

**SÄÄTÖTEKNIIKAN LABORATORIO**

**LD-KG-konvertterin  
dynaaminen ohjaus**

Jari Ruuska, Janne Peltonen ja Kauko Leiviskä

Raportti B No 41, Helmikuu 2003



## **LD-KG-konvertterin dynaaminen ohjaus**

Jari Ruuska, Janne Peltonen ja Kauko Leiviskä

Oulun yliopisto, Säätötekniikan laboratorio

**Tiivistelmä:** Teräksen valmistus LD-konvertterissa on perinteisesti pohjautunut ns. staattisiin malleihin konvertteriprosessista eli prosessin aine- ja energiataseisiin perustuvaan panoslaskentaan, jonka avulla konvertterista saatavan raakateräksen koostumus ja lämpötila on pyritty saamaan halutuksi siten, ettei lisäpuhallusta tai ylimääräistä lisäaineseostusta tarvita. Dynaamisella ohjauksella pyritään määrittämään prosessin tila koko puhallusprosessin ajan tai lähellä lopetushetkeä, jolloin voidaan oikea-aikaisesti lopettaa happipuhallus.

Dynaamisen ohjauksen mahdollistaa riittävän tarkat prosessimallit ja mittausinstrumentoinnin riittävä laatu. Riittävän tarkkuuden ja käytettävyyden haasteisiin on kehitetty useita uusia tekniikoita, joita on koeteltu oikeissa tehdasoloissa hyvin tuloksin, lupaavimpia näistä ovat tutkalla tehtävä konvertterin pinnanmittaus, savukaasujen jatkuva lämpötilan ja koostumuksen mittaus sekä lämpötilan ja hiilipitoisuuden mittaus pudotussondilla.

Dynaamisessa ohjauksessa käytetään useita, ainakin osittain kokeellisesti määritettyjä matemaattisia malleja kuvaamaan prosessin eri vaiheita ja tilanteita. Vaikka pyrkimys on yleispäteviin konvertterimalleihin, mallien parametrit on aina sovitettava laitoskohtaisesti. Mallintaminen on luonteeltaan jatkuvaa ja sen parametreja päivitetään sulatusstatistiikan mukaan.

Puhalluksenaikaissa mittauksessa saadusta tiedosta konvertteriprosessin tila määritetään dynaamisen mallin avulla ja puhalluksen optimaalinen lopetushetki voidaan määrätä ja tarvittaessa tehdä korjaavia ohjaustoimenpiteitä. Apulanssitekniikka on ollut käytössä pitkään ja se tarjoaa luotettavan tekniikan teräksen laadun varmistamiseksi puhalluksen aikana ja lopussa. Pudotussondin etuja ovat halvemmat kustannukset ja mitätön prosessin häiriintyminen.

Raportin tavoitteena on selvittää dynaamisen ohjauksen menetelmät ja periaatteet sekä käytetyt tekniikat. Kirjallisuudesta löytyy selvityksiä useista laitoskohtaisista modernisointiprojekteista. Näissä koko konvertterin ohjausjärjestelmä prosessitietokoneineen on yleensä uusittu sekä uusia prosessimalleja dynaamista ohjausta varten on otettu käyttöön tai vanhoja malleja paranneltu.

**Hakusanat:** LD-KG-konvertteri, dynaaminen ohjaus, lämpötilamalli, pudotussondi

**ISBN 951-42-6956-X**  
**ISSN 1238-9404**  
**ISBN 951-42-7546-2 (PDF)**

**Oulun yliopisto**  
**Säätötekniikan laboratorio**  
**PL 4300**  
**FIN-90014 OULUN YLIOPISTO**



## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 LD-KONVERTTERIPROSESSI	6
2.1 Raakarauta	8
2.2 Poltettu kalkki	8
2.3 Lisäaineet (fluksit)	9
2.4 Romu ja lämpötilaa korjaavat lisäaineet	9
2.5 Kaasupuhallus	10
2.6 Puhalluksen kulku	12
2.7 Teräksen kaato	14
3 KONVERTTERIN MITTAUSTEKNIikka	15
3.1 Apulanssit	15
3.2 Pudotussondit	17
3.3 Savukaasumittaukset	19
3.4 Mittaukset muilla menetelmillä	20
4 KONVERTTERIN MALLIT JA DYNAAMINEN OHJAUS	23
4.1 Staattinen malli	24
4.2 Puhalluskäytäntö ja puhalluspraktiikka	25
4.3 Dynaaminen malli	27
4.4 CONSIM-konvertterin simulointiohjelma	29
4.5 Dynaaminen ohjaus savukaasumittaukseen perustuen	30
5 DYNAAMISEN OHJAUKSEN JÄRJESTELMÄT	31
5.1 Dynacon / Voest Alpine	31
5.2 Mefcon / MEFOS	32
5.3 BloCon / Mannesmann Demag	35
6 YHTEENVETO	37
LÄHDELUETTELO	38



## SYMBOLILUETTELO

PCD	jälkipalamisaste
$?_1, ?_2$	aallonpituus, mitattu
$V_{?1}, V_{?2}$	harmaan intensiteetti
$C_2$	toinen säteilyvakio
$e_{?1}, e_{?2}$	pinnan emissiivisyys
$G_1, G_2$	kalibrointivakio
$a_0, a_1$	happitaseen kerroin
$C_{SL}$	hiilipitoisuudet apulanssimittauksessa
$C_{EP}$	hiilipitoisuus puhalluksen loppupisteessä
$F_{O_2}$	puhallushapen määrä apulanssimittauksen jälkeen
?	fluksien happikerroin
$W_{sub}$	fluksien määrä
$O_2$	happea sisältävien fluksien määrä
$W_{ST}$	sulan teräksen paino
$I_i$	statistisen mallin kerroin
$X_i$	prosessiolosuhteiden tekijä i
$F_{BC}$	happitaseen korjaus takaisinkytketyltä laskentamallilta
$b_0, b_1$	lämpötaseen kerroin
$T_{SL}$	lämpötila apulanssimittauksessa
$T_{EP}$	lämpötila puhalluksen loppupisteessä
?	jäähdytyskapasiteetin kerroin
$T_{Sub}$	fluksien jäähdytyskapasiteetti
$F_{BT}$	lämpötaseen korjaus takaisinkytketyltä laskentamallilta
a	hiilen hapetustehokkuus
G	vahvistus
i	näytteenottohetken numero
$? O_i$	puhalletun hapen määrä hetkellä i
$? C_i$	hiilipitoisuuden muutos hetkellä i
A, B, C, D, E, F	kokeellinen vakio
$C_o$	alin mahdollinen hiilipitoisuus

# 1 JOHDANTO

Teräksen valmistus LD-konvertteriprosessin avulla on perinteisesti pohjautunut ns. staattisiin malleihin konvertteriprosessista eli aine- ja energiataseisiin perustuvaan panoslaskentaan, jonka avulla konvertterista saatavan raakateräksen koostumus ja lämpötila on pyritty saamaan halutuksi siten, ettei lisäpuhallusta tai ylimääräistä lisäaineseostusta tarvita. Staattiset mallit ovat kuitenkin hyvin rajoittuneita ja käytännössä prosessien häiriöitä ei pystytä ottamaan huomioon. Dynaamisella ohjauksella pyritään määrittämään prosessin tila koko puhallusprosessin ajan tai lähellä lopetushetkeä, jolloin voidaan oikea-aikaisesti tehdä sopivat lisäainelisäykset ja lopettaa happipuhallus. Toimiva dynaaminen ohjaus laskee tuotantokustannuksia ja mahdollistaa mm. suorakaadon toteutuksen eli teräksen kaadon senkkaan ilman laboratorioanalyysivarmistusta.

Dynaaminen ohjaus käsittää konvertteriprosessin matemaattisen, ainakin osittain kokeellisesti määritetyn mallin sekä jatkuvan savukaasujen pitoisuuksien mittauksen sekä yleensä menetelmästä riippuen apulanssimittauksen tai pudotussondimittauksen puhalluksen loppuvaiheessa. Mittauksessa saadusta tiedosta konvertteriprosessin tila määritetään dynaamisen mallin avulla ja puhalluksen optimaalinen lopetushetki voidaan määrätä. Apulanssitekniikka on ollut käytössä pitempään ja vaikka siihen perustuvat dynaamiset ohjausjärjestelmät ovat käytössä koetellumpia, suuntaus on ollut apulanssittomiin järjestelmiin ja myös pudotussondien käyttöön. Pudotussondilla on etuja apulanssiin nähden, kuten halvemmat ylläpitokustannukset ja mitätön prosessin häiriintyminen mitattaessa.

Dynaamiseen ohjaukseen liittyy kiinteästi konvertterin mittausinstrumentoinnin laatu. Riittävän tarkkuuden ja käytettävyyden haasteisiin on kehitetty 90-luvulla useita uusia tekniikoita, joita on koeteltu oikeissa tehdasoloissa hyvin tuloksin.

Haasteellisin tehtävä dynaamisen ohjauksen rakentamisessa on konvertterin mallintaminen mittausdatan perusteella. Vasta kun riittävän tarkka matemaattinen malli on luotu ja konvertteriprosessissa on riittävän tarkat mittaukset, dynaamisella ohjauksella on toimintaedellytykset. Konvertteriprosessin mallinnuksessa tarvitaan useita osamalleja, jotka perustuvat esimerkiksi aine- ja energiataseisiin, savukaasumittauksiin tai puhalluksen lopun apulanssi- tai pudotussondimittaukseen. Mallien parametrit ovat kokeellisesti prosessidatasta määritettyjä. Konvertteriprosessin mallintaminen on luonteeltaan jatkuvaa, eli mallin lopullinen sovittaminen tapahtuu tehtaalla käyttöönotossa ja dynaamisen ohjauksen järjestelmä jopa päivittää itse parametrejaan tietokantaan sulatusdatan perusteella.

Raportin tavoitteena on selvittää dynaamisen ohjauksen säätötekniset menetelmät ja periaatteet. Aihetta on tutkittu ympäri maailman ja mm. MEFOS Luleåssa, Ruotsissa, Voest Alpine Linzissä, Itävallassa ja Mannesmann Demag Duisburgissa, Saksassa ovat kehittäneet omat dynaamisen ohjauksen säätöjärjestelmäkonseptinsa savukaasumittauksella ja/tai pudotussondia käyttäen. Kirjallisuudesta löytyy selvityksiä useista laitoskohtaisista modernisointiprojekteista. Näissä koko konvertterin ohjausjärjestelmä prosessitietokoneineen on yleensä uusittu sekä uusia prosessimalleja dynaamista ohjausta varten on otettu käyttöön tai vanhoja malleja paranneltu.

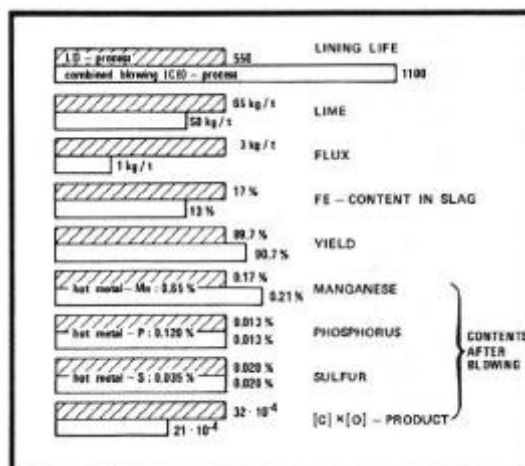


## 2 LD-KONVERTTERIPROSESSI

Raportissa keskitytään tarkastelemaan LD-konverttereita (Linz-Donawitz). Vanhemmista menetelmistä ilmaa käyttävät Bessemer-menetelmä sekä Thomas-menetelmä ovat jo jääneet pois käytöstä ja varsinkin Itä-Euroopan maissa vielä käytetty Siemens-Martin menetelmä eli BOH (Basic Open Hearth) on myös jäämässä pois, kun uusia uuneja ei rakenneta. Ruostumattoman teräksen valmistukseen käytettävät AOD-konvertterit (Argon Oxygen Decarburization) tai valokaariuunit (EAF, Electric Arc Furnace) jätetään niin ikään tarkastelussa vähemmälle. /9/ Voest-Alpine on kehittänyt VAI@CON-järjestelmän teräksen lämpötilan mittaukseen AOD-konvertterille. Mittaus perustuu sulan raudan aiheuttamaan infrapunasäteilyyn. /17/

Alkuperäinen LD-konvertteri on tyypiltään päältäpuhalluskonvertteri eli hapen puhallus teräskylpyyn tapahtuu ylhäältäpäin konvertterin suuaukosta happilanssin avulla. Myöhemmin on LD-prosessista kehitetty lukuisia eri variaatioita, joissa päältäpuhalluksen lisäksi voidaan sulaan syöttää happea tai inerttejä kaasuja, lisäpolttoaineita ja kuonanmuodostajia konvertterin pohjassa sijaitsevien reikätiilien tai suuttimien (engl. tuyere) kautta. Näitä pohjastakin puhallettavia konverttereja kutsutaan yhdistelmäpuhalluskonverttereiksi ja lisäksi on kehitetty pelkästään pohjasta puhallettavia pohjapuhalluskonverttereja. Suurin etu pohjapuhalluksesta tulee kuitenkin puhalluksen sekoitusvaikutuksesta. Päältäpuhallettava LD-konvertteri on edelleen yleisin konvertterityyppi, mutta yleinen suuntaus on muuntaa vanhat LD-konvertterit yhdistelmäpuhalluskonverttereiksi. /9/

Kuvassa 1 on tyypillinen esimerkki LD-konvertterin muuntamisesta yhdistelmäpuhalluskonvertteriksi (CB, Combined Blowing) Mannesmannin Huckingenin tehtailla 80-luvun alussa. Kuvassa on nähtävissä yhdistelmäpuhalluksen vaikutukset eli vähentynyt poltetun kalkin ja fluksien kulutus, kuonan Fe-pitoisuuden lasku (ja siten rautahäviöiden vähentyminen), vuorauksen eliniän piteneminen, saannin paraneminen ja teräksen hiili- ja happipitoisuuden lasku. /5/ Eri konvertterityyppejä on esitetty taulukossa 1 /9/. LD-prosessin kuvaus löytyy samaisesta lähteestä, josta seuraavissa kappaleissa on tiivistettynä esitetty osia sekä joitain lisänäkökohtia.



Kuva 1. Yhdistelmäpuhallus (valkoinen) vs. perinteinen LD-prosessi (musta)

Taulukko 1. LD-konvertterityypit /9/

Basic oxygen steelmaking processes Variations on original LD Process					
100% top-blown processes					
Name	Description and developer	Top blow			Comment
L-D	Linz-Donawitz, Voest-Alpine	O <sub>2</sub>			
BOP	Basic oxygen process	O <sub>2</sub>			
LD-AC	LD-Arbed CRM, Arbed, CRM	O <sub>2</sub> and lime through lance for high phosphorus iron			
OLP	Oxygen lance process, Irsid	O <sub>2</sub> and lime through lance for high phosphorus iron			
LD-CL	LD circulating lance, NKK	O <sub>2</sub>			lance moves in circle Jets are pulsed in circular sequence
LD-PJ	LD pulse jet — Italsider	O <sub>2</sub>			
LD-GTL	LD gas through lance, Linde, National Steel	O <sub>2</sub> diluted with air			
LD-AOB	LD argon oxygen blowing, Linde, Inland Steel	O <sub>2</sub> diluted with nitrogen, then argon			
Combined blowing: bottom stirring with less than 10% inert gases					
Name	Description and developer	Top blow	Gas	Bottom bubbling System	Comment
LBE	Lance bubbling equilibrium, Arbed, Irsid	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Porous brick	May blow lime through lance
LD-KG	Kawasaki Gas, Kawasaki Steel	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
LD-KGC	Kawasaki gas control, Kawasaki Steel	O <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
KG-LI	Kawasaki lime injection, Kawasaki Steel	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Blows lime through lance	
ACLI	Arbed lance coal injection, Arbed	O <sub>2</sub> , coal, lime		Increases scrap (no bottom stirring)	
NK-CB	NKK combined blowing, NKK	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Multi-hole plugs and/or small pipes	
LDB	LD bubbling, Voest-Alpine	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	Piping systems for processes vary in structure size, number and arrangement from time to time
LD-BC	LD-Boel CRM, Boel, CRM	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
LD-KB	LD Kombined Blow, Mannesmann	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
LD-AB	LD argon blowing, Nippon Steel	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
J&L	Jones & Laughlin (now LTV Steel)	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
TBM	Thyssen Blas Metallurge, Thyssen	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	Pipes	
Combined blowing: bottom blown through concentric tuyeres (oxygen above 10% of total)					
Name	Description and developer	Top Blow	Concentric tuyeres Inside	Outside	Comment
BAP	Bath agitation process, British Steel, Hoogovens	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , air	N <sub>2</sub>	Lime sometimes used
LD-OB	LD oxygen bottom, Nippon Steel	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	gas	
LD-HC	LD Hainaut Sambre, Sambre, CRM	O <sub>2</sub> & lime	O <sub>2</sub>	gas and lime	
OTB	Oxygen top and bottom, Kobe	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
STB	Sumitomo top bottom, Sumitomo	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
STB-P	Sumitomo top bottom powder, Sumitomo	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> & lime	
LET	Lance equilibrium tuyeres, Solmer	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
K-OBM	Klöckner OBM, Klöckner	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	gas	Increased scrap
KMS	Klöckner Maxhütte Steel, Klöckner-Maxhütte (with scrap preheat)	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , lime	gas	Increased scrap
KS	Klöckner Steel, Klöckner-Maxhütte (with scrap preheat)	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , lime	gas	100% scrap
K-BOP	Kawasaki BOP, Kawasaki Steel (with scrap preheat)	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , lime and coal	gas	Increased scrap
100% bottom blown					
OBM	Oxygen Bottom Maxhütte, Maxhütte		O <sub>2</sub>	gas	
LWS	Creusot Loire-Wendel Sidelor (CL-WS)		O <sub>2</sub>	oil	
Q-BOP	Quick (or Quality) BOP, US Steel		O <sub>2</sub>	gas	

