Turbakasutuse ökoloogliselt tasakaalustatud viisidest ja seda toetavatest tehnoloogiatest.

II osa

Turbakasutuse tehnilistest ja energeetilistest võimalustest.

Marek Stranberg

Turba täanane energeetiline kasutus Eestis.

Enamjaolt põletetakse täna kaevandatav turvas Eestis, kas puistena või valmistatakse turbast küttebrikette. Mõlemal juhul on eelduseks turba piisavalt madal niiskusesisladus ning selliseks otstarbeks kasutatava turba lagunemisaste peab olema optimaalne. Vähelagunenud turba küttena kasutamine saab kõne alla tulla vaid puistena. Briketeerimiseks ning granuleerimiseks sobib märkimisväärselt lagunenud turvas. Peamine niiskuse alandamise viis on turba kuivatamine päikese ja tuule käes ja see muudab ka turbatootmise sesoonseks.

Kütteturvas jaotatakse järgmistesse kasutuskategooriatesse (http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/3._Turvas.pdf , samast allikast pärinevad Eesti turvaste füüsikalis-keemiliste karakteristikute väärtused, mida kasutatakse käesolevas töös).

Katelde ja ahjude kolletes kasutatava turba ehk kütteturba liigid:

• freesturvas – soo pinnast freesitud ja õhu käes kuivatatud peen turbapuru, mille põhimassi (85%) moodustavad osakesed läbimõõduga alla 3 mm, suuremate osakeste pikkus ulatub 10–15 mm-ni;

• tükkturvas – märjast turbamassist pressitud ja õhu käes kuivatatud turbatükid, mille pikkus on enamasti 100–200 mm, läbimõõt aga 50–100 mm;

• turbabrikett – sõelutud ja kuivatatud freesturbast suure rõhu all 10…13 MPa pressitud tihedad korrapärase kujuga briketid mõõtmetega 180 × 75 × 35 mm;

• turbapelletid ehk graanulid – kuivatatud freesturbast pressitud peened sõrmejämedused turbapulgad, sõltuvalt kuivatamise meetodist on kahte liiki:
− välipelletid – freesturvas kuivatatakse õhu käes,
− tehasepelletid – freesturvas kuivatatakse kuivatis.

Sama allika alusel klassifitseeritakse kütteturvast järgmisel moel:

Kütteturba liikide lühiiseloomustus

Näitaja	Ühik	Freesturvas	Tükkturvas	Turbabrikett	Turbapelletid
Arvutuslik niiskus	%	45	35	12	15
Tarbimisaine alumine kütteväärtus	MJ/kg kW h/kg kW h/m^{3*}	9,1…10,5 2,5…2,9 0,9…1,0	11,1…12,8 3,1…3,6 1,1…1,3	16,0…16,8 4,4…5,1 3,3…3,8	15,2…17,6 4,2…4,9 2,7…3,2
Kuivaine tuhasisaldus	%	2…11	2…11	2…11	2…11
Tarbimisaine niiskus	%	35…50	25…40	10…14	10…20
Tarbimiskütuse tihedus	kg/m^3	300…400	300…400	~750	550…750
Kuivaine keskmine väävlisisaldus	%	0,35	0,35	0,35	0,35

*tihedusel 350 kg/m^3

TTÜ soojustehnka instituut on analüüsinud nii turba elementaarkoostist kui eraldi ka orgaanilise aine koostist:

Turba kuivaine elementaarkoostis %

C^k	50...55
O^k	35…45
N^k	1…2
H^k	~ 6
S^k	0,1…0,5*

*mõnedes proovides isegi kuni 0,8%

Turba orgaanilise aine elementaarkoostis %

C^o	58
O^o	34
N^o	2
H^o	5,6
S^o	0,4

Turba niiskusesiladusest.

Turba niiskusesisaldus on väga kõikuv, sõltudes kuivatamise tingimustest (temperatuur, õhuniiskus, aeg), tootmisviisist ja kuiva turba tagasiniiskumisest. Toorturvas sisaldab kuni 90% vett ja 10% kuivainet. Tootmisel kuivab turvas soodsates tingimustes õhu käes ja päikese mõjul kuni 25%-se, üle aasta varju all seismisel isegi kuni 15%-se niiskusesisalduseni. Ilmastikust tingituna läheb turvas tarbimisele sageli normaalsest (33%) kõrgema niiskusesisaldusega (40…50%). Turba koguse arvestuse aluseks on tinglik niiskus. Tükkturba tinglikuks niiskuseks loetakse 33% ja freesturba tinglikuks niiskuseks 40%. Nende niiskuste juures on tükkturba tingkütuse ekvivalendiks (söe ekvivalendiks) 0,446 ja freesturbal 0,379. (TTÜ soojsutehnka instituudi andmed)

Käesoleva töö esimeses osas on kasutatud turbakoguste kirjeldamisel selles sisalduva orgaanilise süsiniku massi või siis turbakoguseid on kirjeldatud taandades need 12% niisuksesisaldusega turbale, mis vastab ligikaudu turbabriketi niiskusesisaldusele.

Turba küttevääртus

Suur niiskus põhjustab tarbimisaine madalat küttevääртust Qt = 8…14 MJ/kg (freesturbal keskmiselt 11 MJ/kg, tükkturbal 13 MJ/kg), turbabriketil Qt = 17,2…18,5 MJ/kg. Põlevaine küttevääртus Qp on piirides 20…25 MJ/kg, keskmiselt 21,1 MJ/kg.

Süttimistemperatuur

Õhkkuiva turba süttimistemperatuur võib olla 225 °C. Termiline lagunemine aga algab juba 100…110 °C juures.

Tuhk

Turbatuha keemiline koostis erineb oluliselt puidutuhast. Turbatuha keemiline koostis muutub suurtes piirides sõltuvalt paikkonnast ja turba liigist ning on toodud järgnevas tabelis:

Turbatuha keemiline koostis %

SiO_2	32…43
Al_2O_3	14…29
Fe_2O_3	14…36
CaO	6…10
MgO	1…4
K_2O	2…7
TiO_2	0,3…0,4
P_2O_5	1…1,1
SO_3	0,4…4

Sama võib öelda ka tuha sulamiskarakteristikute kohta:
- tuha deformatsioonitemperatuur tDT = 800…1400 °C,
- tuha sulamistemperatuur tFT = 950…1500 °C.

Sellised suured erinevused tuha sulamiskarakteristikutes ning küllaltki madalad alumised temperatuurid (tFT = 950 °C) viitavad turba kui kütuse šlakistumisvõimele katelseadmetes.

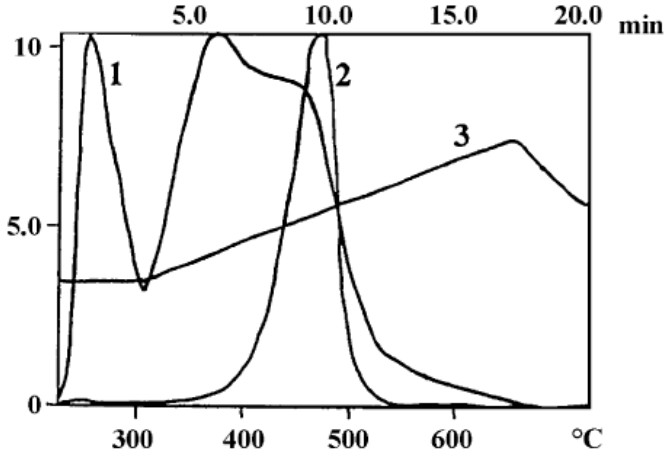
Seepärast tuleb kindlasti uute turbaalade kasutuselevõtmisel kütteturba tootmiseks määrata tuha sulamiskarakteristik.

Turba ja põlevkvi võrdlustest.

Nii põlevkvi kui turvas on otse põletatavad erineva loomuga põletusseadmetes ning seeläbi on saadav terminline energia rakendatav nii soojuse kui elektritootmiseks. Turvast saab mugavalt kasutada keevkiht-põletusseadmetes, mis nõuab vähem ettevalmistust kütuse selekteerimisel kui näiteks põlevkivi.
Turba kasutamine vahetult kütusena on aga sesoonse iseloomuga ning vahetult ammutatud turba madal tihedus nõuab kapitalikulukaid ladustamisvõimalusi.

Detailsemalt turba kasutamist vahetult põletatava kütusena antud töös ei käsitleta.

Turba ja põlevkivi võrdlsut termilise töötluse kontekstis on käsitlenud H. Luik koos kaastöötajtega (Peat semicoking and hydrocracking, J. Anal. Appl. Pyrolysis 85 (2009) 497–501).
Termilis-keemilise muundamise toormena käituvad põlevkivi ja turvas erinevalt. Viidatud töös on toodud Eesti põlevkivi ja turba võrdlevad Rock-Eval pürolüütilise lagundamise tulemused.



Põlevkivi (2) ja turba (1) pürolüütilise lagunemise kõverad, mis on mõõdetud temeratuuriproofiiliga (3). H. Luik jt.

Turba termilisel lagunemisel ilmneb laguprodukte juba 100 C kraadi jures ning see kerget eralduv komponentide kogum puudub põlevkivil täiesti.
Turvas on oma keemilise koostise tõttu igati atraktiivne tooraine küstuskeemiatööstusele.

Lähtetoormeks on H. Luige jt töös 12,9% niiskusega turvast ning lagundatud seda pürolüütiliselt ja töödelud hüdrokrakkimise meetodil (termiline töötlus vesiniku ja katalüsaatori manulusel). Kõnealune töö ilmestab turba keemilise töötlemise potentsiaali.

