



Förbränningsteknik

Björn Zethräus

Inledning och bakgrund till materialet

Sedan oljeprishöjningarna under det tidiga 1970-talet har intresset för att spara bränsle både i processindustrins ugnar liksom i de pannor som producerar en stor del av Sveriges fjärrvärme.

Detta ledde till en efterfrågan på tillämpade och korta utbildningar avsedda för operatörer och driftpersonal. I ett något senare skede, under -80 och -90 talen, och speciellt sedan de stora miljöcertifieringssystemen ISO 14000 och EMAS hade utvecklats, breddades behovet av utbildningar till att även omfatta driftledare, miljö- och energistrateger inte bara inom energibranschen utan även inom offentlig sektor.

Kompendiet är ett av flera som har tagits fram för att möta dessa behov.

Det finns även speciellt material framtaget för mera avancerade kurser i förbränningsteknik, för specialkurser gällande biobränslen specifikt, för lagring och hantering av biobränslen och andra speciella eller avgränsade områden.

Bergdala, november 2016

Björn Zethräus
Professor i Bioenergiteknik/Förbränningsteknik

Varför effektiv eldningsteknik?

Det är ett faktum att huvuddelen av vår energianvändning baseras på förbränning av bränslen och det är ett faktum att denna förbränning utgör en huvudorsak till de stora koldioxidutsläpp som riskerar att förändra jordens klimat.

Det är också ett faktum att förbränning inte bara ger upphov till koldioxidutsläpp utan även andra föroreningar bildas vid förbränningen.

Slutligen kostar bränslena pengar.

En effektiv eldningsteknik syftar till att minimera utsläppen och bränsleförbrukningen genom att maximera verkningsgraden samtidigt som bildningen av olika typer av föroreningar skall hållas på en minimal nivå. Detta kan man uppnå dels genom åtgärder beträffande bränsle kvaliteten, dels genom åtgärder i förbränningsanläggningen.

Det här kursmaterialet syftar till att ge grundläggande men tillämpbara kunskaper som kan vara till nytta i detta arbete.

De räkneexempel som finns i materialet utgår i huvudsak från resonemang kring ”rena” bränslen som cellulosa, metangas eller liknande, men resonemangen är generella och giltiga även för bränslen som består av blandningar, som avfall, kol eller olja, bara man känner till deras analys.

Avsikten är inte att ge några djuplodande teoretiska kunskaper, utan att med breda penseldrag illustrera de viktigaste förloppen vid förbränningen av bränslen och hur de viktigaste parametrarna påverkar förloppen. Tyngdpunkten ligger på att ge kvalitativa förklaringar och att illustrera sambanden mellan olika parametrar - inte på att i detalj förklara förloppen.

Sammanfattningsvis kan man säga att en effektiv eldningsprocess kännetecknas av att den är:

- Säker** Processen skall vara säker både för dem som jobbar med den och för den yttre miljön. Under förbränning bildas heta, giftiga och explosiva gaser som måste hållas under kontroll samtidigt som det bildas olika miljögifter.
- Stabil** Processen måste vara stabil för att man skall kunna hålla den säker. Det är också under instabil drift som de största mängderna av miljögifter bildas. För en stabil förbränningsprocess krävs stabila flöden, stabila temperaturer och stabila tryck.
- Styrbar** Processen måste vara styrbar för att fylla sin funktion, vare sig det gäller att producera fjärrvärme eller el eller att driva en industriell process. För att på ett förutsägbart sätt kunna styra processen krävs också att man kan mäta de viktigaste processvariablerna.

Innehållsförteckning

Varför effektiv eldningsteknik?	- 2 -
Bränslen och förbränning i Sverige	- 4 -
Vad är ett bränsle?	- 5 -
Fotosyntesen - Cellulosa	- 5 -
Legala aspekter	- 5 -
Ett perspektiv på bränslen – Fossila bränslen	- 7 -
Ett annat perspektiv på bränslen – Förbränningsprocessen	- 7 -
Ett tredje perspektiv – Bildning av föroreningar	- 10 -
Förbränningskedjan	- 12 -
Villkor för förbränning	- 12 -
Förbränningsintensitet	- 12 -
<i>Finfördelning</i>	- 12 -
<i>Pyrolys och blandning</i>	- 14 -
<i>Förbränning i bäddar</i>	- 15 -
Förbränningskemi och värmevärde	- 17 -
Elementär förbränningskemi	- 17 -
Förbränning med luftöverskott	- 17 -
Förbränningstemperatur	- 18 -
Förbränning med luftunderskott	- 19 -
Några definitioner	- 21 -
Förbränning med fuktiga bränslen	- 21 -
Fuktiga bränslens värmevärde och rökgasvolym	- 21 -
<i>Värmevärde:</i>	- 22 -
<i>Kalorimetriskt eller övre värmevärde:</i>	- 22 -
<i>Effektivt eller nedre värmevärde:</i>	- 22 -
För att sammanfatta förbränningskemin i enkla formler:	- 23 -
Förbränningens aerodynamik	- 25 -
Eddy Dissipation Concept (Virvelupplösningssmodellen), EDC	- 25 -
Turbulens	- 29 -
Uppehållstid (och turbulens)	- 31 -
Temperatur (och turbulens och uppehållstid)	- 35 -
Föroreningsbildning	- 38 -
Mellanprodukter	- 38 -
Bränslebundna föroreningar	- 44 -
Föroreningar som bildas under speciella betingelser	- 47 -
Kortlivade och långlivade föroreningar	- 50 -
Eldningsteknik	- 54 -
Stegförbränning	- 56 -
Typisk reglerstrategi	- 59 -
Finns det några bra pannor?	- 63 -
Avrundning	- 66 -

Bränslen och förbränning i Sverige

Enligt energimyndighetens statistik tillfördes det svenska energisystemet år 2012, exporten av el oräknad, totalt 618 TWh varav 165 TWh olja/oljeprodukter, 12 TWh fossilgas och stadsgas, 21 TWh kol och koks samt 140 TWh biobränslen och torv. Totalt 338 TWh eller 56.5 % bränslen. Elexporten år 2012 uppgick till 20 TWh.

De sammanlagda förlusterna var 160 TWh, och användningen av bränslen för utrikes transporter och för andra ändamål än energi, var 61 TWh varför den totala slutanvändningen av energi uppgick till 377 TWh.

Av förlusterna (160 TWh) stod elproduktionen i kondenskraftverk för 123 TWh av tillfört 188 TWh kärnbränsle medan de sammanlagda förlusterna i hela det resterande energisystemet var 37 TWh.

Sammantaget får man följande översiktliga bild av det svenska systemet:

	Brutto in	Förluster och annat¹	Nettotillskott totalt	
			<i>TWh</i>	<i>%</i>
Biobr. etc	140.1	7.6	132.5	33.3
Olja etc	165.4	62.1	103.3	26.0
Vatten	79.1	11.7	67.4	16.9
Uran	187.5	132.9	54.6	13.7
Kol etc	20.9	1.1	19.8	5.0
Gaser	12.2	4.0	8.2	2.1
Vind	7.2	1.1	6.1	1.5
Geoterm	5.8	0	5.8	1.5
Totalt²	618.1		397.6	

Värden från energimyndigheten, energiläget i siffror 2014

¹ "Förluster" inkluderar direkta förluster, omvandlings- och distributionsförluster samt användning för utrikes transporter och användning för icke-energiändamål

² Summorna överskrider energimyndighetens siffror med 20 TWh eftersom exporten av elkraft inte är medräknad. År 2012 exporterades 19.6 TWh el.

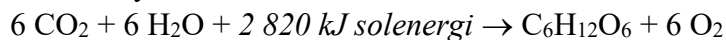
- Av 618 TWh tillförd energi till det svenska energisystemet år 2012 kom 339 TWh (drygt 54 %) från bränslen.
- Av nettoenergin 398 TWh var 132 TWh biobränslen, torv och avfall och de fossila bränslena var sammanlagt ungefär lika mycket.
- Av de fossila bränslena användes 76 TWh (58 %) inom transportsektorn med en verkningsgrad omkring 35 %.
- Utnyttjandet av bränslenas energi i stationära anläggningar sker i huvudsak med verkningsgrader som väl överstiger 80 %.
- I fjärrvärmenäten är verkningsgraden från bränsleenergi till levererad energi till slutkund omkring 77 %.

Förändringarna från 2014 till idag är inte på något vis avgörande utan bilden är i sina huvuddrag oförändrad.

Vad är ett bränsle?

Fotosyntesen - Cellulosa

Den energi som finns lagrad i ett bränsle finns där i form av lagrad solenergi från fotosyntesen.



I fotosyntesen tar växterna upp koldioxid (CO₂) från luften, vatten (H₂O) genom rötterna från marken och solenergi genom bladen. Av totalt 264 gram CO₂ och 108 gram vatten bildas 180 gram cellulosa plus 192 gram syrgas. I cellulosan finns solenergin lagrad, totalt 2 820 kJ/180 gram, eller cirka 15.7 MJ/kg torr cellulosa. I biobränslen ingår även komponenterna lignin (25.1 MJ/kg) och hemicellulosa och ett typiskt värmevärde för biobränslenas torrsbstans är 19.2 MJ/kg.

Legala aspekter

Federal lag – EU-direktiv – har också ett inflytande på vad som får kallas ett bränsle. Här går den stora skiljelinjen mellan traditionella, fossila, bränslen och nya bränslen som exempelvis biobränslen, avfallsbränslen och liknande.

EU-direktiv 2000/76/EC, det så kallade avfallsdirektivet, reglerar detta: *Essentially, the draft Directive aims at covering all waste. Furthermore, it will introduce far stricter provisions than those found in the existing municipal waste incineration Directives (89/369/EEC and 89/429/EEC) and in the existing hazardous waste incineration Directive (94/67/EC), which would be repealed. However, it excludes some forms of waste such as:*

- *biomass (such as non-treated agriculture and forest residues), which falls under the scope of the large combustion plants Directive;*
- *experimental plants with a limited capacity used for research and development of improved incineration processes.*

Följande anläggningar skall emellertid undantas från detta direktivs tillämpningsområde:

a) Anläggningar som endast behandlar följande slags avfall:

1. Vegetabiliskt jord- och skogsbruksavfall.
2. Vegetabiliskt avfall från livsmedelsindustrin, om den värme som alstras återvinns.
3. Vegetabiliskt fiberhaltigt avfall som uppstått vid produktion av nyfiberpappersmassa och vid pappersproduktion, om avfallet samförbränns på produktionsplatsen och om den värme som alstras återvinns.
4. Träavfall med undantag för träavfall som kan innehålla organiska halogenföreningar eller tungmetaller till följd av behandling med träskyddsmedel eller till följd av ytbehandling, och som särskilt omfattar sådant träavfall från bygg- och rivningsavfall.
5. Korkavfall.
6. Radioaktivt avfall.
7. Djurkroppar, varom regleras i direktiv 90/667/EEG, utan att detta påverkar framtida ändringar av det direktivet.
8. Avfall som uppkommer vid prospektering och utvinning av olje- och gasfyndigheter från offshoreplattformar och som förbränns på dessa.

b) Experimentanläggningar som används för forskning, utveckling och provning i syfte att förbättra förbränningsprocessen och som behandlar mindre än 50 ton avfall per år.

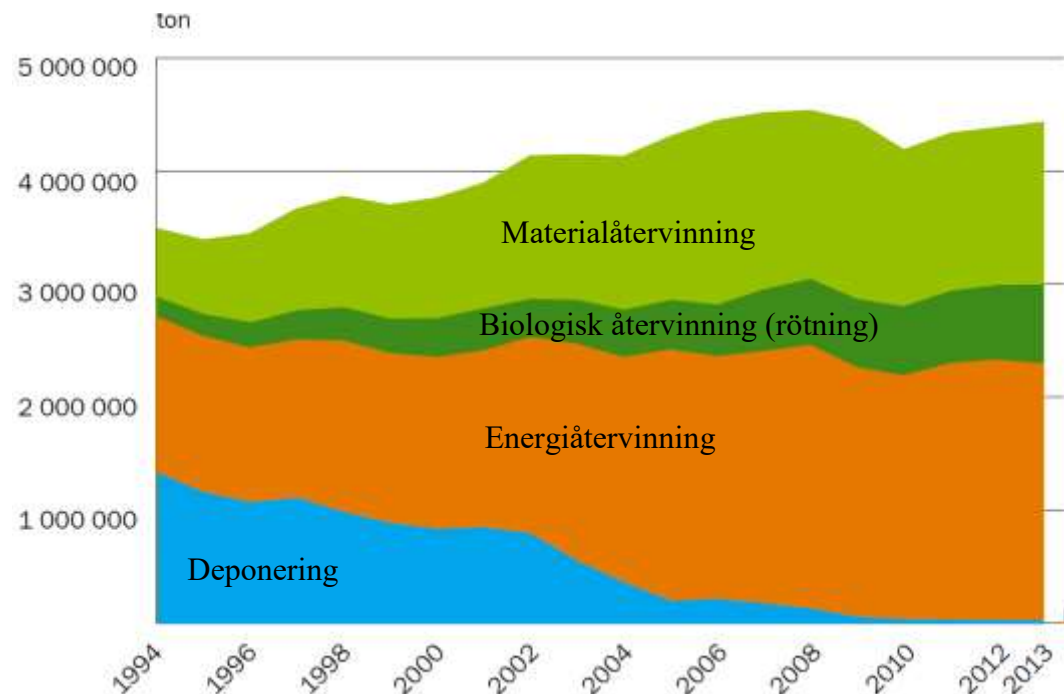
I de svenska fjärrvärmeverken används en mängd olika energikällor, statistik från energimyndigheten och från avfallsverige gällande år 2012:

	Totalt tillfört	
	TWh	%
Biobränslen och torv	29.0	44.7
Avfall	16.0	24.6
Geotermi	5.8	8.9
Spillvärme från industri	4.9	7.5
Fossilgas	4.1	6.3
Kol och masugns gas	2.7	4.1
Olja	2.2	3.4
Elpannor	0.3	0.5
Totalt	65.0	100.0

Tillförd energi till fjärrvärmeproduktion

De totala förlusterna i fjärrvärmesystemen uppskattas enligt energimyndigheten till 15.1 TWh vilket innebär att totalverkningsgraden i systemen som genomsnitt är omkring 77 % räknat från bränsleenergi till slutkund.

Huvuddelen av det hushållsavfall som produceras i Sverige förbränns idag i fjärrvärme- eller kraftvärmeanläggningar medan en allt mindre andel deponeras. Figuren är hämtad från AvfallsSveriges statistikrapport år 2013.



Ett perspektiv på bränslen – Fossila bränslen

Även de fossila bränslena - kol, olja och gas - har en gång bildats genom fotosyntesen men har under årmiljonernas lopp omvandlats till dagens kvalitet. Man kan grovt uppskatta de fossila bränslenas sammansättning genom att anta att syret (O) i det ursprungliga biobränslet har försvunnit under årmiljonerna medan kolet (C) och vätet (H) finns kvar. Eftersom energin finns lagrad i huvudsak i kolväteföreningarna finns även den ursprungliga energin kvar. Resonemanget illustreras i tabellen här nedan.

1 kg ursprungligt biobränsle				Nuvarande fossilt bränsle		
Kol	C	400 gram		Kol	C	400 gram
Syre	O	533 gram	<i>försvinner</i>	Syre	O	0 gram
Väte	H	67 gram		Väte	H	67 gram
Total vikt		1000 gram		Total vikt		467 gram
Energi MJ		19.2 MJ		Energi MJ		19.2 MJ
Värmevärde		19.2 MJ/kg		Värmevärde		41.1 MJ/kg

Betraktat på detta enkla vis ser man att fossila bränslen kommer att ha ett högre värmevärde än biobränslen, men man kan inte dra några andra slutsatser.

Ett annat perspektiv på bränslen – Förbränningsprocessen

Om man istället betraktar bränslet som sammansatt av

- Fukt
- Aska
- Brännbara, flyktiga beståndsdelar
- Brännbar, fast bränsleåterstod

kan man komma till andra slutsatser beträffande bränslet och dess egenskaper.

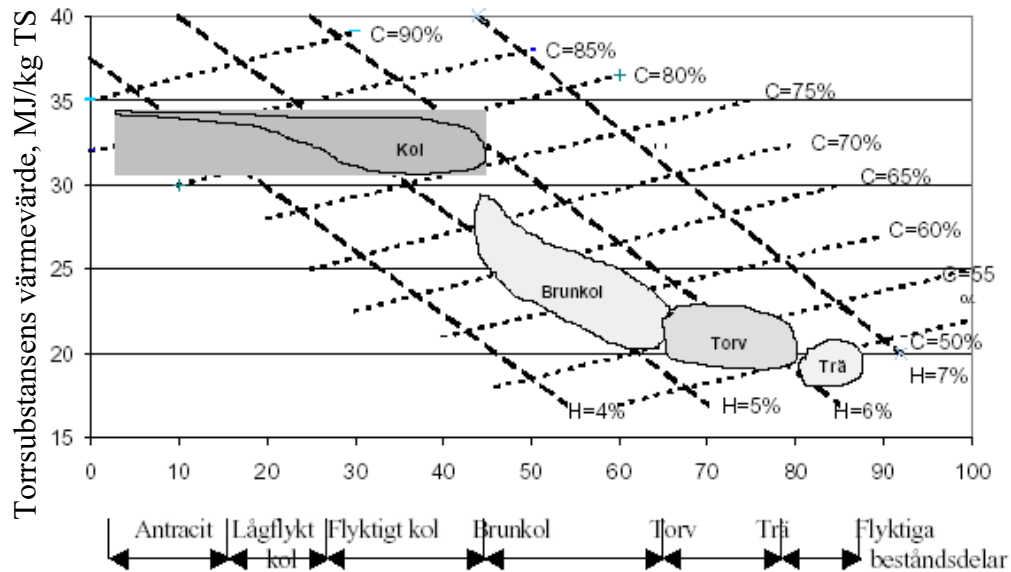
Fukt förekommer nästan alltid i bränslen, speciellt i fasta bränslen som trä, kol, avfallsbränslen och liknande. Även i olja förekommer vatten. I gasformiga bränslen är det dock mera ovanligt.

Aska finns i fasta och flytande bränslen även om askhalten i t ex bensin är exceptionellt låg. I olja är askhalten normalt sett omkring 0.01-0.1 vikts-%, i biobränslen - beroende på hur de har hanterats - allt från 0.5 till över 5 vikts-% och i kol ofta väsentligt högre än så. I avfallsbränslen varierar askhalten inom mycket vida gränser.

Om man värmer upp ett brännbart material utan lufttillträde och håller det vid en hög temperatur avges en del av bränslet i form av brännbara, gasformiga beståndsdelar. Förloppet kallas *pyrolys* eller *avgasning*. En väsentlig del av bränslets svavel och kväve avges samtidigt i gasform.

Mängden avgivna gaser ökar med stigande hålltemperatur och ökar också ju snabbare uppvärmningen sker. Detta innebär att om ett och samma fasta bränsle undersöks dels i form av grova partiklar och dels i form av fina partiklar, och båda fraktionerna värms genom att placeras i en förvärmad ugn, så

kommer de små partiklarna att värmas snabbare än de grova och de små partiklarna kommer följaktligen att avge en större del av sin massa i form av flyktiga beståndsdelar.



Den fasta bränsleåterstoden är det som återstår av det askfria bränslet efter att det har torkats och de flyktiga beståndsdelarna drivits av. Denna består huvudsakligen av kol och väte eftersom syre, svavel, kväve och flera andra grundämnen till stor del har avgivits i gasform.

Ett typiskt exempel på en fast bränsleåterstod är grillkol. I grillkol finns dock askan kvar, vilket den egentligen inte skall göra enligt definitionen på den fasta bränsleåterstoden.

Grillkol är svår att antända, vilket är typiskt för den fasta bränsleåterstoden från alla bränslen. Gasol - som ju till 100 % består av flyktiga beståndsdelar - är å andra sidan mycket lättantändlig. Normalt sett sker antändningen genom att de flyktiga beståndsdelarna antänds och att gasflammorna sedan värmer den fasta bränsleåterstoden så att den i sin tur antänds. Mer om detta senare.

Typiska ungefärliga förhållanden mellan de olika beståndsdelarna, i vikts-%, är

	Fukt	Aska	Flykt	Fast rest
Gasol	0	0	100	0
Olja	0.1-3	0.01-0.1	99	0.1-1
Biobränsle	10-60	0.5-5	60-80	20-40
Avfallsbränsle	10-60	0.5-20	30-80	20-70
Kol	2-20	2-20	20-50	50-80

Aska angiven som vikts-% av torrsubstansen

För avfallsbränslen är det egentligen inte riktigt relevant att beskriva sammansättningen i ovanstående termer, utan deras innehåll av olika råmaterial eller fraktioner beskriver deras förbränningsegenskaper på ett bättre sätt.

Tabellen här nedan visar typisk sammansättning av hushållsavfall och är tagen ur utredningen SOU 2002:9. Man ser hur värmevärdena för de ingående fraktionerna varierar mellan 0 och 34 MJ/kg samtidigt som fukthalterna kan vara upp till 80 % i vissa fraktioner och askhalterna varierar mellan 100 % för de obrännbara fraktionerna och ner till enstaka procent för rena plastfraktioner.

På samma sätt varierar även flykthalterna mellan olika avfallsfraktioner – från nära nog 100 % för vissa plastkvaliteter och ner till mycket låga värden, cirka 5-10 %, för läder.

Sammansättningen hos avfallsbränslen styrs i hög grad av lagar och regler samt av hur väl systemen för källsortering fungerar i olika kommuner och orter. Det är därför mycket svårt – för att inte säga omöjligt – att ange några typiska data för avfallsbränslen annat än att de ofta har höga kvävehalter, höga klorhalter och höga fukthalter.

	Andel (%)	Värmevärde (Hi)	Fukthalt (%)	Askhalt (%)	Lämpligt för:		
					Förbränning	Biologisk behandling	Materialåtervinning
Papper	17,9	13,6	14	9,4	X	(X)	X
Kartong	8,9	11	27	8,9	X	(X)	X
Hårdplast	2	32,6	10	1,4	X		X
Mjukplast	5,3	34,4	10	1,3	X		X
Komposterbart 1	23,5	7,5	52,1	1,8	X	X	
Komposterbart 2	21,4	1,8	79,8	1,2	(X)	X	
Textil, gummi, läder	2,7	19,7	11,3	8,8	X		X
Glas	5,1	0,36	2	98			X
Metaller	2,7	0	0	100			X
Övrigt brännbart	8,6	8,1	46,3	5,9	X		
Övrigt icke brännbart	1,9	0					

Av detta sätt att betrakta bränslet kan man kvalitativt förstå att vad som händer då en bränslepartikel kommer in i en het eldstad är följande: (och detta gäller även om ”partikeln” är en vätskedroppe)

- Uppvärmning till 100 °C och torkning
- Vidare uppvärmning med samtidig avgivning av flyktiga beståndsdelar
- Antändning av de flyktiga beståndsdelarna
- De brinnande gaserna förbrukar syret närmast partikeln samtidigt som flammorna fortsätter att värma den fasta bränsleresten
- Då gasflammorna slocknar, dvs. de flyktiga beståndsdelarna brunnit ut, kan syre komma i kontakt med den heta, fasta bränsleåterstoden vilken nu antänds

Genom detta sätt att betrakta bränslet kan man förstå varför vissa bränslen är mera lättantändliga än andra, man kan skapa sig en bild av hur förbränningen sker, men man kan inte förstå varför vissa bränslen har högre värmevärde än andra, man kan inte förstå varför förhållandet mellan väte och kol är likartat i kol och i färsk björkved etcetera. Dessa senare aspekter fick däremot sin förklaring då vi betraktade de fossila bränslena som långtidslagrade produkter av fotosyntesen...

Ett tredje perspektiv – Bildning av föroreningar

Ett tredje sätt att betrakta bränslet är att se det som bestående av brännbara kolväten plus föroreningar och att betrakta förbränningsprocessen och vad som händer under den.

Målet med förbränningsanläggningen är att bringa luftens syre i kontakt med bränslets brännbara delar genom att blanda om dem så effektivt som möjligt och att därigenom oxidera bränslets kol fullständigt till koldioxid och att oxidera bränslets väte fullständigt till vattenånga. Dessa två är de primära produkterna från all förbränning.

Men eftersom bränslet består av en blandning av brännbara kolväten och olika föroreningar, aska, kväve, klor, svavel..., och eftersom vi alltså vill blanda bränslet med luften så fullständigt som möjligt kan vi inte undvika att samtidigt bringa alla bränsleföroreningarna i kontakt med luftens syre. Då inträffar det sorgliga att en del av dessa föroreningar också oxideras. Svavlet i bränslet oxideras till svaveldioxid (SO₂), en del av bränslets kväve oxideras till kväveoxider (NO, NO₂, N₂O, N₂O₄... sammanfattningsvis NO_x) etcetera. Klorret i bränslet oxideras till saltsyra - HCl - vilken i sin tur kan bidra till bildning av klorerade kolväten som exempelvis dioxin.

Under förbränningens gång bildas kolmonoxid (CO), sot och andra mellanprodukter. Dessa är visserligen brännbara - i likhet med bränslet självt - men det är inte säkert att de hinner brinna ut i eldstaden, varför utsläpp av dessa komponenter snarare är regel än undantag från förbränningsanläggningar.

