

Jernkontorets forskning

Rapport TO 23-175

D 875

Förbättrad processtyrning av ljusbågsugnar genom utveckling av mätteknik – Slutrapport

*Improved process control of electric arc furnaces by
development of measurement techniques – final report*

Erik Sandberg, Christoffer Schmidt, Dan Sandström, Nils Andersson,
Anders Tilliander, Johan Björkvall

Sammanfattning

Detta projekt har fokuserat på att förbättra processtyrningen av ljusbågsugnen inom tre områden; tidpunkt för chargering av skrotkorgar, tidpunkt för övergång mellan smältnings- och raffineringsfas samt tidpunkt för temperaturprovtagning genom att kombinera fyra olika mättekniker (harmoniska störningar i ström, ljud, ljus och vibrationer), vilka utvecklats och testats inom projektet. Projektets huvudtes är att dessa mätningar kan utnyttjas för att minska smälttiden med i genomsnitt 2,9 % för den skrotbaserade svenska stålindustrin (5 % för målverket Outokumpu Stainless). För att åstadkomma den förbättrade styrningen har soft-sensorer för nedsmältningsgrad och ståltemperatur utvecklats. Nya styrstrategier utgående från soft-sensorernas signaler har också utvecklats. Teknik för mätning av harmoniska störningar i ström och ljud samt integrering av dessa signaler i soft-sensorer i befintligt system har realiserats inom projektet. Vibrationsmätningar är lovande, men kräver mer underhåll än ljudmätningar som ger liknande men brusigare information. Ljusmätningar gick ej att genomföra i industriell skala på grund av praktiska problem med installation, men mätningar i pilotskala gav lovande resultat. Soft-sensorerna och styrstrategierna testades i en avslutande försökskampanj. Ingen av de testade styrstrategierna hade statistiskt säkerställd effekt (95 % konfidensnivå) på smälttiden. Strategin för chargering av skrotkorgar resulterade dock i minskning av medelvärdet för power-on tiden med 44 sekunder per smälta (1,55 % av 47,62 minuter eller 36 % av den uppskattade potentialen på 2 minuter för målverket). Potentialen för ytterligare förbättringar bedöms hög genom vidare utveckling av soft-sensorer, teknik för ljusmätning och justering av styrstrategier.

Summary

This project has focused on improving process control of the EAF in three areas; time for charging scrap baskets, time of transition between melting phase and refining phase and time for temperature measurement. To provide a basis for improved control, four different measurement techniques (harmonic current distortions, sound, light and vibrations) have been developed and tested. The project's main thesis is that these measurements will provide sufficient information to reduce the power-on time by an average of 2.9% for the scrap-based Swedish steel industry (5% for the initial recipient plant Outokumpu Stainless). To achieve the improved control, soft sensors for meltdown degree and steel temperature based on the developed measuring techniques have developed. New control strategies have also been developed based on the soft-sensor signals. The measurement techniques for harmonic current distortions and sound, and the integration of these signals in the soft-sensors into existing systems, have been realized within the project. Although promising, vibration measurements require more maintenance than the sound measurements while providing similar though noisier information. Light measurements could not be carried out at industrial scale due to practical problems with the installation, but the measurements in pilot scale were promising. Soft sensors and control strategies were tested in a final industrial trial campaign. None of the tested control strategies had statistically significant effect (95% confidence level) on the power-on time. However, the control strategy for charging of baskets resulted in reduction of the average power-on time by 44 seconds per heat (1.55% of 47.62 minutes or 36% of the estimated potential at the test-plant). The potential for further improvements is deemed high by continued development of soft sensors, techniques for measuring light and adjusting the control strategies.

Nyckelord: EAF, Process control, THD, Audio, Vibration, Fibre optics, Measurement techniques, Soft sensors

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Innehållsförteckning	3
1 Inledning.....	5
2 Mål.....	6
3 Teoretisk/teknisk bakgrund	7
4 Metod	8
4.1 Förberedelser för datainsamling och nulägesbeskrivning.....	8
4.2 Nulägesbeskrivning.....	8
4.3 Utveckling av teknik för on-line mätningar i ljusbågsugn.....	9
4.4 Mät- och försökskampanjer.....	9
4.5 Utveckling av soft-sensorer.....	11
4.5.1 Nedsmältningsgrad.....	12
4.5.2 Ståltemperatur	13
4.6 Utveckling av processtyrningsstrategier	13
4.7 Installering av soft-sensor och försökskampanj på målverk	14
4.8 Industriseminarier.....	15
5 Resultat.....	15
5.1 On-line mätningar i ljusbågsugn	15
5.1.1 Harmoniska störningar i ström.....	16
5.1.2 Fiberoptiska mätningar.....	16
5.1.3 Ljud och vibrationsmätningar	17
5.2 Soft-sensors utveckling	18
5.2.1 Nedsmältningsgrad.....	18
5.2.2 Temperatur	19
5.3 Dynamisk beräkning av nedsmältningsindex och ståltemperatur	21
5.4 Driftförsök vid Outokumpu Stainless i Avesta	22
5.4.1 Tidpunkt för chargering av skrotkorgar	22
5.4.2 Tidpunkt för start av raffinering.....	23
5.4.3 Tidpunkt för temperaturprovtagning.....	24
6 Diskussion.....	25
7 Slutsatser	26
8 Nyttiggörande av resultat och fortsatt arbete	28
9 Hållbarhet	30
10 Referenser	31
11 Bilagor	32
11.1 Bilaga 1 Projektorganisation och medverkande.....	32
11.2 Bilaga 2 Publikationer	33
11.3 Bilaga 3 Annan resultat- och kunskapsförmedling	35
11.4 Bilaga 4 Beskrivning av programmet.....	36
11.5 Bilaga 5 Lista över processdata.....	37
11.6 Bilaga 6 Soft-sensorn FAQ	39
11.7 Bilaga 7 Fullständig variabelista till soft-sensorer i Avesta.....	41
11.8 Bilaga 8 Försöksplan.....	48
11.9 Bilaga 9 Exempel på försöksprotokoll	50
11.10 Bilaga 10 – Program för industriseminarium i Halmstad	52
11.11 Bilaga 11 – Program för industriseminarium på Jernkontoret	53
11.12 Bilaga 12 – Metodbeskrivning för utveckling av soft-sensorer	54

11.13	Bilaga 13 – Lista över förkortningar	55
-------	--	----

1 INLEDNING

Projektet ingår i och finansieras av Energimyndighetens forskningsprogram JoSEn (Järn och Stålintustrins Energianvändning). Projektet syftar till att öka järn- och stålintustrins energieffektivitet, vilket är ett av forskningsprogrammets mål för den aktuella programperioden.

Skrotbaserad ståltillverkning i ljusbågsugn är en mycket energikrävande process, normalt används ca 630 kWh/ton flytande stål [1]. I Sverige tillverkades under 2012 ca 1 500 000 ton stål på detta sätt [1], vilket motsvarar ungefär 75 % av full kapacitet [2]. Trots att mängden flytande stål vid tappning i regel är densamma varierar energiförbrukningen kraftigt mellan chargerna. Denna variation kan till viss del förklaras av varierande skrotmix, men tidigare forskning har visat att sambandet mellan skrotmix och energiförbrukning är lågt [3, 4].

Skrotsmältningen sker i dagsläget utan kontinuerliga direktmätningar i ugnen. Operatörerna förlitar sig istället på punktmätningar via manuell eller automatiserad provtagning och på audiovisuella iakttagelser samt tumregler för att bedöma processläget. Avsaknaden av kontinuerliga direktmätningar på viktiga parametrar som skrotets nedsmältningsgrad, stålkemi, slaggekemi och ståltemperatur är ett stort problem för de svenska stålverken som begränsar möjligheterna att styra processen på ett energieffektivt sätt. Så kallade ”Soft-sensors” för indirekt uppskattning av dessa parametrar via konventionella mätningar (som kylförluster, avgasanalyser/temperaturer, syrgas/kolflöden, etc.) har utvecklats tidigare [5], men tillförlitligheten är begränsad på grund av låg korrelation mellan tillgängliga mätdata och de sökta parametrarna. På senare tid har dock framsteg med direktmätning i ugnar med ljusensorer [6, 7] vibrationssensorer [6, 8] och fiberoptik gjorts [9-12], men ingen tillförlitlig metod för uppskattning av de sökta parametrarna baserat på dessa mätningar har utvecklats.

De harmoniska störningarna i strömmen, Total Harmonic Distortion (THD) har tidigare använts för att beskriva nedsmältningen av skrot i ljusbågsugn [13]. Utvecklingsarbetet bestod i att tillgängliggöra dessa mätningar, integrera loggning av mätningar med processuppföljningssystemet samt signalbehandling.

Inom detta projekt undersöks möjligheterna att utnyttja mätdata från nya metoder för direktmätningar (harmoniska störningar i ström, ljud, vibrationer och ljus), tillsammans med konventionellt processdata, för utveckling av soft-sensorer för on-line uppskattning av ståltemperatur och nedsmältningsgrad. Projektet avser att utveckla teknik för applicering av dessa mätmetoder på ljusbågsugn, utveckling av soft-sensorer för att koppla dessa signaler till de sökta parametrarna samt on-line implementering av utvecklade soft-sensorer på målverket Outokumpu Stainless i Avesta genom integrering i existerande processmodeller och/eller operatörsbilder.

Projektets nyhetsvärde ligger i tekniska lösningar för applicering av mättekniker för ljud, vibrationer och ljus på ljusbågsugnen samt integreringen av dessa signaler i processtyrningssystemet via soft-sensorer för ståltemperatur och nedsmältningsgrad samt utveckling och test av styrstrategier baserade på soft-sensorernas signaler.

Målverket kan utnyttja utvecklade soft-sensorer och styrstrategier för förbättrad processkontroll i form av optimering av tidpunkter för chargering av skrotkorgar, övergång mellan olika faser i smält- och raffineringsprogrammen samt temperaturprovtagning. Övriga svenska stålverk kan utnyttja utvecklade metoder för implementering av mätteknik och

kalibrering av soft-sensorer för att skapa liknande förutsättningar för förbättrad processkontroll. Den förbättrade processkontrollen förväntas ge en energieffektivare smältning vilket i sin tur ger minskad smälttid (min/smälta) och specifik energiförbrukning (kWh/ton). Industrin kan utnyttja detta till minskade produktionskostnader och ökad produktivitet.

2 MÅL

Resultatmål

Projektet väntas ge följande resultat:

- Utvärdering (i rapportform) av möjligheterna att applicera mättekniker för harmoniska störningar i ström, ljud, vibrationer och ljus på ljusbågsugnar.
- Industriseminarium för presentation av ovan nämnda rapport samt spridning av kunskap om applicering av ovan nämnda mättekniker på ljusbågsugnar
- Dokumenterad metod för utveckling och implementering av soft-sensorer för nedsmältningsgrad och ståltemperatur i ljusbågsugn.
- Implementerad soft-sensor för nedsmältningsgrad och ståltemperatur för målverket Outokumpu Stainless ljusbågsugn i Avesta.
- Dokumenterad metod för framtagning av styrstrategier (tidpunkter för charging, byte av arbetspunkt för smältprogram samt temperaturprovtagning) baserade på signaler från soft-sensorer (nedsmältningsgrad och ståltemperatur).
- Industriseminarium för presentation av och diskussion kring möjligheter till förbättrad processtyrning baserade på soft-sensor signaler som nedsmältningsgrad och ståltemperatur.

Effektmål

Huvudmålet med projektet är att minska smälttiden (power-on tiden) med 5 % vid målverket Outokumpu Stainless i Avesta (2 av 40 minuter). I projektansökan uppskattas att hälften av denna tidsbesparing kan uppnås inom projekttiden vilket skulle innebära en energieffektiviserings-potential under projektet på 8,4 GWh/år baserat på en årsproduktion på 500 000 ton vid målverket. Från beslutsbrevet (Dnr 2013-005490) framgår att energieffektiviserings-potentialen för projektet är 8,4 GWh/år vid en minskning av power-on tiden på 2 minuter.

Energieffektiviseringspotentialen har beräknats genom att anta att den tillförda effekten under power-on är konstant varför en minskning på 5 % ger en motsvarande minskning av energiförbrukningen på 5 %. Detta ger en energieffektivisering på 33,5 kWh/ton stål (5 % av 630 kWh/ton), vilket även inkluderar indirekt inverkan (2 kWh/ton) genom minskade energiförluster [14]. Vid en årsproduktion på 500 000 ton motsvarar detta en energieffektivisering på 16,8 GWh/år. Det kan därför konstateras att den angivna energieffektiviseringspotentialen i beslutsbrevet svarar mot en minskning av power-on tiden på 1 minut vilket är i linje med målsättningen i ansökan.

Vidare framgår det från beslutsbrevet att projektet skall påvisa en förväntad minskning av energianvändningen på 18 kWh/ton är möjlig att uppnå under projekttiden genom en minskning av utnyttjandegraden (power-on tiden) med 2 minuter för ljusbågsugnen. Minskningen av energianvändningen på 18 kWh/ton är relaterad till en genomsnittlig minskning av power-on tiden på 2,9 % för samtliga skrotbaserade stålverk i Sverige. Uppskattningen av genomsnittlig potential på 2,9 % beräknades utifrån medelvärdet (viktat

efter produktionsvolym) av deltagande verkens egna uppskattningar. För de stålverk som inte deltog i projektet antogs potentialen vara 5 %.

Vidare framgår det från beslutsbrevet att inom projekttiden ska följande ha genomförts:

- Visa att energianvändningen kan minskas med 18 kWh/ton stål om utnyttjandegraden i ugnarna minskas med 2 minuter.
- Visa tillförlitligheten på de sensorer som utvecklas inom projektet vid ett annat stålverk, jämfört med projektets målverk.
- Utveckla och installera soft-sensorer samt testa dessa under verkliga förhållanden för att utvärdera den verkliga energieffektiviseringen.

Dock förväntas inga installationer av soft-sensorer ske inom projektets tidsram förutom vid målverket Outokumpu Stainless i Avesta. Däremot planerades försök med användning av soft-sensor i off-line läge på ett av de deltagande stålverken för att jämföra tillförlitligheten på soft-sensorers med och utan de extra mätsignaler som finns tillgängliga på målverket.

Genom seminarier och dokumentation av metoder för signalbehandling och kalibrering kan utnyttjande av undersökt mätteknik samt utveckling av soft-sensorer ske även på övriga stålverk i Sverige, uppskattningsvis inom 2 år efter projektets slutförande för de deltagande företagen (1,5 % förbättringspotential) och inom 4 år för de övriga stålverken i Sverige (5 % förbättringspotential). De deltagande företagen ombads inför projektansökan att uppskatta förbättringspotentialen, därav siffran 1,5 % som är ett medelvärde (viktat efter produktionsvolym) av de deltagande företagens (exklusive målverket Outokumpu) egna uppskattningar. Detta innebär en effektivisering på ytterligare 12,3 GWh/år inom 2 år (räknat på 1 300 000 ton) och 3,3 GWh/år inom 4 år (räknat på 200 000 ton). Full potential (36,5 GWh/år) kan uppnås på alla verk i Sverige då teknikerna för direkmätningar i ugnen är färdigutvecklade för kontinuerlig drift. Detta förväntas kunna ske inom 10 år efter projektets slutförande.

3 TEORETISK/TEKNISK BAKGRUND

Styrningen av ljusbågsugnarnas energitillförsel sker genom så kallade smältprogram. Ett smältprogram består i regel av ett antal faser (borrning 1, smältning 1, borrning 2, smältning 2, raffinering), vilka smältprogrammet genomför i kronologisk ordning. Varje fas består i sin tur av ett antal delsteg vilka även dessa utförs i kronologisk ordning och definieras av olika transformatorinställningar (spännings och effektlägen) och flödes hastigheter för brännare och injektionslansar. Vid statisk reglering är brytpunkterna mellan de olika stegen fördefinierade i termer av total tillförd elektrisk effekt (kWh) eller specifik energiförbrukning (kWh/ton skrot). Flera olika statiska smältprogram kan finnas tillgängliga och vilket av dessa styrsystemet använder är ofta kopplat till den stålsort som tillverkas eller till den chargemix som chargerats.

Styrningen sker dock (vid statisk reglering) utan återkoppling av mätsignaler från ljusbågsugnen till styrsystemet. Dynamiska styrsystem (med återkoppling av mätsignaler) har hittills inte använts i kontinuerlig drift (i Sverige) på grund av befarade risker med överhettning och begränsade möjligheter till förbättrad styrning genom återkoppling av de mätsignaler som finns tillgängliga.

Swerea Mefos och KTH har lång erfarenhet av utveckling av mätteknik för användning i svårtillgängliga miljöer samt statistisk behandling av mätsignaler vilket är nödvändigt för att möjliggöra dynamisk styrning av ljusbågsugns energitillförsel genom återkoppling av mätsignaler.

