu	Saak					
	Tarbepuit	Traditsiooniline küttepuit		Hakkpuit, (niiskus 40%)		Puitkütuste energia kokku
	tm/ha	rm/ha	MWh/ha	pm^3/ha	MWh/ha	MWh/ha
Kaasik	-	-	-	40 – 130	32 – 105	32 – 105
Kuusik	-	-	-	40 – 130	32 – 105	32 – 105
Männik	-	-	-	40 – 130	32 – 105	32 – 105

Tähistused: tm (m^3) – tihumeeter; rm – ruumimeeter; pm^3 – puistekuupmeeter

Tabel 11. Esimene harvendusraie latimetsas. Toodang: tarbepuit, traditsiooniline küttepuit, hakkpuit raiejäätmetest.

Puistu	Tagavara	Saak					
		Tabe-puit	Traditsiooniline küttepuit		Hakkpuit, (niiskus 40%)		Puitkütuste energia kokku
	tm	tm/ha	rm/ha	MWh/ha	pm^3/ha	MWh/ ha	MWh/ha
Kaasik	101 – 117	13 – 18	12 – 18	17 – 25	40 – 58	33 – 48	50 – 106
Kuusik	146 – 179	4 – 6	3 – 5	4 – 6	7 – 10	6 – 8	10 – 14
Männik	152 – 233	6 – 14	9 – 14	12 – 19	20 – 28	17 – 23	29 – 42

Tabel 12. Teine harvendusraie keskealises metsas. Toodang: tarbepuit, traditsiooniline küttepuit, hakkpuit raiejäätmetest.

Puistu	Tagavara	Saak					
		Tarbepuit	Traditsiooniline küttepuit		Hakkpuit, (niiskus 40%)		Puitkütuste energia kokku
	tm	tm/ha	rm/ha	MWh/ha	pm^3/ha	MWh/ha	MWh/ha
Kaasik	244 – 379	53 – 83	7 – 15	10 – 20	22 – 28	19 – 23	29 – 43
Kuusik	340 – 586	28 – 70	3 – 6	4 – 8	15 – 20	12 – 17	16 – 25
Männik	279 – 522	36 – 80	2 – 6	2 – 8	17 – 25	14 – 20	16 – 28

Tabel 13. Uuendusraie küpses metsas. Toodang: tarbepuit, traditsiooniline küttepuit, hakkpuit raiejäätmetest.

Puistu	Puistu vanus	Taga-vara	Saak					
			Tarbe-puit	Traditsiooniline küttepuit		Hakkpuit, (niiskus 40%)		Puitkütuste energia kokku
	aasta	tm	tm/ha	rm/ha	MWh/ha	pm^3/ha	MWh/ ha	MWh/ha
Kaasik	≤ 70	245-366	173-277	31-48	44-67	50-65	40-55	84-122
Kuusik	≤ 80	387-585	285-437	52-78	73-109	92-132	78-111	151-220
Männik	≤100	323-522	261-432	10-15	14-20	67-100	56-84	70-104

Arvutusnäide. Kui palju metsamaa pindalaühikult oleks keskmiselt võimalik saada puitkütust massi-, mahu- ja energiaühikutes.

Oletame, et kavandatakse esimest harvendusraiet kaasikus, eraldise suurus on 0,4 ha. Väljaraie tulemus oleks siis järgmine:

- tarbepuitu - 0,4 ha x (13...18) tm/ha = 5,2...7,2 tm,
- traditsioonilist küttepuitu e halupuitu - 0,4 ha x (12...18) tm/ha = 4,8...7,2 rm,
- hakkpuitu raiejäätmetest - 0,4 ha x (40...58) pm^3/ha = 16...23,2 pm^3.