Eftersom man aldrig kan få blandningen fullständig kommer en del av bränslets kolväten att slinka igenom anläggningen och komma ut i omgivningen i form av oförbrända kolväten.

Genom att betrakta bränslet på detta, tredje, sätt kan man alltså förstå kvalitativt varför miljöföreningar bildas och släpps ut genom skorstenen.

Sammanfattningsvis

- Bränslen är sådana ämnen som innehåller kemiskt bunden solenergi från fotosyntesen och som vi utnyttjar för att frigöra energi genom kemiska reaktioner.
- Bränslen kan betraktas på olika sätt:
 - en blandning av kol, väte och syre där lång lagring (20-100 miljoner år) under syrefria betingelser lett till att syrehalten sjunkit medan energin behållits. Detta betraktelsesätt förklarar varför fossila bränslen (kol, olja) har högt värmevärde.
 - en blandning av fukt, aska, flyktiga brännbara beståndsdelar samt en brännbar, fast återstod. Detta betraktelsesätt kan förklara varför vissa bränslen är lättare att antända än andra och ger också en kvalitativ bild av hur förbränningsförloppet sker.
 - en blandning av brännbara kolväten och obrännbara föreningar av olika slag. Detta betraktelsesätt ger en kvalitativ bild av vilka olika föreningar som kan bildas under förbränningen.
- Effektiv eldningsteknik är att frigöra bränslets kemisk bundna energi så fullständigt som möjligt, att tillvarata den frigjorda energin med högsta möjliga verkningsgrad samt att bilda så litet föreningar som möjligt under tiden.

Förbränningskedjan

Villkor för förbränning

Villkoren för att förbränning skall kunna ske är att

1. Det finns ett brännbart material
2. Det brännbara materialet kommer i kontakt med syre, vanligen från luft
3. Temperaturen är tillräckligt hög för att förbränningsreaktionerna skall kunna ske, dvs. för att bränslet skall kunna antändas.

Dessa tre villkor måste alltid vara uppfyllda. Om antändningen inte sker så blir det inte heller någon förbränning.

Förbränningsintensitet

För att kontakten mellan bränslet, speciellt i fall med flytande eller fasta bränslen, skall bli tillräckligt intensiv är det lämpligt att finfördela bränslet. Ju mera finfördelat bränslet är desto större yta exponeras för luftsytet och desto mera intensiv kan förbränningen bli.

Som typiska värden för förbränningsintensiteten eller eldstadsbelastningen kan man sätta

Bränsle	Förbränningsintensitet, genomsnitt för hela eldstaden		
	Storlek, MW	MW/m ²	MW/m ³
Gas/Olja	”Små” anl, ca 20-50 MW	3	0.4
	”Stora”, omkring 500 MW	5-6	0.35
Kolpulver	”Små” anl, ca 100 MW	2.5	0.15-0.2
	”Stora”, omkring 500 MW	Omkring 5	0.15
Kol på rost	Spreaderstoker, 10-150 MW	Drygt 2	0.2
	Kedjerost, snedrost, 10-120	1.3	0.2-0.25
Bark, flis Avfall	Snedrost, 10-120 MW	0.8	0.1-0.15
	BFB, 5-50 MW	0.8	0.1
	CFB, 20-150 MW	Omkring 1	0.15

Spreaderstokers kombinerar vanligen med wanderrostar

I fluidbäddar begränsas förbränningsintensiteten av det tillgängliga luftflödet, hastigheter cirka 2-5 m/s i bubblande bäddar, 5-20 m/s i cirkulerande bäddar. I fluidbäddar gäller också att stora bränslepartiklar stannar kvar i bädden under längre tid, varför finfördelningen av bränslet blir mindre kritisk i dessa anläggningar än vid exempelvis pulvereldning, då ju partiklarna blåser ut ur eldstaden efter en ganska kort tid, eller rosteldning, då ju partiklarna rent fysiskt matas ut ur eldstaden efter en bestämd tid.

Finfördelning

Finfördelningen av bränslet är alltså mest kritisk då man använder en förbränningsteknik med brännare, oljebrännare eller pulverbrännare. Olja finfördelas till små droppar i speciella finfördelningsmunstycken som kan vara av olika slag. Undvik ordet *atomiseringsmunstycken* eftersom finfördelningen inte alls sker till atomer!

Finfördelningen kan ske på olika sätt:

- rent mekaniskt, tryckoljemunstycken, rotationsmunstycken eller ultraljudsmunstycken.
- med ett medium, exempelvis tryckluftfinfördelning, ångfinfördelning eller med fläktluft i pressluftbrännare.
- genom att man blandar t ex vatten med oljan strax före brännaren varvid ångan som bildas inne i eldstaden spränger sönder oljedropparna till mycket små droppar.

Tryckoljemunstycken används gärna i mindre anläggningar (villa- och fastighetsstorlek) eftersom de inte kräver något annat än ett tillräckligt högt tryck på oljan. De kräver ett någorlunda rent bränsle eftersom de innehåller smala kanaler, de slits mekaniskt och de behöver inspekteras med jämna mellanrum.

Ultraljudsmunstycken har i huvudsak samma egenskaper som tryckoljemunstycken, en förhållandevis robust och enkel konstruktion, men de kräver ett rent bränsle och regelbunden inspektion. Ultraljudsmunstycken har också ett begränsat reglerområde.

Rotationsmunstycken används gärna vid förorenade bränslen, avfallsoljor, tallbecksolja och liknande, eftersom de tål att partiklar följer med bränslet. Detta innebär att de slits och att rotationskopporna behöver inspekteras och bytas ut med jämna mellanrum.

Alla mekaniska finfördelningsdon kräver att alla kanter som berörs av oljan är skarpa så att oljefilmen släpper ordentligt. Droppstorleken bestäms huvudsakligen av oljans viskositet, av rotationshastigheten och av trycken.

Finfördelningsmedia används gärna vid tjockare oljekvaliteter och i större brännare (över 0.5-1 MW). Pressluftbrännare, där man använder fläktluft vid måttligt tryck som finfördelningsmedium, förekommer dock i mindre storlekar.

Speciellt vid användning av tjocka oljekvaliteter som kräver förvärmning för att få rätt viskositet kan press- eller tryckluftbrännare vara besvärliga eftersom mediet är kallt och kan kyla oljan i brännarlansen och på det viset försämra finfördelningen. Ångfinfördelning håller upp oljetemperaturen i lanssen men kräver å andra sidan att man har en speciell ånggenerator för att kunna starta brännarna från kallt tillstånd.

Finfördelning med ett medium kräver rätt oljeviskositet, rätt hastighet hos finfördelningsmediet samt rätt förhållande mellan flödet av olja och flödet av finfördelningsmedium. Även i detta fall måste kanterna vara skarpa så att oljefilmen släpper ordentligt.

Finfördelning med hjälp av vatteninblandning kombineras med fördel med finfördelning med ett medium och ökar munstyckets användbarhet för oljor med högre viskositet.

Finfördelning av fasta bränslen – kol, trä, torv – för förbränning i brännare sker genom malning.

- Malning av kol, som är ett sprött material, kan ske i kul- eller stångkvarnar där det är viktigt att kvarnens inbyggda sikt fungerar väl så att storleksfördelningen på det bränsle som går vidare till brännaren är korrekt och överstort material återförs till kvarnen.
- Trä, som inte är sprött utan som består av förhållandevis sega cellulosa-fibrer, är svårt att mala i kvarnar med låg rotationshastighet som kul- eller stångkvarnar. På flera ställen använder man pellets som råvara, för att på det viset effektivisera transporten, och mal pelleterna i kul- eller stångkvarnar. De partiklar man får på detta vis är i huvudsak tillplattade sågspån som kommer av att pelleterna krossats tillbaka till sitt ursprungsmaterial, sågspån, medan dessa sågspån sedan inte malts ner i någon hög utsträckning.
- Malning av flis, som ju inte består av sågspån från början utan som består av långa, parallella, cellulosa-fibrer sammanklistrade med lignin, kräver hammarkvarnar eller snabbt roterande knivkvarnar för att ge ett rimligt bra malresultat. Även med dessa kvarnar får man ofta en partikelfraktion som består av nålliknande fibrer.

Pyrolys och blandning

Då det finfördelade bränslet kommer in i brännarens mynning värms det upp, torkas och pyrolyseras (i fall med rena, flytande bränslen är det frågan om en fullständig förångning istället). Pyrolysgaserna skall sedan blandas med luftens syre i sådana proportioner som gör att blandningen är brännbar. Blandningen får varken vara alltför mager eller alltför fet.

Alltför grova partiklar kommer inte att pyrolyseras, avgasas eller förångas i den zon som är avsedd för denna process, utan kommer att följa med ut i flammen utan att ha förgasats som de skall. Detta kan leda till bildning av oönskade produkter liksom det kan försämma flammans stabilitet.

Alltför små partiklar kan å andra sidan leda till alltför snabb förångning så att flammen kryper in i brännarmynningen och överhettar mynningen.

Blandningen av pyrolysgaser och luft värms ytterligare genom blandning med heta gaser från flammen och antänds sedan den uppnått en viss temperatur. Antändningen bör ske strax utanför brännarmynningen och skall vara stabil både i rummet och i tiden.

Vid start av en kall brännare (med en kall mynning) kan det vara svårt att få uppvärmningen och därmed antändningen att ske stabilt, vilket kan leda till att flammorna fladdrar och hoppar under en startfas tills brännarmynningen blivit rödvarm. Vid korrekt drift skall dock antändningen ske stabilt och flammen skall "sitta fast", dvs. antändas, strax utanför brännarmynningen.

Förbränningskedjan, det vill säga sekvensen

- Finfördelning
 - Förångning eller pyrolys
 - Blandning med syre i rätta proportioner
 - Uppvärmning följt av antändning
- gäller likadant vid all förbränning, även på rost eller i fluidbäddar.

Förbränning i bäddar

Vid rosteldning används gärna partiklar av grövre storlek, flera cm, att jämföra med < 0.1 mm vid kolkpulvereldning. Vid trä- eller torvpulvereldning kan man acceptera storlekar upp till omkring 0.5 mm men inte gärna större än så. Finfördelningen sker därför inte i kvarnar utan i exempelvis flistuggar eller i kolkrossar. För avfallsbränslen används hellre rivare – eftersom dessa bränslen är ännu mera inhomogena än trä eller biobränslen.

Stora partiklar krävs för att man skall kunna ”blåsa på” tillräckligt mycket primärluft genom rosten utan att partiklarna blåser iväg eller rycks med luftströmmen. Därför ställer en effektiv rosteldning krav på att det inte finns alltför mycket finfraktion med i bränslet – till skillnad från brännarförbränningen som ju ställde krav på att det inte förekom alltför mycket grovfraktion.

Det värme som krävs för att partiklarna skall torka och pyrolysera tillförs dels ovanifrån från brinnande gaser och från varma eldstadsväggar, och dels genom att brinnande partiklar från bäddens överyta tumlas ner i bädden vid roströrelserna. På en wanderrost sker ingen sådan omblandning eller tumling, och som vi såg tidigare är också förbränningsintensiteten på wanderrostar vanligtvis lägre än på snedrostar.

Blandningen mellan pyrolysgaser och luft sker mellan partiklarna i bädden, men pyrolysgaserna antänds och brinner till en början ovanför bränslebädden och bara i mindre utsträckning nere i själva bädden. Efter en tid, då bädden fått tillräckligt hög temperatur, kryper gasförbränningen ner i bädden och den fasta bränsleåterstoden antänds och brinner långsamt ut.

Om vi betraktar en träpartikel, 3×2×5 cm, med 40 % fukt och 70 % fukthalt, så väger denna partikel inledningsvis omkring 18 gram. Efter torkning väger den cirka 10 gram och efter en fullständig avgasning väger den bara omkring 3 gram, men den har i huvudsak kvar sin form och sin storlek. Den krymper visserligen något under pyrolysen, men detta spelar mindre roll för resonemanget här. Man kan inse att det inte krävs någon hög lufthastighet för att lyfta en så lätt partikel. Eftersom man inte vill att partiklarna skall blåsa bort från rosten innebär detta att lufthastigheterna genom bränslebädden, speciellt i dess nedre delar, måste hållas mycket låga och eftersom bränslet inte kan brinna snabbare än vad tillgången på syre tillåter, så betyder detta att partiklarna måste hållas kvar på rosten under mycket lång tid. Typiska uppehållstider i rostpannor är en halv, upp till 6 timmar.

I fluidiserade bäddar blandas färskt bränsle med pyrolyserat bränsle, med brinnande charpartiklar och med sand i en mer eller mindre homogen bädd. Typiska proportioner är att bädden innehåller 90-95 % sand och bara 5-10 % bränsle. Vid drifttemperatur (typiskt 800-900 grader) har sanden bland annat funktionen att snabbt värma, torka och pyrolysera det färskta bränslet. Genom den förhållandevis stora sandmängden innebär detta att en fluidiserad bädd kan tåla en plötslig inblandning av ett mycket fuktigt bränsle utan att slockna, medan däremot en pulverflamma eller en rosteldad anläggning skulle löpa en sådan risk.

Nackdelarna med de fluidiserade bäddarna är dels att de har ett begränsat reglerområde och dels att eftersom även den brinnande bränsleåterstoden utsätts för förhållandevis höga lufthastigheter så sker det en ganska stor medryckning av partiklar ur eldstaden. Dessutom är risken för sintring stor om asksammansättningen händelsevis råkar bilda lågsmältande föreningar med sanden.

- Förbränning sker alltid genom kedjan
 - Finfördelning
 - Förångning eller pyrolys
 - Blandning med syre i rätta proportioner
 - Uppvärmning följt av antändning
- Dessa fyra delförlopp måste alltid finnas med och måste vara stabila.
- Finfördelning av flytande bränslen sker normalt sett i en speciell lans i brännaren, endera mekaniskt, genom ett speciellt finfördelningsmedium eller genom inblandning av vatten med efterföljande förångning.
- Finfördelning av fasta bränslen för förbränning i pulverbrännare sker genom malning.
- Pyrolys/förångning, blandning och antändning sker alla i brännarens yttre del, mynningen, vilken måste vara korrekt utformad för detta ändamål.
- Vid eldning i brännare är det kritiskt att bränslets storleksfördelning inte har alltför mycket finfraktion, risk för överhettning och skador, men inte heller har alltför mycket grovfraktion, risk för utsläpp av föroreningar.
- Finfördelning av fasta bränslen för förbränning på rost kan ske genom flisning eller krossning.
- Vid förbränning på rost får bränslet inte innehålla alltför mycket finfraktion eftersom det leder till medryckning och att (en del av) förbränningen sker på "fel plats" i eldstaden.
- Om inte antändningen sker stabilt i anläggningen kommer hela förbränningen att ske instabilt, varvid man inte kan kontrollera dess miljöprestanda på ett tillfredsställande sätt.

Förbränningskemi och värmevärde

Alla data för gaser angivna vid 273.15 K, 101325 Pa.

Elementär förbränningskemi

Eftersom förbränning innebär att den kemiskt bundna solenergin i bränslet skall frigöras, så består förbränningen av en serie av kemiska reaktioner. Genom dessa kemiska reaktioner bildas förbränningsprodukter, i första hand koldioxid och vatten.

Med de kemiska beteckningarna C för kol, H för väte och O för syre kan vi beskriva förbränningen av en förenklad cellulosamolekyl (6 kolatomer, 12 väte och 6 syreatomer) med luft (21 % syrgas O₂ plus 79 % kvävgas N₂ vilket är detsamma som att för varje syremolekyl får vi med oss in i anläggningen $79/21=3.76$ stycken kvävemolekyler) med hjälp av reaktionsformeln

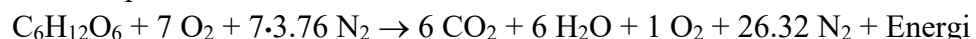
$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 + 6 \cdot 3.76 \text{N}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + 22.56 \text{N}_2 + \text{Energi}$$

Som vi sagt tidigare är energimängden cirka 15.7 MJ/kg i ren, torr cellulosa. Som man ser av den här reaktionsformeln så startar vi med cellulosa, vi tillför 28.56 molekyler luft (6 syremolekyler och ”på köpet” 22.56 kvävemolekyler) och vi får som resultat 6 molekyler koldioxid (CO₂), 6 molekyler vattenånga (H₂O) och dessutom har vi kvar allt kvävet.

Sammanlagt får vi alltså $6+6+22.56 = 34.56$ molekyler gasformiga produkter varav 6 molekyler ($100 \cdot 6/34.56 = 17.4\%$) CO₂, lika mycket vattenånga och resten kvävgas. Detta kallas *stökiometrisk* förbränning: Vi tillför exakt så mycket syre (luft) som krävs för att allt bränsle fullständigt skall förbrukas. Den mängd luft som behövs för fullständig förbränning kan man beräkna ur bränslets kemiska sammansättning.

Förbränning med luftöverskott

I praktiken måste man tillsätta mera luft eftersom blandningen, kontakten mellan bränslet och luften, inte är perfekt i praktiska anläggningar. Då får man reaktionsformler där det blir syre ”över” på formelns högersida, som till exempel denna:

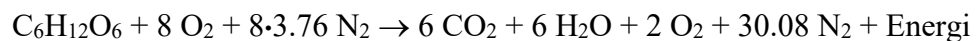


Mängden koldioxid (6 molekyler) är oförändrad. Eftersom det bara ingår sex kolatomer i cellulosamolekylen kan vi inte bilda mer än sex koldioxidmolekyler. På samma sätt har allt vätet som finns i cellulosan gått åt för att bilda sex vattenmolekyler och vi kan inte bilda mer än sex stycken om vi inte får in mera väte på vänstersidan i formeln.

Den här gången har vi alltså tillsatt totalt $7 + 7 \cdot 3.76 = 33.32$ molekyler luft, varav sju syre och 26.32 kväve, och vi har producerat totalt $6+6+1+26.56=39.32$ molekyler gasformiga produkter.

Produkterna, *rökgasen*, består den här gången av $100 \cdot 6 / 39.32 = 15.2\%$ CO₂, lika mycket vattenånga, $100 \cdot 1 / 39.32 = 2.2\%$ O₂ och resten kväve. Vi har alltså fått syre kvar i rökgaserna samtidigt som halten av koldioxid har sjunkit. Orsaken till det här är att vi har tillfört mera luft än vad som är teoretiskt nödvändigt, vi har tillfört ett *luftöverskott*. Det teoretiska behovet var sex syremolekyler för en cellulosamolekyl, men vi har tillfört sju stycken i formeln. Förhållandet mellan den verkliga syremängden (luftmängden), dvs. sju syremolekyler, och det teoretiska luftbehovet, dvs. sex syremolekyler, kallar vi *luftkvot* eller *luftfaktor*. I det här fallet blir luftfaktorn $7/6 = 1.17$ eller 117 %. Detta uttrycker vi i sin tur som att vi har eldat med ett *luftöverskott av 17 %*.

Ju större luftöverskottet är, desto högre blir syrehalten i rökgaserna och ju lägre blir CO₂-halten. Se till exempel på formeln här nedan som visar vad som händer vid luftfaktorn 1.33 (=33 % luftöverskott):



Nu är den totala produktmängden 44.08 gasmolekyler (6+6+2+30.08), CO₂-halten har sjunkit till 13.6 % och syrehalten i rökgasen har stigit till 4.5 %. I alla de tre exemplen vi nu har tittat på förbränns bränslet fullständigt. Det innebär att all den lagrade energin i bränslet frigjorts, dvs. 15.7 MJ/kg ren, torr cellulosa.

Vid luftfaktor 1.0 (*stökiometrisk förbränning*) bildades det 34.56 molekyler rökgas, vid luftfaktor 1.17 39.32 molekyler och vid 33 % luftöverskott bildades det 44.08 molekyler produkter. Räknat på ett kilo ren, torr cellulosa motsvarar detta ungefär 4.30 m³ rökgaser vid stökiometrisk förbränning, 4.90 m³ rökgas vid luftöverskottet 17 % och 5.49 m³ rökgaser/kg cellulosa vid luftfaktorn 1.33. Volymerna anges vid 101325 Pa och 0 °C.

Förbränningstemperatur

Den frigjorda energin hittar vi nu i dessa gasformiga produkter och vi finner alltså att vid luftfaktor 1.0 fördelas energin som $15.7/4.30 = 3.65$ MJ/m³ rökgas, vid luftfaktor 1.17 får vi $15.7/4.90 = 3.20$ MJ/m³ rökgas och vid luftfaktor 1.33 slutligen $15.7/5.49 = 2.86$ MJ/m³ rökgas.

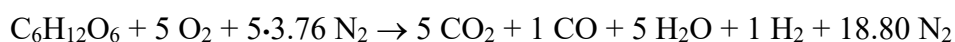
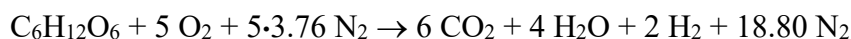
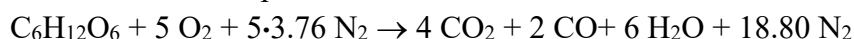
Detta, låg energimängd per m³ gas, är samma sak som att temperaturen är låg och slutsatsen blir att ju högre luftfaktor vi har desto lägre temperatur får vi. All överskottsluft som tillsätts späder helt enkelt ut rökgaserna och späder samtidigt ut bränsleenergin så att vi får allt lägre CO₂-halt samtidigt som temperaturen sjunker. Samtidigt får vi allt mera syre kvar i rökgaserna vilket innebär att syrehalten ökar med ökande luftfaktor.

OBSERVERA: Luft- och gasvolymen anges i m³ vid en bestämd temperatur och ett bestämt tryck – inte i ”normalkubikmeter”. Det finns ingen enhetlig eller internationell definition för vilket tryck eller vilken temperatur som skulle vara ”normalt” tillstånd för en gas. Tabellen visar några olika tillstånd, kombinationer av tryck och temperatur, som svenskar, engelsmän och amerikaner ofta refererar till som ”normala”. Volymen har angivits till 1 vid 0 °C och 101325 Pa eftersom detta är det tillstånd som rekommenderas enligt SI-systemet och värdena i tabellen anger sedan volymen vid de andra normala tillstånden relativt detta. Exempelvis förekommer det att engelska och amerikanska utrustningstillverkare anser 15 psi och 65 °F vara normalt varvid en m³ blir 4.55 % större än vad den är om den anges vid 0°C och 101325 Pa. Försök ta reda på vilket tillstånd som anses vara ”normalt” inom just ditt företag och fundera över varför andra tillstånd skulle vara ”onormala”...

Tryck	101325 Pa	1 bar	1 kp/cm ²	760 torr	1 atm	15 psi
Temp						
0 °C	1.0000	1.0132	1.0332	1.0000	1.0000	0.9797
18 °C	1.0659	1.0800	1.1013	1.0659	1.0659	1.0443
20 °C	1.0732	1.0874	1.1089	1.0732	1.0732	1.0514
22 °C	1.0805	1.0948	1.1164	1.0805	1.0805	1.0586
25 °C	1.0915	1.1060	1.1278	1.0915	1.0915	1.0694
32 °F	1.0000	1.0132	1.0332	1.0000	1.0000	0.9797
65 °F	1.0667	1.0812	1.1026	1.0667	1.0667	1.0455

Förbränning med luftunderskott

Om vi istället eldar med alltför litet luft så kan vi inte bränna bränslet fullständigt. Dessutom gäller i dessa fall att det inte är helt självklart vilka produkter som kommer att bildas. Om du räknar antalet atomer (kol för sig, syre för sig, väte för sig och kväve för sig) i de tre följande formlerna kommer du att se att det finns lika många av varje slag på vänstersidan som på högersidan i alla formlerna. Hur skall vi då kunna veta vilken av dem som är rätt? Observera att den frigjorda energin inte finns med i högerledet, den skall vi behandla separat alldeles strax...



Låt oss börja med att kontrollera att formlerna är formellt korrekta, dvs. att det verkligen finns rätt antal atomer av varje slag på ömse sidor om pilen:

I samtliga vänsterled har vi sex kolatomer i cellulosamolekylen.

Vi har tolv väteatomer i cellulosamolekylen.

Vi har sex syreatomer i cellulosan plus 10 stycken i syrgasen, totalt 16.

Och så har vi 3.76 gånger så mycket kväve som vi har syrgas, dvs. 37.6 kväveatomer.

I den första formeln

$C_6H_{12}O_6 + 5 O_2 + 5 \cdot 3.76 N_2 \rightarrow 4 CO_2 + 2 CO + 6 H_2O + 18.80 N_2$
finns fyra kolatomer i koldioxiden plus två stycken i kolmonoxiden (CO) vilket ger oss totalt sex.

Det är åtta syreatomer i koldioxiden, två i kolmonoxiden och sex stycken i vattenångan, totalt sexton.

Allt väte finns i vattenångan, totalt 12 atomer.

Kvävet hittar vi i 18.80 molekyler, vardera med två atomer, totalt 37.6.

Det stämmer alltså i den första formeln.

Kontrollera de andra två formlerna på samma sätt.

Vad gäller energin så utgår vi från ett kilo cellulosa, dvs. 15.7 MJ.

I den första formeln har vi kvar brännbar koloxid (CO) efter reaktionen och räknat på ett kg cellulosa visar det sig att formeln säger att vi skulle ha kvar inte mindre än 311 gram CO eller 0.25 m³ CO.

