

Modellering og regulering af affaldsforbrænding

Søren Nymann Thomsen

Kongens Lyngby 2007
IMM-M.Sc-2007-3

Technical University of Denmark
Informatics and Mathematical Modelling
Building 321, DK-2800 Kongens Lyngby, Denmark
Phone +45 45253351, Fax +45 45882673
reception@imm.dtu.dk
www.imm.dtu.dk

IMM-M.Sc: ISSN XXXX-XXXX

Resumé

I dette speciale undersøges det om et estimat af flammefronten kan bruges til at regulere forbrændingen på et affaldsforbrændingsanlæg. Samtidig udføres systemidentifikation for at kunne opstille en model af forbrændingen. Denne model reguleres efterfølgende med modelbaserede stokastiske regulatorer.

Der er af Dong Energy og Force Technology blevet gennemført en række trinresponsforsøg over to uger på Haderslev Kraftvarmeværk. Under disse forsøg blev flammefrontens position estimeret ud fra overvågningskameraet i ovnen, et framegrapperkort og en til formålet udviklet algoritme. Algoritmen bestemte flammefrontens placering på basis af en tærskelværdi og en kantdetektion. Efterfølgende blev estimatet af flammefrontens placering filtreret og sammenholdt med dampproduktionen. Systemidentifikationen blev udført på basis af data fra trinresponsforsøgene. Den herved fundne model blev reguleret med følgende regulatorer: PID , MV_0 , PZ og LQG . Regulatorerne blev undersøgt for deres evne til at få dampproduktionen til at følge en referenceændring.

Estimatet af flammefronten var krydskorreleret med dampproduktionen, i nogle af trinresponsforsøgene. Systemidentifikationen viste at dampproduktionen reagerede langsomt på ændringer i indfødningshastigheden, og med stor tidsforsinkelse. Der var en sammenhæng mellem øget indfødningshastighed og øget dampproduktion. Ændring i lufttilførslen til forbrændingen gav ikke vedvarende ændring i dampproduktionen. Af regulatorerne virkede PID , PZ og LQG . Heraf var de modelbaserede stokastiske regulatorer, PZ og LQG , hurtigere til at få processen til at stige og til at konvergere, i modsætning til den traditionelle PID -regulator.

Krydskorrelationen mellem flammefronten og dampproduktionen var ikke tidsforskudt, og ville derfor ikke kunne bruges som feedforward signal. Derimod viste det sig at krydskorrelationen mellem iltprocenten og dampproduktionen var tidsforskudt og dette gjaldt ved alle forsøgene. Det kan desuden konkluderes, at det er relevant at benytte LQG - og PZ -regulatorerne til at regulere dampproduktionen på et affaldsforbrændingsanlæg.

Abstract

This thesis deals with the regulation of a Danish waste incineration plant. It is tested if the flame front can be used as a manner of controlling the combustion. Systemidentification is performed as well, to be able to formulate a model of the combustion. This model is thereafter controlled with modelbased stochastic controllers.

The two Danish companies Dong Energy and Force Technology have been performing stepresponses on the Waste Incineration Plant, Haderslev Kraftvarmeværk in Denmark. Concurrently the position of the flame front was estimated, using a camera in the oven, a framegrabber card and an algorithm designed for this purpose. The algorithm calculated the position of the flame front on the basis of a treshold and an edgedetection. The estimate of the position of the flame front was then filtered and compared to the steam production. The systemidentification was performed on the basis of data from the stepresponses. The model found hereby was controled with the following controllers: PID , MV_0 , PZ and LQG . The controllers were tested according to their ability to follow a change in references.

The estimate of the flame front was crosscorrelated to the steamproduction in some of the stepresponses. The systemidentification did show a slow rise in the steamproduction responding to a rise in the speed of wastefeeding, with great delay. A change in the combustion air did not cause a continuous rise in the production of steam. The modelbased stochastic controllers PZ and LQG did make the proces rise and converge faster, compared to the traditional PID regulator.

The crosscorrelation between the flame front and the production of steam was not time-delayed. It can as well be concluded, that it is relevant to use a LQG - and PZ -controller to control the steam production on a waste incineration plant.

Notation

Alle vektorer er søjlevektorer. Vektorer og matricer fremhæves med fed skrift. Vektorer skrives med små bogstaver og matricer med store bogstaver.

Symboler

A	:	Overføringspolynomium ($A(q^{-1})$)
B	:	Overføringspolynomium ($B(q^{-1})$)
c	:	Hastighed
C	:	Overføringspolynomium ($C(q^{-1})$)
D	:	Overføringspolynomium ($D(q^{-1})$)
F	:	Overføringspolynomium ($F(q^{-1})$)
h	:	Impulsresponsfunktionen
k	:	Tidsforsinkelse
n	:	Farvet støj/proces støj
K_p	:	Forstærkning i <i>PID</i> -regulatoren
q^{-1}	:	Bagudrettet forskydningsoperator ($x_t q^{-1} = x_{t-1}$)
T_s	:	Samplingstid
w	:	Reference
x	:	Input
y	:	Output
\hat{y}	:	Estimat af outputtet
ε	:	Hvid støj
Δp	:	Trykdifference
∇	:	Differensdannelse ($\nabla x_t = (1 - q^{-1})x_t = x_t - x_{t-1}$)
ϕ	:	Regressionsvektor
γ_t	:	Autokovariansfunktion til tiden t

- ρ : Massefylde
- $\rho(t)$: Autokorrelationsfunktion til tiden t
- τ_d : Diffeentialtid i *PID*-regulatoren
- τ_i : Integraltid i *PID*-regulatoren
- $\boldsymbol{\theta}$: Parametervektor
- $\hat{\boldsymbol{\theta}}$: Vektor med parameterestimer
- ζ : Modstandskoefficient

Forord

Dette speciale er udført som afslutningen på overbygningsuddannelsen, som civilingeniør.

Specialet er gennemført på Institut for Informatik og Matematisk Modellering (IMM) ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU) og i samarbejde med Centerkontrakt for modelbaseret regulering (CMBC). To af samarbejdspartnerne fra CMBC, DONG Energy og Force Technology, har været venlige at stille data til rådighed for dette speciale. Data er genereret gennem en række driftsforsøg over en to ugers periode på Haderslev Kraftvarmeværk (HAV). Driftsforsøgene blev lavet i forbindelse med to PSO-projekter^{1 2}.

Jeg vil gerne takke HAV, for at jeg måtte være tilstede på anlægget under forsøgene. Dette gav mig et praktisk indblik i driften af et affaldsforbrændingsanlæg. Der skal især rettes en personlig tak til Bjarne L. Andersen fra HAV, som altid beredvilligt har besvaret spørgsmål.

Endvidere vil jeg gerne rette en tak til Jesper Cramer og Lars Henrik Hansen, Force Technology, og i særdeleshed Kristian B. Poulsen, DONG Energy, og Bjarke Rasmussen, Danfoss, for faglig sparring og ikke mindst input gennem hele forløbet. Endelig stor tak til min faglige vejleder professor Henrik Madsen, IMM/DTU, for sin entusiasme, positive humør og ikke mindst den høje faglighed.

Lyngby, 10. januar 2007

Søren Nymann Thomsen, s020458

¹PSO 5727 - Avanceret måleudstyr til forbedret drift af affaldsfyrede anlæg (Fase2)

²PSO 5755 - Affaldsforbrændingsmodeller til driftsoptimering (Fase 2)

Indhold

1	Indledning	1
1.1	Udbredelsen af affaldsforbrænding i Danmark	2
1.2	Opbygningen af affaldsforbrændingsanlæg og procesbeskrivelse	5
1.3	Formål	8
2	Teori	9
2.1	Forbrændingsprocessen	9
2.2	Identifikation af flammefronten	13
2.3	Modellering af affaldsforbrænding	14
2.4	Regulering	19
3	Dataopsamling og databeskrivelse	27
3.1	Målepunkter	28
3.2	Udvælgelse af datasæt	29
4	Identifikation af flammefronten	37
4.1	Forstyrrelser i flammen og af flammefronten	40
4.2	Valg af tærskelværdi	40
4.3	Design af kantdetekteringsalgoritme	43
4.4	Filtrering af flammefrontsestimat	46
5	Dataanalyse / modellering	49
5.1	Sammenhæng mellem dampproduktionen og flammefronten	51
5.2	Model for pusherhastigheden i forhold til dampproduktionen	54
5.3	Model for primærluften under rist 2 i forhold til dampproduktionen	59

6	Regulering	65
6.1	<i>PID</i> -regulatoren	65
6.2	<i>MV</i> ₀ -regulatoren	68
6.3	<i>PZ</i> -regulatoren	69
6.4	<i>LQG</i> -regulatoren	71
6.5	Sammenligning	73
7	Diskussion	75
7.1	Forsøgsplanlægning	75
7.2	Forbrændingsprocessen	75
7.3	Identifikation af flammefronten	76
7.4	Dataanalyse / modellering	77
7.5	Regulering	78
8	Konklusion	81
9	Perspektivering	83
A	Teori	85
A.1	Eksempler på brændværdier	85
B	Billedanalyse	87
B.1	Billedopsamlingsprogram	87
B.2	Billeder af to forskellige driftssituationer	92
B.3	Forsøg med forskellige tærskelværdier	96
C	Databeskrivelse	99
C.1	Flammefront og dampdata	99
D	Dataanalyse	107
D.1	Ilt og dampproduktion	107
D.2	Modstandskoefficienten (ζ) over risten	109
D.3	Simulering	109
E	Regulering	111
E.1	Regulering af dampproduktionen med pusherhastigheden	111

Indledning

I Danmark producerede vi i 2004 13.359.000 tons affald. Heraf blev 26% omdannet til energi ved forbrænding og 1% blev oplagret midlertidigt inden forbrænding. Af de sidste 73% af affaldet, blev de 65% genanvendt og 8% deponeret (Miljøministeriet, 2005). I henhold til regeringens plan (Regeringen, 2003) er målet at 26% af den totale affaldsmængde skal omdannes til energi ved forbrænding. Dette mål er allerede nået, det er blot fordelingen af affaldsfraktionerne der skal ændres lidt. Det forventes at mængden af affald generelt stiger i Danmark og dermed også mængden til affaldsforbrænding. Der er to måder at imødegå den øgede mængde affald, den ene er at bygge nye anlæg, den anden er ved at optimere de eksisterende anlæg.

Affaldsforbrænding er reguleret af en række love, bekendtgørelser og vejledninger, hvoraf enkelte sætter direkte begrænsninger for udledningen af forskellige stoffer samt betingelser for driften af anlæg. Der er både grænseværdier for røggassens indhold og for slaggen, det udbrændte produkts indhold. Det er bestemt i Miljøministeriet (2003) at slaggen højst må indholde 3% TOC, Totalt Organisk Kulstof. Det vil sige, at 97% af det affald der kan brænde, skal brændes. Dette skal ske under driftsforhold, hvor røggassens temperatur på kontrolleret og ensartet vis, er over 850°C i minimum 2 sekunder efter sidste lufttilførelse.

Forbrændingsanlæggene skal have en så høj udbrændingsgrad, at grænseværdien for TOC overholder lovgivningen, samtidig med at de skal have så meget affald brændt som muligt. Affaldsforbrændingsanlæggene får penge pr. ton affald de modtager, samt for den strøm og fjernvarme de producerer.

1.1 Udbredelsen af affaldsforbrænding i Danmark

I Danmark har vi brændt affald i over 100 år. Incitamentet for at bygge affaldsforbrændingsanlæg har været forskellige gennem årene. I begyndelsen af affaldsforbrændingshistorien var det primært et ønske om at minimere affaldsvolumen, der igangsatte bygningen af anlæg. Senere blev argumentet for at bygge anlæg behovet for brændsel til fjernvarmeproduktion i decentrale fjernvarmeværker. I dag bliver affald brændt på større og større anlæg som producerer både strøm og fjernvarme.

Det første affaldsforbrændingsanlæg blev bygget i starten af 1900-tallet af Frederiksberg Kommune. Årsagen var at kommunen, som en af landets mindste og samtidig tættest befolkede kommuner, var ved at løbe tør for grunde til lossepladser. Derfor var kommunen nødt til at finde en alternativ metode til at komme af med affaldet på. Løsningen var at brænde dagrenovationen og samtidig anvende det som brændsel til energiproduktion (Kleis og Dalager, 2003).

Det første affaldsforbrændingsanlæg stod færdigt i 1903. Anlægget forsynede bygningerne på Frederiksberg Hospital og Alderdomshjem med damp, varmt vand og elektricitet (Kleis og Dalager, 2003). Ved at anvende affaldet som brændsel komprimerede Frederiksberg Kommune affaldet, hvorved dets volumen blev reduceret med omkring 90% og vægten reduceredes med 75-80% (Christensen, 1998).

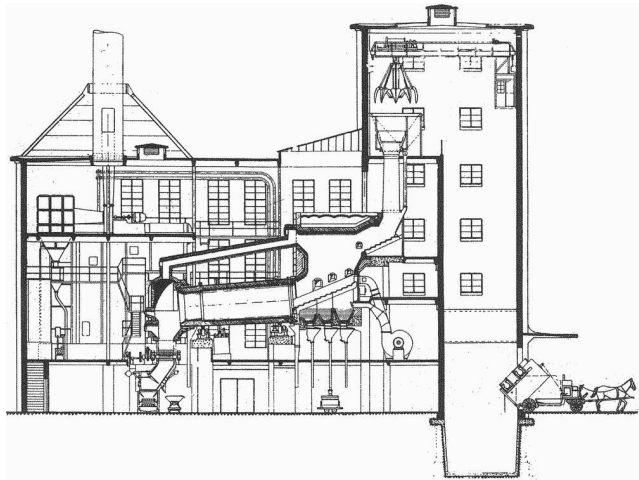
Anlægget på Frederiksberg var bachfyrret, betydende at når ovnen var fyldt med affald, tændtes der ild i det. Affaldet fik lov til at brænde ud, og producerede derved varmt vand og damp. Når affaldet var brændt ud, fyldtes ovnen på ny, og forbrændingen blev således gennemført igen. Denne driftsform betegnedes også som diskontinuerlig drift.



Figur 1.1: Affaldsforbrændingsanlægget på Frederiksberg 1903 med senere tilbygning. På anlægget brændte Frederiksberg Kommunes affald frem til kommunen kom med i I/S Vestforbrændingen og I/S Amagerforbrændingen i 1970'erne. (Danish Board of District Heating, 2006)

I løbet af 1920'erne blev der udviklet en ny metode til at brænde affald i

kontinuerlig drift. Kontinuerlig drift betød, at der hele tiden blev født affald på i den ene ende, mens det udbrændte affald transporteredes ud i den anden ende. Det første kontinuerligt arbejdende forbrændingsanlæg blev bygget i Gentofte i 1931. Året efter fik Frederiksberg Kommune et tilsvarende anlæg, dette kan ses på figur 1.2 (Kleis og Dalager, 2003).



Figur 1.2: Snittegning af anlægget fra 1932 på Frederiksberg. Selve konstruktionsprincippet kaldes roterovnprincippet, da forbrændingen slutter med en udglødning af affaldet i en roterende ovn for enden af ristene (Kleis og Dalager, 2003).

I 1934 fik den tredje danske kommune et affaldsforbrændingsanlæg, Århus kommune, og dette var det sidste anlæg, der blev bygget i Danmark indtil 1950'erne, pga. anden verdenskrig (Kleis og Dalager, 2003).

Efter krigen blev elproduktionen langsomt omlagt fra decentral til mere centraliseret produktion, og derved blev de eksisterende strømproducerende centrale kraftværker overflødige. Mange steder havde man anvendt overskudsvarmen fra strømproduktionen som fjernvarme. Da anlæggene lukkede, skabtes et behov for at forsyne det allerede eksisterede fjernvarmenet med varme fra en alternativ proces. Der opstod således et behov for at bygge nye varmecentraler, hvor nogen valgte at bruge affald som brændsel og løse to opgaver samtidig, bortskaffelse af affald samt fjernvarmeproduktion (Danish Board of District Heating, 2006).

I 1960'erne havde leverandørerne af fjernvarme udviklet en teknologi, der gjorde det muligt at basere fjernvarme på vand med en lav temperatur, 90°C. Denne teknologi gjorde det billigere både på driftssiden, og i forbindelse med konstruktionen af fordelingsnettet. Det blev muligt at bringe fjernvarme rundt i de nye boligområder uden høje etableringsomkostninger (Danish Board of Di-

strict Heating, 2006). De nye boligområder øgede især efterspørgslen efter mindre fjernvarmeværker, der havde en kapacitet på op til 3,5 ton affald i timen (Kleis og Dalager, 2003).

De danske amter stillede i 1970'erne forslag om etablering af en række fælles kommunale affaldsforbrændingsanlæg. Det var det eksisterende fjernvarmenet og de billige etableringsomkostning ved nye fjernvarmesystemer, der gjorde det teknisk og økonomisk muligt (Danish Board of District Heating, 2006). Samtidig gjorde de hastigt stigende priser på brændsel under energikrisen i 1970'erne, det meget attraktivt at finde alternative brændsler til de fossile brændstoffer.

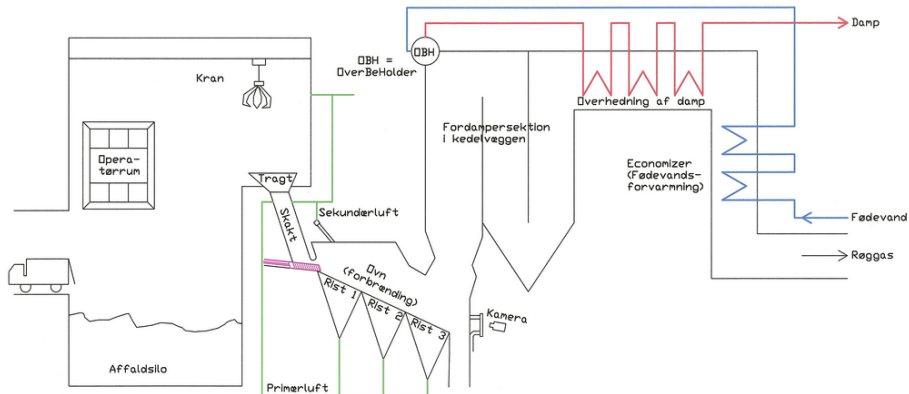
Det største fælles kommunale projekt blev bygget i begyndelsen af 1970'erne, da Københavns Kommune indgik et samarbejde med kommunerne Hvidovre, Glostrup og Rødovre. Indtil da var affaldet blevet deponeret på lossepladser rundt omkring i København og når der var behov for at reducere mængden af deponeret affald skete det ved afbrænding af lossepladsen (Kleis og Dalager, 2003). Der blev bygget 3 roterovnslinier til I/S Amagerforbrændingen og 3 til I/S Vestforbrændingen, hver med en affaldskapacitet på 12 ton affald i timen pr. linie (Kleis og Dalager, 2003).

Med handlingsplanen *Energi 2000* fra Energistyrelsen, skulle samproduktionen af el og varme fremmes. Dette slog igennem i 1990'erne på affaldsforbrændingen, hvor anlæggene, der før primært havde produceret fjernvarme, nu også skulle producere elektricitet (Danish Board of District Heating, 2006).

Fra den 1. januar 2007 er industriaffald i EU blevet en vare, der skal have lov til at flyde frit over grænserne. Husholdningsaffald skal stadig blive indenfor landets grænser. I Danmark koster det iflg. Ingeniøren kr. 150 pr. ton industriaffald at få brændt i Danmark, mod 1100 kr. i Tyskland. Dette vil sandsynligvis betyde en øget mængde affald til danske affaldsforbrændingsanlæg.

1.2 Opbygningen af affaldsforbrændingsanlæg og procesbeskrivelse

I nedestående figur ses en skitse af Haderslev Kraftvarmeværk, hvorfra forsøgsdata stammer. Anlægget og processen er beskrevet nærmere i de nedestående afsnit.



Figur 1.3: Oversigtsdiagram over Haderslev Kraftvarmeværk. Det lille under skakten er pusheren. I ovenloftet sidder sekundærdyserne. Rist 1, rist 2 og rist 3 er individuelle riste, hvor både luftmængde og hastighed kan styres individuelt. For enden af risterne sidder ovenkameraet.

1.2.1 Affaldssilo og indfødnings

I affaldssiloen modtages affald fra skraldevogne. Affaldssiloens indhold og størrelse har en indirekte indflydelse på brændværdien af det indfyrede affald. Affaldet tilføres løbende i ugens hverdage i forskellige fraktioner, husholdnings- og industriaffald. Fraktionerne gør at affaldet har forskellig størrelse og brændværdi. Kranførerer skal derfor blande det indkomne affald i affaldssiloen, således at brændværdien bliver mere ensartet, eksempler på brændværdier ses i bilag A.1.

Kranen fylder affald på skakten. I kranen sidder en vejecelle, der registrerer vægten af affaldet.