Product	Semicoking	Hydrocracking
Gas + water	42.0	30.1
Oil	13.3	29.8
Charcoal	44.7	40.1

Massiprotsentides avaldatud turba pürolüütilise poolkoksistamise ja hüdrokrakkimise tulemused. Hüdrokrakkimine surendab märkimisväärselt vedela komponendi tekke osakaalu. H. Luik jt.

Solvent	Semicoking	Hydrocracking
Water	29.3	4.7
Benzene	63.1	48.2
Acetone	7.7	47.1

Turba poolkoksistamise ja hüdrokrakkimise saaduste lahstuvused vees, bebseenins ja atsetoonis. Hüdrokrakkimise tulemusena suureneb vees mittelahustuvate ja kütustena või kütuselisaditea (suure hapnikusisalduse tõttu) kasutatavate saaduste osakaal.

Hüdrokrakkimine võimaldab turbas olevat orgaanilist ainet tõhusalt kallutada vees mitte lahustvate produktide tekke suunasl, mis kütuse ja keemiatööstuse seisukohalt on vaieldamatult huvipakkuv.

Muudest turba termilise töötlemise viisidest ja seotud võimalustest.

Hüdrotermiline söestamine.

Tegemist on suhteliselt universaalse protsessiga, mille abil õnnestub erinevaid orgaanilsi bioloogilsit päritolu aineid (valke, rasvu, süsvesikuid) muundada ühtlase kvaliteediga ja hoiustatavaks kõrge süsinikusisaldusega ja hüdrofoobseks biosöeks.

Selle protsessi võtmeks on 22 baarise ja 220C kraadisel temperatuuril biomassi dehüdreerimine, mis toimub energeetiliselt tõhusamalt kui tavapärane termiline kuivatamine.

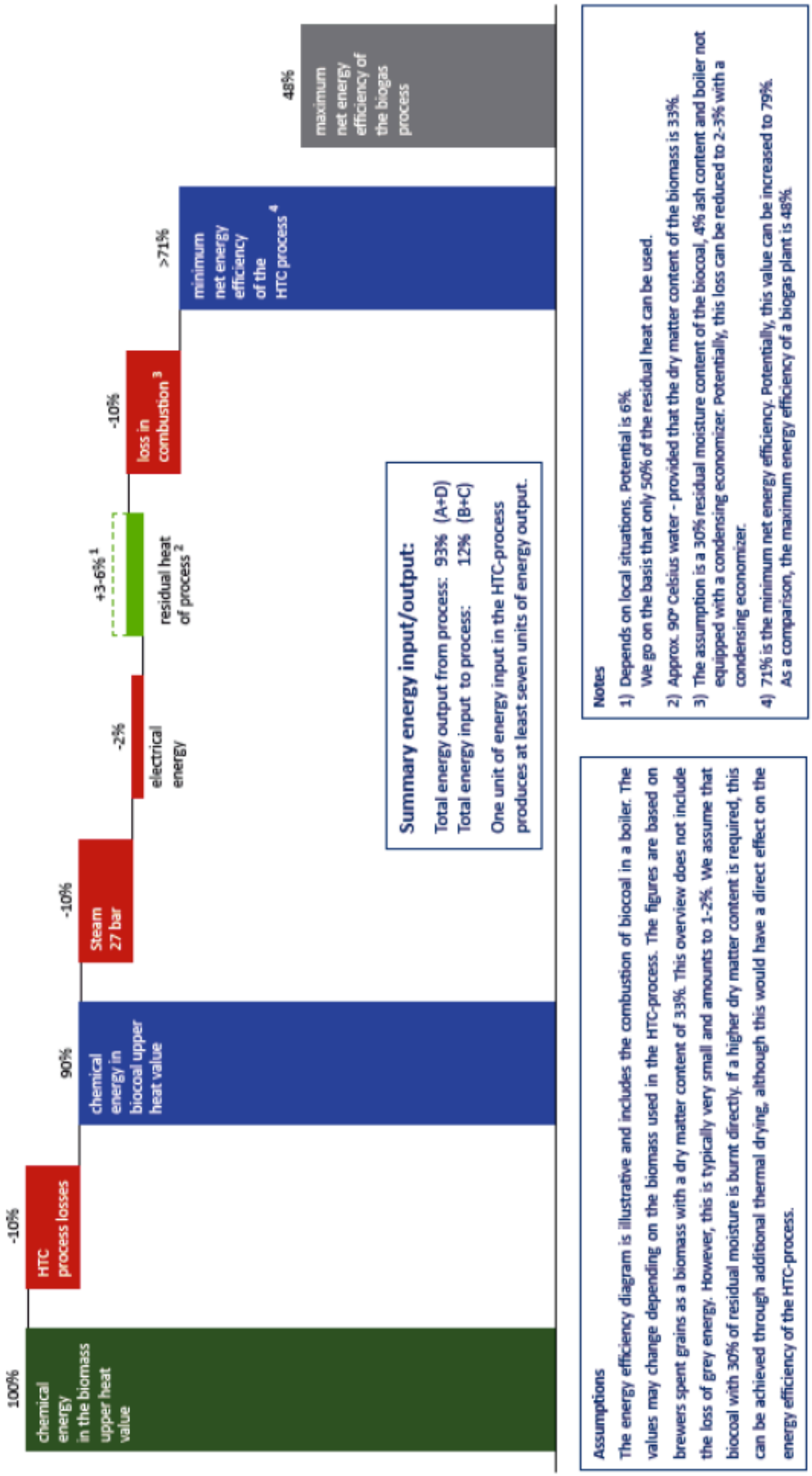
Selle protsessi avastamise eest on 1913 aasta Nobeli keemiapreemia antud Friedrich Bergiusele.

2013 aasta juunis Leipzigis toimunud rahvusvahelisel biomassi konverentsil esitleti AVA-CO2 biosöe tootmise tehnikat, mille näitajad on järgmised:

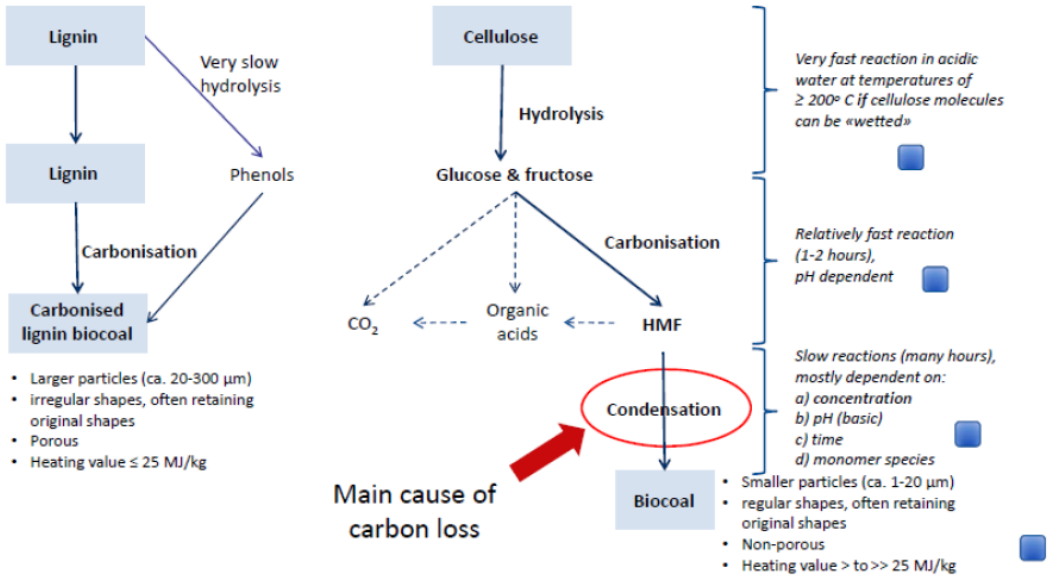
- efektiivsus süsinikuaatomite ülekandel lõpptootessse: üle 90%
- energeetiline efektiivsus: 70%
- produkti energiasisaldus kuni 30 GJ/t (8333 kWh/t)
- tuha sulamistemperatuur: 1200 C kraadi (turba töötlemisel biosöeks võib see ränühendite tõttu olla madalam)
- jäätmevaba konversioon: saadusteks on biosüsi ja vesi

Bioloogilise toorme muutmisel kütuseks on biosöe tootmisprotsess efektiivsem, kui näiteks biogaasi tootmine.

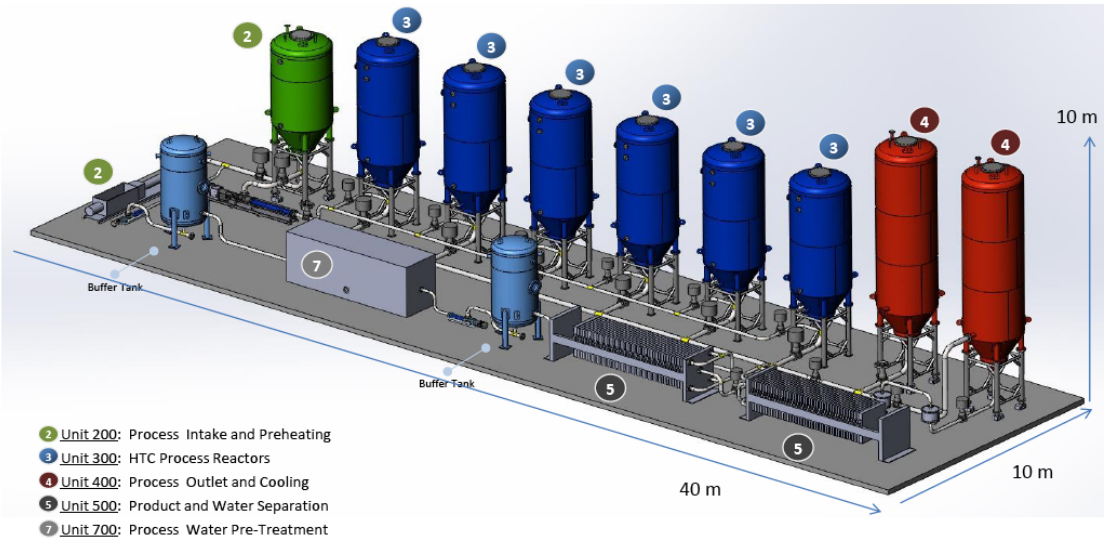
Seda võrdlust kajastabki Leipzigi konverentsil esitletud järgnevalt ära toodud slaid.