Denna mängd CO motsvarar (innehåller) 3.14 MJ energi som vi kan frigöra genom att bränna den vidare till CO₂, men det är ju precis det vi inte har gjort eftersom vi tillsatte alltför litet luft. Alltså har vi inte frigjort alla de 15.7 MJ som cellulosan innehöll utan bara 15.7 – 3.14 = 12.56 MJ om förbränningen sker enligt den första formeln.

Vid förbränning enligt den andra formeln får vi visserligen inte kvar någon brännbara kolmonoxid (CO) i högerledet, men å andra sidan får vi vätgas (H₂) kvar. Vätgasen motsvarar energimängden 2.66 MJ och vi har följaktligen bara frigjort 13.04 MJ om förbränningen sker enligt den andra formeln.

Om den tredje formeln skulle vara den riktiga så får vi kvar *både* CO och H₂ efter förbränningen och dessa två komponenter tillsammans representerar 2.90 MJ vilket innebär att förbränning enligt den tredje formeln på föregående sida skulle frigöra 12.8 MJ per kilo ingående cellulosa.

För att få reda på vilken av formlerna som är rätt, dvs. vilken av dem som beskriver det som verkligen sker, behöver man genomföra komplicerade kemiska beräkningar. Man kan då konstatera att ingen av dessa formler är korrekt men att det faktiskt bildas både CO och vätgas vid understökiometrisk (eller ofullständig) förbränning, dvs. vid förbränning med luftunderskott (eller med luftfaktorn mindre än 1).

Vi kan nu konstatera att i samtliga tre fall så är den totala mängden gasformiga produkter lika, nämligen 30.8 gasmolekyler eller, omräknat, 3.84 m³/kg cellulosa. Om vi utgår från att den sista formeln är mest rätt så skulle vi alltså frigöra 12.8 MJ samtidigt som vi bildar 3.84 m³ rökgaser och det ger oss energitätheten 12.8/3.84 = 3.34 MJ/m³ rökgas. Återigen – precis som när vi räknade vid luftöverskott – är värdet lägre än vad det är vid stökiometriska förhållanden och vi kan konstatera att luftunderskott vid förbränningen, precis som luftöverskott, leder till en sänkt temperatur.

Några definitioner...

Vad vi nu har sett är alltså att fullständig förbränning av kemiskt ren, torr cellulosa ($C_6H_{12}O_6$) kräver exakt $6+22,56=28,56$ molekyler luft vilket kan räknas om till *det teoretiska luftbehovet* $3,56 \text{ m}^3$ luft/kg cellulosa. Det teoretiska luftbehovet betecknas $V_{lu,min}$.

Vid stökiometrisk förbränning får vi en viss bestämd rökgasmängd som vi kallar *den minsta rökgasvolymen*. Minsta rökgasvolymen betecknas $V_{g,min}$.

Den minsta tänkbara rökgasvolymen består av den koldioxid som bildas vid förbränningen av bränslet plus den vattenånga som bildas vid förbränningen av bränslet plus det kväve som finns med i förbränningsluften. I många fall är det praktiskt att istället använda sig av den *minsta torra rökgasvolymen* – varvid man alltså räknar bort vattenångan. Den betecknas $V_{gt,min}$.

Allmänt sett gäller att rökgasvolymen är större än den tillförda luftvolymen. Luftfaktorn betecknas numera med lambda (λ) men i något äldre litteratur kan man fortfarande se beteckningen n .

Förbränning med fuktiga bränslen

Låt oss nu också titta på ett fall då vi bränner ett fuktigt bränsle. Vi antar att vi har kemiskt ren cellulosa med totalt 20 % fukthalt. Kemiskt sett innebär detta att för varje cellulosa-molekyl ($C_6H_{12}O_6$) har vi dessutom i bränslet precis 2,5 molekyler vatten (H_2O). Vi ställer upp formeln för stökiometrisk förbränning (bortsett från energitermen):



Inom klammern redovisas bränslet, som ju i det här fallet består av 1 cellulosa-molekyl plus 2,5 vattenmolekyler och vilket alltså motsvarar fukthalten 20 %. Vi ser att det som händer är att rökgasmängden ökar med precis lika mycket som det vatten vi tillsatt med bränslet. I det här fallet får vi alltså en rökgasmängd som består av 6 molekyler CO_2 , 8,5 molekyler vattenånga och 22,56 molekyler kvävgas.

Men hur mycket energi frigör vi?

Fuktiga bränslens värmevärde och rökgasvolym

Låt oss räkna på ett kg *bränsle*. Men ett kg bränsle består ju av 80 % cellulosa (=800 gram) plus 20 % vatten (=200 g). Alltså kan energimängden inte vara större än som allra mest $0,8 \cdot 15,7 = 12,56$ MJ, eller hur?

Dessutom går det åt en del energi för att värma och koka vattnet. Om vi antar att bränslet normalt sett lagras utomhus så kan vi utgå från att dess temperatur från början, när det kommer fram till pannan, är cirka $0^\circ C$. Och det gäller förstås inte bara cellulosan utan även fukten i bränslet. För att värma upp 1 kg vatten från $0^\circ C$ till $100^\circ C$ krävs det inte mindre än cirka 0,42 MJ. Sedan skall vattnet förångas.

För att förånga ett kg vatten vid 100 °C krävs det en energimängd av ungefär 2.26 MJ. Det betyder alltså att om vi får in ett kilo vatten i pannan så går det åt 2.68 MJ för att värma och koka detta vatten. Enligt standard använder man 2.443 istället, 2.68 är det högsta tänkbara...

I det här fallet hade vi bara 0.2 kg vatten vilket alltså betyder att det går åt $0.2 \cdot 2.443 = 0.490$ MJ för att förånga vattnet. All den här energin tas från den kemiskt bundna energin i cellulosan, vi hade ju 800 gram cellulosa med också.

Så från 1 kg bränsle som består av 800 gram cellulosa plus 200 gram vatten kan vi som allra mest få ut energin $0.8 \cdot 15.7 - 0.2 \cdot 2.443 = 12.56 - 0.490 = 12.070$ MJ. Med andra ord är värmevärdet för fuktig cellulosa vid 20 % fukthalt 12.07 MJ/kg.

Den minsta rökgasvolymen, $V_{g,min}$, blir 3.69 m³/kg fuktigt bränsle. Tidigare fick vi 4.30 m³ rökgaser/kg ren, torr cellulosa vid stökiometrisk förbränning.

Låt oss så titta på rökgasvolymen per frigjord energimängd:

Då vi brände ett kg ren, torr cellulosa fick vi 15.7 MJ och 4.3 m³ rökgaser, dvs. vi fick rökgasvolymen $4.3/15.7 = 0.274$ m³ rökgaser/MJ energi.

Då vi istället brände cellulosa med 20 % fukthalt fick vi 12.07 MJ och vi fick 3.69 m³ rökgaser, dvs. $3.69/12.07 = 0.307$ m³ rökgaser/MJ energi.

Vid 20 % fukthalt i cellulosan får vi alltså 12 % mera rökgaser per mängd frigjord energi än vad vi får om cellulosan skulle vara helt torr!

Några definitioner...

Värmevärde:

Rökgaserna från förbränning innehåller i huvudsak kväve från förbränningsluften, koldioxid och vattenånga. Värmevärdet bestäms genom att en noggrant invägd mängd bränsle förbränns fullständigt och rökgaserna kyls till samma temperatur som bränslet hade före förbränningen. Rökgasernas energiinnehåll mäts och normeras till ett energiinnehåll per kg bränsle.

Kalorimetriskt eller övre värmevärde:

Då rökgaserna kyls till en låg temperatur kondenserar vattenångan till flytande vatten varvid ångbildningsvärmets frigörs. Vid en kalorimetrisk mätning kommer även detta förångningsvärme att ingå i det uppmätta värdet, och det uppmätta, okorrigerade mätvärdet benämns det kalorimetriska eller det övre värmevärdet.

Effektivt eller nedre värmevärde:

I verkliga förbränningsanläggningar kommer vattenångan att lämna anläggningen i ångform. Genom att subtrahera förångningsvärmets värme från rökgasernas vatteninnehåll från det uppmätta kalorimetriska värmevärdet fås ett korrigerat, lägre, värmevärde som bättre speglar vad man faktiskt kan tillgodogöra sig i verkliga anläggningar. Detta korrigerade värde kallas det effektiva eller det nedre värmevärdet.

För att sammanfatta förbränningskemin i enkla formler:

Förbränning sker genom att bränslets kol, C, och väte, H, oxideras med syre, O, endera i form av bundet syre i bränslet eller med luftens syrgas, O₂, till koldioxid, CO₂ och vattenånga, H₂O. Dessutom passerar genom eldstaden en stor mängd kvävgas, N₂, eftersom luften består av 21 % syrgas och 79 % kvävgas. För varje syremolekyl i luften får vi alltså 3.76 kvävemolekyler.

- Kol, väte och syre ingår i bestämda förhållanden i bränslet – förhållanden som oftast anges som vikt-%. För beräkningar är det dock enklare att använda sig av antalet atomer eller mol av de olika ämnena. Om en kemisk analys av bränslets torrsubstans har visat på f_C vikt-% kol, f_H vikt-% väte och f_O vikt-% syre, så kan dessa värden räknas om till enheten mol/kg genom formlerna:

$$n_C = \frac{10 \cdot f_C}{12} \quad \left(\text{Exempel: } f_C = 40, n_C = \frac{10 \cdot f_C}{12} = \frac{400}{12} = 33,33 \right)$$

$$n_H = 10 \cdot f_H \quad (\text{Exempel: } f_H = 6, n_H = 10 \cdot f_H = 60)$$

$$n_O = \frac{10 \cdot f_O}{16} \quad \left(\text{Exempel: } f_O = 50, n_O = \frac{10 \cdot f_O}{16} = \frac{500}{16} = 31,25 \right)$$

Värdena n_C , n_H och n_O kan sedan användas för att beteckna bränslet på ett annorlunda vis, nämligen som C _{n_C} H _{n_H} O _{n_O} . Ibland kan man finna en minsta gemensamma nämnare för de tre värdena, exempelvis om $n_C = 6$, $n_H = 12$ och $n_O = 6$. I det här fallet kan man skriva C₆H₁₂O₆ – som vi har gjort ovan – eller man kan skriva C₁H₂O₁, efter att ha dividerat alla siffrorna med 6. I detta, senare, fall brukar man utelämnat ettorna och bara skriva CH₂O.

- För ett torrt bränsle som består av K stycken kolatomer, L stycken väteatomer och M stycken syreatomer (beteckning C _{K} H _{L} O _{M} i enlighet med punkten ovan) gäller att det teoretiska luftbehovet är (vid 101325 Pa och 0 °C)

$$V_{lu,min,TS} = \frac{K + \frac{L}{4} - \frac{M}{2}}{12 \cdot K + L + 16 \cdot M} \cdot 107.76 \quad \text{m}^3/\text{kg torrsubstans}$$

Med siffror för cellulosa, $K=6$, $L=12$ och $M=6$, får vi till exempel:

$$V_{lu,min,TS} = \frac{6 + \frac{12}{4} - \frac{6}{2}}{12 \cdot 6 + 12 + 16 \cdot 6} \cdot 107.76 = \frac{6 + 3 - 3}{72 + 12 + 96} \cdot 107.76 = \frac{6}{180} \cdot 107.76 = 3.59$$

Prova nu att sätta in siffrorna $K=1$, $L=2$ och $M=1$. Vi får

$$V_{lu,min,TS} = \frac{1 + \frac{2}{4} - \frac{1}{2}}{12 \cdot 1 + 2 + 16 \cdot 1} \cdot 107.76 = \frac{1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}}{12 + 2 + 16} \cdot 107.76 = \frac{1}{30} \cdot 107.76 = 3.59$$

Vi får alltså samma resultat vilket tyder på att beteckningarna C₆H₁₂O₆ och CH₂O är likvärdiga – precis så som sagts ovan.

- För ett torrt bränsle som består av K stycken kolatomer, L stycken väteatomer och M stycken syreatomer gäller att den minsta rökgasmängden är (vid 101325 Pa och 0 °C)

$$V_{g,min,TS} = 0,2155 \cdot \frac{500 \cdot K + 151 \cdot L - 198 \cdot M}{12 \cdot K + L + 16 \cdot M} \text{ m}^3/\text{kg torrsubstans}$$

Med siffror för cellulosa, $K=6$, $L=12$ och $M=6$, får vi till exempel:

$$\begin{aligned} V_{g,min,TS} &= 0,2155 \cdot \frac{500 \cdot K + 151 \cdot L - 198 \cdot M}{12 \cdot K + L + 16 \cdot M} = 0,2155 \cdot \frac{500 \cdot 6 + 151 \cdot 12 - 198 \cdot 6}{12 \cdot 6 + 12 + 16 \cdot 6} = \\ &= 0,2155 \cdot \frac{3000 + 1812 - 1188}{12 \cdot 6 + 12 + 16 \cdot 6} = 0,2155 \cdot \frac{3624}{180} = 4.34 \end{aligned}$$

- För fuktiga bränslen gäller följande:
Om torrsubstansen har det effektiva värmevärdet ΔH_{TS} MJ/kg och fukthalten är $f\%$ så är det fuktiga bränslets effektiva värmevärde ungefär

$$\Delta H \approx \frac{100-f}{100} \cdot \Delta H_{TS} - \frac{f}{100} \cdot 2.443 \text{ MJ/kg (då } f=0 \text{ fås } \Delta H_{TS})$$

Genomsnittliga värmevärden för vanliga skandinaviska skogsbränslen är cirka 19.5-19.8 MJ/kg för barrved, 18.5-18.8 för lövved, 19.2 för blandad grot.

Om torrsubstansens luftbehov enligt formeln ovan är $V_{lu,min,TS}$ m³/kg torrsubstans blir det fuktiga bränslets, fukthalt $f\%$, luftbehov

$$V_{lu,min} = \frac{100-f}{100} \cdot V_{lu,min,TS} \text{ m}^3/\text{kg (då } f=0 \text{ fås } V_{lu,min,TS})$$

Om torrsubstansens minsta rökgasvolym enligt formeln ovan är $V_{g,min,TS}$ m³/kg torrsubstans, blir det fuktiga bränslets, fukthalt $f\%$, minsta rökgasvolym

$$V_{g,min} = \frac{100-f}{100} \cdot V_{g,min,TS} + 1.245 \cdot \frac{f}{100} \text{ m}^3/\text{kg (då } f=0 \text{ fås } V_{g,min,TS})$$

- Vid förbränning med luftöverskott, då $\lambda \geq 1$, gäller följande

Tillförd luftmängd till bränslet, V_{lu} , är

$$V_{lu} = \lambda \cdot V_{lu,min} \text{ m}^3/\text{kg bränsle}$$

Rökgasmängden V_g är

$$V_g = V_{g,min} + (\lambda - 1) \cdot V_{lu,min} \text{ m}^3/\text{kg bränsle}$$

Förbränningens aerodynamik

För att undvika föroreningar krävs att förbränningen i varje ögonblick är den bästa. För att förstå varför vissa fenomen uppträder behöver man förstå några grundläggande egenskaper hos förbränningen.

Som sagts tidigare kräver förbränning

- Ett bränsle
- Luft
- Tillräckligt hög temperatur för att tända

Om någon av dessa tre parametrar fattas så blir det ingen förbränning.

Låt oss nu se hur vi kan tillämpa detta i en turbulent gas.

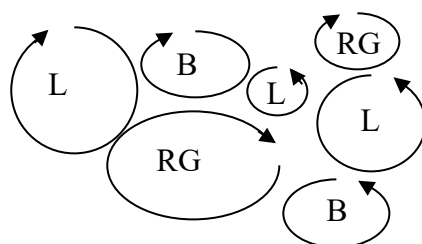
Eddy Dissipation Concept (Virvelupplösningsmodellen), EDC

Vid det sextonde internationella förbränningssymposiet presenterade de två norska vetenskapsmännen Magnussen och Hjertager en teoretisk modell för hur förbränningsreaktionerna skulle ske baserat på att förbränning kräver

- Ett bränsle
- Luft
- Tillräckligt hög temperatur för att tända

En av de stora fördelarna med deras modell, som kallas EDC, är att den är lätt att förstå. En annan fördel är att den har visat sig mycket användbar för att förklara många fenomen som uppträder i verkligheten. Det finns alltså goda skäl att tro att den här modellen är tämligen verklighetsnära.

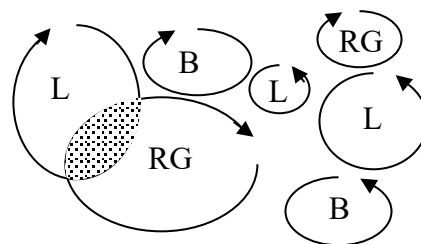
Enligt Magnussen/Hjertager är den storskaliga (turbulenta) blandningen i en eldstad i högsta grad ofullständig. I gasen finner man i varje ögonblick ett stort antal turbulensvirvlar av olika storlek och med olika hastighet och med olika sammansättning. Virvlarna kan endera innehålla (i huvudsak) **B**ränsle eller **L**uft eller (heta)**R**ök**G**aser. De är olika stora och antalet virvlar med bränsle och luft avtar successivt när man passerar genom eldstaden.

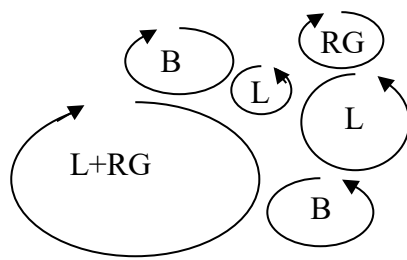


De här virvlarna rör sig i förhållande till varandra samtidigt som de roterar och de kan alltså kollidera med varandra och blandas med varandra på ett i huvudsak slumpmässigt sätt.

I nästa figur har till exempel en luftvirvel och en rökgasvirvel kolliderat.

Inom det skuggade området startar en blandning mellan syrerik luft och (het) rökgas vilket ger upphov till en blandning som både har hög syrehalt och hög temperatur. Det blandade området kommer snabbt att omfatta de kombinerade virvlarna som dessutom (möjligen) kommer att bilda en helt ny, kombinerad virvel.

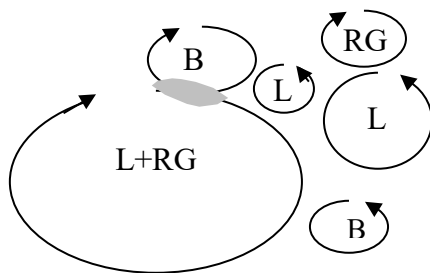
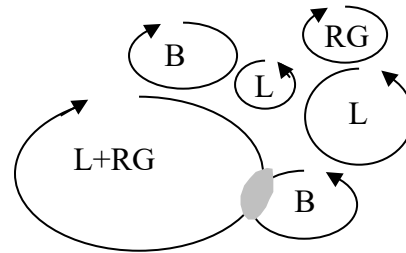




I den här figuren har luftvirveln och rök-gasvirveln flutit samman och bildat en enda virvel som nu innehåller en syrerik gas vid hög temperatur.

Den här virveln råkar nu händelsevis närma sig en virvel som innehåller bränslegas. (se nedan)

När detta sker så uppstår det mellan bränslegasvirveln och den stora virvel som innehåller den varma, syrerika gasen en zon där alla tre betingelserna för förbränning är uppfyllda. Där finns syre, hög temperatur och bränsle. Här uppstår då en liten flamma, ett flamsegment.



Efter en kort stund kan de här två virvlarna glida isär igen, varvid flammen slocknar samtidigt som luft-och-rök-gasvirveln blivit större och bränslevirveln blivit mindre. Men nu kan luft-och-rök-gasvirveln kanske stöta på en annan bränslevirvel varvid en ny flamma uppstår...

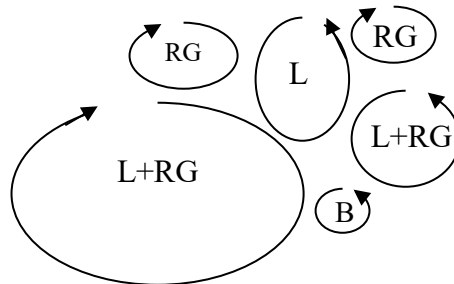
Genom slumpvis och successiv turbulent blandning på det här viset föreställde sig Magnussen och Hjertager att förbränningen fortgick ända tills andelarna av syrerika eller bränslerika virvlar var så låg att reaktionerna i praktiken upphörde.

1. För det första kan vi nu konstatera att det inte spelar någon roll i vilken ordning blandningen sker mellan de tre komponenterna. I exemplet ovan började vi med att blanda Luft och Rök-gaser och lät sedan den blandningen komma i kontakt med Bränsle. Låt oss kalla det $(L+RG)+B$. Men vi hade fått precis samma resultat om vi först hade blandat Luft och Bränsle och därefter fört den blandningen i kontakt med heta rök-gaser: $(B+L)+RG$ eller om vi hade blandat Bränsle och Rök-gaser och sist blandat in luften: $(B+RG)+L$.
2. För det andra kan vi konstatera att förbränningen i en turbulent gas sker lokalt i små, tunna, flamsegment. De här segmenten är typiskt någon millimeter tjocka (eller ett par) och kanske någon centimeter långa. Som cornflakes, ungefär.
3. För det tredje kan vi konstatera att den volym som flamsegmenten upp-tar, i förhållande till hela eldstadens volym, blir förfärligt liten. Faktum är att själva flamzonerna i en eldstad bara fyller kanske 5-10 % av hela volymen medan väl över 90 % av volymen är fylld med en blandning av luftvirvlar och rök-gasvirvlar och bränslevirvlar. De här virvlarna rör sig hela tiden.

Det här betraktelsesättet förklarar två saker:

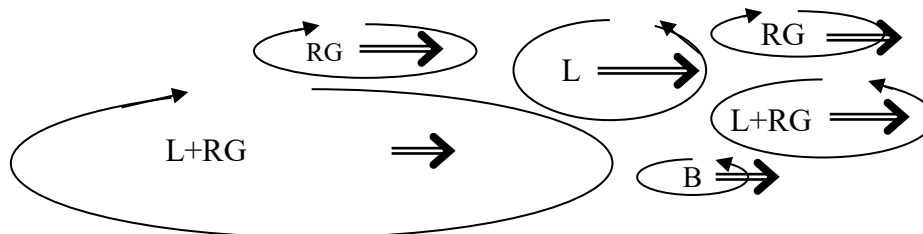
- Direkt- NO_x (kommer i nästa avsnitt) bildas då luftens kväve kommer in i en flamma med tillräckligt hög temperatur. Men eftersom flamzonerna är en så väldigt liten andel av hela eldstaden så är det inte så konstigt att direkt- NO_x är tämligen sällsynt.
- Om man stoppar in ett mätinstrument i eldstaden och fixerar det i en enda punkt, till exempel ett termoelement, så kommer det inte att visa ett konstant värde. Istället kommer mätvärdet att fluktuera kraftigt. Det är naturligt med tanke på att det, i den punkten vi mäter, kanske ena sekunden är en brinnande flamma och nästa sekund är en turbulensvirvel som innehåller nästan bara kall luft. På samma sätt varierar den lokala gassammansättningen inom vida gränser.

Då vi närmar oss utloppet ur eldstaden har förhoppningsvis andelen bränsle och andelen luft minskat.



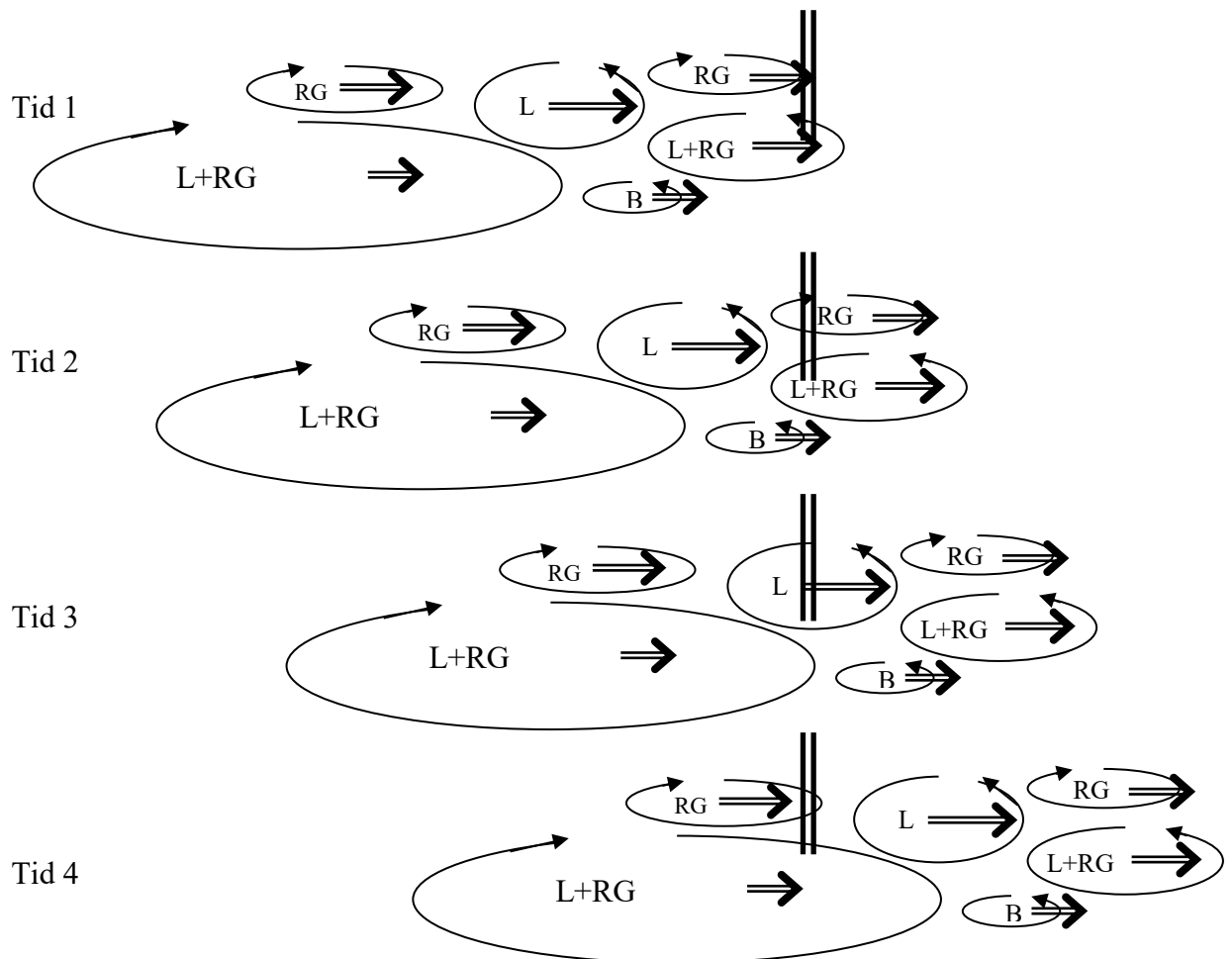
Ett visst luftöverskott måste vi alltid ha, men andelen oförbränt bränsle, till exempel mätt som CO eller som H_2 eller som kolväten skall vara mycket låg.