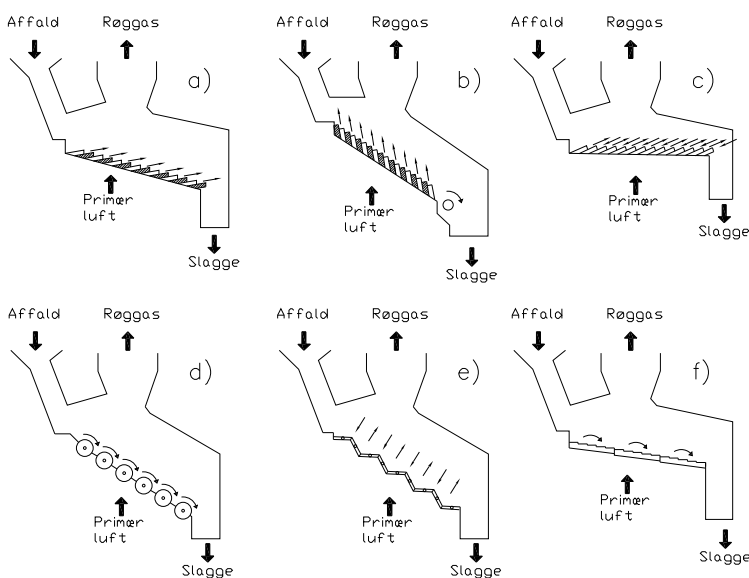
Selve skakten er udformet på en sådan måde at tværsnitsarealet øges ned efter. Denne konstruktion er lavet for at imødegå brodannelse af affaldet inde i skakten, for sker dette, stopper affaldstilførslen helt. Affaldssøjlen i skakten fungerer som en buffer til indfødningsen, således at der kontinuerligt kan tilføres brændsel til processen. Endvidere modvirker affaldssøjlen at falsk luft kommer ind til forbrændingen gennem skakten, da der er undertryk i ovnen.

På Haderslev kraftvarmeværk er indfødningsystemet et pusher system, som består af tre hydrauliske cylindere. Disse kører frem samtidigt, lige indtil en af

dem rammer endestopkontakten, hvorefter de alle tre returnerer så hurtigt som muligt til udgangspositionen. Alle tre cylindere risikerer derfor ikke at nå lige langt frem, og derved kan der ske uens indfødning henover bredden af risten.

1.2.2 Risten og ovnrummet

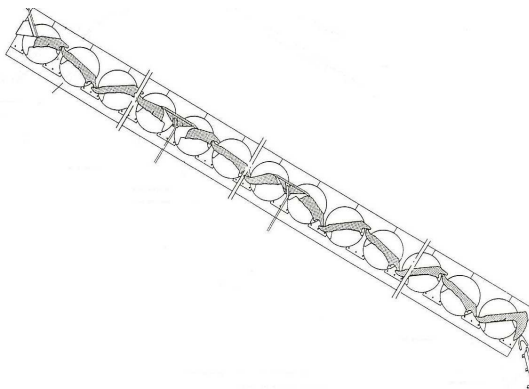
Der findes mange forskellige ristetyper, i figur 1.4 ses 6 ristetyper. Den ristetype der er installeret på Haderslev Kraftvarmeværk er en vipperist, som kan ses i detailtegningen i figur 1.5 på modstående side. Opholdstiden for affaldet på risten er ca. 40 minutter, oplyst af Haderslev Kraftvarmeværk.



Figur 1.4: Figuren viser 6 forskellige ristetyper: a. Fremadskubberist, b. Tilbageskubberist, c. Overløbsrist, d. Valserist, e. Vipperist (B&S), f. Vandrerist (Vølund) (frit efter Christensen (1998)).

Der er på Haderslev kraftvarmeværk tre luftsystemer til ovnen, et primært, et sekundært og et tertiært luftssystem. Primær- og sekundærluften indgår i forbrændingen og ilten herfra nærer forbrændingen. Det tertiære luftssystem fungerer som køleluft i ovnvæggen, påfyldningsskakten og ristebjælkerne. En del af den tertiære luft bliver tilført direkte i primærluften for at varme den op.

Risten sidder i det der kaldes ovnrummet. Ovnrummet på Haderslev Kraftvarmeværk er et udmuret ovnrum, hvor murværket i siderne køles med luft. Sidepladerne slutter ikke helt tæt, så der strømmer falsk luft ind til forbrændingen.



Figur 1.5: Rist og ristelementer på Haderslev Kraftvarmeværk (BS Miljøteknik A/S, 1992).

I loftet af ovnen sidder sekundærluftdyserne, som blæser ind i ovnrummet med en hastighed, der sikrer god opblanding af gasserne i ovnrummet. Impulsen fra sekundærluften gør, at der trækker varm luft op til indfødningen, hvorved affaldet varmes og tørres. Ovnene er en medstrømsovn, det vil sige at forbrændingssluften bevæger sig i samme retning som affaldet.

1.2.3 Kedlen

Kedlen består af tre sektioner: Fordampning, overheder og fødevandsforvarming. Lige efter ovnen er fordampningstrækket, hvor der i rørvæggen opstår en tofaset strømning af vand og damp. Denne tofasede strømning, er den der skaber den naturlige cirkulation i kedlen. Når den tofasede strømning kommer til overbeholderen, forsætter den mættede vanddamp ud til overhederne, mens vandet cirkulerer endnu en gang. I overhederne bliver den mættede damp opvarmet til mellem 400° - 420° (BS Miljøteknik A/S, 1991).

Dampen forsætter ud til turbinen, hvor det er turbinens trykventil, der styrer trykket til turbinen og dermed modtrykket til overbeholderen. Et øget tryk i overbeholderen medfører en højere mætningstemperatur for dampen. Bliver trykket for højt, er der en række sikkerhedsforanstaltninger der træder i kraft, for at hindre havari af kedlen.

Dampen efter turbinen kondenseres i kondensatoren og føres med fødevands-pumperne til økonomiseren, som forvarmer fødevandet inden det føres til overbeholderen.

1.2.4 Den nuværende regulering

Den nuværende indfødningregulering på HAV regulerer på samme tid hastigheden på pusheren og ristene, da de kører i et fast forhold til hinanden. Dette forhold kan ændres af operatøren.

Regulator til indfødningreguleringen er en PID-regulator, som regulerer på forskellen mellem sætpunktet og procesværdien af dampproduktionen.

Inden dette regulatorsignal kommer ud til pusheren og ristene, korrigeres signalet med et bidrag fra iltregulatoren i røggassen.

1.2.5 Operatørens brug af ovnkameraet

Flammefronten, en subjektiv vurdering af operatøren, bruges i dag til at justere parameterne i reguleringen. Dette sker hvis flammefronten bevæger sig for langt op mod indfødningen eller for langt ned mod slaggefaldet.

Hvis flammefronten bevæger sig for langt op mod indfødningen vil iltprocenten stige. Endvidere ses der typisk et fald i temperaturen i ovnen og efterforbrændingskammeret (EBK) samt et fald i dampproduktionen. Operatøren øger i dette tilfælde pusherhastigheden og sekundært sættes luftmængden ned.

Skulle det modsatte være tilfældet, at flammefronten bevæger sig for langt ned mod slaggefaldet, er iltprocenten ofte lav. Operatøren sætter derfor ristehastigheden ned og øger luftmængden.

Operatøren forsøger at holde flammefrontens placering, dog kan det ske at dampproduktionen alligevel bliver for høj. I disse tilfælde nedjusteres pusher- og ristehastighed. Bliver dampproduktionen derimod for lav, er iltprocenten ofte høj. Operatøren øger derfor pusherhastigheden, samt sænker forbrændingsluften især primærluften på rist 3 og sekundærluftdyserne.

1.3 Formål

Det er målet for dette speciale at foretage en billedanalyse af billedet fra operatørens overvågningskamera for enden af ovnen. Gennem billedanalysen skal flammefronten identificeres og der skal laves en kvantitativ bestemmelse af flammefronten. Flammefronten undersøges med henblik på brug i reguleringen af anlægget. Endvidere skal der laves en blackbox model af forbrændingsprocessen på Haderslev Kraftvarmeværk. Modellen skal bruges til at vurdere forskellige regulatorer.

2.1 Forbrændingsprocessen

Forbrænding af affald kan opdeles i forbrænding med ilt underskud og forbrænding med ilt overskud. Processen med ilt underskud, er en pyrolyse- og forgasningsproces, hvor affaldet varmes op i en iltfattig atmosfære. De afgivne gasser fra affaldet føres væk fra forgasningsovnen, for efterfølgende at blive brændt af f.eks. i en gasturbine (Christensen, 1998).

I Danmark foregår affaldsforbrænding ofte ved risteforbrænding med iltoverskud (Christensen, 1998). I affaldslaget på risten sker der en pyrolyse- og forgasningsproces med ilt underskud. Gasserne brænder af i ovnrummet over affaldslaget, da der er et ilt overskud her.

Den energimængde, der omdannes fra affaldet, kan bestemmes ud fra en elementaranalyse af affaldet, hvor masseandelen af elementerne sættes ind i en brændværdiberegning, ligning (2.2). De elementer der skal bruges for at bestemme den nedre brændværdi af er kulstof (m_c), brint (m_h), kvælstof (m_n), svovl (m_s), ilt (m_o) og vand (m_w).

$$m_c + m_h + m_n + m_s + m_o + m_w = 1 \quad (2.1)$$

Den nedre brændværdi for et fast eller flydende brændsel kan bestemmes ud fra nedenstående ligning (2.2) (Cebe og Hoffmann, 1999)

$$H_u \approx (34,0m_c + 101,6m_h + 6,3m_n + 19,1m_s - 9,8m_o - 2,5m_w) \frac{MJ}{kg} \quad (2.2)$$

Som det fremgår af ovenstående, indgår kondensationsvarmen af vand ikke i beregningen af den nedre brændværdi. Det vil sige at vandet bruger energi på at fordampe, men denne energi udnyttes ikke ved at få kondensationsvarmen fra vandet tilbage i energibalancen.

Beregningen af brændværdien på et affaldsforbrændingsanlæg foregår ofte ved en betragtning af energibalancen i forhold til mængden af det tilførte affald. Beregningen har en stor tidsforsinkelse, da den er baseret på vægten af grabben, som fylder affald i skakten hvert 15.-20. minut.

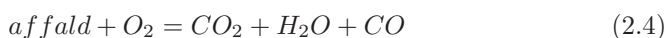
Et alternativ til at basere brændværdiberegningen på energibalancen og grabvægten er, at bruge massebalancen for brændingsluft og røggassen. En massebalance betragtning af brændværdien for det brændende affald er blevet beskrevet i van Kessel et al. (2002) og uddybende formuleret i van Kessel et al. (2004). Her betragtes affaldet som bestående af vand, inert materiale og brandbart materiale på formen CH_yO_z . Hvor y kan anses for konstant, da variationen er af mindre betydning for energiproduktionen (van Kessel et al., 2002). Metoden bruger gasmålinger af CO_2 , O_2 og H_2O i røggassen samt O_2 og H_2O i forbrændingsluften. Gasmålingerne giver en hurtigere bestemmelse af brændværdien, i modsætning til brændværdi hvor grabvægten indgår.

Reaktioner

Når affaldet reagerer med ilt ved forbrænding, kan der ske en fuldstændig eller ufuldstændig forbrænding. Den fuldstændige forbrænding er kendetegnet ved (forsimplet)



mens den ufuldstændige forbrænding er kendetegnet ved (forsimplet)



Det er som regel en ufuldstændig forbrænding, der sker på risten, men tilførslen af sekundærluft øger luftoverskuddet og opblandingen, således at CO kan reagere til CO_2 .

Antændelsestemperatur

Affald består af mange forskellige elementer, som hver for sig har en selvantændelsestemperatur. Temperaturen i ovnrummet har derfor en indflydelse på hvornår affaldet antændes, se tabel 2.1. Et opvarmningsforsøg i en ovn har vist, at affald kan være selvantændende $180^\circ C$ (van Kessel et al., 2004).

2.1.1 Affaldslagets stadier ved forbrænding på rist

I princippet kan forbrændingen af affaldet deles op i tre stadier. Ved første stadiet sker der en opvarmning af affaldet, så vandet fordamper fra affaldet og

Materiale	Temp (Ca.)
Benzin	500 °C
Bygningstræ (gran)	385 °C
Diesel	225 °C
Polyethylen	490 °C
Polyurethan (skum)	280 °C
Æter	180 °C

Table 2.1: Antændelsestemperatur for forskellige materialer (Beredskabsstyrelsen, 2006).

det tørrer. Samtidig forbrændes de flygtige gasser fra affaldet i ovenrummet.

Det næste trin i processen er en endoterm pyrolyse, hvor det faste affald bliver omdannet til brandbare gasser. De gasser der ikke har kunnet reagere med ilt i affaldslaget, bliver brændt af i ovenrummet. Dette sker ved tilførsel af sekundærluft eller med overskydende primærluft.

Ved det sidste stadie sker en forbrænding af de faste brandbare bestanddele af affaldet, såsom fast kulstof. Denne forbrændingsproces kaldes også for koks forbrænding og er eksoterm, det vil sige at processen udvikler varme nok til selv at kunne fortsætte, ved tilførsel af ilt. Ofte finder pyrolysen og koksforbrændingen sted samtidig på de første par riste. Restproduktet efter forbrændingen kaldes slagger.

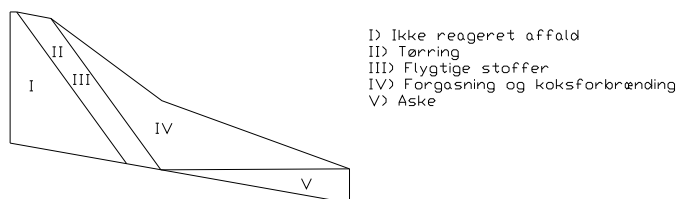
Modeller for tilstandene

For at undersøge forbrændingshastigheden for et fast brændsel, har en klassisk tilgangsvinkel været et fikseret riste forsøg (Marskell et al., 1946), på engelsk kaldet “pot furnace” eller “fixed bed” forsøg. Resultaterne fra forsøgsmetoden kan overføres generelt til fast biobrændsel på ristefyrrede anlæg (Thunman og Leckner, 2001) og (van Kessel et al., 2004).

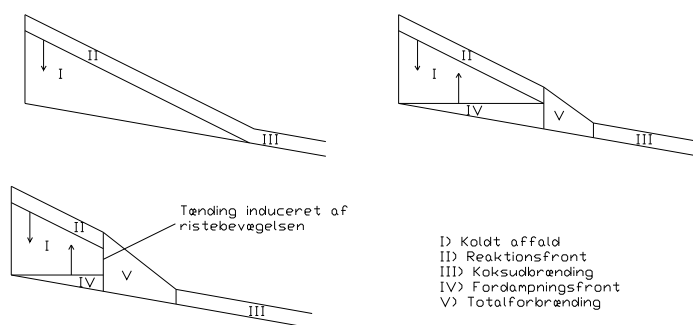
Ud fra observationerne ved forsøgene i henholdsvis Thunman og Leckner (2001) og van Kessel et al. (2004), er der blevet opstillet to betragtninger for hvordan forbrændingen sker på risten. Disse to betragtninger er lidt forskellige, som fremgår af figur 2.1 og 2.2.

I Thunman og Leckner (2001) antages modellen i figur 2.1 at gælde, når den horisontale bevægelse af ristelaget er hurtigere end den vertikale bevægelse af forbrændingen gennem brændselaget.

I van Kessel et al. (2004) antages det at affaldet ikke blandes af ristebevægelserne, hvorfor det fikserede risteforsøg ses som en prøve af affaldet, som vandrer ned over risten. Forsøgene blev gennemført med forvarmet primærluften på hhv. 70°C og 140°C. Ved luftforvarmning på 140°C blev der observeret en 2 regime forbrænding, det andet regime opstår, når tørringsfronten og fordampningsfronten mødes. Derved mange dobles reaktionsfrontens hastighed (van Kessel et al.,



Figur 2.1: Thunmans forbrændingsteori. (frit efter Thunman og Leckner (2001))



Figur 2.2: van Kessel forbrændingsteori. (frit efter van Kessel et al. (2004))

2004), se figur 2.2.

Ved de praktiske forsøg på et affaldsforbrændingsanlæg opstod det andet regime før end beregnet induceret af ristebevægelserne (van Kessel et al., 2004), se nederst figur 2.2.

2.1.2 Mængden af affald på ristene

Energiproduktionen på et affaldsforbrændingsanlæg afhænger, udover brændværdien, også af mængden af brændsel der tilføres processen. En øget mængde affald vil øge ristelaget, som langsomt vil blive transporteret hen over risten. Da der bliver tilført primærluft under ristene, vil der være behov for et større tryk under ristene, for at kunne få samme mængde primærluft til at penetrere gennem den øgede mængde affald. Forskellen mellem trykket i ovnen og trykket under risten er et mål for trykfaldet over risten og dermed en indikation af ristelagets trykkelse. Generelt er et tryktab (Δp) afhængig af kvadratet på hastigheden (c).

Til at beregne tryktab ved strømning i rør, er det normalt at betragte modstandskoefficienten som konstant og afhængende af kvadratet på hastigheden,

hvormed mediet strømmer igennem flowmodstanden (Krex, 1997)

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot c^2 \quad (2.5)$$

hvor Δp er trykdifferencen, ζ modstandskoefficienten, ρ mediets massefylde og c hastigheden.

Ved at beregne en modstandskoefficient ζ er det i teorien muligt at gøre affaldslaget uafhængig af hastigheden på luften, inden risten, og dermed uafhængig af regulatorens setpunkt for primærluften.

2.2 Identifikation af flammefronten

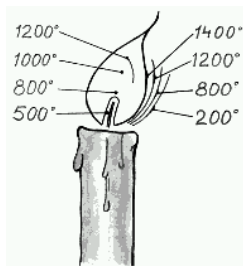
En relativ simpel metode til identifikation af flammefronten er beskrevet i Persson og Helgesson (2004) hvor der er lavet forsøg med forskellige optiske filtre foran et almindeligt kamera. Der søges at fremhæve flammen og få store gradienter i pixelværdien, som gør det nemmere at skille *ikke* brændende affald og flammen ad. I selve algoritmen benyttes en tærskelværdi på 0,5 af den maksimale pixelværdi i et gråskala billede og dermed identificeres alle pixels over tærskelværdien som flamme. Flammefronten defineres som det sted hvor 20% af den maksimale flammebrede første gang optræder nederst i billedet (Persson og Helgesson, 2004).

Et almindeligt kamera er også anvendt i Müller et al. (1998), her bliver billedet brugt til regulering af udbrændingszonen gennem en fuzzyregulator. Billedet detekteres for udbrændt affald i udbrændingszonen og arealet og intensiteten er koblet til fuzzyregulatoren. Detekteringen af udbrændt affald sker gennem en filtering og kantdetektering af billedet. Udbrændingszonen kommer efter forbrændingszonen, og ved optimal regulering gælder det om at holde flammefronten så tæt på der hvor disse to zoner mødes (Müller et al., 1998).

Et mere avanceret kamera er blevet anvendt i Zipser et al. (2004). Der benyttes et infrarødt (IR) kamera til at identificere forbrændingens placering og temperatur. Med et IR kamera er det muligt at se gennem flammerne og se direkte på forbrændingen, der foregår på risten. Informationen om forbrændingen er blevet korreleret med en røggasmåling for NO og der er fundet en sammenhæng. Zipser et al. (2004) foreslår at det kan anvendes i en adaptiv reguleringsstrategi.

2.2.1 Flammefarve og temperatur

En ren gasflamme, der brænder, er i sig selv farveløs. Men indeholder gas/luftblandingen små partikler, vil disse gløde og lyse op. Det er fra disse glødende partikler at flammens farve og dermed strålingsvarmen kommer. Farven og temperaturen på flammen hænger ofte sammen, fx. i et stearinlys se figur 2.3 og tabel 2.2.



Figur 2.3: Temperaturen på flammen fra et brændende stearinlys (Beredskabsstyrelsen, 2006)

Temp	Farve
ca. 550 °C	mørk rød glødning
ca. 700 °C	svagt rød
ca. 900 °C	klart rød
ca. 1100 °C	orange, gul
ca. 1400 °C	hvid

Tabel 2.2: Farverne i flammen af et stearinlys afhænger af temperaturen det pågældende sted. (Beredskabsstyrelsen, 2006)

En ren gasbrænding har “ingen” flammefarve og vil hovedsagelig afgive konvektionsvarme.

Ved affaldsforbrænding har flammen farve pga. en masse små partikler. Det er derfor muligt at relatere temperatur og flammefarve til hinanden analogt til stearinlyset i figur 2.3.

2.3 Modellering af affaldsforbrænding

Til at beskrive et transient respons i et dynamisk system findes der tre typer af modeller, en whitebox, en blackbox eller en graybox model.

En whitebox model er en tilstandsbeskrivelse af systemet, hvor kendte ligninger anvendes. Dette kan bla. være varmeoverførelse, diffusionshastighed, kemiske reaktioner, mm. Der er i Force Technology et al. (2005) lavet en whitebox model for en halmfyringsproces, som bliver brugt til en dynamisk beskrivelse af systemet. Modellen indeholder 340 tilstande for selve fyringsprocessen, som indstilles med et udvidet Kalman Filter.

En blackbox model er en statistisk tilgangsvinkel til hvordan et givent system responderer på et givent input. Begrænsningen i denne metode er, at der laves en linearisering omkring et driftspunkt.

Den sidste type af modeller kaldes graybox modellering og er en form for semi fysisk modellering, hvor man baserer systemets dynamik på stokastiske differentiaalligninger. Parameterne i systemet reduceres og estimeres, indtil en signifikant model opnås. Hertil kan værktøjet CTSM¹ anvendes. Programmet er udviklet på IMM/DTU.

