TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL

Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiad ja seadmed väikese mastaabiliseks hajutatud energia tootmiseks

Ülo Kask

Soojustehnika instituut

EJKÜ aastakonverents, Pühajärve, 10.04.2014

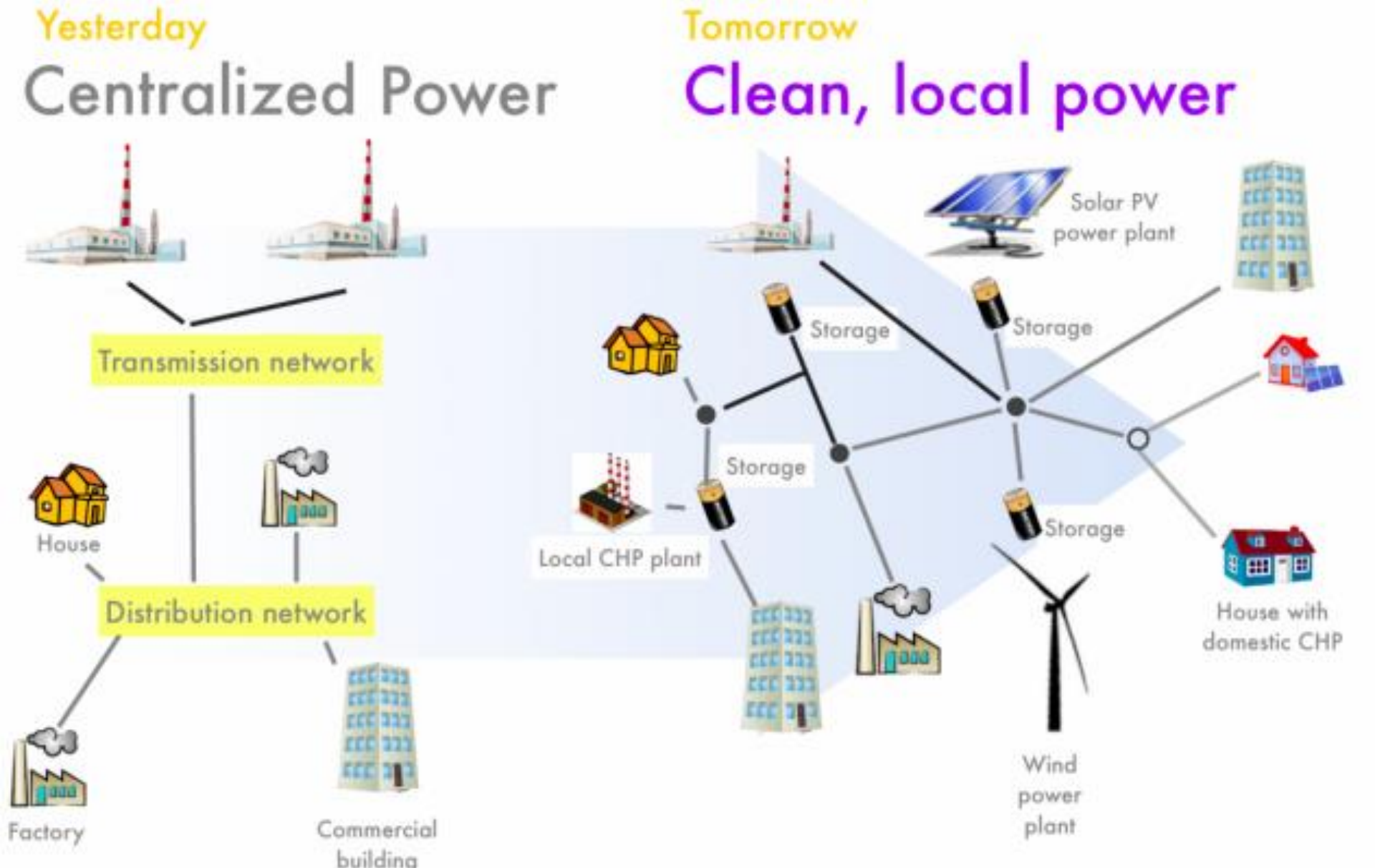
Teemad

- Hajutatud energia tootmine
- Koostootmise tehnoloogiad hajutatud energiatootmiseks
  - kütuseelementidega süsteemid,
  - sisepõlemisega kolbmootoritega süsteemid,
  - välispõlemisega kolbmootoritega süsteemid,
  - mikroturbiinidega süsteemid
- Puugaasigeneraatoritega koostootmisseadmed
- Termoelektrilised generaatorid

Hajutatud energia tootmine - hajaenergeetika

- **Hajutatud energiatootmise (genereerimise)** *ingl k - distributed generation, on-site generation, dispersed generation, embedded generation, decentralized generation, decentralized energy, distributed energy or district energy*, all mõeldakse olukorda, kus elektri genereerimine paljudes väikestes seadmetes ja erinevatest allikatest, on ühildatud energiasalvestamise ja koormuste juhtimisega võrgus.
- Hajutatud genereerimise korral hangitakse elekter paljudelt väiketootjatelt, mistõttu võivad väheneda keskkonnamõjud, võrreldes sellega kui see hangitaks nt ühest suurest fossiilkütustel töötavast jaamast, ja paraneb energia varustuskindlus.

Hajutatud tootmisega energiasüsteem



Hajaenergeetika energiaallikad

- Hajutatud energiatootmise (genereerimise) korral saadakse energia väikestest soojuse ja elektri koostootmise jaamadest (seadmetest, tüüpilise võimsusvahemikuga 1 kW kuni 10,000 kW). Järgnevalt olgu loetletud:
- Päikese paneelid (PV), tuuleturbiinid, jäätmed-energiaks süsteemid (nt biogaasijaam), kütuseelemendid, termoelektrigeneraatorid.

- Hajutatud väikevõimsuste probleemiks on nende kõrge algkapitalikulu, st suhteline suur maksumus genereeritava võimsuse ühiku kohta (€/kW).

Tehnoloogiad ja seadmed

- Tehnoloogiad võib jagada järgmiselt (http://www.nrel.gov/learning/eds_power_generation.html):
  - **gaaskütustel põhinevad** (kütuse elemendid, kolbmootorid (sise- ja välispõlemismootorid), väike- ja mikroturbiinid);
  - **taastuvaid energiaallikaid kasutavad** (päikesepaneelid, tuuleturbiinid, hüdroturbiinid, geotermaaljaamad ja orgaanilist ainet – biomassi energiaks muundavad seadmed;
  - **hübriidtehnoloogiad** (tuuleturbiin koos diiselgeneraatoriga (Ruhnu), päikesepaneelid koos tuulegeneraatori, diiselgeneraatori ja elektrisalvestiga (Kessulaid), kütuseelement koos mikroturbiiniga.

Koostootmise tehnoloogiad hajutatud energiatootmiseks

- Koostootmise korral muundatakse energiaallikast saadav energia meile vajalikeks soojuseks ja elektriks tõhusamalt kui lahus tootmise korral.
- Ühest kütuseühikust saab kasutada kasulikult kuni 90% selles sisalduvast keemilisest energiast.
- Seetõttu on koostootmine hajaenergeetika korral soosituim (loomulikult peab soojus olema kasulikult kasutatud, vastasel korral võidakse eelistada muid tehnoloogiaid).

Koostootmise tehnoloogiad hajutatud energiatootmiseks II

- Väliskirjanduses sageli ei eraldata väike ja mikrokoostootmist, vaid mikrokoostootmine on võimsuseni kuni 50kW$_e$, inspireerituna EL direktiivist 2004/8/EC.
- Kodumajapidamisele sobivad CHP seadmed on äsja turule jõudnud tänu tugevale subsideerimisele. On saada seadmeid ühepere-elamutele (< 5 kWe) ja korruselamutel (3 – 50 kWe) ning suurematele üksiktarbijatele või koostootmisjaamadele, ning nendeks on:
  - Kütuseelementidega süsteemid,
  - Sisepõlemisega kolbmootoritega süsteemid,
  - Välispõlemisega kolbmootoritega süsteemid,
  - Mikroturbiinidega süsteemid.

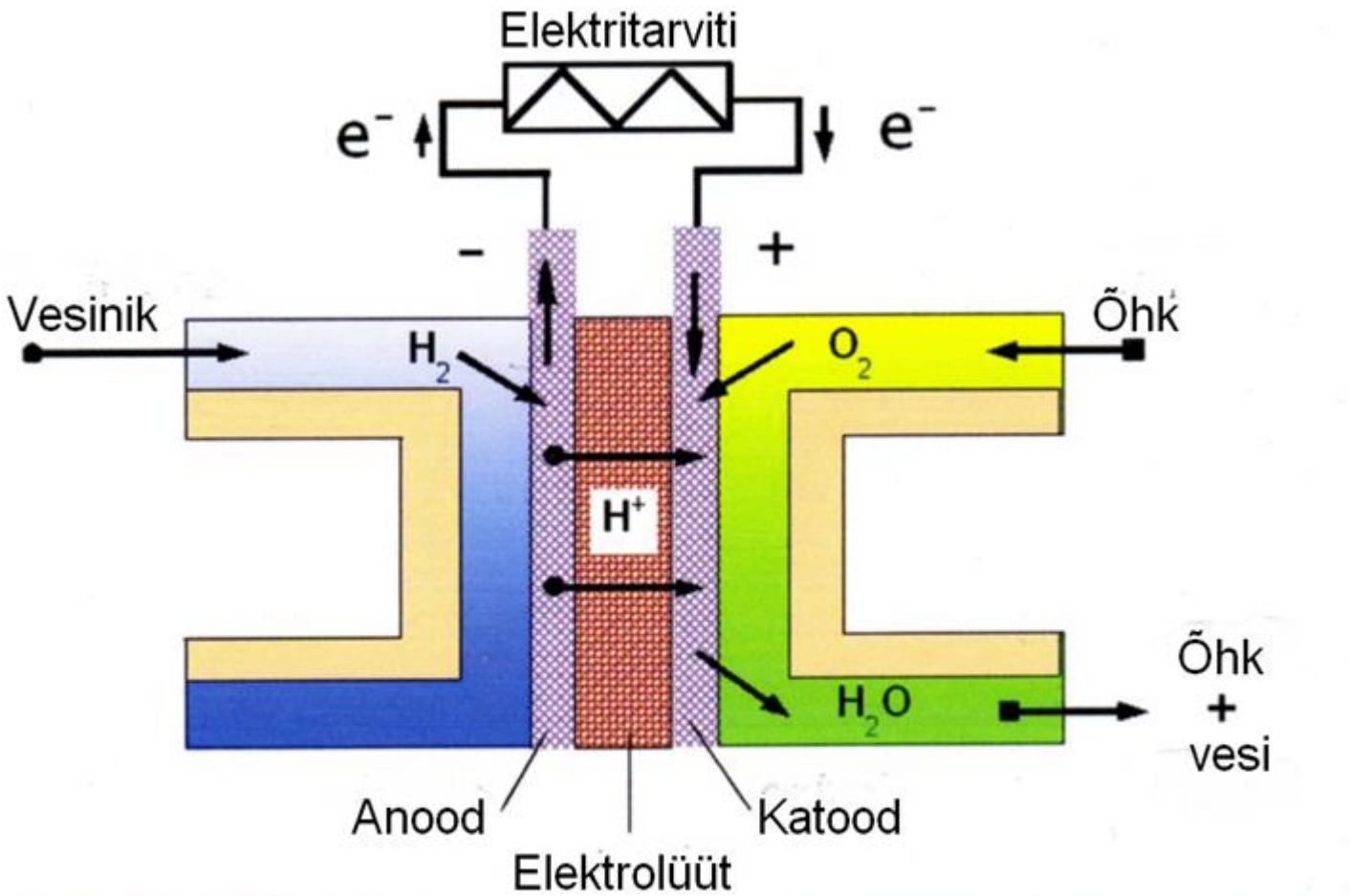
Kütuseelement – *fuel cell*

- **Kütuseelement** on keemiline vooluallikas, milles saadakse elektrienergiat juurdeantava kütuse oksüdeerimisel vabaneva energia arvel. Oksüdeerijaks on õhk või hapnik ja kütuseks nt vesinik (põlevgaasid).
- Niisugust energiamuundurit võib käsitada kui galvaanielementi, mille elektrokeemilise reaktsiooni jaoks tarvilik aine ei paikne lõpliku kogusena elemendi sees, vaid seda antakse väljastpoolt pidevalt juurde. Niiviisi on võimalik saada kütusest vahetult elektrienergiat.