Då vi passerar ut från eldstaden kommer normalt sett gasens hastighet att öka. Det här leder automatiskt till att virvlarna blir mera långsträckta.



Alla virvlarna i den här bilden rör sig i genomsnitt åt höger med ungefär samma hastighet, men eftersom strömningen är turbulent så måste vi utgå från att hastigheterna inte är alldeles lika.

En bit nedströms i rökgaskanalen har vi så en provtagningspunkt där vi suger ut gas. Figuren på nästa sida visar hur det kan se ut när den här gasen passerar provtagningssondens munstycke vid några olika tider.



Figuren visar från vilken virvel provgasen sugts ut i olika ögonblick, då rök-gasen från föregående sida passerar förbi gasprovtagningssonden.

Vid den första tidpunkten, överst, sugs gas ut från en virvel som innehåller en bestämd men slumpmässig blandning av luft och rökgaser. Den här gasen kommer alltså att innehålla förbränningsprodukter, CO_2 , H_2O och NO tillsammans med syre (O_2) från luften.

Näst överst har gasen flyttat sig så att provtagningen visserligen sker i samma virvel, men i dess bakre ände.

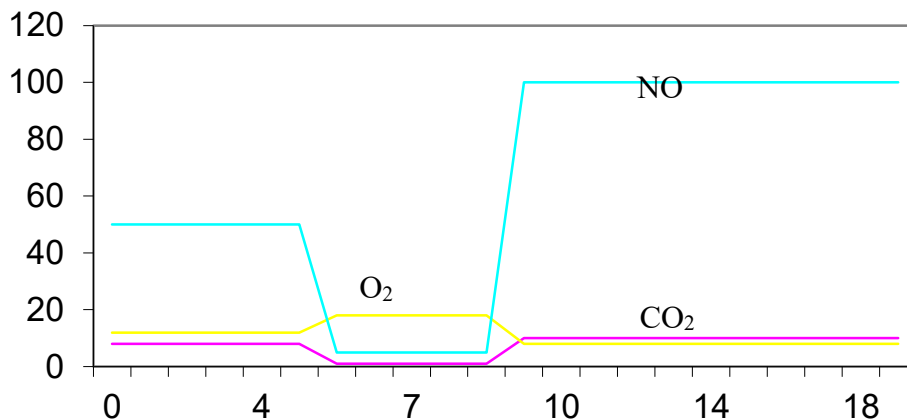
På den tredje bilden uppifrån har en luftvirvel kommit fram till provtagningen och i denna förväntar vi oss mycket låga halter av förbränningsprodukterna CO_2 och H_2O medan däremot syrehalten bör vara mycket hög.

I den nedersta bilden har gasen flyttat sig vidare och provtagningssonden suger nu ut gas från en virvel med en ny luft-och-rökgasblandning. Det är mycket osannolikt att sammansättningen i denna virvel skulle vara precis densamma som den i den första luft-och-rökgasvirveln.

Låt oss nu anta att den första luft-och-rökgasvirveln innehöll t ex 8 % CO_2 , 12 % O_2 och 50 ppm NO och att dess längd och hastighet motsvarar att just denna virvel befann sig framför sonden i fem sekunder.

På samma sätt antar vi att ”luft”virveln innehåller 18 % O₂, 1 % CO₂, 5 ppm NO och varar i fyra sekunder.

I den stora luft-och-rökgasvirveln antar vi sammansättningen vara 10 % CO₂, 8 % O₂ och 100 ppm NO. Den här virveln har en varaktighet motsvarande tio sekunder.



I verkligheten blir det förstås inte så här renodlat och dessutom kommer gasanalyssystemet att ”smeta ut” analyserna över tiden genom att blanda om gaserna i sina filter, kylare och pumpar, men principen framgår:

- Genom att betrakta förbränningen och den turbulenta omblandningen med hjälp av EDC kan vi enkelt förstå varför både gasanalyser och temperaturer kommer att fluktuera när vi mäter dem i eldstaden eller i rök-gaskanalen. Man kan också förstå varför bildning av NO_x via direkt-NO_x-mekanismen är förhållandevis ovanligt liksom man kan förstå hur det kommer sig att fullständig utbränning tar så pass lång tid (ett par sekunder) trots att de kemiska reaktionerna i sig är mycket snabba vid normala förbränningstemperaturer: Det är blandningen som tar tid.

Turbulens

Turbulent strömning kännetecknas av att den innehåller ett mått av slump ”ovanpå” en genomsnittlig och välordnad rörelse.

I genomsnitt strömmar gaserna i en eldstad från inloppet(-en) till utloppet på ett ganska tydligt och välordnat sätt och med en väl definierad medelhastighet. Men inget enskilt ”gaspaket” rör sig så som genomsnittet förutsäger utan varje enskilt gaspaket rör sig på sitt eget sätt. Det förekommer också virvlar och recirkulationszoner i eldstaden.

Turbulenta virvlar förekommer i alla storlekar från något mindre än eldstadens tvärmått och ner till enstaka mm eller delar av millimeter. Den blandning som beskrevs i det förra avsnittet enligt EDC-modellen äger i första hand rum i den små- och mellanskaliga turbulensen med typiska virveldiametrar från de minsta och upp till några decimeter eller någon meter i diameter. I en stor eldstad, med tvärmått kanske 10-15-20 meter, finns det också storskalig turbulens med typiska virveldiametrar på flera meter eller kanske upp till eldstadens hela tvärmått.

Förbränningstekniskt sett har dessa stora virvlar till främsta uppgift att flytta luft, bränsle och värme (heta rökgaser) över långa sträckor, exempelvis att flytta brännbara gaskomponenter från gashalsens centrala delar till en punkt där sekundärluft finns tillgänglig. Däremot sker den huvudsakliga blandningen och själva förbränningsreaktionerna i liten skala och ner till mikroskala i de mindre turbulensvirvlarna.

Stora turbulensvirvlar kan ha mycket lång livslängd – åtskilliga sekunder. De små virvlarna, däremot, har kort livslängd och de allra minsta virvlarna kan bara överleva att snurra ett enda varv.

Så fort någonting rör sig så innebär det att detta något har ett visst mått av *rörelseenergi*. Samtidigt förloras hela tiden rörelseenergi i form av friktion. Om en luftvirvel bildas och inte tillförs ny rörelseenergi så kommer den efter en stund att stanna av på grund av dessa friktionsförluster. Hur lång tid detta tar beror på hur mycket rörelseenergi som fanns i virveln från början. En stor virvel, med en stor mängd gas (stor massa av gas) i kommer att innehålla mera rörelseenergi än en liten virvel med samma hastighet. En virvel med hög hastighet kommer att innehålla mera rörelseenergi än en lika stor virvel med lägre hastighet. Detta är alltså förklaringen till att stora virvlar generellt sett kan ha längre livslängd än små virvlar.

I en eldstad, där ju temperaturen är hög, har dessutom gaserna en hög viskositet, dvs. de är sega och ”trögflytande”. Gaser har nämligen egenheten – till skillnad från de flesta vätskor – att bli mera trögflytande vid hög temperatur än vid låg temperatur. Detta bidrar till att förkorta virvlarnas livslängd eftersom det betyder att friktionsförlusterna blir stora.

Huvuddelen av den rörelseenergi som krävs för blandningen i eldstaden tillförs genom luftfläktarna. Normalt sett är det också luftinloppen som definierar de högsta hastigheterna i eldstaden. Om man t ex har sekundärluftinlopp med inloppshastigheten 20 m/s i en rosteldad panna är det ju mycket svårt att tänka sig att gasen någon annan stans i pannan skulle ha hastigheten 50 m/s, eller hur?

Rent allmänt gäller att rörelseenergin hos en kropp (till exempel hos en m^3 gas som är ute och flyger) är proportionell mot dess massa multiplicerad med dess hastighet i kvadrat. Det betyder att om vi fördubblar massan så fördubblar vi rörelseenergin, men om vi fördubblar hastigheten så fyrdubblar vi rörelseenergin.

Då kan man fråga sig om en hög hastighet i inloppen alltid är till fördel för blandningen. Svaret är nej, förvånande nog. Prova att ta ett vanligt pistolhandtag till ett tryckluftssystem i handen och öppna munstycket fullt. Prova nu att känna med den andra handen var någonstans tryckluftstrålen är. Du kommer att märka att strålen har en väldefinierad ”kant” som sträcker sig ganska långt framåt från munstycket.

Det ovanstående innebär alltså att tryckluftstrålen inte blandar sig speciellt väl med den omgivande luften, utan att den behåller sin identitet under en förhållandevis lång sträcka. Om du släpper ut samma luftflöde genom en större öppning, dvs. med lägre hastighet, så kommer den att förlora sin identitet, dvs. blandas med den omgivande luften, mycket snabbare.

Den sträcka under vilken en stråle, till exempel av sekundärluft, blandas med den omgivande gasen, till exempel de brännbara gaserna i en eldstad, är vid samma hastighet direkt proportionell mot inloppets diameter. Om vi till exempel släpper in sekundärluft med hastigheten 10 m/s genom munstycket med 3 cm diameter, och vi säger att blandningen kräver tjugo diameter, så har blandningen skett 60 cm bort från munstycket. Om vi istället använder munstycket med 10 cm diameter så har blandningen skett först efter två meter. (Om vi vill ha samma totala flöde av luft måste vi minska antalet munstycken till $1/11$ i det här exemplet.)

Antag nu att vår panna är fyra meter tvärs över. Då har vi ju målet att få in sekundärluften till mitten av pannan, eller hur? Vi *vill* alltså att sekundärluften skall blandas in under en sträcka av två meter – inte att den skall stanna bara 60 cm från väggen. Om vi vill hålla fast vid våra gamla munstycken med diametern 3 cm måste vi öka lufthastigheten till närmare 100 m/s och detta kostar en hel del i form av högtrycksfläktar och buller och el till fläktarna. Det är alltså inte självklart att höga hastigheter leder till den bästa omblandningen. Istället måste hastigheter och inloppsdiametrar väljas så att man i varje enskild anläggning får de bästa förhållandena.

Det här påverkas också av lasten. Om gashastigheten i pannan är hög så kommer sekundärluftstrålar från väggmonterade dysor att böjas av kraftigare än om gashastigheten är låg. Och eftersom gashastigheten är beroende dels av pannbelastningen men också av hur primärzonen drivs och av bränslets fukthalt och en del annat så kan man förstå att det inte är självklart vad som i varje läge är det bästa.

För att åstadkomma en effektiv förbränning krävs dels att man har tillräckligt mycket av storskalig turbulens för att kunna flytta gaser över stora avstånd tvärs över eldstaden samtidigt som man har tillräckligt intensiv småskalig turbulens för att åstadkomma en effektiv omblandning i mikroskalan enligt EDC och dessutom att man har tillräckligt lång uppehållstid för att blandningen och de kemiska reaktionerna verkligen skall hinna ske.

Upphållstid (och turbulens)

Som framgått av det ovanstående är blandningen oftast det tidsbestämmande (=långsammaste) steget vid förbränningen.

För det mesta nöjer man sig med att tala om medeluppehållstider. Gasens medeluppehållstid i en eldstad är $\text{Eldstadens volym i m}^3 / \text{Gasflödet i m}^3/\text{s}$.

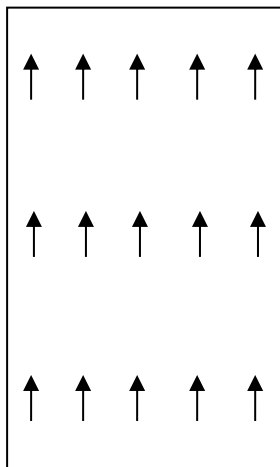
Exempel: Antag att vi har en eldstad med volymen 4000 m^3 ($12 \times 12 \times 28 \text{ m}^3$) och vi eldar träpulver (fukthalt 10 %) i denna eldstad med en total effekt av 600 MW. Vilken är medeluppehållstiden vid $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ eldstadstemperatur? Använd formlerna på sidorna 22 - 23 för att beräkna $V_{g,min,TS}$, $V_{lu,min,TS}$, $V_{g,min}$, $V_{lu,min}$ samt V_g och ΔH med $K=1$, $L=2$, $M=1$, $\lambda=1,2$ och $\Delta H_{TS}=19.2$.

Vi får $V_g = 4.68 \text{ m}^3/\text{kg}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ och 101325 Pa) och $\Delta H = 17.03 \text{ MJ/kg}$. För att få den verkliga rökgasvolymen vid tusen grader behöver vi multiplicera med termen $(\text{Eldstadstemperatur}+273)/273$, i det här fallet $1273/273 = 4.66$ och får följaktligen rökgasvolymen i eldstaden till $21.82 \text{ m}^3/\text{kg}$ bränsle ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 101325 Pa).

Eftersom vi vet att effekten är 600 MW så vet vi att man tillför bränsleenergi motsvarande 600 MJ/s ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$) och vi vet bränslets värmevärde, 17.03 MJ/kg . Alltså får vi bränsleflödet $600/17.03 = 35.2 \text{ kg/s}$ och det totala gasflödet genom eldstaden följaktligen $35.2 \cdot 21.82 = 769 \text{ m}^3/\text{s}$.

Slutligen får vi medeluppehållstiden $4000/769 = 5.2$ sekunder. Om vi så säger att eldstadstemperaturen är 1200 grader istället för 1000 så minskar uppehållstiden till 4.5 sekunder.

Om eldstadstemperaturen istället är 1400 grader fås 4.0 sekunder.



Nu säger dessa värden egentligen ingenting om den verkliga situationen.

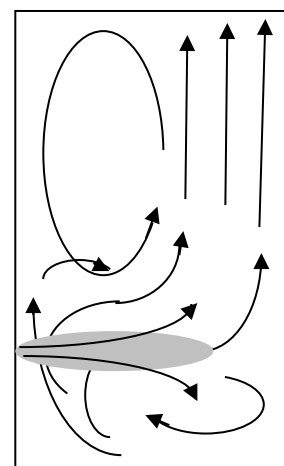
Låt oss för enkelhets skull säga att eldstaden bara är en rak låda.

Om nu all gasen strömmade rakt upp i eldstaden såsom visas i bilden här bredvid, så skulle medeluppehållstiden säga oss att all gas uppehöll sig i pannan under 5.2 (eller 4.5 eller 4.0) sekunder, beroende på eldstadens temperatur. Ingen gas skulle lämna pannan på kortare tid och ingen gas skulle vara kvar under längre tid.

Men såhär ser det ju inte ut i verkligheten.

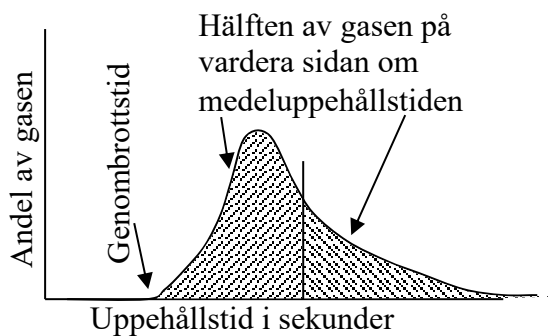
En mera realistisk bild visas här, med en symbolisk flamma (skuggad) inlagd.

Av bilden framgår att gasen kan ta olika vägar genom eldstaden och att dessa olika vägar kan ge helt olika uppehållstider.



Ett gaspaket som lämnar flammen och sedan följer bakväggen upp till rök-gasavdraget kommer att ha den kortaste tänkbara uppehållstiden medan däremot ett gaspaket som efter flammen går nedåt och kanske fångas in i recirkulationen under flammen för att sedan kanske fångas in även i den stora recirkulationsvirveln ovanför flammen kommer att få en mycket lång uppehållstid.

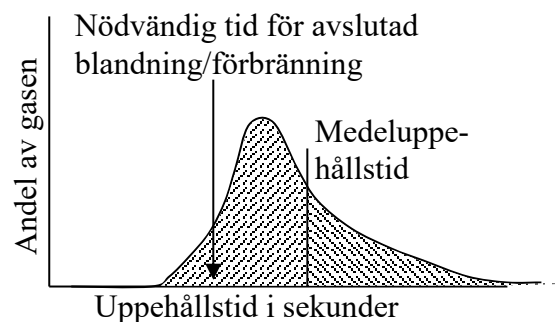
Eftersom målet med aerodynamiken och strömningen i panna är att blanda om gaserna så att mikroblandningen kan ske som beskrivits tidigare (avsnittet om EDC) så vet vi alldeles säkert att vi absolut inte har en sådan strömning som den första bilden visade. I den bilden hade vi ju ingen blandning alls. Så förbränningen i en panna där strömningen såg ut på det viset skulle vara fruktansvärt ineffektiv. I den strömning som illustreras i den andra bilden har vi däremot en omblandning – men å andra sidan kan vi inte enkelt räkna ut en realistisk uppehållstid.



Verkliga situationer påminner mera om diagrammet här till vänster. En del av gasen befinner sig i eldstaden under kort tid och bryter igenom, dvs. visar sig i rökgasavdraget, inom en kort tid. Denna kortaste tid kallas *genombrottstiden*. En del av gasen fångas däremot in i recirkulationsvirvlar och uppehål-

ler sig i eldstaden under mycket lång tid. Medeluppehållstiden är den tid som delar uppehållstidsfördelningen i två lika delar så att hälften av gasen stannar i eldstaden kortare och hälften längre tid än medelvärdet.

Om vi nu antar att blandningen är den process som bestämmer hur fort förbränningen sker och om vi antar att blandningen visserligen hinner ske på en kortare tid än medeluppehållstiden men att den kräver längre tid än genombrottstiden, då finner vi att en del av gasen i eldstaden inte har haft en chans att brinna färdigt. Den gasen åker ut ur eldstaden innan den har blandats ordentligt och följaktligen innan den har bränts.



Då man ökar pådraget i en ugn eller en panna eller rent allmänt i en eldstad ökar man samtidigt gasgenomflödet, vilket innebär att man minskar medeluppehållstiden. Men ofta påverkar man även strömningens bild. Då man ökar hastigheterna på de ingående gasflödena så kan det uppstå nya recirkulationszoner etcetera som gör att genombrottstiden minskar mera än vad medeluppehållstiden gör.

Om man fördubblar gasflödet genom den panna vi räknade på i exemplet så sjunker ju medeluppehållstiden från 5.2 till 2.6 sekunder – ifall temperaturen fortfarande är 1000 °C vid dubbla lasten. Men det är troligt att temperaturen stiger, så låt oss säga att vid 1200 MW får vi eldstadstemperaturen 1400 grader istället och i så fall sjunker medeluppehållstiden till hälften av 4.5 sekunder, dvs. den sjunker till 2.25 sekunder. Detta är allvarligt nog. Men om vi nu säger att genombrottstiden vid normal last är cirka $\frac{1}{4}$ av medeluppehållstiden (ett ganska rimligt värde) så var genombrottstiden från början 1.3 sekunder, en fjärdedel av 5.2 sekunder. Vid överlast antar vi att det uppstår nya recirkulationsvirvlar som fyller en stor del av eldstaden. Då kommer genombrottstiden att minska i förhållande till medeluppehållstiden och vi kan exempelvis anta att den går ner till cirka $\frac{1}{6}$ av medelvärdet. Då är vi nere på en genombrottstid av bara litet knappt 0.4 sekunder vid 1200 MW och eldstadstemperaturen 1200 °C.

Detta är inga orealistiska siffror och de syftar till att illustrera ett av de fenomen som uppträder vid överlast.

I början av detta lilla kompendium fanns det en tabell över typiska eldstadsbelastningar med några olika bränslen och några olika förbränningstekniker. Det som begränsar eldstadsbelastningen är just uppehållstiderna och då speciellt genombrottstiden. Effektiv förbränning innebär att all gas i eldstaden får en rimlig chans att brinna ut och för att den skall få det så måste genombrottstiden vara längre än tiden för fullständig blandning. Vid alltför hög förbränningsintensitet så kommer man med nödvändighet att våldföra sig på detta villkor med ineffektiv förbränning och stora utsläpp av oförbrända mellanprodukter som följd.

Vill man då ha en fullständigt perfekt omblandning i sin eldstad? Lustigt nog: Nej.

Om vi har en eldstad som är fullständigt perfekt omblandad så innebär det att någonting som tillförs eldstaden, till exempel bränsle, *omedelbart* och *utan att det tar någon tid* alls fördelas fullständigt jämnt i hela eldstaden. (En sådan omblandning är visserligen omöjlig att få i verkligheten, men låt oss för resonemangets skull tala om detta teoretiska fall, den perfekt omblandade eldstaden.) I samma ögonblick som bränslet kommer in i den här eldstaden så kan vi alltså hitta detta bränsle överallt i hela eldstaden. Överallt? Ja, just *överallt i hela eldstaden* – alltså även i utloppet! Den perfekta omblandningen innebär alltså med nödvändighet att genombrottstiden är noll! Och det vill vi inte ha. Vi vill ha en genombrottstid som är längre än tiden för omblandning *och* kemiska reaktioner. I den teoretiska, perfekt omblandade, reaktorn är alltså omblandningstiden noll och det är också genombrottstiden, men eftersom de kemiska reaktionerna kräver en viss tid så kommer en perfekt omblandad eldstad att släppa ut förhållandevis stora mängder av oförbränt bränsle.

Istället vill vi ha en kombination av väl omblandade zoner där vi kan sköta blandningen och av så kallade pluggflödeszoner eller pistongflödeszoner där gasen bara strömmar framåt utan störningar och i vilka vi kan vinna tid för att reaktionerna skall hinna ske i den gas som vi nyss blandade om.

En praktisk konsekvens av detta är att alltför många nivåer av lufttillsats eller av rökgasåterföring eller av injektion av olika additiv kan göra att det till slut inte finns någon plats i eldstaden där man har en väl fungerande fördröjning av gasen, en plats där de kemiska reaktionerna får sin tid.

Här spelar även driftsättet en stor roll. Även om det finns låt oss säga fyra luftnivåer i en panna plus kanske en nivå med rökgasåterföring, så är det inte säkert att driften blir den bästa när man använder alla dessa nivåer. Det kan mycket väl vara så att lufttillsatsen skall göras i huvudsak långt ner och med mycket rörelseenergi så att man får en god blandning men att man sedan skall låta den färdigblandade gasen strömma uppåt utan ytterligare störningar så att man inte i onödan förkortar genombrotts tiden.

Uppehållstiden är viktig – men den är litet mer komplicerad än många tror.

Temperatur (och turbulens och uppehållstid)

Temperaturens inverkan har berörts redan, på flera ställen, men det är värt att diskutera hur temperaturen påverkar förloppen i ett eget avsnitt.

När den kemiskt bundna energin i bränslet frigörs sker det genom att det bildas gasformiga förbränningsprodukter. Detta diskuterades tidigare. Den frigjorda energin hamnar i de gasformiga produkterna vilket innebär att de blir varma. Ju mera koncentrerad energin är, mätt i J/m^3 gas, desto högre blir temperaturen. I avsnittet om förbränningskemi fann vi att om man eldar stökiometriskt och lyckas åstadkomma en fullständig utbränning av bränslet så får man minimal rökgasmängd och maximal koncentration av energin, dvs. den högsta tänkbara temperaturen.