¹<http://www.imm.dtu.dk/~ctsm>

2.3.1 Modellering af affaldsforbrænding som et lineært system

Ved affaldsforbrænding er der en række faktorer, der har indflydelse på, hvordan processen opfører sig transient. Hvis man fx. tilføjer mere brændsel vil processen producere mere energi, altså mere damp. Til at beskrive denne sammenhæng kan systemet forsøges beskrevet, ved at linearisere en model omkring et driftspunkt. Dette kan lade sig gøre såfremt systemet er lineært, tidsinvariant og kausalt. Den lineære sammenhæng mellem input og output, kan beskrives ved impulsresponsfunktionen ($h(q^{-1})$) (Madsen, 1998).

$$y_t = h_0 x_t + h_1 x_{t-1} + \dots \quad (2.6)$$

hvis beskrivelsen indeholder observationsstøj opskrives det generelle tilfælde

$$y_t = \sum_{i=0}^{\infty} h_i x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

hvor ε_t er hvid støj. Er der derimod tale om processtøj på observationerne vil sammenhængen blive udtrykt

$$y_t = \sum_{i=0}^{\infty} h_i x_{t-i} + n_t \quad (2.8)$$

hvor n_t kaldes farvet støj, da det indeholder information om processen. Som det fremgår af ligning (2.8) kan $h(q^{-1})$ indeholde et uendeligt antal parametre. Antallet af parametre kan, med afsæt i teorien om rækkeudvikling, reduceres ved at omskrive impulsresponsfunktionen til en overføringsfunktion

$$h(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})} \quad (2.9)$$

Hvor k er tidsforsinkelsen, mens $B(q^{-1})$ og $F(q^{-1})$ er polynomier for henholdsvis input og output. Herefter kan overføringen fra input til output beskrives gennem overføringsfunktionen

$$y_t = \frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})} x_t + n_t \quad (2.10)$$

Modellen i ligning (2.10) betegnes som en Output Error model (Madsen, 1998). Processtøjen, betegnet n_t , kan ligeledes for et lineært, tidsinvariant og kausalt system forsøges beskrevet med en overføringsfunktion, hvor inputtet er hvid støj.

$$n_t = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \varepsilon_t \quad (2.11)$$

Den generelle modelstruktur, der vil blive anvendt her i specialet, er

$$y_t = \frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})}x_t + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}\varepsilon_t \quad (2.12)$$

Såfremt faktorene i $F(q^{-1})$ og $D(q^{-1})$ er ens vil de blive betegnet $A(q^{-1})$ og følgende opskrivning vil blive anvendt

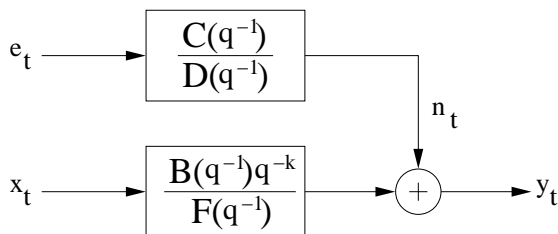
$$A(q^{-1})y_t = B(q^{-1})q^{-k}x_t + C(q^{-1})\varepsilon_t \quad (2.13)$$

Modellen i ligning (2.12) kaldes en Box-Jenkins model (BJ), mens modellen i ligning (2.13) kaldes ARMAX, AutoRegressiv-Moving Average med eXogeneous input (Madsen, 1998).

Såfremt at $C(q^{-1}) = 1$ kaldes modellen for en ARX model, AutoRegressiv med eXogeneous input (Madsen, 1998)

$$A(q^{-1})y_t = B(q^{-1})x_{t-b} + \varepsilon_t \quad (2.14)$$

Skematisk set ser ligning (2.12) ud som i figur 2.4.



Figur 2.4: SISO, single-input single-output, system, med overføringsfunktionerne $\frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})}$ for inputtet og $\frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}$ for støjen e_t til outputtet, q^{-k} repræsenterer tidsforsinkelsen. n_t er processtøj, mens e_t er hvid støj

2.3.2 Identifikation af impulsresponsfunktionen

Ved at forudsætte, at systemet er lineært, tidsinvariant og kausalt, kan systemet i diskret tid karakteriseres ved impulsresponsfunktionen $h(q^{-1})$

$$y_t = \sum_{i=0}^{\infty} h_i x_{t-i} + n_t \quad (2.15)$$

For at kunne danne et estimat af impulsresponsfunktionen $h(q^{-1})$ begrænses horisonten til N observationer

$$y_t = \sum_{i=0}^N h_i x_{t-i} + n_t \quad (2.16)$$

Dette giver regressionsligningen for det absolutte tilfælde

$$y_t = \phi_t \boldsymbol{\theta} + n_t \quad (2.17)$$

hvor $\boldsymbol{\theta} = (h_0, h_1, \dots, h_N)^\top$ og $\phi_t = (x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-N})^\top$. Estimatet af impulsresponsfunktionen kan bestemmes ved at anvende de mindste kvadraters (uvægtede) skøn, også kaldet LS for Least Squares

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} S_N(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.18)$$

hvor

$$S_N(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{t=1}^N \epsilon_t^2(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{t=1}^N (y_t - \phi_t \boldsymbol{\theta})^2 \quad (2.19)$$

Det vil sige at $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ er det $\boldsymbol{\theta}$ der minimerer kvadratafgivelsen. Hvilket også kan skrives som

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Phi}^\top \boldsymbol{\Phi})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^\top \mathbf{y}_t \quad (2.20)$$

hvor $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{h}_0, \hat{h}_1, \dots, \hat{h}_N)^\top$

Identifikation af impulsresponsfunktionen med Ridge Regression

Såfremt datasættet indeholder mange korrelerede variable i den lineære regressionsmodel, kan ridge regressionen anvendes. Variablene kunne godt være højt korreleret, når det vides at inputtene til forbrændingsprocessen er ændret ved trinrespons. Men dette afhænger dog af trinstørrelse ved forsøgene.

Ved ridge regression straffes regressionskoefficienternes størrelse (Hastie et al., 2001).

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Phi}^\top \boldsymbol{\Phi} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^\top \mathbf{y}_t \quad (2.21)$$

Identifikation af impulsresponsfunktionen med Prewhitening

Såfremt input-serien til processen ikke er mulig at kontrollere, og kan beskrives med en ARMA-model. Kan overføringen til processen findes ved at tilpasse ARMA-model til input-serien.

$$B(q^{-1})x_t = C(q^{-1})\varepsilon_t \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_t = \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})}x_t \quad (2.23)$$

Efterfølgende filtreres output-serien med samme model.

$$\beta_t = \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})}y_t \quad (2.24)$$

Herefter kan impulsresponsfunktionen estimeres ved (Madsen, 1998)

$$\hat{h}_k = \frac{\gamma_{\alpha\beta}(k)}{\gamma_{\alpha\alpha}(0)} \quad (2.25)$$

hvor $\gamma_{\alpha\beta}(k)$ er krydskovariansfunktionen og $\gamma_{\alpha\alpha}$ er autokovariansfunktionen.

2.3.3 Identifikation af overføringsfunktionen

Med afsæt i de dominerende værdier for impulsresponsfunktionen kan ordenen for en OE model bestemmes. Det vil sige at det er ordenen af $B(q^{-1})$ og $F(q^{-1})$ der bliver bestemt, mens residualt n_t efterfølgende må analyseres.

Selve parameterestimatet kan bestemmes ved at anvende de mindste kvadraters (uvægtede) skøn, under antagelse af at residualt er hvid støj

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Phi}^\top \boldsymbol{\Phi})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^\top \mathbf{y}_t \quad (2.26)$$

hvor

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (b_0, \dots, b_{nb}, f_1, \dots, f_{nf})^\top \quad (2.27)$$

og

$$\boldsymbol{\Phi} = (\mathbf{x}_{t-k}^\top, \dots, \mathbf{x}_{t-nb-k}^\top, -\mathbf{y}_{t-1}^\top, \dots, -\mathbf{y}_{t-nf}^\top)^\top \quad (2.28)$$

Antages det derimod at residualt af overføringsfunktionen $\left(\frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\right)$ ikke er hvid støj anvendes prædiktionsfejl metoden. Det vil sige at modelparametrene for OE-, ARMAX- og BJ-modeller, estimeres med prædiktationsfejl metoden. Prædiktionsfejl metoden betinger på tidligere observationer og er givet ved

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} S_N(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.29)$$

hvor

$$S_N(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{t=1}^N n_t^2(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.30)$$

og

$$n_t(\boldsymbol{\theta}) = y_t - \hat{y}_{t|t-1}(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.31)$$

Når overføringen til n_t er identificeres, således at inputtet er hvid støj (ε_t), er der fundet en god model. Derudover skal parametrene for den endelige model være signifikante, samtidig med at den valgte modelorden er passende ud fra et givet kriterie.

Et kriterie for valg af modelorden kan være Akaike's informationskriterium (AIC), hvor modellen med det mindste kriterium vælges. AIC er defineret ved (Madsen, 1998)

$$\text{AIC} = N \log \hat{\sigma}_\epsilon^2 + 2n_i \quad (2.32)$$

hvor $\hat{\sigma}_\epsilon^2 = S_N(\hat{\boldsymbol{\theta}})/N$ og n_i er antallet af parametre.

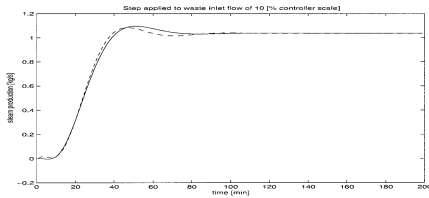
Et alternativ er Bayesian informationskriterium (BIC), som er mere konsistent overfor modelordenen (Madsen, 1998). BIC kriteriet er defineret ved

$$\text{BIC} = N \log \hat{\sigma}_\epsilon^2 + n_i \log N \quad (2.33)$$

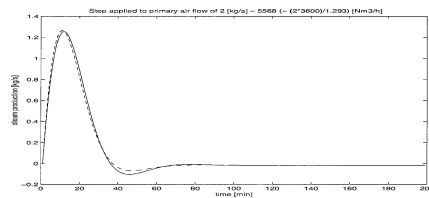
Andres resultater

Der er i Leskens et al. (2002) fundet en ARX model for en affaldsforbrænding. Det anvendte datasæt består af 5 datasæt af op til 25 timer varighed. Datasættet er baseret på en PRBS perturbation af input i lukket sløjfe. Modellen, der estimeres, er en multipel input mutipel output model (MIMO). Modellen har indfødningshastigheden, ristehastigheden, primærluft samt sekundærluft, som input og dampproduktionen og iltkoncentrationen i røggassen, som output. Den første model i Leskens et al. (2002) er af 23. orden og gennem en række reduktionstrin, opnås en model af 8×2 . orden.

Resultaterne fra Leskens et al. (2002) er anvendt i van Kessel et al. (2002) og van Kessel (2003), hvor ARX-modellen bruges til at tilpasse parametrene i en whitebox model, udviklet af firmaet TNO². I figurene 2.5 og 2.6 ses resultaterne af parametertilpasningen, som trinrespons kurver.



Figur 2.5: Responskurve for dampproduktionen, hvor trin foretages i indfødningshastigheden. Resultat er taget fra van Kessel (2003).



Figur 2.6: Responskurve for dampproduktionen, hvor trin foretages i primærluften. Resultat er taget fra van Kessel (2003).

Som det fremgår af figur 2.5 er et trin i indfødningshastigheden behæftet med en tidsforsinkelse på 15 minutter. Det tager ca. 1 time før dampproduktionen når sin stabile tilstand efter et lille oversving.

Figur 2.5 viser den indflydelse et trin i primærluften har på dampproduktionen. Heraf fremgår det at den øgede mængde primærluft øger dampproduktionen, men efter et lille undersving returnerer dampproduktionen til udgangspunktet.

2.4 Regulering

2.4.1 PID-regulator

PID regulatoren er en hyppigt anvendt regulator. Den er relativ robust og kræver ikke megen procesinformation (Poulsen, 1999). Den består af en forstærkning (**P**), en integralvirkning (**I**) og en differentialvirkning (**D**). Den teoretiske

²TNO Environment, Energy and Process Innovation

overføringsfunktion fra fejlen mellem reference og procesværdien til styresignal er (Jannerup og Sørensen, 2000)

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.34)$$

Faktorerne K_p , τ_i og τ_d kan bestemmes ud fra Ziegler-Nichols lukket sløjfeforsøg (Jannerup og Sørensen, 2000). Dette forsøg kræver, at man først finder den kritiske forstærkning. Den kritiske forstærkning er der hvor systemet første gang kommer i stående svingninger, hvilket ikke er hensigtsmæssigt at gennemføre i praksis på et affaldsforbrændingsanlæg.

Heilmanns metode er en praktisk tilgangsvinkel og kræver ikke at systemet er i stående svingninger (Heilmann, 1998). Det er et godt udgangspunkt for en håndtuning af en regulator. Ved Heilmanns metode bestemmes først en passende integraltid (τ_i) ud fra den tid det tager systemet i åben sløjfe at opnå 50% af totalændringen. Herefter findes størrelserne på K_p og τ_d ved praktiske forsøg.

Når ligning (2.34) skal implementeres i diskret tid, kan Laplace operatoren s erstattes med den bagudrettede differensoperator

$$s \leftarrow \frac{\nabla}{\nabla t} = \frac{1 - q^{-1}}{T_s} \quad (2.35)$$

hvor T_s er sampling tiden.

Sættes ligning (2.35) i ligning (2.34) fås

$$\frac{x_t}{e_t} = K_p \left(1 + \frac{T_s}{\tau_i(1-q^{-1})} + \tau_d \frac{(1-q^{-1})}{T_s} \right) \quad (2.36)$$

$$x_t(1 - q^{-1}) = K_p(1 - q^{-1})e_t + \frac{K_p T_s}{\tau_i} e_t + \frac{K_p \tau_d}{T_s} (1 - q^{-1})^2 e_t \quad (2.37)$$

$$x_t = x_{t-1} + K_p(e_t - e_{t-1}) + \frac{K_p T_s}{\tau_i} e_t + \frac{K_p \tau_d}{T_s} (e_t - 2e_{t-1} + e_{t-2}) \quad (2.38)$$

PID regulatoren i ligning (2.38) er blevet implementeret og testet i afsnit 6.1.

2.4.2 Minimalvarians regulator MV_0

Resultatet af systemidentifikationen kan bruges til at designe en modelbaseret stokastisk regulator. Den mest simple er en minimalvarians regulator MV_0 , der minimerer kvadratet af fejlen mellem procesværdien (y_t) og referencen (w_t)

$$\bar{J}_t = E[(y_{t+k} - w_t)^2] \quad (2.39)$$

I nedenstående betragtes systemet at været beskrevet som et ARMAX system på formen

$$A(q^{-1})y_t = q^{-k}B(q^{-1})x_t + C(q^{-1})\varepsilon_t \quad (2.40)$$

På basis af (2.40) er MV_0 regulatoren givet ved

$$Rx_t = Qw_t - Sy_t \quad (2.41)$$

som for ARMAX modellen kan omskrives til

$$BGx_t = Cw_t - Sy_t \quad (2.42)$$

hvor polynomierne G og S er løsninger til diophantine ligningen (Poulsen, 1999)

$$C = AG + q^{-k}S \quad (2.43)$$

Såfremt der anvendes en Box-Jenkins model

$$y_t = q^{-k} \frac{B}{F} x_t + \frac{C}{D} \varepsilon_t \quad (2.44)$$

findes diophantine ligningen ved at skrive BJ-modellen om til ARMAX formen

$$FDy_t = q^{-k} DBx_t + FC\varepsilon_t \quad (2.45)$$

hvorefter kan diophantine ligningen opstilles

$$CF = DFG + q^{-k}\tilde{S} \quad (2.46)$$

Det ses at F er en faktor i to ud af tre led. Dermed må $\tilde{S} = F \cdot S$ (Poulsen, 1999), således at G og S kan bestemmes ud fra

$$C = DG + q^{-k}S \quad (2.47)$$

2.4.3 PZ-regulator

Minimalvarians regulatoren MV_0 bruger ofte meget regulator energi på at følge referencen. Ønskes det i stedet at bruge mindre regulator energi, kan ændringen i referencen filtreres gennem filteret $\frac{B_m}{A_m}$.

$$y_t = q^{-k} \frac{B_m}{A_m} w_t \quad (2.48)$$

Derved oplever regulatoren en langsommere ændring af referencen og bruger mindre energi på at den minimere fejlen. Denne type regulering har forskellige navne og kaldes i Poulsen (1999) PZ-regulering, mens den kaldes modelfølge regulering i Åstrom og Wittenmark (1995). Regulatoren forsøger at minimere kostfunktionen

$$\bar{J}_t = E[(A_m y_{t+k} - B_m w_t)^2] \quad (2.49)$$

PZ-regulatoren til ARMAX systemet fra ligning (2.40) er givet ved

$$BGx_t = B_m C w_t - S y_t \quad (2.50)$$

hvor G og S er løsninger til diophantine ligningen (Poulsen, 1999)

$$A_m C = AG + q^{-k}S \quad (2.51)$$

2.4.4 LQG-regulatoren

Ovenstående regulatorer fokuserer udelukkende på at minimere kvadratet af fejlen mellem procesværdien og referencen. Det er ikke hensigtsmæssigt såfremt der er tale om et *ikkeminimumsfase* system. Især for et *ikkeminimumsfase* system vil det være praktisk at tilføje et bidrag fra styreeffekten i kostfunktionen, som minimeres over en uendelig horisont.

$$\bar{J}_t = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{N} \sum_{i=t}^N (y_i - w_i)^2 + \rho(x_i)^2 \right] \quad (2.52)$$

Regulatoren har derfor en god evne til at håndtere *ikkeminimumsfase* systemer, samt systemer med tidsforsinkelser. LQG-regulatoren er givet ved

$$Rx_t = Cw_t - Sy_t \quad (2.53)$$

For at kunne løse reguleringsproblemet løses først faktoriseringsproblemet

$$P(q)P(q^{-1}) = \rho A(q)A(q^{-1}) + B(q)B(q^{-1}) \quad (2.54)$$

således at der findes et stabilt n ordens monisk polynomium til P . Efterfølgende kan diophantine ligningen løses for at finde polynomierne P og S (Poulsen, 1999)

$$CP = AR + BS \quad (2.55)$$

2.4.5 xGPC-regulator

xGPC står for eXtended Generalized Predictive Control (Nielsen, 2002). xGPC regulatoren anvender den generelle opskrivning af GPC regulatoren, i stedet for at regulatoren er diophantineløsningen til reguleringsproblemet (Clarke et al., 1987). I Clarke et al. (1987) beskrives hvordan LQG regulatoren bliver til GPC regulatoren.

Anvendes metoden fra Palsson et al. (1994) (xGPC) fås en mere generel løsning til reguleringsproblemet, som gør det muligt at anvende tidsvariende modelparametre. Dette er ikke muligt med GPC regulatoren foreslået af Clarke et al. (1987), da modelparametrene anses for konstante over prædiktionshorisonten, hver gang problemet løses med diophantineligningen.

Metoden for både GPC og xGPC regulatoren består i at betragte j -trins prædiktoren, hvor j går fra 1 op til N , og kan beskrives som

$$\hat{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t \quad (2.56)$$

hvor

$$\hat{\mathbf{y}}_t = [\hat{y}_{t+1|t}, \dots, \hat{y}_{t+N|t}]^\top \quad (2.57)$$

$$\mathbf{x}_t = [x_t, \dots, x_{t+N-1}]^\top \quad (2.58)$$

$$\mathbf{n}_t = [n_{1,t}, \dots, n_{N,t}]^\top \quad (2.59)$$

og endelig impulsresponsfunktionsmatricen

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} h_{1,t+1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ h_{2,t+2} & h_{1,t+2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{N-1,t+N-1} & h_{N-2,t+N-1} & \cdots & h_{1,t+N-1} & 0 \\ h_{N,t+N} & h_{N-1,t+N} & \cdots & h_{2,t+N} & h_{1,t+N} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Målet for regulatoren er at holde procesværdien så tæt som muligt til reference-signalet w_t . Reguleringsfejlen mellem output og reference skulle gerne være så lav som mulig og samtidig med at reguleringsarbejdet er acceptabelt. Dette kan ske ved at minimere kostfunktionen

$$\bar{J} = E \left[\sum_{j=N_1}^{N_2} (y_{t+j} - w_{t+j|t})^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_{j,t} x_{t+j-1}^2 \right] \quad (2.61)$$

Parameterne N_1 , N_2 , N_u og λ_j i ligning (2.61) er designparametre for både GPC og xGPC.

N_1 er den mindste output horisont og såfremt tidsforsinkelsen k kendes sættes $N_1 = k$. Er k derimod tidsvarierende sættes $N_1 = 1$ eller $N_1 = \min k$

N_2 er den maximale output horisont. Generelt skal N_2 vælges således at alle betydningsfulde repons er inkluderet i kostfunktionen. For stabile åben sløjfe systemer skal N_2 ca. være stigningstiden af systemet.

N_u er reguleringshorisonten, hvor det for simple systemer er det fornuftigt at sætte $N_u = 1$. Stigende værdier af N_u medfører en mere aktiv regulator og mindre reguleringsfejl.

λ_j er en sekvens af reguleringsvægte. Værdien af λ_j afhænger af den aktuelle kost af σ_y^2 og σ_x^2 i lukket sløjfe.

Den vægtede version af ligning (2.61) med matricen notation er

$$\bar{J} = E [(\mathbf{y}_t - \mathbf{w}_t)^\top \mathbf{Q}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{w}_t) + \mathbf{x}_t \Lambda \mathbf{x}_t] \quad (2.62)$$

Matricen Λ indeholder sekvensen af reguleringsvægtene λ_j i diagonalen. Vægtningmatricen \mathbf{Q}_t gør det muligt f.eks. at vægte fremtidige værdier lavere i forhold til af prædiktionshorisonten, f.eks. ved at anvende den inverse kovariansmatricen af prædiktionsfejlen.