100%
chemical energy in the biomass upper heat value
-10%
HTC process losses
90%
chemical energy in biocoal upper heat value
-10%
Steam 27 bar
-2%
electrical energy
+3-6% 1
residual heat of process 2
-10%
loss in combustion 3
>71%
minimum net energy efficiency of the HTC process 4
48%
maximum net energy efficiency of the biogas process
Summary energy input/output:
Total energy output from process: 93% (A+D)
Total energy input to process: 12% (B+C)
One unit of energy input in the HTC-process produces at least seven units of energy output.
Notes
1) Depends on local situations. Potential is 6%.
We go on the basis that only 50% of the residual heat can be used.
2) Approx. 90° Celsius water - provided that the dry matter content of the biomass is 33%.
3) The assumption is a 30% residual moisture content of the biocoal, 4% ash content and boiler not equipped with a condensing economizer. Potentially, this loss can be reduced to 2-3% with a condensing economizer.
4) 71% is the minimum net energy efficiency. Potentially, this value can be increased to 79%.
As a comparison, the maximum energy efficiency of a biogas plant is 48%.
Assumptions
The energy efficiency diagram is illustrative and includes the combustion of biocoal in a boiler. The values may change depending on the biomass used in the HTC-process. The figures are based on brewers spent grains as a biomass with a dry matter content of 33%. This overview does not include the loss of grey energy. However, this is typically very small and amounts to 1-2%. We assume that biocoal with 30% of residual moisture is burnt directly. If a higher dry matter content is required, this can be achieved through additional thermal drying, although this would have a direct effect on the energy efficiency of the HTC-process.

Ligniini ja tselluloosi, millised osised on esindatud ka turbas, transformatsioon biosöeks toimub järgmiste protsesside ahelates:



Tootmisprotsessi ülesehitus on biosöe toormiseks järgmine:

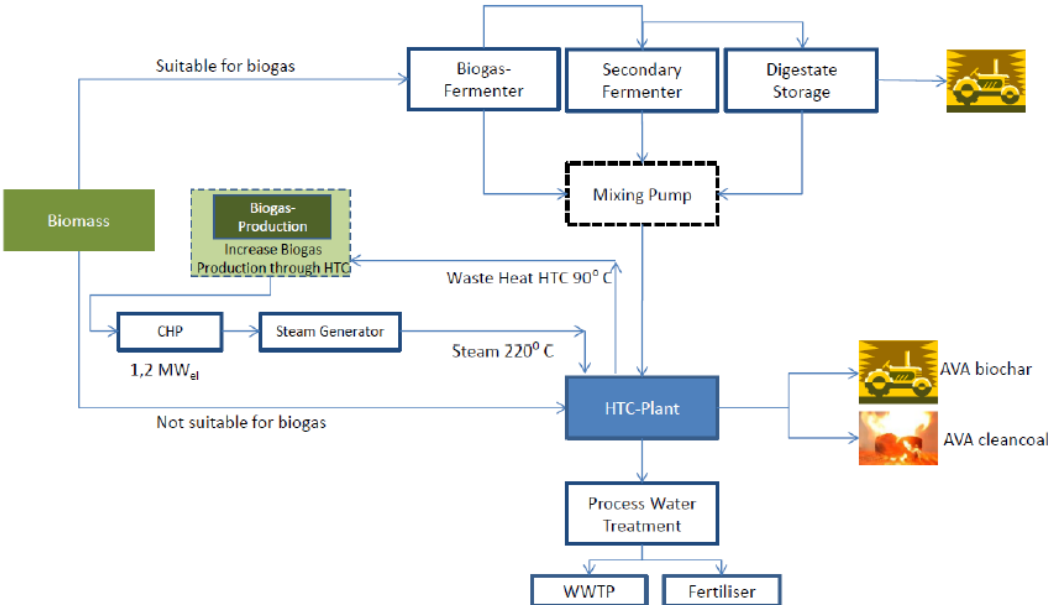


AVA-CO2 tehnikal biosöetehas Relzow'is Saksamaal.

HTC-1 tootmsiseadme tehnilis-majanduslikud andmed:

Investeering: 5-9 M€
Tööaeg: 300 pv aastas (300 x 24h = 7200 töötundi aastas
Biomassi kogus: 10800 t/y (1,5 t annuse kohta x 7200 annust aastas)
Annuseid aastas: 7200 (4 annust reaktori kohta päevas x 300 päeva x 6 reaktorit)
Biosöe toodang: 8400 t/a
Küttevääртus: 20-30 GJ/t
Energiavajadus: 5,7GWh/a (1,1-1,5 tonni auru annuse kohta=0,8 MWh x 7200 annust
Elektrivajadus: 0,54 GWh/a (0,075 MWh/annus x 7200 annust)
Veevajadus: 32500 m3 (3-6m3/annus x 7200 annust)
Pindalavajadus: 2000 m2 (HTC moodul koos kõigi vajalike lisadega)
C efektiivsus: >90%
Energeetiline netto-efektivsus: >70%

Sellises protsessis tekkiv biosüsi on hüdrofoobne ning mitteporsuv ning seetõttu ka pikemaajaliselt ladustatav.
Kasutades toormeks turvast saab selle filterpressi või vaakum-lint kuivati abil eelnevat veetustada protsessi jaoks sobilikku seisu.
Kontsentreeritud süsiniku allikana on biosüsi vajadusel kasutatav ka vedelkütuste sünteesiks.
Kombinatsioonis biogaasi tootmisega saab AVA-CO2 loodud biosöe tehnoloogiat sellega energiasäästlikult integreerida, kuid see pole otseselt seotud turbakasutuse võimalusega:



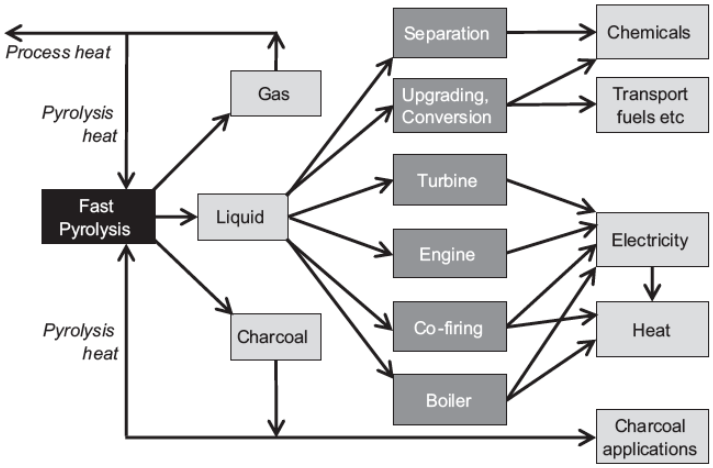
HTC tehnoloogia ja biogaasi tootmise omavaheline integreerimine.

Biomassist (ka turbast) vedelkütuste saamine.

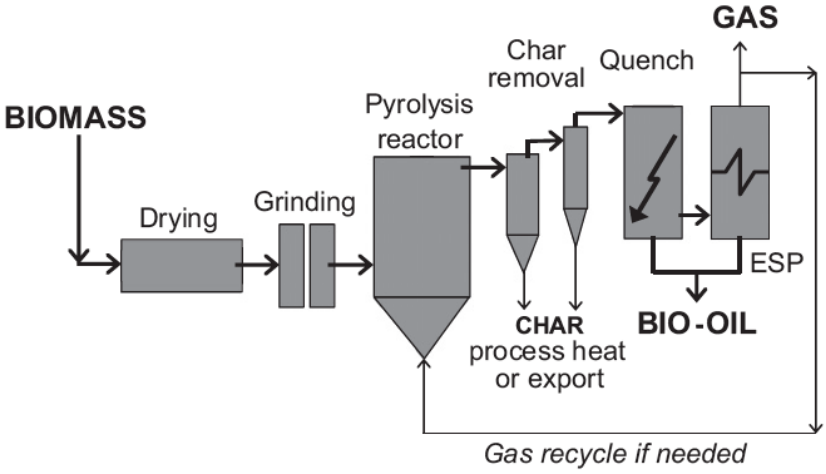
Vaatamata biosöe tootmise efektiivsuele on siiki huvipakkuv ka vedelkütuste tootmine biolooglisest toormest. Ka põlevkivi kasutuses ollakse liikumas suunal, kus nii õli tootmine põlevkivist, kui selle väärindamist nn heledateks vedelkütusteks peetakse oluliseks. Käesoleva töö kontekstis näidatase ka seda, millised on vedelkütuste ja kütuelisandite saamise võimalused turbast.