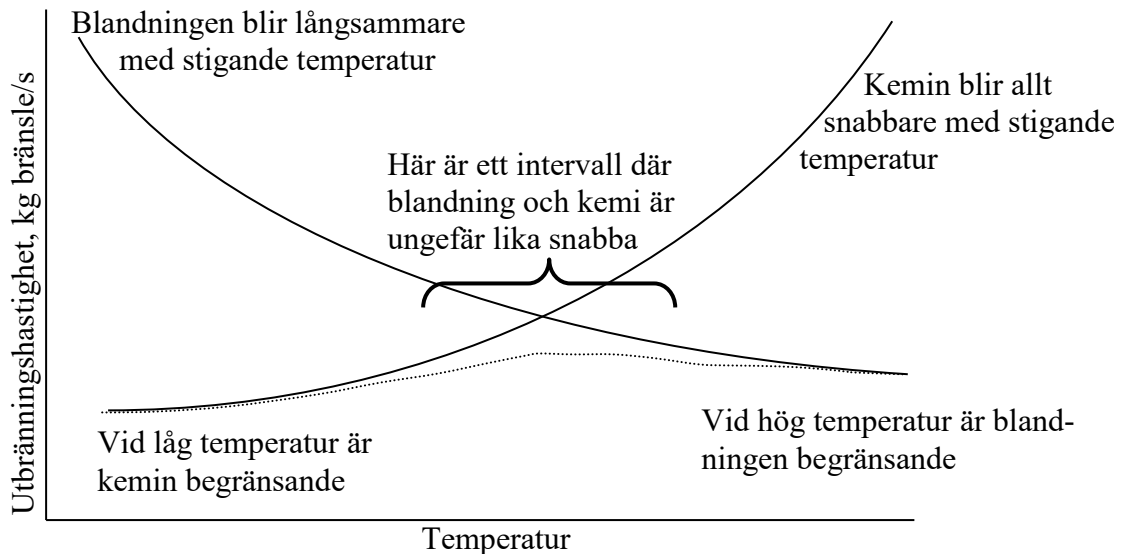
Temperaturen är alltså ett bra mått på förbränningens effektivitet, ju högre temperatur vi får hos gaserna, desto högre verkningsgrad i själva förbränningen. Detta gäller naturligtvis fullt ut bara i system där vi inte kyler väggarna, men som princip...

Men temperaturen kan också användas för att i viss mån styra förbränningen och det kan man göra genom att variera kylningen.

I avsnittet om förbränningskemi nämndes aldrig att kemiska reaktioner rent allmänt sett går fortare ju högre temperaturen är – men så är det. Det finns en tumregel som säger att kemiska reaktioner ungefär fördubblar sin hastighet då man höjer temperaturen tio grader. Så enkelt är det inte, men redan en måttlig temperaturhöjning kan leda till mycket snabbare reaktioner.

I avsnittet om EDC nämndes, på tal om virvlar och deras livslängd, att gaser blir allt segare, deras viskositet ökar, med ökande temperatur. Detta innebär i sin tur att blandningen mellan gaser blir allt besvärligare och långsammare med ökande temperatur. Och så nämndes det att i de flesta praktiska förbränningsmanhang så är det blandningen som är det långsammaste, tidsbegränsande steget - inte de kemiska reaktionerna.

Låt oss sammanfatta det här i ett kvalitativt diagram som visar hur den totala utbränningshastigheten beror av blandning, kemisk reaktionshastighet och temperatur.



Den totala utbränningshastigheten är markerad med en streckad linje i figuren. Vad figuren illustrerar är att även om de kemiska reaktionerna accelererar mycket snabbt med ökande temperatur så innebär det i praktiken ändå inte nödvändigtvis att utbränningshastigheten ökar. Det kan tvärtom vara så att den minskar när temperaturen stiger. Men det beror i så fall inte på att de kemiska reaktionerna själva förlorar i hastighet utan på att blandningen blir begränsande, och den har egenskapen att bli allt långsammare då temperaturen ökar.

Låt oss nu tillämpa detta på det resonemang vi förde i det föregående avsnittet beträffande överlast i eldstäder. Vi konstaterade där att överlast innebär att genombrottstiden för gasen minskar, liksom medeluppehållstiden. Men vi konstaterade också att en ökad eldstadsbelastning i de flesta fall även innebär en temperaturökning. I värsta fall, har vi nu sett, kan temperaturökningen innebära att utbränningshastigheten sjunker, dvs. att utbränningstiden ökar.

Då man analyserar data för praktiska förbränningsanläggningar upptäcker man ofta att de drivs vid en temperatur där blandning och kemisk kinetik är ungefär lika snabba. I diagrammet ovan ser man att det är i det området som förbränningshastigheten är maximal och det är naturligtvis därför som man, efter tillräckligt många års drift och intrimning, väljer att driva dem vid den temperaturen.

Det innebär att vare sig vi sänker eller höjer temperaturen, så kommer förbränningshastigheten att minska. Inte radikalt, för man ser att den streckade kurvan är ganska flack i det området, men den kommer att minska.

Olika eldningstekniker innebär att man eldar vid olika genomsnittliga temperaturnivåer. I fluidiserade bäddar, till exempel, håller man sig gärna omkring 850 – 950 °C, i rosteldade pannor för fuktiga bränslen omkring 1000 – 1100 °C och i pulvereldade pannor eller oljepannor är det inte ovanligt med temperaturer på 12 – 1300 °C inne i eldstaden.

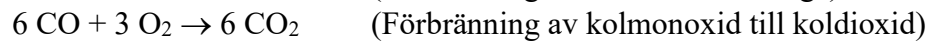
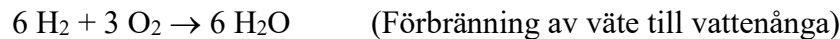
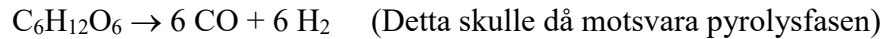
Lokalt är temperaturerna mycket högre men det kommer också alltid att finnas platser i eldstaden där temperaturen är mycket lägre. Beroende på vilken temperatur man väljer (= vilken teknik man väljer) kommer ett och samma bränsle att brinna olika snabbt. Men om man väljer en teknik i vilken bränslet brinner långsamt så måste man begränsa gasgenomflödet så att man får tillräckligt lång uppehållstid. Men att begränsa gasgenomflödet är samma sak som att begränsa bränsletillförseln. Det är därför som olika eldningstekniker har olika optimala eldstadsbelastningar så som visades tidigare.

- Huvuddelen av förbränningen – de energifrigörande reaktionerna – sker i en turbulent strömmande gas.
- I de allra flesta praktiska fall utgör blandningen mellan ”små”, någon cm till några dm, turbulensvirvlar i gasen det begränsande steget.
- De stora turbulensvirvlarna har i första hand funktionen att flytta gasvirvlar innehållande luft, bränsle och värme över långa sträckor – flera meter.
- Blandningen i den lilla skalan sker mellan turbulensvirvlar som innehåller syre, som innehåller bränsle eller som innehåller värme i form av heta förbränningsprodukter.
- Då virvlar innehållande alla tre komponenterna blandas uppstår små flamsegment som till storlek och utseende påminner om cornflakes.
- Dessa flamsegment tänds och släcks slumpmässigt allteftersom turbulensvirvlarna rör sig.
- Förekomsten av dessa turbulenta virvlar med olika gas och med olika temperatur förklarar varför ett känsligt instrument visar en varierande sammansättning och temperatur i en och samma punkt i en eldstad eller en rök-gaskanal.
- Praktiskt taget all den rörelseenergi som krävs för den turbulenta blandningen tillförs som el till luftfläktarna.
- Höga hastigheter och små munstycken är inte alltid bra för blandningen.
- Gasens minsta uppehållstid i eldstaden – genombrottstiden – bestäms av eldstadsbelastning, driftsätt och pannkonstruktion.
- Det finns ett temperaturintervall inom vilket utbränningen av bränslet är som snabbast, och det är ofta där pannorna körs i praktiken.
- Effektiv eldning är att anpassa driften till vad eldstaden kan klara av beträffande förbränningshastighet, blandningshastighet och genombrottstid.

Föroreningsbildning

Ett av kännetecknen på en effektiv förbränning är att dess miljöpåverkan är minimal.

Såsom vi behandlade förbränningskemin ovan så hoppade vi över det faktum att förbränningen inte alls sker i ett enda steg. En något mera verklighetsnära bild får man genom att anta att förbränningen sker i flera steg, till exempel enligt



Inte heller detta schema är komplett men det illustrerar att förbränningen i verkligheten sker i flera steg där det bildas mellanprodukter i de olika stegen. Bland dessa mellanprodukter finns inte bara vätgas och kolmonoxid utan en stor mängd mer eller mindre obehagliga produkter.

Dessutom sker inte bara kemiska reaktioner som berör själva det brännbara bränslet, utan även askans mineraler ingår bland de ämnen som reagerar liksom andra flyktiga bränslebeståndsdelar som bränslets innehåll av svavel, klor och kväve. Också luftens kvävgas deltar i reaktionerna.

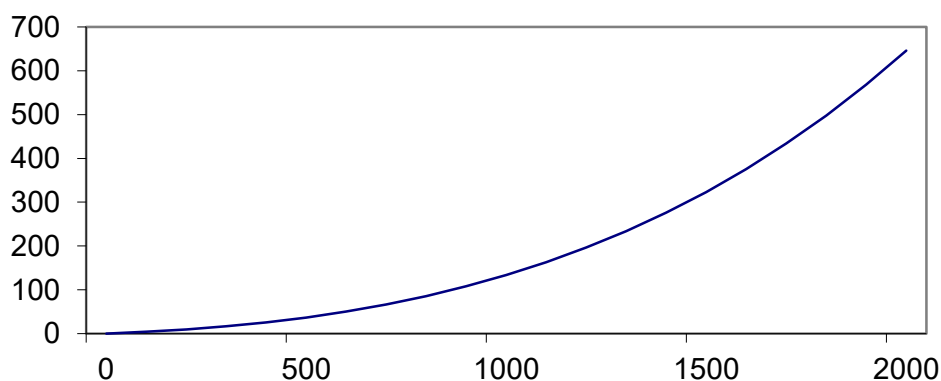
Sammantaget kan man säga att det finns tre huvudgrupper av föroreningar från förbränningsanläggningar, nämligen

1. Föroreningar som utgör naturliga mellanprodukter i förbränningen och som inte skulle slippa ut ifall förbränningen vore perfekt
2. Föroreningar som bildas på grund av att bränslet innehåller mera än bara brännbara kolväten
3. Föroreningar som bildas därför att det lokalt uppträder speciella betingelser som gör att vissa specifika föreningar kan bildas

Mellanprodukter

En typisk representant för den första gruppen är kolmonoxiden, CO. Kolmonoxid är visserligen en höggradigt giftig gas men den utgör i sig själv inget väsentligt miljöproblem. Om kolmonoxid slipper ut ur skorstenen så oxideras den långsamt till ogiftig koldioxid i atmosfären. Koncentrationerna är också låga. Däremot anses ofta CO vara en bra indikator på utsläpp av andra mellanprodukter, t ex kolväten av olika slag, av vilka flera kan vara cancerframkallande. Skälet till att man mäter CO i många förbränningsanläggningar är alltså inte i första hand att man är rädd för utsläpp av CO utan för att man är rädd för utsläpp av andra, farligare, substanser.

Problemet är att dessa farligare föreningar, aromatiska kolväten och annat, inte är linjärt beroende av kolmonoxidhalten. Istället är det ganska typiskt att mängden kolväten ökar långsamt vid låga CO-halter men ökar snabbt vid höga CO-halter. I figuren på nästa sida stiger kolvätehalten (mg/m^3) från ungefär noll till knappt $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ då CO-halten stiger från noll till 500 ppm medan kolvätehalten är uppe i omkring $650 \text{ mg}/\text{m}^3$ då CO-halten stigit till 2000 ppm.



Detta betyder att kortvariga spikar med höga CO-halter kan leda till mycket höga utsläpp. Vi utgår från de två vänstra kolumnerna i tabellen här nedan och lägger in ett par olika driftsituationer där driftsituation 1 innebär att vi hela tiden (under 100 % av tiden) har CO-halten 300 ppm.

ppm CO	mg kolväten/m ³	Drift 1	Drift 2	Drift 3
0	0			50 %
100	4		10 %	25 %
200	9		20 %	
300	16	100 %	40 %	
400	25		20 %	
500	37		10 %	10 %
600	50			
700	66			
800	86			
900	108			
1000	134			5 %
1100	163			
1200	196			
1300	234			
1400	276			
1500	323			5 %
1600	376			
1700	434			
1800	498			
1900	568			
2000	646			5 %

Driftsituation 2 innebär att vi under 10 % av tiden har 100 ppm CO, under 20 % av tiden har 200 ppm CO, under 40 % av tiden har 300 ppm, under 20 % av tiden har 400 ppm och under 10 % av tiden har 500 ppm.

Driftsituation 3 är den mest komplicerade. I denna har vi ingen CO alls, 0 ppm, under 50 % av tiden, 100 ppm CO under 25 % av tiden, och de resterande 25 procenten av tiden fördelar sig på kortvariga spikar om 500 ppm, 1000 ppm, 1500 ppm och 2000 ppm.

Börja med att räkna ut en genomsnittlig CO-halt i de olika fallen:

- Driftsituation 1 är enkel: Vi har hela tiden CO-halten 300 ppm så genomsnittet blir 300 ppm.
- Driftsituation 2 består av olika nivåer och vi kan beräkna medelvärdet genom att väga samman de olika nivåerna på CO-halten med de olika andelarna av tiden. Vi får då

$$\begin{aligned} CO_{\text{medel}} &= 0.1 \cdot 100 + 0.2 \cdot 200 + 0.4 \cdot 300 + 0.2 \cdot 400 + 0.1 \cdot 500 = \\ &= 10 + 40 + 120 + 80 + 50 = 300 \end{aligned}$$

- Driftsituation 3 behandlas på samma sätt som nummer två, fast med andra siffror:

$$\begin{aligned} CO_{\text{medel}} &= 0.5 \cdot 0 + 0.25 \cdot 100 + 0.1 \cdot 500 + 0.05 \cdot 1000 + 0.05 \cdot 1500 + 0.05 \cdot 2000 = \\ &= 0 + 25 + 50 + 50 + 75 + 100 = 300 \end{aligned}$$

CO-halterna är alltså i genomsnitt 300 ppm i alla de tre fallen, men de fördelar sig på väldigt olika sätt.

På precis samma sätt räknar vi nu ut de genomsnittliga halterna av kolväten:

- Driftsituation 1 är enkel: Vi har hela tiden kolvätehalten 16 mg/m³ så genomsnittet blir 16 mg/m³.

- Driftsituation 2 ger oss:

$$\begin{aligned} (C_n O_m)_{\text{medel}} &= 0.1 \cdot 4 + 0.2 \cdot 9 + 0.4 \cdot 16 + 0.2 \cdot 25 + 0.1 \cdot 37 = \\ &= 0.4 + 1.8 + 6.4 + 5 + 3.7 = 17.3 \text{ mg/m}^3. \end{aligned}$$

- Driftsituation 3 behandlas på samma sätt som nummer två, fast med andra siffror:

$$\begin{aligned} (C_n O_m)_{\text{medel}} &= 0.5 \cdot 0 + 0.25 \cdot 4 + 0.1 \cdot 37 + 0.05 \cdot 134 + 0.05 \cdot 323 + 0.05 \cdot 646 = \\ &= 0 + 1 + 3.7 + 6.7 + 16.15 + 32.3 = 59.85 \text{ mg/m}^3. \end{aligned}$$

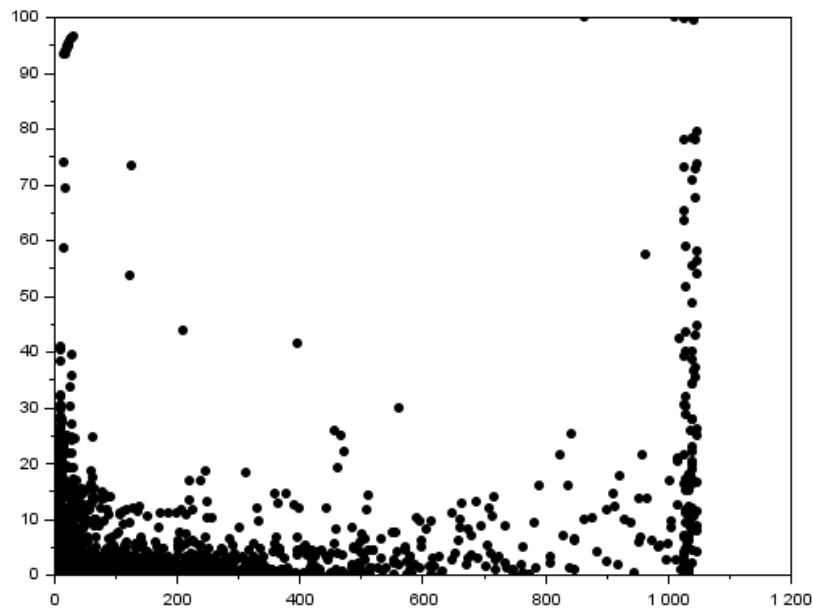
Trots att alla tre fallen har samma genomsnittliga CO-halt och trots att den tredje driftsituationen innebär att anläggningen går helt utan CO under halva tiden så gör alltså CO-spikarna att kolväteutsläppen under driftsituation 3 är närmare 60 mg/m³ i genomsnitt, medan de är under 20 mg/m³ i de två andra driftfallen. I driftläge tre är CO-halten högst 100 ppm under 75 % av tiden, i driftläge 1 är den aldrig någonsin under 300 ppm – men ändå ger driftläge 3 nästan fyra gånger högre genomsnittliga kolväteutsläpp.

Drygt hälften av de kolväten som släpps ut i driftsituation 3 – 32.3 mg/m³ av totalt 59.85 – härrör från de 5 % av tiden då de högsta CO-spikarna förekommer.

Vad betyder då 5 % av tiden? 5 % av en timma är tre minuter. Om vi antar att en hög CO-spik kan vara i 30 sekunder betyder det alltså att sex sådana spikar i timman motsvarar 5 % av tiden. Det är en hög CO-spik var tolfte minut. Det är alltså inte några höga frekvenser av höga spikar som behövs för att kolväteemissionerna skall stiga, även om medelvärdet av CO är lågt eller åtminstone acceptabelt.

Av detta kan man inse att CO-halten inte nödvändigtvis är någon bra indikator på kolväteutsläpp medan däremot höga och tillfälliga spikar i CO-halten kan vara en bra indikator. Detta gäller allmänt för mellanprodukterna. En stabil drift ger låga utsläpp – instabil drift ger höga utsläpp.

Komplexiteten illustreras även av den nedanstående figuren.

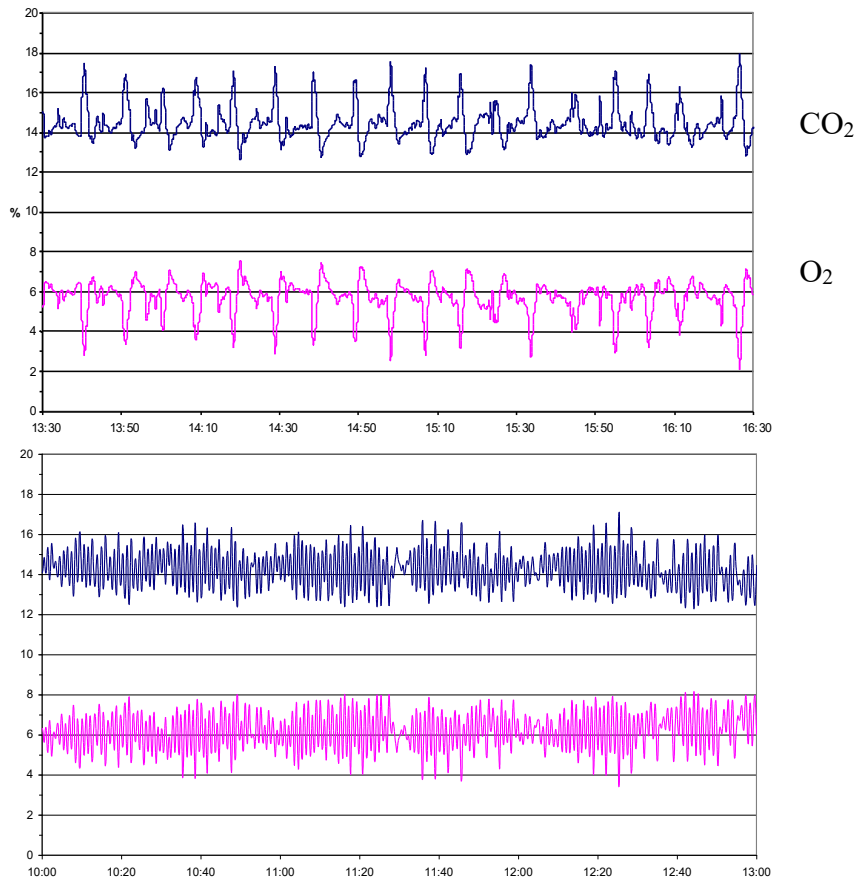


Figuren visar uppmätta kolvätehalter (ppm) som funktion av uppmätta CO-halter (ppm) i en rosteldad panna med hushållsavfall som bränsle. Figuren innehåller 183 000 värden uppmätta under tolv månaders drift 2013-2014. Värdena är tagna med en minuts intervall. Man ser tydligt hur höga kolvätehalter, över cirka 20 ppm, förekommer både tillsammans med låga CO-halter, under 100 ppm, och tillsammans med höga CO-halter, över 1000 ppm.

Det övre av de två diagrammen på nästa sida visar koldioxid- och syrehalter i en 6 MW, rosteldad panna med fuktig grot som bränsle under en period av tre timmar. Det undre diagrammet visar samma sak, men i en 4 MW rostpanna med briketter som bränsle. Vid båda mättillfällena drevs pannorna vid ungefär 40-50 % last.

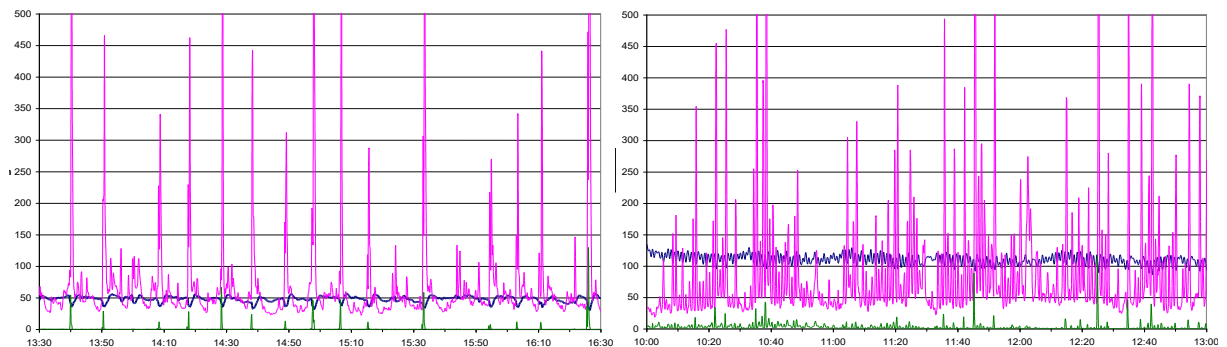
Genomsnittliga syrehalter i de två pannorna under mätperioden var 5.7 respektive 6.2 % (taget i våt rökgas), verkningsgraderna var 87 respektive 90 % och CO-halterna i genomsnitt 49 respektive 52 ppm. Mätvärdena från termoelement monterade nära eldstädernas utlopp (sk "eldstadstemperatur") var också i huvudsak lika.

De parametrar man ofta använder för att bedöma panndriften var alltså lika i de två fallen – men kolväteutsläppen från brikettpannan var tre gånger högre än kolväteutsläppen från grotpannan, 0.59 mg/MJ räknat som propan att jämföra med 0.19 mg/MJ. Samma förhållande gällde för kväveoxidutsläppen där brikettpannan visade 103 mg/MJ medan den groteldade pannan gav 53 mg/MJ.

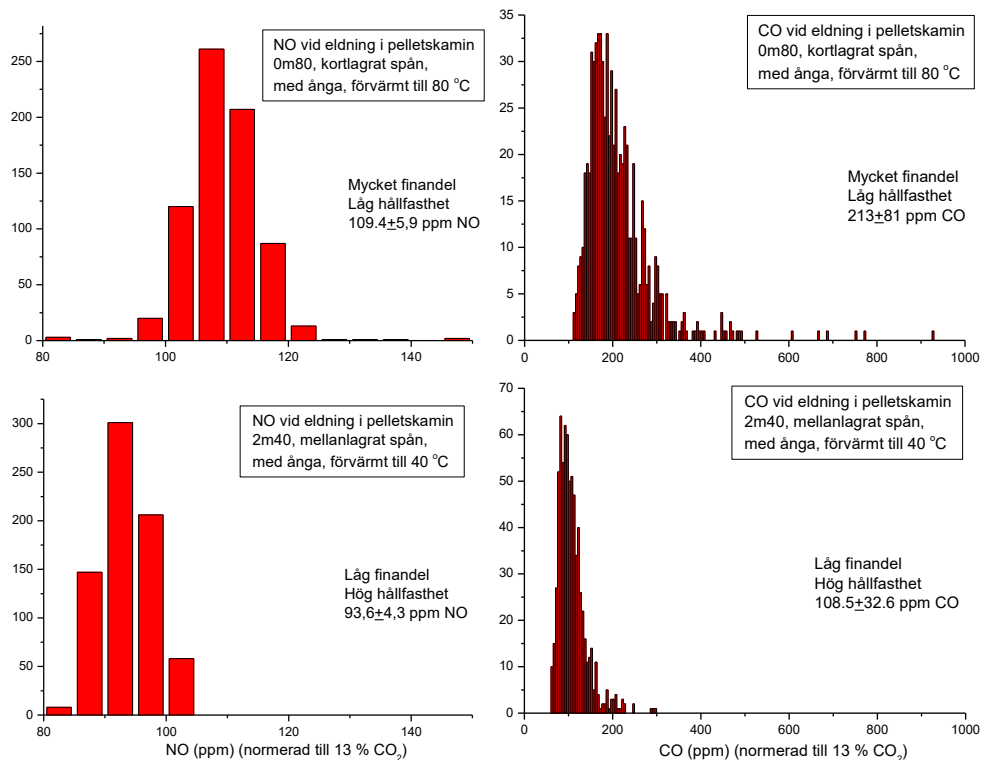


Skillnaderna mellan de två pannorna framgår av nedanstående figur där det vänstra diagrammet visar den groteldade pannan och det högra visar data från den som eldas med det bättre och mera homogena bränslet - briketter.