Anvendes parameterne N_1 , N_2 , N_u og λ_j i ligning (2.60 skrives impulsresponsionsfunktionensmatricen som

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} h_{1,t+N_1} & 0 & \cdots & 0 \\ h_{2,t+N_1+1} & h_{1,t+N_1+1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_u,t+N_1+N_u-1} & h_{N_u-1,t+N_1+N_u-1} & \cdots & h_{1,t+N_1+N_u-1} \\ h_{N_u+1,t+N_1+N_u} & h_{N_u,t+N_1+N_u} & \cdots & h_{2,t+N_1+N_u} + h_{1,t+N_1+N_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_2-N_1+1,t+N_2} & h_{N_2-1,t+N_2} & \cdots & \sum_{i=0}^{N_2-N_1-N_u+2} h_{i,t+N_2} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Ved at betragte ligning (2.63) ses det, at vælges $N_u = 1$ reduceres ligning (2.63) til et udtryk, der minder kraftigt om ligning (2.60). Forskellen er blot at udtrykket begynder ved den mindste output horisont (N_1).

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} h_{1,t+N_1} & 0 & \cdots & 0 \\ h_{2,t+N_1+1} & h_{1,t+N_1+1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_2,t+N_2} & h_{N_2-1,t+N_2} & \cdots & h_{1,t+N_2} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Endvidere bliver vektoren $\mathbf{n}_t = [n_{N_1,t}, \dots, n_{N_2,t}]^\top$.

Siden at $\bar{J} = E[J]$ og $y_t = \hat{y}_t + \tilde{y}_t$, hvor \hat{y}_t og \tilde{y}_t er stokastisk uafhængige gør, at den uvægtede kostfunktion bliver

$$J = (\mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t)^\top (\mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t) + \mathbf{x}_t^\top \Lambda_t \mathbf{x}_t + E[\tilde{\mathbf{y}}_t^\top \tilde{\mathbf{y}}_t] \quad (2.65)$$

For at finde den række input der minimerer kostfunktionen i ligning (2.65) sættes den første afledede med hensyn til x_t lig nul. Det vil sige

$$\frac{\delta J}{\delta x_t} = 0 \quad (2.66)$$

Herved findes input sekvensen, som løsningen til

$$\mathbf{x}_t = -[\mathbf{H}_t^\top \mathbf{H}_t + \Lambda_t]^{-1} \mathbf{H}_t^\top (\mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t) \quad (2.67)$$

Det er dog kun det første element af vektoren \mathbf{x}_t , som implementeres til tidspunktet t .

For at undgå stationære fejl anvendte Clarke et al. (1987) en regulator baseret på en Moving-Average opskrivning af regulatoren. Det vil sige en model som består af differensprocessen til input og output. I Palsson et al. (1994) og Nielsen (2002) er der anvendt en mere generel beskrivelse, som benytter en filtreret version af inputsignalet. Filteret skal konstrueres sådan, at det har en stationær forstærkning på 0.

$$\bar{x}_t = \frac{P_n(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} x_t \quad (2.68)$$

Det filtrerede input kan blive dekomponeret i to dele, som det også skete med MV_0 - og PZ -regulatorerne med diophantineligningen. Den ene del indeholder en sum af tidligere input og den anden del indeholder en sum af nuværende og fremtidige input. Det vil sige

$$\bar{\mathbf{x}}_t = \mathbf{F}\mathbf{x}_t + \mathbf{g}_t \quad (2.69)$$

hvor

$$\bar{\mathbf{x}}_t = [\bar{x}_t, \dots, \bar{x}_{t+N_u-1}]^\top \quad (2.70)$$

$$\mathbf{x}_t = [x_t, \dots, x_{t+N_u-1}]^\top \quad (2.71)$$

$$\mathbf{g}_t = \bar{\mathbf{x}}_{t|x_t=0} \quad (2.72)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ f_2 & f_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_u} & f_{N_u-1} & \cdots & f_1 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

I det tilfælde hvor $\bar{x}_t = \nabla x_t = x_t - x_{t-1}$ bliver \mathbf{g}_t og \mathbf{F} fra hhv. ligning (2.72) og (2.73)

$$\mathbf{g}_t = [x_{t-1}, 0, \dots, 0]^\top \quad (2.74)$$

og

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & \ddots & & \vdots \\ 0 & -1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Ved at anvende den filtrerede version af inputtet i ligning (2.69) i kostfunktionen fra ligning (2.65) bliver kostfunktionen for det filtreret input

$$J = (\mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t)^\top (\mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t) + (\mathbf{F}\mathbf{x}_t + \mathbf{g}_t)^\top \Lambda_t (\mathbf{F}\mathbf{x}_t + \mathbf{g}_t) + E[\tilde{\mathbf{y}}_t^\top \tilde{\mathbf{y}}_t] \quad (2.76)$$

og inputsekvensen er herved givet

$$\mathbf{x}_t = -[\mathbf{H}_t^\top \mathbf{H}_t + \mathbf{F}^\top \Lambda_t \mathbf{F}]^{-1} [\mathbf{H}_t^\top (\mathbf{n}_t - \mathbf{w}_t) + \mathbf{F}^\top \Lambda_t \mathbf{g}_t] \quad (2.77)$$

2.4.6 Adaptiv regulering

De modelbaserede stokastiske regulatorer kan gøres adaptive, ved at ændre dem til selvindstillelige regulatorer. De selvindstillelige regulatorer adapterer deres reguleringsparameter fra processen, men det er en forudsætning at modelordenen på forhånd er blevet bestemt. Regulatorernes parametre estimeres ved en rekursion, rekursionen kan foregå på to måder *explicit* eller *implicit*.

Eksplicitte selvindstillere

Den eksplicitte metode er baseret på et estimat af modelparametrene. Hvor ordenen kendes fra modelleringen og modelparametrene kan estimeres online f.eks. med rekursive mindste kvadraters metode (RLS) udvidet med glemselfaktor. RLS er opbygget af tre elementer, en parameter varians matrice P , en forstærkning K og et *online* parameter estimat $\hat{\theta}$. Nedenstående RLS algoritme er udvidet med hukommelsesfaktoren λ , som er en eksponentiel vægtning. Er $\lambda = 1$ vægtes alle data lige højt (Åstrom og Wittenmark, 1995).

$$\hat{y}_t = \Phi_{t-1}^\top \hat{\theta}_{t-1} \quad (2.78)$$

$$\hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + K_t(y_t - \hat{y}_t) \quad (2.79)$$

$$K_t = P_t \Phi_t = \frac{P_{t-1} \Phi_t}{\lambda + \Phi_t^\top P_{t-1} \Phi_t} \quad (2.80)$$

$$P_t = \frac{(I - K_t \Phi_t^\top) P_{t-1}}{\lambda} \quad (2.81)$$

Hvor hukommelsestidskonstanten er (Madsen, 1998)

$$T_0 = \frac{1}{1 - \lambda} \quad (2.82)$$

Disse modelparametre omregnes efterfølgende til regulator parametre og styresignal. De mest almindelige eksitations signaler til rekursiv estimation, i.flg. Wellstead og Zarrop (1995), er firkantet bølge, pseudo random binary signal (PRBS), ligelig fordelt støj, normalt fordelt støj.

Implicitte selvindstillere

Ved den implicitte metode beregnes regulatorparameterne direkte. Det vil sige at faktorene i polynomierne R , Q og S , bestemmes uden først at beregne modelparameterne. Denne metode er relativ hurtig, men antallet af parametre i R stiger med tidsforsinkelsen (k). Dette skyldes at polynomiet G er indeholdt i R og ordenen af G er givet ved

$$\text{ord}(G) = k - 1 \quad (2.83)$$

Derfor stiger antallet af parametre, og et øget antal parametre øger usikkerhed i parameterestimerne. I systemer med tidsforsinkelser, er det derfor bedre at anvende den eksplicitte selvindstillere.

Parameterestimerne kan lige som ved den eksplicitte selvindstillere, bestemmes rekursivt med RLS.

Dataopsamling og databeskrivelse

Alle data blev opsamlet fra SRO¹ systemet på HAV i forsøgsperioden. Dataopsamlingsystemet udtog målinger fra SRO systemet hvert 15. sekund og lagrede middelværdien af det seneste minut, som det pågældende minuts værdi. Dataserien blev kun genereret for forsøgsdagene (mandag-fredag) og ikke for weekenden.

I den første og anden forsøgsuge blev der lavet dynamiske trinrespons forsøg, for at se hvordan forbrændingen, ovn og kedel reagerede over for disse ændringer, forsøgsplanen ses i tabel 3.1. Forbrændingsreguleringen var i manuel under forsøgene, så trinresponsforsøgene gav et åbent sløjfe respons. Om aftenen blev reguleringen sat tilbage i automatik.

Hele den tredje uge var reguleringen i automatik, for at sikre en stationær drift under belægningsforsøgene. Belægningsforsøgene havde intet at gøre med de dynamiske forsøg de første to uger. Ved belægningsforsøgene skulle driften og driftspunktet holdes stabilt hele ugen. I dette speciale bliver denne tredje uge brugt som reference til hvordan reguleringen kører normalt.

De foreliggende data er fra 28/2-2006 til 3/3-2006, fra 6/3-2006 til 10/3-2006 og fra 13/3-2006 til 17/3-2006. Der er data fra hele døgnet i en forsøgsuge, det vil sige 7200 minutters observationer pr. uge, 21600 observationer i alt.

¹Styring, regulering og overvågning

Uge 9					
	Mandag 2006-02-27	Tirsdag 2006-02-28	Onsdag 2006-03-01	Torsdag 2006-03-02	Fredag 2006-03-03
Formiddag	Ingen dataopsamling	Pusher	Primærluft zone 1	Primærluft zone 2	Primærluft zone 3
Eftermiddag	Ingen dataopsamling	Pusher	Primærluft zone 1	Primærluft zone 2	
Uge 10					
	Mandag 2006-03-06	Tirsdag 2006-03-07	Onsdag 2006-03-08	Torsdag 2006-03-09	Fredag 2006-03-10
Formiddag	Lav brændværdi på affald	Rist	Primærluft fra zone 1 til zone 3	Rist og primær luft zone 2 samtidig	Sekundær luft
Eftermiddag	Sekundær luft	Rist	Primærluft fra zone 1 til zone 3	Rist og primær luft zone 2 samtidig	
Uge 11					
	Mandag 2006-03-13	Tirsdag 2006-03-14	Onsdag 2006-03-15	Torsdag 2006-03-16	Fredag 2006-03-17
Formiddag	Gundet belægningsforsøg blev forbrændingen forsøgt holdt så stabil, som mulig under forsøgene. Setpunktet for dampen var det samme hele ugen				
Eftermiddag					

Tabel 3.1: Forsøgsplanen i perioden for dataopsamlingen. Under de pågældende dage står navene på de input, hvormed der blev udført trinresponsforsøg.

3.1 Målepunkter

De målinger der indgår i dataanalysen og modelleringen, er de input, som operatørene normalt anvender, når de skal ændre i driftstilstande. En beskrivelse af operatørenes handlemåder kan læses i afsnit 1.2.5 på side 8.

De primære output fra forbrændingsprocessen, som gør at operatørene griber ind i processen er:

Flammefronten [pixel rækker.]

Flammefronten er ikke en måling der eksisterer i dag. Der er derfor blevet udviklet en algoritme til bestemmelse af flammefronten. Algoritmen er beskrevet i afsnit 4 på side 37.

Damproduktionen [kg/s]

Bestemmelse af damproduktionen foregår ved, over en blænde, at måle differencetrykket, omregne dette til en massestrøm, og samtidig hermed at korrigere for dampens tryk og temperatur iht. damptabellen.

Når operatørene finder sig nødsaget til at gribe ind i forbrændingsprocessen, anvender de ofte nedenstående input:

Pusherhastighed [kg/h]

Pusherhastighedens enhed [kg/h] angiver den oliemængde, der strømmer til hydraulikcylinderen og er dermed et udtryk for pusherhastigheden. Pusheren kører uanset denne oliemængde så hurtigt som muligt tilbage til udgangspositionen, således at oliemængden alene er et udtryk for den fremadskubbende hastighed.

Primærluften under rist 1, rist 2 og rist 3. [Nm³/h]

Til måling af luftmængden anvendes et Pitotrør. Et Pitotrør måler både det statiske og det dynamiske tryk. Det dynamiske tryk omregnes til en hastighed og ved at kende tværsnittet af kanalen og korrigere for temperaturen, fås volumenstrømmen i Nm³/h.

Ristehastigheden [kg/h]

Ristehastigheden måles ligesom pusherhastigheden i [kg/h], hvilket svarer til den oliemængde der strømmer til hydraulikcylinderen og er dermed et udtryk for hastigheden.

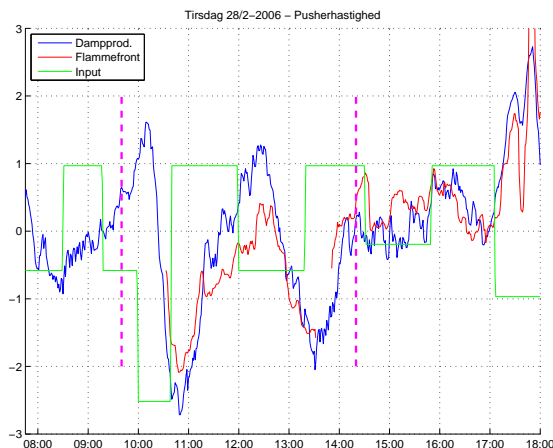
3.2 Udvælgelse af datasæt

Trinresponsforsøgene med de enkelte input pusherhastighed, primærluft under ristene og ristehastigheden blev udført af DONG Energy A/S. Alle forsøgene begyndte med at forbrændingsreguleringen blev sat i manuel, det vil sige at reguleringssløjfen ikke længere havde indflydelse på de før nævnte input.

Til hvert af de nedenstående afsnit er der en hændelseslog i bilag C.1 for det pågældende trinresponsforsøg. Dog er væsentlige hændelser medtaget nedenfor.

3.2.1 Trinresponsforsøg med pusherhastigheden

Det første trinresponsforsøg blev udført med pusherhastigheden, se figur 3.1. Ved det første trin kl. 8:30, responderede systemet ikke lineært, som var tilfældet ved de følgende trin. Efter kl. 14:00 havde responset ikke længere nogen plausibel sammenhæng mellem ændring i input og output. Det er derfor data i tidsrummet kl. 9:40 til 14:20, der blev udvalgt til dataanalysen. Tidspunktet kl. 9:40 blev valgt, idet det var 20 minutter før den første medtagne trinændring.



μ_{damp}	3,6
σ_{damp}	0,59
μ_{flamme}	245,2
σ_{flamme}	34,0
μ_{pusher}	38,8
σ_{pusher}	6,4

Tabel 3.2: Værdier for dataserien mellem de to lodrette, stiplede linier i figur 3.1. Data er centreret og skaleret.

Figur 3.1: Trinresponsforsøg med pusherhastigheden blev udført i tidsrummet fra kl. 7:45 til kl. 18:00. Tidsrummet der blev udvalgt til dataanalysen kl. 9:40 til kl. 14:20.

Flammefronten i figur 3.1 begyndte først kl. 10:33. De manglende data i tidsrummet 13:32 til 13:51, skyldtes manglende brug af `try and catch` fejl-funktionen i MATLAB. Flammefronten følger ændringerne i dampproduktionen godt.

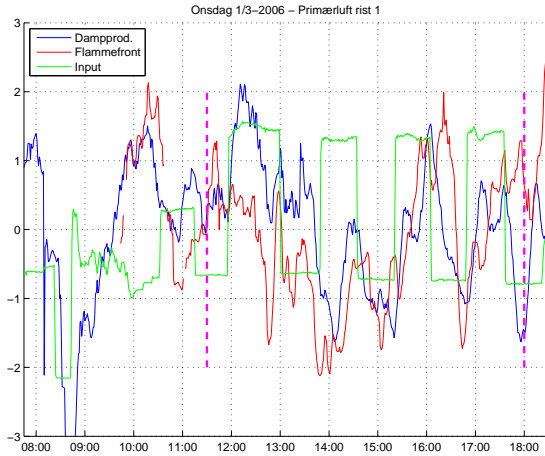
I afsnit 5.2 er der lavet en model for dampproduktionen med pusherhastigheden som input.

3.2.2 Trinresponsforsøg med primærluft til rist 1

Afgrænsningen af data til trinresponsforsøgene i primærluften for rist 1, blev sat til tidsrummet mellem kl. 11:30 til kl. 18:00. Der skete et trip i dampkredsen kl. 8:10 pga. for høj temperatur på by-pass stationen. Et trip i denne sammenhæng betød, at ovnen kørte ned til et minimum, en sikkerhedstilstand, så der ikke skete yderligere energiudvikling. Trippet betød, at ovnen skulle starte op igen, hvilket skete kl. 8:50, og den derefter skulle finde sin stabile tilstand. Dette var opnået kl. 11:30.

Af figur 3.2 fremgår det, at et trin op i primærluften under rist 1 umiddelbart fik dampproduktionen til at stige. Det første trin lidt før kl. 12:00, fik dampproduktionen til at stige kortvarigt og returnere til udgangspunktet efter ca. 60 timer, men de efterfølgende trinrespons viste ikke tilsvarende respons.

Samtidig med at der blev udført trinresponsforsøg på primærluften til rist 1, foretog Force Technology en validering af luftflowmålingerne. Det viste sig at visningen i SRO systemet ikke stemte særlig godt overens med de vali-



μ_{damp}	3,4
σ_{damp}	0,50
μ_{flamme}	244,5
σ_{flamme}	18,9
$\mu_{primair1_{kal}}$	1189,0
$\sigma_{primair1_{kal}}$	171,3
$\mu_{primair1_{SRO}}$	2618,7
$\sigma_{primair1_{SRO}}$	1074,3

Tabel 3.3: Værdier for dataserien mellem de to lodrette, stiplede linier i figur 3.2. Data er centreret og skaleret.

Figur 3.2: Forsøg med primærluften til rist 1 udført fra kl. 7:45 til kl. 18:00.

derende målinger (Elsam Engineering A/S, 2006), regressionsligningen blev $x_{kal} = 0,1667 \cdot x_{SRO} + 778$. Derfor blev variationen af inputtet i realiteten væsentlig mindre end tilsigtet. Trinstørrelsen, der var noteret i hændelsesloggen, gik fra 1500 [Nm³/h] til 3500 [Nm³/h], men i forhold til den kalibrerede måling, svarede det kun til trin mellem 1028 [Nm³/h] og 1361 [Nm³/h]. Det vil sige, et trin op i SRO-visningen på 133%, reelt kun øgede luftmængden med fjerdedel heraf, 33%. Dette kan være årsagen til at responset i dampproduktionen ikke var så entydigt. På trods af at der kun skete en ændring af luftflowet på en fjerdedel af det ønskede, ses i figur 3.2 en stigning af dampflowet, når der laves en trinændring i luftmængden.

Flammefronten varierede på nogenlunde samme vis som damp, mere herom senere.

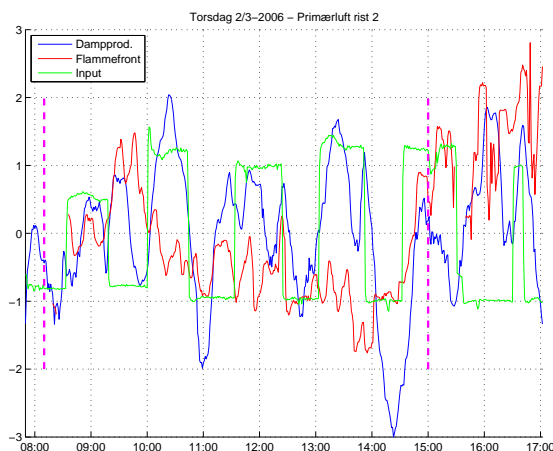
På baggrund af responsets dårlige reproducerbarhed samt misvisningen af luftflow, vil primærluften under rist 1 ikke blive anvendt i en nærmere analyse af forbrændingsdynamikken.

3.2.3 Trinresponsforsøg med primærluft til rist 2

Anlæggets forbrændingsregulering blev sat i manuel kl. 7:50. Efter en stabiliseringsperiode på 20 minutter, blev data udvalgt til dataanalysen fra kl. 8:10. Slut tidspunktet for denne udvalgte dataserie var kl. 15:00, da flammefronten herefter var dårlig estimeret.

Der var i hændelsesloggen for dette forsøg ingen bemærkninger ud over, at der muligvis skiftedes brændsel til noget med lavere brændværdi kl. 13:30 og kl.

14:00. På disse tidspunkter skete der samtidig et dyk i dampproduktionen, se figur 3.3. Brændselsændringen kl. 14:00 faldt sammen med et trin ned i luftmængden til rist 2. Det var muligvis årsagen til at dampproduktionen efterfølgende lavede testperiodens største fald i dampproduktionen.



μ_{damp}	4,0
σ_{damp}	0,37
μ_{flamme}	273,1
σ_{flamme}	26,3
$\mu_{primair2_{kal}}$	2988,0
$\sigma_{primair2_{kal}}$	1133,3
$\mu_{primair2_{SRO}}$	3307,0
$\sigma_{primair2_{SRO}}$	1011,0

Tabel 3.4: Værdier for dataserien mellem de to lodrette, stiplede linier i figur 3.3. Data er centreret og skaleret.

Figur 3.3: Forsøg med primærluften til rist 2 er udført fra kl. 7:50 til kl. 16:42.

