

Puun pienpolton analysointi hapenkulutusmenetelmällä ja hiilidioksidintuottomenetelmällä

Tuomas Paloposki

sekä

Jaakko Saastamoinen, Krzysztof Klobut,
Pekka Tuomaala



Aalto-yliopisto

Tausta

- Puun poltto uuneissa – tyypillisiä piirteitä:
 - panospoltto
 - epästationäärinen palaminen
 - vaiheet: kuivuminen, pyrolyysi, hiiltojäännöksen palaminen
 - aikaskaalat palamisessa ja uunin lämmönluovutuksessa





Aalto-yliopisto

Tavoite

Löytää keino, jolla voidaan arvioida *lämmönvapautumisnopeus* (= palamisreaktioissa vapautuva hetkellinen lämpöteho) ajan funktiona.

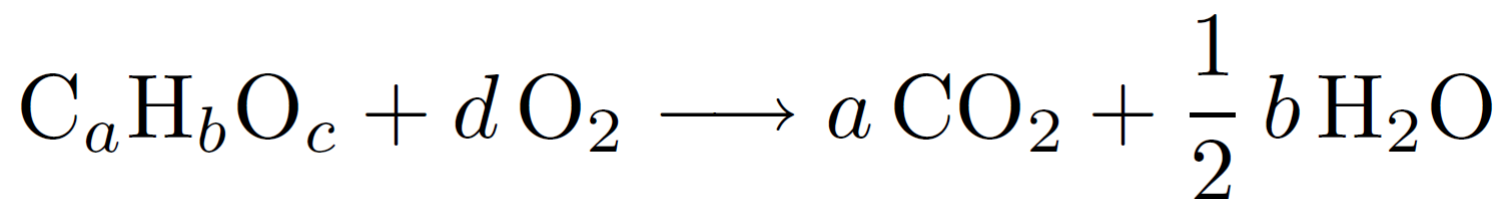
Pyritään soveltamaan paloturvallisuustekniikassa käytettäviä menetelmiä (*hapenkulutusmenetelmä, hiilidioksidintuottomenetelmä*).



Aalto-yliopisto

Palamisreaktio yleensä

Orgaanisen aineen palamisreaktion yhtälö yleisessä muodossa on



missä

$$d = a + \frac{1}{4} b - \frac{1}{2} c.$$



Aalto-yliopisto

Esimerkkireaktioita

Code	Fuel	Combustion reaction	ΔH_r [kJ/mol]
(R1)	carbon	$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-394
(R2)	methane	$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-800
(R3)	propane	$C_3H_8 + 5O_2 \longrightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	-2044
(R4)	benzene	$C_6H_6 + 7\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 3H_2O$	-3128
(R5)	methanol	$CH_3OH + 1\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-635
(R6)	acetic acid	$CH_3COOH + 2O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	-876
(R7)	D-glucose	$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	-2772

Lämpöarvot

Määritellään lämpöarvot:

$$Q' = -\Delta H_r$$

”perinteinen” lämpöarvo

$$Q'' = -\frac{\Delta H_r}{d}$$

lämpöarvo suhteessa
palamisessa kuluvan
hapen määrään

$$Q''' = -\frac{\Delta H_r}{a}$$

lämpöarvo suhteessa
palamisessa syntyvän
hiilidioksidin määrään

Esimerkkireaktioihin sovellettuna

Code	Fuel	Q' [kJ/mol]	d []	Q'' [kJ/mol]	a []	Q''' [kJ/mol]
(R1)	carbon	394	1	394	1	394
(R2)	methane	800	2	400	1	800
(R3)	propane	2044	5	409	3	681
(R4)	benzene	3128	$7\frac{1}{2}$	417	6	521
(R5)	methanol	635	$1\frac{1}{2}$	423	1	635
(R6)	acetic acid	876	2	438	2	438
(R7)	D-glucose	2772	6	462	6	462
AVERAGE:				420		562