Dietrich Meier jt (State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20 (2013) 619–641) on oma ülevaatetöös keskendunud just kiirpürolüüsi, kui ühe lubavama tehnika biomassi vedelkütuseks konverteerimisel, olukorra ja väljavaadete kirjeldamisele.
Ka Eestis on käivitumas esimene biomassi kiirpüsolüüsil selle peamist produkti, bioõli, tootev tehas Pärnus, mis kasutab ära sooja ajal elektri ja sooja koostootmisjaamas tekkiva jääksoojuse.

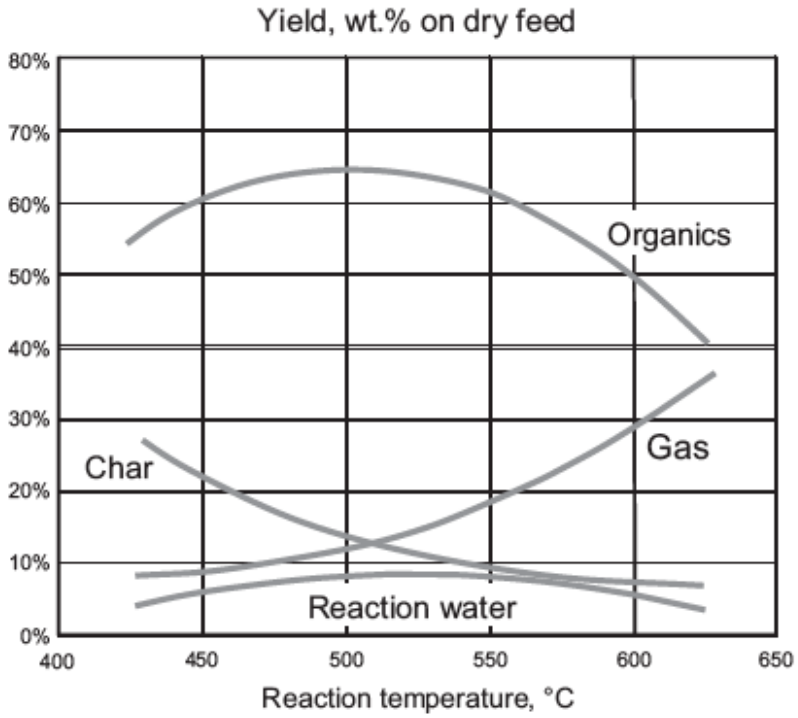
Selle uurimuse kohaselt on kiirpürolüüsi biomassi vedelaks kütteaineks konverteerimise tõhusus kui 75%.
Kiirpürolüüsil tekkiv bio-õli on pruunikas ja ajas muutuvate omadustega vedelik, mille kütteväärtus on reeglina pool naftapõhise kütteõli omast.
Lisaks bio-õlile muundub osa töödeldavast biomassist ka gaasiks ning tekib ka kosksitunud materjal.



Kiirpürolüüsi saadustest ja nende kasutamisest. Meier jt.



Kiirpürolüüsi protsessi keskseks osaks on vastav reaktor. Samas moodustab selle süsteemi osa kapitalikulu vaid 10-15% terviksüsteemi maksumusest. Põhiline arendustegevus toimubki pürolüüsireaktori konstruktsioonide ja töörežiimide osas, et saavutada ühtalne soojusülekanne ning keemiliste protsesside parim koordineeritus ja sünkroniseeritus ühtlase kvaliteediga toote saamiseks. Meier jt.



Papli puidust erinevatel kiirpürolüüsi meetodil saadavate bioõlide koostis. Meier jt.

Puidust toodetud bioõli sisaldab nii vett kui on toimunud keemiliste muutuste tõttu ka happeline.

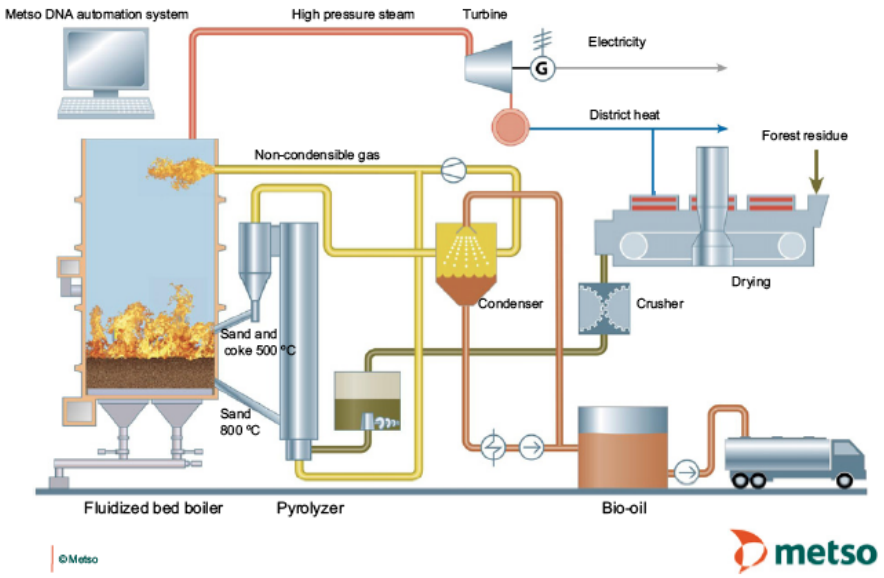
Typical properties of wood-derived crude bio-oil.

Physical property	Typical value
Water content	25%
pH	2.5
Specific gravity	1.2
Elemental analysis (on dry basis)	
C	56%
H	6%
O	38%
N	0–0.1%
HHV (as produced)	17 MJ/kg
Viscosity (20 °C and 25% water)	40–100 mPas
Solids (char)	0.1%
Vacuum distillation residue	up to 50%

Puidust todetud bioõli koostis ja omadused. Meier jt.

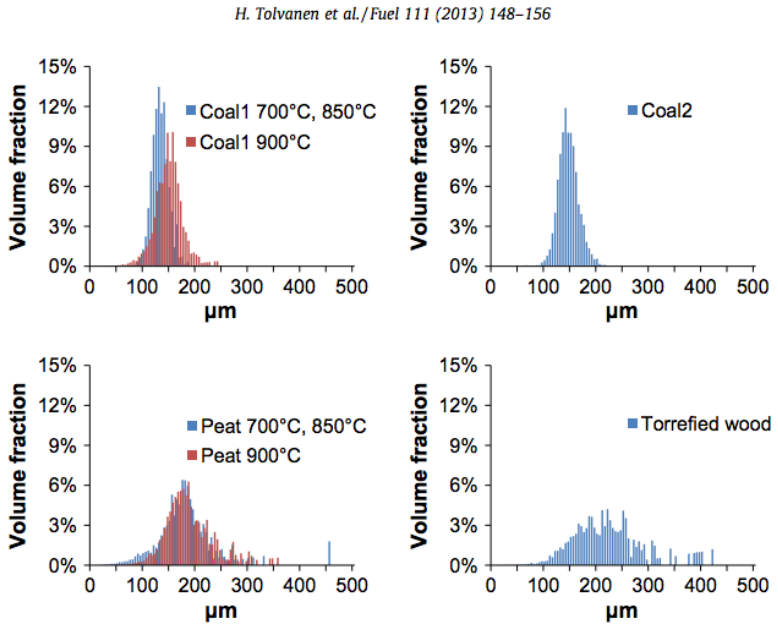
Bioõlide tootmist kiirpürolüüsil uuritakse ja arendatakse enamustes tööstusriikides. Metso, VTT, Fortum ja UPM on soomes loonud konsortsiumi, mis on loonud integreeritud kiirpürolüüsi tehnilise lahenduse, kus sel moel loodud kütused on kasuatavad kaugküttes ja elektri tootmisel ning tootmise kõrvalsaadused näiteks

väetistena põllumajanduses.



Pidades silmas truba kaevanadamist niiskena pakuvad siinkohal huvi ennekõike sellised turba keemilis-termilise töötlemise viisid, kus niiske või märja materjali kasutamine on tötlemisprotsessi loomulik osa.

Ilmselt põhjusel, et turvat ei loeta ei ÜRO ega Euroopa Liidu poolt taastuvtoormeks pole ka viimasel ajal põhjalikumat käsitlust leidnud bioõli tootmine turbast. Tolvaneni jt. uuringus (Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling, Fuel 111 (2013) 148–156) võrreldakse peeneteralsie söe, puidu ja turba lagunemisomadsui mudeldades kiirpürolüüsi situatsiooni. Sellele uuringule tuginedes võib väita, et nii puidu kui turbagi muundumiskarakteristikud kiirpürolüüsiprotsessis on lähedased ja erinevad märkimisväärslt söe mundumisest kiirpürolüüsi protsessis. Sellest saab teha järelduse, et nii turba kui puidu puhul võivad muundumisprotsesid ja ilmselt ka saadused olla lähedased.



Erinevate materjalide osakeste jaotused kiirppürolüüsi protsessis. Puidu ja turbaosakeste muundumisel kiirpürolüüsi protsessis moodustvad lähedaste jaotusomadustega osakesed, mille jaotusküver erineb mmärkimisväärselt söe kiirpürolüüsil tekkivate osakeste jaotuskõverast. Tolvanen jt.

Biomassi gaasistamine ja süsivesinike süntees.

Kas katalüsaatorita ca 1200-1300 C kraadi juures või sobilike katalüsaatoritega ca 900 C kraadi juures on biomass muudetav nn süngaasiks, mille koostisosadeks on Co, CO2, H2, CH4 ja N2.