I henhold til Elsam Engineering A/S (2006) foretog Force Technology også kalibrering af luft flow måleren under dette forsøg, her blev regressionskoefficienten betydelig højere og tættere på 1 end ved kalibrering af luftflowmåleren til rist 1. Regressionsligningen blev $x_{kal} = 1,1209 \cdot x_{SRO} - 718,79$, hvilket betyder at ændringen i SRO-systemet nogenlunde svarer til den reelle ændring af luftflowet.

Det bemærkes i figur 3.3, at flammefronten ikke varierer på samme måde som dampproduktionen.

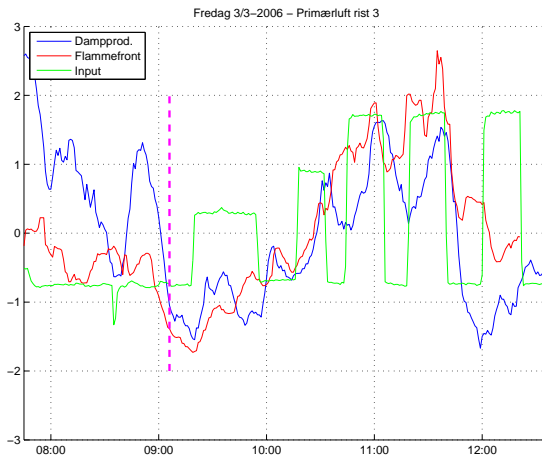
I afsnit 5.3 er der lavet en model for dampproduktionen med primærluften under rist 2 som input.

3.2.4 Trinresponsforsøg med primærluft til rist 3

Fredag den 3. marts skulle der laves trinresponsforsøg på rist 3, men inden da tog Force Technology billeder med et IR kamera under ristene. For at dette kunne lade sig gøre blev der slukket for luften under den pågældende rist, hvilket var i perioden fra kl. 8:36 til 8:39. Afgrænsningen af datasættet til analysen var fra kl. 9:06, en halv time efter indgrebet i primærluften, til anlægget blev sat i automatik igen kl. 13:00.

Det første trin gennemførtes kl. 9:17, hvor dampproduktionen steg med det samme, for at falde igen ca. 20 minutter efter. Samtidig med det første trin

kom der en langsom oversvingning af dampproduktionen, se figur 3.4. Dette skete fordi affaldet kom langt ned i ovnen før det begyndte at brænde, derved oplagredes en god kapacitet af ikke afbrændt affald på risten. Det var med til at skubbe forbrændingszonen ned på rist 3, så luften for en væsentlig begyndning for dampproduktionen.



μ_{damp}	3,3
σ_{damp}	0,33
μ_{flamme}	281,6
σ_{flamme}	43,0
$\mu_{primair3}$	2410,9
$\sigma_{primair3}$	1303,0

Tabel 3.5: Værdier for dataserien mellem de to lodrette, stiplede linier i figur 3.4. Data er centreret og skaleret.

Figur 3.4: Forsøg med primærluften luften til rist3 udført fra kl. 7:45 til kl. 13:00.

På grund af affaldet ved forsøget bevægede sig langt ned mod slaggefaldet, samt at varigheden af trinene var kort, vurderes det at dette forsøg ikke kan bruge i en lineariseret model omkring et driftpunkt.

3.2.5 Trinresponsforsøg med ristehastigheden

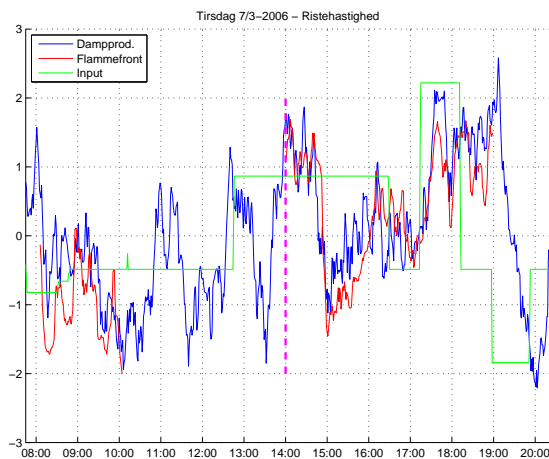
Tirsdag den 7 marts 2006 blev der ikke kun udført trinresponsforsøg for at se på dynamikken i trinresponsen, men også i forbindelse med det sideløbende projekt om belægninger på kedelrør. I belægningsforsøget skulle ændringen holdes i længere tid, i dette tilfælde 3 timer ved hver ristehastighed. Som det fremgår af figur 3.5, blev de to første ristehastighedsniveauer udført i forbindelse med belægningsforsøgene og først fra kl. 16:30 steg hyppigheden af forsøgene til ca. hver 45. minut. Selvom ristehastigheden kunne styres individuelt til rist 1, rist 2 og rist 3, kørte de i et fast forhold til hinanden. Ved ristehastighedsforsøget ændredes hastigheden på alle tre riste samtidigt og hastighedsforholdet mellem risterne blev bevaret.

Under de første 6 timer af forsøget fremgår det af figur 3.5, at der var en langsomt varierende egen dynamik i ovnrummet. Alle input til forbrændingen var konstante i denne periode, men alligevel varierede dampproduktionen, med

en periodelængde på ca. halvanden til to timer. Der forligger i data ikke lignende perioder, hvor input har været konstante så længe som her.

Flammefronten er desværre ikke blevet estimeret fra kl. 10 til 14, men følger ellers variationen af dampproduktionen. Til dataanalysen anvendes kun data i perioden fra kl. 14:00 til kl. 20:22, det vil sige fra flammefront estimatet fungerer igen til en halv time efter det sidste trin. Denne afgrænsning er dog lidt uheldig for flammefronten, da den ikke er estimeret efter kl. 19:00.

Der er desværre ikke mange trin for denne forsøgsperiode, derfor vil ristehastigheden ikke blive brugt som input til en model.



μ_{damp}	3,6
σ_{damp}	0,32
μ_{flamme}	262,4
σ_{flamme}	17,7
$\mu_{ristHast}$	41,9
$\sigma_{ristHast}$	4,9

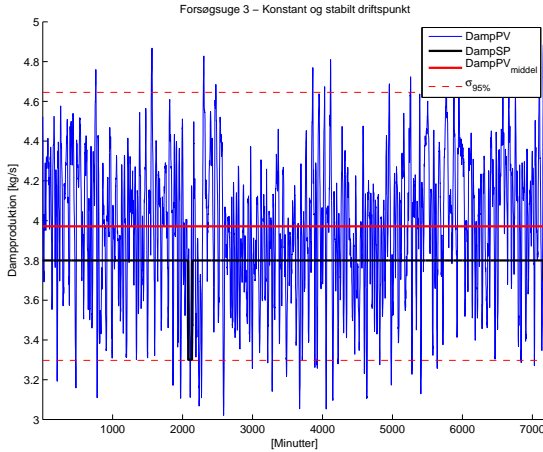
Tabel 3.6: Værdier for dataserien mellem de to lodrette, stiplede linier i figur 3.5. Data er centreret og skaleret.

Figur 3.5: Forsøg med ristehastigheden udført fra kl. 7:45 til kl. 19:52..

3.2.6 Den nuværende regulering på HAV

Som tidligere nævnt blev, der i den 3. forsøgsuge ikke ændret driftspunkt eller regulatorindstillinger hele ugen. Derfor kan denne uge tages som et eksempel på, hvordan den nuværende regulering fungerer. Der var i denne uge ingen bestemmelse af flammefronten. I figur 3.6 ses ugens dampproduktion, samt sætpunktet, middelværdien og et 95% konfidensinterval.

Det ses i tabel 3.7, at reguleringen medfører et offset mellem middelværdi og sætpunkt på godt 4,5%, samt at spredningen i et 95% konfidensinterval udgør 17% af middelværdien. Hvis offset og varians af dampproduktionen kan mindskes kan lastpunktet hæves. Dette er der potentiale for, når sætpunktet for dampproduktionen på 3,8 [kg/s] sammenlignes med den oprindelige dimensionering af anlæget, hvor det maximale kontinuerte lastpunkt (sætpunkt) er 4,5 [kg/s] (BS Miljøteknik A/S, 1991).



SP_{damp}	3,8
μ_{damp}	3,97
σ_{damp}	0,34
$\sigma_{95\%}$	0,67

Tabel 3.7: Værdier for hele ugens dataserie, se figur 3.6.

Figur 3.6: Belægningsforsøg på kedelrør, samme driftspunkt og regulatorindstillinger hele ugen.

3.2.7 Korrektion af data

Den eneste måling som har manglende observationer er estimeret af flammefronten. Målingerne fra SRO systemet har ingen manglende observationer i forsøgsperioden.

Der hvor flammefronten har manglende observationer er observationerne udeladt. Dette gælder også hvis flammefronten er blevet analyseret med andre målinger, fx. ved krydskorrelation, her er observationerne for begge målinger udeladt, såfremt at flammefronten ikke er estimeret.

Identifikation af flammefronten

Der eksisterede ikke en kvantitativ bestemmelse af flammefronten, derfor var det nødvendigt at udvikle en algoritme til dette speciale.

Algoritmen der er blevet udviklet og anvendt i dette speciale bestemte overordnet flammefrontens placering ved anvendelse af en tærskelværdi og en kantdetektion.

For at kunne opsamle billederne fra kameraet, blev der i den første forsøgsuge anvendt en bærbar PC, som var udstyret med et framegrabber kort. Video indgangen på framegrabberkortet, blev tilsluttet videosignalet fra kameraet, uden dette medførte manglende eller forstyrret signal til operatørene.

I den første forsøgsuge kørte flammefrontsanalysen online i MATLAB. Algoritmen var opbygget med `callback`¹ funktioner, så det løbende var muligt at ændre parametrene for analysen, når der blev observeret forstyrrelser. De vigtigste MATLAB funktioner ses i bilag B.1. Parameterændringerne skete uden indflydelse på det billede, der blev gemt, da billedet blev gemt før analysen blev påbegyndt. Ved at anvende `try and catch` funktionen i MATLAB, stoppede fejl i billedanalysen ikke algoritmen. Framegrapperkortet tog 25 frames pr. sekund, dette var en hardware opsætning, som ikke kunne ændres gennem MATLAB. Det betød at der ofte opstod en lille horisontal forskydning af rækkerne ned gennem billedet, da det analoge videosignal ikke havde nået at opdatere hele billedet. Derfor blev det billede, som blev analyseret og gemt et middelbillede af 10 frames.

¹Funktioner der kaldes på ny ved hvert funktionskald, f.eks. fra en timerfunktion

I den anden forsøgsuge blev den stationære dataopsamlings PC anvendt. Med hjælp fra Force Technology blev alle MATLAB funktionerne konverteret til C++ koder, så det kunne afvikles uden installation af MATLAB. En tidsserie af flammefrontsestimater for alle forsøgsdagene, ses i bilag B.3.

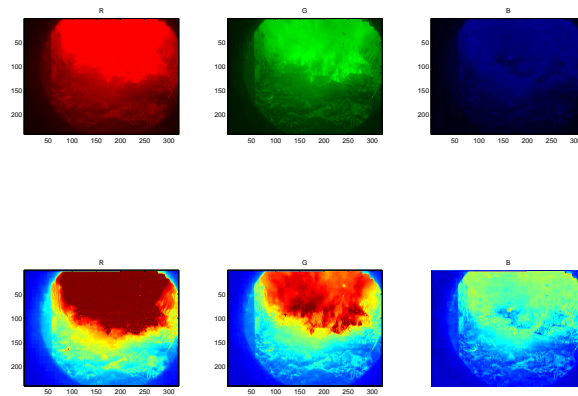
Selve videosignalet kan splittes op i de tre grundfarver rød, grøn og blå, denne opsplitning kaldes et RGB signal. Den første flammefarve der kan ses er den røde farve, der anes allerede ved 550 °C. Flammen fra affaldsforbrændingen er ofte meget orange eller gul, det vil i henhold til tabel 2.2 sige omkring 1100°C. Orange og gule farver består, hvis de opdeles i RGB-farverne, hovedsagelig af den røde farve med bidrag fra den grønne farve. Blandes der blå i den røde og grønne farveblanding, bliver flammens farve lysere og ender med at blive hvid.

I figur 4.1 ses et billede fra det første besøg på Haderslev Kraftvarmeværk, den 8. februar 2006². I figurene 4.2 og 4.3 ses samme billede, men opspiltet i RGB farverne. Af figurene 4.2 og 4.3 fremgår det at den røde og den grønne farve har store gradienter i pixelværdierne, som gør det muligt at afgrænse flammefronten.

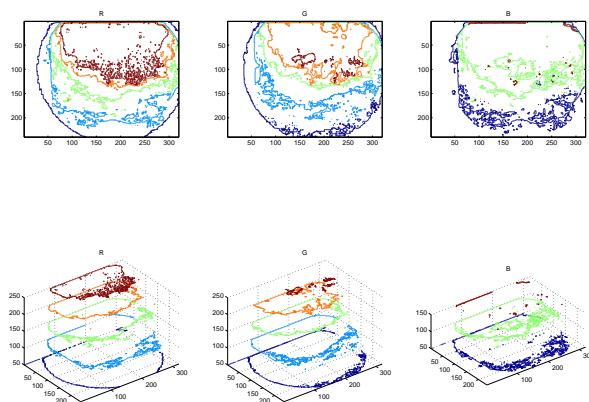


Figur 4.1: Billede fra det indledende besøg den 8. februar 2006.

²Det vil sige inden forsøgene i begyndelsen af marts.



Figur 4.2: Samme billede som i figur 4.1, men opsplittet i farverne rød, grøn og blå. I den nederste række vises samme billede blot med en anden farveskala i forhold til pixelværdierne.



Figur 4.3: Konturplot af RGB-farverne i forhold til pixelværdierne.

4.1 Forstyrrelser i flammen og af flammefronten

Under forsøgene i den første uge, blev der blevet observeret en række forstyrrelser. Nogle forstyrrelser skete i flammen, mens andre var forbeholdt flammefronten. De forstyrrelser som var relateret til flammen var:

1. Sort røg.
2. Sekundærluft, der blæste hul i flammen.
3. Flyvende partikler.

De forstyrrelser der var forbeholdt flammefronten var:

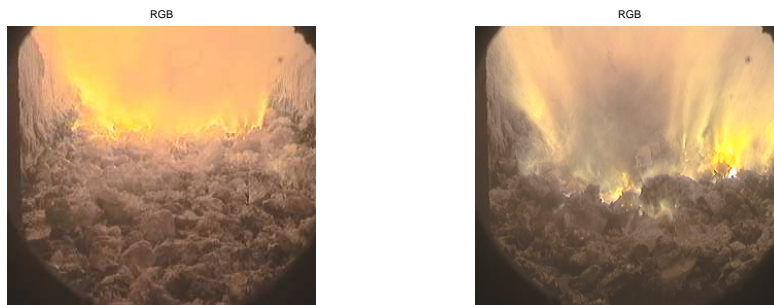
1. Brændende affald, som brændte efter flammefronten.
2. En klump brændende affald, som lokalt trak fronten længere ned mod slaggefaldet.
3. Genskin i affaldet fra en intens forbrænding.
4. Forbrændingen pulserede, hvilket skyldtes sandsynligvis positionen på vipperisten.
5. En klump svært brandbart, som skabte hul i flammefronten.
6. Forbrændingen foregik i større eller mindre klumper.

Punkterne 1-4 blev primært observeret, når forbrændingen lå tæt på indfødningen, mens punkterne 5 og 6 primært blev observeret, når forbrændingen var langt nede mod slaggefaldet. I de situationer hvor forbrændingen var trukket langt ned mod slaggefaldet, var det sværest at lave et estimat af flammefronten. Ved det rigtige valg af tærskelværdi, kantdetekterings algoritme og filtrering af estimatet, kunne et acceptabelt estimat af flammefronten genereres.

4.2 Valg af tærskelværdi

I den første forsøgsuge varierede forstyrrelserne af flammefronten dagene imellem. Der var dage, som var rolige og andre, hvor der var større forstyrrelser af flammefronten. En af disse dage var fredag den 3/3-2006, hvor der var en rolig og tydelig forbrænding til at begynde med. Senere samme dag, kom der en forstyrrelse, som gjorde det svært at estimere en flammefront, se hhv. figur 4.4 og 4.5. Forstyrrelsen bestod i en stor klump svært brandbart materiale, der lavede et hul i flammefronten.

Farvene rød, grøn og blå kunne hver især antage en pixelværdi på 0 til 255. Opdeltes dette spand i pixelværdier i intervaller på 4 pixels, opstod intervallerne 0-3, 4-7, 8-11 ect. For hver række i billedet taltes antallet af pixels i intervallet.

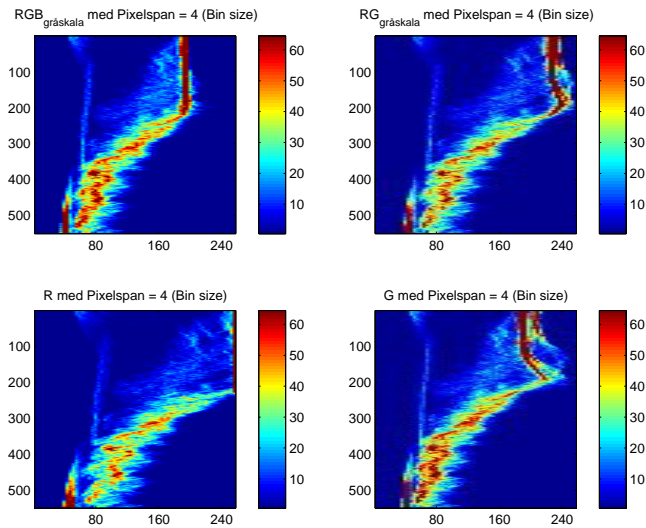


Figur 4.4: En situation fredag den 3/3-2006 kl. 8:22, hvor forbrændingen var normal. **Figur 4.5:** En situation fredag den 3/3-2006 kl. 11:04, hvor der var en tydelig forstyrrelse i placeringen af flammefronten.

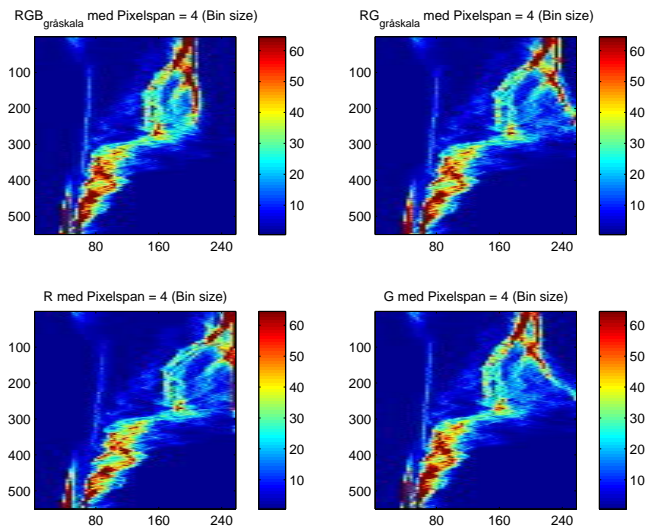
Ud fra dette dannedes det histogramfiske plot, som kan ses i figur 4.6 og 4.7. Flammefarverne orange og gul bestod hovedsagelig af rød og grøn, derfor var det kun disse farver, der blev analyseret. Indgik der mere end en farve i histogrammet, vægtedes hver farve med $1/(\text{antal farver})$, således at pixelspandet på 0-255 hele tiden blev overholdt. En sådan skalering af billedet kaldes et *gråskala* billede.

I histogramplottet nederst til venstre i figur 4.6 ses at majoriteten af røde pixels var samlet i intervallet 252-255, for de rækker hvor flammen syntes placeret. I dette tilfælde ville en tærskelværdi for den røde farve på 224 placere flammefronten tilfredstillende.

I den situation hvor der kom en forstyrrelse ændredes intensiteten i billedet, som det fremgår af figur 4.7. En tærskelværdi for den røde farve på 224 var ikke tilstrækkelig. Men en tærskelværdi for den røde og grønne farve på 175 viste sig god i denne situation. Beslutningen om tærskelværdiens størrelse blev taget ud fra konturplottet i bilag B.2. Og i overvejene grad fordi den filtrede version af flammefrontestimatet med denne tærskelværdi opretholdt et pænt estimat af flammefronten, se i afsnit 4.4.



Figur 4.6: Histogramplot for hver række i billedet i figur 4.4, for farverne RGB, RG, R og G.



Figur 4.7: Histogramplot for hver række i billedet i figur 4.5, for farverne RGB, RG, R og G.

4.3 Design af kantdetekteringsalgoritme

Ved at designe algoritmen til at afgrænse flammen hele vejen rundt er det muligt at inkludere forstyrrelser i flammen, som f.eks. sort røg og partikler. Herved kan flammens intensitet beregnes inklusiv forstyrrelser. Det formodes, at det er en sammenhæng mellem en lav flamme intensitet, pga. af sort røg, og en høj CO værdi.

Algoritmen konverterer billedet til et binært billede, bestående af 1 i pixels, der overskrider tærskelværdien og kan karakteriseres som flamme. Alle pixels under tærskelværdien sættes til 0.

Kanten mellem flammen og det der *ikke* er flamme, kan være temmelig ujævn. For at glatte denne kant ud kan der udføres en erosion af flammen efterfulgt af en dilation af flammen eller omvendt.

Erosionen og dilationen bliver udført som en morfologisk transformation af det binære billede. En morfologisk transformation sker ved at føre et strukturelement over billedet (Carstensen, 2002). Strukturelementet er en matrice med et ulige antal rækker og kolonner, således at matricen har en centercelle. Der kan i de omkring liggende celler fyldes 1 taller i afhængig af formålet. Her i specialet har der været anvendt 3×3 matrice, udfyldt med 1 taller.