Adapted from CRM and F Wallner (Voest-Alpine AG) studies

## 2.1 Raakarauta

Raakarauta tuodaan konverttereille torpedosenkoissa tai mikserissä. Torpedosenkkoja käytetään yleensä pienempien lämpöhäviöiden vuoksi. Konvertterille tuotava rautasula on yli 1200°C lämpötilassa. Tärkeimmät muuttujat raakaraudalla ovat:

1. Lämpötila, joka vaikuttaa lämpötaseeseen ja osin määrää panostettavan romun määrän
2. C-pitoisuus, joka vaikuttaa lämpötaseeseen ja suoraan myös tarvittavan hapen määrään
3. Si-pitoisuus, joka vaikuttaa lämpötaseeseen ja tarvittavaan poltetun kalkin CaO määrään
4. Mn-pitoisuus, joka vaikuttaa puhalluksen alun kuonanmuodostukseen sekä seostustarpeeseen
5. P-pitoisuus, joka vaikuttaa puhallustapaan
6. S-pitoisuus, joka ei juuri vaikuta muihin kuin sekundäärikäsittelyihin
7. Ti-pitoisuus, joka vaikuttaa kuonanmuodostukseen ja konvertterin kulumiseen
8. Cu- ja Sn-pitoisuus, jotka jäävät teräkseen
9. Pb-pitoisuus, joka voi aiheuttaa rikastumista vuorauksen pohjalle
10. Zn-pitoisuus, joka höyrystyy ja voi muodostaa kiertävän kuorman, jos konvertteripölyä kierrätetään /9/

Raakaraudan esikäsittelyillä joudutaan usein poistamaan joitain ei-toivottuja aineita ennen varsinaista puhallusta, sillä useimmiten jonkin aineen poistamiseen tähtäävä puhallustekniikka johtaa toisen ei-toivotun aineen pitoisuuden nousuun. Esimerkiksi Keihin Worksin NK-CB-konvertterin raakaraudasta poistetaan paitsi rikki myös erittäin vähäfosforisilla laaduilla myös fosfori erillisillä prosessiasemilla. /7/

## 2.2 Poltettu kalkki

Poltettua kalkkia, CaO, tai dolomiittikalkkia, CaO·MgO, panostetaan LD-konvertteriin kuonanmuodostusta varten. Kalkin päätehtävä on liueta alkukuonaan, neutraloida piidioksidin, SiO<sub>2</sub>, happamuus (yksi osa SiO<sub>2</sub> vaatii kolme osaa CaO) ja muodostaa emäksinen kuonaemulsio rikin- ja fosforinpoistoa varten, emäksisen vuorauksen suojaamiseksi, mellotusreaktion edistämiseksi ja lämpöhäviöiden vähentämiseksi. /9/

### 2.3 Lisäaineet (fluksit)

Kalkin liukenemisen parantamiseksi ja kuonan käyttäytymisen hallitsemiseksi käytetään usein pieniä määriä lisä- eli fluksiaineita (1-5kg/tte). Useat happipuhalluksessa syntyvät oksidit toimivat sinällään fluksina ja varsinkin FeO-määrään kuonassa voidaan puhallusteknisesti vaikuttaa tai sitä voidaan sellaisenaan lisätä. Fluksilla pyritään nopeuttamaan emäksisen kuonan syntymistä puhalluksen alkuvaiheessa alentamalla haitallisen dikalsiumsilikaatin sulamispistettä ja supistamalla sen esiintymisaluetta, laskemaan kuonan viskositeettiä ja siten nopeuttamaan kuonan ja sulan välisiä reaktioita ja kuonan pitämiseen tasalaatuisena, alentamaan kuonan ja kalkin sulamispistettä sekä metallisen raudan kuonasta erkautumisen tehostamiseen puhalluksen lopussa. /9/

### 2.4 Romu ja lämpötilaa korjaavat lisäaineet

Hapetuksessa syntyvä ylimääräinen lämpö käytetään teräsromun sulatukseen. Romua pyritään luonnollisesti käyttämään mahdollisimman paljon sulatuksessa, mutta sitä käytetään myös panoksen lämpötilan säätelyyn. Normaalisti konverterin romumäärä on korkeintaan 30% sulatuksen koosta, suurempi määrä ei yleensä ole lämpötaseen kannalta mahdollinen, mutta jos prosessiteknisillä tai ohjausteknisillä muutoksilla puhalluksen lämpöhäviötä saadaan kasvatettua, hieman suuremman romumäärän käyttö on mahdollinen. Romu sulaa jo mellotuksen aikana, sillä hiiltä diffundoituu romun pintaan sulasta ja nopeuttaa romun sulamista alentamalla sen sulamispistettä. Romun sulamisnopeutta pienentävät mm. matala C-pitoisuus tai lämpötila sulassa, matala romun C-pitoisuus tai lämpötila, suuri romun palakoko tai osuus panoksessa sekä heikko sekoitus tai romun kasautuminen konverterin seinille. Romun jäähdytyskerroin 1650°C lämpötilassa on noin -2,3°C/kg/tte.

Vaihtoehtoisesti konverterin panoksen jäähdytykseen käytetään sintteriä tai pellettiä, joiden jäähdytyskerroimet ovat -6,5°C/kg/tte ja -6,9°C/kg/tte. Myös rautaharkkoja käytetään. Nyrkkisääntönä 1t sintteriä tai pellettejä vastaa 3t romua tai 4,5t rautaharkkoja. /9/

Panoksen kuumentamiseen käytetään esim. ferropiitä, jonka hapettumisesta vapautuva lämpö nostaa metallisulan lämpötilaa.

## 2.5 Kaasupuhallus

Konverterissa tärkein rooli on happipuhalluksella. Puhallushapen vaadittava puhtaus on noin 99,5%. Happi toimii hapettimena ja hapettaa sulasta epäpuhtauksia kuten C, Si, Mn ja P. Konverterissa hapetusprosesseja säädellään hapen puhalluksen ja pohjahuuhtelun intensiteettiä muuttamalla. LD-prosessissa happi syötetään sulapintaan ylhäältä päin ylääänivirtauksen kehittäväällä happilanssilla. Lanssi on vesijäähdytteinen ja kehitys on kulkenut yksisuutinlanssista kolmi- tai useampisuuttimisiin lansseihin.

Pääasiallinen mellotusreaktio konverterissa on



Normaalisti vain pieni osa hiilimonoksidista reagoi hiilidioksidiksi reaktiossa



Myös ns. jälkipolttolansseja on kehitetty, koska nämä mahdollistavat sulasta nousevan CO-kaasun polttamisen osittain hiilidioksidiksi CO<sub>2</sub>, mikä reaktio vapauttaa lämpöä ja jos lämpö saadaan siirtymään sulaan, se tuo myös prosessiin lämpöä.

Hapensyöttönopeus vaihtelee laitoksittain riippuen mm. lanssin koosta ja rakenteesta sekä konverterin rakenteesta. Tyypillinen hapen syöttönopeus on 2,5 – 3,5 Nm<sup>3</sup>/min/tte. Hapen kulutus on karkeasti verrannollinen raakaraudan hiilipitoisuuden ja teräksen tavoitehiilipitoisuuden erotukseen, ja tyypillinen kulutus on 45-50 Nm<sup>3</sup>/tte. Puhalluksen alussa hapen syöttönopeus määrää mellotusnopeuden, mutta kun puhalluksen loppupuolella saavutetaan ns. kriittinen hiilipitoisuus sulassa, hiilen diffuusionopeus teräksessä määrää mellotusnopeuden.

Lanssisuuttimien mitoitus on oleellinen seikka prosessin hallittavuuden kannalta. Tyypillisesti suuttimien muodostavat kuristava osa, kurkku ja laajennusosa. Jos suuttimien mitoitus ei ole käytettyihin virtausmääriin ja paineeseen nähden oikea syntyy häiriövirtauksia ja happisuihku joko yli- tai alilaajenee. Tällöin roiskeet lisääntyvät, mellotusnopeus heikkenee, rautatappiot kasvavat ja kuonan FeO-pitoisuus nousee sekä Mn-hapettuminen kasvaa ja seostustarve lisääntyy.

Pohja- ja yhdistelmäpuhalluskonvertereissa happea voidaan puhaltaa myös konverterin pohjan suuttimien kautta. Pohjasuuttimissa yleensä happi puhalletaan keskiosaa pitkin ja suutinta ylikuumenemiselta suojaava kaasu (yleensä hiilivety) puhalletaan ulointa osaa pitkin. Inertin kaasun syöttöön käytetään useimmiten reikätiiliä konverterin pohjassa. Pohjasta puhalletaan usein vain sekoituksen tehostamiseksi inerttejä kaasuja.

Yhdistelmä- ja pohjapuhalluskonvertereissa sulan sekoitus on huomattavasti tehokkaampaa kuin LD-konverterissa ja tämän takia teräksen, hapen ja kuonan väliset reaktiot tapahtuvat nopeammin ja täydellisemmin. Pohjapuhalluskonverterissa happipitoisuus sulassa saadaan pysymään suhteessa pienempänä kuin yhdistelmäpuhalluskonverterissa, jossa happi puhalletaan vain yläkautta. Korkea

happipitoisuus sulassa merkitsee suurempia palohäviöitä ja teräksen tiivistyksen vaikeutumista.

LD-prosessi on edullinen typpi- ja vetypitoisuuksien kannalta, ja melloituksen aikana tapahtuva kaasunmuodostus kykenee jopa huuhtelevaan osan raakaraudan mukana tulevista kaasuista pois. N-pitoisuus puhalluksen jälkeen on noin 20-30ppm ja H-pitoisuus noin 0-1ppm.

Konvertterin savukaasujen CO-pitoisuus on noin 90%. CO-kaasun polttaminen hiilidioksidiksi CO<sub>2</sub> vapauttaa lämpöä 1600°C lämpötilassa -280 kJ/mol CO. Jälkipalamista (engl. post combustion) tehostamalla siis saadaan prosessin lämpötaloutta edullisemmaksi. Jälkipalamisen tehostaminen tehdään yleensä lisäämällä konvertterin yläkartioon happisuuttimia tai lisäämällä ylimääräinen happireikäsarja lanssin runkoon pääreikien yläpuolelle. Ongelmana voi olla konvertterin yläkartion ja huuuvan ylikuumentuminen. /9/

Jälkipalamisaste, PCD (engl. post combustion degree) määritellään kaavalla

$$PCD = \left[ \frac{\%CO_2}{\%CO + \%CO_2} \right] \times 100 \quad (3)$$

Savukaasumittausten perusteella normaali LD-konvertterin jälkipolttoaste on noin 6-10%. Jos jälkipolttoastetta saataisiin tehostettua 6%:sta 25%:iin, energian tuotanto konvertterissa kasvaisi 60%:lla, mikä vaatisi 25% lisää happea. Jälkipalamisen edistäminen mahdollistaa suuremman romumäärän käytön, nopeamman loppulämpötilan saavuttamisen ja siten prosessin syklin lyhenemisen sekä estää kuonan ja teräksen muodostaman ”skollan” (engl. skull) kerääntymistä lanssiin ja konvertterin yläkartion ja suun alueelle.

Ensimmäiset kehitetyt jälkipolttolanssit ovat ns. yksivirtalansseja, joissa sekä jälkipolttohappi että varsinainen puhallushappi tulevat samasta linjasta samalla paineella. Jälkipalamisreaktion paikkaa ja vaikutusta voidaan muuttaa nostamalla sekundäärihappisuuttimien paikkaa 1-3 m primäärihappisuuttimien yläpuolelle. Matala korkeus antaa lisää romunsulatuskapasiteettia, kun taas korkealle asetettu suutin estää kuonautumista lanssiin ja konvertterin seinämille. Yksivirtarakenne kuitenkin rajoittaa jälkipolton hapen käyttöä, koska liian lähelle sulan pintaa suunnattu suihku kuluttaa konvertterin vuorauksia eikä sekundäärihapen nopeutta voi säätää. Monikäyttöisempi ratkaisu on ns. kaksivirtalanssi, jossa sekundäärihappi puhalletaan matalammalla paineella oman linjansa kautta ja siten jälkipalamisreaktio saadaan tapahtumaan turvallisella etäisyydellä konvertterin vuorauksista. /15/

## 2.6 Puhalluksen kulku

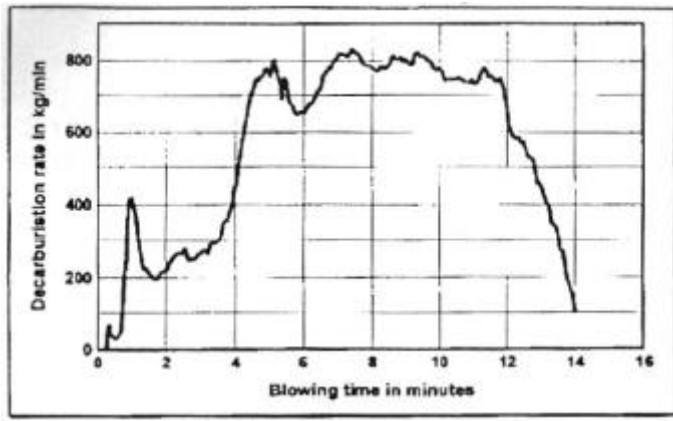
Happikonvertertteri prosessi on hyvin kompleksinen, termokemiallinen prosessi, jossa epäpuhtauksien hapettumista kontrolloi keskeisesti kaksi tekijää; hapetusreaktioiden termodynaaminen affiniteetti sekä aineensiirto (sekoitus) rautasulassa. Normaali puhallusaika LD-konvertertteriassa on 16-18 min, panoskoon vaikutuksen ollessa pieni. Ns. tap-to-tap aika eli kahden kaadon välinen aika on noin 30-40 minuuttia. Lämpötila on käytetystä romumäärästä riippuen puhalluksen lopussa 1650-1730°C. Kuvassa 2 on savukaasumittauksen perusteella laskettu hiilen melloitusnopeuden trendi puhalluksen aikana Voest-Alpinen Stahl Linz GmbH:n tehtailla. Kuvissa 3 ja 4 on Voest-Alpinen LOMAS savukaasumittausjärjestelmällä mitatut trendikäyrät eri pitoisuuksille savukaasussa sekä samalla järjestelmällä saadut hiilipitoisuus sulassa ja sulan lämpötila. Hiilen melloitusnopeus korreloi lähes suoraan savukaasun CO-pitoisuuteen.

Hiilen melloittuminen voidaan jakaa karkeasti kolmeen jaksoon:

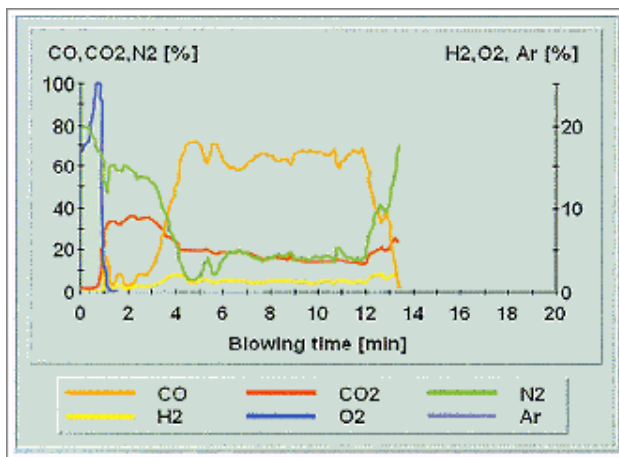
Alussa melloitusnopeus eli hiilen palamisnopeus  $dC/dt$  kasvaa lähes lineaarisesti. Suurin osa raakarautan mukana tulleesta piistä palaa  $SiO_2$ :ksi, joka muodostaa puhalluksen alussa lisätyn kalkin kanssa alkukuonan. Merkittävä osa mangaanista, Mn, ja fosforista, P, hapettuu kuonaan ja Ti ja V hapettuvat lähes täydellisesti. Kuonan FeO-pitoisuus pitää saada korkeaksi, jotta kalkin liukeneminen kuonaan nopeutuu. Tämä tapahtuu ajamalla puhalluslanssia korkealla, pitämällä pohjapuhalluksen ja siten sekoituksen intensiteettiä alhaisena sekä tarvittaessa lisäämällä rautaoksidipitoisia lisäaineita. Hiilen melloitusnopeutta rajoittavat sekä korkea lanssi että piin hapettumisen hapenkulutus. Kuonan muodostuessa ja alkaessa vaahdota sen pinta kohoaa ja lanssi uppoaa kuonaan, ylikuohumisen estämiseksi ja tehokkaan melloituksen aloittamiseksi lanssia lasketaan alemmas.