4 METOD

Projektet har delats upp i ett antal delsteg, se aktivitets och tidplan i gantt-schema (Tabell 1) nedan. Gantt-schemat i Tabell 1 visar när olika aktiviteter genomfördes och skiljer sig till vissa delar från Gantt-schemat i projektplanen.

Tabell 1– Gantt-schema för aktiviteter inom projektet

Aktivitet	Utförare	2014				2015				2016				2017
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
Nulägesbeskrivning och förberedelser för datainsamling	Outokumpu													
Mätningar av harmoniska störningar i ström	KTH													
Fiberoptiska mätningar	Swerea Mefos													
Ljud och vibrationsmätningar	KTH													
Utveckling av soft-sensorer	Swerea Mefos													
Utveckling av processtyrningsstrategier	Swerea Mefos													
Installering av soft-sensor och försökskampanj	Outokumpu													
Projektadministration och koordinering	Swerea Mefos													
Industriseminarier	Swerea Mefos								1					2
Slutrapportering	Swerea Mefos													

4.1 Förberedelser för datainsamling och nulägesbeskrivning

Förberedelser för datainsamling genomfördes i projektets uppstartsskede. Förberedelserna innebar att Swerea Mefos skickade ut en lista med önskade (konventionella) processparametrar med förmodad koppling till utsignalerna från Soft-sensorerna (nedsmältningsgrad och ståltemperatur). En lista över processdata återfinns i bilaga 5. De deltagande stålverken undersökte i vilken grad dessa processdata fanns tillgängligt och samlade in och sammanställde exempel på tillgängligt processdata.

Vid målverket (Outokumpu Stainless) genomfördes i de fall det bedömdes nödvändigt åtgärder för att säkerställa tillgänglighet av de sökta parametrarna under framtida mät- och försökskampanjer. Även förberedelser för mätning och loggning av data från experimentella mätningar inom projektet genomfördes.

4.2 Nulägesbeskrivning

Som mått på nuläget vid projektstart sammanställdes energiförbrukning (2013) för de deltagande stålverken, se Tabell 2 nedan. Då Outokumpu Avesta installerade en elektromagnetisk omrörare (EMS) i ljusbågsugnen under sommaren 2014 används istället energiförbrukningen för 2015 som nuläge. Den totala energiförbrukningen har beräknats enligt ekvation 1 [15]:

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{El}} + \text{Olja} \cdot 11 + \text{Gasol} \cdot 8 + \text{Naturgas} \cdot 10,5 + \text{Inj O}_2 \cdot 5,2 \quad (1)$$

Injicerat kolpulver ingår ej i ekvation 1. Däremot ingår förbränning av kol i den beräknade energiekvivalenten för injektion av syrgas (5,2 kWh/m³n) [15]. Logiken bakom detta är att i det generella fallet balanseras injektion av kolpulver med injektion av syrgas på ett sådant sätt att andelen injicerad syrgas som går till förbränning av kol förblir konstant. För enskilda smältor kan dock injektion av kolpulver och syrgas vara i obalans, varför även kolpulverinjektion ingår i soft-sensorerna för nedsmältningsgrad och ståltemperatur (se sektion 4.5 och bilaga 7).

Tabell 2 – Nulägesbeskrivning vid projektstart (2013), medelvärden för angiven period

		Outokumpu Avesta	Ovako Smedje- backen	Höganäs	NOMAC	Sandvik	Uddeholm
Period		150101 - 151231	130401 - 130930			130101 - 131231	130401 - 130930
Power-on tid	Minuter	46,4	52,2	38	120	62	
Elförbrukning	kWh/ton flytande	503	454	585	639	523	553
Oljeförbrukning	liter/ton	0	0	0	1	0	0
Gasolförbrukning	m ³ n/ton	0,97	0	0	0	0	0
Naturgasförbrukning	m ³ n/ton	0	0	0	0	0	0
Injicerad syrgas	m ³ n/ton	3,66	18,2	4	8	10,9	1,48
Total energiförbrukning	kWh/ton	529	549	606	692	580	561

4.3 Utveckling av teknik för on-line mätningar i ljusbågsugn

Utvecklingsarbetet bestod av tillverkning av utrustning, installation, mätkampanj, signalbehandling, utvärdering, modifiering av utrustning samt tolkning av resultat i form av koppling till fysiska händelser och förlopp i ugnen. Installation av experimentell teknik för direktmätning i ugnen genomfördes på målverket Outokumpu Stainless samt vid Swerea MEFOS pilot-EAF. En sammanställning utvecklingsarbetet har sammanställt i två tekniska rapporter [16, 17] och i denna rapport presenteras bara en översikt av arbetet. Tekniken för mätning av harmoniska störningar i ström fanns i huvudsak tillgänglig i ugnens strömregulator vid målverket.

Den fiberoptiska mättekniken bygger på att undersöka emitterat ljus från processen och sedan analysera det emitterade ljusets spektrum för att direkt kunna beräkna temperaturen i processen. Ljud och vibrationer är nära relaterade och kommer i att benämnas som audiosignaler i den vidare presentationen. Audiosignaler kan genereras t.ex. från fallande skrot, ljusbågar och brännare i ljusbågsugnen [18]. Det kan dock antas att de starkaste audiosignalerna härrör från ljusbågarna då dessa rör sig med en mycket hög hastighet [19].

4.4 Mät- och försökskampanjer

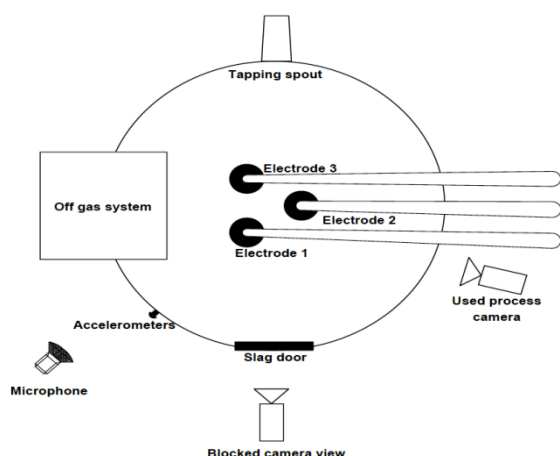
Ursprungligen planerades att genomföra en mätkampanj och en försökskampanj inom projektet, där skillnaden ligger i att vid en mätkampanj genomförs speciella mätningar och

datainsamling medan vid en försökskampanj används utvecklade tekniker för att förbättra styrningen. Totalt har tre industriella mätkampanjer och en mätkampanj i pilotskala samt en avslutande försökskampanj genomförts i projektet.

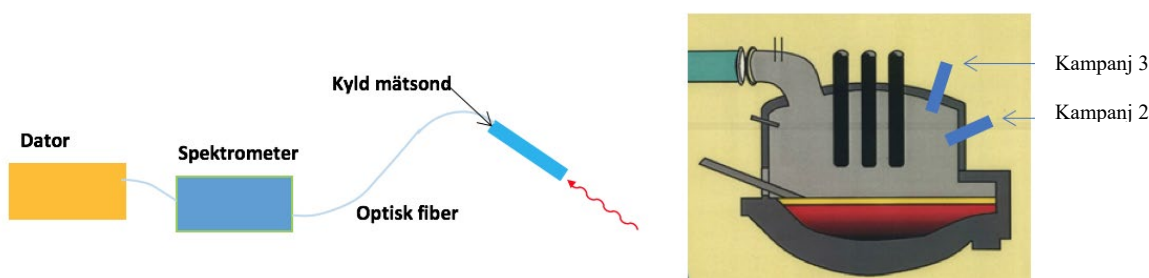
Vid den inledande mätkampanjen i Avesta (kampanj 1) genomfördes förberedande tester med utrustningen för mätning av ljud och vibrationer samtidigt som de harmoniska störningarna i ström observerades.

Vid den andra kampanjen (kampanj 2) i Avesta genomfördes mätningar med samtliga mättekniker. Även nedsmältningsgraden vid charging av skrotkorgar undersöktes med hjälp av en kamera. En schematisk bild på uppställningen av ljud- och vibrationsmätningar visas i Figur 1. Den ljusoptiska mätsonden monterades genom ett brännarhål i ugnen, vilket gav mycket begränsad information p.g.a. störningar. Vidare uppstod de problem med vibrationsmätningarna då lågor från ugnen förstörde accelerometrarna, kontakter och kablar.

Den tredje mätkampanjen (kampanj 3) genomfördes i Luleå vid MEFOS pilot ljusbågsugn. Under denna kampanj användes samtliga mätutrustningar. Den fiberoptiska mätsonden monterades genom ugnssvalvet. Detta ledde till att information från samtliga mättekniker kunde sammanställas för mätkampanjen. I Figur 2 presenteras en schematisk bild på den fiberoptiska uppställningen och placeringen av mätsonden under kampanj 2 och 3.



Figur 1 – Schematisk bild av ljusbågsugnen i Avesta. Mikrofonen är placerad 4-5 meter nedanför ugn riktad uppåt. Skalan är inte proportionell [16].



Figur 2 – Schematisk bild på den fiberoptiska uppställningen och placeringen av mätsonden under kampanj 2 och 3.

Efter den tredje försökskampanjen på MEFOS beslutades att ytterligare än industriell mätkampanj (kampanj 4) skulle genomföras i Avesta. En speciell kyld mätsond för de fiberoptiska mätningarna konstruerades med avsikten att monteras i kalkinjektionshållet i ugnssvalvet. Vid monteringen av denna nya mätsond i Avesta så visade det sig att själva sonden kom allt för nära elektrodarmen vilket hade inneburit risk för överslag. Därför demonterades sonden innan försöken och inga mätresultat från de fiberoptiska mätningarna kunde erhållas under kampanj 4. Däremot fungerade ljud och vibrationsmätningarna utmärkt.

Avslutningsvis så genomfördes en försökskampanj (kampanj 5) där ugnen styrdes från den framtagna soft-sensorn som då var implementerad i level två systemet på ugnen. En sammanställning av samtliga kampanjer finns i Tabell 3.

Tabell 3 – Sammanställning över använda tekniker vid mät- och försökskampanjer

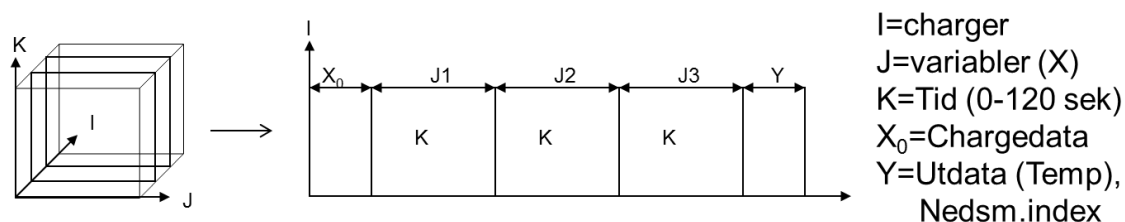
Kampanj nr	Tidpunkt	THD	vibrationer	ljud	Fiber-optik	kamera	soft-sensorn
1, Avesta	7/11–27/11,14	X	(X)	(X)	-	X	-
2, Avesta	19/8–31/8, 15	X	(X)	X	(X)	X	-
3, MEFOS	18/10-23/10, 15		X	X	X	-	-
4, Avesta	20/10 - 19/12, 16	X	X	X	(X)	X	-
5, Avesta	20/12-16-30/1-17	X	X	X	-	X	X

4.5 Utveckling av soft-sensorer

En soft-sensor kan beskrivas som en matematisk modell för att beräkna värdet på processparametrar som det av någon anledning inte finns tillgängliga kontinuerliga direktmätningar av. En mer ingående beskrivning av soft-sensorer i allmänhet finns tillgänglig i bilaga 6.

Utvecklingsarbetet bestod av omfattande datainsamling (på målverket) av både konventionella processignaler och signaler från mätutrustning utvecklad enligt ovan, mätkampanjer, utveckling och kalibrering av prediktionsmodell för de sökta parametrarna (ståltemperatur och nedsmältningsgrad), utvärdering av soft-sensorns tillförlitlighet samt programmering och installation. Datainsamling av konventionella processignaler genomfördes även vid Ovako Smedjebacken och Sandvik Materials Technology.

Vid anpassning av regressionsmodeller av typen OPLS-Batch [20] för beräkning av nedsmältningsgrad och ståltemperatur användes mjukvaran Simca14.1. Se figur 3 nedan för beskrivning av modellstruktur.



Figur 3 – Modellstruktur för OPLS-Batch regressionsmodeller

Inom detta projekt har soft-sensorer för bedömning av nedsmältningsgrad och ståltemperatur utvecklats för Outokumpu Stainless i Avesta. De specifika soft-sensorerna beskrivs mer

noggrant i separat rapport [21]. Soft-sensor för ståltemperatur baserad enbart på konventionella processignaler utvecklades även för Ovako Smedjebacken.

De processdata som används för soft-sensorernas beräkningar är de senaste 120 mätpunkterna med power-on (motsvarar ca 10 minuter då data loggas med 5 sekunders intervall) för de ingående variablerna. Soft-sensorn i Avesta är förberedd för att ta emot 840 signaler (variabler), men i dagsläget är endast ca 200 av de ingående variablerna kopplade till processdata i Avesta. Soft-sensorns beräkning (y_i) vid tidssteg i (y_i) görs sedan genom elementvis multiplicering av variabelvärdena (x_{jk}) med motsvarande regressionskoefficienter (b_{jk}) samt summering av produkterna plus en konstant (a), se ekvation 2 nedan.

$$y_i = a + \sum_{k=i-120}^i \sum_{j=1}^{840} b_{jk} x_{jk} \quad (2)$$

4.5.1 Nedsmältningsgrad

Nedsmältningsgraden har bedömts manuellt (i tre nivåer) genom inspektion av stillbilder från en videokamera monterad ovanför ugnen i Avesta tagna i samband med chargeringar av skrotkorgar. Exempel på bedömning av stillbilder enligt metoden ovan kan ses i Figur 4.



Figur 4 – Exempel på bedömningar av nedsmältningsgrad

Observera att ”grad 1” inte innebär helt smält, det betyder att det finns ett metallbad som ljusbågarna kan slå mot. Det kan fortfarande finnas områden med osmält skrot i närheten av väggarna eller mellan elektroderna.

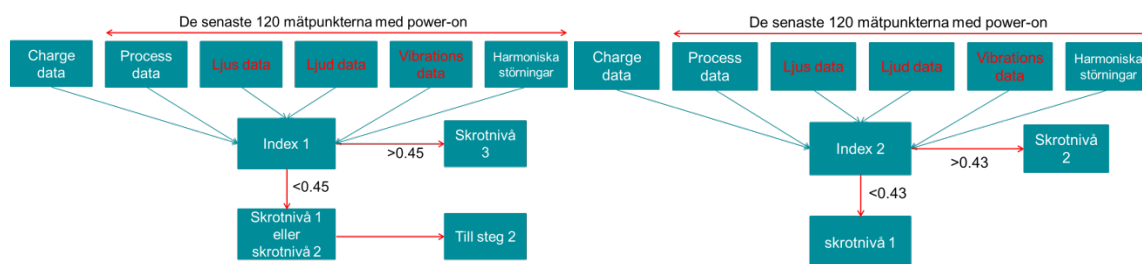
Statistiska modeller för att klassificera nedsmältningsgraden som en av dessa nivåer har utvecklats utifrån processdata under första korgen. Klassificeringen består i att beräkna två ”nedsmältningsindex” och anpassa gränsvärden för dessa index. Gränsvärdena för brytpunkter i nedsmältningsindex har anpassats för att maximera den totala andelen smältor med rätt uppskattad nedsmältningsgrad.

Det första indexet ”Index 1” beskriver sannolikheten (0-1) att nedsmältningsgraden är ”grad 3” (och inte ”grad 1” eller ”grad 2”). Det andra indexet ”Index 2” beskriver sannolikheten (0-1) att nedsmältningsgraden är ”grad 2” eller ”grad 3” (och inte ”grad 1”).

Index 1 är primärt och index 2 är sekundärt, vilket innebär att gränsvärdet för index 1 först används för att indikera om nedsmältningsgraden är ”grad 3” eller inte. I de fall då index 1 indikerar att nedsmältningsgraden inte är ”grad 3” används index 2 för att indikera om nedsmältningsgraden är ”grad 2” eller ”grad 1”.

Separata modeller för beräkning av index 1 och 2 under korg 1 och korg 2/3 har anpassats (d.v.s. 4 modeller totalt). Båda typerna av modeller baseras på nedsmältningsgrader uppskattade vid chargerering av andra skrotkorgen, skillnaden är att modellen för korg 2/3 inte innehåller sådana processparametrar som kan förväntas ha annorlunda värden under korg 2/3 än korg 1. Exempel på sådana parametrar är ackumulerad förbrukning av el, syrgas,

kolpulver, etc. Grafisk struktur (inklusive gränsvärden för index) och ingående variabler för bedömning av nedsmältningsgrad för korg 1 beskrivs i Figur 5 nedan.