Der hvor centercellen i strukturelementet møder en *flamme* pixel, en pixel med et 1 tal, ændres pixels i det binære billede til 1 efter samme mønster som strukturelementet. Denne operation kaldes dilation.

Ved erosion sker der ligeledes en test i det binære billede, når centercellen i struktur elementet møder et 1 tal i billedet. Pixlen beholdes kun, hvis det omkringliggende mønster af 1 taller stemmer overens med mønsteret i strukturelementet. Ved erosion fjernes de pixels, der ikke opfylder kriteriet for strukturelementet.

Afhængig af formålet kan der begyndes med enten dilation eller erosion, og afsluttes med den modsatte morfologiske transformation det tilsvarende antal gange. Erosion efterfulgt af dilation kaldes en *åbning*, mens en dilation efterfulgt af en erosion kaldes en *lukning*.

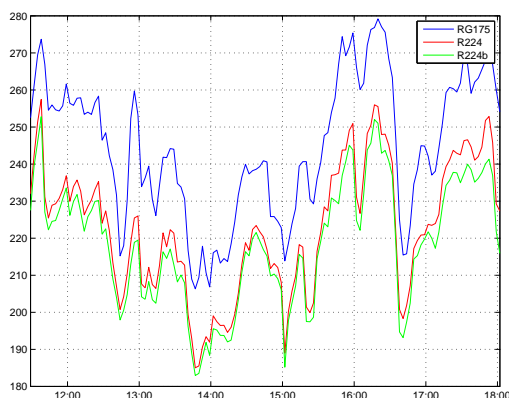
En åbning af flammen fungerer bedst, da der lige udenfor flammefronten er en del pixelværdier, der enkeltvis overskrider tærskelværdien. For at de ikke skal høre med til flammefronten og trække den ned, fjernes eller blotlægges de med en åbning. Herefter beholdes kun den største flamme og den område som *ikke* er flamme.

Algoritmen der er blevet anvendt her i specialet har følgende fremgangsmåde, MATLAB funktionen ses i bilag B.1.1.2:

1. Først konverteres billedet til et binært billede på basis af tærskelværdien, hvor 1 er flamme og 0 er *ikke* flamme.
2. Billedet inverteres, så flamme er 0 og *ikke* er 1.
3. Der gennemføres 2 gange erosion med det valgte strukturelement.

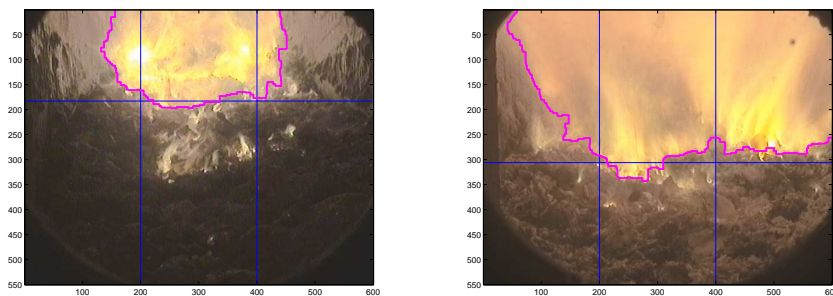
4. Alle selvstændige områder af med 1 taller identificeres og kun det største område beholdes.
5. Dette område dilateres tilbage igen.
6. Det resulterende billede inverteres tilbage, således at flamme igen er 1 og *ikke* flamme er 0.
7. Punkterne 3-5 gentages.
8. Flammefronten defineres ved at erodere flammen en enkelt gang med 3×3 strukturelement, og subtrahere dette nye flammeområde fra det forrige.

Om det er flammen eller det der *ikke* er flammen der foretages “åbning” af først, har indfyldelse på placeringen af flammefrontsestimatet. Som eksempel er i figur 4.8 vist algoritmens resultat for *R224*, hvor *ikke* flamme åbnes først. Mens der for *R224b* er vist samme tærskelværdi men hvor der begyndes med åbning af flammen. Til sammenligning er der også vist den i specialet anvendte tærskelværdi *RG175*.



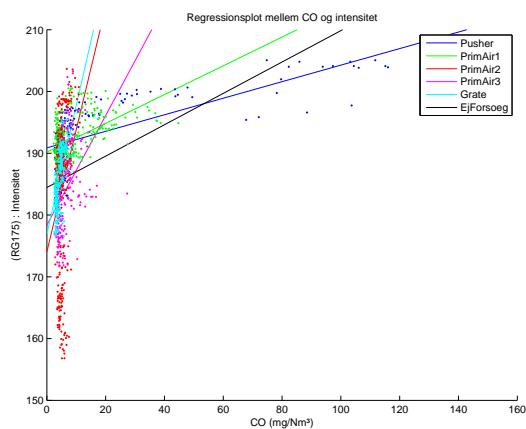
Figur 4.8: I figuren ses flammefrontens placering i forsøget med primærluften under rist 1. RG175 er for tærskelværdien 175 for gråskalabilledet af rød og grøn. R224 er en tærskelværdi på 224 for udelukkende den røde farve. R224b er også en tærskelværdi for den røde farve men med omvendt morfologisk rækkefølge end forklaret i afsnit 4.3.

Alt det der ligger bag flammefronten betegnes som flamme og gennemsnitlig pixelværdi i dette område betegnes flammointensiteten. Den lagrede værdi af flammefronten er defineret ved den gennemsnitlige pixelrække af den oprindelige flammefront i et afgrænset område, se figur 4.9. Der er ikke muligheder for at regulere på parametre på tværs af risten, kun på langs, derfor er der kun dannet dette ene mål for flammefrontens placering.



Figur 4.9: To eksempler på flammefrontsplacering. Den fede streg rundt om flammen er algoritmens bestemmelse af flammefronten. Den blå vandrette streg er den gennemsnitlige flammefront, beregnet ud fra flammefrontens placering mellem de to blå lodrette streger.

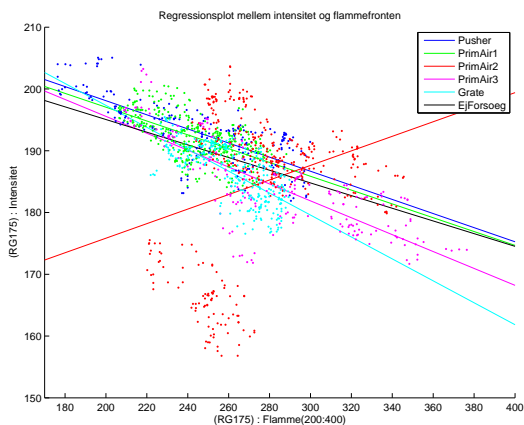
Ved specialets begyndelse blev det formodet, at lav flammeintensitet umiddelbart ville hænge sammen med en høj CO-værdi, pga. af sort røg i flammen. Dette var ikke tilfældet, hvilket fremgår af regressionen i figur 4.10. Der er dog enkelte tilfælde, hvor CO værdien overskrider grænseværdien på $50 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$, men mod forventning er flammeintensitet her høj.



Figur 4.10: Regressionsplot mellem CO og flammeintensiteten for samtlige forsøg. Grænseværdien for CO er pr. døgn 50 mg/Nm^3 (Miljøministeriet, 2003).

Flammens intensitet er ved alle forsøgene negativt korreleret med afstanden fra indfødningsen, lige bortset fra forsøgene med primærluften under rist 2. Ved

dette forsøg er der i perioden fra kl. 12:28 til kl. 14:01 observationer, der ligger et stykke væk fra de øvrige observationer, se figur 4.11. Det har ikke været muligt på optagelserne eller i data at se hvorfor, men flammen er i denne periode meget rødlig.

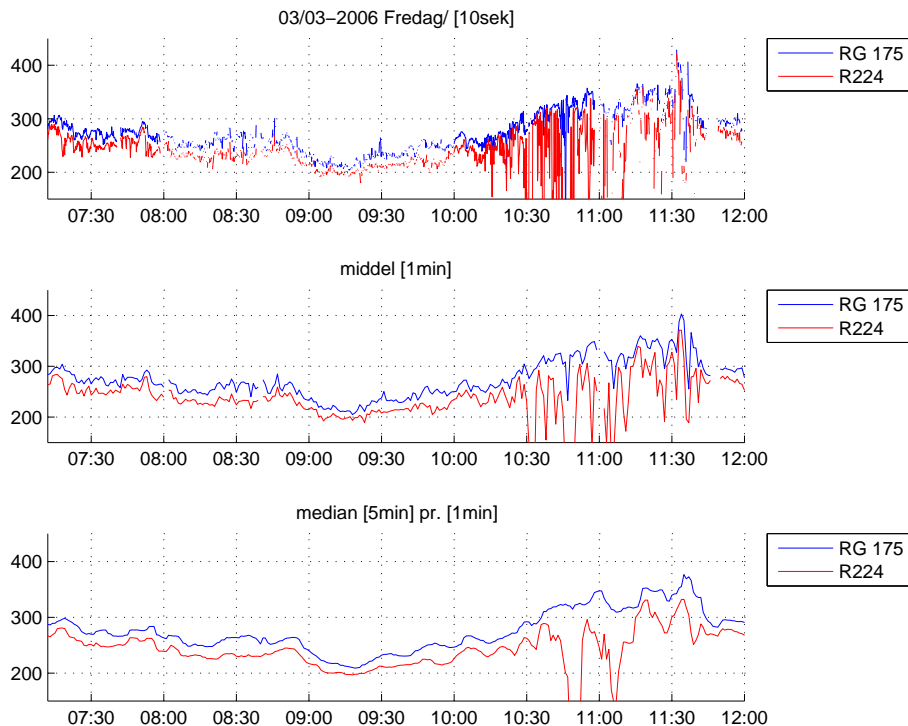


Figur 4.11: Regressionsplot mellem flammeeintensiteten og flammefronten for samtlige forsøg. Flammefronten er angivet i pixelrækken for flammefronten, der er lave værdier tæt på indførdningen og høje værdier tæt på slaggefaldet.

Når forbrændingen finder sted tidligt på risten er forbrændingen meget intens fordi forbrændingen er koncentreret og dermed også flammerne. Bevæger flammefronten sig længere ned er forbrændingen mere spredt og dermed er koncentrationen af flammer ikke så høj. Det betyder at flammen som helhed mister sin intensitet. Dette resultat svarer ikke til det forventede, da en lyskilde tæt på et kamera, bliver opfattet stærkere end en lyskilde længere væk.

4.4 Filtrering af flammefrontsestimat

Flammefronten, der er blevet estimeret pr. 10. sekund, fluktuerer, se figur 4.12. Da estimatet af flammefronten i enkelte tilfælde kunne afvige en hel del fra flammefrontens reelle placering, ville en middelværdi af flammefrontens placering blive påvirket meget. Middelværdien pr. minut ses midterst i figur 4.12. En medianværdi bliver påvirket betydeligt mindre af store afvigelser. Der er derfor valgt en filtrering af flammefrontsestimatet, som en løbende 5 minutters medianværdi, beregnet hvert minut, se nederst i figur 4.12. Flammefrontens placering, som løbende 5 minutters medianværdi pr. minut for samtlige forsøgsgage, findes i bilag B.3.



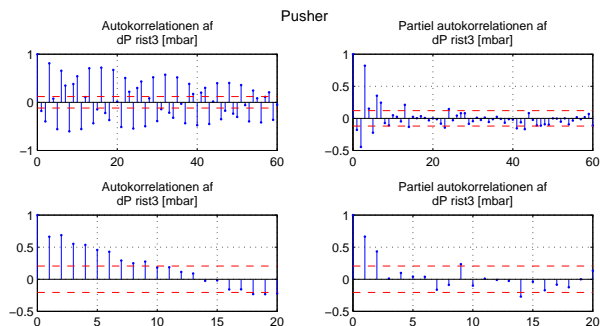
Figur 4.12: Øverst ses de faktiske observationer pr. 10. sek. I den midterste figur er anvendt en 1 minuts middelværdi, mens der i den nederste figur er anvendt en løbende 5 minutters medianværdi, som er lagret hvert minut. I den nederste figur ses tydeligt, at tærskelværdien RG175 har et offset i forhold til R224, men ved forstyrrelsen kl. 11:04 falder algoritmen ikke ud, hvilket sker for R224.

Dataanalyse / modellering

Tiden mellem to observationer i dataopsamlingsystemet er et minut. Det dynamiske respons for input til systemet er ofte meget langsomt, hvorfor det kan være svært at beskrive den langsomme dynamik med få parametre. Ved at øge tiden mellem to observationer, vil det gavne bestemmelsen af modelparametrene, som skal beskrive den langsomme dynamik og ikke de hurtige forstyrrelser. Endvidere reduceres modelordenen, da de hurtigere forstyrrelser filtreres fra.

Analyseres spektrummet for dampproduktionen ses kun de langsomme frekvenser. Analyseres derimod spektrummet for differensserien, ses en frekvens i dampen på 2-3 minutter. Denne frekvens kan sandsynligvis føres tilbage til forbrændingsristen. Selve risteprincippet gør at tryktabet over risten ikke er konstant i alle positioner. Et mindre tryktab i nogle positioner vil resultere i en øget luftmængde til forbrændingen, hvis ikke flowreguleringen er hurtig til at kompensere for det. Kommer der en øget luftmængde til forbrændingszonen, sker der en kort opblusning af forbrændingen. I figur 5.1 ses det tydeligt at tryktabet over rist 3 varierer. Denne variation er ikke lige så tydelig for rist 1 og rist 2, da tryktabet over selve affaldslaget har en større betydning for det samlede tryktab, end ristepositionen. Affaldslaget på rist 3 er betydeligt mindre end på rist 1 og rist 2.

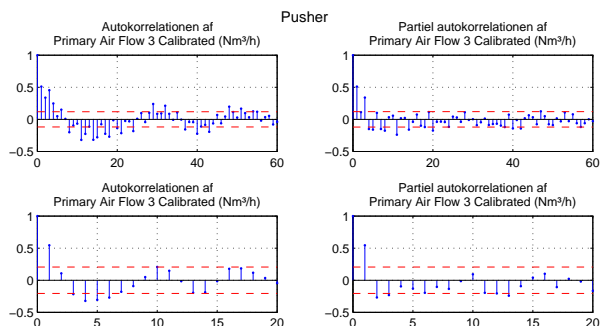
Øverst i figur 5.1 fremgår at autokorrelationsfunktionen for hver tredje observation er mere korreleret med hinanden end de mellemliggende observationer. Dannes et nyt sæt observationer ud fra det eksisterende, men baseret på en 3 minuts middelværdi, fås en autokorrelationsfunktion og partiel autokorrelationsfunktion, der er nemmere at tolke. Figurerne ses nederst i figur 5.1, og heraf fremgår det af den partielle autokorrelation, at processen sandsynligvis



Figur 5.1: Øverst ses autokorrelationen og den partielle autokorrelation for tryktabet over rist 3 ved 1 minuts middelværdier. Nederst ses det tilsvarende, men for 3 minuts middelværdierne.

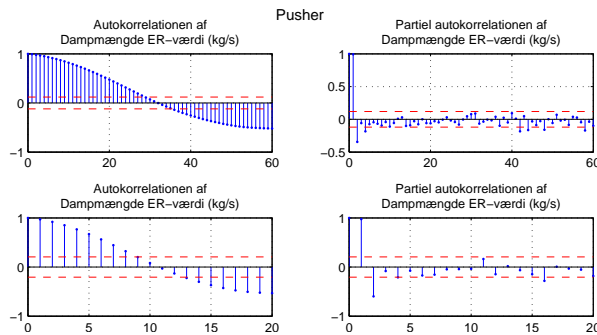
kan beskrives med en autoregressiv model af anden orden - en AR(2) model.

Det mindre trykfald, som skyldes ristens position, resulterer for rist 1 og rist 3 i et øget luftflow, da regulatoren ikke reagerer på ændringerne. Regulatoren til rist 2 reagerer til gengæld så hurtigt, at den kan reducere flow ændringen, som skyldes det ændrede tryktab over risten pga. positionen. Det er derfor muligt, øverst i figur 5.2, at se den periodiske støj fra trykfaldsændringen i autokorrelationsfunktionen for luftflowmålingen. Af samme figur fremgår det også, at det nye sæt observationer baseret på en middelværdi for hvert 3 minut, medfører en mere kontinuert autokorrelationsfunktion for luftflowet, end det er tilfældet for 1 minuts middelværdien. Modelordenen for luftflowet under rist 3 er samtidig reduceret til en autoregressiv model af sandsynligvis anden måske tredje orden. Dog med et vist forbehold pga. af udseendet af den partielle autokorrelationsfunktion.



Figur 5.2: Øverst ses autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for luftmængden til rist 3 ved 1 minuts middelværdier. Nedest ses det tilsvarende, men for 3 minuts middelværdierne.

Når datasættet med 1 minuts middelværdier anvendes, kan dampproduktionens dynamik beskrives med en autoregressiv proces af tredje eller fjerde orden. Dette er baseret på en vurdering af den partielle autokorrelationsfunktion for hvert enkelt forsøg. Anvendes derimod datasættet med 3 minutters middelværdier, kan dampens dynamik beskrives med en autoregressiv proces af anden orden, ligeledes vurderet ud fra de partielle autokorrelationsfunktioner for forsøgene. Et eksempel ses i figur 5.3, som stammer fra forsøget med pusherhastigheden ligesom figur 5.1 og 5.2.



Figur 5.3: Øverst ses autokorrelationsfunktionen og den partielle autokorrelationsfunktion for dampproduktionen ved 1 minuts middelværdier. Nederst ses det tilsvarende, men for 3 minuts middelværdierne.

For at kunne beskrive den langsomme dynamik vil der til de dynamiske modeller i afsnit 5.2 og 5.3, blive anvendt et datasæt baseret på 3 minutters middelværdier.

5.1 Sammenhæng mellem dampproduktionen og flammefronten

Der er en lineær sammenhæng mellem flammefrontens placering og dampproduktionen, men den er ikke ens for alle forsøgene. Ved forsøgene med pusher- og ristehastigheden ser der ud til at være den samme progressive sammenhæng, se figur 5.4 og tabel 5.1. Således svarer en bestemt placeringen af flammefronten til en bestemt dampproduktion. Regressionsligningerne afviger ikke meget fra hinanden, bedømt ud fra tabel 5.1.

Overskriften *EjForsøg* dækker over natten mellem torsdag den 2/3-2006 og fredag den 3/3-2006, hvor reguleringen er tilbage i automatik. Det er den eneste periode, hvor SRO systemet er i automatik og der samtidig er optaget billeder af forbrændingen.

EjForsøg har nogenlunde samme regressionsligning som ved pusher- og ristehastighedsforsøget, men spredningen af flammefrontens placering er større end

ved forsøgene.

Ved trinresponsforsøgene med primærluften under rist 3 flytter forbrændingen sig langt ned af risten mod slaggefaldet, hvilket medfører den høje regressionskoefficient. I modsætning hertil har forsøgene med primærluften under rist 1 og rist 2 lave regressionskoefficienter. Forsøget med primærluften under rist 1 har en stor spredning af dampproduktionen, mens spredning i flammefronten er begrænset. Selvom variationen i flammefronten er lille, er der ved forsøget alligevel en samvariation mellem flammefronten og dampproduktionen, se figur 5.5.

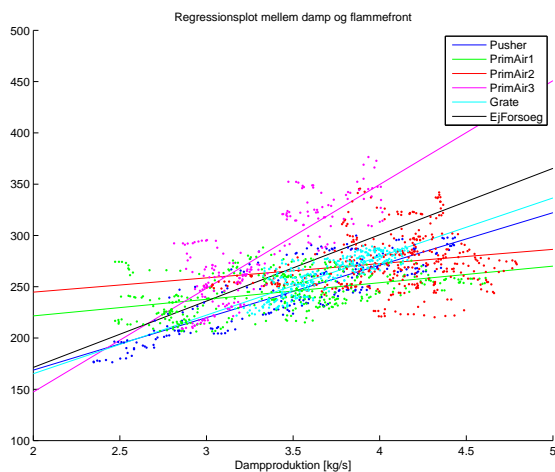
Der er ved forsøget med primærluften under rist 2 næsten ingen samvariation mellem dampen og flammefronten, for krydskorrelationsfunktionen er lav. Endvidere forklarer den lineære regression ikke meget om forholdet mellem flammefrontens placering og dampproduktionen.

Den mindste variation af flammefronten udviser ristehastigheden efter regressionen, hvor spredningen er helt nede på 10 pixels, samvariationen mellem flammefronten og dampproduktionen er også høj ved forsøget, se figur 5.5.

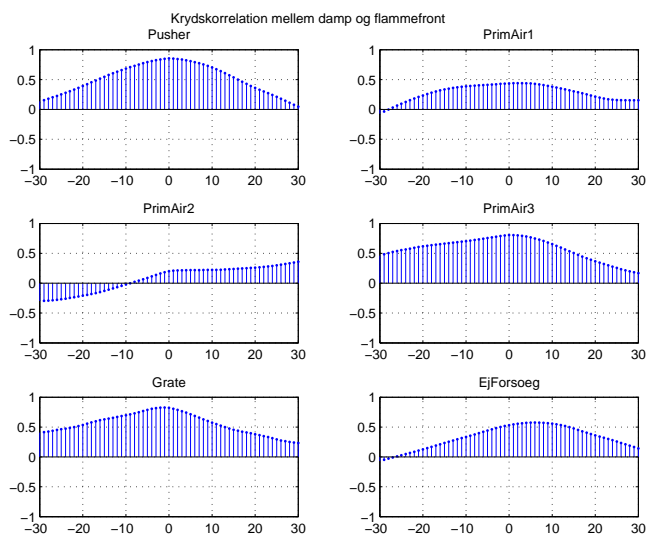
Det fremgår endvidere af figur 5.5, at flammefrontens placering ikke kan bruges som et feedforward signal i forbindelse med regulering af dampprocessen, da flammefronten til tiden 0 ikke har højere krydskorrelation med dampproduktionen ude i fremtiden.