Kütuseelemendi ehitus

- Kütuseelement koosneb elektroodidest – anoodist ja katoodist, mida eraldab ioone juhtiv membraan või elektrolüüt.
- Elektroodiplaadid on metallist, nanopoorsest süsinikust või keraamikast. Reaktsioonide kiirendamiseks (eriti madalatel töötemperatuuridel), on elektroodid kaetud katalüsaatori (plaatina, pallaadiumi) kihiga.
- Elektrolüüdiks, mille ülesandeks on juhtida ioone (kuid mitte elektrone), võib sõltuvalt tüübist olla happe või leelise lahus, samuti tahke aine polümeermembraani kujul, kõrgetemperatuurilistes elementides keraamiline materjal.
- Elektrienergia tootmiseks vajab element anoodil vesinikku või orgaanilist ühendit, näiteks metanooli, metaani või sünteesgaasi, ja katoodil hapnikku. Neid reaktsiooni-komponente tuleb kütuseelemendi elektroodidele pidevalt juurde anda.
- Vesinik-hapnik-kütuseelemendi pinge on temperatuuril 25 °C teoreetiliselt 1,23 V, praktiliselt saavutatud väärtused jäävad vahemikku 0,5 – 1,0 V. Vajaliku pinge saamiseks moodustatakse elementidest järjestikpatarei.

Polümeerelektrolüüdiga kütuseelemendi ehituse ja talitluse skeem



$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

Oksüdatsioon

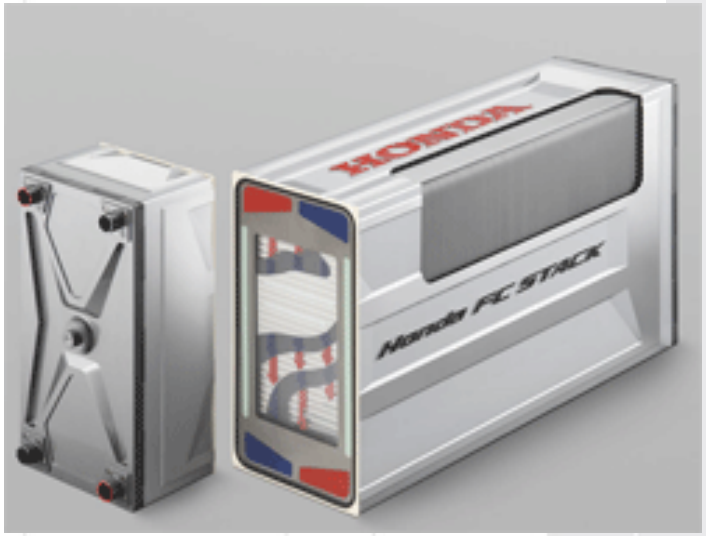
$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Reduktsioon

Vesinikus peituv keemiline energia muundub elektrienergiaks järgmiselt:

- anoodile juhitud vesiniku (H_2) aatomeist eralduvad plaatinakatalüsaatori kaasabil elektronid (e^-), mis suunduvad välisahela (elektritarviti) kaudu katoodile;
- vesiniku positiivsed ioonid, s.o prootonid (H^+) difundeeruvad läbi polümeermembraani katoodi juurde;
- katoodil liituvad elektronid katalüsaatori toimel (õhu)hapniku (O_2) molekulidega; nii moodustunud negatiivsed hapnikuioonid muutuvad prootonitega (H^+) reageerides veeks.
- Vesinik esineb looduses teatavasti ainult mitmesuguste ühenditena. Otsemetanool-kütuseelemendis, kasutatakse vesinikukandjana metanooli (puupiiritust). Elemendi anoodile juhitakse metanool ja vesi, mille omavahelisel reageerimisel tekib vesinik (H_2) ja süsinikdioksiid (CO_2).

Kaubanduslikke kütuseelemente



Kütuseelementide tüübid, andmed

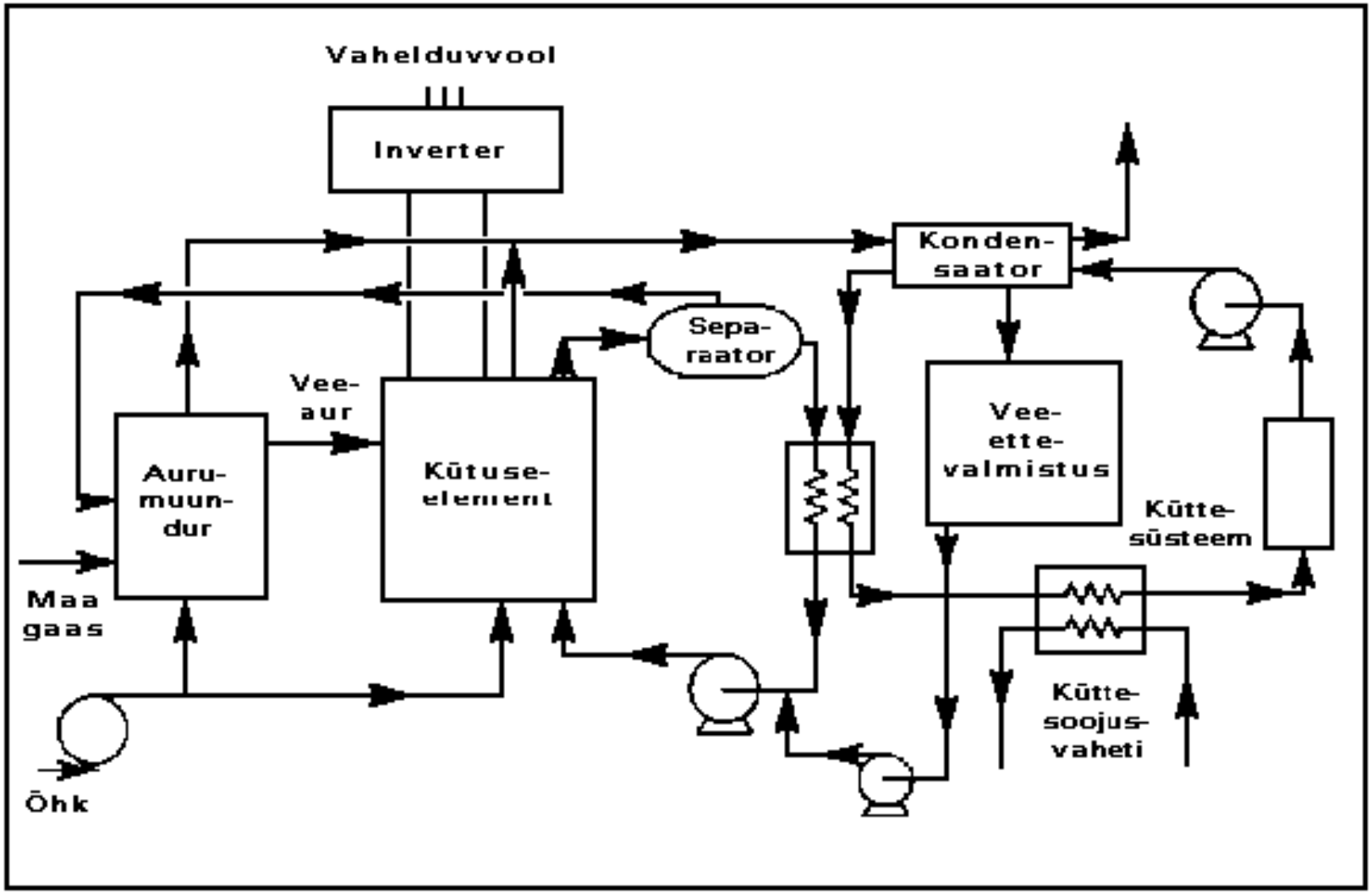
Kütuseelement	Elektrolüüt	Ioon (laengu-kandja)	Kütus (anoodil)	Gaas (katoodil)	Võimsus kW	Tempe-ratuur °C	Kasu-tegur %
Polümeerelektrolüüt -kütuse-element PEMFC	Polümeer-membraan	H^+	Vesinik (H_2)	Hapnik (O_2)	0,1–500	10–100	35–60
Otsemetanoolkütuse -element DMFC	Polümeer-membraan	H^+	Metanool (CH_3OH)	Hapnik (O_2)	0,001–100	60–130	40
Tahkeoksiid-kütuse-element SOFC	Oksiidkeraam iline elektrolüüt	O^{2-}	Vesinik (H_2), metaan (CH_4), süngaas	Õhk (O_2)	Kuni 100 000	800–1000	47
Leeliskütuse-element AFC	Kaalium-leelis (KOH)	OH^-	Vesinik (H_2)	Hapnik (O_2)	10–100	60–90	45–60
Sulakarbonaatkütus element MCFC	Karbonaatide segu sulas olekus	CO_3^{2-}	Vesinik (H_2), metaan (CH_4), sünteesgaas	Hapnik (O_2)	Kuni 100 000	650	48
Fosforhappe-kütuselement PAFC	PH_3PO_4	H_3O^+	Vesinik (H_2)	Hapnik (O_2)	Kuni 10 000	130–220	38

http://et.wikipedia.org/wiki/Kütuseelement

Kütuseelementide tüübid ja andmed *(DOE 2011, Pehnt 2003)*

	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	KOH	Proton conducting membrane	Phosphoric acid	Carbonate melt	Y stabilised ZrO_2
Temperature	90–100 °C	50–100 °C	150–200 °C	650 °C	800 – 1000 °C
Ion	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
$\eta_{system,el}$ **(natural gas)**		30–42 %	38–42 %	50–55 % (w/ ST > 55%)	30–55 % (w/ GT> 60%)
$\eta_{system,el}$ **(hydrogen)**	60 %	38–50 %	47–50 %	n.a.	n.a.
Favoured application	Space, military, portable	Mobile, portable, CHP	CHP	CHP	CHP, auxiliary power
Power range [kW_{el}]	10–100	1 – 100	50 – 10 000	300 – 3000	1 – 2000
Status	First commercial production	Subsidised commercial production	Small series production (200 kW_{el})	Subsidised commercial production	Subsidised commercial production