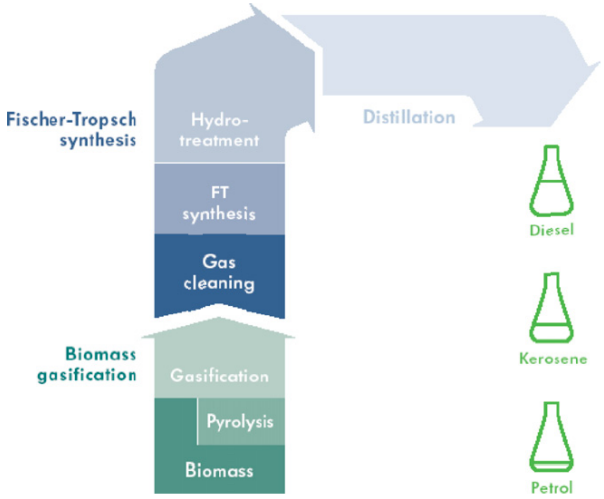
1923 aastal on Franz Fisheri ja Hans Tropschi poolt loodud keemiline reaktsioon, täna kutsutud kui Fisher-Tropschi reaktsioon, mille abil on sellestgaasisegust sünteesitavad mitemsugused süsivesinikud. Reaktsiooni kõrvalsaaduseks on vesi.

Üldistatult on see reaktsioon selline.

$$(2n + 1)\ H_2 + n\ CO \rightarrow C_nH_{(2n+2)} + n\ H_2O$$

FT reaktsioon toimub temperatuuril 150-300 C kraadi. Selle temperatuurbvahemiku ülaosas suureneb metaani osakaal sünteesisaaduste hulgas. Kasutatakse koobalt- ja raudkatalüsaatoreid.

Sünteesil tekkinud segu hüdrogeenimisel ja järgneval destillatsioonil saadakse huvipakkuvaid kütusesegusid sisepõlemismootoritele.



Tahketest biokütstest pürolüütilisel gaasistamisel vedelkütuste saamise ahel.

Põhjalikumalt on biokütuste kasutamist pürolüütilises gaasitamises ning hilisemas süsvesinike sünteesis ja hüdrogeenimisel käsitelenud Swain jt. (Biomass to liquid: A prospective challenge to research and development in 21st century, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 4917– 4933)

Nagu baastööstuses levinud on tootmiskulud sõltuvuses tootmismahtudest. Üle gaasistamise ja FT reaktsiooni vedelkütste tootmisel on välja toodud tootmise omahinna sõltuvus tootmisüksuse biomassitarbimisest (energiaühikuile taandatult) järgmiselt:

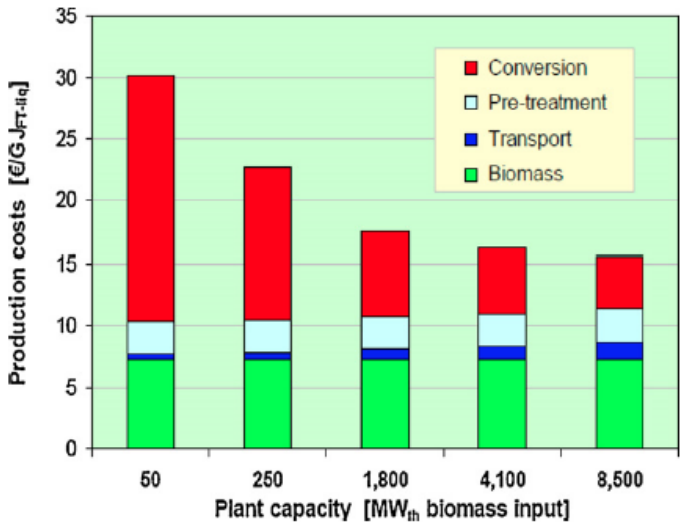
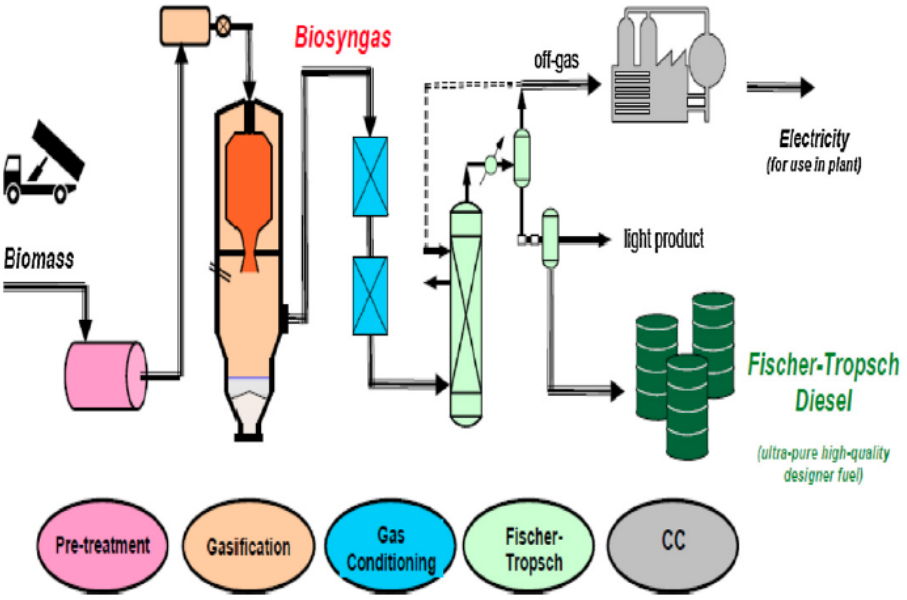


Fig. 3. Scale dependency of FT fuel production costs. For illustration: 15 €/GJ$_{FT}$ ≈ 55 €ct/L

Swain jt.



Biomassist vedelkütuse tootmise skeem koos põlevate gaaside kasutamisega jõujaamas. Swain jt.

Selline tootmine vajab tooret, mille niiskusesisaldus on ca 7%. Optimaalseks tootmismahuks sellisel biomasi vedelkütuseks konverteerimisel peetakse toodangu energeetilist väljundit 2000-4000 MWh/pv (16 000 – 32 000 bbl/pv).

Lisaks FT reaktsioonile on Lurgi poolt loodud ka süngaasi eksotermilse metanoolisünteesi protsess, mis toimb 50-100 baarisel rõhul temperatuurivahemikus 220-280 C kraadi ning Cu-Zn-Al2O3 katalüsaatori manulusel.

Protsessi kulgeb ise järgmiste rööbitiste reaktsioonidena:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$$

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

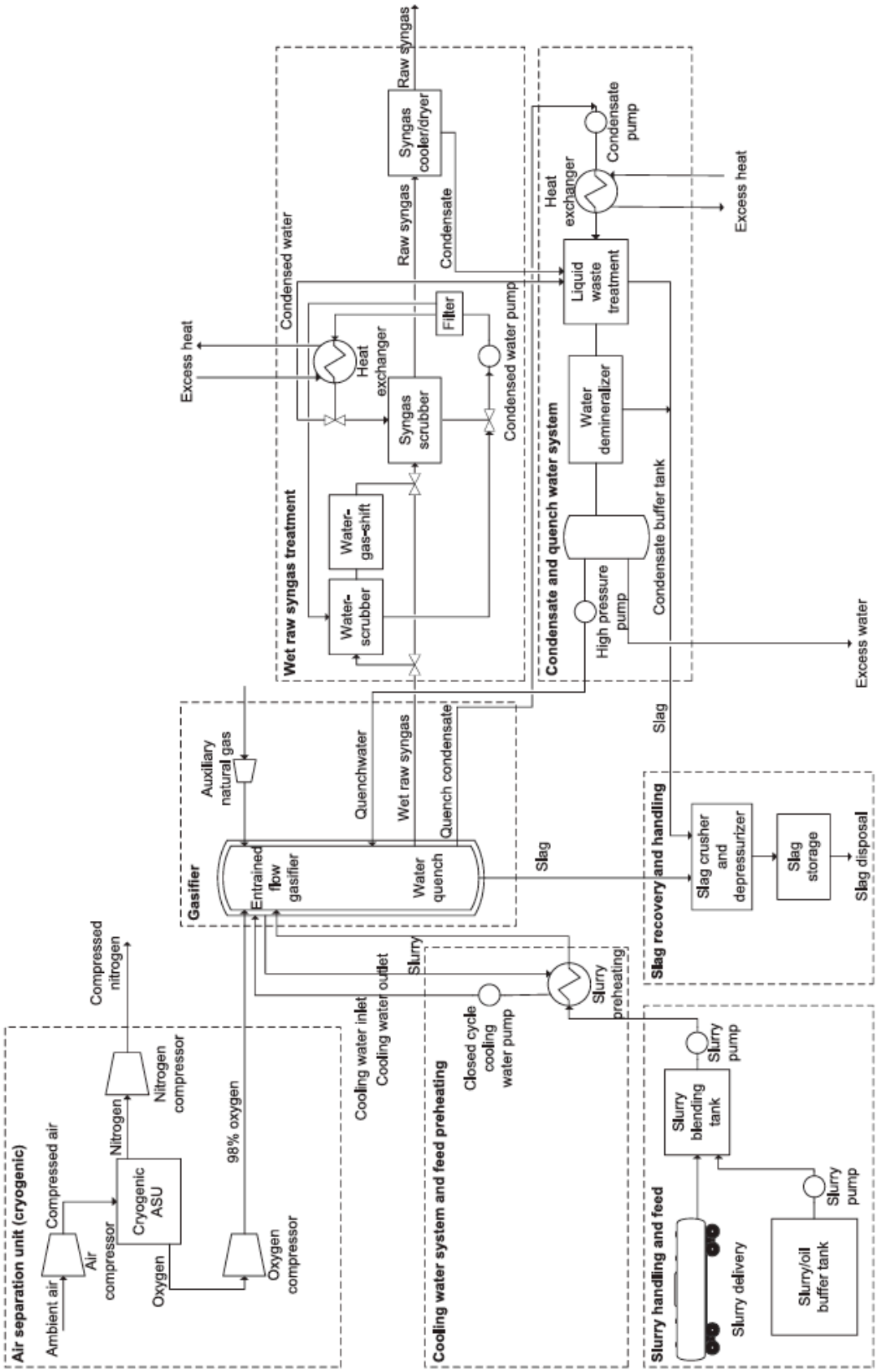
Metanool on samuti kasutatav mootorikütusena aga ka näiteks kütuselementides elektriks muundamiseks.