Puhalluksen keskivaihe kestää noin puolet puhallusajasta. Hiilen palamisnopeus pysyy lähes vakiona ja riippuu pelkästään prosessiin syötetystä hapen määrästä ja pysyy vakiona, jos happivirtaus on vakio. Kuonan FeO-pitoisuus laskee, koska ajetaan matalammalla lanssilla ja tästä syystä osa mangaanista ja fosforista saattaa pelkistyä takaisin sulaan, kun kuona jäykistyy ja laskeutuu. Kuonan vaahtoaminen on vähäisempää matalammalla lanssilla. Pohjahuuhdeltu on voimakkaampaa, jotta sekoitus sulassa edesauttaa hiilen kulkeutumista kohti pintaa ja kuonaa, jossa suurin osa hiilen hapettumisesta tapahtuu. Sulan hiilipitoisuuden laskiessa myös melloitusnopeus alkaa lopulta hidastua ja siirtyään kolmanteen vaiheeseen.

Lopussa hiilen palaminen alkaa hidastua sulan hiilipitoisuuden laskiessa tasolle 0,5-0,3%. Kuonan FeO-pitoisuus alkaa taas kasvaa, koska rautaa alkaa palaa enemmän sulan happipitoisuuden noustessa. Kun kriittinen hiilipitoisuus ohitetaan, hiilen diffuusionopeus sulassa rajoittaa melloitusnopeutta. Mangaani ja fosfori kuonautuvat uudelleen ja rikki kuonautuu myös lopussa emäksiseen, happirikkaaseen kuonaan. /9/, /23/

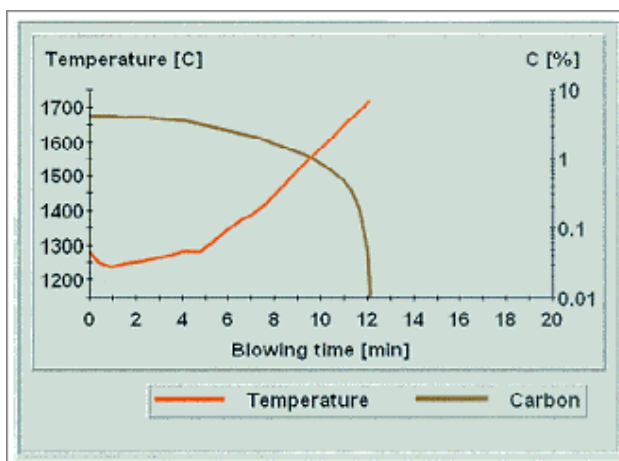


Kuva 2. Hiilen mellotusnopeus vs. Puhallusaika /20/



Kuva 3. Savukaasuanalyysit vs. puhallusaika

<URL:<http://www.vai.co.at/vai/technology/steelmaking/oxygen/dynamicmodeling/2-5-1-3.htm>>



Kuva 4. Hiilipitoisuus ja lämpötila vs. puhallusaika

<URL:<http://www.vai.co.at/vai/technology/steelmaking/oxygen/dynamicmodeling/2-5-1-3.htm>>



Kuonalla on erittäin tärkeä merkitys LD-prosessissa ja sen koostumukseen pyritään ohjausteknisesti ja lisäaineilla vaikuttamaan. Kuonan päätehtävät ovat nopeuttaa hiilen mellostusta, mahdollistaa rikin ja fosforin poisto, suojella vuorausta sitomalla happamat oksidit sekä estää lämpöhäviöitä varsinkin sulatuksen lopussa ja odotusaikana ennen kaatoa. Mellostusreaktiot tapahtuvat suureksi osaksi rautapisaroissa, jotka nousevat ylöspäin kuona-kaasu-rauta-emulsiassa. On arvioitu, että jopa 30% sulasta metallista voisi olla kuonaemulsiassa puhalluksen aikana ja että jopa kaksi kolmasosaa hiilen mellostumisesta tapahtuisi kuonassa. Kuonassa reaktiot eivät tapahdu suoraan, vaan hapettuneen raudan välityksellä. Loput mellostusreaktioista tapahtuvat ns. hot-spot pisteessä eli kohdassa, jossa happisuihku osuu sulaan läpäistyään kuonan noin 2200-2500°C lämpötilassa, vuorauksen seinillä ydintymällä tai sulassa olevien kaasukuplien välityksellä. /9/

## 2.7 Teräksen kaato

Puhalluksen loputtua kaato voidaan suorittaa kolmella eri menetelmällä.

Tavallinen kaato (engl. regular tap) on perinteinen varma tapa eli jokaisen puhalluksen lopussa otetaan loppunäyte terässulasta, joka lähetetään laboratorioon analysoitavaksi ja vasta, kun analyysitulokset on muutaman minuutin kuluttua saatu, ryhdytään terästä kaatamaan senkkaan ja seostamaan.

Nopea kaato (engl. quick tap) tarkoittaa, että puhalluksen loputtua suoritetaan teräksestä mittausta apulanssilla tai pudotussondilla, kaato aloitetaan, mikäli mitattu lämpötila ja hiilipitoisuus ovat hyväksyttävissä ja mahdollisesti puhalluksen aikana apulanssilla otettu näyte (engl. in-blow sample) on hyväksyttävissä rajoissa.

Suorakaato (engl. direct tap) tarkoittaa konvertterin puhalluksen jälkeen suoritettua kaatoa ilman laboratorion ilmoittamia analyysituloksia tai lopussa suoritettua mittausta. Jotta suorakaato olisi mahdollista, konvertteriprosessista on oltava riittävän tarkat staattinen ja dynaaminen malli, jotta voidaan riittävällä varmuudella arvioida teräksen koostumus kulloisenkin puhalluksen lopussa. /24/

Mikäli mitatut tai analysoidut teräksen ominaisuudet poikkeavat halutuista voidaan suorittaa lisäpuhallus, jonka aikana lämpötilaa ja hiilipitoisuutta korjataan panostettavien lisäaineiden avulla.

Suorakaato on yleensä perimmäinen päämäärä, kun dynaamista ohjausta lähdetään kehittämään, koska sillä saavutetaan monia etuja; aikaa säästyy, kun puhalluksen jälkeiseltä odotukselta säästytään ja siten tuotantokapasiteetti kasvaa, vuoraukset kuluvat vähemmän, pystytään nopeammin reagoimaan tuotantoketjun tarpeisiin, metalliroiskeilta näytteenottokallistusten yhteydessä vältytään, lämpöhäviöt pienenevät, jne.

### 3 KONVERTTERIN MITTAUSTEKNIikka

Tärkeimmät konverterin lopputilaa kuvaavat muuttujat ovat:

1. teräksen lämpötila
2. teräksen hiili-, fosfori- ja rikki- pitoisuudet
3. teräksen määrä

Näiden suureiden saavuttaminen on perinteisesti nojannut staattisiin panoslaskentamalleihin, jotka eivät vielä tehdaskohtaisilla parametreilla ja adaptiivisilla tekijöillääkään riitä yksinään konverterin tehokkaaseen ohjaukseen. Dynaamisen ohjauksen tarkoitus on tarkentaa staattisten mallien tuloksia reaaliaikaisilla prosessimittauksilla. Tärkeimmät ja yleisimmät dynaamisen ohjauksen mittauskohteet ovat:

1. savukaasujen lämpötila
2. savukaasujen koostumus
3. sulan lämpötila, hiili- ja happipitoisuus sekä sulapinnan korkeus /9/

Konverterin ohjauksessa merkittävin ongelma on kattavan mittausdatan saanti. Koska lämpötilat ovat korkeita, jatkuvia mittauksia on hankalaa tai mahdotonta saada. Tämän takia joudutaan moni asia laskemaan erilaisten mallien avulla käytettävissä olevista mittauksista. Seuraavissa kappaleissa esitellään tärkeimmät käytössä olevat tai ainakin käytössä testatut konverteriprosessin mittaustekniikat.

#### 3.1 Apulanssit

Tärkein apuväline konverteriprosessin dynaamisessa ohjauksessa on nk. apulanssi (engl. sub lance), jonka rakenne ja toimintaperiaate puhalluksen loppupisteen määrittämisessä on esitetty kuvassa 6. Apulanssi on näytteenotin, joka voidaan laskea konverterin suuaukosta sulaan teräkseen happipuhallusta lopettamatta puhalluksen loppupuolella (engl. in-blow sample) ja konverteria kallistamatta. Apulanssin rungon päähän kiinnitetään varsinainen mittaussondi, jolla esimerkiksi mitataan lämpötilaa tai sulan pinnan korkeutta, määritetään hiilipitoisuutta tai sulan happipitoisuutta tai otetaan teräsnäyte. /9/

Erilaisia apulanssin sondityyppejä on taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri apulanssin sondityypit /22/

Tehtävä	Merkintä
Sulan lämpötila	T
Hiilipitoisuuden määrittäminen lämpötilasta	C
Happipitoisuuden määrittäminen	O
Analyttinen näyte	S
Näyte polttoanalyysia varten	P
Sulan pinnankorkeus	L, BL

TSC-tyypin sondeja käytetään pääasiassa puhalluksenaikaisessa näytteenotossa noin 2 minuuttia ennen loppua, mutta myös loppunäytteenotossa. Hiilipitoisuus määritetään sulan jäähmettymispisteestä.

TSO-tyypin sondilla otetaan yleensä loppunäyte, jolla tarkastetaan lämpötila, aktiivinen happi ja kemiallinen koostumus. Aktiivisen hapen mittauksesta voidaan määrittää hiilipitoisuus. Konverterin pinnan säädössä voidaan käyttää hyväksi äkillistä muutosta, joka näkyy happipitoisuudessa sondin läpäistessä kuona-teräs-rajapinnan.

T-tyypin sondia käytetään yleensä lämpötilan säätöön odotusaikoina tai uudelleenpuhalluksen jälkeen.

L- ja BL-tyypin sondeilla mitataan sulan pinnankorkeutta perustuen sähköisen resistanssin mittaamiseen kahden kontaktielektrodin välillä. L-tyypillä mitataan pinta apulanssin liikkeessä alaspäin sulaa kohti, BL-tyypillä taas vedettäessä lanssia ylös.

TS- ja TO-tyypin sondeja käytetään joskus lisäkontrollina loppunäytteenotossa tai TSO-tyypin sijasta joidenkin laatuojen kanssa.

TP-tyyppiä käytetään tyyppillisesti lämpötilan hiilipitoisuuden ja fosforipitoisuuden säätöön eri teräksenvalmistusprosessien välillä.

Apulanssien mittausvarmuus on keskeinen tekijä dynaamisen ohjauksen kannalta. Taulukossa 3 on kolmen tavallisen apulanssityypin käytettävyys eli onnistuneiden mittausten osuus prosentteina. Esitetyt lukemat ovat keskiarvoja viidestä konverterista Euroopassa vuonna 1996, joissa on käytetty Heraeus Electro-Nite apulansseja.

Taulukko 3. Apulanssimittausten käytettävyys /22/

Sondin tyyppi	Sulan lämpötila	Hiilipitoisuus	Happipitoisuus	Näytteenotto
TSC	97,0%	97,5%		93,3%
TSO	97,5%		96,7%	96,5%
T	98,1%			

Apulansseissa käytettiin alun perin ainoastaan TSC-tyypin sondeja, mutta kun TSO-tyypin sondit tulivat käyttöön ne ovat yleisimmin käytetty tyyppi loppunäytteenotossa. Näytteenotossa suuntaus on siirtymään käyttämään apulansseissa uusia kaksoispaksuusnäytteitä (engl. dual thickness sample), jotka ovat kompakteja kooltaan ja siten jäähtyvät nopeammin ja soveltuvat paremmin automaattiseen näytteenkäsittelyyn robottien avulla. Tulevaisuuden sovellus apulansseissa voi olla FeO-pitoisuuden määrittäminen kuonasta uuden TSO-sondityypin avulla. /22/

Apulanssin käytöllä saavutetaan monia etuja verrattuna apulanssittomaan prosessiin:

1. Lyhyempi aika kaadosta kaatoon (tap-to-tap time,) kun konvertteria ei tarvitse erikseen kallistaa näytteenottoa varten.
2. Suuremman romumäärän käyttö on mahdollista ja happea kuluu vähemmän, kun tavoitearvot saavutetaan tarkemmin ja puhalluksen tavoitelämpötilaa voidaan alentaa.
3. Vähentynyt lisäaineiden ja deoksidointiaineiden käyttö.
4. Vähentynyt vuorausten kuluminen, koska panoksen pitoaika konvertterissa lyhenee, pienempää lämpötilaa voidaan käyttää ja uudelleenpuhalluksia tehdään vähemmän.
5. Saanti paranee, koska uudelleenpuhalluksia on vähemmän ja rautaa on siten vähemmän kuonassa.
6. Tyypeä diffusoituu vähemmän sulaan ympäröivästä ilmasta, koska uudelleenpuhalluksia on vähemmän /20/.

Apulanssin käytössä on myös haittapuolensa:

1. Riittävän selkeän lämpötilamittauksen ja luotettavan analyysin varmistamiseksi päältäpuhallushapen määrää on vähennettävä apulanssimittauksen ajaksi. Tämä näkyy selvästi myös mittauksissa eli prosessiin tuodaan ylimääräinen häiriö ja hallittavuus heikkenee.
2. Happipuhalluksen vähennyksestä huolimatta joka kerralla ei saada mittaustulosta.
3. Huipputekniikkaa olevat sondit ja apulanssijärjestelmän kunnossapito aiheuttavat huomattavat kustannukset /20/.

Apulanssitekniikka on hyvin testattua ja suurin osa nykyisistä dynaamisen ohjauksen järjestelmistä perustuu apulanssimittaukseen, mutta suuntaus on pyrkiä käyttämään dynaamisen ohjauksen järjestelmiä, jotka perustuvat pommisondien käyttöön ja konvertterikaasujen mittaukseen.

### **3.2 Pudotussondit**

Pudotussondit, jotka tunnetaan myös pommisondeina, ovat nimensä mukaisesti vapaasti pudotettavia mittaussondeja, joilla mitataan sekä terässulan lämpötilaa että happipitoisuutta. Nämä mittaukset on perinteisesti tehty käsisondeilla kaadon yhteydessä tai apulanssilla puhalluksena aikana. Pudotussondeissa on termoelementtipari, joka sulaan osuessaan antaa hetkellisen millivoltilukeman ennen sulamistaan, josta sulan lämpötila saadaan laskettua.

Betlehem Steelin Burns Harborin tehtailla LD-yhdistelmäpuhalluskonvertterissa suoritetuissa kokeissa vertailtiin tavanomaisten käsisondien mittausten tarkkuutta pudotussondeihin. Taulukon 4 pohjana on 40 testiparia käsisondeilla kaadon yhteydessä. Hiilipitoisuuden poikkeama saatiin vertaamalla anturin mittauksen perusteella laskettua pitoisuutta ja spektrometrillä saatua pitoisuutta.

Taulukko 4. Tavanomaisen käsisondin tarkkuus /19/

Mitattu arvo	Lämpötila (°F)	Liennut happi (ppm)	Hiilipitoisuus (pistettä)
<b>Keskimääräinen hajonta</b>	+3	+9	-
<b>Standardipoikkeama</b>	7	67	0,3

Taulukossa 5 on esitetty tulokset pudotussonditestistä sekoitusasemalla. Seitsemän näyteparia otettiin sekä pudotussondilla että käsisondilla ja lukemien lämpötilaero on esitetty taulukossa.

Taulukko 5. Pudotussondin ja käsisondin lämpötilalukeman ero /19/

Näyte	Lämpötilaero (°F)	Pudotussondin anturin kuluneisuus
<b>1</b>	-3	-
<b>2</b>	-5	-
<b>3</b>	+9	Ei kulumista
<b>4</b>	+6	Suuri
<b>5</b>	-4	Hieman
<b>6</b>	-12	Suuri
<b>7</b>	-7	Suuri

Taulukossa 6 on esitetty konvertterikokeiden tulokset. Mittaukset tehtiin normaalin käsisondimittauksen jälkeen. Hiilipitoisuuden poikkeama saatiin kuten käsisondillakin.