Fosforhape-elektrolüüdiga kütuseelemente kasutav energiaseade

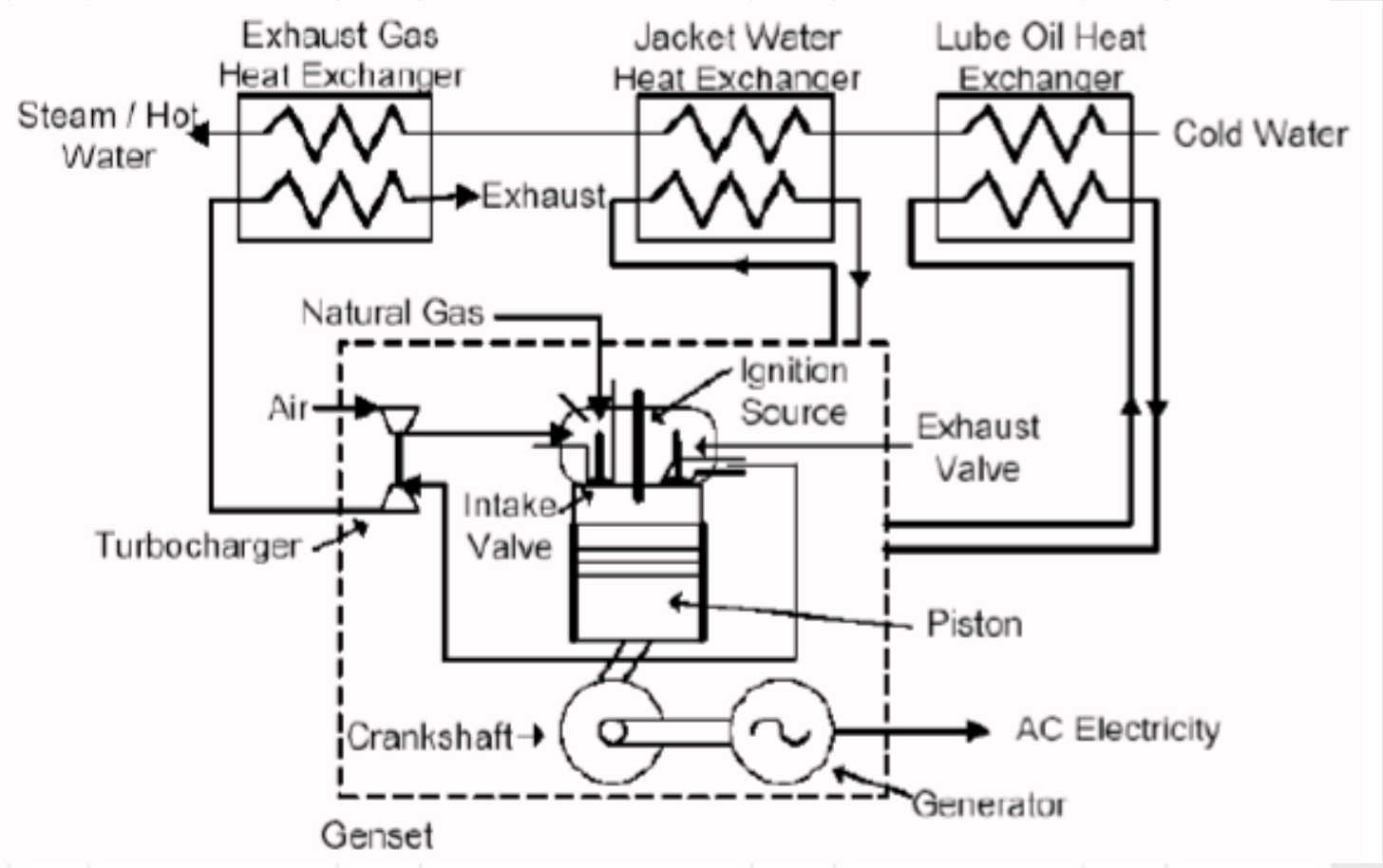


Kütuseelementide praegused ja eeldatavad hinnad tulevikus

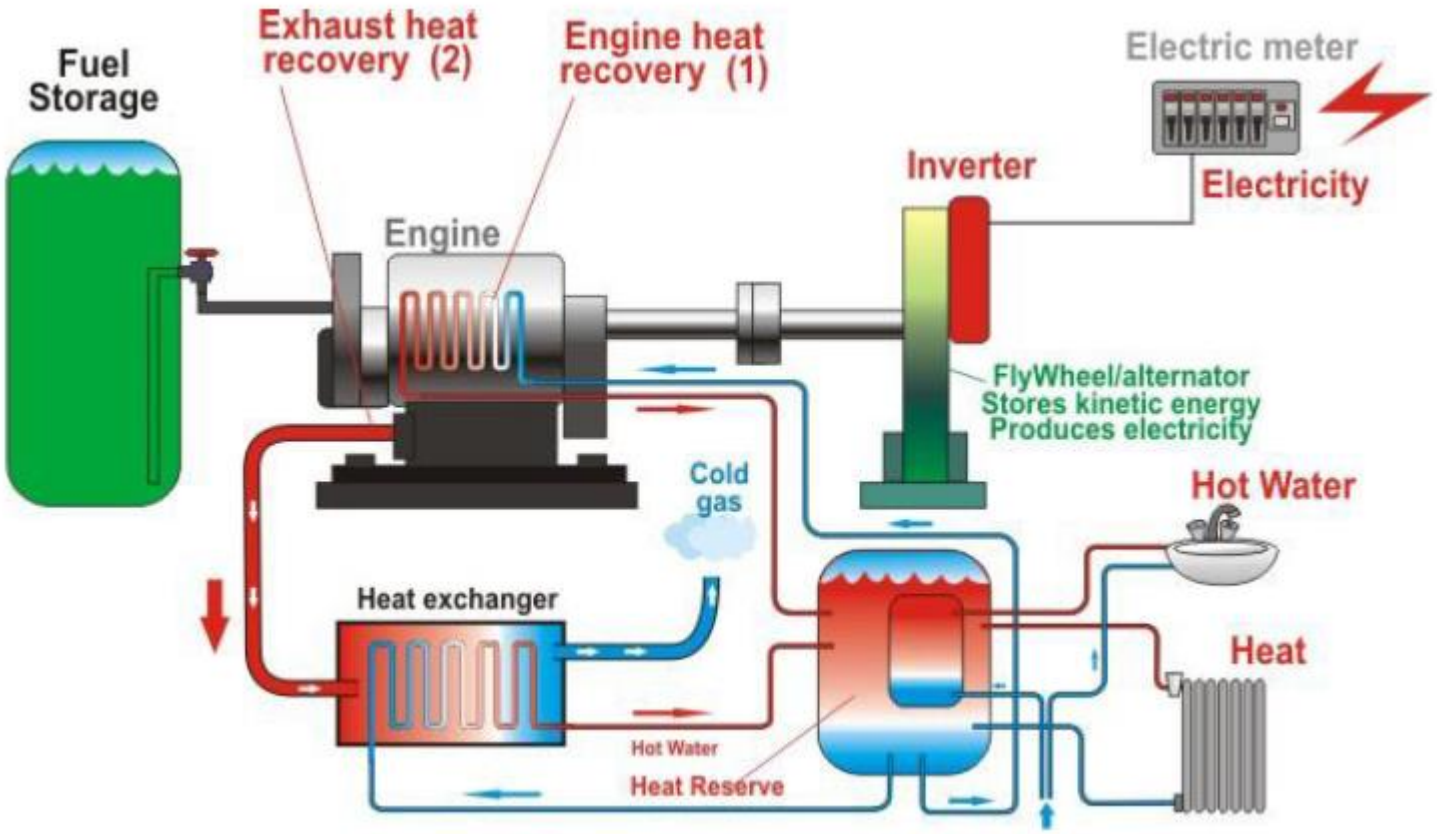
Systems		Year	Cost / Price per system	Production volume	Description	Ref.
PEMFC	South Korea	2008	€56,000	100	Expected price during the third and final year of the current demonstration project.[107]	[112]
		2010	€12,000		Target cost stated in the Korean national action plan.	[112]
		2012	€8,000	10,000 cumulative	Target price set by the Ministry of Knowledge Economy.	[289]
	Japan	2004	€14,500	10,000 p.a.	Estimated manufacturing cost for ENEFARM systems made by the manufacturers.	[98, 295]
		2012	€5,000 – 8,000	50,000 p.a.	The METI technology roadmap for production cost of residential cogeneration systems.	[88]
		2015	€3,500 – 5,000	500,000 p.a.		
		2015	€3,500	200,000 p.a.	Panasonic's target price for systems set in 2008.	[296]
		2020-2030	€2,750		The METI technology roadmap for production cost of residential cogeneration systems.	[88]
SOFC	Japan	2008	~€3,800	Mass production	Kyocera's expected retail price for systems (including hot water tank).	[297]
		2015	€7,000 / kW	Several thousand p.a.	The METI technology roadmap for residential cogeneration systems.	[88]
		2020-2030	€2,750 / kW			