Figur 5 – Grafisk struktur för soft-sensor för bedömning av nedsmältningsgrad (korg 1).

4.5.2 Ståltemperatur

Denna soft-sensor beräknar ståltemperaturen under nedsmältning av sista korgen. Kalibreringen har skett genom anpassning av statistisk modell för prediktion av ståltemperaturen baserat på aktuella temperaturmätningar (med temperatursond). Kalibreringen för användning vid tre-korgsförfarande är dock osäker på grund av litet statistiskt underlag.

Soft-sensorns beräkning av ståltemperatur är endast relevant mot slutskedet av smältningen då man kan anta att allt skrot är smält. Lämpligen bör man då inte börja lita på soft-sensorns ståltemperaturberäkning innan soft-sensorn för nedsmältningsgrad säger ”Grad 1” (Synligt metallbad i ugnen).

4.6 Utveckling av processtyrningsstrategier

Baserat på resultaten av soft-sensorernas beräkningar utvecklades processtyrningsstrategier för minimering av energiförbrukning (och power-on tid) vid målverket Outokumpu Stainless.

Tidpunkt för chargering av skrotkorgar

Strategin för styrning av tidpunkt för chargering av skrotkorgar är att rekommendera chargering då det aktuella värdet för nedsmältningsindex går under ett gränsvärde som baseras på fyllnadsgraden i den skrotkorg som ska chargeras. Gränsvärdena baseras på standardisering av normal praxis och har tagits fram genom medelvärdesberäkning av nedsmältningsindex vid chargering av skrotkorgar med olika fyllnadsgrader och ordningstal. Medelvärden har inte beräknats för fyllnadsgrader där dataunderlaget var mindre än 10 charger. Charger med tidskrävande överchargeringar har tagits bort ur medelvärdesbildningen. En linjär funktion av medelvärdet för nedsmältningsindex som funktion av fyllnadsgrad har också anpassats. Det är den linjära anpassningen som ligger till grund för gränsvärden som används vid tillämpning av styrstrategin vid försökskampanjer.

Tidpunkt för start av raffinering

Tidpunkten för start av raffinering är viktigt för totala power-on tiden samt för värmebelastningen på väggar och valv i ugnen. En återhållsam eller defensiv strategi är att rekommendera start av raffinering då ”Index 2” för sista korgen nått medelvärdet då raffineringen vanligtvis startar. En offensivare strategi är att starta raffineringen först när soft-sensorn indikerar att nedsmältningsgraden har nått grad 1, d.v.s. synligt platt bad i ugnen. Offensiv strategi kommer dock att innebära kraftigt förlängd smältperiod (och kortare raffineringsperiod) för flertalet smältor vilket kan innebära risk för överhettningsskada på ugnen. Det rekommenderas därför att starta med den defensiva strategin och succesivt arbeta

sig mot den offensiva genom att sänka gränsvärdet i omgångar så länge inga indikationer på överhettning av ugnsvägg eller valv noteras. Gränsvärden för "Index 2" för start av raffinering togs fram genom medelvärdesberäkning av Index 2 vid tidpunkt för start av raffinering (defensiv strategi) och vid tidpunkt för indikering av "Nedsmältningsgrad 1" (offensiv strategi).

Tidpunkt för temperaturprovtagning

Tidpunkten för styrning av temperaturprovtagning är central för att undvika energikrävande överhettning av stålet eller tillsatts av exoterma råvaror och/eller elektrisk energi i efterföljande processteg till lägre verkningsgrad än i ljusbågsugnen. Strategin innebär att genomföra temperaturprovtagning då soft-sensors beräkning av temperaturen överensstämmer med måltemperaturen för den aktuella chargen. I de fall då operatören bedömer att måltemperaturen uppnåtts innan soft-sensors beräknade temperatur överensstämmer med måltemperaturen bör ett temperaturprov tas omedelbart.

4.7 Installering av soft-sensor och försökskampanj på målverk

De utvecklade soft-sensorerna installerades och integrerades med level-2 systemet vid målverket innan försökskampanjen. Installationen gjordes av Outokumpu med assistans från Swerea Mefos och KTH. I tabell 4 nedan finns en översiktlig beskrivning av de variabler som ingår i soft-sensorerna i Avesta. Förutom dessa signaler förbereddes soft-sensorn även för ljud och vibrationssignaler, men dessa uteslöts ur kalibreringen eftersom det var oklart om dessa signaler skulle vara tillgängliga under industriförsöken. Fullständig lista på variabler finns i bilaga 7.

Tabell 4 – Ingående variabler till soft-sensorer i Avesta (X betyder att variabeln ingår).

Variabeltyp	Ingående variabler	Antal	Korg 1		Korg 2/3		Temp
			Index 1	Index 2	Index 1	Index 2	
Dynamiska processdata	Kylvattentemperaturer	4	X	X	X	X	X
	Kylvattenflöden	3	X	X	X	X	X
	Brännarflöden	4	X	X	X	X	X
	Injektionsflöden	3	X	X	X	X	X
	Förbrukningsdata	2	X	X			X
	Transformatorläge	12	X	X	X	X	X
	Avgasflöden	2	X	X	X	X	X
	Avgastemperatur	1	X	X	X	X	X
	NOx-halt i avgas	1	X	X	X	X	X
Energidata	Elenergi	1	X	X			X
	Energiförluster	2	X	X			X
Eldata	Ström	3	X	X	X	X	X
	Spänning	3	X	X	X	X	X
	Aktiv effekt	1	X	X	X	X	X
	Effektfaktor	3	X	X	X	X	X
	Press	3	X	X	X	X	X
	HRR	3	X	X	X	X	X
	Ljusbåglängd	3	X	X	X	X	X
Harmoniska störningar	Individuella övertoner	14	X	X	X	X	X
	THD	1	X	X	X	X	X

	Dominerande överton	4	X	X	X	X	X
Beräknade data	Power-on tid	1	X	X			X
	Spec. energiförbrukning	1	X	X			X
Chargedata	Chargerad vikt i korgar	3	X	X	X	X	X
	Fyllnadsgrad i korgar	3	X	X	X	X	X
Totalt		81					

Efter installation genomfördes en försökskampanj med direktmätningar i ugnen för att testa utvecklade processtyrningsstrategier i drift samt utvärdera soft-sensors tillförlitlighet under varierande förhållanden. En försöksplan och försöksprotokoll utarbetades och användes vid försöken. Försöksplanen finns i bilaga 8 och ett exempel på försöksprotokoll finns i bilaga 9.

Resultatet från försökskampanjen (i form av smälttid och energiförbrukning) var ursprungligen tänkt att jämföras med nuläget för Outokumpu Stainless efter installation av EMS (tabell 2). Vid en jämförelse av månadsmedelvärden för elförbrukning under 2015-2016 konstaterades dock kraftiga variationer, både mellan närliggande månader och mellan samma månad olika år. Standardavvikelse för månadsmedelvärden på elförbrukning under 2016 är ca 12,1 kWh/ton, vilket är i samma storleksordning som den förväntade minskningen av elförbrukning under projektets genomförande (ca 12,6 kWh/ton, vilket motsvarar 2,5 % av årsmedelvärdet 2015).

Det är därmed inte säkert att en jämförelse mellan elförbrukningen under försöksperioden med den tilltänkta referensperioden i tabell 2 är rättvisande. En mer rättvisande jämförelse vore att jämföra de smältor under försöksperioden som styrt enligt försöksplanen med medelvärdet för den period de genomfördes inom, d.v.s. december 2016. Denna metod för utvärdering av måluppfyllelse kommer att tillämpas.

4.8 Industriseminarier

Ett industriseminarium har anordnats i Halmstad, 20 september 2016. Titeln på seminariet var ”Mättekniker för processtyrning av ljusbågsugnar ” och seminariet fokuserade på resultatet av utveckling av mätteknik enligt avsnitt 3.2 ovan. Seminariet var välbesökt, 31 deltagare från 12 företag deltog. Programmet för industriseminarier visas i bilaga 10.

Ytterligare ett industriseminarium anordnades på Jernkontoret, 6 mars 2017 i anslutning till Teknikområde 23's årsstämma. Titeln på seminariet var ” Förbättrad processtyrning av ljusbågsugnar genom utnyttjande av soft-sensorer”. Även detta seminarium var förhållandevis välbesökt med ett tjugotal deltagare från den svenska stålindustrin. Programmet för industriseminarier visas i bilaga 11.

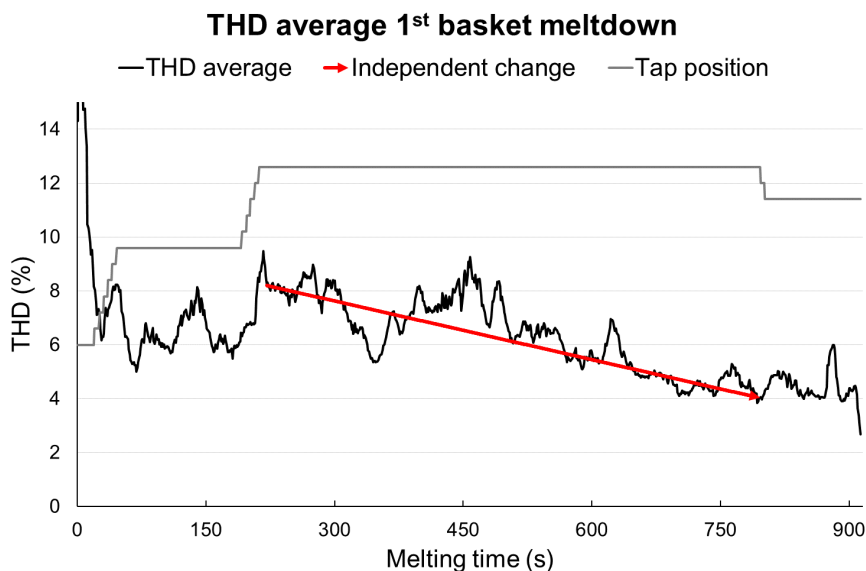
5 RESULTAT

5.1 On-line mätningar i ljusbågsugn

Ny teknik för direktmätningar i ljusbågsugnar har utvecklats inom projektet. Möjligheter och begränsningar med dessa tekniker har identifierats. Detaljerad beskrivning av respektive teknik finns i de tekniska rapporterna [16].

5.1.1 Harmoniska störningar i ström

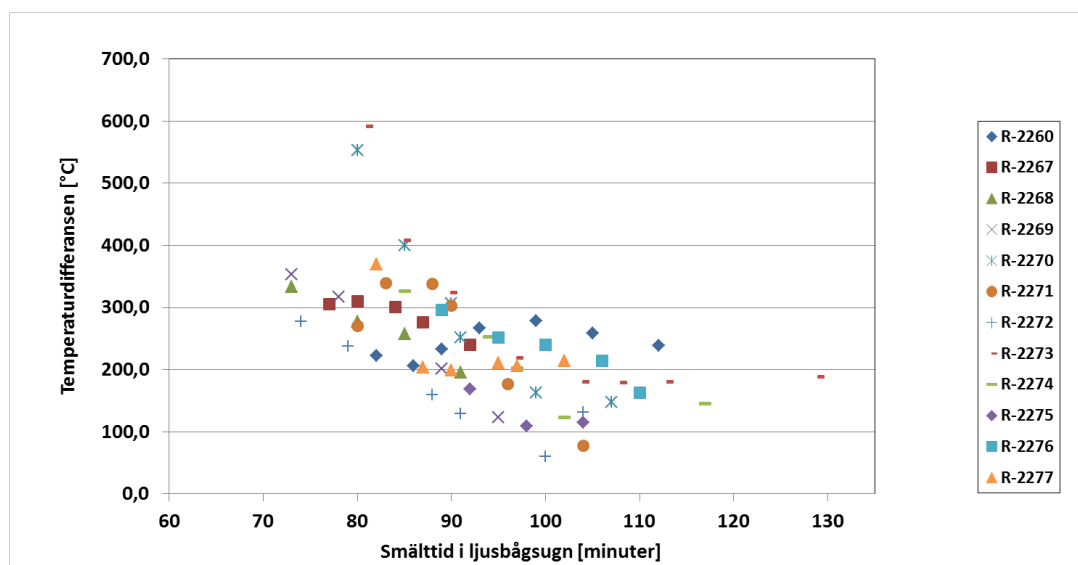
De harmoniska störningarna i strömmen (THD) undersöktes under samtliga mätkampanjer i Avesta (kampanj 1, 2 och 4 i tabell 3). Ett exempel på hur harmoniska störningar av strömmen minskar under en charge illustreras i Figur 6 där man kan observera hur THD avtar samtidigt som lindningskopplarläget inte förändras.



Figur 6 – THD (andel disharmonisk amplitud) avtar när skrotet blir mer nedsmält under tiden som ljusbågsugnen är i drift under ett lindningskopplarläge, rött streck visar trenden. Denna tagning vid charge 53196. [16]

5.1.2 Fiberoptiska mätningar

Som tidigare nämnts är de uppmätta resultaten från de fiberoptiska mätningarna begränsade till kampanj 3 som bestod av mätningar genomförda vid MEFOS pilot ljusbågsugn. De temperaturer som beräknades utifrån spektrometerdata visade på en lägre temperatur jämfördes med doppyrometern. Differensen mellan doppyrometern och den beräknade temperaturen visas i Figur 7. Differensen minskar med ökad smälttid i ljusbågsugnen.



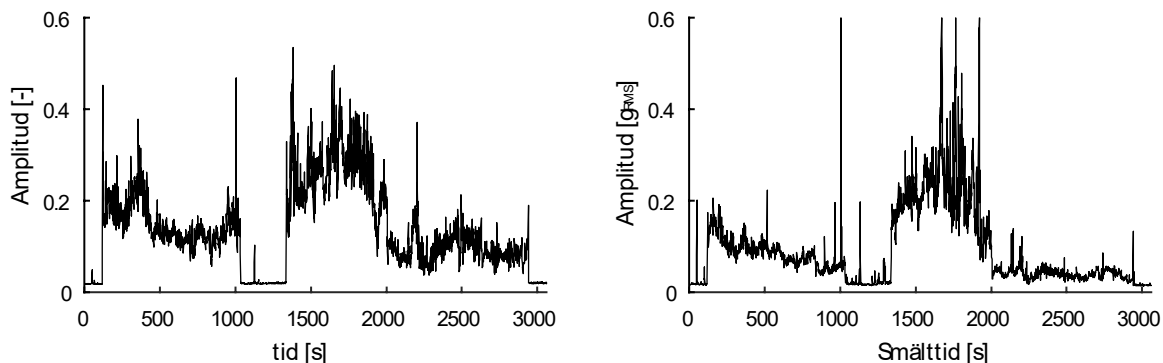
Figur 7 – Differenser mellan doppyrometern och de beräknade spektrometertemperaturen. Varje charge visas som punkterserier [17].