Forsøg	ax	b	σ_{reg}	μ_{flamme}	σ_{flamme}	μ_{damp}	σ_{damp}
Pusher	51,2	66	17,6	245	34,0	3,6	0,59
PrimAir1	16,2	189	17,1	244	18,9	3,4	0,50
PrimAir2	13,9	217	25,8	273	26,3	4,0	0,37
PrimAir3	101,2	-55	25,5	281	43,0	3,3	0,33
Grate	57,1	51	10,0	262	17,7	3,6	0,32
EjForsøg	64,7	42	28,8	294	34,0	3,9	0,28

Tabel 5.1: Regressionsligninger for de forskellige trinresponsforsøg. ax er regressionskoefficienten, b konstanten og σ_{reg} er spredningen ved den pågældende regression. Pusher er forsøget med pusherhastigheden. PrimAir er forsøgene med primærluft under hhv. rist 1, rist 2 og rist 3. Grate er forsøget med ristehastigheden. EjForsøeg er en nat med reguleringen i automatik.



Figur 5.4: XY-plot for dampproduktionen og flammefrontens placering målt i pixelrække fra indfødingen, samt de tilhørende regressionsligninger for trinresponsforsøgene. Baseret på 1 minuts værdierne.



Figur 5.5: Figurerne viser hvordan flammefrontens placering til tiden $t = 0$ er krydskorreleret med dampproduktionen. Krydskorrelationen er baseret på 1 minuts værdierne.

5.2 Model for pusherhastigheden i forhold til damproduktionen

Overføringsfunktionen fra pusherhastigheden til damproduktionen kan bestemmes ved at bruge data fra åben sløjfe forsøget den 28/2-2006. Her var det kun pusherhastigheden der blev ændret. Afgrænsningen af datasættet er beskrevet i afsnit 3.2.1. Al databehandling i dette afsnit sker med observationer baseret på 3 minutters middelværdier.

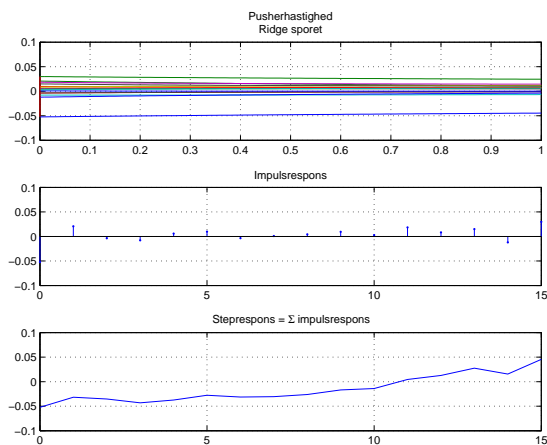
Det første skridt i systemidentifikationsprocessen er at bestemme impulsresponsfunktionen med ridge regression, som beskrevet i afsnit 2.3.1.

$$y_t = \sum_{i=0}^{15} h_i x_{t-i} + n_t \quad (5.1)$$

Estimatet af impulsresponsfunktionen skal hjælpe med at finde overføringsfunktionen fra input (x_t) til output (y_t) beskrevet som en Output-Error model

$$y_t = \frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})} x_t + n_t \quad (5.2)$$

I figur 5.6 ses øverst ridge sporet ved forskellige λ værdier. Heraf fremgår det at parameterestimatet fra starten udviser en lille varians, hvorfor det ikke er nødvendigt at straffe høje regressionskoefficienter, $\lambda = 0$ er blevet anvendt.



Figur 5.6: Forsøg med pusherhastigheden. Bestemmelse af impulsresponsfunktionen ($h(q^{-1})$) til damproduktionen på basis af ikke filtrerede data.

Endvidere ses i midten af figur 5.6 estimatet af impulsresponsfunktionen. Af impulsresponsfunktionen fremgår den største impulsresponskoefficient ved første

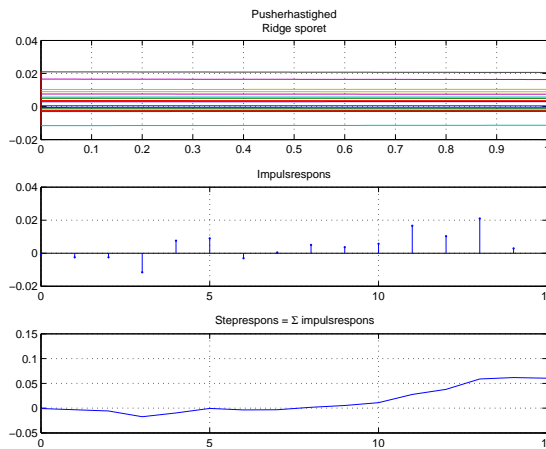
observation, svarende til $h_1 q^{-1}$, hvis der ses bort fra initialiseringsværdien h_0 . Derudover er der en høj værdi i 15. observation, svarende til det 45. minut.

Summeres alle impulsresponsfunktionens værdier, dannes trinresponsfunktionen, denne er vist nederst i figur 5.6. Af trinresponsfunktionen fremgår det, at der egentlig først sker noget med trinresponsen ved omkring 8.-10. observation, det vil sige efter 30. minutter.

Analyseres impulsresponsfunktionen til differensserien

$$\nabla y_t = \sum_{i=0}^{15} h_i \nabla x_{t-i} + n_t \quad (5.3)$$

er estimatet af impulsresponsfunktionens koefficienter mere konsistent, hvilket ses øverst i figur 5.7. De første mest betydende koefficienter for impulsresponsfunktionen befinder sig ved omkring 3. observation og er negative. De følgende 2 er positive og reducerer betydningen af den negative 3. observation. Herefter er systemet i ro til den 8. observation, hvor impulsresponsfunktionens værdier langsomt stiger, for igen at aftage til nul ved den 15. observation.



Figur 5.7: Som figur 5.6 med filtrerede input og output ved at danne differensserien.

Nederst i figur 5.7 ses summen af impulsresponskoefficienter, som et trinrespons, der begynder at stige ved 8. observation, svarende til det 24. minut, og konvergerer ved den 13. observation, det 39. minut. Selve trinresponsen minder om et *ikkeminimumfase system* eller et system med stor tidsforsinkelse. En rimelig model for udseendet af trinresponsen vil være af første eller anden orden, med en tidsforsinkelse på 8 observationer. Generelt kan dampens dynamik, vurderet ud fra den partielle autokorrelation, forklares med anden ordens autoregressiv model, se evt. figur 5.3. Derfor er en model af anden orden umiddelbar mest sandsynlig.

5.2.1 Valg af model

I dette afsnit er funktioner fra *System Identification Toolbox* i MATLAB blevet anvendt. *System Identification Toolbox* bygger på teorien i Ljung (1999).

Vurderet udfra figur 5.8 har et trin *op* i pusherhastigheden en tidsforsinkelse på ca. 4 observationer og et trin *ned* har en tidsforsinkelse på ca. 10 observationer. Ved analysen af impulsresponsfunktionen fandtes de mest betydende værdier mellem 8. og 13. observation. Det vurderes derfor at systemet havde en gennemsnitlig tidsforsinkelse på 8 observationer. En række forskellige modeller er blevet testet, hvoraf modellernes AIC og BIC kriterium fremgår i tabel 5.2. Endvidere fremgår det af tabel 5.2 om residualen for modellen er hvid støj. Dette er blevet bedømt udfra om autokorrelationsfunktionen af residualen samt om krydskorrelationen mellem residual og output holder sig indenfor konfidensintervallet. Endelig er det blevet vurderet om modellen indeholdt *ikke* signifikante parametre.

Model	AIC	BIC	Hvid støj	Ikke sign. parametre
ARX(1,1,8)	-427,6	-422,5	✓	
ARX(1,2,8)	-429,9	-422,3	✓	b_1
ARX(2,1,8)	-438,3	-430,7	✓	
ARX(3,1,8)	-431,6	-421,5	✓	a_3
OE(2,1,8)	-261,1	-253,4	%	b_0, a_1, a_2

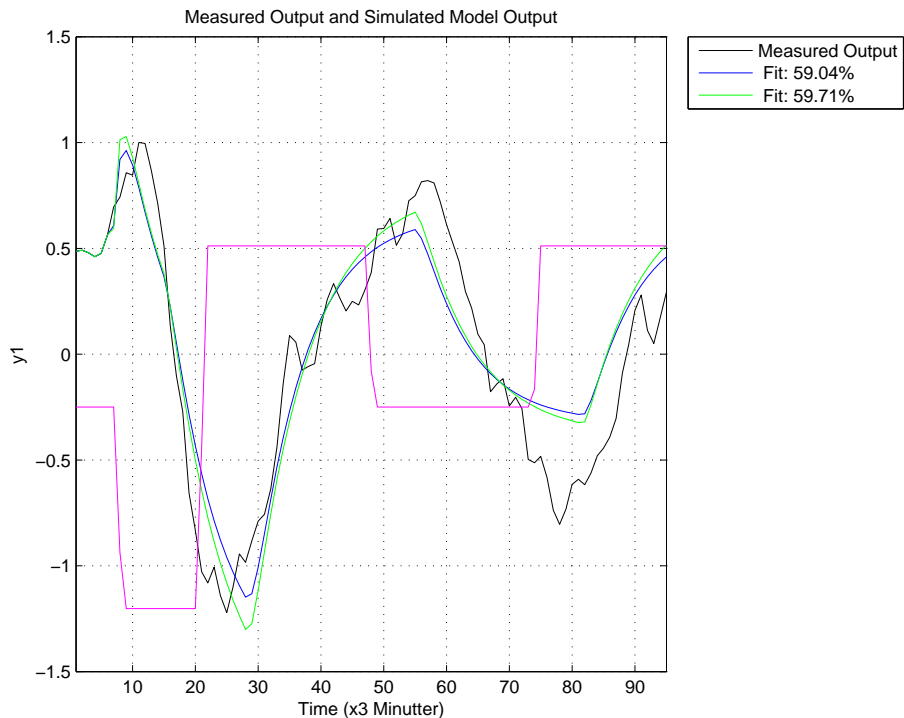
Tabel 5.2: Modeller og kriterier for pusherhastigheden. Modellen ARX(2,1,8) vælges pga. af mindste BIC.

Parameter	$\hat{\theta}$	$\pm\sigma_{95\%}$
a_1	-1.329	± 0.195
a_2	0.395	± 0.187
b_0	0.00788	± 0.00399

Tabel 5.3: Parameter og signifikansniveau for den valgte ARX(2,1,8) model. Polerne er reelle og har størrelserne 0,8805 og 0,4487.

Ligning (5.2) er en opskrivning på den såkaldte *Output Error* model. Analyseres residualen for denne modelstruktur OE(2,1,8) ses det tydeligt at der er tale om farvet støj ($n_t \neq \varepsilon_t$), se figur 5.9. Korrelationsfunktionen af residualen viser en langsomt eksponentielt aftagende funktion, hvilket kunne tyde på et AR led. Det er derfor nærliggende at formode $F(q^{-1}) = D(q^{-1})$, og dermed analysere ARX strukturen, som det er sket i tabel 5.2.

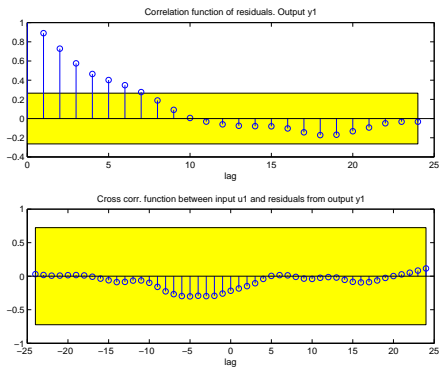
$$A(q^{-1})y_t = B(q^{-1})x_t + \varepsilon_t \quad (5.4)$$



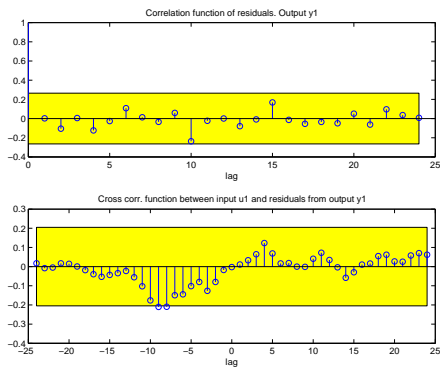
Figur 5.8: To modeller. Den blå kurve er $ARX(2,1,8)$ modellen, mens den grønne krave er den tilsvarende $OE(2,1,8)$ model.

Grafisk følger OE og ARX modellerne hinanden, når de skal følge trinresponsen, se figur 5.8.

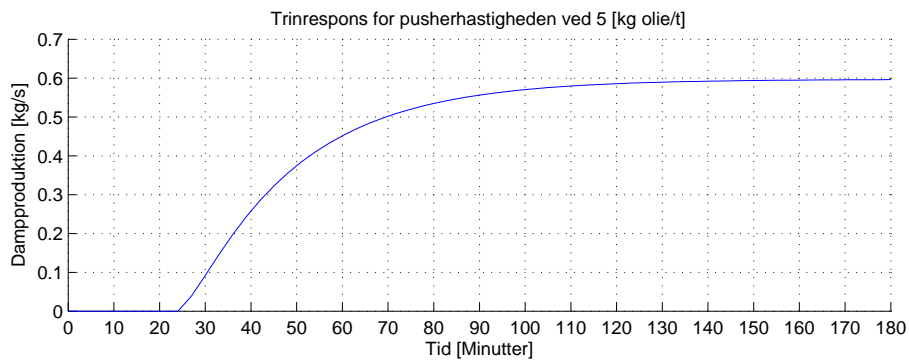
I figur 5.11 ses responsfunktionen for en trinændring i pusherhastigheden med 5 [kg olie/s]. Figuren viser tidsforsinkelsen på 24 minutter, samt at systemet er over 90 minutter om at konvergere.



Figur 5.9: Residualanalyse af $OE(2,1,8)$, hvor det ses at residualen sandsynligvis er autoregressivt.



Figur 5.10: Residualanalyse af $ARX(2,1,8)$, som opfylder betingelserne for hvid støj.

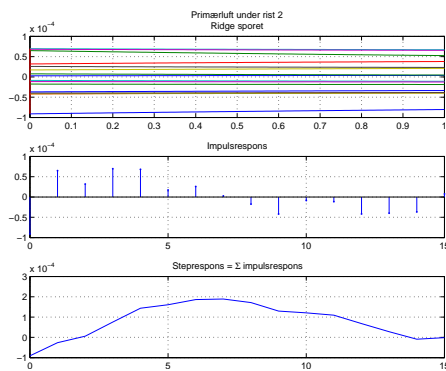


Figur 5.11: Trinrespons i dampproduktionen for en trinændring i pusherhastigheden.

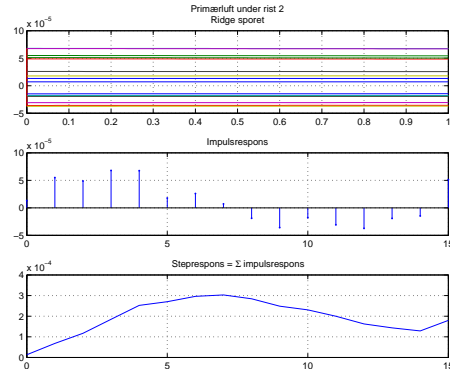
5.3 Model for primærluft under rist 2 i forhold til dampproduktionen

Figurerne 5.12 og 5.13 indeholder et estimat af impulsresponsfunktionen for dampproduktionen med primærluft under rist 2 som input. Figur 5.12 er for ikke filtrerede data, men data i figur 5.13 er blevet filtreret med et differens filter.

Øverst i begge figurer ses et meget konsistent estimat af koefficienterne til impulsresponsfunktionen. Midterst i figurerne ses den nogenlunde samme impulsresponsfunktion, hvor den væsentligste forskel er den første værdi (h_0), hvilket skyldes initialbetingelserne. Derudover ligner begge impulsresponsfunktioner hinanden, hvilket også gør sig gældende for trinresponsen nederst i figur 5.12 og 5.13.



Figur 5.12: Forsøg med primærluft under rist 2. Bestemmelse af impulsresponsfunktionen ($h(q^{-1})$) til dampproduktionen på basis af ikke filtrerede data.



Figur 5.13: Som figur 5.12 med filtrerede input og output ved at danne differensserien.

Trinresponsen ligner umiddelbart et dæmpet anden ordens system med komplekse rødder, som langsomt svinger ind mod en stationær tilstand. Men trinresponsen kunne også godt ligne produktet af et trinrespons gennem et højpas- og et lavpasfilter (beskrevet som den Laplace-transformerede i kontinuert tid)

$$\text{Lavpasfilter} : \frac{1}{s + 1} \tag{5.5}$$

$$\text{Højpasfilter} : \frac{s}{s + 1} \tag{5.6}$$

Produktet af ovenstående giver

$$\frac{1}{s + 1} \cdot \frac{s}{s + 1} = \frac{s}{s^2 + 2s + 1} \tag{5.7}$$

Dette produkt har den fordel, ved trinrespons, at det først stiger og derefter falder for at konvergere mod nul igen. Denne udformning af trinresponset har også en god sammenhæng til fysikken. Så længe brændslet og indfødingen er konstant, burde dampproduktionen også være konstant. Det der sandsynligvis sker ved trinændringen er, at det affald der ligger på rist 2 brændes af, og dampproduktionen stiger. Herefter falder dampproduktionen fordi forbrændingen har trukket sig tilbage. Forbrændingen skal herefter finde tilbage omkring sin oprindelige stationære tilstand. Dette når i midlertid ikke at ske, da trinlængden i forsøget kun er mellem 40-45 minutter (13-15 observationer).

I diskret tid opnås det samme udseende for et trinrespons, hvis trinændringen reduceres til en impuls ved at substrahere ændringen af styresignalet i den efterfølgende observation f.eks.

$$\frac{b_0 - b_1q^{-1}}{1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}}q^{-k} \quad (5.8)$$

hvor $b_0 = b_1$.

Derved bliver den stationære forstærkning nul og den stationære tilstand bliver det samme som udgangspunktet.

Om der er brug for et eller to nulpunkter, som udligner hinanden må komme an på en nærmere analyse, se næste afsnit. Der er under alle omstændigheder tale om et anden ordens system uden en tidsforsinkelse, der er større end en observation.

5.3.1 Valg af model

Impulsresponsfunktionen giver en indikation om ordenen af overføringsfunktionen på *Output-Error* formen (OE), ligning 5.2. Den tager ikke hensyn til den farvede støj, men prøver at følge procesværdierne så godt som muligt transient, hvilket også fremgår af figur 5.14. Selvom OE modellen følger data rimelig godt, viser et plot af autokorrelationsfunktionen for residualet, næsten det samme som tidligere, figur 5.9. En eksponentielt aftagende autokorrelationsfunktion, dog med en svag tendens til oscillation.

Det nærmeste er at antage, at der er tale om en ARX model, men den følger transient ikke data lige så godt som OE modellen. Det er at foretrække hvis modellen også transient følger data, da længere prædiktionshorisonter kan anvendes. Øges ordenen af $B(q^{-1})$ eller $A(q^{-1})$ er alle parametrene ikke længere signifikante i et 95% konfidensinterval.

OE modellens polynomier $B(q^{-1})$ og $F(q^{-1})$ giver transient et bedre procesestimat end ARX modellens polynomier $B(q^{-1})$ og $A(q^{-1})$. Dog forklarer $A(q^{-1})$ en god del af strukturen på støjen. Dette giver belæg for at betragte polynomierne $D(q^{-1}) \neq F(q^{-1})$ og dermed indholder forskellige faktorer, Box-Jenkins strukturen (BJ). For ARX-modellen ses endvidere en oscilerende krydskorrelation mellem input og residualet af output, men det ligger indenfor konfidens-

5.3 Model for primærluften under rist 2 i forhold til dampproduktionen 61

grænserne.

$$y_t = \frac{B(q^{-1})q^{-k}}{F(q^{-1})}x_t + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}\varepsilon_t \quad (5.9)$$

BJ strukturen giver det bedste transiente respons, samt de laveste BIC kriterier, se figur 5.14 og tabel 5.4. Samtidig er residuallet for BJ modellen hvid støj, vurderet ud fra autokorrelationsfunktionen af residuallet i figur 5.15. Og den oscillerende krydskorrelation mellem input og residuallet af output er forsvundet, i forhold til ARX-modellen. I BJ modeller hvor bare et af polynomierne har en højere orden BJ(1,0,2,2), er enkelte parametre ikke længere signifikante i et 95% konfidensinterval, se tabel 5.5.

Model	Input	AIC	BIC	Hvid støj	Ikke sign. parametre
ARX(2,1,1)	Trin	-695,3	-686,5	✓	
ARX(2,2,1)	Trin	-693,6	-681,9	✓	b_1
ARX(3,1,1)	Trin	-689,6	-672,9	✓	a_2
OE(2,1,1)	Trin	-363,6	-354,8	%	
BJ(1,0,2,2)	Trin	-710,1	-695,5	✓	
BJ(1,1,2,2)	Trin	-708,8	-691,2	✓	c_1

Tabel 5.4: Modeller og kriterier for primærluften under rist 2. Modellen BJ(1,0,2,2) vælges for inputtet som trinresponsen pga. af mindste BIC og signifikante parametre.