Den mest slående skillnaden är den mellan CO-kurvorna. I den groteldade pannan uppträder totalt 15 CO-toppar överstigande 150 ppm, i den briketteladade är dessa toppar mångfaldigt flera. I det vänstra diagrammet ser man tydligt hur varje enskild CO-spik också hör samman med en spik i kolväteutsläpp, de gröna topparna längst ner i diagrammet. Detta är alltså en illustration från verkligheten av de räkneexempel som visades ovan. Den mörkblå kurvan i diagrammen visar NO-halten.



Höga CO-utsläpp kan även ha en annan orsak, nämligen att finfraktion från bränslet ryker med rökgaserna högt upp i eldstaden och producerar ny CO och nya kolväten nära eldstadens utlopp. Sannolikt är det denna mekanism som ligger bakom den del av uppträdandet i den avfallspanna för vilken data visats tidigare.



De två övre diagrammen i figuren visar histogram över kväveoxidutsläppen (rött, till vänster) och koloxidutsläppen (svart, till höger) från en kommersiell pelletskamin eldad med träpellets med låg hållfasthet – dvs med hög andel finfraktion. De nedre histogrammen visar resultat från ett jämförande försök i samma pelletskamin men med en mer hållfast pelletkvalitet, dvs med lägre andel finfraktion.

På senare år har det visat sig att injektion av svavel i eldstaden kan leda till sänkta CO-halter. De exakta mekanismerna bakom detta är ännu inte utredda, men vissa resultat tyder på att man samtidigt får en reduktion av oförbrända kolväten.

Det *kan* alltså vara så, att en injektion av svavel minskar halten av CO och att även halterna av de verkliga miljöbovarna, kolvätena, sänks. De svavelmängder som behöver injiceras för att åstadkomma sänkningar i CO är såpass små att man åtminstone i vissa fall skulle kunna försvara tekniken ifall man verkligen får en motsvarande reduktion av kolvätena som man får av CO. Indirekt kan detta ge möjligheter att även sänka utsläppen av kväveoxid eftersom det ger möjlighet att driva anläggningen vid ett lägre luftöverskott än vad som annars skulle vara möjligt.

Självklart gäller att man ändå alltid skall sträva efter bästa möjliga utbränning av bränslet vilket alltså innebär att man även minimerar den här gruppen av föroreningar. Men man skall alltså även sträva efter en så stabil drift som möjligt. Tillsats av svavel för att ytterligare sänka utsläppen är en extra åtgärd men får inte ersätta att driften i grunden hålls så nära optimal som möjligt.

Bränslebundna föroreningar

Den andra gruppen av föroreningar är sådana som bildas därför att bränslet innehåller andra ämnen än kolväten. Till den här gruppen av föroreningar hör till exempel svaveloxider. Finns det svavel i bränslet så kommer svavlet att oxideras till svaveloxider under förbränningen när vi har syre i överskott. Det är inte mycket att göra åt. Samma sak gäller klor: Finns det klor i bränslet kommer det i huvudsak att oxideras till HCl under förbränningen och komma ut i skorstenen.

Överhuvudtaget gäller att alla grundämnen som finns med i bränslet – och det är de flesta – kommer att komma ut ur eldstaden i en eller annan form och i samma mängd som de kom in. Om vi tillför ett kg svavel med varje ton bränsle så kommer det också att komma ut ett kg svavel för varje ton bränsle vi stoppar in. Vad som kan påverkas är i vilken form detta svavel lämnar eldstaden. Om vi tillför ett kilo kadmium med vårt biobränsle så kommer det att komma ut ett kilo kadmium. Om vi tillför ett kilo kvicksilver med kolpulvret så kommer det ut ett kilo kvicksilver...

I fluidbäddar arbetar man ofta med kalktillsats för att binda svavel. Grunden för detta är att kalcium och svaveldioxid tillsammans kan förenas till kalciumsulfat (gips) som bildar små partiklar i rökgasen och som kan avskiljas i spär- eller elektrofilter tillsammans med flygaskan. En stor del (upp till omkring 80 %) av allt det ingående svavlet kan på detta sätt bindas i gipsen och avskiljas. Liknande metoder finns även för pulvereldade pannor och man kan bygga på rökgasavsvavlingsanläggningar på vilka som helst pannor – men de kostar en hel del.

Det här betyder visserligen att man minskar utsläppen av gasformig svaveldioxid och att man därigenom minskar utsläppen av försurande gaser, men å andra sidan läggs filteraskan – inklusive gipsen – oftast på deponier från vilka det sker en långsam utlakning. Detta är alltså ingen metod att faktiskt ta bort svavlet ur de naturliga kretsloppen utan bara en metod att fördröja utlakningen.

På liknande sätt arbetar man idag för att finna metoder att skilja ut tungmetaller ur rökgasen. Det gäller kvicksilver, bly och kadmium i första hand, men även andra metaller kan förekomma i förhållandevis höga halter i olika typer av bränslen och kan utgöra lokala miljöproblem. Även i dessa fall gäller dock att man ännu inte har några säkra metoder att hantera askan. Vad som händer då man avskiljer någonting från gasfasen och istället fångar upp det tillsammans med askan är alltså att man fördröjer utsläppet genom att mellanlagra materialet i en depå.

Till den här gruppen av miljöföroreningar hör även partiklarna, både grova askpartiklar i bottenaskan, fina askpartiklar i flygaskan och superfina (submikrona) partiklar i rökgaserna. Dessa partiklar består av icke brännbara material som i en eller annan form har kommit in med bränslet.

Den grova fraktionen i bottenaskan utgör i de flesta fall huvudsakligen rena, eventuellt sintrade askmineraller i oxiderad form. Bottenaskan har varit utsatt för höga temperaturer och kan ha varit delvis smält, varvid den kan ha sintrat samman till större klumpar. Bottenaskan är oftast ett ganska ofarligt material.

Flygaskan sönderfaller ofta i två olika delar, nämligen en grövre del (partiklar större än en eller ett par miljondels meter, mikrometer, μm) och en mycket finkornig del med partiklar mindre än $1 \mu\text{m}$ (submikrona partiklar). Av dessa två delar består den grövre fraktionen huvudsakligen av små askpartiklar som har ryckts med från bränslebädden eller – i fall av pulvereldning – blivit kvar efter att partiklarna/dropparna brunnit ut. De submikrona partiklarna nybildas däremot till stor del under själva förbränningsprocessen enligt de senaste rönen.

Flygaskan har varit utsatt för mycket höga temperaturer under sin passage genom eldstaden samtidigt som den varit utsatt för växelvis reducerande och oxiderande betingelser. Då gasen lämnar eldstaden och går in i pannans konvektionsdel sjunker såväl gas- som partikeltemperaturen. Därvid kondenserar metaller (t ex zink) och tunga kolväten (t ex bens(a)pyren) på fasta ytor. De minsta partiklarna representerar förhållandevis stora ytor.

Om vi antar partikelkoncentrationen före cyklon vara 200 mg/m^3 varav 50 mg utgörs av submikrona partiklar med diametern $0.4 \mu\text{m}$ och resten, 150 mg , utgörs av ”stora” partiklar med diametern $5 \mu\text{m}$, så gäller att de små partiklarna representerar drygt fyra gånger större yta än vad de stora gör ($0.625 \text{ m}^2/\text{m}^3$ att jämföra med $0.15 \text{ m}^2/\text{m}^3$), trots att mängden av dem (massan) bara utgör en tredjedel av de stora partiklarnas massa.

Om vi nu dessutom antar att det kondenserar ett tiondels gram tunga kolväten på varje kvadratmeter tillgänglig yta då temperaturen sjunker, så finner vi alltså att det kondenserar 0.0625 gram tunga kolväten på de små partiklarna medan det bara faller ut 0.015 gram tunga kolväten på de grova partiklarna.

De finaste partiklarna väger 0.050 gram , 50 mg , och på dem kondenserar alltså 0.0625 gram kolväten eftersom deras yta var 0.65 m^2 . Det betyder att de ökar i massa till 0.1125 gram och att de slutligen består till $100 \cdot 0.0625 / 0.1125 = 55.5 \text{ vikt-\%}$ av tunga kolväten. De ”grova” partiklarna däremot kommer bara till $100 \cdot 0.015 / 0.165 = 9.1 \text{ vikt-\%}$ att bestå av tunga kolväten. Detta beror på att bara 0.015 gram kolväten kondenserade på de grova partiklarna eftersom deras totala yta bara var 0.15 m^2 . Totalt finner vi i detta räkneexempel 0.0775 gram kondenserade kolväten på askpartiklarna i varje kubikmeter rökgas före cyklonen.

Vi får alltså i många fall en *anrikning* (koncentration) av kondenserande komponenter på de minsta partiklarna. I cyklonen avskiljs den grova partikelfraktion effektivt medan den fina fraktionen bara avskiljs mycket ofullständigt. Vi påstår nu litet godtyckligt att högst 40 % av de små partiklarna ($0.4 \cdot 112.5 = 45$ mg) avskiljs i cyklonen medan däremot avskiljningsgraden för ”stora” partiklar är minst 80 %. Efter cyklonen har vi då $112.5 - 45 = 67.5$ mg submikrona partiklar och $(1 - 0.8) \cdot 165 = 33$ mg ”grova” partiklar vilket ger oss totalt cirka 100 mg/m^3 efter cyklonen.

I den avskilda askan finner vi 25 mg tunga kolväten på de små partiklarna och 0.012 gram på de grova partiklarna, totalt 0.037 gram. På de partiklar som passerar genom cyklonen finner vi däremot 0.0375 gram kolväten på de minsta partiklarna och 0.003 gram på de grova, totalt 0.0405 gram. I det här enkla exemplet finner vi alltså att mer än hälften av de tunga kolvätena slipper igenom cyklonen på grund av anrikningen på små partiklar och på grund av cyklonens ofullkomlighet vad gäller att avskilja de minsta partiklarna.

Elfilter och spärrfilter (textilfilter) är väsentligt effektivare än cykloner vad gäller att skilja av de minsta flygaskepartiklarna.

Eldar man fossila bränslen så är den största föroreningen kolet själv. Det stora och överskuggande miljöproblemet vid all fossilbränsleledning är ju utsläppen av koldioxid från fossilt kol. Det är dessa utsläpp som utgör det största enskilda bidraget till växthuseffekten. Koldioxiden kan vi inte rena bort med kommersiellt acceptabelt resultat, vi kan inte undvika att den bildas och vi kan (idag) inte lägga den på deponier.

Att avskilja och/eller mellanlagra dessa föroreningar sedan de en gång bildats är inte den bästa metoden att minska de totala utsläppen. Däremot finns det två andra metoder som är effektiva:

- Använd ett så rent bränsle som möjligt. Det låter sig göras att försöka upphandla bränslet med bland annat kriteriet att det skall innehålla så låga föroreningshalter som möjligt. Det är sällan (eller aldrig) ekonomiskt försvarbart att rena ett bränsle, men det kan vara vettigt att prioritera leverantörer som levererar ett rent bränsle.
- Höj anläggningens verkningsgrad så mycket som möjligt. Om bränslet innehåller 1 kg kadmium per ton och om vi kan höja verkningsgraden i anläggningen så att alla kunder får vad de skall ha fast vi bara tillför 0.9 ton bränsle istället för 1.0 ton bränsle, ja då har vi minskat utsläppen av kadmium från 1 kg till 0.9 kg under den tidsperioden.

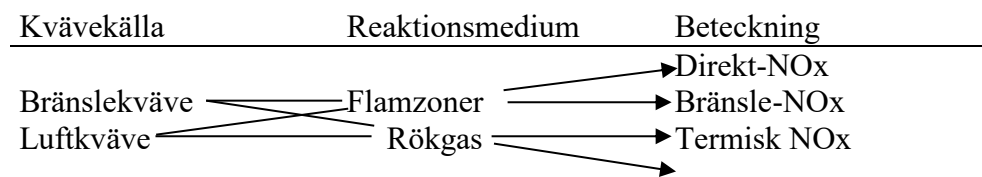
Att höja verkningsgraden påverkar antagligen även den förra gruppen av föroreningar – mellanprodukterna. Att sträva efter en maximal verkningsgrad är alltså inte bara - eller ens i första hand - en ekonomisk fråga, det är en mycket effektiv miljöåtgärd. Speciellt vad gäller en anläggnings påverkan på växthuseffekten är verkningsgraden en helt avgörande faktor. Ju högre verkningsgrad man har desto mindre bidrag till växthuseffekten.

Föroreningar som bildas under speciella betingelser

Den tredje gruppen är de föroreningar som bildas under speciella betingelser lokalt i eldstaden eller i rökgasstråket.

Det mest typiska exemplet är kväveoxiderna, NO_x , och då speciellt den termiska NO_x 'en.

Ett grovt schema över kväveoxidernas bildningsvägar är att säga att kvävet förekommer dels i bränslet ("bränslekväve") och dels i luften ("luftkväve"). Bildningen av kväveoxider kan i huvudsak ske endera i själva flamzonerna i eldstaden eller i de mellanliggande gasvolymerna som i huvudsak upptas av förbränningsprodukter, rökgaser.



Av de fyra reaktionsvägarna är det bara tre som är praktiskt möjliga eftersom den brinnande bränslepartikeln ju idealt sett omges av en flamma där pyrolysgaserna brinner och bränslekvävet följaktligen inte kan komma ut i rökgasen utan att passera genom flammen.

Bränslets kväve avges i huvudsak endera som ammoniak (H_3N) eller som cyanväte (CHN). Fördelningen av dessa två är sådan att CHN (cyanväte) är en dominerande komponent då kvävet avges från fossila bränslen medan däremot ammoniak är dominerande i pyrolysgasen från biobränslen. Båda komponenterna kan bilda flera olika kväveoxider, men för att göra en lång historia kort bildas lustgas (N_2O) företrädesvis från CHN medan NO bildas från H_3N . Bildningen av lustgas stimuleras vidare av låga temperaturer. Kombinationen, fossilt bränsle och låga temperaturer, finner man t ex vid eldning av kol i fluidiserade bäddar där också ofta lustgasemissionerna kan vara ett problem.

Bränsle- NO_x (alltså inte lustgasen N_2O utan NO) bildas i första hand genom att ammoniak reagerar med NC - och NCO - radikaler i flamfronten. Den andel av bränslets kväve som omvandlas till NO vid samma förbränningsbetingelser avtar successivt med ökande kvävehalt i bränslet, men andelen avtar långsammare än vad kvävemängden ökar. Nettoresultatet blir att exempelvis en fördubbling av kvävehalten i bränslet leder till en ökning av mängden bränsle- NO_x – dock inte till en fördubbling.

Direkt- NO_x kan bildas från molekylärt kväve i flamfronten eftersom reaktioner mellan N_2 och i första hand CH - radikaler kan bryta sönder den mycket stabila kvävemolekylen till bland annat fria kväveatomer eller till CHN vilka sedan kan bilda NO .

Termisk NO_x bildas ur molekylärt kväve och molekylärt syre sedan de stabila kvävemolekylerna brutits sönder genom reaktioner med i första hand OH- radikaler i rökgasen. Villkoret för detta är att temperaturen är mycket hög varav namnet "termisk" NO_x. Dessutom krävs hög syrehalt.

Dominerande bildningsvägar är dels bränsle-NO_x (ofta omkring 70 % av all NO_x vid eldning av kvävehaltiga bränslen) och termisk NO_x (under typiska biobränslebetingelser cirka 25 % av all NO_x). Bildning via direkt-NO_x-mekanismen är för det mesta försumbar i sammanhanget.

Termisk NO_x är alltså en förorening vars bildning kräver ganska speciella betingelser, nämligen dels en *Hög temperatur* och dels en *Hög syrehalt*.

En annan typ av föroreningar som kräver speciella betingelser för sin bildning är dioxinerna eller, mera allmänt, den stora gruppen klorerade kolväten. För att dessa skall bildas i någon större omfattning krävs i praktiken:

1. Närvaro av klor
2. Närvaro av kolväten
3. Närvaro av katalytiskt verkande flygaska
4. Temperaturer i intervallet cirka 400-900 °C
5. Tillräckligt lång uppehållstid (gärna ett par sekunder, åtminstone)

Vad gäller att reducera bildningen av föroreningar som kräver speciella betingelser så räcker det med att *en enda* av dessa kritiska betingelser undanröjs för att problemet (=bildningen) skall reduceras radikalt.

I fallet med termisk NO_x kan vi välja att endera reducera temperaturen eller att reducera syrehalten. Vilken av de två vi väljer styrs av vad som är enklast att genomföra i den aktuella anläggningen och med hänsyn till alla övriga driftparametrar.

I fallet med klorerade kolväten är det mera besvärligt:

Om vi har ett klorhaltigt bränsle så finns klor närvarande. Detta kan vi inte komma ifrån annat än genom att byta till ett bränsle som inte innehåller något klor, men det är oftast omöjligt. Om anläggningen är till för att bränna bark, halm, sopor... så finns det mycket klor i bränslet och även i exempelvis torv eller kol finns det klor.

Om förbränningen inte är alldeles perfekt så finns det kolväten närvarande i rökgaserna i högre eller mindre utsträckning. Genom att kombinera hög temperatur i eldstaden med tillräckligt lång uppehållstid kan vi reducera mängden kolväten och därmed bildningen av klorerade kolväten. Detta är orsaken till förbränningsdirektivets krav på minst 850 °C och minst två sekunders (medel?)-uppehållstid vid samtidig närvaro av syre för avfallsförbränning.

Flygaska kan vi inte komma ifrån när vi eldar fasta eller flytande bränslen. Det finns alltid en viss mineralandel i bränslena och en del av dessa mineraler kommer att bilda små askpartiklar.

Normalt sett byggs förbränningsanläggningar för att man skall nyttiggöra bränslets kemiska energi. Ju bättre man nyttiggör denna energi desto lägre blir rökgasttemperaturen. Med eldstadstemperaturer över 900 °C och med rökgasttemperaturer under 400 °C så är det absolut nödvändigt att gasen vid något tillfälle passerar genom intervallet 900 → 400 °C, så detta kan vi inte komma ifrån.

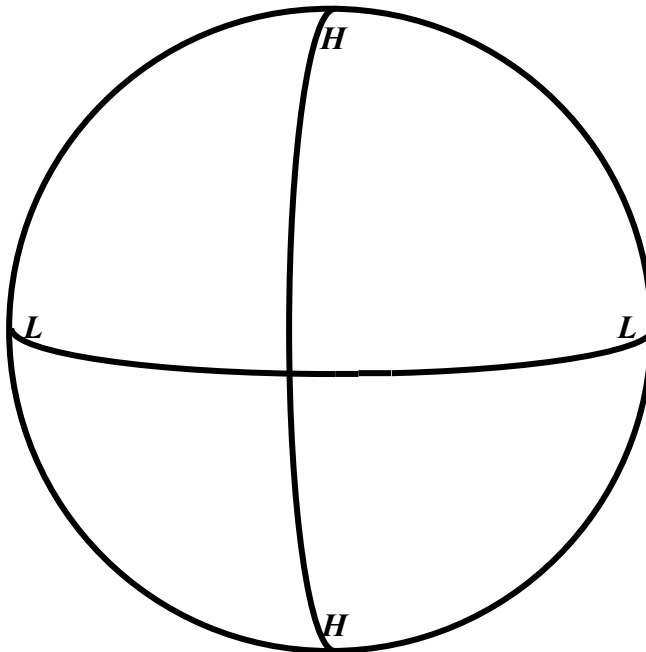
Men uppehållstiden i det kritiska intervallet kan vi påverka genom att hålla konvektionsdelen ren. I en väl sotad panna sjunker temperaturerna till nivåer väl under 400 grader inom loppet av 1 – (högst) 2 sekunder. Om däremot konvektionsdelen är illa dimensionerad och/eller illa sotad, så kan uppehållstiderna i det kritiska temperaturintervallet bli så pass långa att bildningen av klorerade kolväten hinner ske i stor omfattning.

Då det gäller den här gruppen av föroreningar gäller det alltså att identifiera vilka som är de kritiska betingelserna och att sedan vidta drift- eller dimensioneringstekniska åtgärder för att undanröja en eller flera av dem.

- Föroreningar finns av i huvudsak tre olika slag:
 - Sådana som hör samman med ofullständig förbränning
 - Sådana som hör samman med bränslets analys
 - Sådana som bildas under speciella betingelser
- Dessa olika föroreningar kan alla bekämpas genom åtgärder i den dagliga driften av anläggningen men de kräver olika typer av åtgärder beroende på exakt vilken förorening det gäller.

Kortlivade och långlivade föroreningar

Hittills har vi bara talat om hur föroreningarna bildas och inte om deras egenskaper i miljön. Låt oss ägna en stund åt detta komplex och låt oss göra det med en extremt förenklad bild av hur atmosfären uppträder.



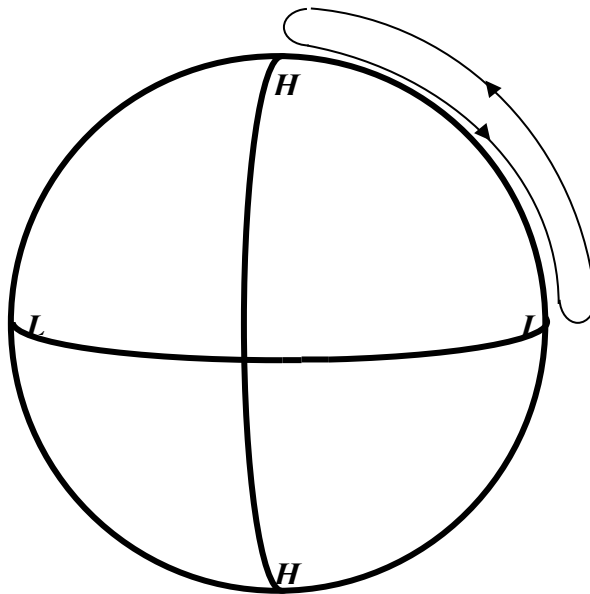
Betrakta jorden som en liten kula.

Atmosfären som system kännetecknas, mycket förenklat, av två ganska stabila zoner, nämligen två tämligen stabila högttryckszoner vid polerna och en tämligen stabil lågttryckszon vid ekvatorn.

Ett lågttryck kännetecknas av att luften i lågttrycket stiger uppåt i atmosfären (*hävs* på meteorologspråk). Under hävningen sjunker dess temperatur, idealt sett med cirka $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 100 meter men i verkligheten långsammare. Luften vid markytan är normalt sett ganska fuktig – vår och växternas andning, avdunstning från sjöar, hav och floder etc. – och när denna fuktiga luft kyls av under hävningen så kommer förr eller senare fukten att kondensera och bilda moln. När vattnet kondenserar avges värme, vilket gör att luften fortsätter att stiga och förr eller senare kan den nå en så pass låg temperatur att det inte bara faller ut vattenånga som små droppar utan att dessa droppar slår sig ihop och det bildas regn.

Ett högttryck däremot kännetecknas av att luften sjunker nedåt genom atmosfären. Om vi betraktar ett luftpaket (säg 1 m^3) en bit upp i atmosfären, t ex 5000 meter upp, så innehåller den här luften ganska litet fukt, eftersom den är så kall. När detta luftpaket sjunker ner genom atmosfären så värms det – idealt sett och för torr luft med ungefär $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per hundra meter, i verkligheten långsammare. Då torr luft värms händer ingenting dramatiskt – den fortsätter att vara torr och blir bara allt varmare. I en högttryckszon finns alltså inget självklart incitament för att bilda moln eller regn.

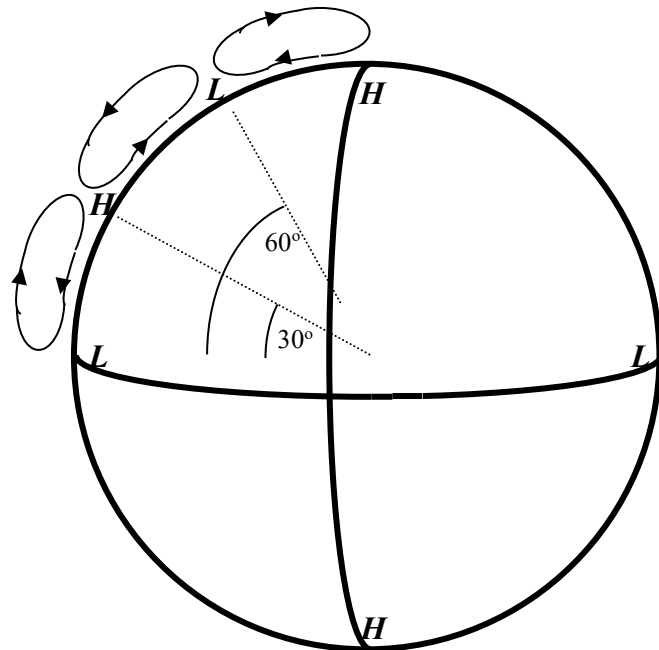
Nu resonerar vi bara kring norra halvklotet för att inte trassla till det alltför mycket. Vid nordpolen sjunker luft nedåt från höga höjder i atmosfären till låga höjder, och vid ekvatorn stiger luft uppåt i atmosfären från låg höjd till hög höjd.