5.1.3 Ljud och vibrationsmätningar

Det har under studien konstaterats att ljud mätt med mikrofon samt vibrationer mätta med accelerometrar fastsatta på ugnen visar mycket liknande beteende. I figur 8 nedan visas två grafer som bägge visar amplitud. Amplituden som visas avser total amplitud inom det undersökta frekvensområdet (0-1000 Hz). Båda graferna är skalade till att motsvara andel av maximalt utslag för mätutrustningen. Den vänstra bilden visar amplituden av ljudet runt ugnen mätt med mikrofonen (dB_{RMS}) och den högra bilden visar vibrationerna mätta med accelerometern (g_{RMS}). RMS betyder "Root Mean Square" och är ett sätt att beskriva medelvärde under en våglängd på en signal som oscillerar kring noll. I ekvation 3 nedan visas hur RMS-värdet för en signal motsvarande en sinusformad vågrörelse med maximal momentan amplitud A beräknas:

$$\text{IF } y(x) = A * \sin(\omega t) \text{ THEN } y_{RMS} = A/\sqrt{2} \quad (3)$$

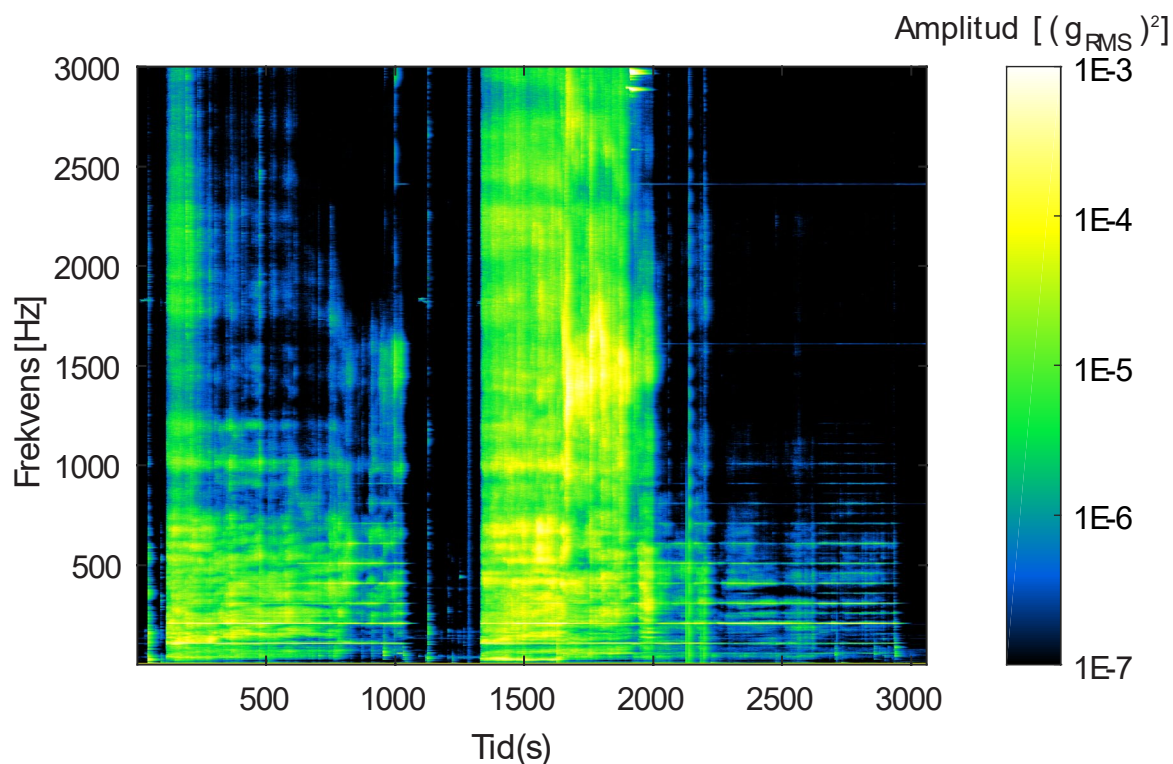
Mellan 1000 och 1300 sekunder är ugnen avstängd för isättning av nytt skrot. Jämför man bilderna så ser man att trenderna är mycket lika varandra. Amplituden är högre i början av nedsmältningen och minskar sedan. Detta beror både på att effekten minskar samt att ljusbågarna stabiliseras. Ska signalernas stabilitet jämföras så är data insamlad med accelerometrarna mer stabil och visar på tydligare trender.



Figur 8 – Löpande medelvärde för ljudet (vänster) och vibrationernas (höger) amplitud under nedsmältningen av två korgar samt raffinering.

Ljud- och vibrationssignalerna undersöktes också med avseende på amplituden på varje individuell frekvens. Detta gjordes för att ljusbågsugnar har ett mycket karakteristiskt beteende gällande amplituder om 100 Hz. Denna amplitud skapas av frekvensen på nätspänningen. I Sverige har vi nätspänningen 50 Hz, anledningen till varför den karakteristiska amplituden blir 100 Hz istället för 50 Hz är för att strömmen är som starkast två gånger per period. I figur 9 visas en bild som beskriver hur ugnen vibrerar. I nedre högra hörnet på figuren kan man se horisontella linjer varje 100 Hz. Detta motsvarar då arbetsfrekvensen för ljusbågarna. Det mest intressanta med denna typ av graf är den tydliga skillnaden i beteende som kan ses vid ungefär 2000 sekunder. Vid denna period så ändras vibrationerna från att vara mycket starka och spänna över hela frekvensområdet till att bli svagare och nästan ebart vara isolerade till området under 1000 Hz samt att elektrodernas arbetsfrekvenser blir dominerande. Detta beteende anses bero på att ljusbågarna stabiliseras

och arbetar mot ett format stålbad. När ljusbågarna inte är stabila och istället träffar osmält skrot skapas vibrationer som är starka och spänner över ett större frekvensområde.



Figur 9 – Amplitud för vibrationer på olika frekvenser över nedsmältningen av två korgar samt raffinering. Samma tidsenhet som i figur 8.

5.2 Soft-sensors utveckling

5.2.1 Nedsmältningsgrad

Klassificeringsmodellernas noggrannhet beskrivs i Tabell 5 nedan. Noggrannheten har uppskattats genom jämförelse mellan manuellt klassificerad nedsmältningsgrad och soft-sensors klassificering för alla de charger som ingår i soft-sensors kalibreringsunderlag (ca 160 charger från kampanj nr 2, se tabell 3.)

Tabell 5 – Noggrannhet i uppskattning av nedsmältningsgrad för korg 1

Korg	Grad 3	Grad 2	Grad 1	Total andel smältor med rätt uppskattad	2 nivåer
Nr	(ja/nej)	(ja/nej)	(ja/nej)	grad (1/2/3)	fel
1	82,65%	71,43%	88,78%	71,43%	0,00%
2 & 3	80,61%	74,49%	89,80%	72,45%	2,04%

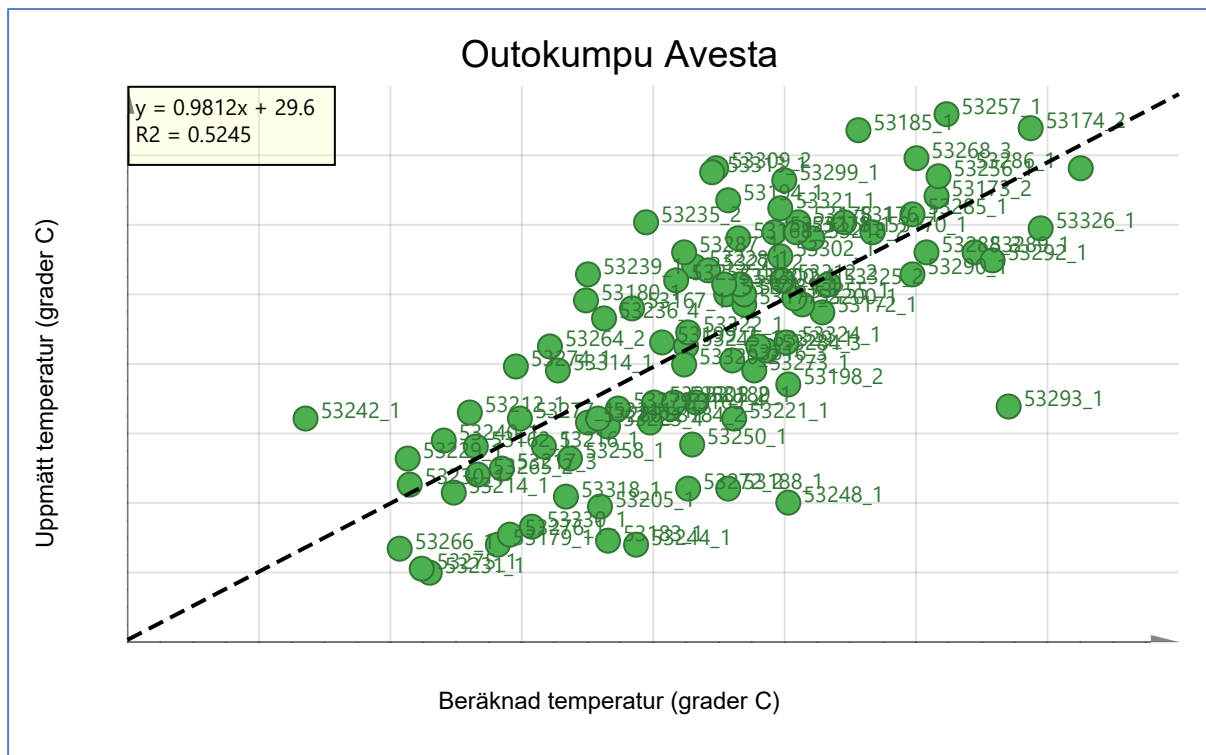
Angående den relativa betydelsen av olika variabler för soft-sensors bedömning av nedsmältningsgraden kan sägas att de mest betydelsefulla grupperna av variabler är (i fallande ordning):

1. Värmeförluster (kylvattenflöden och kylvattentemperaturer)
2. Total tillförd energi (elenergi, power-on tid, el-förluster, kWh/ton)
3. Spänningsläge (LK-läge, sekundär spänning, spenningsfall i ljusbågar)
4. Chargerad skrotvolym
5. Ljud (anplitud för frekvensband)
6. Harmoniska störningar (amplitud för övertoner)

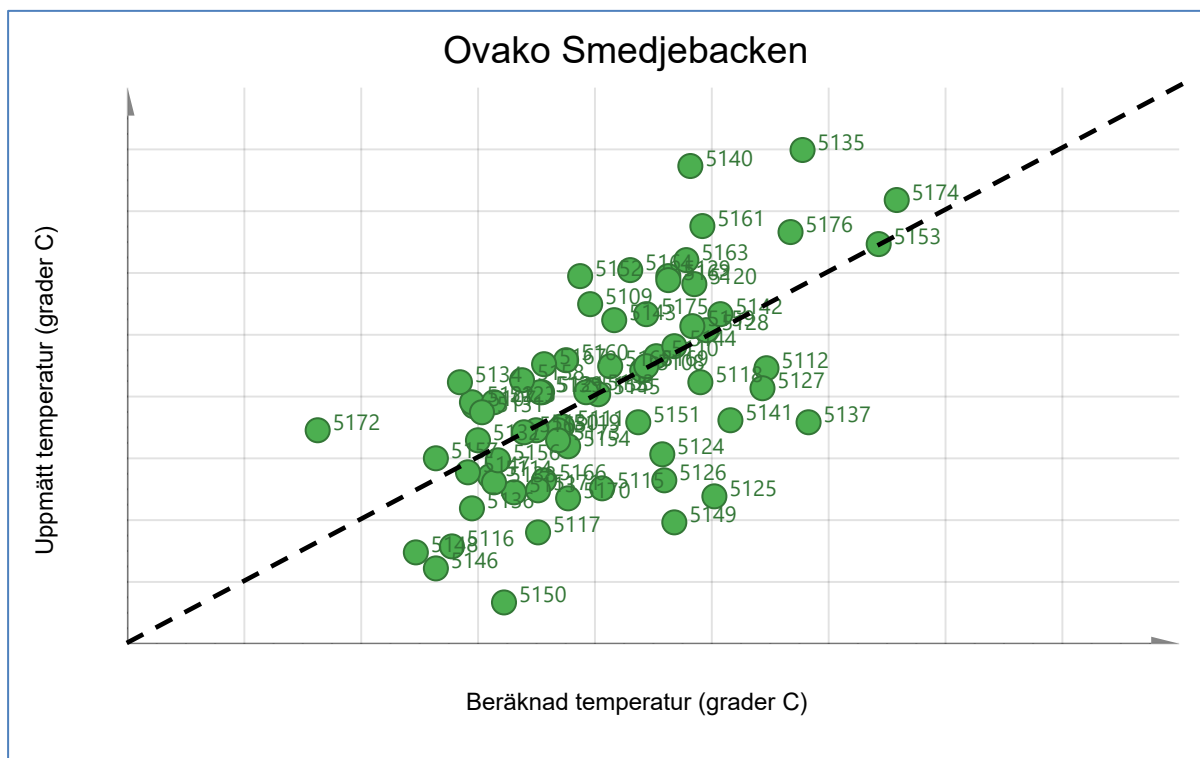
Rangordningen av variabelgrupper baseras på medelvärde av relativ betydelse (VIP – Variable Importance on Projection) för den av i gruppen ingående variabel med högst relativ betydelse [20]. Det betyder alltså att rangordningen av gruppen bestäms av gruppens mest betydelsefulla variabel.

5.2.2 Temperatur

Soft-sensors beräknade temperatur har jämförts med verkligt uppmätt temperatur för alla temperaturprovtagningstillfällen i dataunderlaget för kalibrering av soft-sensorerna i Avesta och Smedjebacken. Resultatet kan ses i Figur 10a och 10b nedan. Båda graferna i figur 10 avser utvärdering av beräkningsnoggrannheten i temperatur i off-line läge. Punkterna i diagrammen är numrerade enligt systemet Chargenummer_provnummer.



Figur 10a – Beräknad och uppmätt temperatur för kalibreringschager vid Outokumpu Avesta.



Figur 10b – Beräknad och uppmätt temperatur för kalibreringscharger vid Ovako Smedjebacken.

RMSEE i figur 10a och figur 10b avser ”Root Mean Square Error of Estimation”, vilket representerar det kvadratiske medelberäkningsfelet (grader C) för alla charger i kalibreringsdatat. RMSEcv i figur 10a och figur 10b avser korsvaliderat kvadratisk medelberäkningsfel, då kalibreringschargerna delats upp i sju korsvalideringsgrupper.

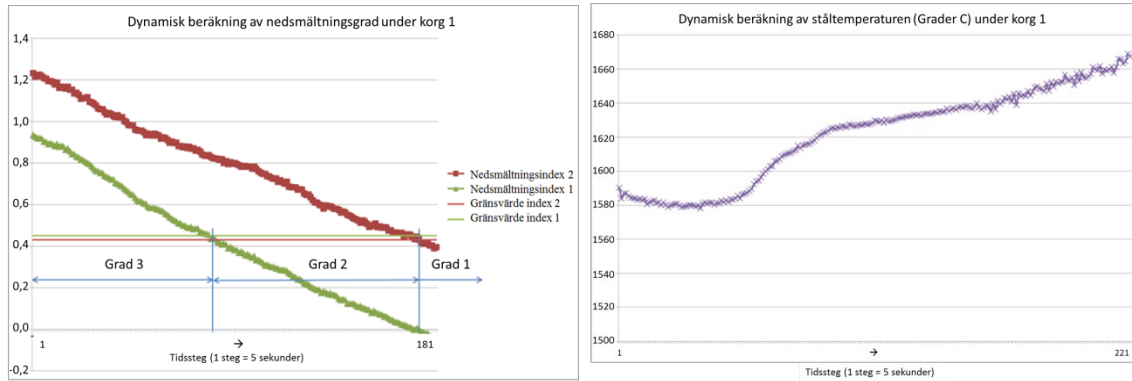
Angående den relativa betydelsen av olika variabler för soft-sensorns bedömning av nedsmältningsgraden kan sägas att de mest betydelsefulla grupperna av variabler är (i fallande ordning):

1. Värmeförluster (kylvattenflöden och kylvattentemperaturer)
2. Ljud (amplitud för frekvensband)
3. Total tillförd energi (elenergi, power-on tid, el-förluster, kWh/ton)
4. Syrgasinjektion (flöde, ackumulerad volym)
5. Direktutsug (flöde, temperatur)
6. Harmoniska störningar (amplitud för övertoner)

Rangordningen av variabelgrupper baseras på medelvärde av relativ betydelse (VIP – Variable Importance on Projection) för den av i gruppen ingående variabel med högst relativ betydelse [20]. Det betyder alltså att rangordningen av gruppen bestäms av gruppens mest betydelsefulla variabel.

5.3 Dynamisk beräkning av nedsmältningsindex och ståltemperatur

Dynamisk beräkning av nedsmältningsindex och ståltemperatur alla charger från mätkampanj nr 2 (se tabell 3) genomfördes. Ett exempel på nedsmältningsindexens och ståltemperaturens utveckling för smältning av korg 1 under en charge visas i figur 11 nedan.



Figur 11 – Exempel på soft-sensorns beräkning av nedsmältningsindex/grad i Avesta.

I exemplet i figur 11 ovan visas även brytpunkter för övergång mellan olika nedsmältningsgrader.

Gränsvärden för chargering och övergång till raffineringsfas

I Tabell 6 nedan finns beräknade gränsvärden för index 1 och index 2 för chargeringar av skrotkorg 2 och 3 baserat på strategin för tidpunkt för chargering av skrotkorgar (se sektion 4.5).

Tabell 6 – Gränsvärden för rekommendation av charging för olika fyllnadsgrader

Fyllnadsgrad korg 2	Gränsvärde index 1	Gränsvärde index 2	Fyllnadsgrad korg 3	Gränsvärde index 1	Gränsvärde index 2
5	0,91		5	0,78	
10	0,83		10	0,72	
15	0,75		15	0,66	
20	0,67		20	0,60	
25	0,59		25	0,54	
30	0,51		30	0,48	
35		0,84	35	0,42	
40		0,78	40		0,78
45		0,72	45		0,74
50		0,65	50		0,70
55		0,59	55		0,66
60		0,53	60		0,62
65		0,46	65		0,58

Gränsvärdet för Index 2 rörande övergång från smältningsfas till raffineringsfas fastställdes till 0,69 för den defensiva strategin och 0,61 för den offensiva strategin. För den defensiva strategin beräknas gränsvärdet som medelvärdet för Index 2 enligt andrakorgsmodellen vid start av raffineringsfas enligt ordinarie operatörspraxis. För den offensiva strategin beräknas gränsvärdet som medelvärdet för Index 2 enligt andrakorgsmodellen vid övergång från nedsmältningsgrad 2 till nedsmältningsgrad 1. Se sektion 4.6 – Tidpunkt för start av raffineringsfas för detaljer om strategier för start av raffineringsfas.