Taulukko 6. Pudotussondin tarkkuus konvertterikokeissa /19/

<b>Standardipoikkeamat mitattujen ja laskettujen arvojen välillä</b>		
Lämpötila (°F)	Liennut happi (ppm)	Hiilipitoisuus (pistettä)
12	110	0,5

Verrattaessa pudotussondia ja käsisondia nähdään, että käsisondi on tarkempi. Kokeissa pudotussondin tarkkuus kuitenkin oli riittävä mahdollistamaan suorakaadon. Pudotussondeilla ja käsisondeilla saataviin mittaustuloksiin haitallisesti vaikuttavia tekijöitä ovat paksut kuonakasaumat sulan pinnalla ja suuret kovettumat, ”skollat”, jotka ovat pudotussondin tiellä. Paksun kuonan läpi pudotetulla sondilla saatuja lukemia täytyy tulkita enemmänkin trendikäyrästä kuin ilmoitetusta lukemasta. Riittävä aika täytyy kulua pudotuksen jälkeen, jotta sula asettuu ja saadaan hyvä millivoltilukema liuenneelle hapelle ja lasketulle hiilipitoisuudelle. /19/

Pudotussondien käyttö on apulanssiin nähden edullisempaa, koska kallista apulanssia ohjauslaitteistoinen ei tarvita eikä puhallus häiriinny samalla lailla näytteenoton ajaksi. Pudotussondien käytöstä löytyy kuitenkin vähän kirjallisuutta, mikä viittaisi niiden olevan vasta yleistymässä apulanssittomissa konverttereissa.

### 3.3 Savukaasumittaukset

Tärkeimpiä dynaamisen ohjauksen mahdollistavia mittauksia apulanssi- ja pudotussondimittausten ohella on konvertterin savukaasumittaus (engl. off-gas measurement). Savukaasumittaukseen kuuluu tärkeimpinä savukaasujen lämpötila sekä CO/CO<sub>2</sub>-suhde, mutta kaasun koostumuksesta voidaan mitata myös O<sub>2</sub>-, Ar-, H<sub>2</sub>- ja N<sub>2</sub>-pitoisuudet. Savukaasumittaus mahdollistaa jatkuvan, joskin epäsuoran, mittausdatan saannin puhallusprosessista. Moni käytetty dynaaminen malli perustuukin pitkälti savukaasumittaukseen ja pisimmälle vietyinä koko konvertterin dynaaminen ohjaus on ainakin periaatteessa mahdollista perustaa savukaasumittauksiin, vaikkakin yleensä vielä käytetään joko apulanssia tai pudotussondia dynaamisen mallin tarkennukseen ennen puhalluksen loppua.

Savukaasumittauksilla voidaan mitata paitsi konvertterin jälkipalamisastetta eli CO/CO<sub>2</sub>-suhdetta myös epäsuorasti mellottumisastetta, koska savukaasun lämpötila laskee puhalluksen loppua kohti sitä mukaa kun hiilipitoisuus sulassa vähenee. Matala savukaasun lämpötila puhalluksen lopussa merkitsee pientä hiilipitoisuutta sulassa ja rautaoksidipitoista kuonaa mikä edistää fosforinpoistoa. /10/ Savukaasujen lämpötilaa seuraamalla yläosan vuoraukset eivät pääse ylikuumenemaan ja optimaalisen jälkipolttoasteen saavuttaminen on mahdollista.

Savukaasumittaukset voidaan luokitella karkeasti näytteenottoon perustuviin ja suoriin mittauksiin. Näytteenottavasta mittauksesta esimerkkinä on Voest-Alpinen patentoima LOMAS-järjestelmä (engl. Low Maintenance Analyzing System).

Järjestelmään sisältyy:

1. Itsepuhdistavat anturit suodatuksella, jäähdytysvaipalla ja lämmitetyllä näytteenottolinjalla
2. automaattinen kaasun esikäsitteilylaitteisto
3. automaattinen kaasun analyysilaitteisto.

Järjestelmä asennetaan yli 10 m korkeuteen konvertterin suun yläpuolelle. Mittauslaitteistoa ohjaa erillinen ohjelmoitava logiikka, joka välittää analyysitulokset prosessijärjestelmään.

Putkimaisia ruostumattomasta teräksestä valmistettuja antureita on kaksi, toinen ottaa näytettä puhalluksen aikana, kun toinen on puhdistettavana toistuvilla tyypipuhalluksilla. Kaasunäytettä otetaan metallisuodattimen läpi 1000 l/h virtauksella, josta ylimäärä palautetaan takaisin puhdistettavana olevan putkianturin suodattimen läpi vastavirtaan. Näytekaasu johdetaan lämmitettävän kanavan kautta kaasunkäsitteilylaitteistoon, jossa kaasu suodatetaan hienojakoisilla suodattimilla ja jäähdytetään säilyttäen analysaattorille sopiva kosteus. Kaasu syötetään 130 l/h virtauksella kaasuanalysaattoriin, jossa kaasu analysoidaan automaattisesti massaspektrometrillä sekunnin aikaintervallilla mittausten välissä. Mittausalueet analysaattorilla ovat CO 0-85%, CO<sub>2</sub> 0-40%, O<sub>2</sub> 0-35%, H<sub>2</sub> 0-10%, Ar 0-10% sekä N<sub>2</sub> 0-100%. Kokonaisviive, mikä kuluu kaasun muodostuksesta konvertterissa siihen, että näytteistetty kaasuanalyysi on suoritettu ja savukaasumallin laskut suoritettu on noin 20 sekuntia. /16/

Suorat savukaasun mittausmenetelmät ovat harvinaisempia ja kehittyvaiheessa. Optiseen emissioon perustuvaa mittausta rajoittaa matala spektriresoluutio ja absorboivien kaasujen suhde. Laserpohjaista optista anturia on koekäytetty täysimittaisessa tuotannossa lupaavin tuloksin. Mittausjärjestelmään kuuluu infrapunalasermoduuli ja ilmaisimoduuli, joka asetetaan vastakkaiselle puolen konvertteria. Lasersäde ohjataan sekä kuumen konvertterikaasun läpi että suoraan peilien kautta ns. referenssi-ilmaisimelle, johon kaasun läpi kulkenutta sädettä verrataan. Kalibroitaispektrin ja tietokonemallien avulla saadaan savukaasun lämpötila ja CO/CO<sub>2</sub>-suhde määritettyä. Anturin vasteaika on muutamia sekunteja, mikä on parempi kuin näytteenottoon perustuvilla menetelmillä ja erinomainen varsinkin säätöä ajatellen. Luotettava mittausignaali saadaan suurimmalta osalta puhallusta eli mittauksen käytettävyys on kohtuullinen. /13/

Savukaasumittauksen käytettävyys on osoittautunut hyväksi Voest-Alpine Stahlin Linzin tehtailla. Yli 98% käytettävyysaste on saavutettavissa siinä, missä apulanssin käytettävyys oli 91,3%, mikä tosin ei ole apulanssille kovin hyvä lukema. /20/

### 3.4 Mittaukset muilla menetelmillä

Terässulasta puhalluksen aikana tehtävien mittausten ongelmana on prosessiolosuhteet, joissa koskettavien tai edes lähelle sijoitettavien anturien käyttö jatkuvaan mittaukseen on mahdotonta. Tärkeimpiä mittaushetkiä dynaamisen ohjauksen kannalta ovat sulan pinnankorkeus, sulan lämpötila ja sulan hiilipitoisuus.

Liekin intensiteetin lasku konvertterin suulla vastaa pientä hiilipitoisuutta terässulassa. Tähän korrelaatioon perustuu kokeneiden operaattorien silmämääräinen arvio hiilipitoisuudesta ja varsinaisten valoanturien (engl. light sensor) toiminta. Valoanturiyksikkö sisältää varsinaisena anturina seleenivalokennon, jonka suurin herkkyys on näkyvällä aallonpituusalueella noin 560nm kohdalla, mikroprosessorikortin anturignaalin käsittelyä ja antoa varten sekä ilmatiiviin, ilmajäähdytetyn ja paineistetun teräskoteloinnin, jossa on aukko konvertteriin suunnattuna. Yksikön antama millivolttiulostulo on verrannollinen valon intensiteettiin. /18/

Bethlehem Steelin Sparrows Pointin tehtailla tehdyissä kokeissa on verrattu valoanturilla konvertterista mitatun valon intensiteettiä kumulatiiviseen puhalletun hapen määrään. Havaittiin, että matalilla hiilipitoisuuksilla (alle 0,05%) piirretyn kuvaajan, valon intensiteetti puhalletun hapen funktiona, tietyt ominaispiirteet korreloivat erittäin hyvin kaadossa mitatun hiilipitoisuuden kanssa. Hiilipitoisuudelle kehitettiin regressioyhtälö, jolla hiilipitoisuus laskettiin kolmen kuvaajasta saatavan ominaisarvon avulla. Hiilipitoisuuden lasketun estimaatin virheen standardipoikkeama oli 0,005-0,007% välillä, kun virhe oli kaadossa mitattu hiilipitoisuusprosentti vähennettynä estimoidulla hiilipitoisuudella. Kun hiilipitoisuutta arvioitiin staattisella mallilla, standardipoikkeama samasta virheestä oli 0,01-0,02% välillä. Reaaliaikaista valoanturimittausta käytetään Bethlehem Steelin tehtailla matalahiilisten laatujuonien happipuhalluksen automaattiseen säätöön. Mittauksen käyttöönoton jälkeen keskimääräinen hiilipitoisuudesta johtuvien uudelleenpuhallusten määrä putosi alle puoleen alkuperäisestä. Puhalluksen lämpötilan

osumatarkkuuteen säädöllä ei ollut keskimäärin vaikutusta. Mittausta käytetään myös ilman säätöä operaattorien apuna puhalluksen lopetushetken määrittämisessä. /18/

Konvertterin suulle asennettavaa äänimittausta (engl. sonic meter) voidaan käyttää kuonan vaahtoamisen ennakoimiseen ja ominaisuuksien mittaamiseen. Konvertterista mitattava äänisignaali vahvistetaan ja suodatetaan noin 160-180Hz taajuusalueelle. Saatava signaali kuvaa kuonaemulsion fyysistä tilaa. Matala signaali tarkoittaa suurta kuonamäärää. Cockerill Sambren Chertalin LD-HC yhdistelmäpuhalluskonvertterissa tehtyjen kokeiden perusteella matalalla äänisignaalilla puhalluksen lopussa on suora korrelaatio matalaan fosforipitoisuuteen teräksessä. /10/

TIP-anturi (engl. Thermal Imaging Pyrometer) sijoitetaan happilanssin suuttimien keskelle 2,5-tuumaiseen putkeen. Näköyhteys sulaan, jatkuvalla instrumentti-ilmapuhalluksella varustetun lanssinkärjen reiän läpi, on kaiken aikaa erinomainen. TIP-anturiin kuuluu kaksi 50000 kuidun kuvan valokuitukimppua, jotka kytketään lanssin kärkeen sekä toisessa päässä kaksi CCD-kameraa, jotka kuvaavat valokuitujen tuoman mustavalkoisen kuvan suoraan konvertterista. TIP-anturi mittaa säteilytason kahdella eri aallonpituudella, jotka ovat lähellä infrapuna. Mittauksista lasketaan konvertterin pintalämpötila kaavalla

$$T = \frac{-C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \left( \frac{V_{\lambda_1}}{V_{\lambda_2}} \right) - \ln \left( \frac{G_1}{G_2} \right) - \ln \left( \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \right)} \quad (4)$$

missä  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  ovat mitatut aallonpituudet,  $V_{\lambda_1}$  ja  $V_{\lambda_2}$  ovat kahden saadun kuvan harmaan intensiteetit,  $C_2$  on toinen säteilyvakio,  $\epsilon_{\lambda_1}$  ja  $\epsilon_{\lambda_2}$  ovat pinnan emissiivisyys kahdella mitatulla aallonpituudella ja  $G_1$  ja  $G_2$  ovat kalibroituvakioita. Kapealla aallonpituusalueella emissiivisyydet oletetaan yhtä suuriksi ja viimeinen termi nimittäjästä jää pois. TIP-anturin avulla voidaan laskea mm. pintalämpötila sulassa, kertynyt happivirtaus ja lanssin korkeus sulasta. Anturilla mitattu sulan loppulämpötila ei heitä yli 20°F perinteisestä termoelementtiparilla tehdystä lämpötilamittauksesta. Anturin vaihto lanssiin ei kestä kuin 20 minuuttia. Osa TIP-anturin ominaisuuksista on vielä kehityksen alla, mutta sitä on jo kokeiltu täyden mittakaavan tehdastuotannossa. /3/

Kaikista vaikein mittauskohde konvertterissa on sulan pinnankorkeus, jolla kuitenkin on erittäin suuri merkitys prosessin tehokkuuden kannalta. Oikea etäisyys lanssin kärjen ja terässulan välillä on kriittinen mm. kuohumisen estämisen, raudan kuonaantumisen ja pohjasekoituksen kompensoinnin kannalta. Vanhoja mittauskeinoja on esimerkiksi kiinnittää lanssin päähän terässauva, laskea se sulaan ja laskea jäljelle jääneen sauvan pituudesta ja lanssin asematiedoista sulan pinnankorkeus tai käyttää apulanssissa termoelementtiparia ja mitata pinta ennen puhalluksen aloitusta. Tämä on kuitenkin hankala ja aikaa vievä keino. Uudempi ja paljon käytetty tapa on mitata laserilla etäisyyksiä kiintopisteisiin ja muodostaa kolmiulotteinen profiili konvertterista, josta konvertterin tilavuus saadaan laskettua, ja kun tunnetaan panoksen koko voidaan pinnankorkeus laskea. Menetelmän haittana on laskemisen epätarkkuus ja profiilin muodostamisen hitaus, etuna taas konvertterin seinämien kulumisen seuranta. /8/, /5/



Tutkamittaus (engl. radar level measurement) antaa tarkan, suoran mittauksen sulan pinnankorkeudesta muutamassa minuutissa ja mahdollistaa lanssin korkeuden optimoinnin. Normaalisti mittausta ei tarvitse tehdä kuin noin kerran vuorossa. Tutkamittauslaitteisto sisältää mikroaaltoalueen lähetin-vastaanottimen yhdellä antennilla ilmapuhalletussa suojakotelossa ja prosessointiyksikön, joka antaa mittaustiedon digitaalisena tai analogisena eteenpäin. Mittaus perustuu aikaeroon signaalin lähetyshetkestä sen heijastumiseen takaisin vastaanottimeen. Antennin sijoituksella saadaan helposti vahva primäärikaiku, jolloin heikommat kaiut voidaan suodattaa pois. Mittaus voidaan tehdä ennen tai jälkeen puhalluksen ja se on osoittautunut tuotantokelpoiseksi. Hankaluutena tutkalaitteistoilla on niiden iso koko ja esimerkiksi lanssi joudutaan ehkä ensin siirtämään pois konverterin suulta ennen kuin mittaus on mahdollista. /11/

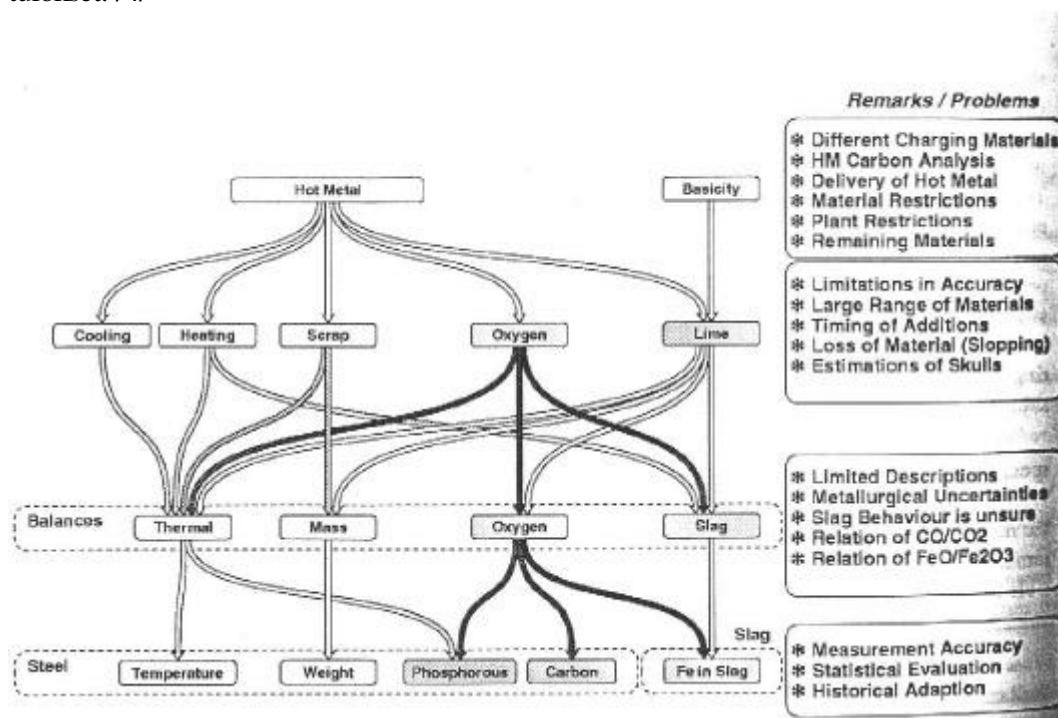
Uutta kehitteillä olevaa tekniikkaa pinnanmittauksessa on FMCV tutka (engl. Frequency Modulated Continuous Wave). FMCV-tutka perustuu Doppler-ilmiöön ja mitatessa sulan pintaan lähetetään jatkuvia signaaleja eri taajuuksilla, jolloin takaisin heijastuneiden signaaleiden vaihesiirron perusteella voidaan laskea etäisyys sulasta. Esim. Fisher-Rosemountin APEX-tutka toimii 24GHz taajuudella, jolloin iso antenni ei ole tarpeen säteen kohdistamiseen tarkasti sulan pintaan, vaikkakin mittalaitteen asemointi ja keilan leveys ovat hyvin kriittisiä. Mittausyksiköstä voidaan tehdä siten pieni ja kevyt verrattuna markkinoilla oleviin pulssitutkiin. Sulan pintamittaus voidaan tehdä ennen puhallusta ja puhalluksen jälkeen muutamassa sekunnissa. Tehdastesteissä LTV Steelin Indiana Harborin tehtaiden yhdistelmäpuhalluskonverterissa on saatu alustavia hyviä tuloksia. /8/