Kuna eraldiselt raiutavad tarbepuidu ja traditsioonilise küttepuidu kogused on väikesed, võib olla otstarbeks kogu raiutavast materjalist toota hakkpuitu. Sel juhul saab raiutavast tarbepuidust toota 2,5 x (5,2...7,2) tm = 13...18 pm^3 hakkpuitu ja raiutavast traditsioonilisest küttepuidust 1,7 x (4,8...7,2) tm = 8,16...12,24 pm^3 hakkpuitu. Seega eraldiselt saaks raie tulemusel (13...18) + (8,16...12,24) + (16...23,2) = 37,16...53,44 pm^3 hakkpuitu. Selline kogus vastab hakkeveoki täiskoormale. Seega antud oludes võiks kasutada eespool kirjeldatud tüvestehakke tehnoloogiat.

Puitkütuste keskmised hinnad viimastel aastatel

Eesti ettevõtetes olid 2012. aastal tarbitud puitkütuste hinnad järgmised: küttepuud 25,57 €/tm, hakkpuit 15,84 €/pm^3 ja puitjäätmed (peamiselt puukoor) 14,98 €/pm^3. (Eesti Statistikaameti andmed, www.stat.ee).

Tabel 14. Puitkütuste keskmised jaehinnad Eesti Konjunktuuriinstituudi andmetel koos käibemaksuga eurodes 2012. ja 2013. aasta kvartalite kaupa.

Puitkütuse liik	III, 2012	IV, 2012	I, 2013	II, 2013	III, 2013	IV, 2013
Pelletid, € /t	193	194	199	200	201	206
Puitbrikett, € /t	157	159	163	158	158	167
Kuivad lepahalud, 50 cm, € /rm	45	45	45	43	43	43
Märjad lepahalud, 50 cm, € /rm	34	34	34	33	34	34
Hakkpuit, käibemaksuta €/ pm^3	11,3	11,1	11,6	10,9	10,8	10,8

Kasutatud kirjandus

1. Wood Fuels Basic Information Pack. 2000. Jyväskylä. 191 lk.
2. European Biomass Statistics 2009. 2010, AEBIOM.
3. J. Lepa jt. Alternatiiv- ja väikeenergeetika. 1997, Tartu. 67 lk.
4. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Techno-logy Programme 1999 – 2003. In: Technology Programme Report 6/2004. 2004: Helsinki.
5. Grothantering. SCA SKOG, 1990.
6. „Eestis olemasoleva, praeguse või juba kavandatud tootmise-tarbimise juures tekkiva biomassi ressursi hindamine“. 2007. Maaelu Edendamise Sihtasutuse granti lõpparuanne
7. Muiste, P., Kiivit, K., Niidumaa, M. 2004. Kütusena kasutatavate raiejäätmete potentsiaal harvendus- ja uuendusraies, Metsanduslikud uurimused 40, 198-207.
8. Production of forest chips in Finland. In: OPET Report 6. 2001, VTT Energy.
9. Vares, V., et al. 2006. Biokütuste kasutaja käsiraamat, Tallinn, 172 lk.
10. Wood Fuel. Heat from the forest. 1983, Domänverket och SSR: Stockholm.
11. Pärast madalseisu on puiduturg ettevaatlik. Metsaleht 25.02.2010.
12. Mets. Maailm. Avastusretk piltides. 2006. Sinisukk. 125 lk.
13. www.metla.fi
14. www.stat.ee.
15. Eija Alakangas. Properties of wood fuels used in Finland, VTT Processes, 2005
16. EVS-EN 14961-1:2010 Tahked biokütused. Kütuste spetsifikatsioon ja klassid. Osa 1: Üldised nõuded
17. Ülevaade 2013. aasta IV kvartali puiduturust, autor Heiki Hepner,

Brošüüri väljaandmist finantseeris: SA Erametsakeskus
Täitja: Eesti Biokütuste Ühing
Koostasid: Ülo Kask, Peeter Muiste, Villu Vares
Tehniline teostus ja kujundus: Eha Kask
Trükk: Ecoprint AS
Tallinn 2014