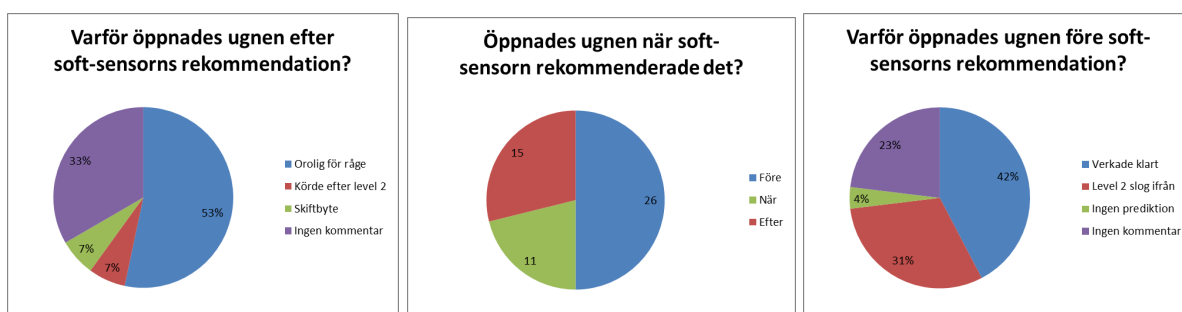
5.4 Driftförsök vid Outokumpu Stainless i Avesta

Soft-sensorn har installerats och integrerats i level-2 systemet vid Outokumpu Stainless i Avesta. Den version som installerats innehåller de variabler som beskrivs i tabell 4 och en försökskampanj med tillämpning av utvecklade styrstrategier genomfördes. Kampanjen (kampanj nr 5 i tabell 3) omfattade totalt 48 charger och 52 chargingar av andra/tredjekorgar, d.v.s, av de 48 chargerna genomfördes 42 st med tvåkorgsförfarande och 6 st med trekorgsförfarande.

Vid analys av processdata konstaterades att power-on tiden var något kortare (9 sekunder) under hela försöksperioden jämfört med referensperioden i december 2016. Detta samtidigt som elförbrukningen var högre för försöksperioden (6 kWh/ton) jämfört med referensperioden. De generella avvikelserna från referensperioden kan inte anses vara signifikanta med hänsyn tagen till den stora variationen i energiförbrukning och power-on tid som konstaterades under referensperioden, se sektion 4.7.

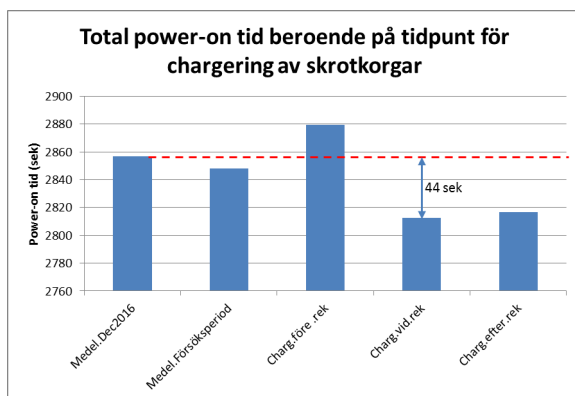
5.4.1 Tidpunkt för charging av skrotkorgar

Enligt försöksplanen ombads operatörerna notera om de följde soft-sensorns rekommendationer för charging av skrotkorgar enligt tabell 6 och kommentera när de valde att göra avsteg från rekommendationen. Se Figur 12 nedan för översikt över när (i förhållande till soft-sensorns rekommendation) operatörerna chargerade 2:a och 3:e korgar under försökskampanjen.

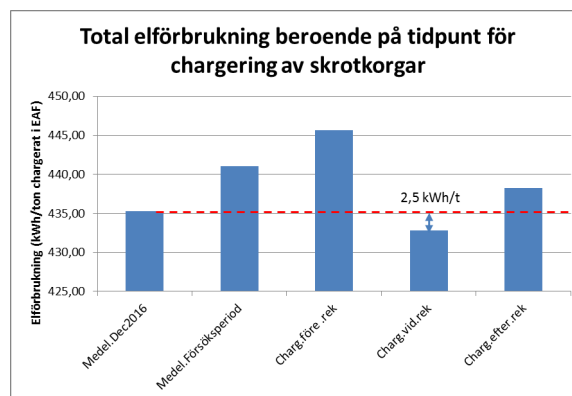


Figur 12 – Översikt för chargingar och orsak till avsteg från soft-sensorns rekommendation.

Vid en jämförelse av de smältor då soft-sensorns rekommendationer kring charging av skrotkorgar följts med referensperioden så kan en minskning i både power-on tid (44 sekunder, se Figur 13) och elförbrukning (2,5 kWh/ton, se Figur 14) observeras.



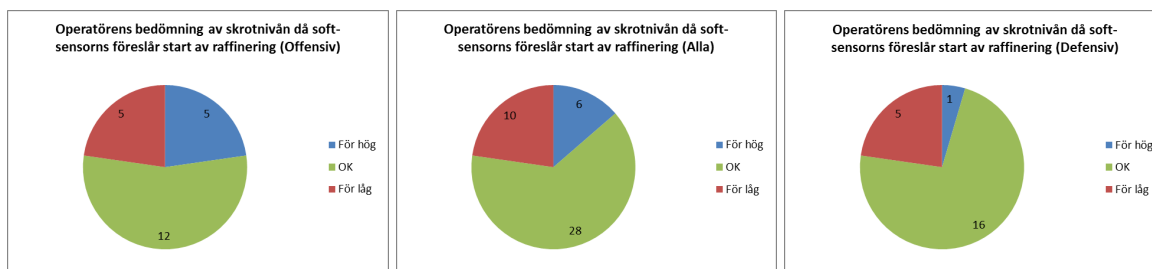
Figur 13 – Power-on tiden för försök och referens



Figur 14 – Elförbrukningen för försök och referens

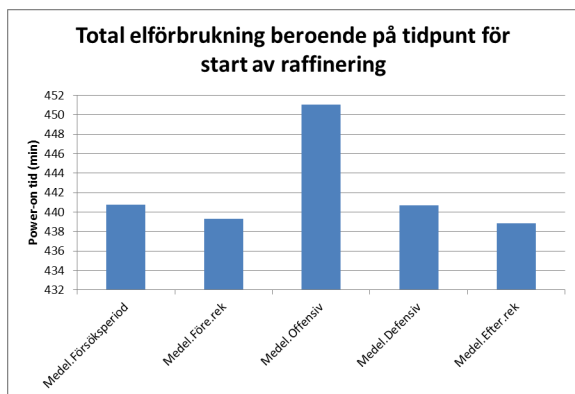
5.4.2 Tidpunkt för start av raffinering

Operatören ombads nedteckna sin bedömning av skrotnivån när soft-sensorn föreslog start av raffinering. I den inledande delen av försökskampanjen användes den offensiva strategin enligt avsnitt 4.6. Vid upprepade tillfällen ansåg operatören att skrotnivån vid det rekommenderade gränsvärdet för nedsmältningsindex (0,61) var för låg. I vissa fall nåddes inte gränsvärdet innan det var dags för tappning. Därför användes fortsättningsvis den defensiva strategin (gränsvärde 0,69) enligt avsnitt 4.6. I Figur 15 nedan visas operatörernas bedömning av skrotnivån vid det tillfälle då soft-sensorn föreslår start av raffinering.

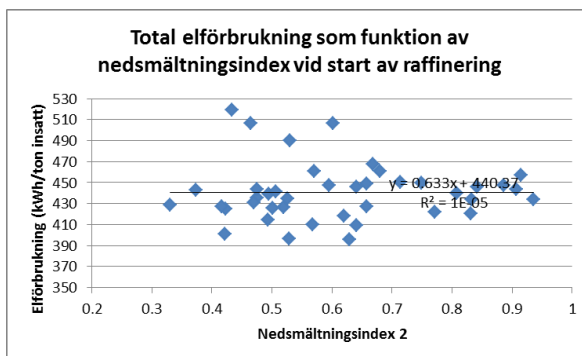


Figur 15 – Operatörernas bedömning av skrotnivån då soft-sensorn föreslår raffineringsstart

I Figur 16 visas medelvärden på elförbrukning beroende på tidpunkt för start av raffinering i relation till den rekommenderade tidpunkten enligt den offensiva (Index 2 = 0,69) och defensiva strategin (Index 2 = 0,61) som beskrivs i avsnitt 4.6. I Figur 17 visas power-on tiden och elförbrukningen som funktion av värdet på nedsmältningsindex 2.



Figur 16 – Elförbrukningen för försök och referens avseende start av raffinering



Figur 17 – Total elförbrukning som funktion av nedsmältningsindex

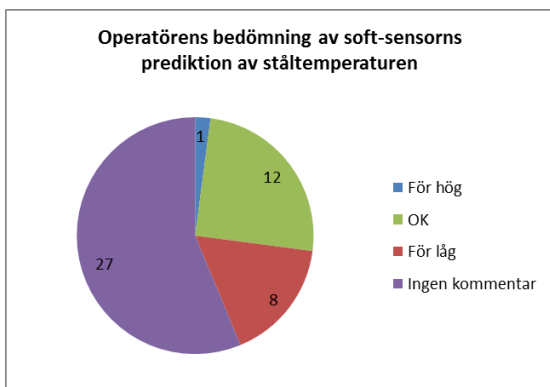
5.4.3 Tidpunkt för temperaturprovtagning

Enligt försöksbeskrivningen ombads operatörerna ta ett temperaturprov vid det tillfälle då soft-sensors predikterade temperatur överensstämmer med måltemperaturen. Av försöksprotokollen framgår inte om så verkligen skedde i enskilda fall, men om ingen notering som antyder motsatsen gjorts i försöksprotokollet antas att så skedde. I Tabell 7 visas en jämförelse mellan prediktionsfelen för soft-sensorn, operatörens temperaturuppskattning samt den konventionella temperaturmodellen i Avesta som baseras på en mass- och energibalans.

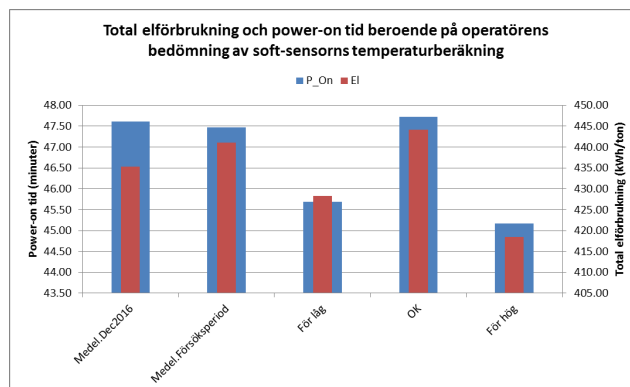
Tabell 7 – Jämförelse mellan prediktionsfelen (grader C) för soft-sensorn och operatörens bedömning

	Soft-sensor	Operatör	Konventionell modell
Kvadratisk medelfel	51,1	50,8	119,6
Medelfel	12,2	-5,4	-58,3
Standardavvikelse	49,7	50,5	105,1

Operatörernas generella kommentar till soft-sensors temperaturprediktion kan ses i Figur 18 nedan. I Figur 19 visas medelvärden i elförbrukning och power-on tid för respektive operatörskommentar enligt figur 18.



Figur 18 – Operatörens bedömning av soft-sensors prediktion av ståltemperaturen



Figur 19 – Elförbrukning och power-on tid vid olika bedömningar av soft-sensors temperaturberäkning

6 DISKUSSION

I förhållande till den uppskattade potentialen att minska smälttiden på målverket med 2 minuter innebär de 44 sekunders förkortad smälttid som kunde konstateras en måluppfyllelse på ca 36 % inom projektets tidsram. Vid projektansökan uppskattades att 50 % av potentialen skulle kunna uppfyllas. Genom aktiv styrning av smältprogram i kombination med styrning av tidpunkt för charging, raffineringstart och temperaturprovtagning är det möjligt att uppnå hela projektets energieffektiviseringspotential inom den tidsram som angetts sista stycket av sektion 2 (mål).

Som helhet kan sägas att soft-sensors noggrannhet i klassificeringen av nedsmältningsgrader är relativt god, se tabell 5. Däremot är det inte säkert att den manuella klassificeringen (figur 7) är tillräckligt noggrann och objektiv för att kunna fungera som underlag för förbättrad processtyrning, även om soft-sensors noggrannhet i klassificeringen skulle vara 100 % för alla nedsmältningsgrader. Detta problem har överkommit genom att basera processtyrning på gränsvärden för nedsmältningsindex (tabell 6) istället för diskreta nivåer av nedsmältningsgrad.

Styrningen av tidpunkt för charging av skrotkorgar baserade på gränsvärden i tabell 6 resulterade i en minskning av power-on tid (figur 13) och elförbrukning (figur 14), medan styrningen av tidpunkt för start av raffinering inte gav någon positiv effekt på elförbrukning (figur 16 och figur 17). Detta resultat är inte oväntat, med tanke på att modellen för beräkning av nedsmältningsindex 2 för korg 2/3 är kalibrerad på data från första skrotkorgen. Det vore naturligtvis önskvärt att kalibrera modellen på data från sista skrotkorgen, men detta kräver att ugnen öppnas innan start av raffinering för manuell bedömning av nedsmältningsgraden. Detta har inte genomförts inom projektet eftersom det bedömts påverka produktiviteten signifikant. Ur figur 15 kan dock konstateras att operatörerna i allmänhet ändå tyckte att den rekommenderade tidpunkten för raffineringstart var "OK", oavsett vilken strategi som användes.

Angående beräkningsnoggrannheten för ståltemperatur som illustreras i Figur 10 kan konstateras att noggrannheten inte skiljer sig nämnvärt mellan Outokumpu Stainless och Ovako Bar. Detta trots att kalibreringsunderlaget för Outokumpu inkluderar THD data och

ljudsignaler vilka saknas i Ovako. Det är därmed troligt att dessa signaler ej har signifikant relevans till ståltemperaturen.

Vid en jämförelse av det korsvaliderade medelberäkningsfelet för kalibreringen i Outokumpu (figur 10, $RMSE_{cv}=31$ grader C) med soft-sensorns kvadratiska medelprediktionsfel ($RMSEP=$ "Root Mean Square Error of Prediction") i temperaturberäkningen vid försökskampanjen (tabell 7, $RMSEP=51$ grader C) kan konstateras att soft-sensorns medelprediktionsfel vid försökskampanjen är betydligt högre än medelberäkningsfelet vid kalibreringen. Detta beror troligtvis på att den statistiska modellen är något överanpassad (för få observationer i förhållande till antalet variabler leder till modellering av brus som förstärks vid applicering på nya mätningar). Men det kan heller inte uteslutas att den verkliga korrelationen mellan de ingående variablerna och ståltemperaturen förändrats sedan kalibreringen vilket i så fall skulle kunna åtgärdas med nykalibrering.

Av tabell 7 framgår att soft-sensorns och operatörens bedömningar i stort sett är likvärdiga i fråga om noggrannhet i uppskattning av temperatur. Både soft-sensorn och operatörens bedömning är dock vida överlägsna den ordinarie temperaturmodellen. Det bör poängteras att operatörerna haft tillgång till både soft-sensorns signal och den ordinarie temperaturmodellen vid sin bedömning, varför det är naturligt att operatörens bedömning är den mest noggranna.

Sammanfattningsvis kan om försökskampanjen sägas att operatörerna var mer oroliga för överchagering när de följde soft-sensorns rekommendationer, men enligt operatörens bedömning efter genomförd chagering inträffade färre överchageringar ("rågar") då chagering genomfördes enligt soft-sensorns rekommendationer. Samtidigt kan man också säga att antalet för tidiga chageringar var lägre när man stannade innan soft-sensorns rekommendationer.