## 4 KONVERTTERIN MALLIT JA DYNAAMINEN OHJAUS

Konvertteriprosessin mallintamisen tekee hankalaksi paitsi monimutkaisuus myös hankalat olosuhteet, kuten korkea lämpötila, jonka vuoksi on hankala saada paitsi suoria jatkuvia mittaustietoja myös kattavia analyyseja metallisulan tai kuonan koostumuksesta puhalluksen aikana. Erilaisia tietokonepohjaisia konvertterin prosessimalleja on kehitelty jo vuosikymmeniä. Konvertteriprosessin monimutkaisuus on suurimpana syynä matemaattiseen mallintamiseen, jonka tärkein sovellutus on panostettavien materiaalien määrän laskenta. Yleiset ongelmat mallinnuksessa ovat:

1. Fysikaalinen tai kemiallinen ongelma on niin monimutkainen, että täsmällisen datan puuttuessa on lähes mahdoton kuvata prosessia kaikilta yksityiskohdilta tai ymmärtää kaikkien reaktioiden pienimmät yksityiskohdat soveltuvan matemaattisen kuvauksen luomiseksi.
2. Mikä tahansa approksimatiivinen kuvaus sisältää rajoituksensa ja tuloksilla on oma tilastollinen hajontansa ja selittämättömiä poikkeamia.
3. Joka tapauksessa prosessin ollessa monimutkainen hyvä approksimaatio on aina parempi kuin operaattorin arviointi ilman matemaattisten mallien apua.
4. Konvertteriprosessit ovat yksilöllisiä ja usein ohjausjärjestelmän onnistuneen käytännön toteutuksen siirtäminen toiselle tehtaalle sellaisenaan johtaa ongelmiin.
5. Yksilöllisyys pätee myös konvertterimallien siirtämiseen tehtaasta toiseen.
6. Vaikein ongelma käytännön toteutuksessa on malliparametrien viritys tilastollisen käyttäytymisen mukaan, jolloin yksittäisten vaikutusten analysointi on vaikeaa.

Kuvassa 5 on periaatteellinen kuva konvertteriprosessin vuorovaikutuksista panosmateriaalien kesken, tarvittavia tasemalleja ja tarvittavat mallinnuksella saatavat tulokset. /4/



Kuva 5. Konvertteriprosessin mallinnus /4/

## 4.1 Staattinen malli

Staattinen malli on laskennallinen peruslähtökohta konvertterin panostukselle ja ohjaukselle, ja sen antamia tuloksia tarkennetaan dynaamisella ohjauksella. Staattisten mallien avulla lasketaan panostettavan raakaraudan, romun ja kalkin määriä halutun loppulämpötilan ja hiilipitoisuuden saavuttamiseksi, kun noudatetaan tiettyä puhalluspraktiikkaa. Puhalluspraktiikkaan kuuluvat määrätyt päältäpuhalluskaasun ja pohjahuuhtelukaasun puhallusnopeudet, päältäpuhalluslanssin korkeudet ja korkeuden muutosajat, kalkkipanoksen porrastus, pohjahuuhtelun aloitusaika ja pohjahuuhtelukaasun puhallusnopeuden muutokset. Lisäksi huomioidaan muut panostettavat aineet, kuten harkkorauta tai konvertteripöly. Staattisiin malleihin liittyy yleensä myös rekursiivinen korjaus, jossa edellisten samalla praktiikalla suoritettujen puhallusten tuloksien poikkeamaa käytetään laskennan tarkentamiseen. /23/

Esimerkkinä ILVAN Taranton tehtailla päältäpuhallettavan konvertterin staattinen mallinnus sisältää konvertterin panoslaskennan. Staattinen laskenta on jaettu kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa eli esilaskennassa lasketaan panostettavan raakaraudan ja romun optimaalinen määrä analyysien ja tuotettavan teräslaadun perusteella. Toisessa vaiheessa, kun konvertteriin on panostettu raakarauta ja romu ja määrät ovat tiedossa, voidaan laskea tarvittavat kalkin, raudan, lisäaineiden ja puhallettavan hapen määrät. Kolmannessa vaiheessa eli uudelleenlaskennassa lasketaan vielä tarvittavat suureet, kun panostettujen lisäaineiden määrä on tiedossa. Laskenta perustuu empiiriseen, statistiikkaan perustuvaan malliin, joka vertaa kuutta viimeistä, samankaltaista sulatusta laskennan parametrien määrittämisessä sopivilla painokertoimilla. Tämän takia sulatukset täytyy luokitella luokiksi, joilla on samankaltaiset teräksen ominaisuudet. /1/

NKK:n Keihin Worksin NK-CB-konvertterilla staattinen panoslaskennan malli käsittää sintterin, koksen ja hapen kulutuksen laskennan sekä fosforinpoistoon tarvittavan kalkin määrän. Poltetun kalkin lisäys perustuu staattisen mallin laskemaan määrään, joka näytetään operaattorille ja operaattori valitsee sopivan määrän kalkkia panostettavaksi. Varsinaista staattista mallia tarkennetaan lämpöasetta vertailevalla mallilla. Malli käyttää tietokantaa, jossa on kyseisen sulatuksen, normaali- ja erikoislaatuisten sekä erikoisolosuhteiden data. Kymmenen samanlaista sulatusta valitaan referenssiksi ja sintterin, koksen ja hapen kulutus lasketaan jokaisen referenssin tiedoilla, joista operaattori voi sitten valita parhaiten sopivat arvot tulevaan sulatukseen. /7/

Sumimoto Metal Industriesin Kashiman tehtailla staattinen malli sisältää tärkeänä tekijänä dynaamisen ohjauksen kannalta apulanssin mittaushetken määrittämisen panoslaskennan perusteella. Suuri hajonta mittaushetken hiilipitoisuudessa ja sulan lämpötilassa aiheuttaa dynaamisen mallin epästabiiliuden. /6/

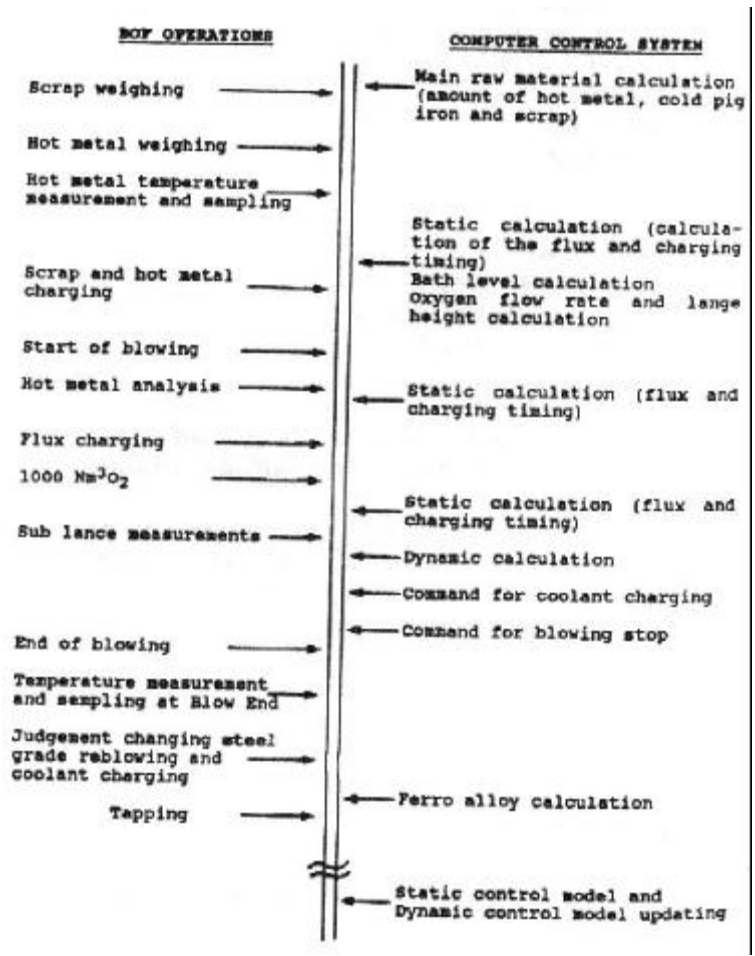
## 4.2 Puhalluskäytäntö ja puhalluspraktiikka

Puhalluskäytäntöön kuuluu staattisen mallin panoslaskenta, panostus, happipuhalluksen ja mahdollisesti pohjapuhalluksen aloitus, happilanssin paikan säätö puhalluksen aikana, happivirtauksen ja pohjapuhalluksen virtauksen säätö, puhalluksenaikainen näytteenotto apulanssilla tai pelkkä mittaus pudotussondilla, mahdolliset lisäainelisäykset, puhalluksen lopetus ja mahdollinen loppunäyte ennen kaatoa. Puhalluskäytäntö syntyy ja hioutuu monien tekijöiden summana, johon vaikuttavat käytetyt mittaustekniikat ja niiden käytettävyys, käytetyt mallit, mallien määrä ja tarkkuus, aiemmat kokemukset, automaation taso, raakaraudan laatuvaihtelut ja teräksen laatuvaatimukset, käytettävissä oleva mittaustietokanta ja sen laajuus, jne. Kuvassa 6 on esitettyä tavanomaisen apulanssilla varustetun konvertterin sulatuksen kulku.

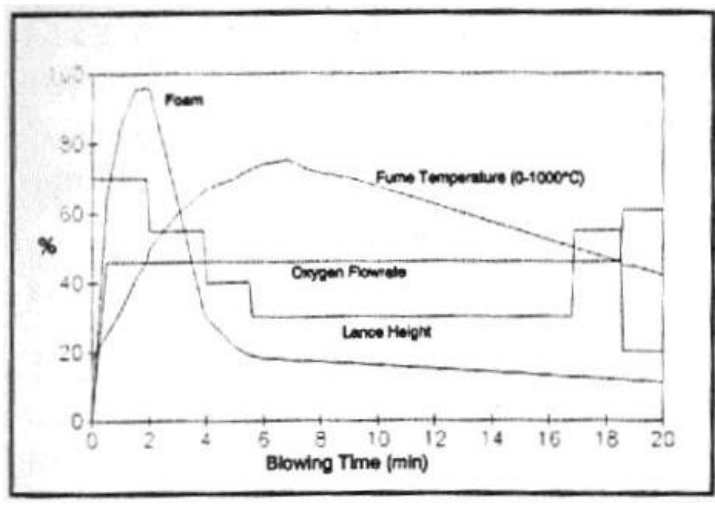
Puhalluspraktiikkaan kuuluvat määrätyt päältäpuhalluskaasun ja pohjahuhtelukaasun puhallusnopeudet, päältäpuhalluslanssin korkeudet ja korkeuden muutosajat, kalkkipanoksen porrastus sekä pohjahuhtelun aloitusaika ja pohjahuhtelukaasun puhallusnopeuden muutosajat. /23/ Puhalluspraktiikka on tärkein yksittäinen puhalluksen lopputulokseen vaikuttava tekijä, mutta yleensä käytetyt praktiikat ovat melko pitkälle käytössä hiottuja. Konvertterin pintamittauksen toimivuus vaikuttaa oleellisesti käytetyn praktiikan toimivuuteen.

Kuvassa 7 on esimerkkinä Cockerill Sambren Chertalin LD-HC konvertterin optimoitu puhalluspraktiikka. Puhalluksen alussa korkealla olevaa lanssia lasketaan ensimmäisen 5 minuutin aikana progressiivisesti 20 cm minuutissa. Matala asento pidetään suurimman osan aikaa nopean mellotuksen takaamiseksi. Puhalluksen lopussa lanssia nostetaan hieman kuonan kasvattamiseksi ja siten fosforin kuonaantumisen varmistamiseksi. Tavoitteena ohjauksessa on ollut matala fosforitaso, mihin auttaa runsas kuona puhalluksen aikana ja tarvittaessa lanssia on pyritty nostamaan runsaan kuonan ja fosforin kuonaantumisen edistämiseksi.

NKK:n Keihin Worksin NK-CB-konvertterilla puhalluspraktiikan hoitaa automaattinen ohjausjärjestelmä prosessitietokoneen antaman ohjeen mukaisesti ja operaattorin tehtävänä on valvoa ja tehdä korjauksia, jos kuohumista tai roiskumista tapahtuu. Apuna on vielä erillinen kuohumisen ennakointimalli, joka estimoii savukaasun virtauksesta, puhallushapen hapetustehosta ja sulan metallin tilasta kuonan tilan ja kuohumistodennäköisyyden. Malli voi myös korjata puhalluspraktiikkaa automaattisesti. Prosessitietokone saa lähtötietoina mm. konvertterin pinnankorkeuden, piipitoisuuden, suutintyyppin, raakarauta-romusuhteen, panostetut lisäainemäärät, valmistettavan teräslaadun ja tavoite hiili- ja typpipitoisuudet. Tietokone laskee näistä sopivan happivirtauskäyrän, lanssin asemakäyrän, pohjahuhtelukaasun virtauskäyrän sekä panostettavien lisäaineiden määrät ja panostushetket. /7/



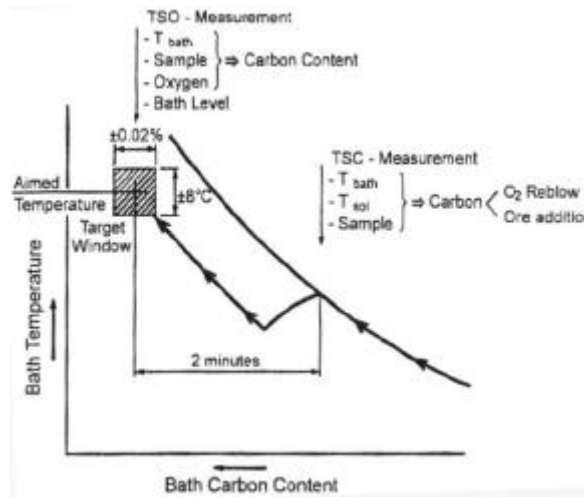
Kuva 6. Apulanssia käyttävän konvertterin puhalluskäytäntö /1/



Kuva 7. LD-HC konvertterin optimoitu puhalluspraktiikka /11/

### 4.3 Dynaaminen malli

Dynaaminen malli tarvitaan antamaan riittävän tarkka arvio puhalluksen optimaalisesta lopetushetkestä ja mahdollisesti tarvittavista lisäainelisyksistä, jotta sulatukselle asetetut koostumus- ja lämpötilavaatimukset täyttyvät. Kuvassa 8 on esitetty dynaamisen ohjauksen peruskonsepti, tässä tapauksessa apulanssisysteemillä TSC- ja TSO-sondeja käyttäen.



Kuva 8. Dynaamisen ohjauksen peruskonsepti /24/

Sumimoto Metal Industriesin Kashiman tehtailla on käytössä puhalluksen lopetuspuheen ohjausjärjestelmä, joka koostuu dynaamisesta ohjausmallista ja takaisinkytketystä laskentamallista. Dynaaminen ohjausmalli laskee tarvittavan puhallushapen määrän ja tarvittavien lisäaineiden määrän puhalluksen aikana tehdyn apulanssimittauksen perusteella. Lisäksi se arvioi teräksen lämpötilaa ja hiilipitoisuutta reaaliajassa käyttäen apulanssilla mitattua hiilipitoisuutta ja lämpötilaa. Takaisinkytketty laskentamalli laskee dynaamisen järjestelmän estimaatin virhettä operatiivisia mittausarvoja kuten puhallushapen virtausta käyttäen.