Sisepõlemisega kolbmootorid

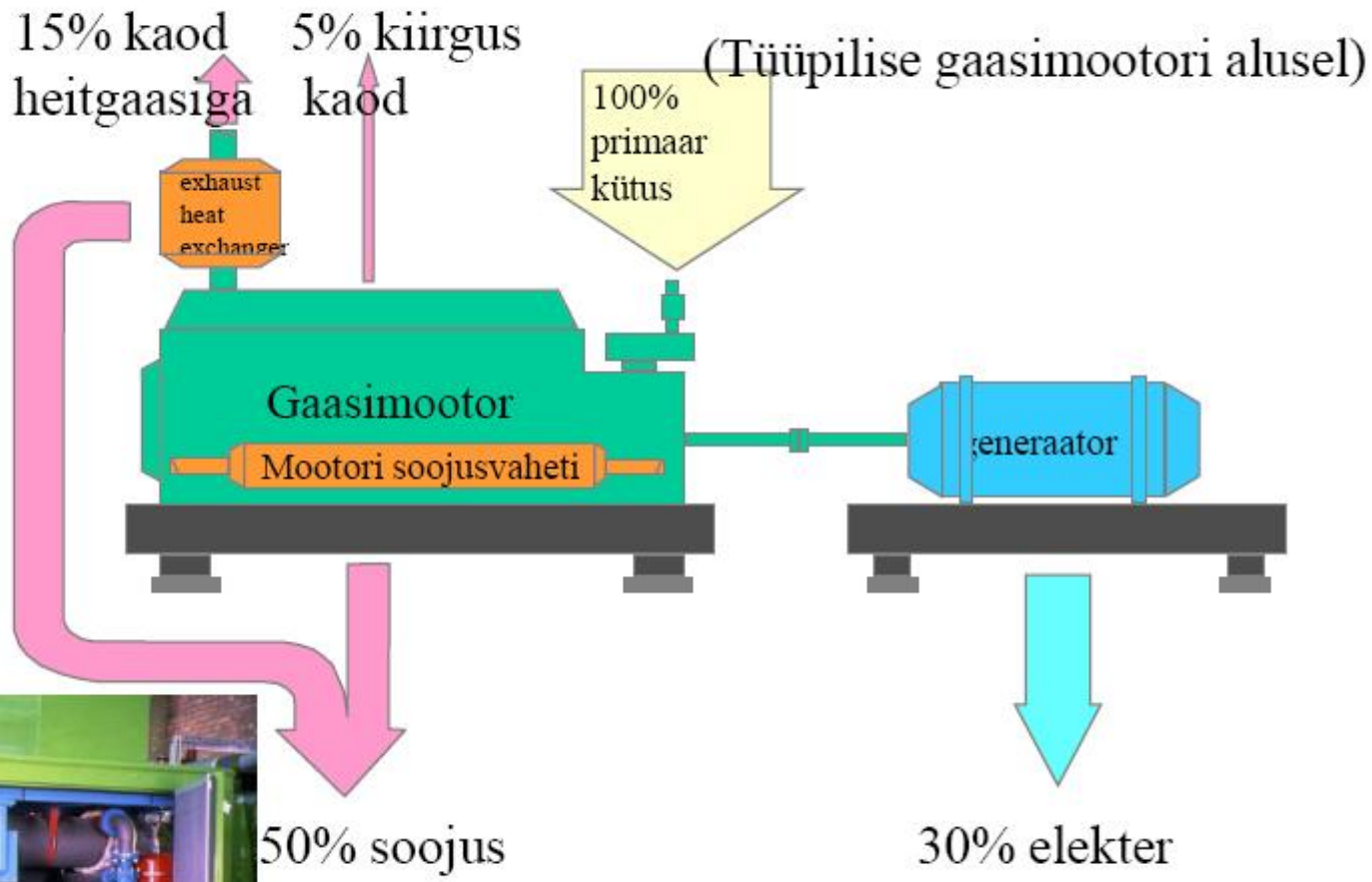
- Soojuse ja elektri koostootmisel on kasutatavad Otto ja Diesel mootorid
- Nii vedelad kui gaasilised fossiilsed ja biokütused.



Mikrokoostootmise blokkskeem

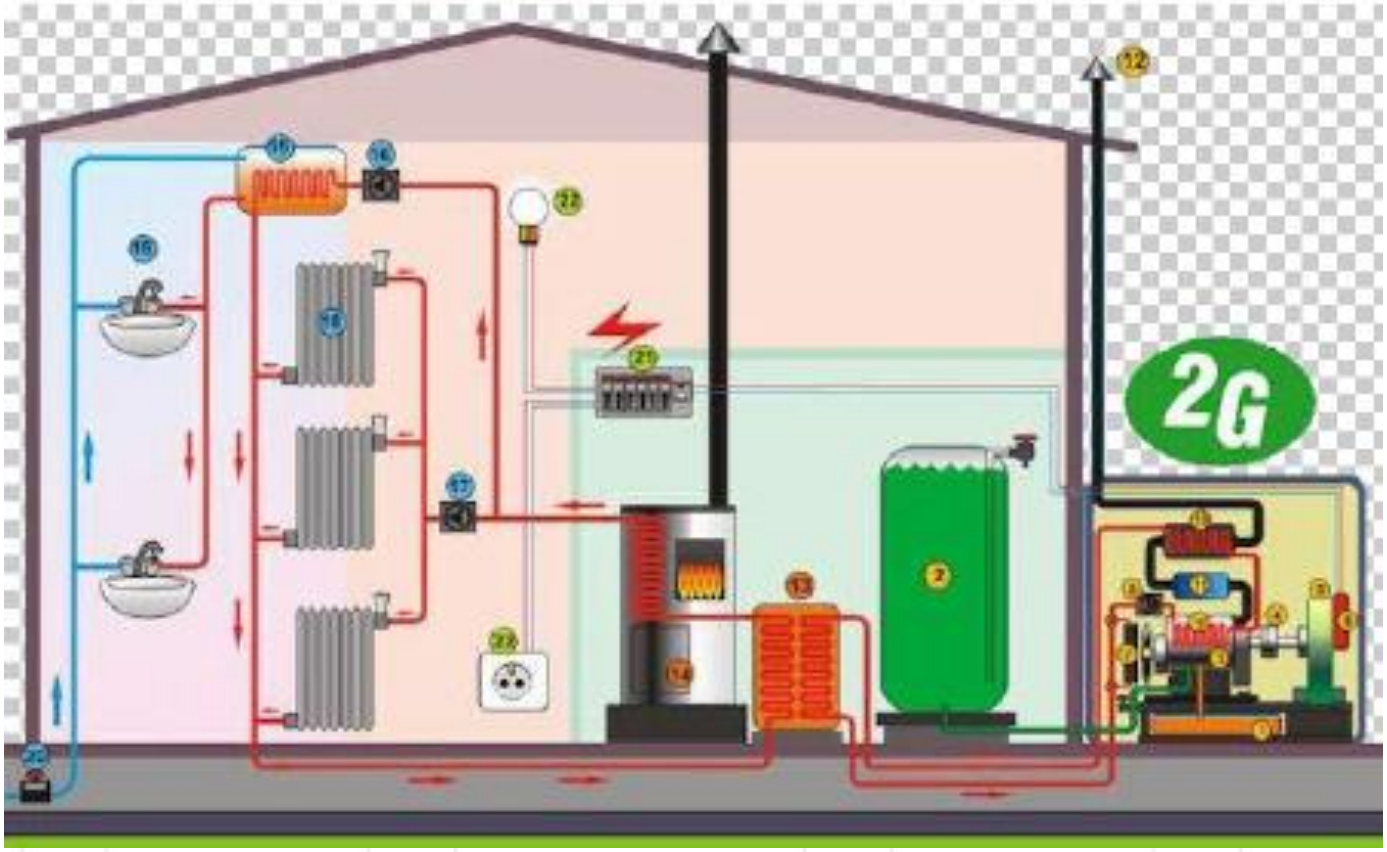


Sisepõlemismootoriga koostootmisjaam



Uuematel seadmetel on elektriline ja soojuslik kasutegur peaaegu võrdsed

Kodune mikro CHP



Sisepõlemisega kolbmootorid II

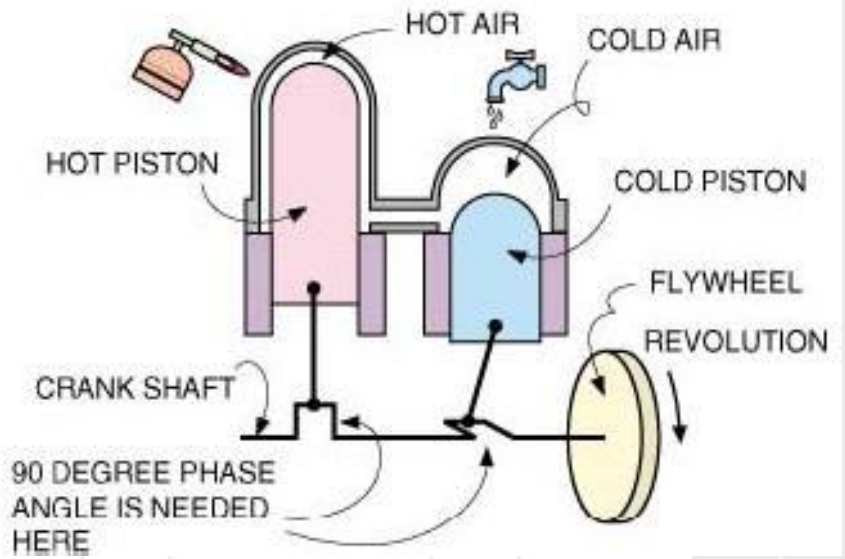
- Sisepõlemisega kolbmootoritel põhinevad koostootmisseadmed võimsusega vähem kui 500 kW maksavad vahemikus 800 kuni 3,020 $/kW, kusjuures mida väiksemad seadmed, seda kõrgem ühikhind.
- 5.5 kWe mikro CHP - 3300 €/kWe, välja arvatud tipusoojuse seade ja paigaldus.
- 3 kWe μ-CHP - 3960 €/kWe, välja arvatud tipusoojuse seade ja paigaldus.

Sisepõlemisega kolbmootorid III

- Nii kasutegurid kui ka hinnad sõltuvad oluliselt võimsusest:
  - 1 kW_e ca 6000 €/kW_e, elektritootmise kasutegur ca 20%;
  - 10 kW_e ca 2500 €/kW_e, elektritootmise kasutegur ca 27%;
  - 20 kW_e ca 2000 €/kW_e , elektritootmise kasutegur ca 29%.

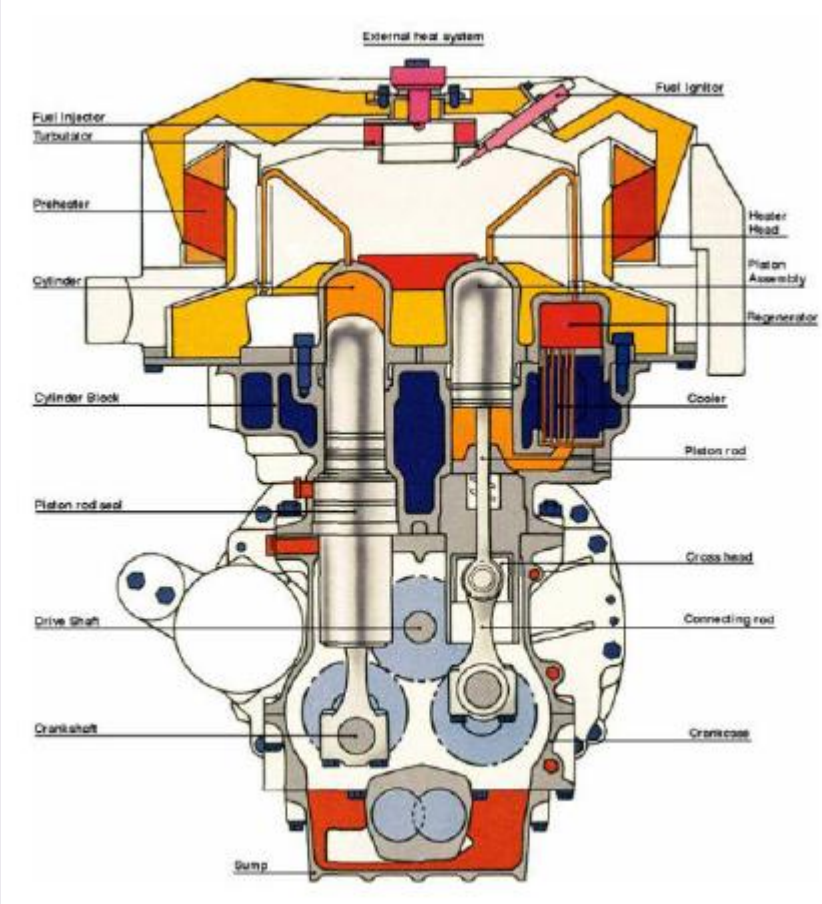
Välispõlemisega kolbmootorid

Tuntuim - Stirling mootor



Stirling mootor erineb sisepõlemismootorist selle poolest, et silindrid on suletud ja põlemisprotsess toimub väljaspool silindreid. Kolvid paneb liikuma gaasi rõhkude vahe, mis tekib silindri välispinna kuumutamisel ja jahutamisel. Töökehaks ehk gaasiks võib olla isegi õhk kuid efektiivsemad on vesinik, heelium. Mootor käivitab tavaliselt sünkroongeneraatori.