Puun koostumus ja lämpöarvot

- Puulle on suunnilleen voimassa:

– $m = b/2a \approx 0,7$

– $n = c/a \approx 0,6$

– $Q'' \approx 425 \text{ kJ/mol}$

– $Q''' \approx 446 \text{ kJ/mol}$

koostumus on suunnilleen vakio

kuivan puun lämpöarvot suhteessa kuluneen hapen määrään ja suhteessa tuotetun hiilidioksidin määrään ovat suunnilleen vakioita

- Kaikki tämä lähestulkoon puulajista riippumatta!
- (kuori, trooppinen puu, ja jätepuu mahdollisesti poikkeuksia)



Aalto-yliopisto

Välijohtopäätös

- Jos pystymme arvioimaan, kuinka paljon happea palamisessa kuluu (mol/s), niin voimme laskea hetkellisen lämmönvapautumisnopeuden (kW)
(= *hapenkulutusmenetelmä*)
- Jos pystymme arvioimaan, kuinka paljon hiilidioksidia palamisessa syntyy (mol/s), niin voimme laskea hetkellisen lämmönvapautumisnopeuden (kW)
(= *hiilidioksidintuottomenetelmä*)

Koejärjestelyt

- Tarvittavia mittauksia on minimissään kaksi.

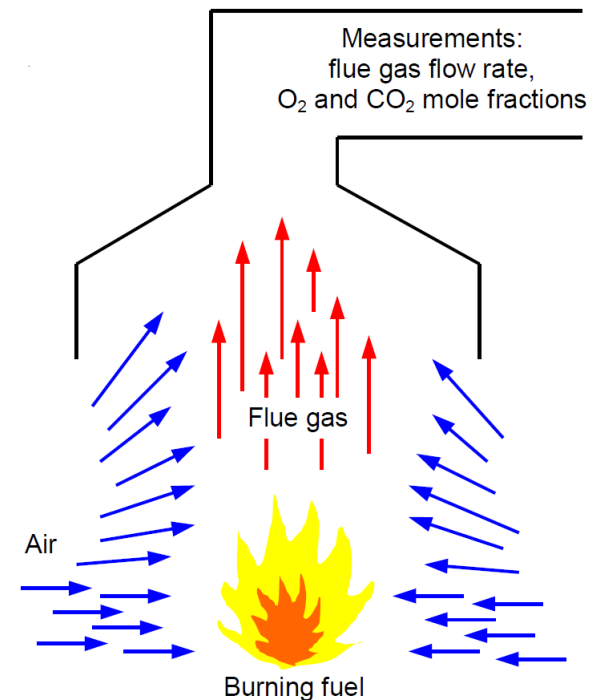
Hapenkulutusmenetelmä:

- Savukaasuvirtaus
- Savukaasun O_2 -pitoisuus

Hiilidioksidintuottomenetelmä:

- Savukaasuvirtaus
- Savukaasun CO_2 -pitoisuus

- Tarkkuutta ja luotettavuutta voi parantaa lisäämällä mittauksia.





Aalto-yliopisto

Laskentakaavat

Hapenkulutusmenetelmä:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= -\Delta\dot{N}_{\text{O}_2} \cdot Q'' \\ &= -\dot{N}_{\text{WFG}} k Q'' \cdot \frac{[1 + \frac{1}{2}(m - n)]\Delta x_{\text{O}_2}}{1 + \frac{1}{2}(m - n)(1 - x_{\text{O}_2}) - \frac{1}{2}k(m + n)\Delta x_{\text{O}_2}}\end{aligned}$$

Hiilidioksidintuottomenetelmä:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \Delta\dot{N}_{\text{CO}_2} \cdot Q''' \\ &= \dot{N}_{\text{WFG}} k Q''' \cdot \frac{\Delta x_{\text{CO}_2}}{1 + \frac{1}{2}(m - n)x_{\text{CO}_2} + \frac{1}{2}k(m + n)\Delta x_{\text{CO}_2}}\end{aligned}$$