Käytetty dynaaminen ohjausmalli koostuu happitaseyhtälöstä ja lämpötaseyhtälöstä. Tarvittava hapen määrä perustuu hiilipitoisuuden muutosnopeuteen ja happitase ilmaistaan yhtälöllä

$$\frac{F_{O_2} + \eta \sum W_{sub} \cdot O_2}{W_{st}} = a_0 (C_{SL} - C_{EP}) + a_1 \ln \frac{C_{SL}}{C_{EP}} + a_2 + \sum l_i (X_i - \bar{X}_i) + FB_c \quad (5)$$

missä  $a_0$ ,  $a_1$  ovat happitaseen kertoimia,  $C_{SL}$  ja  $C_{EP}$  ovat hiilipitoisuudet apulanssimittauksessa ja puhalluksen loppupisteessä,  $F_{O_2}$  on tarvittava puhallushapen määrä apulanssimittauksen jälkeen,  $\eta$  on fluksien happikerroin,  $W_{sub}$  on fluksien määrä,  $O_2$  on happea sisältävien fluksien määrä,  $W_{ST}$  on sulan teräksen paino,  $l_i$  on statistisen mallin kerroin,  $X_i$  on prosessiolosuhteiden tekijä  $i$  ja  $FB_c$  on happitaseen korjaus takaisinkytketyltä laskentamallilta.

Lämpötasemallissa yhtälö perustuu puhalletun hapen määrään eikä hiilipitoisuuteen, koska hapen määrällä on vahvempi korrelaatio lämpötilan hajontaan. Lämpötase ilmaistaan yhtälöllä

$$T_{EP} - T_{SL} = b_0 \frac{F_{O_2} + \eta \sum W_{sub} \cdot O_2}{W_{ST}} + b_2 + \gamma \sum W_{sub} \cdot T_{sub} + \sum l_i (X_i - \bar{X}_i) + FB_T \quad (6)$$

missä  $b_0$ ,  $b_1$  ovat lämpötaseen kertoimia  $T_{SL}$  ja  $T_{EP}$  ovat lämpötilat apulanssimittauksessa ja puhalluksen loppupisteessä,  $F_{O_2}$  on tarvittava puhallushapen määrä apulanssimittauksen jälkeen,  $\eta$  on fluksien happikerroin,  $\gamma$  on jäähdytyskapasiteetin kerroin,  $W_{sub}$  on fluksien määrä,  $W_{ST}$  on sulan teräksen paino,  $O_2$  on happea sisältävien fluksien määrä,  $T_{sub}$  on fluksien jäähdytyskapasiteetti,  $l_i$  on statistisen mallin kerroin,  $X_i$  on prosessiolosuhteiden tekijä  $i$  ja  $FB_T$  on lämpötaseen korjaus takaisinkytketyltä laskentamallilta.

Käytettyyn happitasemalliin olennaisesti liittyy parametrien,  $a_0$  ja  $a_1$  automaattinen viritys sulatuskohtaisesti, koska hiilen hapetustehokkuus muuttuu joka sulatuksessa eikä tarkan estimaatin saanti kiinteällä parametrilla ole mahdollista. Viritysparametrit lasketaan massaspektrometrillä saatujen savukaasumittausten perusteella. Parametri,  $a_0$ , lasketaan todellisen mitatun hapetustehokkuuden keskiarvon käänteislukuna ja parametri,  $a_1$  lasketaan parametrin,  $a_0$ , sekä todellisen hapetustehokkuuden ja hiilipitoisuuden avulla. Todellinen hapetustehokkuus lasketaan kaavalla

$$\alpha = G \cdot \frac{W_{ST} \cdot \Delta C_i}{\Delta O_i} \quad (7)$$

missä  $a$  on hiilen hapetustehokkuus,  $G$  on vahvistus,  $i$  on juokseva näytteenottohetken numero apulanssimittauksesta lopetushetkeen,  $\Delta O_i$  on puhalletun hapen määrä hetkellä  $i$  ja  $\Delta C_i$  on hiilipitoisuuden muutos hetkellä  $i$ .

Takaisinkytketty laskentamalli laskee jatkuvasti dynaamisen ohjausmallin virhettä ja sen muutosnopeutta. Muutosnopeutta verrataan aiemmissa sulatuksissa saatuihin muutosnopeuksiin ja takaisinkytkennän määrä määrätään muutosnopeuden mukaan. Muutosnopeuden suuruuden mukaan takaisinkytkennän laskentakaava valitaan kolmesta eri luokasta. /6/

NKK:n Keihin Worksin tehtailla dynaaminen ohjausmalli määrää tarvittavan puhallushapen kokonaisuuden ja sintterin määrän apulanssimittauksen jälkeen. Hiilipitoisuuden lasku ja lämpötilan nousu ennustetaan savukaasumittauksiin perustuvalla dynaamisella mallilla. Dynaaminen malli käyttää apulanssin mittaamaa hiilipitoisuutta ja lämpötilaa lähtöarvoina ja estimoi eteenpäin joka toinen sekunti hiilipitoisuutta ja lämpötilaa sulassa. Hiilipitoisuus lasketaan hiilen taselaskentana savukaasujen tilavuuden ja niiden hiilipitoisuuden perusteella. Lämpötila lasketaan hapetustehokkuuden ja konverterin jäännöshapen perusteella. /7/

ILVAN Taranton tehtailla päältäpuhalluskonverterin dynaaminen malli aktivoituu apulanssimittauksen jälkeen. Malli laskee tarvittavan puhallushapen määrän ja mahdollisesti tarvittavien jäähdytysaineiden määrän. Malli perustuu hiilen

hapetusnopeuden yhtälöön ja mallia korjataan kertoimilla, joita muutetaan puhalluksen lopussa saatujen tuloksien perusteella. /1/

Inland Steel Companyn apulanssia käyttävässä konverterissa dynaaminen malli sisältää erillisen laskennan loppupisteen hiilipitoisuudelle ja lämpötilalle. Hiilen hapetusnopeus lasketaan yhtälöllä

$$\frac{dC}{dO} = A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{C-C_0}{B}} \right) \quad (8)$$

missä A ja B ovat kokeellisia vakioita ja  $C_0$  on hiilipitoisuus, jossa hapettumista ei enää tapahdu.

Lämpötilan laskenta perustuu yhtälöön

$$T = T_{SL} + D \cdot O_2 + E \cdot W + F \quad (9)$$

missä D, E ja F ovat kokeellisia vakioita ja  $T_{SL}$  on apulanssilla mitattu lämpötila. On esitetty, että lämpötila on myös puhalluksen aikaisen hiilipitoisuuden funktio, mitä ei tässä yhtälössä oteta huomioon. /14/

#### 4.4 CONSIM- konverterin simulointiohjelma /23/

Kotimaista CONSIM-simulointiohjelmaa on tehty jo 1980-luvulta lähtien. Kirjoitushetkellä uusien Windows-pohjainen versio 4.0 pitäisi olla valmistunut. CONSIM-ohjelma simuloi rautasulan, kuonan ja konverterikaasun määrän, koostumuksen ja lämpötilan ja romun sulamisen, puhallushapen funktiona. Koska happea puhalletaan vakionopeudella, saadaan puhallushapen kulutuksen funktiona myös puhallukseen kulunut aika. Ohjelma perustuu oletukseen, että mellotusprosessin edistymistä kontrolloi keskeisesti

1. Rautasulan seosaineiden (C, Mn, Si, P, V, Ti) ja raudan palamis- ja kuonautumisreaktioiden termodynaaminen affiniteetti eli termodynaaminen todennäköisyys.
2. Seosaineiden aineensiirto rautasulassa.
3. Kemiallisten reaktioiden lämmöntuotto ja lämmön kulutus konverterissa tapahtuviin termisiin prosesseihin.

Mallissa on yksinkertaistettu mellotusreaktioiden kuvausta siten, että koko konverteri oletetaan yhdeksi faasiksi ja mellotusreaktiot kuvataan yhdellä, yhteisellä laskennallisella reaktiopinnalla. Aineensiirto konverterin sulasta tähän pintaan on formuloitu ns. pinnan uudistusteorian pohjalta. Sekoituksen intensiteetti määräytyy päältäpuhalluksesta ja pohjahuuhtelusta sulaan dissipoituvasta liike-energiasta, ja sekoituksen intensiteetti taas vaikuttaa hapettuvien seosaineiden korvautumiseen reaktiovyöhykkeessä. Mellotusreaktioiden termodynaaminen affiniteetti kontrolloi reaktiovyöhykkeessä tapahtuvaa hapen jakautumista raudan ja seosaineiden hapettumiseen.



Consimin laskenta jakautuu kolmeen askeleeseen, isoon ja pieneen laskentasilmukkaan ja sisimmäiseen hapetussilmukkaan. Jokainen laskentasilmukka päivittää mallintamansa datan, hapetusreaktiot lyhyimmällä ja ison laskentasilmukan data pisimmällä aikaintervallilla. Consimin tärkeimpiä osamalleja ovat romunsulamismalli, pinnan uudistumisteoriaan perustuva aineensiirtomalli, Shiro Ban-yan kuonamalliin perustuva kuonamalli, lämpöhäviömalli, jälkipalamismalli sekä kalkin liukenemismalli. Consimia voidaan hyödyntää esimerkiksi konvertteriprosessin puhalluspraktiikan ja konventionaalisen staattisen mallin suunnittelussa ja testauksessa, korvaamalla staattinen laskentamalli dynaamisella simuloinnilla tai siitä voidaan kehittää dynaamisen ohjauksen apuväline. Ohjelma pitää kuitenkin sovittaa jokaiselle tehtaalle erikseen. Consim-ohjelma sovitettiin onnistuneesti Oy Fundia Wire Ab:n Koverharin tehtailla sulaton 60 tonnin konverttereille ja implementoinnista on tehty diplomityö /12/. Sovituksessa jääneisiin virheisiin ja parametrien sovitukseen liittyen on tekeillä insinöörityö.

#### **4.5 Dynaaminen ohjaus savukaasumittaukseen perustuen**

Nykyinen suuntaus apulansittomiin dynaamisen ohjauksen järjestelmiin perustuu apulanssimittauksen korvaamiseen jollain toisella menetelmällä. Pudotussondien lisäksi pisimmällä on savukaasujen jatkuvaan mittaukseen perustuva tekniikka. Savukaasujen mittaukseen perustuvaa tekniikkaa on kokeiltu käytössä jo ympäri maailmaa ja tulokset ovat olleet niin hyviä, että apulanssin käytöstä ollaan luopumassa savukaasumittauksen rinnalla. Savukaasumittauksiin perustuvia dynaamisen ohjauksen järjestelmiä tarkastellaan seuraavassa luvussa.

Kokemuksen mukaan happipuhalluksen lopussa CO-, CO<sub>2</sub>- ja O<sub>2</sub>-pitoisuudet savukaasussa muodostavat tunnistettavia, karakteristisia piirteitä sisältävät käyrät ja näitä piirteitä voidaan käyttää puhalluksen lopetuspisteen määrittämiseen. /20/ Vastakkaisiakin kokemuksia on, sillä Cockerill-Sambren Marcinellen pohjasta puhallettavassa K-OBM-konvertterissa on käytössä savukaasumittaus ja yli 800 sulatuksen tilastollisen tutkimuksen jälkeen päädyttiin käyttämään loppupisteen määrittämisessä konvertterikaasujen lämmöntalteenottokattilan paineen maksimia ja savukaasujen lämpötilan maksimia matalan Si-tason sulatuksille. Savukaasun CO- ja O<sub>2</sub>-pitoisuuksien leikkauspiste oli liian myöhäinen piste tehdä korjauksia, mikä johtunee osin pohjapuhalluksesta. /10/

# 5 DYNAAMISEN OHJAUKSEN JÄRJESTELMÄT

## 5.1 Dynacon / Voest Alpine /21/

EKO Stahlin kahdella 240 t LD-konvertterilla on otettu käyttöön Voest-Alpinen kehittämä Dynacon, dynaamisen ohjauksen järjestelmä. Puhalluksen loppupisteen määrittämiseen käytetään savukaasuanalyysiin perustuvaa mallia. Käytetty Lomas-savukaasumittausjärjestelmä on esitelty jo aiemmin. Dynacon sisältää yhteyden Lomas-järjestelmään, tietokannan ja graafisen käyttöliittymän. Taustalla pyörivä ohjelma kerää jatkuvasti prosessidataa varsinaisesta automaatiojärjestelmästä. Puhalluksen aikana savukaasujen tilavuus ja koostumus, tähtäyslämpötila ja tähtäyshiilipitoisuus sekä ajalliset tekijät, kuten puhalluksen aloitus- ja lopetus aika päivitetään lähes reaaliaikaisesti 5 sekunnin mittausvälillä. Puhalluksen lopussa operaattorille näytetään laskettu hiilipitoisuus sulassa sekä jäljellä oleva aika tähtäyshiilipitoisuuden saavuttamiseen.

Dynaconin dynaaminen malli perustuu oletukseen, että tasapaino saavutetaan terässulan ja kuonan välillä muutamaa minuuttia ennen puhalluksen loppua ja tästä syystä kaikki sulatukset käyttäytyvät samankaltaisesti puhalluksen lopussa. Matemaattinen kuvaus hiilen hapetusnopeuden trendistä LD-prosessin viimeisessä vaiheessa perustuu seuraaviin oletuksiin:

1. Happipuhalluksen ja pohjapuhalluksen suuruus pysyy vakiona
2. Lanssin etäisyys sulasta pysyy vakiona
3. Konvertteri pysyy suljettuna mahdollisimman pitkään

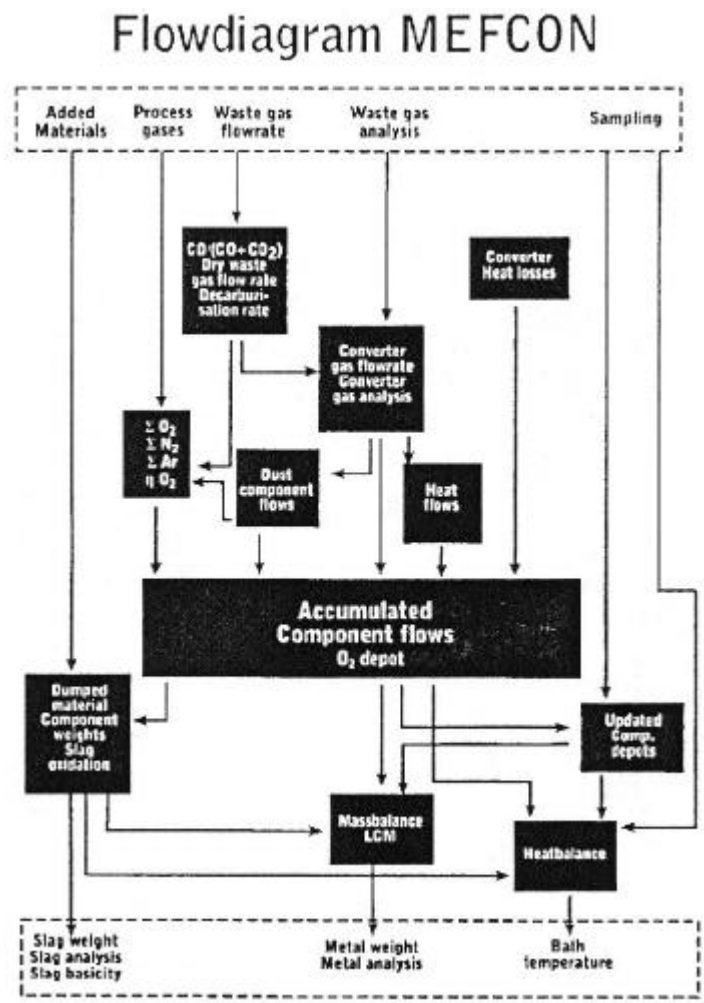
Malli käyttää CO-, CO<sub>2</sub>- ja O<sub>2</sub>-pitoisuuksia savukaasussa puhalluksen lopetus pisteen määrittämiseen. EKO Stahlilla tehtyjen käyttötestien perusteella vahvistui käsitys, että savukaasujen tilavuus ja koostumus on puhallusajan funktio. Käyttötesteissä Dynaconilla saatiin 74,8% sulatuksista laskettua hiilipitoisuus oikein  $\pm 0,005\%$  tarkkuusvaatimuksella. Kun valintakriteerit mittausvirheiden ja näytteenottovirheiden poistamiseksi otettiin käyttöön, nousi onnistuneiden ennustusten määrä 82,7%:iin.