Põhiliselt viidatakse sedalaadi töödes ennekõike põllumajandusliku või puidupõhise biomassi konverteerimisel süngaasiks. Turvast ei käsitleta, sest reeglina puudub laiem raamistik, millega esitleda turba võimalikku ökolooglisemat ning kliimasõbralikku ammutamist. Seega on vajalik igal juhul mistahes sedalaadi tehnoloogia rekendamisel teha täpsustavad uurngud ja kohendused ka turbale.

Põhjaliku tehnilis majandusliku analüüsi biomassist vedelkütuste tootmise kohta on teinud Trippe jt. (Techno-economic assessment of gasification as a process step within biomass-to-liquid (BtL) fuel and chemicals production, Fuel Processing Technology 92 (2011) 2169–2184). Antud töös on mu hulgas analüüsitud ka

kaheksat eri tüüpi gasifitseerimisseadet ning võrreldud erinevaid tootmisskeeme nende kapitali ja opereerimiskuludes.

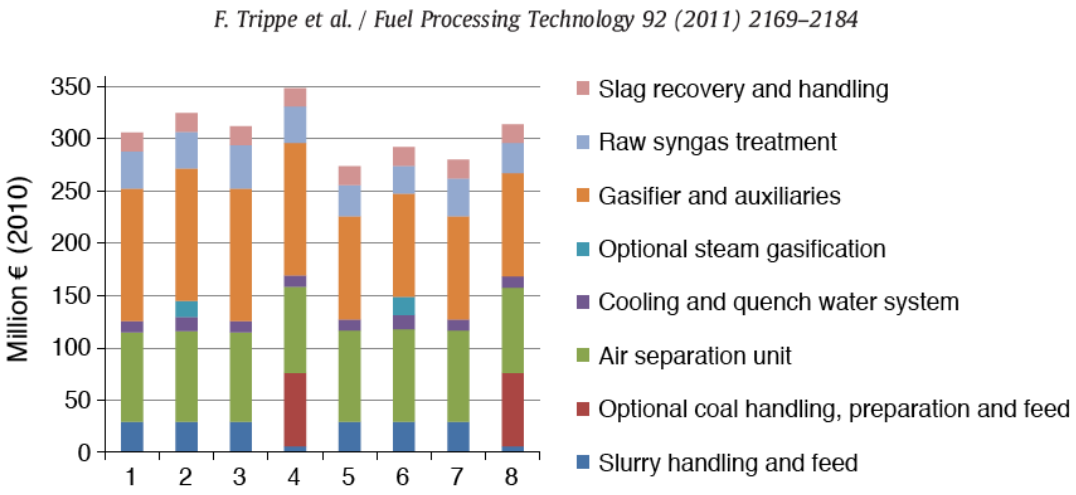
Üldlahendus, mille alusel kaheksa erinevat juhtimit on koostatud on kujutatud järgmisel süngaasi tootmise skeemil:



Peatumata tehhnilistel üksikasjadel, olgu siinkohal välja toodud mõned võrdlusandmed:

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Syngas, $H_2 + CO$ (Nm^3/h)	216,980	214,968	216,980	217,154	217,810	216,198	217,813	216,833
Usable heat (MW)	141	165	135	134	152	173	146	144
Temperature level usable heat (°C)	172	174	171	171	188	187	187	186
Slag (t/h)	15.3	15.3	15.3	15.0	15.3	15.3	15.3	15.0

Töös analüüsitud kaheksa erineva gasifitseerimissüsteemi väljundparameetrid. Trippe jt.



Erinvate gasifitseerimislahenduste kapitalikulude jaotus. Trippe jt.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Capital costs (k€/a)	29,948	31,764	30,522	34,116	26,801	28,596	27,427	30,739
Maintenance cost (k€/a)	13,881	14,809	14,174	14,608	12,273	13,190	12,593	12,883
Tax (k€/a)	3059	3245	3118	3485	2738	2921	2802	3140
Insurance (k€/a)	3059	3245	3118	3485	2738	2921	2802	3140
Personnel costs (k€/a)	3190	3190	3190	3190	3190	3190	3190	3190
Slurry costs (k€/a)	242,747	242,747	242,747	24,275	242,747	242,747	242,747	24,275
Slurry transpor-tation costs (k€/a)	18,883	18,883	18,883	0	18,883	18,883	18,883	0
Electricity costs (k€/a)	40,933	44,161	40,995	39,331	40,390	45,859	40,460	39,028
Coal costs (k€/a)	0	0	0	75,406	0	0	0	75,406
Natural gas costs (k€/a)	80	2023	80	80	80	1435	80	80
WGS catalyst costs (k€/a)	31	0	131	31	31	0	133	29
Sum (k€/a)	355,812	364,066	356,957	198,007	349,870	359,741	351,116	191,909
Specific syngas costs (€/Nm^3)	0.2340	0.2417	0.2347	0.1301	0.2292	0.2374	0.2300	0.1263

Erinevate gasifitseerimislahenduste kulude jaotus ja kulupõhiste omahindade võrdlus. Trippe jt.

Muud perspektiivsed biomassi töötlemismeetodid

Atraktiivseks keemiliste muundamiste keskkonnaks on superkriitlises oleksu vesi. Kõrgematel rõhkudel kui 221 baari ja kõrgematel temperaturidel kui 374 C kraadi on vesi superkriitilises olekus. Füüsikaliselt tähendab see, et veel on vedela olekuga lähedane tihedus, kuid selles olekus täidab vesi anuma nagu gaaski. Kriitilises olekus on vee tihedus 0,322 g/cm3.
Sellises oleksus vees toimuvad mitmesugused oksüdatsiooni ja konversiooniprotsessid ning võimanduvad ka mitmete katalüsaatorite toimed. keemiliste reaktsioonide jaoks, mis puudutavad näiteks biomassi konversiooni muudeks kütusaineteks, on tähenduslikud ka reaktsioonikeskkonnad, mille omadused on lähedased superkriitilisele olekule. Tugevate oksüdeerivate omaduste tõttu nõuab

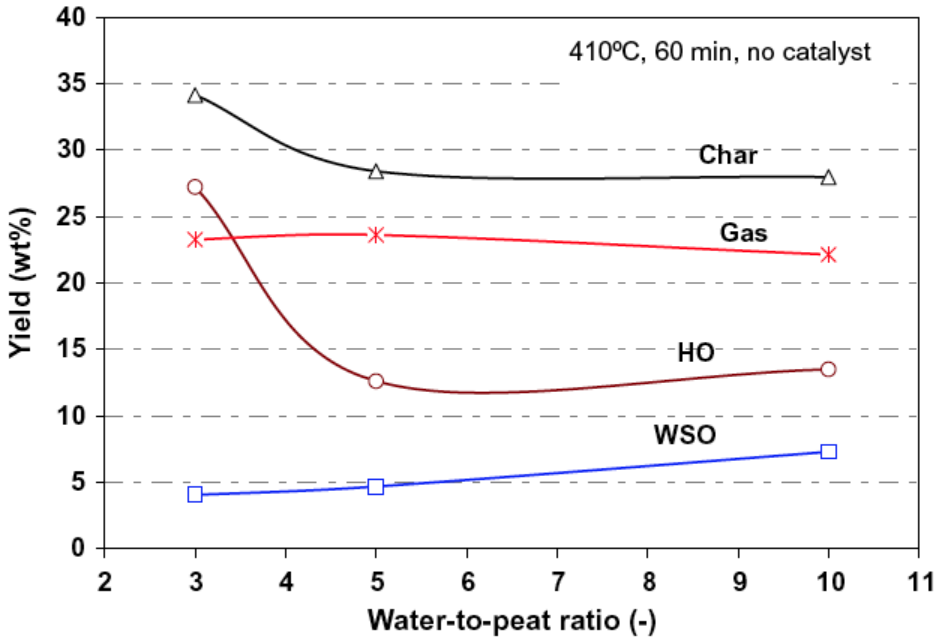
superkriitlise veega reaktsioonide lävbiviimine erimaterjale ning selleks sobilikke metallisulameid. Superkriitlise veega töötlemist on kaalutud ohtlike jäätete utiliseerimiseks ning on loodud ernevaid pilootsüsteeme, mille tootlikkus on münikümmend liitrit tunnis. Tänaseks loodud maailma suurimal materjalide suprkriitlise veega töötaval seadmel on tootmsvõimekus 3000 l/h. See on Rooti firma Chematur Engineering AB poolt loodud AquaCat tehnoloogia, mis on loodud väärismetallidega tegeleva ettevõtte Johnson Matthey jaoks.