Operatörernas generella inställning till soft-sensorns temperaturberäkning var positiv och operatörerna sade sig basera sin uppskattning av ståltemperaturen innan första temperaturprovet tagits på soft-sensorns signal hellre än den ordinarie temperaturmodellen. Ur Figur 19 verkar det ändå som att operatörerna inte lyckats omsätta soft-sensorns relativt goda bedömningar av ståltemperaturen till minskad energiförbrukning genom tappning vid rätt temperatur. Detta på grund av att energiförbrukningen var högre då operatörerna gett en positiv kommentar ("OK") om den beräknade temperaturen än en negativ kommentar ("För låg" eller "För hög"). Men energiförbrukning och power-on tid påverkas också av andra parametrar än tapptemperaturen (exempelvis skrotmixen), varför det inte med säkerhet kan sägas att det är en ökad tapptemperatur som orsakat den högre energiförbrukningen vid goda bedömningar av tapptemperaturen.

7 SLUTSATSER

Harmoniska störningar i ström mäts och lagras i de flesta moderna elektrodregulatorer och finns därmed i allmänhet tillgängliga men ingår relativt sällan i on-line och historiska databaser i level-2 systemet och är därmed inte tillgängliga för analys och processtyrning. Arbetet inom detta projekt har visat att dessa signaler har signifikant koppling till nedsmältningsförloppet, och därmed kan möjligheterna att övervaka och styra nedsmältningsförloppet kunna förbättras avsevärt genom att inkludera dessa signaler i databaserna i level-2 systemet.

Även ljud och vibrations-signaler har visat på kopplingar till nedsmältningsförloppet liknande de för harmoniska störningar. Dessutom finns indikationer på diskreta förändringar i dessa signaler som har koppling till huruvida ljusbågarna slår mot skrot eller smält stål, vilket kan användas till detektering av blankbad. Ljud och vibrationssensorer (mikrofoner och accelerometrar) behöver dock monteras på eller i närheten av ugnen och signalerna från dessa behöver integreras med level-2 systemet för att de ska kunna utnyttjas för övervakning och processtyrning.

När det gäller mikrofoner så har arbetet under projektet visat på nödvändigheten i att montera dessa på en fast plats och att använda standardiserade inställningar på till exempel filter och volym. Placering av mikrofon med manuellt justerbar volym på flyttbart stativ har visserligen gett signaler som har varit användbara, men analys av data från mätkampanjerna har visat på relativt stora förändringar i total amplitud och fördelning av amplitud mellan olika frekvenser som orsakats av små justeringar av placeringen av mikrofonstativet samt volymen.

Mätning av vibrationer med accelerometrar har visat att dessa signaler ger liknande information om nedsmältningsförloppet som ljudmätningar. Signal/brusförhållandet är dock högre för vibrationsmätningar, vilket innebär att kopplingen till nedsmältningsgraden är tydligare. Mätningarna kräver dock mer monteringsarbete (av accelerometrar på ugnsfatet) vilket är tidskrävande och risken för felmontering med resulterande jordfel är högre. Dessutom har accelerometrar en begränsad livslängd vilket innebär att tillgängligheten på signalerna är sämre än för ljudmätningar. Liksom för ljudmätningar är det viktigt att utrustningen monteras på en fast plats.

Fiberoptiska mätningar har visat att temperaturvariationer i slaggen kan övervakas med denna teknik, under förutsättning att det finns en fri siktlinje mellan fibern och slaggen. Med förbättrad signalbehandling och filtrering kan fiberoptisk mätning vara ett alternativ eller komplement till soft-sensor för uppskattning av ståltemperatur. Ytterligare teknikutveckling behövs dock innan tillgängligheten på fiberoptiska signaler från ljusbågsugnen är tillräckligt hög för att signalerna ska kunna användas för processtyrning.

Utveckling av soft-sensorer har visat att det med god noggrannhet går att klassificera nedsmältningsgrad och att följa övergången mellan diskreta nivåer via nedsmältningsindex. För att detta ska vara möjligt krävs kalibrering av statistisk modell mot observationer av nedsmältningsgrad. Separat kalibrering för olika skrotkorgar krävs, vilket innebär att nedsmältningsgraden måste observeras även för sista skrotkorgen om relevant uppskattning av nedsmältningsgraden för denna skrotkorg önskas. Rekalibrering bör också genomföras regelbundet för installerade soft-sensorer. Även underhåll av mätutrustning kräver regelbundna insatser. För att rekalibrering och underhåll av mätutrustning ska kunna genomföras av egen personal på stålverken krävs förutom arbetstid och reservdelar också investeringar i programvara och utbildning. Kalibrering och underhåll kan också utföras av konsulter eller som konsultuppdrag av forskningsutövare.

När det gäller styrning av ugnens smältprogram är förhoppningen att kunna övergå från statiska smältprogram till dynamisk styrning enligt nedsmältningsindex. En sådan ”aktiv” styrning skulle innebära att man trappar ned (och upp) i spänningsnivå enligt fördefinierade nivåer på nedsmältningsindex. Vid försökskampanjen inom projektet har dock ”passiv” styrning tillämpats vilket innebär ingen ändring av ugnens smältprogram utan enbart att processen bryts för chargering vid rätt tillfälle. Passiv styrning av tidpunkt för chargering av

skrotkorgar har dock ändå inneburit minskad nedsmältningstid och energiförbrukning. Passiv styrning av tidpunkt för raffineringstart och temperaturprovtagning har dock inte inneburit någon energieffektivisering.

Soft-sensorer för ståltemperatur baserat på konventionellt processdata ger högre beräkningsnoggrannhet än temperaturmodeller baserade enbart på mass- och energibalanser. Tillgång till ljudsignaler och harmoniska störningar i ström förbättrar inte beräkningsnoggrannheten signifikant. Soft-sensorer med jämförbar beräknings-noggrannhet med den som installerats vid Outokumpu Stainless inom projektet borde kunna kalibreras för övriga stålverk i Sverige utan tillgång till andra mätningar än konventionellt processdata. Soft-sensorn saknar dock fortfarande parametrar som har direkt koppling till temperaturen i ugnen, varför det är troligt att en teknisk lösning för fiberoptiska mätningar i ljusbågsugn skulle förbättra noggrannheten avsevärt.

Huvudmålet med projektet har varit att minska smälttiden (power-on tiden) med 5 % vid målverket Outokumpu Stainless i Avesta (2 av 40 minuter). I projektansökan uppskattas att hälften av denna tidsbesparing (1 av 40 minuter) kan uppnås inom projekttiden. Den tidsbesparing som kunde påvisas under försökskampanjen var 44 sekunder, vilket motsvarar en måluppfyllelse på 73 %. En bidragande anledning till avvikelsen i måluppfyllelse är att utvecklingen av mätteknikerna tog betydligt längre tid än vad som bedömdes i projektansökan.

8 NYTTIGGÖRANDE AV RESULTAT OCH FORTSATT ARBETE

De beskrivna soft-sensorerna är kalibrerade och installerade vid Outokumpu Stainless AB i Avesta. Av de undersökta mätteknikerna är det för närvarande harmoniska störningar i ström (via regulator) och ljudmätningar (via mikrofon) som är implementerade i Outokumpus level-2 system. I den nuvarande kalibreringen av soft-sensorerna ingår ej ljud-data. Data från den senaste mätkampanjen innehåller dock ljud-signaler och kan användas för rekalkibrering. Som tidigare nämnts är regelbunden rekalkibrering av soft-sensorer nödvändigt för att säkerställa att beräkningsnoggrannheten inte försämras med tiden. De processdata som behövs för omkalibrering finns tillgängliga i den tabell som skapades i level-2 systemet och beskrivs i sektion 3.4.1. För omkalibrering av soft-sensor för nedsmältningsgrad krävs dock även visuell bedömning av nedsmältningsgraden vid chargering av skrotkorgar för ca 150 smältor.

De beskrivna soft-sensorerna är endast kalibrerade för Outokumpus ljusbågsugn i Avesta och kan inte utan modifikationer användas på andra ljusbågsugnar. För att kalibrera och implementera liknande soft-sensorer för andra ljusbågsugnar kan metoden som beskrivs i sektion 4.5 - 4.7 tillämpas. Metoden sammanfattas även i form av en punktlista i bilaga 12.

Den arbetsinsats som krävs för kalibrering och implementering av soft-sensorer på andra ljusbågsugnar beror till stor del på vilka mätsignaler som för närvarande finns tillgängliga. Generellt kan sägas att införande av sådana mättekniker som utvecklats med gott resultat vid Outokumpu inom projektet (harmoniska störningar i ström och ljud) kan genomföras med ungefär hälften av motsvarande arbetsinsats vid andra ljusbågsugnar. För införande av mättekniker som vibrations- och ljudmätningar krävs fortsatt teknikutveckling och en förmodligen lika stor arbetsinsats som i detta projekt. Arbetsinsatser för kalibrering och

implementering av soft-sensorer (förutsatt att mätsignaler finns tillgängliga) kan genomföras med hälften av motsvarande arbetsinsats som i detta projekt.

Som exempel kan en ljusbågsugn i samma utgångsläge som ugnen i Avesta (tillgång på råsignaler för harmoniska svängningar i ström via regulator, inga ljud, ljus eller vibrationsmätningar) komma upp till samma läge som i Avesta efter projektet (soft-sensor för nedsmältningsgrad och temperatur baserade på harmoniska störningar i ström och ljudsignaler) med en arbetsinsats på ca 6 månader.

För att åstadkomma den dynamiska eller ”aktiva” styrning av smältningen som krävs för att till fullo utnyttja soft-sensorernas beräkning av nedsmältningsgrad behöver omfattande modifikationer av smältprogrammen genomföras. Troligen krävs ytterligare forskning för att ta fram nya dynamiska smältprogram utan risk för överhettningsskador på ugnen. Dessutom behöver separat modell för beräkning av nedsmältningsgrad för sista skrotkorgen kalibreras för förbättrad styrning av raffineringsstart. Kalibrering av modell för nedsmältningsgrad under sista korg kräver förmodligen extra mätningar av nedsmältningsgraden under sista korgen vilket innebär störningar av produktionen. För att motivera sådana produktionsstörningar krävs en bättre metod att bedöma nedsmältningsgraden, som till exempel automatiserad bildanalys. Vidare skulle det vara av stort intresse att bedöma fyllnadsgraden på skrotkorgarna på ett liknande sätt.

För förbättrad styrning av tidpunkt för temperaturprovtagning krävs tillgång till signaler som har tydlig relevans till ståltemperaturen, vilket i sin tur kräver vidareutveckling av fiberoptisk mätteknik för förbättrad styrning av tidpunkt för temperaturprovtagning.

Sammantaget krävs förmodligen ett ytterligare stort forskningsprojekt, uppskattningsvis av minst halva volymen för detta projekt, för att realisera hela den energieffektiviseringspotential med utnyttjande av mätteknik och soft-sensorer som identifierats inom detta projekt. Fokus på ett sådant projekt skulle kunna vara fiberoptisk mätteknik, bedömning av skrotnivå i ugn och korg med bildanalys samt utveckling av dynamiska smältprogram.

9 HÅLLBARHET

Projektets effekt	Minskad smälttid i ljusbågsugn med 2,9 % vilket på sikt kommer att minska den svenska skrotbaserade stålindustrins energiförbrukning med 36 GWh/år eller 18 kWh/ton råstål.
Jämförelseobjekt	Oförändrad smälttid i ljusbågsugn och oförändrad energiförbrukning för den svenska skrotbaserade stålindustrin

	1. Insatsvaror	2. Tillverkning	3. Användning	4. Återvinning	5. Resthantering
A. Minsta möjliga utsläpp	0	0	0	0	0
B. Hållbar användning av resurser	+	+	0	0	0
C. Minskat utsläpp av växthusgaser	+	+	0	0	0
D. Påverkan på den naturliga miljön	0	0	0	0	0
E. Arbetsmiljö och hälsa	0	0	0	0	0
F. Respekt för mänskliga rättigheter	0	0	0	0	0
G. Jämställdhet och mångfald	0	0	0	0	0

	Område (t.ex. A-I, E-4)	Beskrivning av hur projektet påverkar hållbarhetsområdet
Aspekter med +	B1	Minskad smälttid innebär förutom minskad förbrukning av energibärare även minskade oxidationsförluster av järn, kol och andra legeringselement.
	C1	Minskade oxidationsförluster av järn och legeringselement innebär minskade utsläpp av växthusgaser genom mindre behov av energikrävande nyproduktion från jungfruliga råvaror.
	B2	Minskad smälttid innebär minskad förbrukning av flera olika råvaror för energiproduktion som helt eller delvis inte är förnybara.
	C2	Minskad smälttid innebär minskad förbrukning av flera olika energislag med associerade växthusgasutsläpp, framför allt elektricitet men även fossila bränslen såsom olja, gasol och kolpulver.
Aspekter med -		

10 REFERENSER

1. *Jernkontorets statistik.*
2. Den allmänna uppfattningen inom Jernkontorets forskningsblock 23010 – Ljusbågsugnar.
3. Statistisk analys av skrot och power-off tider, Jernkontorsrapport nummer TO23-127.
4. Cost and energy effective management of EAF with flexible charge material mix (Flexcharge), RFCS kontrakt nr RFSR-CT-2007-00008, ISBN: 978-92-79-22243-6.
5. Endpoint prediction of electric arc furnace based on T-S fuzzy system, Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2012, Article number 6244347, pp 2162-2165.
6. J.M. Buydens, P. Nyssen and C. Marique, La Revue de Metallurgie, April, 1998, p. 501. .
7. B. Dittmer, K. Krüger, D. Rieger, T. Matschullat and A. Döbbeler, Iron & Steel Technology. Feb, 2011, p. 49.,
8. B. Vidacak, I. Arvanitidis, P.G. Jönsson and P. Sjöberg, “The Effect of Viscosity on the Foaming of EAF Slags in the Production of Stainless Steel”, Scand. J. Metallurgy, Vol.31, No. 5, 2002, p. 321.,
9. SIMETAL RCB Temp – Innovation in steelmaking – Contact free temperature measurement,
<http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-RCB-Temp-en.pdf>.
10. Kendall, Thys, Horrex, Verhoeven, A window into the electric arc furnace, a continuous temperature sensor measuring the complete furnace cycle, Archives of Metallurgy and Materials 53 (2) , pp. 451-454, 2008.
11. Borlee, Wauters, Steyls, Whitaker, Continuous measurement of steel temperature in the EAF using a consumable optical fibre.
12. Eriksson, J., et al., On line styrning av temperatur och kolfärskning i konverterprocesser. **TO 21-203**. 2013
13. Ljungqvist, P., Evaluation of sound-, current, and vibrations measurements in the Electric Arc Furnace, Examensarbete för civilingenjör. KTH, **2013**
14. Recent improvements in modelling the electrical energy consumption of electric arc furnaces, S Köhle.
15. Adams, W., et al., Total energy consumption in arc furnaces, MPT International, 2002, No. 6, pp. 44-50.
16. Schmidt, C.N., N.Å.I. Andersson, and A. Tilliander, Technical report, sound, vibration and THD current measurements in Electric arc furnaces. **TO 23-172**. 2016
17. Sandström, D., E. Sandberg, and J. Björkvall, Spectroscopic Measurements in the Electric Arc Furnace. **MEF17004K**. 2017
18. R. W. Higgs, "Sonic Signature Analysis for Arc Furnace Diagnostics and Control," in Ultrasonics Symposium, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1974.,
19. Q. Dong and J. Zhang, “Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Plasma ARC Region of AC Electric ARC Furnace,” in CFD Modeling and Simulation in Materials Processing 2016, John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 35-42.,
20. Eriksson, L., et al., *Multi- and megavariate data analysis : basic principles and applications* 2013: Malmö MKS Umetrics, ISBN 9789197373050.
21. Sandberg, E., Utveckling av soft-sensorer för nedsmältningsgrad och ståltemperatur i ljusbågsugnar. (under produktion). 2018

11 BILAGOR

11.1 Bilaga 1 Projektorganisation och medverkande

a) Lista på medverkande forskare och industrirepresentanter

Namn	Organisation
Erik Sandberg	Swerea Mefos
Dan Sandström	Swerea Mefos
Johan Björkvall	Swerea Mefos
Christoffer Schmidt	KTH
Nils Andersson	KTH
Anders Tilliander	KTH
Pär Ljungqvist	Outokumpu Stainless
Per Andersson	Outokumpu Stainless
Carl Linder	Sandvik Materials Technology
Fredrik Cederholm	Höganäs Sweden
Anders Gustafsson	Ovako Bar
Håkon Jørgensen	NOMAC
Joakim Andersson	ABB
Karin Stenholm	Uddeholms

b) Kort beskrivning av projektorganisationen

Projektet leds av Swerea Mefos. Forskningsutövare är Swerea Mefos och KTH. KTH ansvarar för utveckling och implementering av mätteknik för harmoniska störningar i ström, ljus och vibrationer. Swerea Mefos ansvarar för utveckling av fiberoptisk mätteknik samt utveckling av soft-sensorer och styrstrategier. Målverk för utvecklad mätteknik och soft-sensorer är Outokumpu Stainless i Avesta. Målverket och forskningsutövarna ansvarar gemensamt för installation av mätutrustning och soft-sensorer, mätkampanjer och försökskampanjer. Höganäs Sweden har rollen som ordförande i forskningskommittén vilken fungerar som styrgrupp för projektet. Övriga industriella projektdeltagare fungerar som ledamöter i styrgruppen samt leverantörer av processdata för utveckling av soft-sensorer.