Malli vaatii kuitenkin konvertterikohtaisen parametrien määrittämisen. Mallin suorituskyky on riippuvainen konvertterin puhalluskäyttäytymisestä. Käyttäytymiseen vaikuttavia muuttuvia tekijöitä ovat:

1. Pohjapuhalluksen tehokkuus
2. Terässulan pinnankorkeus
3. Jäännöskuonan määrä konvertterissa
4. Vuorausten geometria
5. Puhalluslanssin kunto

## 5.2 Mefcon / MEFOS

SSAB Tunnplatin tehtailla Luulajassa on ollut käytössä Mefosin kehittämä dynaamisen ohjauksen järjestelmä Mefcon jo useita vuosia kahden apulanssilla varustetun 109 t LD-LBE-konvertterin ohjauksessa. Järjestelmää on koekäytetty myös Suomessa Rautaruukin LD-KG-konvertterilla ja sen käyttöä on laajennettu myös AOD-konverttereihin. Mefcon on savukaasumittaukseen ja dynaamisen mallin käyttöön perustuva ohjausjärjestelmä. Järjestelmään kuuluu noin 10 pääohjelmistomodulia, jotka kommunikoivat keskenään reaaliaikaisen tietokannan välityksellä. Periaatekaavio on esitetty alla olevassa kuvassa 9.

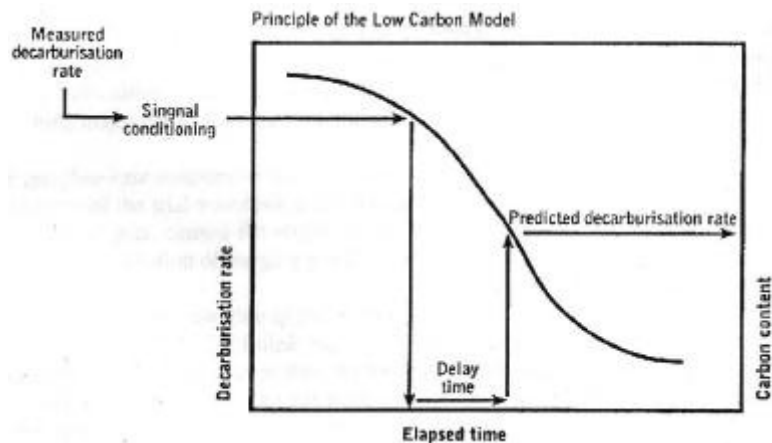


Kuva 9. MEFCON-järjestelmän vuokaavio  
 /URL:[http://www.mefos.se/mefosnews\\_2\\_00.pdf](http://www.mefos.se/mefosnews_2_00.pdf) /.

Järjestelmän toiminta perustuu reaaliaikaisesti laskettavaan aine- ja energiataseisiin. Tärkeää laskennan oikeellisuuden kannalta on savukaasumittauksien luotettavuus. Ainetaset tehdään jokaiselle terässulan ja kuonan komponentille. Happitase on suurin yksittäinen tekijä terässulan ja kuonan koostumuksen sekä lämpötilan laskennassa.

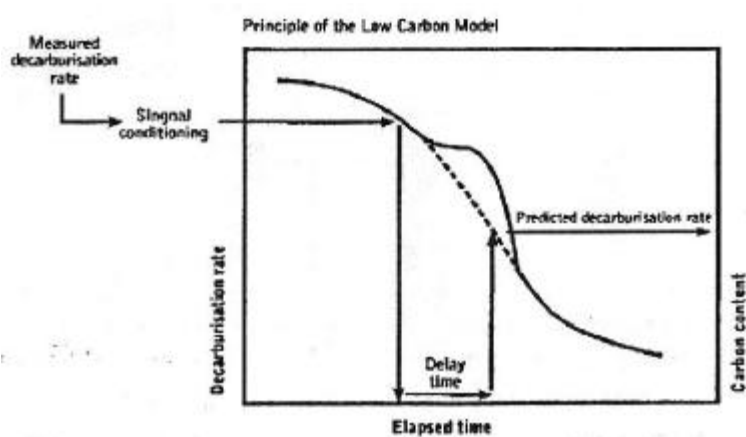
Happitaseesta lasketaan, paljonko happea on vapaana kuonan hapettumiseen ja laskettu happimäärä jaetaan kuonan komponenttien kesken erityisten yhtälöiden mukaan.

Lasketun hiilipitoisuuden tarkkuus on riittävä prosessin ohjaukseen ja valvontaan puhalluksen aikana, mutta lähtötietojen epäluotettavuuden takia tarkkuus ei ole riittävä loppupisteen määrittämiseksi. Mefconissa puhalluksen loppupiste määritetään ns. LCM-mallilla (engl. Low Carbon Model), joka käyttää konverterrikaasun jälkipalamisastetta, happivirtausta ja aikakompensoitua hiilen hapettumisnopeuden mallia hiilipitoisuuden laskemiseen. LCM-mallia sovelletaan, kun hiilipitoisuus on alle 0.15% ja hiilen diffuusionopeus sulassa rajoittaa hapettumisnopeutta. LCM-mallin periaate on esitetty kuvassa 10.



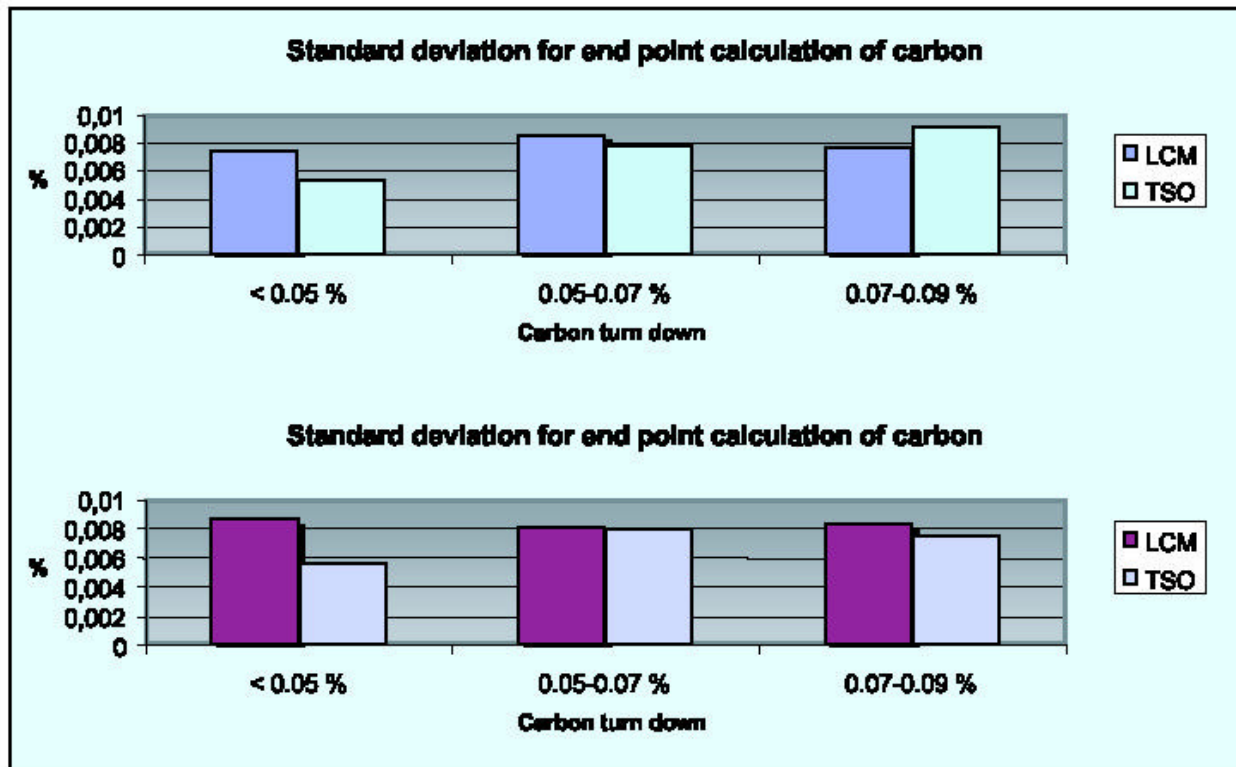
Kuva 10. MEFCON-järjestelmän LCM-mallin periaate  
/URL:[http://www.mefos.se/mefosnews\\_2\\_00.pdf](http://www.mefos.se/mefosnews_2_00.pdf) /.

SSAB Tunnpilat:lla puhalluksissa käytetään dolomiittikalkkia jäähdysaineena apulanssilla otetun näytteen jälkeen. Koska kalkin lisäys saattoi ajoittua LCM-mallin toiminta-alueelle, jouduttiin kehittämään malli, joka ennustaa lisäyksestä syntyneen lisähiilidioksidin määrän konverterrikaasuissa. Kuvassa 11 on esitetty kalkkilisäyksen vaikutus LCM-malliin.



Kuva 11. Dolomiittikalkin lisäyksen vaikutus LCM-malliin  
/URL:[http://www.mefos.se/mefosnews\\_2\\_00.pdf](http://www.mefos.se/mefosnews_2_00.pdf) /.

SSAB Tunnpilatin tehtailla on saatu hyviä kokemuksia MEFCON järjestelmän käytöstä. Puhalluksen aikana suoritettavassa näytteenotossa on voitu siirtyä käyttämään halvempia T-sondeja aiemmin käytettyjen TSC-sondien sijaan ja suurin osa puhalluksen lopussa suoritettavista näytteenotoistakin on voitu suorittaa T-sondeilla. LCM-mallin hiilipitoisuuden laskennan tarkkuus on ollut niin ikään riittävä, suunnilleen TSO-sondin luokkaa kuten alla olevasta kuvasta 12 nähdään. Kehitystyötä vaaditaan vielä ennen kuin apulanssin käytöstä voidaan luopua kokonaan.  
 /URL:[http://www.mefos.se/mefosnews\\_2\\_00.pdf](http://www.mefos.se/mefosnews_2_00.pdf) /



Kuva 12. MEFCON-järjestelmän LCM-mallin suorituskyky  
 /URL:[http://www.mefos.se/mefosnews\\_2\\_00.pdf](http://www.mefos.se/mefosnews_2_00.pdf) /.

### 5.3 BloCon / Mannesmann Demag /4/

Mannesmann Demagin kehittämä BloCon (engl. **B**lowing **C**ontrol **S**ystem) on dynaamisen ohjauksen järjestelmä, joka on uudelleen suunniteltu alkuperäisestä muodostaan mahdollisimman monikäyttöiseksi, sillä esimerkiksi laskennassa voidaan ottaa huomioon kaikki mahdolliset materiaalit. BloCon pitää muiden järjestelmien lailla virittää kulloisenkin konvertterin olosuhteisiin. Tähänkin on panostettu yrittämällä tehdä viritettävien parametrien määrä mahdollisimman pieneksi.

Järjestelmän staattinen laskenta perustuu LD-konvertterin metallurgiseen kuvaukseen ja ratkaisee prosessin aine- ja energiataseita lineaarisen optimointikaavan avulla. Mallinnusta varten kaikkien panostettavien aineiden fysikaaliset ominaisuudet lasketaan per tonni periaatteella. Ennen laskennan aloittamista täytyy järjestelmälle antaa seuraavia parametreja:

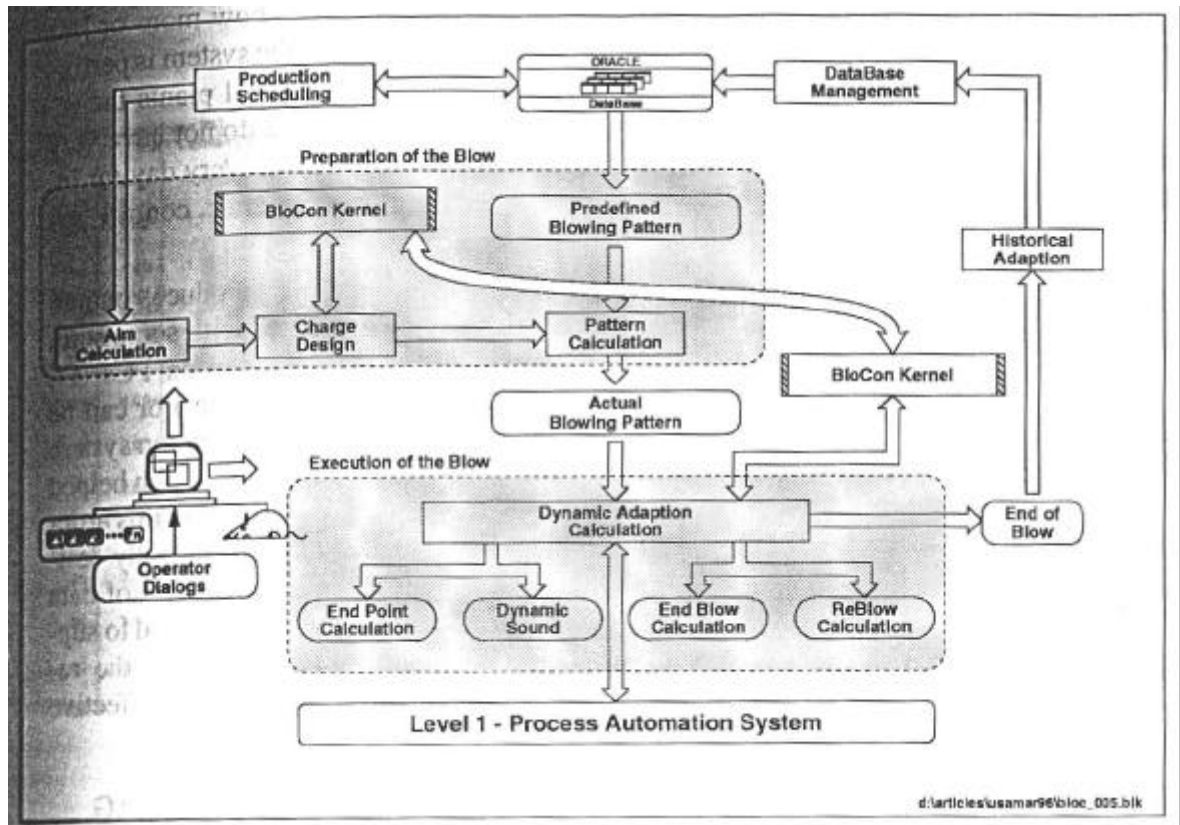
1. materiaalin data (analyysit, fyysiset/kemialliset ominaisuudet)
2. alkuainekohtainen data
3. haluttu kuonan emäksisyys
4. laskettu rautapitoisuus kuonassa
5. jälkipalamisaste
6. FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-suhde raudan poltossa
7. Arvioitu/laskettu teräsanalyysi puhalluksen lopussa

Panostettavien materiaalien panostusjärjestykset täytyy määrätä ja lisäksi jokaiselle materiaalille täytyy määritellä reunaehdot. Reunaehdot voivat olla hyvinkin erilaisia eri laitoksilla ja sisältävät lähinnä laitteiston rajoituksia, kuten romupanoksen enimmäiskoko, yms. Kun kaikki tarvittavat lähtötiedot on annettu, laskenta suoritetaan käyttäen lineaarista ohjelmointia, SIMPLEX-algoritmia. Laskennassa lasketaan prosessin teräksen ainetase, energiatase, kuonan koostumus, kalkkitase, happitase ja minimihinta panostettaville materiaaleille. Jos annetuilla reunaehdoilla sekä aine- että energiataseen täyttäminen on mahdotonta, algoritmille täytyy määrätä, täytetäänkö ainevai energiatase. Yleensä saanti on oikean loppulämpötilan edellä, koska lämpötilaa voidaan hallita lisäainepanostuksilla.

Järjestelmässä käytetään seuraavia malleja asiakaskohtaisesti hieman muunneltuna:

1. Malli, joka huomioi raakauraudan kuljetuksen mittauspaikasta panostukseen, rikinpoistoaseman vaikutuksen, konvertterin tap-to-tap ajan, puhalluksen keskeytykset.
2. Kuonamalli, joka kuvaa kuonan koostumusta, erityisesti Fe-pitoisuutta.
3. Malli, joka ottaa huomioon jälkipalamisen vaikutukset.
4. Malli, joka ennustaa mangaanipitoisuuden puhalluksen lopussa.
5. Erikoismallit palautettuja teräspanoksia varten.

Seuraavan sivun kuvassa 13 on esitettyä yleiskuva BloConin laskentamoduuleista.



Kuva 13. BloCon-järjestelmän laskentamoduulit /4/.