Välispõlemisega kolbmootorid II



Gaasi kuumutatakse ja jahutatakse perioodiliselt selle juhtimisega vaheldumisi kuuma ja külma ruumi. Stirlingmootori silindris on kaks omavahel kooskõlastatult liikuvat kolbi - **töökolb**, mis annab kuumutatava gaasi paisumistöö edasi väntvõllile ja **väljatõrjekolb,** mis suunab kuuma paisunud gaasi jahutatavasse külma ruumi.

Välispõlemisega kolbmootorid III

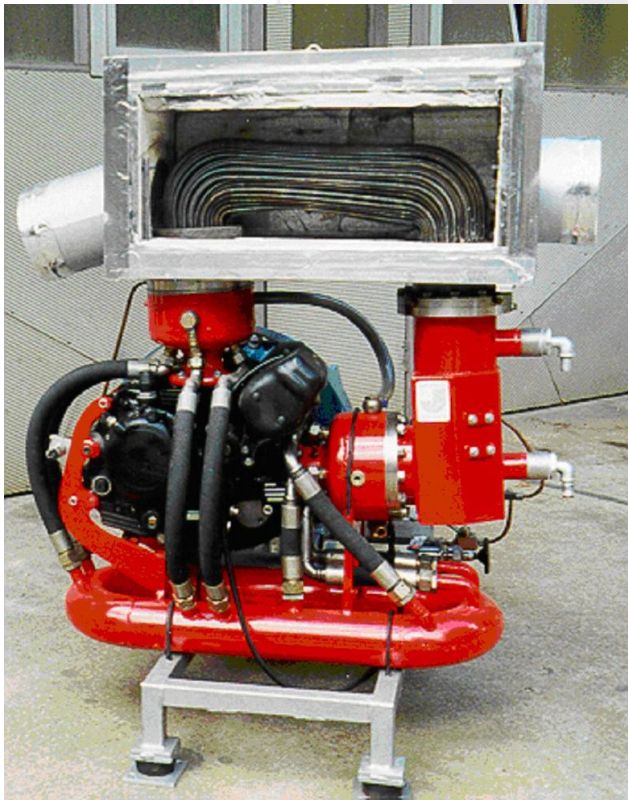
- Kaasajal on jõutud Stirling-mootoritega koostootmisseadmete elektrilise kasutegurini 40 %, süsteemi kogukasuteguri 65 – 85 % juures. Stirling mootoreid iseloomustab hea võime töötada efektiivselt ka osalise koormusega, nt 50 % koormuse juures jääb kasutegur piiresse 34-39 %.
- Kuna tehnoloogia ja seadmed on arendusfaasid ei leidu statistikas andmeid nende mootorite töökindluse ja kättesaadavuse kohta.
- Eeldatakse et töökindlus on võrreldav diiselmootori omaga, kusjuures aastane kasutatavus oleks 85-90% koguajast. Töötab tõhusamalt külmas kliimas.

Välispõlemisega kolbmootorid IV

- Stirling mootoriga CHP soetuskulu on väga kõrge. 2011 aastal ühe Hollandi firma mudel maksis (võimsus 1 kW_e) 10,000 €.
- Ühes 2010. aasta allikas maksis 1 kWe CHP 6,000 €, ja kui lisada veel tipusoojuse seade ja korsten tuleks maksta 2500-3500 € juurde.

Pelletitel töötav seade

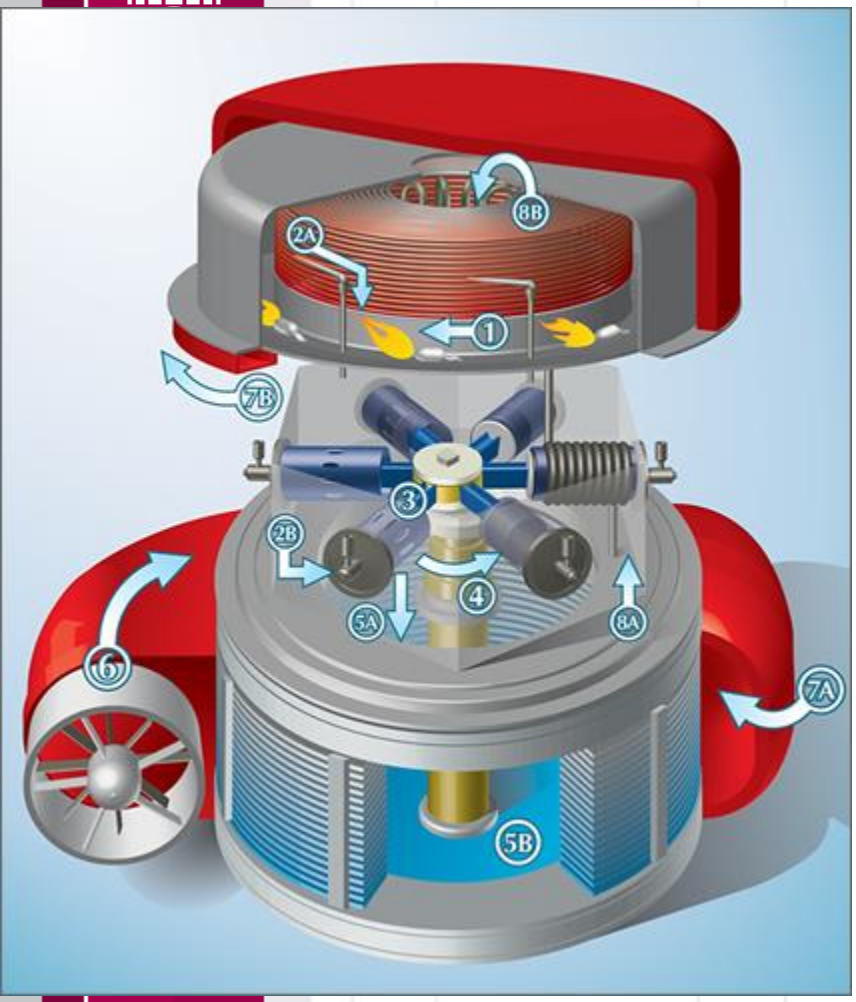
Maagaasil töötav seade



CHP- Puugaasigeneraator koos Stirlingmootoriga

Reaalselt töötav seade Iirimaal, W = 35 kWel.

Välispõlemisega kolbmootorid V - tsüklonmootor



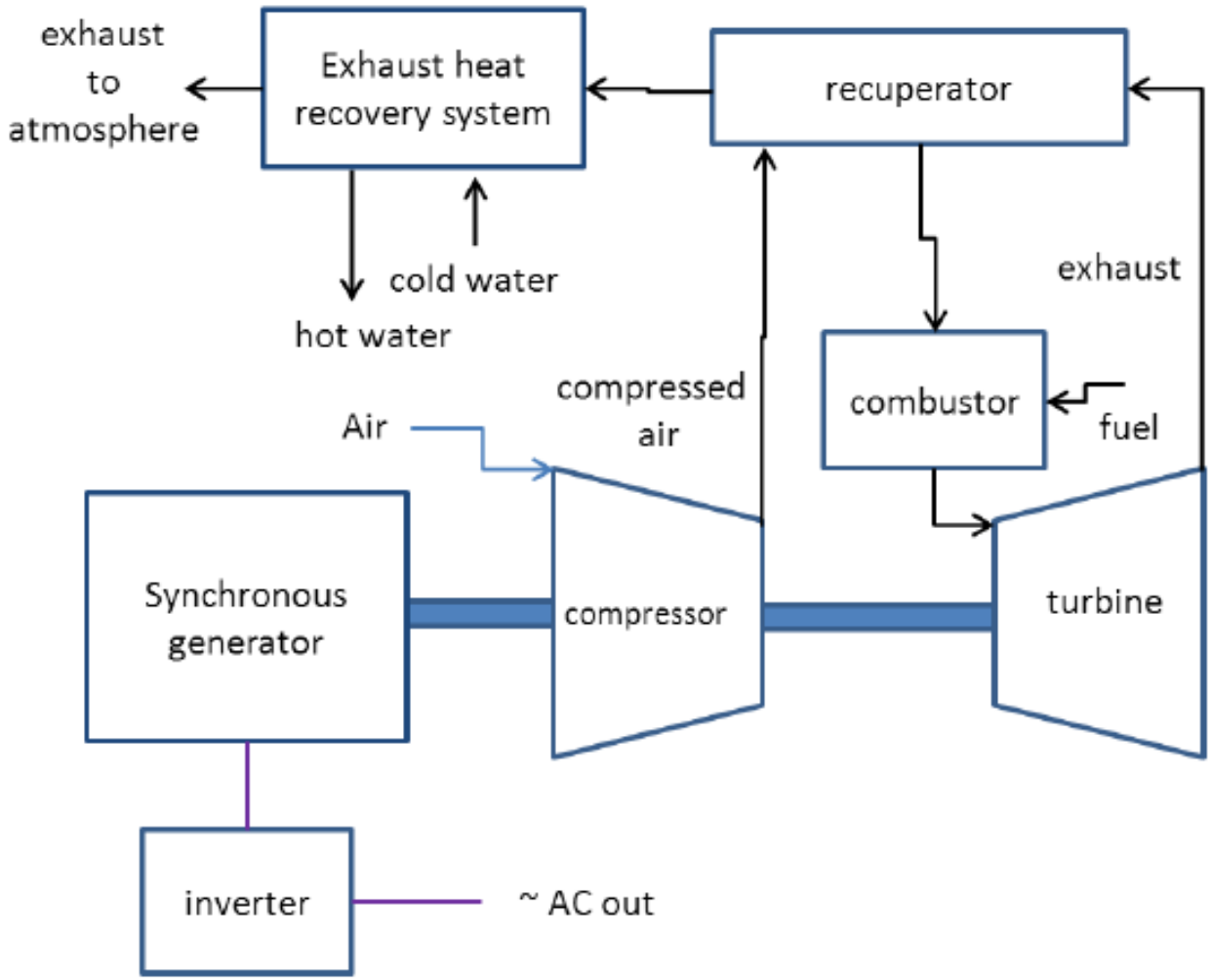
Seade ise ja paljud süsteemid on patenteeritud

- See on regeneratiivsel Rankine tsüklil, tuntud ka Schoell'i tsükli nime all, põhinev mootor.
- Mehaaniline energia saadakse suletud ringis liikuva vee kuumutamisel ja jahutamisel ning liikuvate kolbide kaasabil.
- Kütus pihustatakse ja imetakse spiraalsesse põlemiskambrisse 1.
- Selle siseosas kuumutatakse vesi ülekuumendatud auruks 5 sek (650°C) ja juhitakse spetsiaalsete klappide kaudu silindritesse. Auru rõhk 220 baari.
- Kolbide liikumine kantakse patenteeritud ülekandesüsteemi abil võlli 4 pöörlemiseks. Kolbe jahutatakse kõrgsurveveega.
- Töötanud aur kondenseeritakse sisseimetava õhuga 6. 160°C õhk läheb põlemiskambrisse.