11.2 Bilaga 2 Publikationer

- a) Granskade publiceringar (publicerat eller accepterat för publicering av tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning eller liknande)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
A1	Soft sensors for improved control of electric arc furnaces	Erik Sandberg Christoffer Schmidt Johan Björkvall	ESTAD 17 - European Steel Technology and Application Days, 26-69 June 2017, Vienna
A1			
A3			

- b) Manuskript skickade till granskad publicering (inskickat till tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
B1			
B2			

- c) Manuskript under bearbetning (avsett för publicering i tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare
C1		
C2		

- d) Avhandlingar (både publicerade och under utarbetande)

Nr	Titel	Författare	Datum
D1			
D2			

- e) Delrapporter och interna rapporter

Nr	Titel	Författare	Rapportnummer
E1			
E2			

- f) Övrig dokumentation

Nr	Titel	Författare	Beskrivning
F1			
F2			

11.3 Bilaga 3 Annan resultat- och kunskapsförmedling

- a) Tekniska och populärvetenskapliga publiceringar (utan vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
----	-------	------------	-----------

- b) Ogranskade internationella konferenspublikationer

Nr	Titel	Författare	Konferens
----	-------	------------	-----------

- c) Ogranskade svenska konferenspublikationer

Nr	Titel	Författare	Konferens
----	-------	------------	-----------

- d) Seminarier etc.

Nr	Titel	Författare	Datum, plats
----	-------	------------	--------------

11.4 Bilaga 4 Beskrivning av programmet

Järn- och stålindustrins energianvändning – forskning och utveckling, JoSEn

Programmet Järn- och stålindustrins energianvändning – forskning och utveckling, även kallat JoSEn, stödjer forskning som förväntas kunna bidra till ökad energieffektivisering, ökad användning av restenergier och minskade koldioxidutsläpp inom järn- och stålindustrin.

Forskningsprogrammet JoSEn är ett samverkansprogram mellan Jernkontoret och Energimyndigheten som löper under åren 2013–2017.

Programmets vision och mål

Den långsiktiga visionen för programmet är att svensk järn- och stålindustri år 2050 är konkurrenskraftig och kunskapsmässigt ledande på den internationella marknaden och levererar energi-, klimat- och miljöeffektiva produkter.

Mål för programperioden:

- att stödja projekt som syftar till att öka järn- och stålindustrins energieffektivitet
- att bevara de excellenta forskargrupper som finns vid svenska universitet, högskolor och forskningsinstitut idag
- att sprida programmets resultat till industrin.

Programmet ska stödja väl förankrade projekt som vid avslut leder till god resultatspridning och implementering på kort och lång sikt. För att nå maximal resurseffektivitet i hela järn- och stålindustrins processkedja inkluderas även gruvornas varma processteg i programmet.

11.5 Bilaga 5 Lista över processdata

Lista på efterfrågat konventionellt processdata för utveckling av soft-sensorer. Listan skickades till alla deltagande stålverk. Processdata fanns (med undantag av enstaka saknade variabler) tillgängligt vid Outokumpu Stainless, Sandvik Materials Technology och Ovako Bar.

Förklaring av datatyper

- Dynamiskt processdata – Data som mäts och loggas kontinuerligt, exempelvis var 5:e sekund.
- Charge data – Statiskt data som loggas för varje charging
- Analys data – Statiskt data som loggas för varje provtagning (temperatur, stålanalys eller slaganalys)
- Tappnings data – Statiskt data som loggas för varje tappning

Dynamiskt processdata	Enhet	Datatyp
Aktuellt chargenummer	-	Dynamiskt processdata
Aktuellt korgnummer	-	Dynamiskt processdata
Chargerad vikt i aktuell korg	kg	Dynamiskt processdata
Smältprogram / Ugns-tap	-	Dynamiskt processdata
Transformatorinställning / Transformator-tap	-	Dynamiskt processdata
Förbrukad elektrisk energi (aktiv)	kWh	Dynamiskt processdata
Förbrukad elektrisk energi (reaktiv)	kVArh	Dynamiskt processdata
Syrgasförbrukning via lansar	m ³ n	Dynamiskt processdata
Kolförbrukning via lansar	kg	Dynamiskt processdata
Energiförbrukning	kWh/ton	Dynamiskt processdata
Tidpunkt för charging	min	Dynamiskt processdata
Tidpunkt för tappning	min	Dynamiskt processdata
Power-on tid	min	Dynamiskt processdata
Power-off tid	min	Dynamiskt processdata
Charge-tid	min	Dynamiskt processdata
Aktiv effekt	kW	Dynamiskt processdata
Reaktiv effekt sekundär / primär / skenbar	kW	Dynamiskt processdata
Effektfaktor / cos phi	-	Dynamiskt processdata
Ström	kA	Dynamiskt processdata
Spänning	V	Dynamiskt processdata
Impedans	ohm	Dynamiskt processdata
Avvikelse från målvärde för elektrodposition	ohm	Dynamiskt processdata
Styrsignal till elektrodreglering	V	Dynamiskt processdata
Elektrodposition	m	Dynamiskt processdata
Slaggskumningsindex		Dynamiskt processdata
Flöde syrgaslansar	m ³ n/min	Dynamiskt processdata
Flöde kollansar	kg/min	Dynamiskt processdata
Bottentemperaturer	grader C	Dynamiskt processdata
Avgastemperaturer	grader C	Dynamiskt processdata

Kylvattenflöden	liter/min	Dynamiskt processdata
Kylvattentemperaturer	grader C	Dynamiskt processdata
(CU-paneler, väggar, tak, avgaskrök, avgaskanal, etc)		Dynamiskt processdata
Kylvattenflöden	liter/min	Dynamiskt processdata
(CU-paneler, väggar, tak, avgaskrök, avgaskanal, etc)		Dynamiskt processdata
Tappvikt	ton	Dynamiskt processdata
Senaste kolhalt	w%	Dynamiskt processdata
Senaste syreaktivitet		Dynamiskt processdata
Chargerade material i skrotkorgar	kg	Charge data
Skrot	kg	Charge data
HBI	kg	Charge data
Koks	kg	Charge data
Slaggbildare	kg	Charge data
Tidpunkt för charging	hh:mm:ss	Charge data
Stålanalyser	w%	Analys data
Slagganalyser	w%	Analys data
Ståltemperaturer	grader C	Analys data
Tidpunkt för stålprov	hh:mm:ss	Analys data
Tidpunkt för slagghprov	hh:mm:ss	Analys data
Tidpunkt för temperaturprov	hh:mm:ss	Analys data
Tappvikt	ton	Tappnings data
Tidpunkt för tappning	hh:mm:ss	Tappnings data

11.6 Bilaga 6 Soft-sensorn FAQ

I detta avsnitt beskrivs vad en soft-sensor är och hur de fungerar. **Text i fet stil avser specifik information om de soft-sensorer som ska utvecklas inom detta projekt.**

- Vad är en soft-sensor?
 - En soft-sensor är en matematisk algoritm som beräknar värdet på en parameter som inte mäts direkt genom att utnyttja uppmätta värden på andra parametrar.
- Varför använder man soft-sensorer?
 - Svårt att mäta direkt (**Nedsmältningsgrad i EAF**)
 - Direktmätningar är dyra
 - Direktmätningar inte tillförlitliga
 - Direktmätningar är farliga
 - Uppskattning innan eller mellan direktmätningar (**ståltemperatur i EAF**)
- Vad är det för skillnad på en soft-sensor och en dynamisk processmodell?
 - Dynamiska processmodeller bygger vanligtvis på fysikaliska samband och eventuellt empiriska faktorer
 - Soft-sensorer bygger på statistiska samband
- Hur kalibrerar man en soft-sensor?
 - Genom att anpassa en regressionsmodell för den parameter man vill uppskatta
 - Regressionsmodellen kan vara av vilken typ som helst
 - Linjär (MLR, PLS, OPLS, PCR, etc.)
 - Olinjär (Neurala nätverk, exponentiell, kvadratisk, logaritmisk, etc.)
 - **I detta fall används linjär OPLS (Orthogonal Partial Least Squares)**
 - **Modellen anpassas med hjälp av verktyget SimcaP 14.1 (MKS Instruments Umetrics suite)**
- Vilka signaler kan ingå i en soft-sensor?
 - Tillgängliga signaler från “real sensors” (direktmätningar)
 - **I detta fall normalt chargeringsdata (skrotvikter, etc.) processdata, eldata (harmoniseringar) och ljudmätningar**
 - Eventuella beräknade data från dynamiska processmodeller
 - **I detta fall beräknade kyleffekter, värmeförluster, energiinsatser och beräknad ståltemperatur från temperaturmodellen i Avesta**
 - Eventuella signaler från övriga “soft-sensors”
 - **Inga i detta projekt**
- Måste soft-sensorer kalibreras regelbundet?
 - Ja, för att säkerställa att de statistiska sambanden fortfarande gäller
 - Kalibrering och/eller drift av övriga sensorer kan påverka sambanden
 - **Ingen ytterligare kalibrering av soft-sensorerna under försökskampanjen inom detta projekt bedöms nödvändig.**
 - **Vid långvarig användning av soft-sensorerna behövs dock kalibrering, uppskattningsvis månadsvis.**
- Är soft-sensorer dynamiska?

- Ja, på det sättet att de kan ta hänsyn till dynamisk processhistorik och inte enbart det nuvarande värdet på de ingående parametrarna.
- **Soft-sensorerna i detta projekt kommer att baseras på processhistoriken för de 15 senaste power-on minuterna, d.v.s. ca 180 tidssteg om vardera ca 5 sekunder.**
- Är soft-sensorer prediktiva?
 - Nej, eftersom de enbart räknar ut det nuvarande värdet på den sökta parametern
 - Man kan dock använda dem till att göra prognoser om framtiden genom att anta framtida värden på processens styrparametrar (“what if”).
 - **De styrparametrar man kan anta framtida värden på för att göra prognoser för ljusbågsugnar är LK-lägen, brännarlägen, flöden av syrgas, kolpulver, e.t.c.**
- Hur använder man soft-sensorer för processtyrning?
 - Signalen kan användas direkt för att avgöra om processen är “färdig” eller går in i ett nytt läge.
 - **Soft-sensorn för nedsmältningsgrad kan användas för att avgöra om**
 - **nedsmältningsgraden är tillräcklig för chargering av ytterligare skrotkorgar**
 - **nedsmältningsgraden motiverar byte av LK-läge eller brännarprogram,**
 - **T.ex. nedtrappning för att skydda paneler och infordring under raffinering**
 - **Eller upptrappning vid ras av skrot**
 - **Soft-sensorn för ståltemperatur kan användas för att avgöra om**
 - **Ståltemperaturen med tillräckligt hög säkerhet är tillräcklig för tappning.**
 - Kan användas för att optimera återstående del av processen för att uppnå de slutförhållanden man vill ha till minsta möjliga kostnad.
 - **I detta fall beräkna optimala tidpunkter för byte av arbetspunkt i smältprogrammet för att uppnå lägsta möjliga smälttid**

11.7 Bilaga 7 Fullständig variabellista till soft-sensorer i Avesta

Variabler som är klassade som "kvalitativa" antar ett antal diskreta nivåer istället för flytvärden, t.ex. lindningskopplarläge för transformatorn och brännare på/av. Soft-sensorn anser varje diskret nivå som en enskild variabel med värde antingen 0 eller 1. För LK-läget, som antar en diskret nivå mellan 10 och 21 (vid de senaste 10 minuterna power-on före charging av andra skrotkorgen), skapas alltså 12 binära variabler varav den som motsvarar det aktuella LK-läget har värdet 1 och de övriga värdet 0. I fallet LK-läge skapas även två extra variabler som representerar LK-lägen under 10 respektive över 21 för att hantera situationer då LK-läget antar nivåer som ej ingår i kalibreringen av soft-sensorn.

Kolumnnyckel

No	Parameterns position (kolumn) i "power-on"-tabellen i level-2 systemet
Parameter	Parameterns namn
Källa	Databas i Avesta
Tidssteg	Hur många tidssteg (till och med aktuell tidpunkt) som ingår
Enhet	Enhet som parametern mäts i
Typ	Kvantitativ (flyttal) eller kvalitativ (diskret)
Antal	Antal variabler av aktuell typ
Nivåer	Antal diskreta nivåer för kvalitativa parametrar
Kopplad	Anger om parametern är kopplad till power-on tabellen
Ingår i Nedsm.grad	Anger om parametern ingår i soft-sensorn för nedsmältningsgrad (första korgen)
Ingår i Temp	Anger om parametern ingår i soft-sensorn för ståltemperatur

No	Parameter	Källa	Tidssteg	Enhet	Typ	Antal	Nivåer	Kopplad	Ingår i Nedsm.grad	Ingår i Temp
1	ElEnergi	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
2	kWh/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
3	Temperatur kylvatten paneler ugn in	Dynamisk process	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
4	Temperatur kylvatten paneler ugn ut	Dynamisk process	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
5	Temp kylvatten till valv	Dynamisk process	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
6	Temp kylvatten från valv	Dynamisk process	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja

7	Vattenflöde Valv m3/h (taket på ugnen)	Dynamisk process	120	m3/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
8	Vattenflöde Fat m3/h (kylpaneler på ugnen)	Dynamisk process	120	m3/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
9	Vattenflöde Struktur m3/h (det som bär upp ugnen)	Dynamisk process	120	m3/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
10	Flodedirekt utsug	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
11	FC2023	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
12	Temperatur direktutsug	Dynamisk process	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
13	flöde brännare	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
14	flöde syrgas brännare i Nm3/h	Dynamisk process	120	m3n/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
15	Accumulerad massa FeSi injektion kg	Dynamisk process	120	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
16	Accumulerad massa kol injektion kg	Dynamisk process	120	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Ja
17	Accumulerad volym injektion syrgas Nm3	Dynamisk process	120	Nm3	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
18	Accumulerad Volym injektion kvävgas Nm3	Dynamisk process	120	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Ja
19	Accumulerad massa kalk/dolomit kg	Dynamisk process	120	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Ja
20	elenergi (Effekt i MW)	El-data	120	MW	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
34	Lindningskopplarläge (TAPPOSITION)	Dynamisk process	120		Kvalitativ	1	14	Ja	Ja	Ja
35	Flöde syrgaslans Nm3/h	Dynamisk process	120	m3n/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Ja
36	Flöde kvävelans Nm3/h	Dynamisk process	120	m3n/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Ja
37	Spjäll direktutsug (Ugnen, reglerbart)	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
38	UV2028	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej

39	UV2030	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
40	UV2029	Dynamisk process	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
42	Brännare 1 påslagen? 1=Ja	Dynamisk process	120	0/1	Kvalitativ	1	2	Ja	Nej	Nej
44	Brännare 2 påslagen? 1=Ja	Dynamisk process	120	0/1	Kvalitativ	1	2	Ja	Nej	Nej
46	Brännare 3 påslagen? 1=Ja	Dynamisk process	120	0/1	Kvalitativ	1	2	Ja	Nej	Nej
47	Nox i Nm3/h ut ur stora gasreningen	Dynamisk process	120	m3n/h	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
58	EER_I_STEP	Dynamisk process	120		Kvalitativ	1	11	Ja	Nej	Nej
59	P_on	Beräknad	120	minuter	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
60	P_Off_Heat	Beräknad	120	minuter	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
61	P_Off_Tot	Beräknad	120	minuter	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
62	BurnerEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
63	O2Energy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
64	CoolongWaterWallEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
65	CoolongWaterRoofEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
66	CoolingWaterEnergy	Energidata	120	kWh	Beräknad	1	1	Ja	Ja	Ja
67	BucketEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
68	OffGasEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
69	PreheaterEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
70	RoofEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
71	ElectricalLossEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
72	LimeEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
73	BarrelEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
74	N2Energy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej

75	EffectiveEnergy	Energidata	120	kWh	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
76	CalculatedTemp	Energidata	120	Grader C	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
77-96	50 Hz Sound - 1000 Hz, 50 Hz intervall	Mikrofon	120		Kvantitativ	20	1	Ja	Nej	Nej
97	Icke Harmonisk Amplitud Sound	Mikrofon	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
98	% icke harmoniskt över tröskelvärde Sound	Mikrofon	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
99	total Amplitud Sound	Mikrofon	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
98-102	V1, V2, V3	El-data	120	V	Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
103-105	I1, I2, I3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
106-108	P1, P2, P3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Nej	Nej
109-111	Q1, Q2, Q3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Nej	Nej	Nej
112-114	S1, S2, S3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Nej	Nej	Nej
115-117	PF1, PF2, PF3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
118-120	Imp1, Imp2, Imp3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Nej	Nej	Nej
121-123	V_pr1, V_pr2, V_pr3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Nej	Nej
124-126	I_pr1, I_pr2, I_pr3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Nej	Nej
127-129	Press1, Press2, Press3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
130-135	Prot1, Prot2, Prot3	El-data	120		Kvalitativ	3	2	Nej	Nej	Nej
136-144	Man_E1, Man_E2, Man_E3	El-data	120		Kvalitativ	3	3	Nej	Nej	Nej
145-147	HRR1, HRR2, HRR3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
148-161	Harmonisk amplitud, 2-15 övertoner, m-värde för 3 elektroder	Harm	120		Kvantitativ	14	1	Ja	Ja	Ja
162	M_THD	Harm	120		Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
163	Stability	Harm	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
164	Ripple	Harm	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
165	Average	Harm	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej

166	Variance	Harm	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
167-169	Arc1, Arc2, Arc3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Ja	Ja	Ja
170-172	Set_I1, Set_I2, Set_IO3	El-data	120		Kvantitativ	3	1	Nej	Nej	Nej
173-186	Harmonisk amplitud, 2-15 övertoner, 10s medelvärde	Harm	120		Kvantitativ	14	1	Nej	Nej	Nej
187-193	B30THD_1exceed3 - B30THD_1exceed9	Harm	120		Kvantitativ	7	1	Nej	Nej	Nej
194-200	B30THD_2exceed3 - B30THD_2exceed9	Harm	120		Kvantitativ	7	1	Nej	Nej	Nej
201-207	B30THD_3exceed3 - B30THD_3exceed9	Harm	120		Kvantitativ	7	1	Nej	Nej	Nej
208-214	B30M_THDexceed3 - B30M_THDexceed9	Harm	120		Kvantitativ	7	1	Nej	Nej	Nej
215-221	B30THD_AVGexceed3 - B30THD_AVGexceed9	Harm	120		Kvantitativ	7	1	Nej	Nej	Nej
222-227	M_DomHarmonic	Harm	120		Kvalitativ	1	6	Ja	Ja	Ja
228-233	Avg10sM_DomHarmonic	Harm	120		Kvalitativ	1	6	Nej	Nej	Nej
234	Vikt korg 1	Shiftrapport	1	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
235	Vikt korg 2	Shiftrapport	1	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
236	Vikt korg 3	Shiftrapport	1	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
237	P_Off_Prep	Beräknad	1	minuter	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
238	Volym korg 1	Shiftrapport	1	m3	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
239	Volym korg 2	Shiftrapport	1	m3	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
240	Volym korg 3	Shiftrapport	1	m3	Kvantitativ	1	1	Ja	Ja	Ja
241	Aktuell chargerad vikt	Beräknad	120	kg	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
242	Accumulerad massa FeSi injektion kg/ton	Beräknad	120	kg/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
243	Accumulerad massa kol injektion kg/ton	Beräknad	120	kg/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
244	Accumulerad volym injektion syrgas Nm3/ton	Beräknad	120	Nm3/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
245	Accumulerad Volym injektion kvävgas Nm3/ton	Beräknad	120	Nm3/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
246	Accumulerad massa kalk/dolomit kg/ton	Beräknad	120	kg/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej

247	BurnerEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
248	O2Energy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
249	CoolongWaterWallEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
250	CoolongWaterRoofEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
251	CoolingWaterEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
252	BucketEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
253	OffGasEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
254	PreheaterEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
255	RoofEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
256	ElectricalLossEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
257	LimeEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
258	BarrelEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
259	N2Energy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
260	EffectiveEnergy/ton	Beräknad	120	kWh/ton	Kvantitativ	1	1	Ja	Nej	Nej
261-267	Chargerade vikter av MaterialTyper korg 1	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	7	Nej	Nej	Nej
268-274	Chargerade vikter av MaterialTyper korg 2	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	7	Nej	Nej	Nej
275-281	Chargerade vikter av MaterialTyper korg 3	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	7	Nej	Nej	Nej
282-288	Injicerade materialtyper	Beräknad	120	kg	Kvantitativ	1	7	Nej	Nej	Nej
289-295	Aktuella vikter av MaterialTyper	Beräknad	120	kg	Kvantitativ	1	7	Nej	Nej	Nej
296-340	Chargerade elementvikter/oxidvikter korg 1	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	45	Nej	Nej	Nej
341-385	Chargerade elementvikter/oxidvikter korg 2	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	45	Nej	Nej	Nej
386-430	Chargerade elementvikter/oxidvikter korg 3	Lastlista	1	kg	Kvantitativ	1	45	Nej	Nej	Nej
431-475	Injicerade elementvikter	Beräknad	120	kg	Kvantitativ	1	45	Nej	Nej	Nej
476-520	Aktuella insatta element/oxid vikter	Beräknad	120	kg	Kvantitativ	1	45	Nej	Nej	Nej

521-540	50 Hz Vibr 1 - 1000 Hz Vibr 1	Accelerometer 1	120		Kvantitativ	20	1	Nej	Nej	Nej
541	Icke Harmonisk Amplitud Vibr 1	Accelerometer 1	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
542	% icke harmoniskt över tröskelvärde Vibr 1	Accelerometer 1	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
543	total Amplitud Vibr 1	Accelerometer 1	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
544-563	50 Hz Vibr 2 - 1000 Hz Vibr 2	Accelerometer 2	120		Kvantitativ	20	1	Nej	Nej	Nej
564	Icke Harmonisk Amplitud Vibr 2	Accelerometer 2	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
565	% icke harmoniskt över tröskelvärde Vibr 2	Accelerometer 2	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
566	total Amplitud Vibr 2	Accelerometer 2	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
567-586	50 Hz Vibr 3 - 1000 Hz Vibr 3	Accelerometer 3	120		Kvantitativ	20	1	Nej	Nej	Nej
587	Icke Harmonisk Amplitud Vibr 3	Accelerometer 3	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
588	% icke harmoniskt över tröskelvärde Vibr 3	Accelerometer 3	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
589	total Amplitud Vibr 3	Accelerometer 3	120		Kvantitativ	1	1	Nej	Nej	Nej
590-740	500 nm - 800 nm, 2 nm intervall	Spekrometer	120		Kvantitativ	151	1	Nej	Nej	Nej
741-840	Reserv					100	1	Nej	Nej	Nej

11.8 Bilaga 8 Försöksplan

Fyll i försöksplan individuellt för varje charge. Kan antingen göras på utskrivna blanka protokoll eller genom att fylla i ett protokoll i MS Word (spara i så fall separata filer för varje charge). Minsta antalet charger som ska följas är 50 st.

Första korg och mellan korg

Stanna och öppna ugnen för charging då aktuellt värde på nedsmältningsindex går under det relevanta gränsvärdet i tabell 5.

Om det vid öppning av ugnen bedöms av operatören att risken för övercharging är

- Liten, så genomför chargingen
- Stor, så smält på en stund till tills operatören bedömer risken för övercharging som liten

Sista korg

Anta ”allt smält” då uppskattad nedsmältningsgrad är 1. Vid detta tillfälle kan man

- överväga att starta raffineringsfasen
- börja titta på predikterad temperatur
- överväga att stanna för temperaturprovtagning (och tappning) då predikterad temperatur överensstämmer med måltemperaturen.

Ta alltid ett sista temperaturprov innan tappning.

Uppföljning av data

Data som behöver sparas och följas upp i efterhand (förutom protokollen för försökschargerna):

- Data-tabell till soft-sensor
 - Beräknade värden på
 - Index 1 (”värde 1”) för första korg (finns i nuvarande tabell)
 - Index 2 (”värde 2”) för första korg (finns i nuvarande tabell)
 - Index 1 (”värde 1”) för mellan/sista korg (behöver läggas till i tabellen)
 - Index 2 (”värde 2”) för mellan/sista korg (behöver läggas till i tabellen)
 - Temperatur (finns i nuvarande tabell)
 - Indata (finns i nuvarande tabell)
- Stillbilder från videokamera för chargingar

Mätdata från vibrationssensorer (om det inte ingår i data-tabellen ovan)

11.9 Bilaga 9 Exempel på försöksprotokoll

	Korg 1	Korg 2	Korg 3
Typ av korg (första/mellan/sista)			
Fyllnadsgrad på korg			
Vikt i korg			
Charge Nr			
Öppnades ugnen för charging			
före/när/efter soft-sensorn			
föreslog charging?			
- Om före, varför?			
- Om efter, varför?			
Operatörens bedömning av skrotnivån (utan att öppna ugnen) då soft-sensorn föreslår charging			
Operatörens bedömning av skrotnivån då ugnen öppnades för charging			
- För låg, borde chargerat tidigare			
- Lagom för charging			
- Risk för övercharging			
- Hög risk för övercharging, kan inte charge			
Operatörens bedömning av skrotnivån efter charging			
- Gott om plats kvar			
- Fullt men ingen råge			
- Liten råge som inte kräver åtgärd			
- Råge som kräver åtgärd (specificera åtgärd)			
- Råge som leder till registrerat stillestånd (specificera åtgärd)			
Operatörens kommentarer till soft-sensorns prediktion av skrotnivån			
- För låg			
- OK			
- För hög			
Operatörens bedömning av skrotnivån då soft-sensorn föreslår start av raffinering			
- För låg			
- OK			
- För hög			

Operatörens bedömning av
temperaturen då soft-sensorn
föreslår start av raffinering

Operatörens måltemperatur

Operatörens bedömning av
temperaturen då soft-sensors
beräknade temperatur

överensstämmer med
måltemperaturen

Operatörens bedömning av
temperaturen inför provtagning

- Temperaturprov 1
- Temperaturprov 2
- Temperaturprov 3
- Temperaturprov 4

Uppmätt temperatur vid
provtagning (temperaturprov tas
alltid innan tappning under
försöksperioden)

- Temperaturprov 1
- Temperaturprov 2
- Temperaturprov 3
- Temperaturprov 4

Operatörens kommentarer till
soft-sensors prediktion av
temperatur

- För låg
- OK
- För hög

11.10 Bilaga 10 – Program för industriseminarium i Halmstad

Tid och plats: Grand Hotel, Halmstad, 20 september 2016

Titel på seminariet: ”Mättekniker för processtyrning av ljusbågsugnar”

Program:

08.30 - Inledning Johan Björkvall, Swerea MEFOS

08.40 - Förbättrad processtyrning i ljusbågsugn Erik Sandberg, Swerea MEFOS

09.00 - Mätning av ljud och vibrationer i ljusbågsugn Christoffer Schmidt, KTH

09.20 - Analys av harmoniska störningar i ström Christoffer Schmidt, KTH

09.50 - Kaffe

10.10 - Fiberoptiska mätningar i ljusbågsugn Dan Sandström, Swerea MEFOS

10.50 - ArcSpec Representant för Luxmet

11.20 - Utnyttjande av mätteknik för processtyrning Erik Sandberg, Swerea MEFOS

11.40 - Diskussion och avslutning Johan Björkvall, Swerea MEFOS

11.11 **Bilaga 11 – Program för industriseminarium på Jernkontoret**

Tid och plats: Jernkontoret, Stockholm, 6 mars 2017

Titel på seminariet: ”Mättekniker för processtyrning av ljusbågsugnar”

Program:

10.00 - Inledning / Projektsammanfattning – Johan Björkvall (Swerea MEFOS)

10.20 - Förbättrad processtyrning i ljusbågsugn Erik Sandberg, Swerea MEFOS

10.40 - Utveckling av soft-sensorer och styrstrategier– Erik Sandberg (Swerea MEFOS)

11.00 - Kaffe

11.15 - See and understand things that others don't – Johan Hultman (MKS Instruments)

11.40 - Vidareutveckling av soft-sensorer och förbättrad processtyrning – Erik Sandberg (Swerea MEFOS)

11.12 Bilaga 12 – Metodbeskrivning för utveckling av soft-sensorer

1. Uppskatta nedsmältningsgrad för ca 150 smältor enligt metoden som beskrivs i sektion 4.5.1 och bygger på fotografier/stillbilder liknande de i figur 4. Uppskatta även fyllnadsgraden på de korgar som chargerats vid dessa smältor samt notera eventuella överchageringar.
2. Mät ståltemperaturen vid tappning för ca 150 smältor, förslagsvis samma smältor som ovan.
3. Anpassa regressionsmodeller för beräkning av nedsmältningsgrad och temperatur. Vilka variabler som ska ingå beror på tillgängligheten vid det aktuella stålverket. Hur många tidssteg som ska ingå beror på hur lång power-on tid man vanligtvis har för första korgen (och eventuellt mellanliggande korgar). Som riktlinje kan man anta en tidsperiod som är lika med den kortaste förstakorgen med uppskattad nedsmältningsgrad (enligt punkt 1 ovan).
4. Anpassa gränsvärden för nedsmältningsindex för klassificering av nedsmältningsgrader. Den metod som beskrivs i sektion 4.5.1 och resulterat i tabell 5 kan användas för detta.
5. Anpassa gränsvärden för nedsmältningsindex för styrning av tidpunkt för chagering av skrotkorgar. Den metod som beskrivs i sektion 4.6 och resulterat i tabell 6 kan användas för detta.
6. Anpassa gränsvärden för nedsmältningsindex för start av raffineringsfas. Den metod som beskrivs i sektion 4.6 kan användas för detta.
7. Skapa en dynamisk tabell i level-2 systemet med ”power-on” data för de ingående variablerna. Som riktlinje kan man utgå från bilaga 5 och bilaga 7 och koppla de processparametrar som finns tillgängliga.
8. Skapa tabeller med regressionskoefficienter för respektive soft-sensor i level-2 systemet. Tabellerna bör vara av samma dimension som den dynamiska ”power-on” tabellen enligt punkt 7 ovan, d.v.s. samma antal rader och kolumner samt samma positioner för motsvarande parametrar och tidssteg. Detta för att underlätta programmeringen av beräkningen av soft-sensorernas signaler enligt punkt 6 nedan.
9. Programmera beräkningen av soft-sensorernas signaler (nedsmältningsindex och ståltemperatur) i level-2 systemet. Signalerna kan beräknas enligt ekvation 2.
10. Programmera ett grafiskt användargränssnitt i level-2 systemet som visar aktuell uppskattning av nedsmältningsgrad och ståltemperatur.
11. Programmera funktioner för jämförelse av beräknade nedsmältningsindex och ståltemperatur med aktuella målvärden/gränsvärden enligt punkt 5 och punkt 6 samt rekommendation av åtgärd när målvärde/gränsvärde uppnåts.

Möjligheten att anlita konsulter för hela eller delar av proceduren ovan är naturligtvis möjligt. Steg 1-6 kan utföras av forskningsutövare (exempelvis de som deltagit i projektet) medan steg 7-11 kan utföras av programmeringskonsulter eller teknisk kundsupport från mjukvaruleverantörer för multivariat dataanalys (exempelvis MKS Data Analytics eller ProSensus).

11.13 Bilaga 13 – Lista över förkortningar

Förkortning	Beskrivning
EAF	Electric Arc Furnace (Ljusbågsugn)
THD	Total Harmonic Distortion (Total harmonisk störning)
FAQ	Frequently Asked Questions (Vanliga frågor)
JoSEn	Järn- och Stålindustrins Energianvändning
KTH	Kungliga Tekniska Högskolan
EMS	ElectroMagnetic Stirring (Elektromagnetisk omrörning)
OPLS-Batch	Orthogonal Partial Least Squares for Batch processes
HRR	High Response Regulation valve (Mekanisk elektrodrekling)
RMS	Root Mean Square (kvadratisk medelvärde)
YPred	Predikterat (beräknat) värde på en beroende regressionsvariabel (Y)
Yvar	Observerat (uppmätt) värde på en beroende regressionsvariabel (Y)
RMSEE	Root Mean Square Error of Estimation (Kvadratisk medelberäkningsfel, för data som använts för anpassning av regressionsmodellen som används för beräkning)
RMSEcv	Root Mean Square Error of cross validation (Kvadratisk medelberäkningsfel för korsvaliderad regressionsmodell)
RMSEP	Root Mean Square Error of Prediction (Kvadratisk medelprediktionsfel, för data som inte använts för anpassning av regressionsmodellen som används för prediktion)
VIP	Variable Importance on Projection (Variabelns betydelse vid projektion på modellplan)

Den svenska stålindustrins branschorganisation

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt transportfrågor. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

Besöksadress

Kungsträdgårdsgatan 10

Telefon

+46 (0)8 679 17 00

E-post

office@jernkontoret.se

Organisationsnr

802001-6237

Postadress

Box 1721, 111 87 Stockholm

Webbplats

www.jernkontoret.se