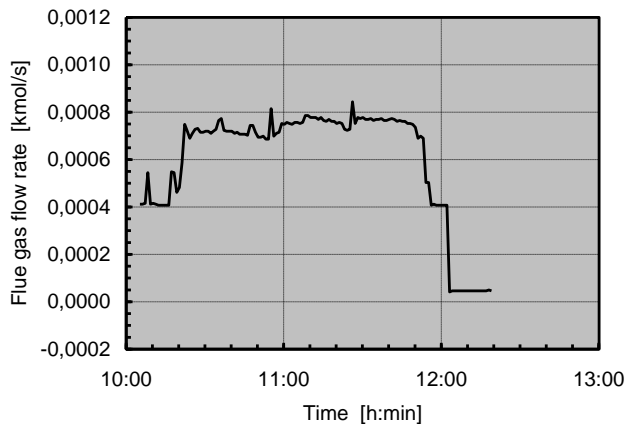


Aalto-yliopisto

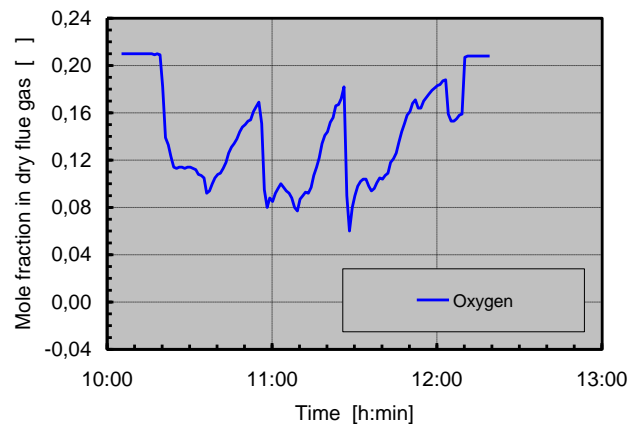
Sovellutus

- Kokeessa poltettiin 3 pesällistä polttopuuta.
- Polttopuun massa yhteensä 8,97 kg.
- Polttopuun lämpöarvo ja koostumus tiedossa.
- Mittaustulokset:

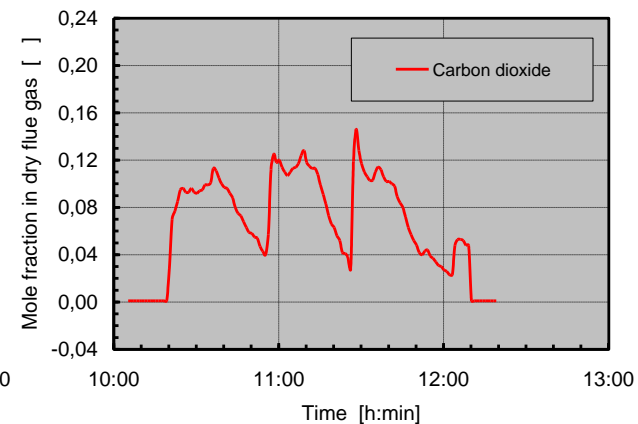
Flue gas flow rate during combustion



Flue gas composition during combustion

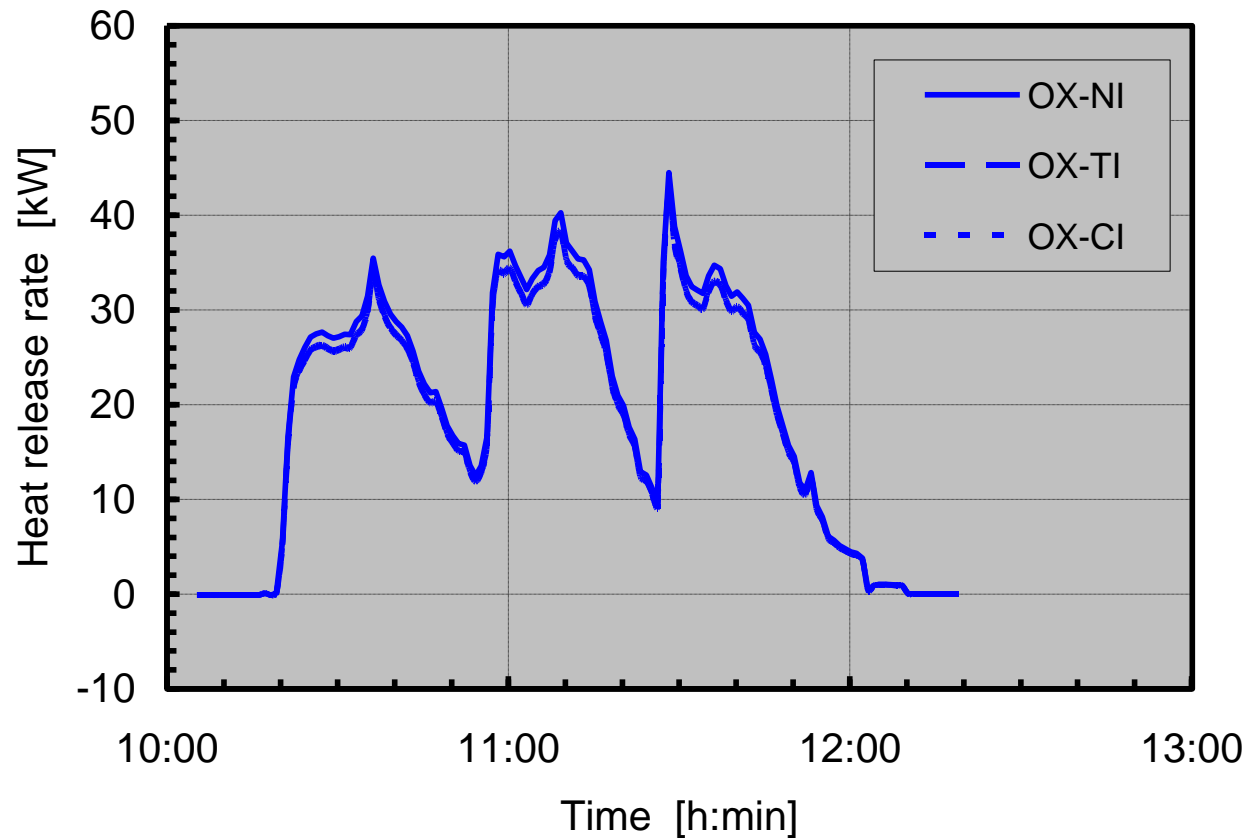


Flue gas composition during combustion



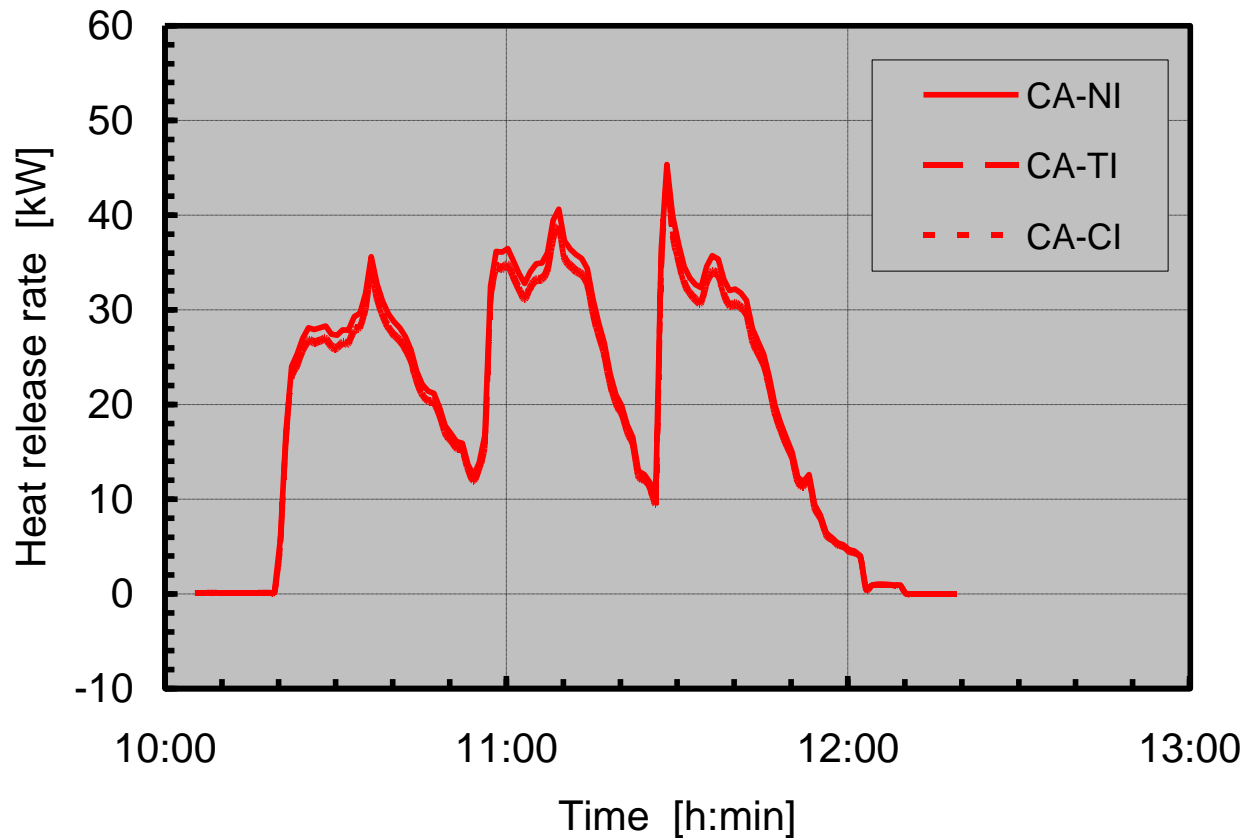
Lämmönvapautumisnopeus

Hapenkulutusmenetelmä:



Lämmönvapautumisnopeus

Hiilidioksidintuottomenetelmä:



Yhteenveto tuloksista

Palaessa vapautuneen energiamäärän laskenta:

Table 3: Summary of calculated values for the total heat release. The calculated values are compared with 143.3 MJ, which is the total energy content of the fuel inserted into the stove during the test.

Case	Total heat release	Difference	Case	Total heat release	Difference
OX-NI	152.8 MJ	+6.6 %	CA-NI	155.2 MJ	+8.3 %
OX-TI	145.6 MJ	+1.6 %	CA-TI	146.8 MJ	+2.4 %
OX-CI	144.7 MJ	+1.0 %	CA-CI	148.5 MJ	+3.6 %

Hiilidioksidituoton laskenta:

Polttoaineen koostumuksen perusteella: 14,65 kg

Savukaasumittausten perusteella: 15,12 kg (+3 %)



Aalto-yliopisto

Johtopäätökset

- Tavoite saavutettiin.
- Onnistuttiin soveltamaan hapenkulutusmenetelmää ja hiilidioksidintuottomenetelmää polttopuun epästationäärisen panospolton tutkimiseen.
- Työhön liittyi laskentayhtälöiden kehitystä.
- Saavutettu tarkkuustaso oli erinomainen.
- Tarvittavat mittauslaitteet ovat tavanomaisia ja tyypillisesti jo käytössä polttolaboratorioissa.



Loppu

Kiitoksia mielenkiinnosta!