Mikroturbiinid

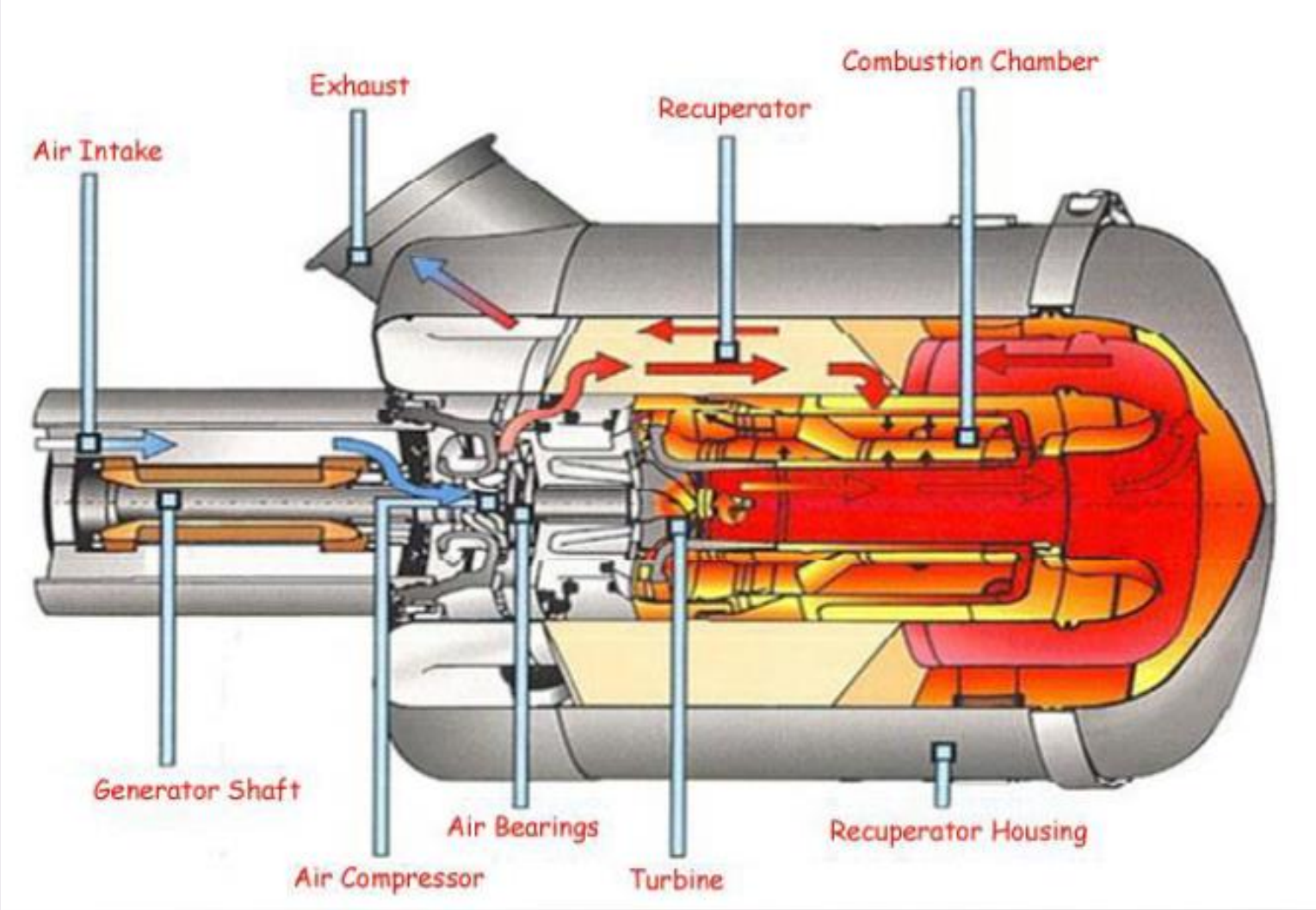
- Mikroturbiiniga CHP konteiner sisaldab turbiini-kompressorit, mis asuvad ühel võllil elektrigeneraatoriga, rekuperaatorit (soojusvahetit) ja inverterit. Generaator võib vajadusel töötada ka turbiini starterina
- Mikroturbiiniga μ-CHP võib saavutada elektrilise kasuteguri 25–30 % ja kogukasuteguri vahemikus 70–90 %.
- Viimane nõuab rekuperaatori kasutamist, mille abil soojendatakse lahkuvate gaasidega ette turbiini suunatav õhk. Selle võttega paranebki oluliselt kasutegur.
- Mikroturbiinidega on hea järgida koormuse muutusi. Osalistel koormustel kasvab NOx ja CO heide mitmekordselt.

Mikroturbiiniga koostootmisseade



Sünkroongeneraator annab kõrge sagedusega vahelduvvoolu. Konverteris muundatakse see võrgusagedusele vastavaks vahelduvvooluks.

Mikroturbiini ristlõige



Mikrogaasiturbiine

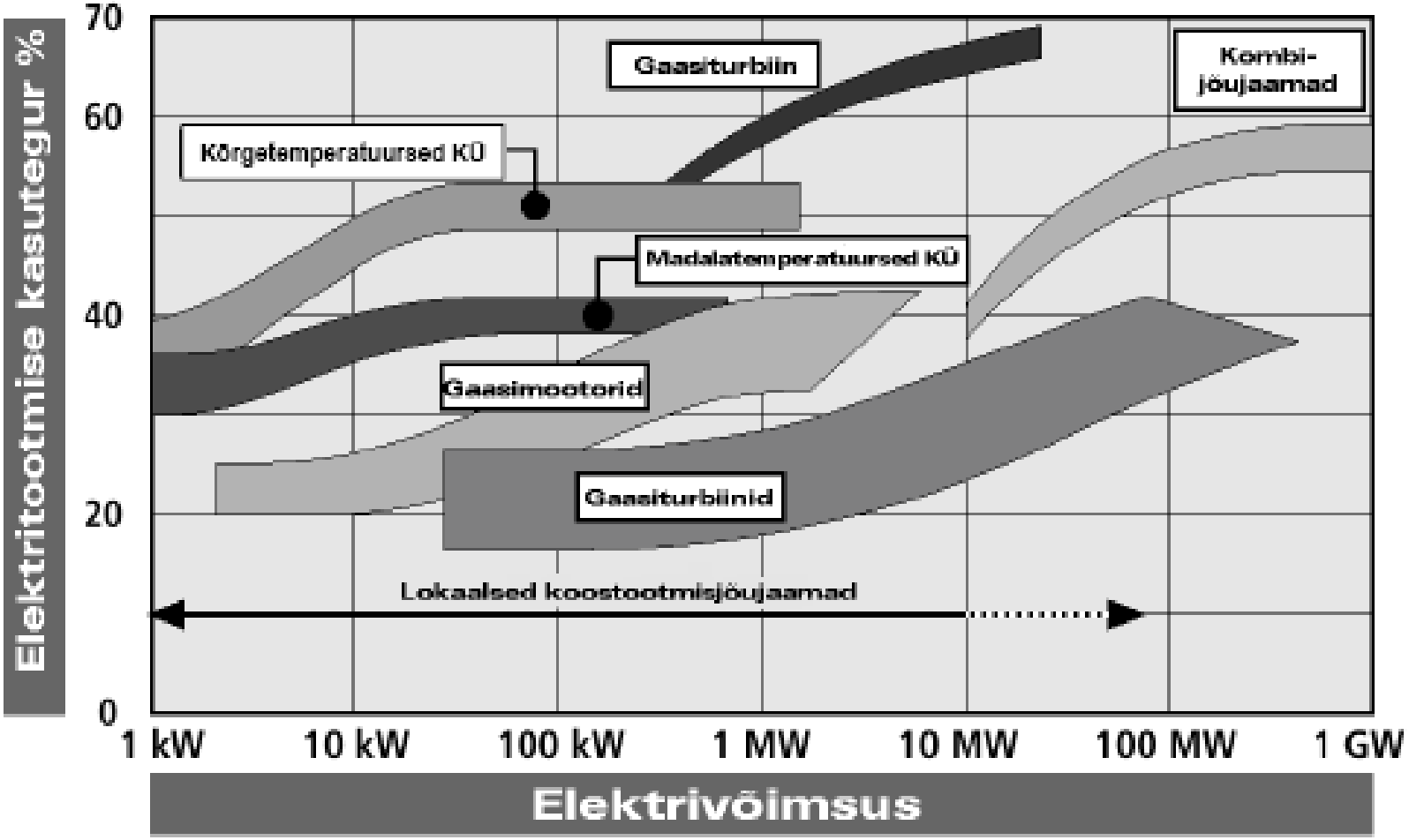
30-60 kW Capstone turbiin

Kui 2000. aasta paiku olid elektrilised kasutegurid 17-30% ja NOx sisaldus heitgaasides kahekohalise numbriga mõõdetav (ppm), siis alates 2007-2010 on saavutatud kasuteguri väärtusi üle 40% ja NOx sisaldus mõõdetav ühekohalise numbriga (ppm). Kasutegur alumise kütteväärtuse järgi.