Staattisen mallin panoslaskennan jälkeen järjestelmä muodostaa käytettävän puhalluspraktiikan tietokantaan ennalta määräytyistä praktiikoista ja staattisen panoslaskennan vaatimuksista. Dynaaminen laskenta suorittaa määrätyn puhalluspraktiikan. BloCon Kernel on järjestelmän ydin (yhdessä joustavan, reaaliaikaisen tietokannan kanssa), joka hoitaa sekä panoslaskennan että korjaukset prosessin ohjaukseen puhalluksen dynaamisen vaiheen aikana. Prosessitapahtumien mukaan erikoismalleja otetaan käyttöön puhalluksen aikana kuvaamaan erikoistilannetta. Järjestelmään kuuluu myös adaptiivinen toiminto, historical adaption, joka mukauttaa seuraavien puhalluksien parametrejä tietokannassa edellisten tuloksilla. Mittaustulokset, joiden perusteella tietokantaa päivitetään, ovat puhalluksen lopussa mitattu lämpötila, happipitoisuus, hiilipitoisuus ja Fe/FeO-suhde kuonassa. Mikäli puhalluksen aikana on ollut jokin epänormaali tilanne, tietokantaa ei päivitetä.

BloCon-järjestelmä on otettu käyttöön Preussal Stahl AG:n Salzgitterin tehtailla. Järjestelmän lisäksi tehtaalle asennettiin savukaasuanalysointori ja äänimittaus konvertterin suulle. Savukaasumalli arvioi savukaasumittausten perusteella hiilipitoisuutta sulassa ja mikäli päätepiestelaskennan laskema puhalluksen päätepieste on liian aikaisin, savukaasumalli lisää puhallusaikaa tai mikäli savukaasumittausten mukaan on ylipuhalluksen vaara, malli yrittää estää tämän panostamalla jäädytysmateriaalia. Ultraäänimittauksen perusteella ohjataan puhalluksen alussa happilanssia kuohumisen estämiseksi. Lisäksi järjestelmään lisättiin uudellenpuhalluksen laskenta, joka automaattisesti laskee sopivan uudellenpuhalluksen lisäainepanostuksineen mikäli sitä tarvitaan.

## 6 YHTEENVETO

Dynaaminen ohjaus on tehokkain keino parantaa LD-konvertterien kustannustehokkuutta ja tehdaskokeilujen perusteella siinä on vielä runsaasti kehittämispotentiaalia. Perinteisen dynaamisen ohjauksen mittauksen eli apulanssin rinnalle on tullut runsaasti uusia, lupaavia tekniikoita, joiden käytöllä on mahdollista luopua kalliiden apulanssien käytöstä, mikäli vain saadaan kehitettyä riittävän kattavia ja tarkkoja malleja konvertteriprosessista. Lupaavimpia tekniikoita ovat savukaasumittaukseen perustuva puhalluksen päätepisteen määrittäminen, pudotussondien käyttö apulanssien sijasta ja tutkapinnanmittaus, joka mahdollistaa entistä tarkemman pinnan mittauksen. Pinnan mittaus on oleellinen tekijä konvertteriprosessin tehokkuuden kannalta.

Konvertterin mallinnus on vaativa tehtävä ja yleensä konvertterin ohjauksessa käytetään useita, rinnakkaisia osamalleja sekä erikoismalleja tiettyyn vaiheeseen puhallusta tai tiettyjä tilanteita varten. Suurin ongelma on paitsi kattavan mittaustiedon saanti myös konvertteriprosessia koskevan tietämyksen puute. Suurin osa teollisuudessa käytetyistä malleista ovatkin luonteeltaan empiirisiä ja mallien käyttö edellyttää aina laitoskohtaisia virityksiä.

Dynaaminen ohjaus tarkoittaa konvertterin staattisella mallilla suoritettua panoslaskentaa puhalluksen aikana saadun hetkellisen mittausarvon tai jatkuvan mittauksen avulla. Hiilipitoisuus ja lämpötila ovat tärkeimmät tarkkailtavat suureet puhalluksen aikana. Hiilipitoisuus korreloi hyvin savukaasujen tilavuuden ja koostumuksen perusteella lasketun hiilitaseen kanssa, kun taas lämpötila on selvimmin riippuvainen puhalletun hapen määrästä eli lasketusta happitaseesta.

Dynaamisen ohjauksen järjestelmiä on kehitetty ensin koeluontoisesti ja nykyään myös tuotanto-olosuhteissa. Järjestelmiä on jopa tuotteistettu tekemällä niistä monikäyttöisempiä. Lupaavimmat ovat MEFOSin MEFCON ja Voest-Alpinen Dynacon, jotka perustuvat pitkälti savukaasumittauksiin ja antavat aihetta uskoa, että apulanssista voidaan luopua kokonaan dynaamisessa ohjauksessa. Järjestelmien keskeiset osat ovat prosessin staattiset ja dynaamiset mallit, niiden laitoskohtaiset viritysparametrit, mittaukset ja niiden talletus tietokantaan, puhalluspraktiikan suunnittelu ja sopivien parametrien määrittäminen tuleville sulatuksille tietokannan samankaltaisten perusteella, reaaliaikainen prosessisuureiden laskenta ja näyttö operaattorille sekä ohjaustoimenpiteet laskettujen puhalluksen päätepisteen arvojen perusteella.



## 7 LÄHDELUETTELO

- /1/ Abbatangelo, A; Rena, M.D; Palchetti, M; Zampetti, L. Blowing Pattern Computerised Control at Taranto Steelshop. Iron and Steel Society, Inc., 1990, s. 337-342.
- /2/ Bergman, D. Experience of waste gas analysis based control system for the LD-LBE-process at SSAB Tunnpåt AB, Luleå, Sweden. 2nd European Oxygen Steelmaking Congress EOSC'97, Taranto, Italy 13-14-15 October 1997. Associazione Italiana di Metallurgia, s.303-312.
- /3/ Fuchs, E.A; Bonin, MP; Jensen, S; Sackos, J; Smith, C; Goldstein, D; Rymarchyk, N Jr; Hardesty, DR. New optical sensor for improved BOF control: lance-based temperature and laser distance measurement. Steelmaking conference proceedings, 1998, s.359-367
- /4/ Grethe, U., Kempken, J., Schramm, R. & Klingenberg, R. BloCon – Modularized and Adaptable BOF Process Model of High Performance. 79th steelmaking conference proceedings, volume 79, 1996, s.133-146.
- /5/ Gruner, H., Wiemer, H.E., Fix, W. & Wünnenberg, K. New metallurgical insight into BOF-steelmaking and improved process control using sublance technique and bottom gas stirring. Iron Steelmaker, vol. 12, no. 3, Mar. 1985s.113-120
- /6/ Iwamura, K; Furusawa, M; Miyamoto, M; Hoteiya, M; Tachibana, H. New endpoint control system with auto-parameter-turning in BOF. Iron and Steel Society/AIME (USA), 1995, s. 715-719
- /7/ Kato, N., Arai, Y., Hatanaka, T. BOF EIC Integrated system at Keihin Works in NKK. 1995
- /8/ Kracich, R.E. Application of FMCW radar for BOF bath level measurement. Steelmaking conference proceedings, vol 81, Canada 1998, s.347-358.
- /9/ Lilja, J. Metallurgiset prosessit, osa IV: Teräksen valmistus. Luentomateriaali, Oulun Yliopisto, Teknillinen Tiedekunta, Prosessimetallurgia. Oulun Yliopistopaino 1997, s.20-48
- /10/ Marique, C., Buydens, J.M., Castiaux, E., Claes, J., Knoops, S. & Dutrieux, M. Dynamic control of refining in oxygen converters., Steel Times (UK), vol. 220, no. 4, Apr. 1992 s. 155-158.
- /11/ Novak, R.C. BOF Bath Level Measurement at Burns Harbor. Iron and Steel Society, Inc. (USA), 1992, s. 169-172
- /12/ Oksanen, Timo. "Happikonvertterisimulaattorin yhdistäminen terästehtaan tuotannonohjausjärjestelmään". Teknillinen korkeakoulu / Automaatio- ja systeemitekniikan osasto, Espoo, huhtikuu 2002, 78 s.

- /13/ Ottesen, D; Allendorf, S; Ludowise, P; Hardesty, D; Miller, T; Goldstein, D; Smith, C; Bonin, M. A laser-based sensor for measurement of off-gas composition and temperature in basic oxygen steelmaking. Steelmaking conference proceedings, vol 81, Canada 1998, s.369-375
- /14/ Robertson, K.J.; Balajee, S.R.; Shearer, J.M; Bradley, J.E. The Sublance Dynamic Control Operation and Its Effect on the Performance of the Inland Steel Company's No. 4 BOF Shop. Iron and Steel Society, Inc., 1989, s. 159-166
- /15/ Rymarchyk, N. Jr. Post combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations. Steel Steelmaking conference proceedings, vol 81, Canada 1998, s.445-449
- /16/ Schmidt, H.U., Opitz, A., Müller, J. & Pirklbauer, W. Experience with an offgas analysis system for process control in the LD converter. MPT International 5/2000, s. 60-62.
- /17/ Schwelberger, J., Ramaseder, N., Gaugl, S., Steins, J., Battan, G., Alghisi, A., Sacchi, A & Pellozzari, S. VAI-CON®Temp - Application of the VAI continuous temperature measurement on the AOD converter at Acciaierie Valbruna, Italy, Voest-Alpine 1999, 8 s.
- /18/ Sharan, A. Light sensors for BOF carbon control in low carbon heats. Steelmaking conference proceedings, vol 81, Canada 1998, s.337-345.
- /19/ Stem, R.A. Increasing BOF productivity and profitability by quick-tapping with drop-in sensors. Iron and Steel Society/AIME (USA), 1995, s.143-146.
- /20/ Tober, R., Pofperl, G., Örtelt, P. & Hofer, D. Dynamisation of the LD-process (First results). 2nd European Oxygen Steelmaking Congress EOSC'97, Taranto, Italy 13-14-15 October 1997. Associazione Italiana di Metallurgia, s.239-246.
- /21/ VAI Technology news, Issue No.31/Aug 1999, Voest-Alpine Industrienlagenbau, s.10-11.
- /22/ Van der Perre, I.W. Various designs, applications and typical results of modern sublance probes. 2nd European Oxygen Steelmaking Congress EOSC'97, Taranto, Italy 13-14-15 October 1997. Associazione Italiana di Metallurgia, s.293-302
- /23/ Virrankoski, R., Oksanen, T., Jalkanen, H. CONSIM-happikonvertteriprosessin simulointiohjelma. Automaatioväylä, 4/2001, s.16-21.
- /24/ Zonneveld, P. How to boost BOF output and reduce cost per ton of steel. 1995 Steelmaking conference proceedings, s. 147-152.



ISSN 1238-9404

Oulun yliopisto

Säätötekniikan laboratorio – Sarja B

Toimittaja: Leena Yliniemi

1. **Yliniemi L & Koskinen J**, Rumpukuivaimen sumea säätö. Joulukuu 1995. 17 s. 6 liitettä. SBN 951-42-4301-3.
2. **Leiviskä K, Rauma T, Ahola T, Juuso E, Myllyneva J & Alahuhta P**, Sumea mallintaminen, viritys ja säätö. Tammikuu 1996. 44 s. 951-42-4348-X.
3. **Altavilla M, Koskinen J & Yliniemi L**, Rumpukuivaimen säätö neuroverkolla. Tammikuu 1996. 12 s. ISBN 951-42-4373-0.
4. **Myllyneva J, Leiviskä K, Heikkinen M, Kortelainen J & Komulainen K**, Sumean säädön käyttömahdollisuudet hiertämön ohjauksessa. Huhtikuu 1997. 52 s. ISBN 951-42-4647-0.
5. **Leiviskä K & Heikkinen M**, TMP-prosessin mallintaminen ja mallipohjainen säätö. Huhtikuu 1997. 68 s. ISBN 951-42-4646-2.
6. **Jaako J**, Nopeusytälön parametrien sovittaminen. Huhtikuu 1998. 25 s. ISBN 951-42-4961-5.
7. **Myllyneva J, Kortelainen J, Latva-Käyrä K, Nystedt H & Leiviskä K**, Hiertämön laatusäädöt. Syyskuu 1998. ISBN 951-42-5023-0.
8. **Lähteenmäki M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät. Lokakuu 1998. ISBN 951-42-5064-8.
9. **Tervahartiala P & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: ohjelmistovertilau. Elokuu 1999. ISBN 951-42-5343-4.
10. **Jaako J**, Eräitä optimointitehtäviä. Syyskuu 1999. 39 s. ISBN 951-42-5352-3.
11. **Jaako J**, Yksinkertaisia prosessimalleja. Syyskuu 1999. 73 s. ISBN 951-42-5353-1.
12. **Jaako J**, MATLAB-ohjelman käyttö eräissä prosessiteknisissä laskuissa. Syyskuu 1999. 61 s. ISBN 951-42-5354-X.
13. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja I – Portfoliomuotoisen kurssin toteutus ja tulokset. Helmikuu 2000. 28 s. ISBN 951-42-5544-5.
14. **Ahola T, Ruuska J, Juuso E & Leiviskä K**, Paperikoneen katkoherkkyysindikaattori. Helmikuu 2000. 33 s. ISBN 951-42-5563-1.
15. **Ylikunnari J**, InTouch valvomo-ohjelmiston implementointi lämmönsiirron identifiointiprosessiin (PS II:n harjoitustyölaitteisto). Maaliskuu 2000. ISBN 951-42-5568-2.
16. **Mäki T & Juuso E**, Tapahtumapohjainen sumea lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden koostumusten ja valmistusprosessien tutkimuksessa. Kesäkuu 2000. ISBN 951-42-5678-6.
17. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja II – Apuopettaja opettajan apuna. Elokuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5742-1.
18. **Sivonen J**, Johdatus säätötekniikkaan, opetuslaitteiston suunnittelu ja toteutus. Syyskuu 2000. 20 s. ISBN 951-42-5795-2.
19. **Mutka P**, Neuraalilaskenta ja epälineaarinen dynamiikka komponenttien kulutus- ja myyntiennusteiden laatimisessa. Joulukuu 2000. 41 s. ISBN 951-42-5873-8.
20. **Komulainen K & Juuso E**, Vikatietojen hyödyntäminen funktionaalisessa testauksessa. Joulukuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5874-6.
21. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K & Murtovaara S**, Sulfaatisellun menetelmät, keiton ohjaus ja massan pesu. Joulukuu 2000. 48 s. ISBN 951-42-5875-4.
22. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K, Murtovaara S & Sutinen R**, Keittoliipeä- ja massa-analyysi sellun keitossa ja pesussa. Joulukuu 2000. 35 s. ISBN 951-42-5876-2.

25. **Rahikka L & Juuso E**, Sulfaatisellun eräkeittoprosessin jatkuvatoiminen analysointi. Joulukuu 2000. 36 s. ISBN 951-42-5879-7.
26. **Pirttimaa M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: Pastapainoprosessin tehdaskokeet. Joulukuu 2000. ISBN 951-42-5884-3.
27. **Jaako J & Nelo S**, Prosessi- ja ympäristötekniikan opetuksen tulevaisuuden haasteita. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5889-4.
28. **Näsi J, Isokangas A & Juuso E**, Klusterointi kuorimon puuhäviöiden mallintamisessa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5894-0.
29. **Mäki T & Juuso E**, Lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden rakeistusprosessin dynaamisessa simuloinnissa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5895-9.
  
31. **Joensuu P**, Vikadiagnostiikka sulatuksen laadunohjauksessa: Syherön syntyminen ja siihen vaikuttavat tekijät. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5893-2.
32. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Jatketiilen tukkeentumisen mallintaminen neuroverkoilla. Helmikuu 2001. ISBN 951-42-5906-8.
33. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Sulkutangon asennon ja valunopeuden käyttö jatketiilen tukkeentumisen ennustamisessa. Maaliskuu 2001. ISBN 951-42-5946-7.
34. **Ruuska J. & Leiviskä K.**, LD-KG-konvertterin lämpötilamalli. Toukokuu 2001. ISBN 951-42-6411-8.
35. **Ainali I., Juuso E. & Sorsa A.**, Vesikemikaalien annostelutyökalun kehittäminen: Flotaation perusteet, koeksot ja mallinnus. Marraskuu 2001. ISBN 951-42-6589-0
36. **Näsi J. & Sorsa A.**, Jatkuvatoimisen liuospuhdistuksen pilot-prosessin mallinnus ja prosessikehitys. Helmikuu 2002. ISBN 951-42-6626-9.
37. **Ikäheimonen J. & Leiviskä K.** Syherödatan analysointi histogrammeja käyttäen. Maaliskuu 2002. ISBN 951-42-6678-1.
38. **Ikäheimonen J. & Leiviskä K.** Neuroverkot ja lingvistiset yhtälöt jatketiilen tukkeuman ennustuksessa. Huhtikuu 2002. ISBN 951-42-6700-1.
39. **Posio J.**, Malliprediktioivinen säätö. Marraskuu 2002. ISBN 951-42-6887-3.
40. **Jaako J.**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja III - Opettajien perehdyttämiskoulutus. Helmikuu 2003. ISBN 951-42-6955-1
41. **Ruuska J., Peltonen J. ja Leiviskä K.**, LD-KG-konvertterin dynaaminen ohjaus. Helmikuu 2003. ISBN 951-42-6956-X

ISSN 1238-9404

Säätötekniikan laboratorio – sarja B