Samas uuritakse biomassi superkriitlise ja subkriitlise veega töötlemist üsna ulatuslikult, sest materjalitehniliste probleemide lahendusmisel võib olla tegu paljullubava tehnoloogilise lahendusega erinevate kütuste saamiseks biomassist.

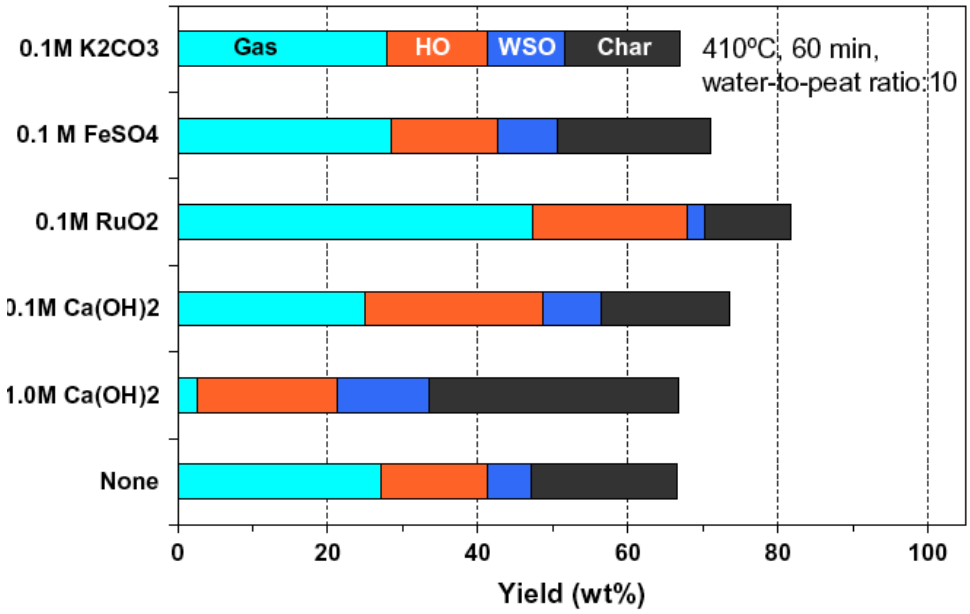
Nii super- kui subkriitilise veega turba töötlemise atraktiivne pool on seotud asjaoluga, et toorainet pole sel juhul vaja veetustatda vaid see tuleb vabastada vaid liigveest, sest sobilike reaktsioonisegude koostises on veel märkimisväärne roll niikuinii.

C. Xu ja J. Donald (Upgrading peat to gas and liquid fuels in supercritical water with catalysts, Fuel 102 (2012) 16-25) kirjeldavad turba töötlemist superkriitilises olekus veega ning erinevate katalüsaatoriite manulusel.

Sõltuvalt vee ja turba massivahekorrast reaktisoonisegus muutub ka reakstioonisaaduste jaotus.



Erinevate produktide saagise sõltuvus reaktsioonisegus oleva turba ja vee massivahekorrast. WSO- vees lahustuvad orgaanilised ühendid; HO- raske õlifraktsioon, GAS – gaasiline saadus, Char – süsi. Katalüsaatorita reakstiooni saadused. Reakstioni temperatuuriks 410 C kraadi ja kestvuseks 60 mintit. Vee osakaalu suurenemine reaktsioonisegus suurendab vees lahustvate oraganiliste ühendite sünteesi ja vähendab raskemate ülijate komponentide osakaalu. Xu jt.



Katalüsaatorite mõju reaktsioonisaaduste hulgale ja suhtarvudele. Gas- gaasilised saadused, HO- rasked kütteõlid, WSO-vees lahustuvad orgaanilised ained, Char – süsi. Xu jt.

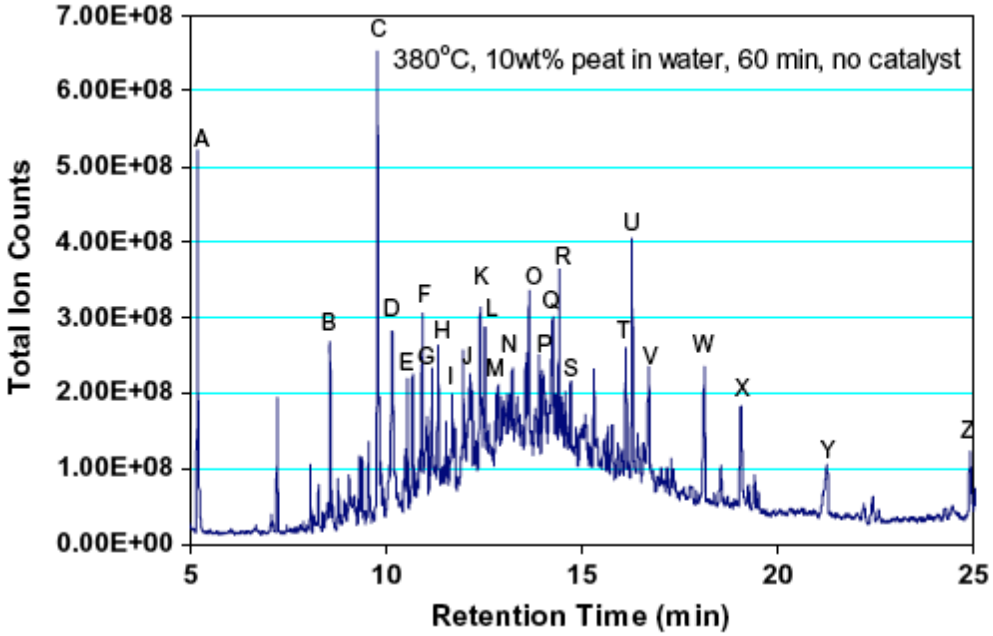
Yield of gaseous species in the SCW treatment of the peat (water-to-peat ratio of 10) for 60 min in 2 MPa N_2 at 410 °C with various catalysts

Catalyst	Yield of gas species (mmol/g)					HHV_m[a] (MJ/kg)
	H_2	CH_4	CO	CO_2	$C_2 + C_3$[b]	
None	0.05	0.26	0.20	4.61	0.16	2.81
0.1 M $Ca(OH)_2$	0.09	0.34	0.23	5.21	0.25	3.44
1.0 M $Ca(OH)_2$	**0.22**	**0.21**	**0.32**	**0.15**	**0.17**	**27.7**
0.1 M RuO_2	**2.44**	**2.02**	**0.08**	**9.66**	**0.28**	**7.73**
0.1 M $FeSO_4$	0.07	0.46	0.24	5.98	0.19	2.99
0.1 M K_2CO_3	0.52	0.35	0.31	6.12	0.21	3.66

[a] $HHV_m = (HHV_v)_{P,T} \times (v)_{P,T}$ where $(HHV_v)_{P,T}$ and $(v)_{P,T}$ are the volumetric higher heating value and the specific volume of the gas mixture, respectively, at 273.15 K and 101.325 kPa.

[b] C_2 = ethylene + ethane and C_3 = propane + propylene.

Katalüsaatorite mõju gaasiliste saaduste koostisele ning küttevääртusele. Xu jt.



A = 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-; B = Phenol, 3-methyl-; C = Phenol, 4-ethyl-;
D = 1,2-Benzenediol; E = Phenol, 3-ethyl-5-methyl-; F= Phenol, 3-propyl-;
G = Benzene, 1,4-dimethoxy-2-methyl-; H = 1,2-Benzenediol, 3-methyl-;
I = 1H-Inden-5-ol, 2,3-dihydro-; J = Phenol, 4-(2-methylpropyl)-; K = 4-Ethylcatechol;
L = 1-Hexene, 2-(O-anisyl)-4-methyl-; M = (6-Hydroxymethyl-2,3-dimethylphenyl)meth;
N = Undecanoic acid; O = Benzyl alcohol, .alpha.-isobutyl-2,4,6-t; P = Furan, 3-phenyl-;
Q = Dodecanoic acid; R =Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-; S = Azulene, 4,6,8-trimethyl-;
T = 1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-; U = 2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetramethyl-;
V = Tetradecanoic acid; W = 2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-; X = 1-Hexadecanol;
Y = n-Hexadecanoic acid; Z = 1-Octadecanol

Fig. 8. GC/MS spectrum and results for the HO product from the SCW treatment of peat at 380 °C for 60 min without catalyst (the NIST 98 MS library with a 2002 upgrade was used for identifying the compounds).

Kormatomass analüüs näitab seda, et raske õli fraktsoon sisaldab märkimisväärselt erinevaid oksügenaate, mida saab kasutada kas olemasoevate nii olemasolevate kütuste lisanditena, keemilise toormena kui ka eraldiseisva kütusseguna. Xu jt.

Superkriitlise vee keskkond biomassi ja sh turba keemilise konverteerimise vahendina on huvipakkuv ka seetõttu, et võimaldab rakendada muundmaiseks erinevaid ja majanduslikult atraktiivseid katalüsaatoreid. Li, Hurley ja Xu on demonstreerinud ka näiteks rauamaagi ja rauühnedite katalüüsivat toimet superkriitilise vee kekeskkonnas. (Liquefactions of peat in supercritical water with a novel iron catalyst, Fuel 90 (2011) 412–420), mille abil on turbast võialik saada peaagu saagisega 40% rasket õlijat oksügenaatiderikast saadust. 40% saagist ületab vaid ruteeniumoksiidi kasutamine katalüsaatorna turba töötlemisel superkriitlises vees.

Mikroenergeetilsied seadmed turbatöötlemise produktide muundamiseks.