I princip skulle man kunna tänka sig att detta gav upphov till en jättestor, vertikal luftvirvel över hela norra halvklotet – eller hur? En virvel där torr luft sjunker ner vid nordpolen och sedan strömmar längs jordytan till ekvatorn där den stiger uppåt igen och sedan cirkulerar tillbaka i de övre delarna av atmosfären.

Eftersom jorden roterar och Corioliseffekten kommer till, kommer en så stor virvel inte att kunna vara stabil, utan den bryts sönder i tre stycken ungefär lika stora virvlar.

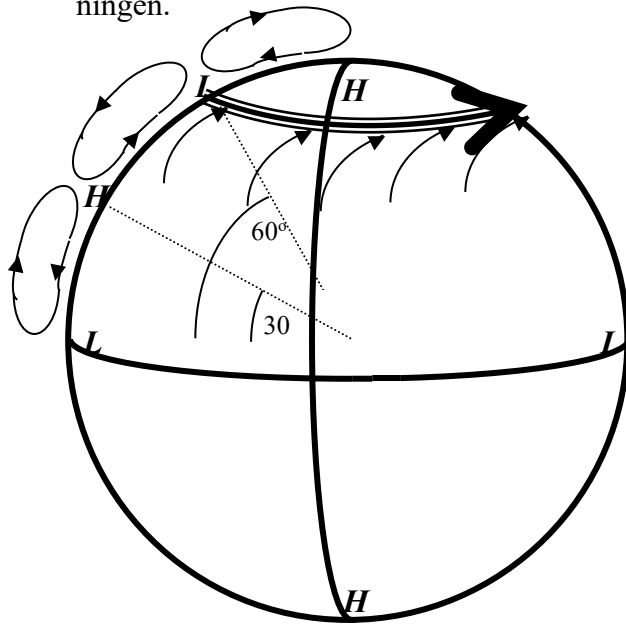
En följd av detta blir alltså att luften stiger uppåt på cirka 60 grader nordlig bredd, vilket är detsamma som att det finns en tämligen stabil lågtryckszon där, och att luften måste sjunka igen på omkring 30 grader nordlig bredd, vilket är detsamma som att det finns en i genomsnitt stabil högtryckszon där.



Så tillkommer en sak till, vid 60 grader nord:

Den luft som strömmar nära jordytan, norrut, från syd- och Mellaneuropa mot 60° N, kommer i genomsnitt att länkas av österut under sin strömning på grund av Corioliseffekten. Detta är speciellt uttalat under vintern då de här systemen är tydligast, men är märkbart i norra Skandinavien även på sommaren. I polartrakterna är de här strömningarna inte alls lika tydliga och stabila.

Resultatet är att vi får en genomsnittlig västvind vid omkring 60° N, det så kallade västvindsbältet. Det skall påpekas att den svenske meteorologen Rossby upptäckte att västvindsbältet dessutom innehåller vågor uppkallade efter honom, Rossbyvågorna, men vi struntar i den för den här framställningen.



För oss som bor häruppe på cirka 60° N gäller alltså att lågtryck i en (som det känns) aldrig sinande ström bildas över Island eller nordatlanten och sedan kommer in över oss... För att trösta oss åker vi på semester till 30° N, Medelhavet och Rivieran.

På södra halvklotet har man i huvudsak samma bild, fast tvärtom.

Nu har vi identifierat två helt olika strömningar som förekommer i atmosfären:

- Ett vertikalt mönster som består av tre virvlar från nordpolen till ekvatorn och sedan ytterligare tre virvlar från ekvatorn till sydpolen.
- Ett horisontellt mönster som vi kallar västvindsbältet.

(Det finns flera horisontella mönster av vilka kanske *monsunbältet* är mest känt)

En luftförorening som släpps ut i den vertikala virvel som är närmast nordpolen, eller i västvindsbältet själv, kommer i första hand att spridas genom västvinden och kommer alltså att från Sverige passera över Östersjön till Finland och Baltikum, över Ryssland, över den Sibiriska tundran, söder om Berings Sund, in över västra Kanada och Klippiga Bergen, över den kanadensiska tundran och Newfoundland, söder om Grönland, via Island, Nordatlanten och Storbritannien och sedan tillbaka till oss igen. Det här varvet tar allt från ett par veckor till ett par månader. Rossbyvågorna ändrar den här vägen en del – men dem bortser vi från nu.

Förutsatt att föroreningen överlever tillräckligt länge i atmosfären kan den också spridas mellan de vertikala virvlarna. Den här spridningen är långsammare och man kan grovt säga att det tar mellan 5 och 10 år för någonting att spridas från en vertikal virvel till nästa. Om vi alltså utgår från någonting som förorenat virveln över Arktis så tar det 5-10 år innan denna förorening spritts även över Mellaneuropa, 10-20 år innan den kommit till Nordafrika, 15-30 år innan den passerat ekvatorn, 20-40 år innan den nått Afrikas södra delar och Eldslandet och efter 25-50 år når den Antarktis.

De här två spridningsmönstren har alltså helt olika egenskaper:

- Det ena mönstret är ”lokalt” och ”snabbt”. Föroreningar som tvättas ur atmosfären och faller ned med regnet inom loppet av cirka 6 månader hinner på den tiden spridas inom hela Västvindsbältet men hinner inte i någon hög utsträckning spridas över jorden. Till sådana här föroreningar hör de vattenlösliga och försurande utsläppen i form av saltsyra, svavel-syra och salpetersyra, liksom en stor del av våra övergödande utsläpp och utsläppen av litet grövre partiklar.
- Det andra mönstret är globalt och långsiktigt. Långlivade föroreningar som till exempel lustgas (livslängd i atmosfären cirka 100-300 år) eller klorerade kolväten (livslängder omkring 200 år) eller submikrona partiklar (mycket lång livslängd ifall de kommer upp i stratosfären) samt alla växthusgaserna sprids först i västvindsbältet men kommer sedan långsamt att fördela sig över hela atmosfären. Det här gäller alltså i första hand sådana ämnen som inte är vattenlösliga. Fettlös DDT och PCB spreds på det här viset till pingvinerna under sena 1900-talet. Den ozonnedbrytning vi idag ser över Antarktis härrör alltså från Europeiska, Nordamerikanska och Ostasiatiska utsläpp från 1950-1970-talen. Det vi hade för oss på nittio-talet har inte ens hunnit till ekvatorn ännu...

Det är viktigt att komma ihåg att daglig driftoptimering med avseende på maximal verkningsgrad, minsta möjliga utsläpp av bränslebundna föroreningar, bästa möjliga utbränning och förbränningsstabilitet och undvikande av sådana betingelser i eldstaden som kan leda till bildning av lustgas, klorerade kolväten eller andra otrevligheter, har en global betydelse.

- Kortlivade föroreningar, till exempel kväveoxider utom lustgas, saltsyra, svaveloxider eller litet grövre flygaskepartiklar sprids huvudsakligen inom västvindsbältet omkring 60° N eller i motsvarande cirkulära strömning beroende på vid vilken breddgrad de släpps ut.
- Långlivade föroreningar som till exempel växthusgaserna, ozonnedbrytande föreningar som klorerade kolväten eller mycket små partiklar, sprids globalt över hela jorden.
- Spridningen inom västvindsbältet sker i huvudsak inom cirka 6 månader.
- Den globala spridningen tar uppemot 50 år.

Eldningsteknik

Eldstaden är anläggningens hjärta och det som sker där bestämmer anläggningens prestanda, både vad gäller verkningsgrad, ekonomi, arbetsmiljö och säkerhet. Därför är övervakningen av eldstaden kritisk och den måste finnas.

Bränslemängd, förhållandet mellan luft och bränsle, tryck och temperatur är viktiga att övervaka och övervakas i de flesta anläggningar. Nedanstående tabell visar varför dessa parametrar är viktiga och vilka åtgärder som skall vidtas om uppmätt värde avviker från börvärdet. Informationen kommer från *Vägledning för anläggningar avsedda för eldning med fasta bränslen*, VFB, som är en branschnorm. Styr- och övervakningssystemet ska vara automatiskt och driftdata ska registreras automatiskt.

Parameter	Syfte	Larm och åtgärder
Bränslemängd	För stor mängd kan innebära alltför mycket oförbränt bränsle i eldstaden	Processlarm
Kvot luft/bränsle ¹	För litet luft kan innebära att explosiv gas finns i eldstaden	Processlarm Avbryt förbränningen och vädra eldstaden
Eldstadstryck	Både för högt och för lågt tryck innebär säkerhetsrisk. Normal fördröjning 20 sek	Säkerhetslarm (A-larm) Avbryt luft- och bränsletillförsel Manuell återstart krävs
Eldstadstemperatur ²	För låg: Bildning av explosiva gaser i eldstaden För hög: Asksmältning och slagging	Processlarm Avbryt bränsletillförsel och vädra eldstaden

¹ Förhållandet luft/bränsle mäts genom t.ex. automatisk rökgasanalystrustning, O₂, eller CO-mätning.

² Tänk på att temperaturgivare ska placeras så att mätresultatet inte väsentligt påverkas av strålning från flammor och kylta ytor.

Den vanligaste typen av eldningsteknik är **rosteldning**, men det finns även eldstäder med bubblande fluidiserad bädd, cirkulerande fluidiserad bädd, brännare för pulverformigt bränsle och sådana anläggningar där man bara har en liten mängd bränsle i själva eldningsanordningen (t.ex. pelletsbrännare). Förutom den allmänna övervakning som nämnts i tabellen ovan tillkommer ytterligare övervakning av temperaturen för dessa eldstäder, vilket tas upp här.

För eldstäder med **bubblande eller cirkulerande fluidiserad bädd** är bäddtemperaturen a och o för en fungerande förbränning. Att bäddtemperaturen är tillräckligt hög säkerställs med hjälp av en startbrännare med tändanordning och flamövervakning. Även brännare för **pulvereldning** har sådan flamövervakning. Om det inte är någon flamma i brännaren under uppstart eller drift, ska bränsletillförseln till brännaren stoppas. Säkerhetslarm (A-larm) indikeras och det krävs manuell återstart av eldningssystemet.

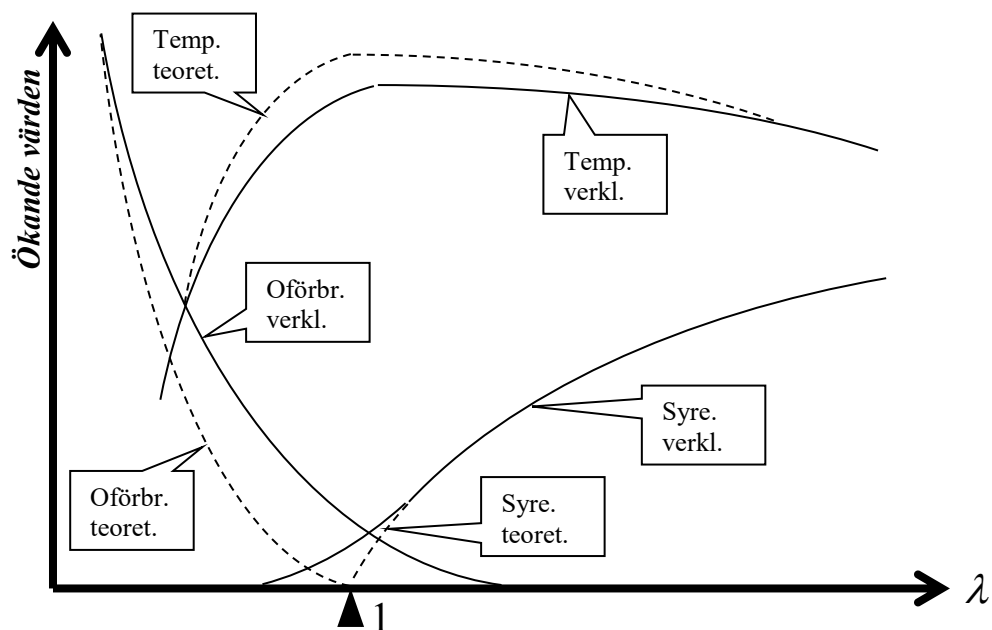
I en **cirkulerande fluidiserad bädd** övervakas även temperaturen i eldstadens topp, i gasen efter bäddmaterialavskiljaren (vanligtvis en cyklon) men före de värmeupptagande ytorna i konvektionsdel och överhettare, samt före ekonomiser och luftförvärmare. Vid för hög temperatur på något av dessa ställen utlöses temperaturvakt. Förbränningen avbryts, bränsleinmatningen stoppas, säkerhetslarm (A-larm) indikeras och manuell återstart krävs.

Ett av kännetecknen på en effektiv förbränning är att dess miljöpåverkan är minimal, ett annat är att den alltid drivs vid högsta möjliga verkningsgrad. Hur kan man då förena dessa båda aspekter i den dagliga driften?

För att förstå detta måste man för det första ha klart för sig vilka som är de viktigaste parametrarna för att beskriva förbränningen.

Det kvalitativa diagrammet här nedan visar hur mängden av oförbrända kolväten ("CO, sot etc"), och syrehalten ("O₂") i rökgaserna från en förbränningsanläggning varierar med luftfaktorn λ .

Vad diagrammet visar är hur mängderna av oförbränt bränsle ökar mycket snabbt med avtagande luftfaktor då man kommer till understökiometriska förhållanden, dvs $\lambda < 1$. Vid överstökiometrisk förbränning – då luftfaktorn är större än 1 – är halterna av oförbrända bränslerester låga medan däremot syrehalten successivt stiger med ökande luftfaktor.



I avsnittet om föroreningsbildning beskrevs de tre huvudsakliga bildningsvägarna för kväveoxider, NO_x, och baserat på den beskrivningen kan man förstå att kväveoxidbildningen avtar snabbt vid understökiometriska förhållanden samtidigt som den genomlöper ett maximum strax över luftfaktor 1 då temperaturen är hög och fritt syre finns tillgängligt. Vid ökande luftfaktor avtar temperaturen och den termiska bildningen förlorar i betydelse, trots de höga syrehaltererna.

Stegförbränning

I praktiken är alla pannor idag utrustade för stegförbränning, dvs förbränningsluften tillförs i två eller flera steg i pannan. Avsikten med detta är att reducera utsläppen av kväveoxider och teorin bakom stegförbränningen kan i huvudsak förklaras genom att man betraktar eldstaden som uppdelad i tre seriekopplade volymer. Den första volymen – primärzonen – utgör i praktiken en förgasningszon där det fasta bränslet i huvudsak omvandlas till en brännbar gasblandning vid låg temperatur – cirka 800-900 °C. Den gas som bildats i primärzonen kommer så in i en fördröjningsvolym i eldstaden, en volym driven och dimensionerad för att vissa bestämda kemiska reaktioner skall kunna äga rum där. I denna volym krävs att det inte finns fritt syre tillgängligt samtidigt om temperaturen skall vara i intervallet 800-900 °C och uppehållstiden skall vara ”tillräcklig”. Efter denna fördröjningsvolym kommer så gasen in i eldstadens tredje avdelning – slutförbränningszonen – till vilken tillförs tillräckligt med luft för att fullständigt bränna ut bränslegasen. Denna slutförbränningszon är i huvudsak en gasbrännkammare och bör dimensioneras och konstrueras med hänsyn till detta. I denna tredje volym är det viktigt att temperatur och blandning styrs på ”rätt” sätt.

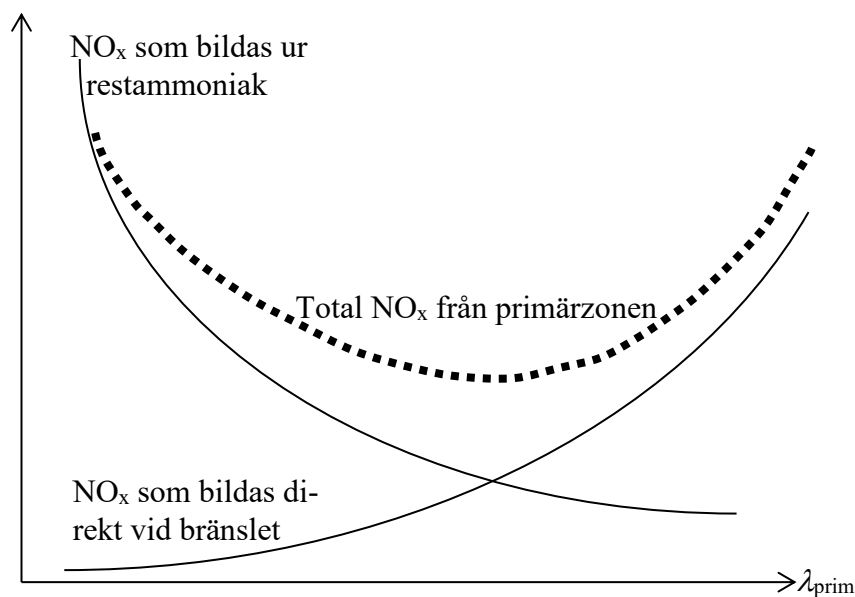
Den första delvolymen kallas ofta ”primärzonen” och den tredje ”sekundärzonen”. Processen kan i huvudsak förklaras på följande förenklade sätt:

1. Pannans primärzon drivs vid understökiometriska förhållanden. Under dessa villkor kommer bara en mindre del av bränslekvävet att kunna oxideras till kväveoxid medan en inte oväsentlig del av bränslekvävet kommer att förekomma som ammoniak i gasfasen. NO visar en ökande halt med ökande luftfaktor i primärzonen, eftersom bildningen av bränsle-NO_x är mycket känslig för syretillgången i primärzonen. En stor del av det kväve som inte bildar NO_x i primärzonen kommer att finnas som ammoniak, vilket reducerar en del av den bildade kväveoxiden samtidigt som ammoniak förbrukas i den understökiometriska primärzonen. Alltför kort uppehållstid i primärzonen leder till att reduktionen inte hinner ske, vilket leder till en förhållandevis hög ammoniakhalt i den gas som kommer vidare till sekundärzonen.
2. Förutsatt gynnsamma förhållanden efter primärzonen – tillräckligt lång uppehållstid i kombination med ”rätt” temperaturintervall – kommer en del av den bildade kväveoxiden att reduceras med ammoniak, i huvudsak enligt summareaktionen $6 \text{ NO} + 4 \text{ NH}_3 \leftrightarrow 6 \text{ H}_2\text{O} + 5 \text{ N}_2$. Detta är samma totalreaktion som utnyttjas vid SCR- och SNCR-teknik för NO_x-reduktion. Upphållstiden efter primärzonen måste alltså vara så dimensionerad att NO_x-reduktionen hinner ske, dels för att mängden inkommande NO_x till sekundärzonen skall vara låg men också för att mängden ammoniak in till sekundärzonen skall bli låg.
3. I sekundärzonen – då luft tillförs för att slutförbränna de oförbrända kolväten, CO och andra brännbara gaser som bildats i primärzonen – kommer gasen alltså att innehålla lägre NO- och ammoniakhalter än den ursprungligen hade då den bildades. Eftersom ammoniak vid överstökiometriska förhållanden och höga temperaturer snabbt oxideras till NO och N₂ enligt summareaktionen $4 \text{ NH}_3 + 4 \text{ O}_2 \leftrightarrow 2 \text{ NO} + \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$, kommer förbrukningen av ammoniak under transporten efter primärzonen att verksamt bidra till att sänka de totala NO-halterna. Samtidigt har

en del av den NO som bildades i primärzonen alltså förbrukats genom att den reducerats med ammoniak under transporten till sekundärzonen. I kombination med en effektiv temperaturkontroll i sekundärzonen – för att undvika termisk NO-bildning – kommer alltså stegförbränningen att vara en effektiv metod för NO-reduktion.

I sekundärzonen sker endast en mycket marginell reduktion av kväveoxid utan den kväveoxid som till slut transporterats in till sekundärzonen kommer i huvudsak att finnas kvar. Däremot sker en viss nybildning, dels via oxidation av restammoniak och dels via den termiska mekanismen. Denna nybildning begränsas genom styrning av syrehalt och temperatur i sekundärzonen. De variationer i NO_x-halt som förekommer i primärzonen kommer alltså inte att dämpas påtagligt i sekundärzonen utan återfinns i skorstenen.

En alltför låg luftfaktor i primärzonen leder dels till så låga temperaturer att reduktionen av NO_x med ammoniak inte hinner ske och kan dessutom leda till att ammoniakhalten i gasen efter primärzonen blir för höga. I detta fall kommer alltså den önskade NO_x-reduktionen inte att ske samtidigt som halten av restammoniak till sekundärzonen blir förhållandevis höga. I den överstökiometriska sekundärzonen kommer slutligen en stor del av restammoniak att oxideras till NO. Även om en låg luftfaktor i primärzonen alltså leder till att bara en mycket liten del av bränslevävet initialt bildar NO, kommer de slutliga mängderna av kväveoxid att bli förhållandevis höga.

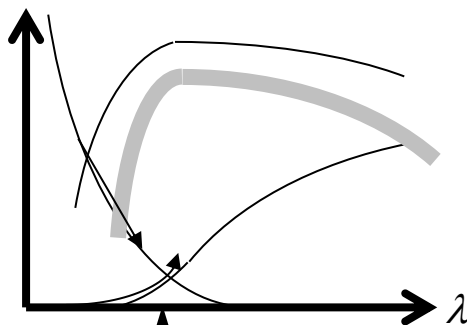
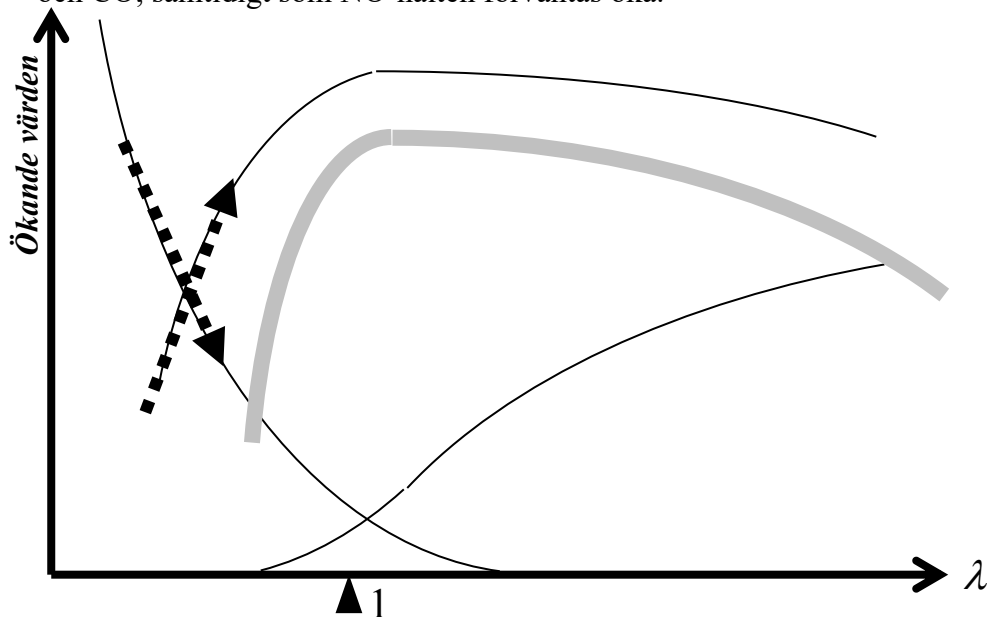


En alltför hög – men fortfarande understökiometrisk – luftfaktor i primärzonen ger dels en hög omvandlingsgrad av bränslevävet till NO redan i inledningsfasen och dessutom blir mängden ammoniak som finns tillgänglig för reduktion av denna initialt bildade NO begränsad.

Slutsatsen av det ovanstående är, att det finns en optimal luftfaktor att använda i primärzonen.

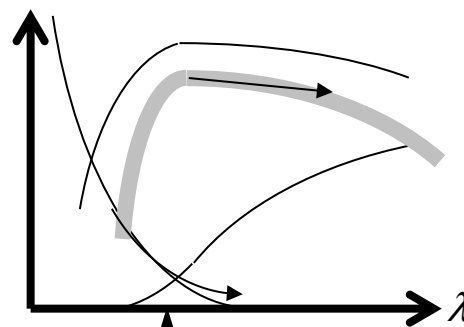
Även om det inte syns tydligt i det kvalitativa diagrammet ovan förväntar man sig en tydlig samvariation mellan syre och CO i förbränningsammanslagning. Sambandet skall teoretiskt sett vara sådant att låga syrehalter sammanhänger med höga CO-halter och i den ideala situationen skulle syre och CO inte kunna förekomma samtidigt utom i det förhållande som beskrivs av vattengasjämvikten. I praktiska situationer kan man inte räkna med att nå detta värde, utan utbränningen av CO begränsas av uppehållstiden och av blandningseffektiviteten. Den lägsta uppnåbara syrehalten utan att CO-halten stiger väsentligt utgör ett mått på anläggningens effektivitet i omblandning.