Mikroturbiiniga CHP elamutekompleksis, Londonis

- 1960’st 12 kordne hoone
- Katab 72 korteri kütte ja elektri vajaduse
- Turbogen TG50CG
- Elektriline võimsus 50 kWe
- Soojuslik võimsus 108 – 275 kWth peamiselt soe tarbevesi
- 6,000 töötundi aastas.
- Turbogen TG50CG - 50000 £
- Toodetud energia/a –24000£
- Käidukulu /a - 14000£
- Aastane sääst - 10000£
- Lihttasuvus - 5 aastat

Maagaasil töötavate eritüübiliste jõuseadmete elektritootmise kasutegurid



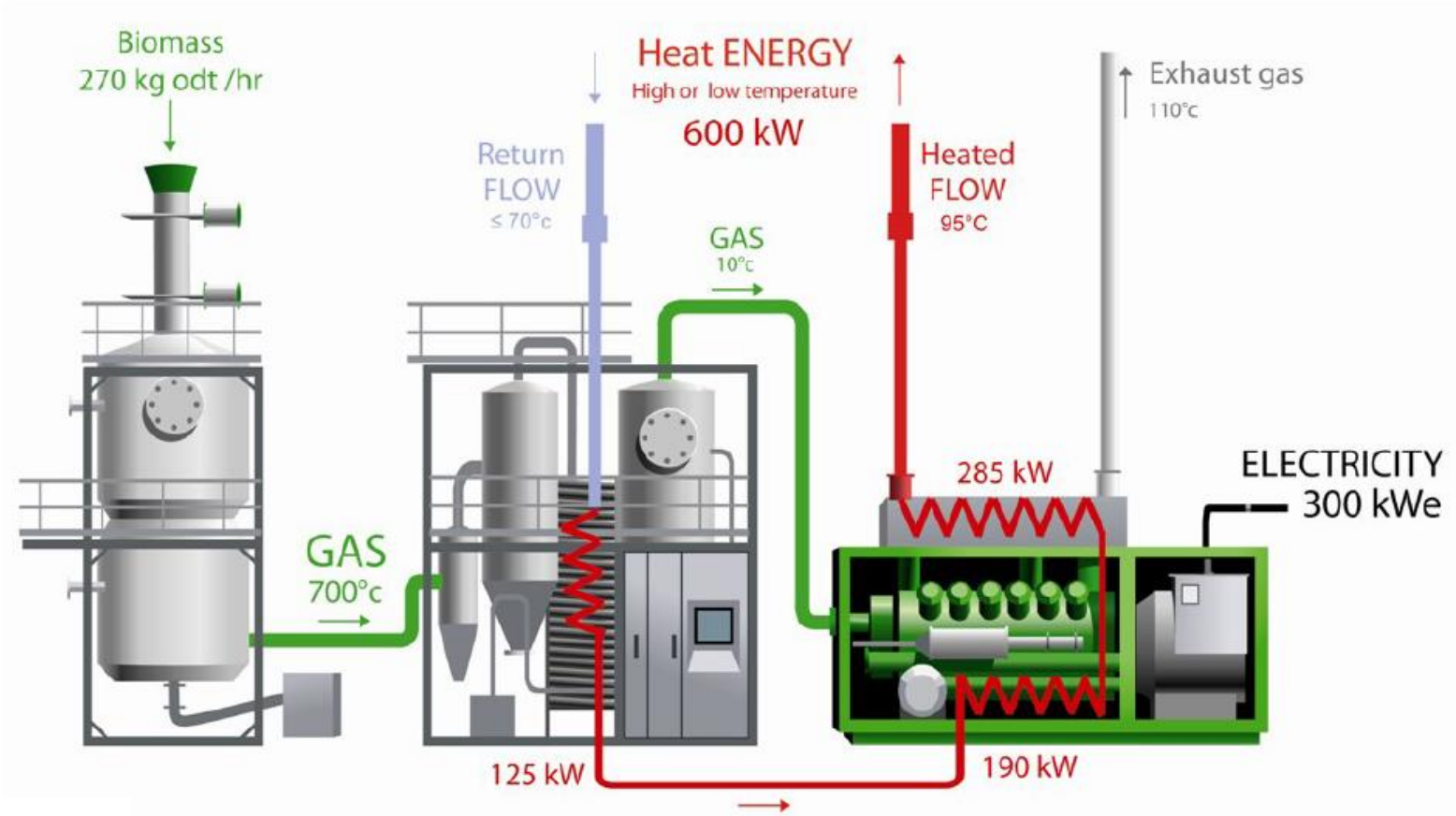
Hajatootmisseadmete tinglik piir 10 MW_e

Mõned biokütustel kaubanduslikud mikro CHP seadmed, (2010)

Technology	*fuel*	*P_e (kW_e)*	*P_{th} (kW_{th})*	*Total efficiency*	*Price €/kW_e*	*Country*	*Manu-facturer*
Stirling	pellets	1	15			AT	KWB
Stirling	pellets	2 – 3	7 – 11	> 85 %	8000	DE	Sunmachine
Stirling	pellets, chips, peat	9	50	> 85 %	8000	FI	Ekogen Oy
Stirling	gas, biomass, pellets	2 – 9	8 – 26	90 %		SE	Cleanergy
gasification + ICE	wood, chips, pellets, bio-waste	50 – 500	100 – 1000	75 - 90 %		FI	Gasek
gasification + ICE	chips	30	80		5000	FI	Volter
gasification + ICE	chips, pellets	4 – 250				IN	Ankur Scientific
Stirling	chips, biomass, biogas	35 – 140	140 – 560			DK	Stirling.dk
external combustion microturbine	wood chips, pellets	25	80			UK	Talbott's

Puidu gaasistamisel (pürolüüsil) põhinevad soojuse ja elektri koostootmise jaamad

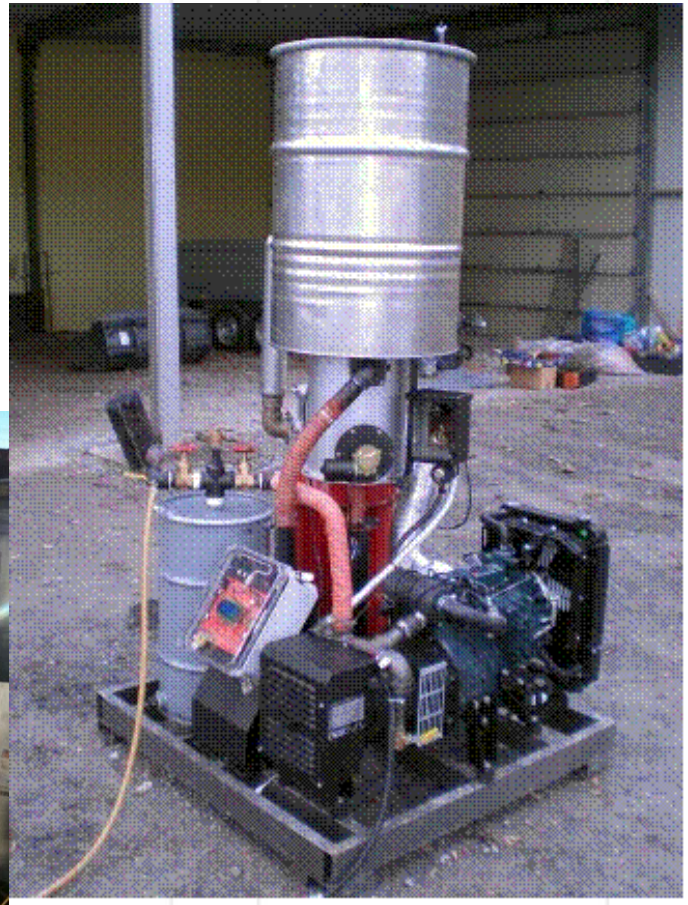
Puidu gaasistamine, protsess, mida tuntakse sajandeid, on praktiliselt ainuke majanduslikult atraktiivne võimalus pidevaks soojuse ja elektri tootmiseks väikestes detsentraliseeritud energiavarustussüsteemides puitjäätmetest.



info@xylowatt.com

Global efficiency = 75% (25% electricity, 50% heat)

http://gekgasifier.com/gasification-store/gasifier-genset-skids/?_kk=biogas&_kt=c6382e74-2011-4197-a1c4-cbc2f7ac4710&gclid=CLCHjI2hka0CFcUl3god3VtaoQ



Power Pallets: Integrated Gasifier-Genset Skids

Biomassi gaasisti koos gaasimootoriga 10-20 kWe (teisaldatav, lohistatav).

Maksumus 1-2 USD watt (keskmine hind 22500 $,

17,3 tuh €

Firma KW – Energie puugaasimootorid
www.kwenergie.de

ή=91%

Bezeichnung	el. Leistung	th. Leistung	Verbrauch
KWE 7,5G-3 AP	8 kW	19 kW	30,00 kW
KWE 12G-4 AP	12 kW	28 kW	43,00 kW
KWE 20G-4 AP	20 kW	42 kW	68,00 kW

Spanner Re^2 GmbH Wood-Power-Plant.

Joos-carburetor™ eriline seade on väike reguleeritav gaasigeneraator. See võimaldab toota gaasistusseadmeid võimsuse vahemikus 30 - 50 kWel and 70 - 110 kWth.

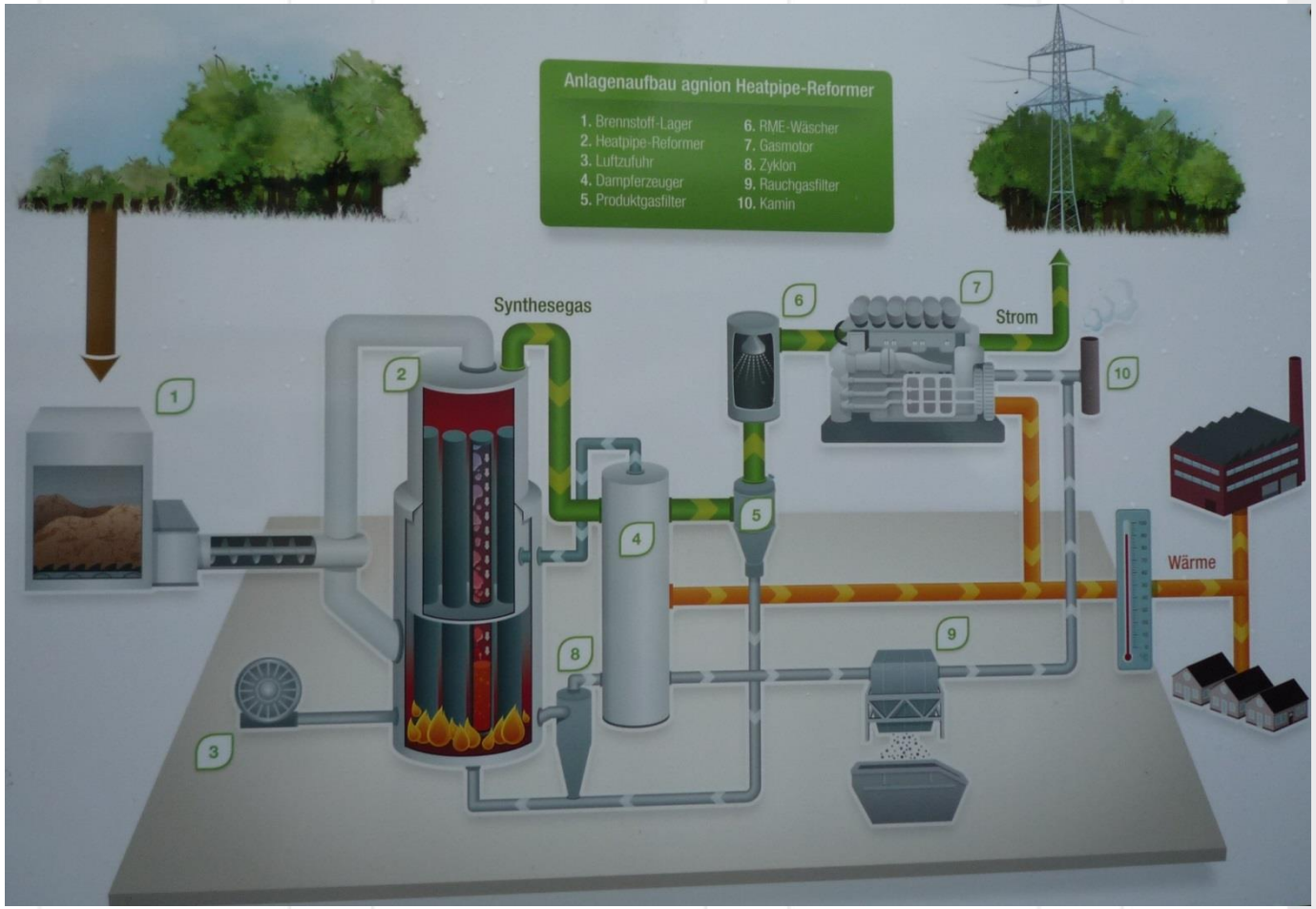
Lähtematerjaliks kasutatakse kaubanduslikku hakkpuitu, milles peenosakeste sisaldus peab olema alla 30%, niiskus ~15%.