Markeerivat tähelepanu vajavad siinkohal energia mikromuundmaisseadmed, mis on võimsusega kuni mõnisada kilovatti alates mõnest kilovatist võimusest.
Kõnealust tehnikat arendatakse ulatuslikult ja siinkohalt toon ära vaid kaks põhimõttelist lahendust, mis võivad huvi pakkuda nii turba (brikettid ja graanulite) kasutamise kontekstis aga ka turbatöötlemisproduktide asjus, mida kirjeldame allpool ning millest atraktiivseim kütus on turba termilis-keemilisel töötlemisel tekkiv biosüsi.

Gaasistamisseadmed ja generaatorgaasil ajamid.

Orgaaniliste ainete õhuvaeguses põlemisel tekkib madala kalorsusega põlev gaas, generaatorgaas, mida saab kasutada ssepõlmismootorite käitamiseks ja seeläbi elektri genereerimiseks.
Kõnealune tehnika on olnud arendajate huviorbiidis viimase 15-20 aasta jooksul, eesmärgiga luua töökindlaid ja automaatjuhtimisel mikrojõujaamu.

Gasifitseerimisel ja muul bioloogilise toorme komplekssel kasutusel põhinevaid tehnikaid arendab Kalifornias paiknev ALL Power Labs, milline on välja töötanud automaatjuhtimisel biomassi gasifitseerimisseadmed koos sisepõlemismootori ja elektrigeneraatoriga (http://www.gekgasifier.com). See ettevõtte ja tema tehnika on toodud siia vaid ühe näitena paljudest.

All Power Labs töötajad Jim Mason ja Nick Bindbeutel 20kW võimusega elektrigenereerimissüsteemi juures.

Kõnealuselt seadmel on mõningaid kasutsupiranguid küstuste osas. Näiteks ei sobi kütusteks roog või siis teisalt ka kivisüsi. Tehnoloogia eeldab koospüsivat tükk,

kütust, millel on lemas piisav energiathedus kuid mille põlemistemperatuur ei ole ka liialt suur.

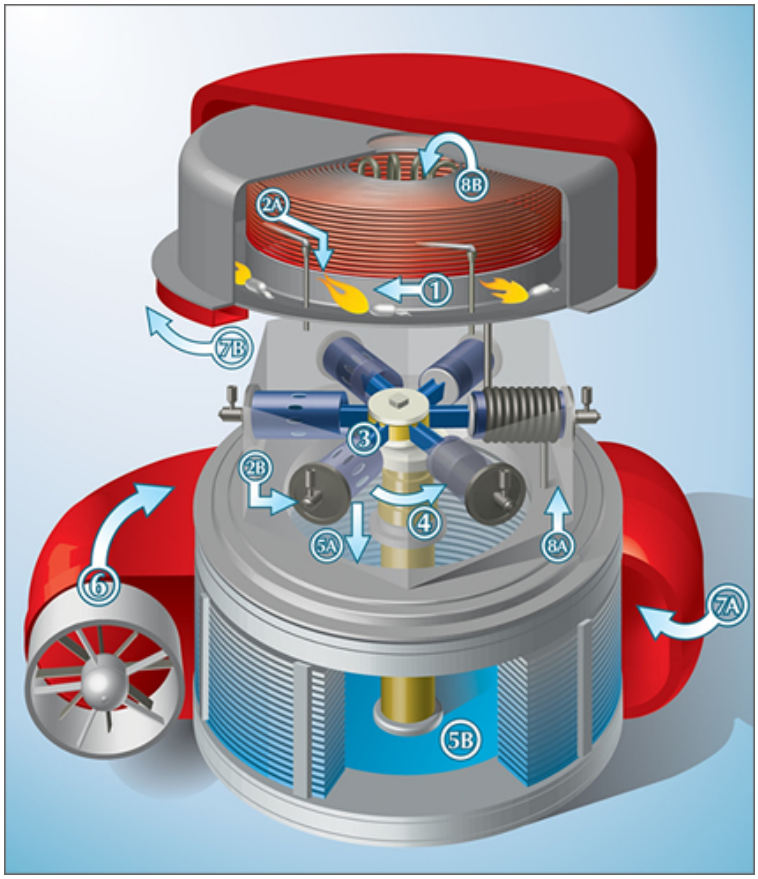
Kuna tehnika on arendatud silmas pidades autonoomse energiavarustuse vajadusi ja orienteeritud just arenevatele riikidele siis on kogu süsteemi maksumuseks 1-2 US dollarit/We (elektrivõimuse vati kohta). Süsteemi kujutab endast automaatjuhtmisel lahendust, mis erineb tradistsioonilistest mikrogasifitseerimisseadmetest, kus operaatori piev osalus on seadme tööks möödapääsmatu. Kõnealune tehnika võimaldab kasutada kütuseid, mille niiskusesisaldus on kuni 30%. Antud tehniline lahendus osaks on ka soojusvahetuslahendus akumulatsioonisüsteemiga, mistõttu saame rääkida miro-koostootmislahendusest.

Võimsus on antud süsteemidel reguleeritav vahemikus 10%-100%. Ettevõtte andmetel on sel moel toodetud elektrienergia hinnaks 0,02-0,05 US dollarit kWh. Kõnealuseid sedmeid tarnitakse ka koos arendustegevuseks vajalike mõõte ning analüüsiseadmetega.

Turba termiliselt töötlemisel tekkinud biosüsi nagu ka granuleeritud või briketeertitud truvas võiks olla sobilk küttematerjal sellise gasifitseerimisseadme jaoks. Võimalik, et see võib tähendada kõnelause tehnika edasiaredust kuid ettevõte o enda sõnul sellise tegevuse suhtes avatud ja koostöövalmis. Eesti oludesse sobib see ka oma universaalsuse tüttu, lubades kasutada küttena puitu ning võimaldades oma lahenduses koostootmist.

Teine näide arenevast elektri mikrogenereerimise tehnikast on biomassi põletusseadme, aurugeneraatori ja aurumasina ning elektrigeneraatori kombineeritud seade, mille arendamisega tegeleb Cyclone Power nimeline ettevõte.

Nende tehniline lahendus põhineb mitmesilindrilisel aurumootoril, milleks vajalik aur toodetakse uudse lahendusega kompaktses põletusseadmes, milline võib kütusena kasutada kogu kütustespektrit sh ka erinevaid biokütuseid. Oluliseks eelduseks on, et kütus oleks põletuskambrisse suunatav nö atomiseeritult.



Cyclone Power energiasüsteemi ülesehitus.
1-gaasistatud kütuse põlemine keerisena põlemiskambris ning põlemisgaaside väljmiskoht (8B). Küts põleb aurugeneraatori soojuvahetusribide ümber ning tagab auru genereerimise auromootori 3 jaoks. Töötand aur suunatakse õhkjahutisse 5B, mille toimimiseks kasutatakse ventilaatorit 6. Võlli 4 külge saab kinnitada ülekande sõiduki veermikule või ka elektrigeneraatorile. Allikas: Cyclone Power

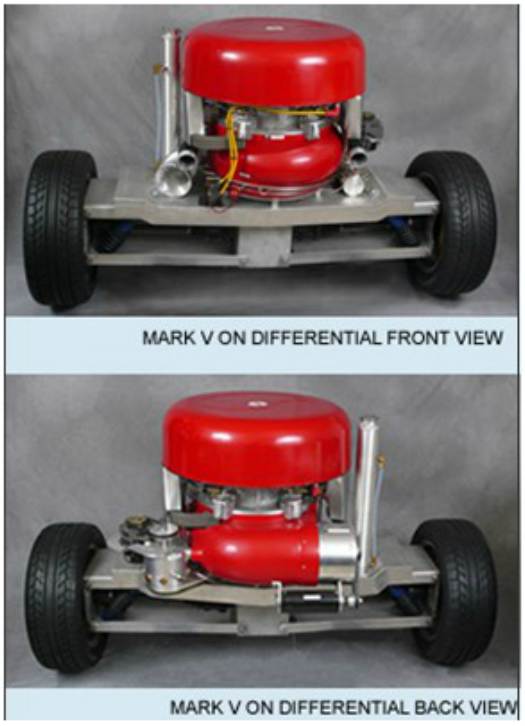
Tegemist on välispõlemismoororiga, mis on suurema kasuteguriga ning lihtsama ülesehitusega, kui stirlingmootorid. Mootori eeliseks on erinevate kütuste kasutamisvõimalus ning kompaktsus. Arendajad on silmas pidanud, et seda tüüpi mootorit saab kasutada nii sõidukitel kui elektrigeneraatorites. Arendaja vältel käivitub mootor tänu aurugeneraatori tõhusale soojusvahetile ning põlemiskambri efektiivusele 10-15 sekundi vältel ning toimib maksimumvõimusel 1 minuti jooksul.

Turbakasutuse kontekstis pakub kõnealune mootor huvi ennekõike kui võimalus kasutusse võtta turba hüdrotermilisel töötlemisel tekkivate vedelaid oksügenaate, mille kasutamine sisepõlemismootoreis eeldab märkimisväärselt suuremat arendustööd vedelkütuste koostise loomisel, kui samade ühendite kasutamine välispõlemismootoris.

Cyclon Poweri välispõlemismootorite võimusulatus on suur.

Gaasikütusel CP välispõlemismootoril murutrimmer. www.cyclonepower.com

Cyclone Power mootoriga elektrigeneraator. www.cyclonepower.com



Cyclone Power mooriga sõiduki diferentsiaalülekandega sild. www.cyclonepower.com