Det nedanstående – förenklade – diagrammet illustrerar några av de viktigaste faktorerna. De två pilarna illustrerar hur halten oförbränt bränsle avtar med ökande luftfaktor, samtidigt som kväveoxidhalten ökar, *vid luftfaktorer under 1*. I den gas som lämnar pannans primärzon, förväntar man sig alltså en samvariation där det vid låg luftfaktor har bildats stora mängder oförbrända kolväten, CO och liknande samtidigt som det har bildats bara små mängder kväveoxider. Då luftfaktorn i primärzonen ökar – men observera att den fortfarande är lägre än 1 – minskar mängden oförbränt, kolväten, sot och CO, samtidigt som NO-halten förväntas öka.

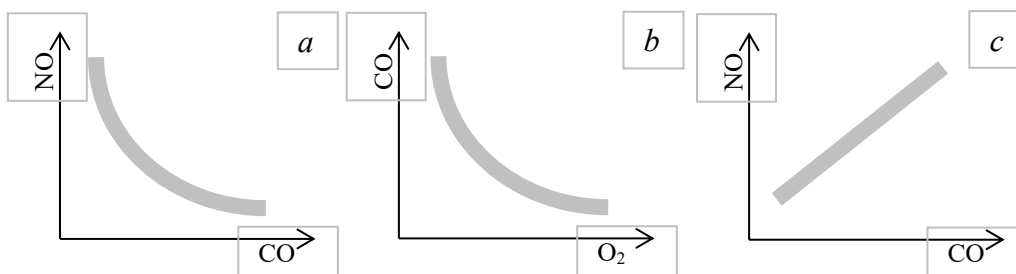


Pilarna i diagrammet härintill visar hur ökande luftfaktor leder till en successivt allt brantare ökning av syrehalten samtidigt som halten av oförbrända kolväten, sot och CO avtar.

Det vidstående diagrammet visar hur NO-halten avtar med ökande luftfaktor samtidigt som halten av oförbränt (CO) också avtar vid ökande luftfaktorer – då luftfaktorn överstiger 1 och dessutom överstiger det värde där den maximala NO-halten uppträder.



Om man sammanställer dessa observationer ser man, att efter en ”bra” eldstad, förväntar man sig teoretiskt att syrehalten, CO-halten och NO-halten i huvudsak skall samvariera på följande vis:



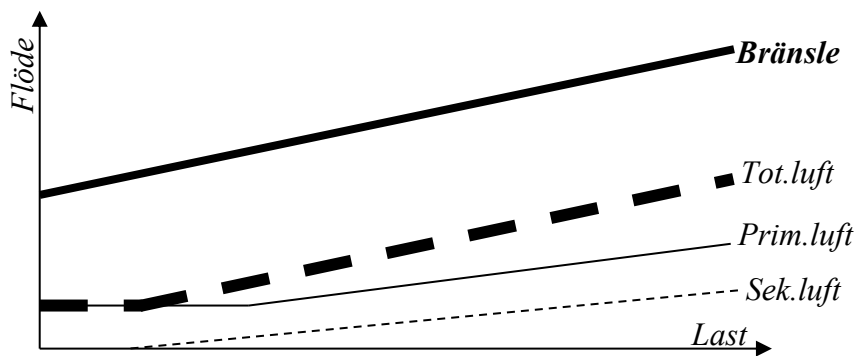
- Figur *a* visar den förväntade, kvalitativa, samvariationen mellan oförbränt – här betecknat med CO – och NO vid understökiometriska förhållanden.
- Figur *b* visar den förväntade, kvalitativa, samvariationen mellan syre och oförbränt i rökgaserna vid överstökiometriska förhållanden.
- Figur *c* visar den förväntade, kvalitativa, samvariationen mellan oförbränt och kväveoxid vid överstökiometriska förhållanden, då luftfaktorn överstiger det värde där den maximala NO-halten uppträder.

Typisk reglerstrategi

Pannregleringen i mindre, rosteldade, pannor – under cirka 20 MW – är i många fall uppbyggd med samma grundläggande logik:

1. Pannan effektregleras – dvs bränsleinmatningen styrs – med returvattentemperaturen som parameter. Sjunkande returvattentemperatur => ökad bränsleinmatning och vice versa.
2. Primärluften – luften genom rosten – regleras linjärt mot bränsleinmatningen bortsett från vid låga laster då primärluftflödet hålls konstant för att garantera kylning av rosten.
3. Sekundärluften regleras med hjälp av syrehalten i rökgaserna.
4. Temperaturerna i såväl primär- som sekundärzonerna begränsas ofta uppåt med hjälp av rökgasåterföring för att förhindra skador på anläggningen eller alltför mycket asksmältning.

Det ovanstående leder till huvudsakliga flöden enligt diagrammet:



Den här reglerstrategin leder alltså till att luftfaktorn i primärzonen blir förhållandevis hög vid låga laster och avtar vid höga laster – även om syrehalten skulle hållas konstant över hela lastområdet. I praktiken finns det dock flera saker som påverkar hur flödena ställs in och var brytpunkterna läggs.

Vid låg last – då primärluften helt dominerar – blir kontakten mellan bränsle och luft god. Luften pressas i detta fall upp genom en fast bränslebädd, diffusionsavstånden är korta och syret kommer att utnyttjas maximalt effektivt. Samtidigt är gasflödet minimalt och uppehållstiden maximal. Detta ger förutsättningar för en god utbränning av bränslet redan vid en låg syrehalt.

Det som komplicerar bilden är, att rosten ofta är uppdelad i flera zoner. Den luft som tillförs rostens övre del – torkzonen – deltar endast i liten grad i förbränningsreaktionerna. Den luft som tillförs rostens mittdel – pyrolyszonen – utnyttjas i huvudsak dels för den partiella oxidation som är nödvändig för pyrolysen och dels för förbränning av pyrolysgaser. Den luft som tillförs rostens nedre del – slutförbränningszonen – utnyttjas i huvudsak för heterogen charutbränning och förgasning. Fördelningen av luft mellan dessa tre zoner påverkar alltså hur väl syret utnyttjas i själva bränslebädden.

- Vid **rosteldning** kommer torkningen att vara den dominerande processen på rostens övre del och längden hos torkzonen kommer alltså att variera dels med partiklarnas fukthalt och dels med deras storlek. Eftersom färsk och fuktig flis ofta tenderar att innehålla en större andel grovt material än vältagd flis kommer det här att påverka fördelningen av olika zoner längs rosten.
- I **fluidbäddar** – både bubblande och cirkulerande – kommer torktiden inte att synas på samma sätt som vid rosteldning men kommer däremot att avspeglas i bäddens temperatur.
- Vid **pulvereldning** kommer torktiden att synas i avståndet mellan brännarens mynning och den punkt där flammen tänds. Eftersom antändningen i det här fallet är mera känslig än för de andra två teknikerna måste fukthalt och partikelstorlek övervakas extremt noga just vid pulvereldning.

Ovanför bränslebädden eller efter de primära flammorna blir strömningen vid låg last mycket långsam – typiskt under cirka 1 m/s. Detta innebär att den turbulenta omblandningen blir långsam och stråkbildning är ett typiskt fenomen vid låglast och kan eventuellt leda till höga CO-halter trots att det totala syreöverskottet är högt.

Speciellt om luftfaktorn i bäddens mittzon – pyrolyszonen – är hög, förväntas höga NO-halter. Om, å andra sidan, luftfaktorn i bäddens mittzon är nära cirka 0.6, kan den långsamma inblandningen av överskottssyret från de två andra zonerna leda till mycket låga NO-halter vid låg last på grund av låg temperatur vid förbränningen av pyrolysgaserna.

- Vid **rosteldning**, där ju gashastigheterna i primärzonen begränsas av den låga densiteten hos de pyrolyserade partiklarna såsom sagts tidigare, kan den tillgängliga rörelseenergin för att skapa stora virvlar vara för låg. Om rörelseenergin är för liten kan makroblandningen bli otillräcklig med stråkbildning som följd.
- I **fluidiserade bäddar** – både i de nedre regionerna ovanför bottenbädden i bubblande bäddar men speciellt i cirkulerande bäddar – sker dissipationen snabbare men det leder inte bara till att mikroblandningen blir bättre utan också till att makroblandningen blir sämre. Resultatet kan bli stråkbildning och lokal överhettning. Utöver att de fasta partiklarna delvis kommer att brinna i cyklonen vid eldning i cirkulerande fluidbäddar är även den förhållandevis dåliga makroblandningen i schaktet en förklaring till att det brinner i cyklonen: Det är först i cyklonen som mikroblandningen tar fart och därför kommer slutförbränningen av en del av gasen också att ske där.
- Vid **pulvereldning** är det brännarens utformning samt hastigheterna och riktningen genom de enskilda luftregistren som bestämmer hela turbulensstrukturen.

Vid låg last kan man alltså få:

Hög CO även vid höga syrehalter då pyrolysgaserna inte hinner brinna ut på grund av den långsamma blandningen. Detta är typiskt då luftflödet till rostens mittzon är alltför lågt.

Låg CO i kombination med låga syrehalter om luftflödet till rostens mittzon är högt nog för att bränna ut pyrolysgaserna samtidigt som luftflödet till utbränningszonen är högt nog för att oxidera charresten fullständigt.

I det första fallet kan man förvänta sig *låga NO-halter* – i det andra förväntar man sig *höga NO-halter*.

Vid medelhög last – då primär- och sekundärluft tillförs samtidigt – gäller allmänt sett att luftfaktorn i primärzonen i genomsnitt är lägre än vid det förra fallet. Detta betyder att primärzonen drivs närmare NO-optimala premisser än vid de lägsta lasterna samtidigt som CO-halten i gasen från primärzonen stiger – men å andra sidan blir totalprestanda mera beroende av hur sekundärluften blandas in i primärzonens produktgas.

Allmänt sett ger medelhög last bättre blandningsförutsättningar än låg last eftersom rörelseenergin i ingående gas- och luftstrålar är högre än vid låglast och följaktligen energin för blandning är större. Å andra sidan är uppehållstiden kortare än vid låglast.

Förutsatt en korrekt dimensionerad sekundärzon kan man alltså få *låg CO* i kombination med *låg NO* och *låg O₂*.

Om sekundärzonen däremot ger en dålig eller ofullständig omblandning, stråkbildning, kan det inträffa att utbränningen av den bildade kolmonoxiden blir ofullständig samtidigt som NO-halten är låg. I sådana fall fås alltså *låg NO* i kombination med *hög CO* och *hög O₂*.

Vid hög last – då förhållandet mellan primär- och sekundärluft allmänt sett bör närma sig det optimala för NO-reduktion – nämligen cirka 50/50 – samtidigt som rörelseenergin för blandning är maximal, bör man vid en korrekt dimensionerad eldstad nå de bästa resultaten avseende alla; CO, NO och O₂.

Givetvis kan man tänka sig flera andra kombinationer, men dessa är ganska typiska. De olika blandningsförhållandena kommer alltså att påverka hur gaserna från primärzonen antänds.

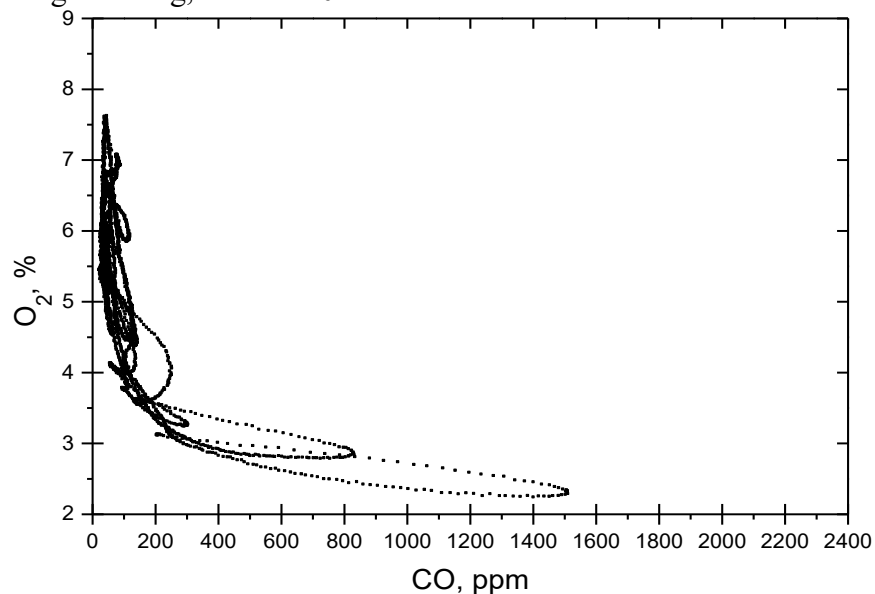
Allmänt sett brinner gaser med synliga flammor. En väl blandad flamma, dvs. en där bränslegas och luft är väl blandade, kan under vissa omständigheter vara helt genomskinlig och har då en blå färg. En sådan flamma innehåller inget sot. Det här fenomenet kan man se i den nedre delen av en vanlig stearinljuslåga. Oftast kommer det däremot att bildas sot i flammen. Sotpartiklarna är fasta, kristalliska, kolstrukturer som brinner långsamt. Eftersom de befinner sig i en het gas, flammen, kommer de att börja glöda och sot i en flamma syns dels genom att den får en gul, gulröd eller röd färg beroende på temperatur, dels genom att flammen blir ogenomsynlig. Det här kan man se i den övre delen av en stearinljuslåga.

- Vid **rosteldning** avges pyrolysgaserna nere i bränslebädden och kan – beroende på hur mycket luft som finns tillgänglig – även antändas där. I så fall får man räkna med att förbränningen av pyrolysgasen kommer att förbruka allt syre så att det inte finns något fritt syre kvar i bäddens övre del. Däremot kommer gasen att bli mycket het och på så sätt driva på pyrolysen av de partiklar som befinner sig i bäddens övre del.
- Vid **eldning i fluidiserad bädd** i första hand bubblande men även cirkulerande – kommer varje enskild partikel att avge ”sin” pyrolysgas i sin egen omgivning och om gasen antänds av den heta sanden kommer också en stor del av gasförbränningen att ske i partikelns närhet.
- Vid **pulvereldning** blir det olika situationer beroende på var i flammen man befinner sig. Om pyrolysgasen antänds nära bränsleinblåsningen kan det vara så att partiklarna befinner sig så tätt att ett ”moln” av brinnande pyrolysgas omger flera partiklar på en gång. Om gasen däremot antänds längre nedströms är partiklarna oftast så separerade att varje enskild partikel omges bara av ”sin egen” gas.

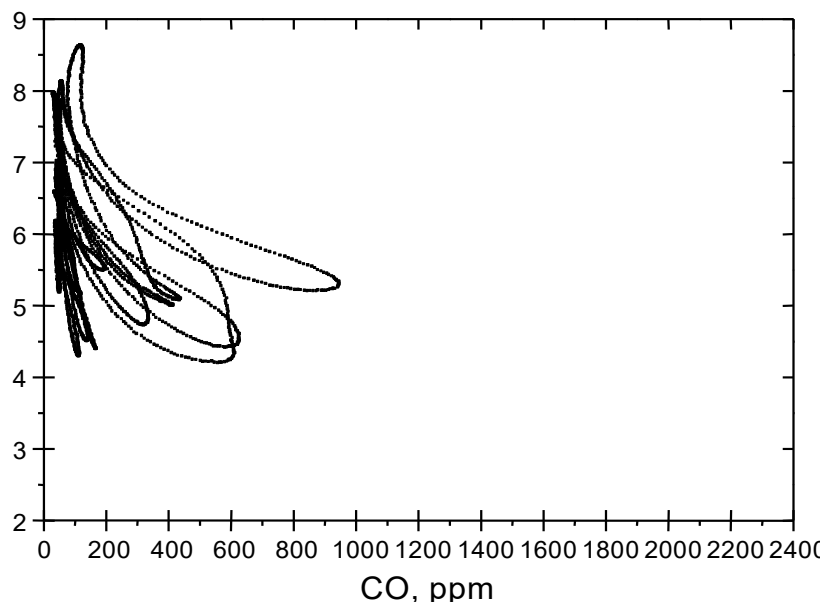
Finns det några bra pannor?

Svaret på den provocerande frågan i rubriken är att – Ja, det finns det.

Diagrammet visar hur CO och O₂ samvarierar i en 6-MW, rosteldad panna vid knappt halv last. Värdena är tagna från samma mättillfälle som de tidigare jämförelserna mellan en 6 och en 4 MW panna, se avsnittet om föroreningsbildning, sidorna 40 och 41.

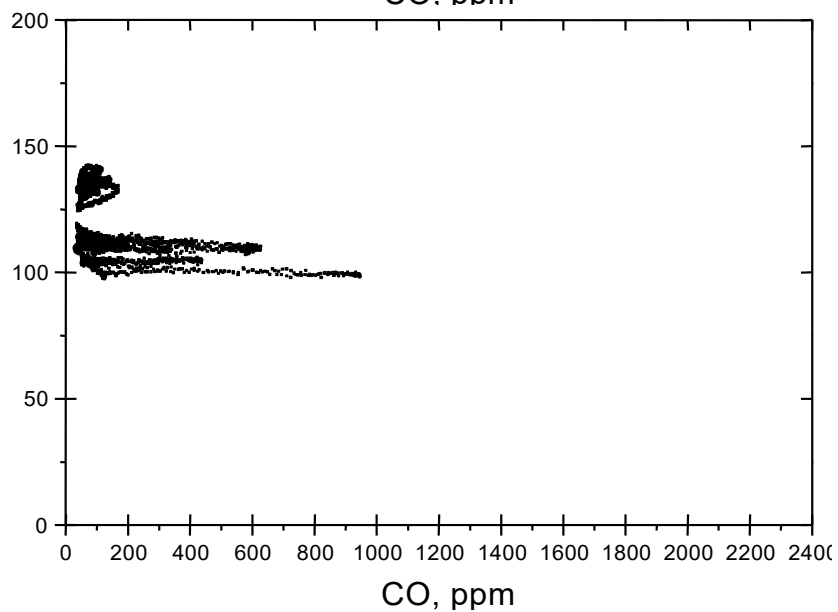
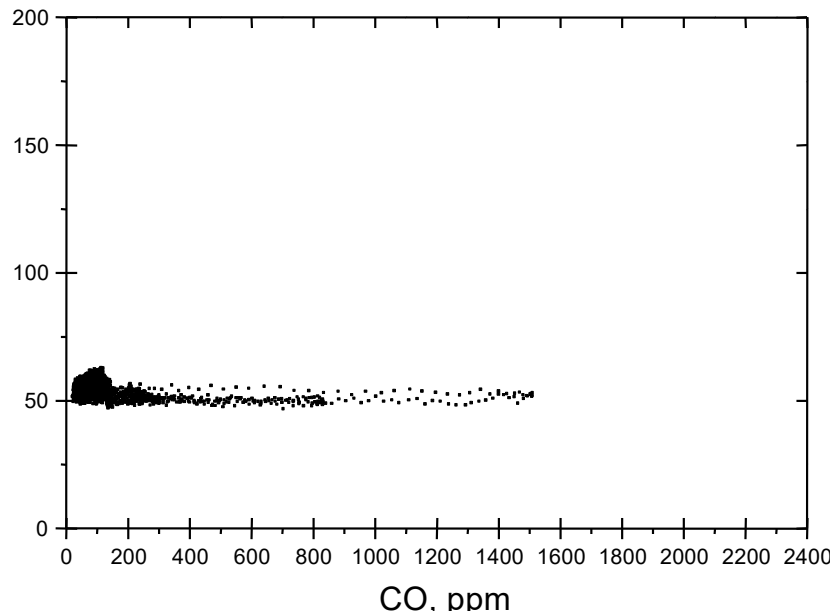


Här visas motsvarande värden för den 4 MW briketteldade pannan.



I det första diagrammet syns tydligt hur syrehalten kan regleras ner till omkring 4 % innan CO-halterna ”sticker iväg”, medan den briketteldade pannan, det andra diagrammet, inte alls visar ett lika tydligt uppträdande.

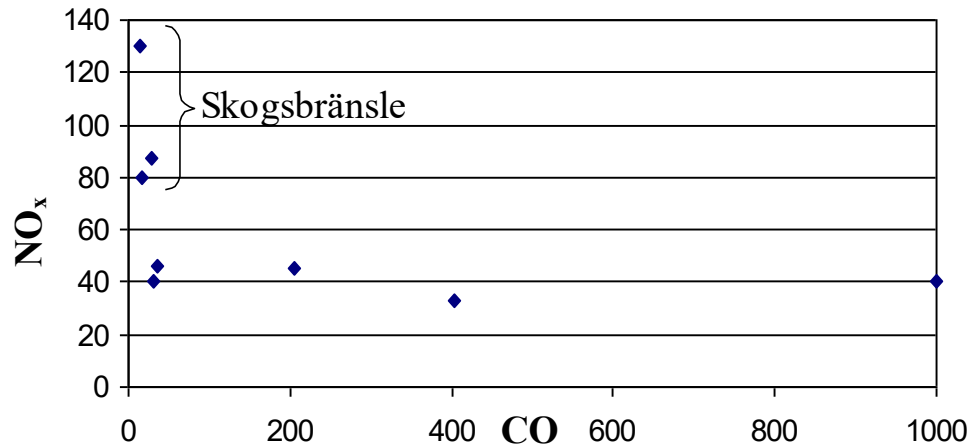
Detta uppträdande tyder på dålig omblandning i sekundärzonen – en slutsats som underbyggs när man ser NO-halterna i de två anläggningarna plottade mot CO-halterna:



Det övre diagrammet – från den groteldade pannan – visar hur NO-halten är låg och oberoende av CO medan däremot det undre diagrammet – från den briketteldade pannan – dels visar högre NO-halter och dessutom visar en tydlig trend att låga CO-halter kan ge upphov till extra höga NO-halter medan höga CO-halter däremot verkar ge lägre NO.

Dessutom visar den briketteldade pannan väsentligt högre NO-halter överlag än vad den groteldade pannan gör. Även detta är en stark indikator på dålig omblandning i sekundärzonen.

Det är viktigt att poängtera, att även om eldstaden alltså har ett helt avgörande inflytande på förbränningskvaliteten så är man inte *helt* oberoende av bränslekvaliteten.



Diagrammet här ovan – mätdata från Emissionsklustret inom BHM-projektet – visar dels några typiska månadsmedelvärden avseende CO och NO från rosteldade pannor med skogsbränslen (grot), tre värden, och dels typiska månadsmedelvärden från fem rosteldade pannor med rena stamvedsbränslen, briketter och i något fall pellets eller sågspån.

De lägre NO-värdena från stamvedsbränslena kan förklaras med att de genomgående har lägre kvävehalter än de blandade bränslena.

De höga CO-halterna från stamvedsbränslena kan förklaras med att de förädlade bränslena – briketter och i vissa fall även pellets – kan ge upphov till en hög andel finfraktion. Samma sak gäller även sågspån.

Avrundning

Förbränningsteknikens tre T'n – Tid, Temperatur och Turbulens – utgör de främsta medlen för att styra anläggningarna och de kan också användas för att, i många fall, diagnostisera anläggningar som inte fungerar korrekt.

Materialet avser att illustrera hur dessa tre T'n samverkar och att det inte är alldeles självklart hur de skall väljas i en given anläggning där man valt en bestämd kombination av bränslekvalitet och förbränningsteknik.

Vad man kan säga är att det inte är självklart eftersträvansvärt att ha längsta möjliga tid på sig i förbränningssammanhang. Om till exempel en klorhaltig rökgas, i närvaro av flygaska och med ett visst innehåll av oförbrända kolväten uppehåller sig alltför lång tid i en zon där temperaturen är mellan 400 och 900 grader så riskerar man bildning av klorerade kolväten. Det är inte heller självklart eftersträvansvärt att ha kortaste tid eftersom förbränningsreaktionerna då kanske inte hinner avslutas.

Beträffande temperaturen gäller att ju högre temperatur desto långsammare turbulent blandning. Eftersom den turbulenta blandningen ofta är det steg som bestämmer utbränningshastigheten så kan en alltför hög temperatur ge en onödig fördröjning av utbränningen.

Alltför låga temperaturer gör att de kemiska reaktionerna blir långsamma och leder alltså även det till onödigt långa utbränningstider.

En blandning som är så intensiv att den närmar sig det teoretiska fallet med en perfekt omblandning leder till att genombrottstiden för gasen i eldstaden kryper ner mot noll. Det innebär att en väsentlig del av den gas som finns i eldstaden får alltför kort uppehållstid för att ens ha en teoretisk chans att hinna brinna ut.

En ofullständig omblandning leder till att syret och bränslet inte blandas med varandra i eldstaden vilket, även det, leder till att en ökande del av bränslet inte får chansen att brinna ut.

Det gäller alltså att anpassa tiden, temperaturen och turbulensen till det bränsle och till den anläggning man har. Här sätter anläggningen vissa gränser beroende på dimensionering, konstruktion och materialval och man kan inte pressa en given anläggning att med gott resultat hantera bränslen med alltför varierande egenskaper.

- Driftpersonalen ansvarar för att anläggningen alltid går på rätta T'n.
- Bränsleinköparen ansvarar för att bränslet är anpassat till anläggningen.
- Driftledningen ansvarar för att anläggningen går inom rätt lastområde.

Tillsammans kan man åstadkomma en effektiv förbränning med minimala miljöeffekter.