Puitkütusel töötavate mikro CHP võimsusvahemikud (wood-power-plant)

Võimsusvahemik	Soojuse väljastus		
	Karburaator-sõlm	CHP seade	Kokku
30 kW electrical 66 kW thermal	ca. 10 kW	ca. 56 kW	ca. 66 kW
40 kW electrical 88 kW thermal	ca. 12 kW	ca. 76 kW	ca. 88 kW
45 kW electrical 100 kW thermal	ca. 15 kW	ca. 85 kW	ca. 100 kW

Hakkpuidu vajadus: 1 kW elektrilise võimsuse kohta umbes 1 kg tunnis

Hakkpuidul töötav koostootmisjaam



Agnion Heatpipe-Reformer (400 kW$_e$ ja 630 kW$_{th}$, üldkasutegur 80%) Grassaus, Baieris, Lõuna-Saksamaal

Ümbritsevad energiaallikad

- Ümbritsev elektromagnetiline kiirgus (ka päikesekiirgus, pV elemendid)
- Biomehaaniline liikumine (nt põlve ümber asetatav seade arendab käimisel võimsust 2,5 W).
- Pieso-elektriline efekt (mehaaniline pinge muundatakse elektriks, nt kinga sees olev muundur muundab sammu surve elektriks, väga väike võimsus).
- Püro-elektriline muundamine (temperatuuri muutused muundatakse elektriks, väga väike võimsus).
- **Termoelektriline muundamine** (Peltier efekt), jahutatava juhi ja kuumutatava juhi vahel tekib elektrivool. Seade termoelektriline generaator (TEG).
- Elektrostaatiline energiakogumine
- Magnetostaatiline energiakogumine
- Tulevikus – nanogeneraatorid ja müraenergia muundajad.

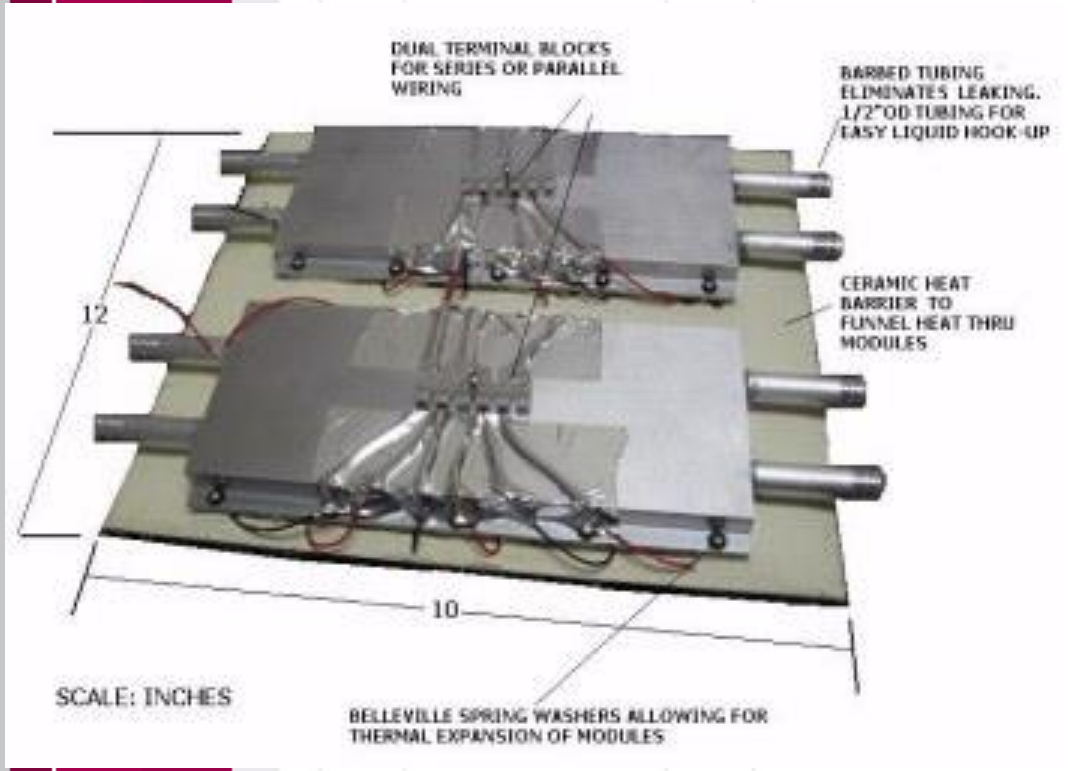
Termoelektrilised generaatorid

LIQUID TO LIQUID TEG POWER GENERATOR

Maksimaalne temperatuur soojal poolel 190°C

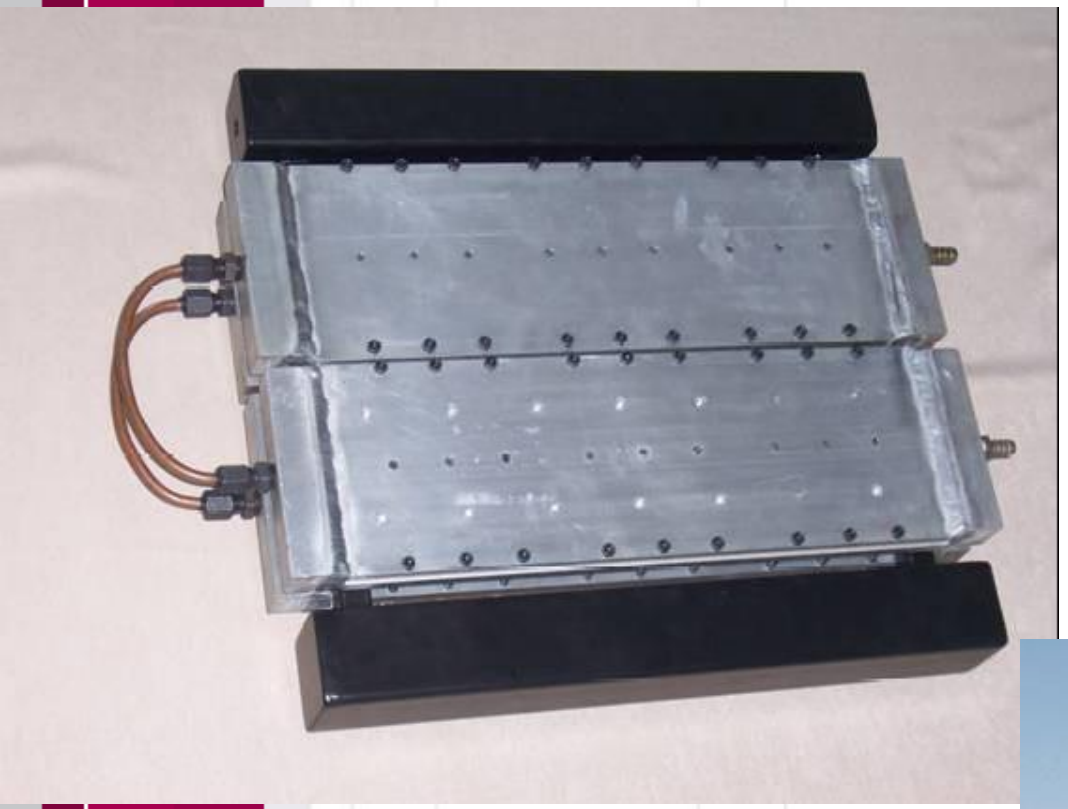
- **TEG2-16-07025HT-SS**
- DT of 100°C ~ 40 watts output
- DT of 120°C ~ 70 watts output
- DT of 150°C ~100 watts output

Ahjule kinnitatav TEG

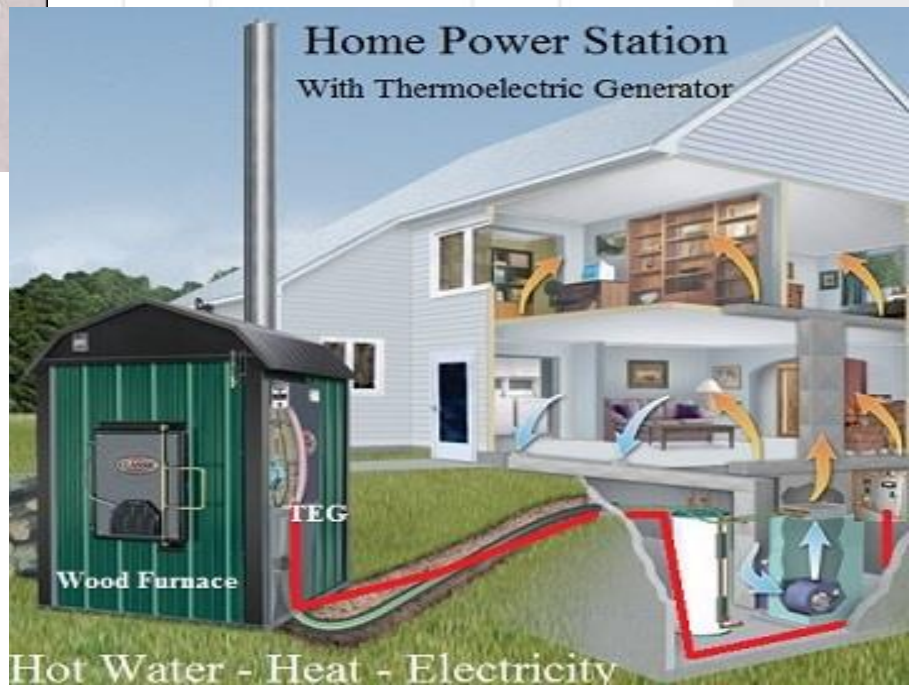


- *Liquid to hot face TEG*
- Maksimaalne kuuma poole temperatuur 320°C
- DT of 180°C ~ 104 watts output
- DT of 210°C ~ 114 watts output
- DT = kuuma poole temperatuur – külma poole temperatuur (st temperatuuride vahe).

500 vatine TEG termoelektriline elektrigeneraator



- Kuum allikas 250°C (490F).
- Külm allikas vähem kui 30°C (86F).
- DT~ 220°C või enam.



Tänan Teid kuulamast!