Parameter	$\hat{\theta}$	$\pm\sigma_{95\%}$
b_0	3,26e-05	$\pm 1,247e-05$
d_1	-1,42	$\pm 0,154$
d_2	0,497	$\pm 0,154$
f_1	-1,689	$\pm 0,110$
f_2	0,8644	$\pm 0,1048$

Tabel 5.5: Parametre og signifikansniveau for modelstrukturen BJ(1,0,2,2) model for inputtet som trinrespons. Polerne er komplekse og er $0,8446 \pm 0.389i$

For med sikkerhed at få overføringsfunktionen til at konvergere tilbage til udgangspunktet, anvendes differensserien til inputtet, og overføringsfunktionen vil dermed få en form, som ligning 5.8 hvor $b_0 = b_1$. Således flyttes nulpunktet fra 0 til 1 i forhold til den tidligere model. Den eneste modelstruktur med differensserien som input, hvor alle parametrene samtidig er signifikante, er BJ(1,0,2,3), se tabel 5.6 og parametrene i tabel 5.7. En simulering af modellen ses i figur D.4.

Model	Input	AIC	BIC	Hvid støj	Ikke sign. parametre
ARX(2,1,1)	Imp.	-683,1	-674,4	✓	b_0
ARX(3,1,1)	Imp.	-676,8	-665,1	✓	a_2, a_3
OE(2,1,1)	Imp.	-359,0	-347,3	%	
BJ(1,1,2,2)	Imp.	-692,3	-674,7	✓	b_0, c_1
BJ(1,0,2,2)	Imp.	-693,3	-678,7	✓	b_0
BJ(1,0,2,3)	Imp.	-703,7	-686,2	✓	

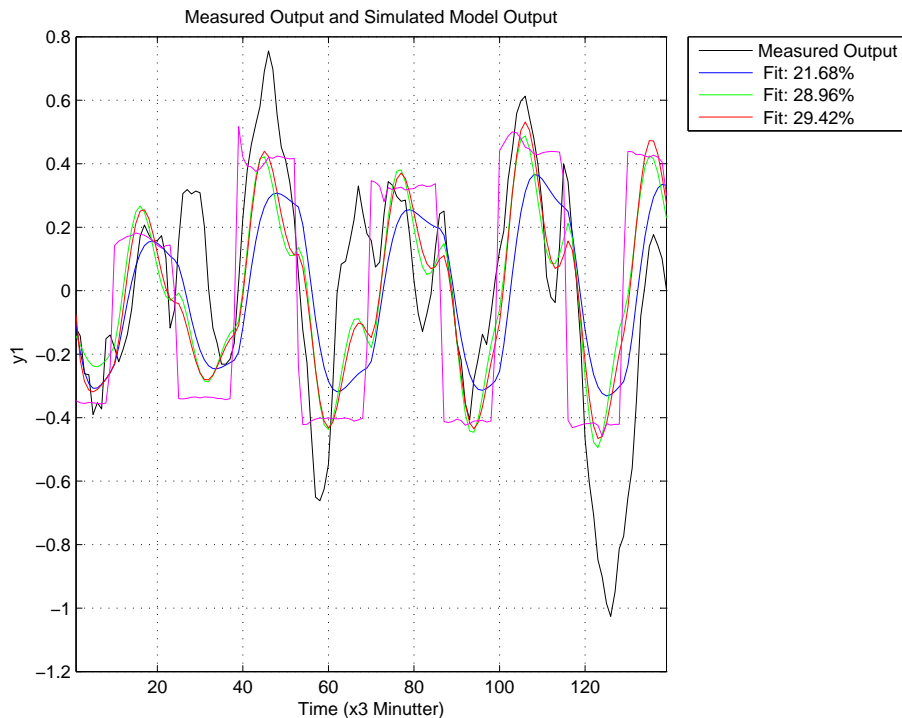
Tabel 5.6: Modeller og kriterier for primærluften under rist 2, med en model som danner differensserien af inputtet. Modellen BJ(1,0,2,3) vælges pga. af mindste BIC og signifikante parametre.

Parameter	$\hat{\theta}$	$\pm\sigma_{95\%}$
b_0	3,32e-05	$\pm 1,267e-05$
d_1	-1,43	$\pm 0,154$
d_2	0,5054	$\pm 0,1552$
f_1	-2,667	$\pm 0,137$
f_2	2,519	$\pm 0,262$
f_3	-0,8474	$\pm 0,1354$

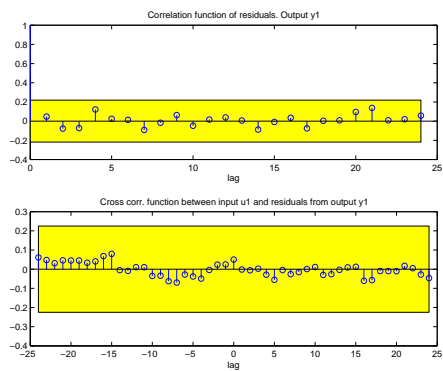
Tabel 5.7: Parameter og signifikansniveau for modelstrukturen BJ(1,0,2,2) for inputtet som impulsrespons. Polerne både reelle og komplekse og er 0,974 samt 0,8467 \pm 0,391i

Sammenholdes parametrene for de 2 modeller, se hhv. tabel 5.5 og 5.7, fremgår det at parametrene har næsten samme størrelse, dog lige med undtagelse af $F(q^{-1})$ polynomiet. Men findes polerne for $\frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}$, har begge modeller de samme komplekse poler, mens modellen med differensserien som input har en ekstra reel pol i 0,974.

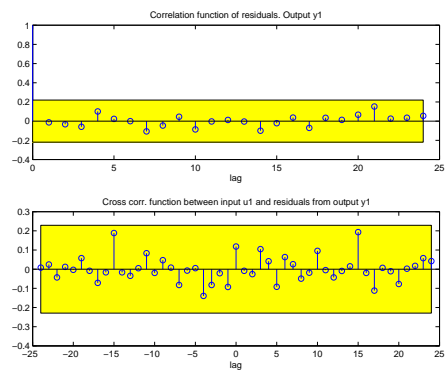
I figur 5.17 ses responsfunktionen for en trinændring i primærluften under rist 2 med 1500 [Nm³/t]. Figuren viser responset for begge BJ modeller, hvoraf den største forskel er i den stationære tilstand for dampproduktionen. Den stationære tilstand for modellen der ikke danner en differensserien af inputtet (blå kurve), stemmer meget dårlig overens med den fysiske forståelse af affaldsforbrænding. Laves en energibalance vil en øget luftmængde nedsætte dampproduktionen, da den øgede luftmængde vil virke kølende på røggassen.



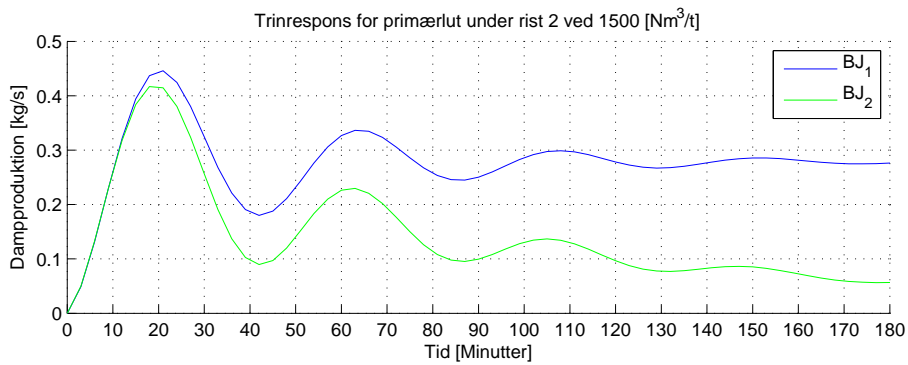
Figur 5.14: Tre modeller. Den blå kurve er $ARX(2,1,1)$ mens den grønne krave er en $OE(2,1,1)$ og den røde er en $BJ(1,0,2,2)$ model, som har laveste BIC.



Figur 5.15: Residualanalyse af modellen $BJ(1,0,2,2)$ for primærluftten under rist 2.



Figur 5.16: Residualanalyse af modellen $BJ(1,0,2,3)$ for differensserien af primærluftten under rist 2.



Figur 5.17: Trinrespons i dampproduktionen for en trinændring i primærluften under rist 2. Den blå kurve, kaldet BJ_1 , er baseret på $BJ(1,0,2,2)$ modellen, hvor inputtet ikke differenses. Den grønne kurve, kaldet BJ_2 , er baseret på $BJ(1,0,2,3)$ modellen, hvor der dannes en differens af inputtet.

Regulering

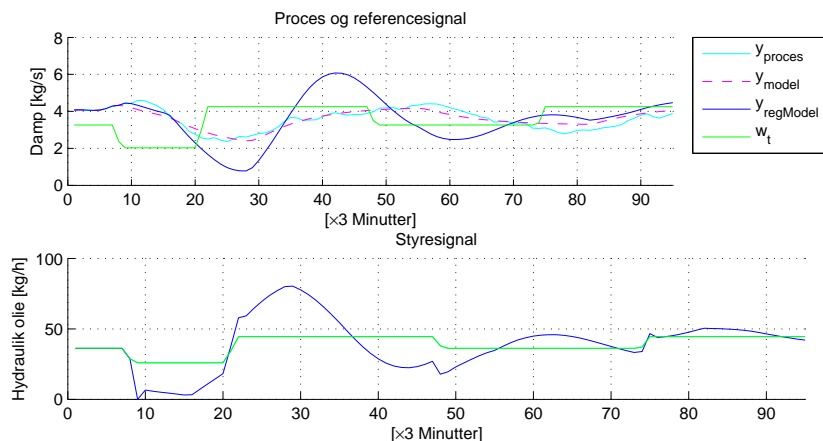
Det input der har størst indflydelse på en varig ændring af damproduktionen, er en ændring i tilførslen af brændslet, under forudsætning af at brændværdien er konstant. Derfor er der blevet testet forskellige typer af regulatorer på modellen med pusherhastigheden som input fra forrige kapitel.

6.1 *PID*-regulatoren

Den første regulator der er implementeret er en *PID* regulator. Der er forsøgt to forskellige principper for at bestemme størrelserne af forstærkning, integrations-tiden og differentialtiden. De to principper er *Zielger-Nichols lukket-sløjferegler* (Jannerup og Sørensen, 2000) og *Heilmanns metode* (Heilmann, 1998). Alle indstillinger og afprøvninger er foretaget i modellen fra afsnit 5.2.

Ved Ziegler-Nichols lukket-sløjferegler øges forstærkningen til systemet, her modellen, kommer i stående svinger. Dette sker ved den kritiske forstærkning $K_{p,krit} = 19$, med en svingningsperiode på 26 observationer, 78 minutter. Ud fra disse bestemmelser kan forstærkningen fastsættes til $K_p = 0,6 \times 19 = 11,4$, integraltiden til $\tau_i = 0,5 \times 26 = 13$ samt differentialtiden til $\tau_d = 0,13 \times 26 = 3,38$. Resultatet af en *PID*-regulering med disse parametre ses i figur 6.1 og i figur E.1 for firkant bølge.

Anvendes Heilmanns metode findes først den tid det tager fra trinændringen til halvdelen af ændringen er opnået, hvilket tager 14 observationer, 42 minutter. Denne tid indsættes som intergraltiden τ_i . Herefter indstilles forstærkningen K_p og differentialtiden τ_d , som efter manuelle forsøg sættes til henholdsvis $K_p = 8$



Figur 6.1: Regulering af dampen med pusherhastigheden. Benævnelsen y_{proces} bruges om den sande procesværdi ved forsøget, y_{model} er modellen af processen fundet i afsnit 5.2, $y_{regModel}$ er responset for den regulerede model, mens w_t er referencen, her i form af den transformerede pusherhastighed.

og $\tau_d = 10$. En simulering for *PID* regulatoren med disse parametre ses i figur 6.2.

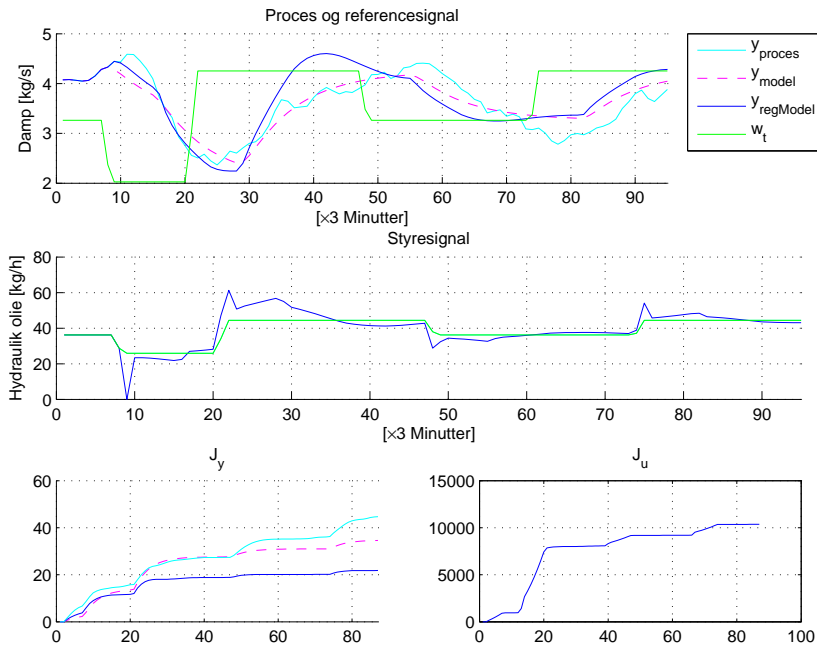
Den umiddelbare bedømmelse af figur 6.1 og 6.2 resulterer i at Heilmanns metode præsterer bedst. Parameterne for de to metoder er samlet i tabel 6.1

	Ziegler-Nichols	Heilmann
K_p	11,4	8
τ_i	13	14
τ_d	3,38	10

Tabel 6.1: Regulatorparametrene for *PID* regulatoren fundet ved hhv. Ziegler-Nichols og Heilmanns metode.

Forstærkning ved Heilmanns metode blev sat mindre end Ziegler-Nichols, for at mindske oversvinget, mens differentialtiden blev hævet betydeligt, ca. 3 gange, for yderligere at undertrykke oversvinget samt at mindske oscilationerne. Heilmanns metode er iterativ og regulatorparametrene bliver lige så gode som brugerens tålmodighed (Heilmann, 1998).

Heilmanns metode er en form for manuel indstilling af *PID* parametrene, hvor der tages udgangspunkt i integraltiden. Dette gøres med henblik på ikke at gøre systemet ustabil. Ziegler-Nichols lukke-sløjferegler bestemmer *PID*-regulatorens parametre ud fra den marginalt stabile proces. I forsøg på at finde den forstærkning, der gør systemet maginalt stabilt, risikerer processen at blive ustabil, hvorfor det er godt at teste denne metode på en model. Det var også



Figur 6.2: Regulering af dampen med pusherhastigheden. Benævnelsen y_{proces} bruges om den sande procesværdi ved forsøget, y_{model} er modellen af processen fundet i afsnit 5.2. $y_{regModel}$ er responset for den regulerede model, mens w_t er referencen, her i form af den transformerede pusherhastighed.

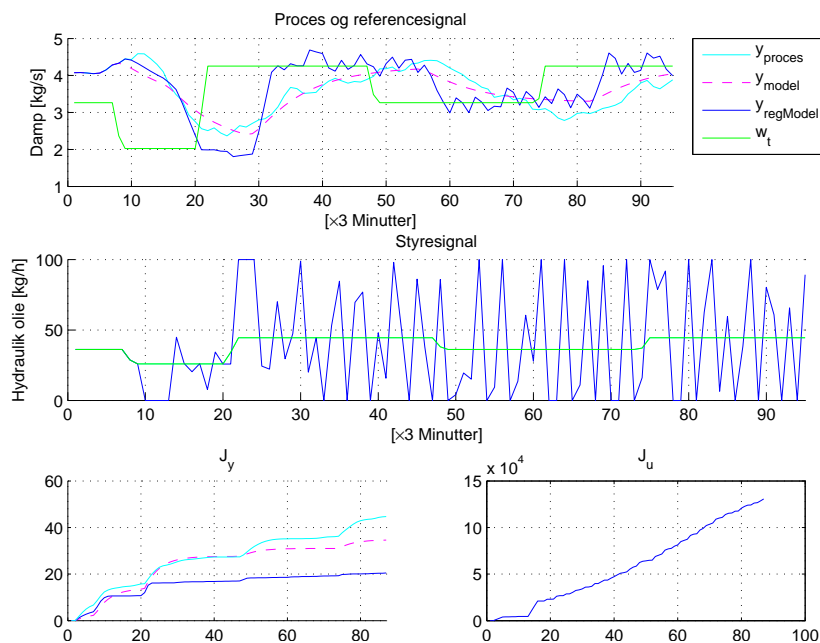
tilfældet i dette afsnit.

6.2 MV_0 -regulatoren

Modellen der blev fundet i afsnit 5.2 var en $ARX(2,1,8)$. Den store tidsforsinkelse gør at G polynomiet i diophantine ligningen bliver af 7. orden. Da ordenen er givet ved

$$\text{ord}(G) = k - 1 \quad (6.1)$$

Det første modelbaserede stokastiske regulator, der er blevet implementeret er en minimal varians (MV_0) regulator. Til at begrænse regulatorens arbejde er arbejdsområdet for olieflowet til pusheren (0-100 [kg/h] hydraulikolie) lagt ind i modellen. Var denne begrænsning ikke inkluderet bliver den regulerede model ustabil, pga. af den store tidsforsinkelse. MV_0 -regulatoren har ingen begrænsninger, udover operationsområdet for olieflowet, i brugen af styresignalet i målet om at minimere variansen mellem output og referencen. Det lykkedes MV_0 regulatoren at holde dampproduktionen omkring referencen, men med et stort regulator arbejde, se figur 6.3.



Figur 6.3: Regulering af dampen med pusherhastigheden. Benævnelsen y_{proces} bruges om den sande procesværdi ved forsøget, y_{model} er modellen af processen fundet i afsnit 5.2. $y_{regModel}$ er responset for den regulerede model, mens w_t er referencen, her i form af den transformerede pusherhastighed.

Det regulerede system responderer på en ændring af referencen, derfor er det nødvendigt at transformere pusherhastigheden om til en dampproduktion,

således at pusherhastigheden kan være en reference for dampproduktionen. Dampproduktionen er målt, som en massestrøm af damp [kg/s], mens pusherhastigheden er målt, som en massestrøm af hydraulikolie [kg/h]. Transformationen er sket ved at middelværdien er blevet trukket ud af begge signaler, hvorefter hydraulikolie signalet er blevet skaleret med dets egen varians i forhold til dampens $(\frac{\sigma_{damp}}{\sigma_{pusher}})$.

Denne betragtning tager ikke højde for at dampproduktionen skal konvergere mod referencen, hvorfor det er nødvendigt at øge den transformerede pusherhastighed med 30%.

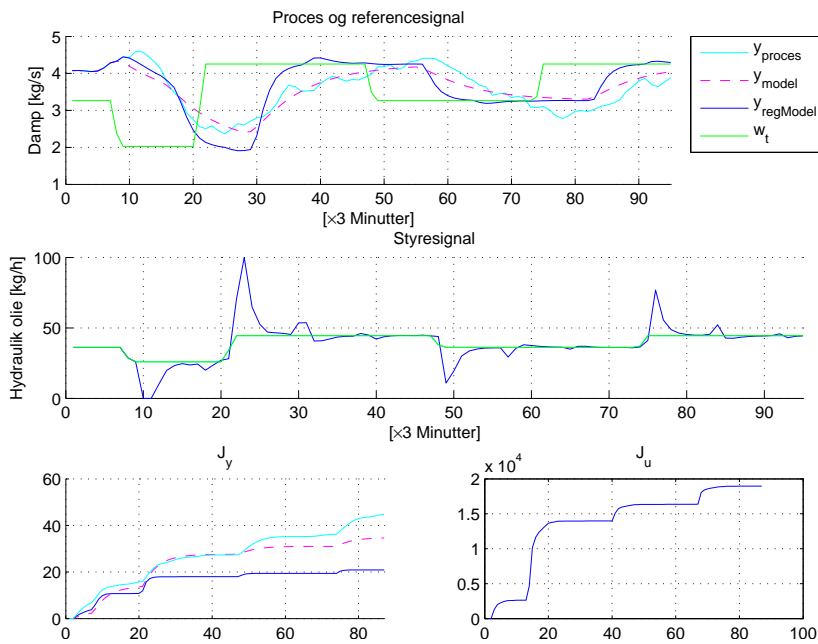
6.3 *PZ*-regulatoren

Det fremgår af figur 6.3, at MV_0 regulatoren kan regulere processen. Regulatoren gør alt for at minimere variansen mellem processen af referencen. Regulatorens arbejde kan mindskes ved at lade regulatoren om at følge en filteret version af referencen. Det sker ved at filtrer referencen med polynomiet

$$\frac{B_m}{A_m} \tag{6.2}$$

hvor systemets poler ($[0,8805 \ 0,4487]$) reduceres med 40% ($[0,5283 \ 0,26922]$) og implementeres som polynomiet $A_m (1 - 0.7974q^{-1} + 0.1422q^{-2})$. B_m skaleres således at den stationære forstærkning bliver 1, det vil sige at der ikke bliver noget offset ved brug af filteret. Denne modificerede form af MV_0 kaldes *PZ*-regulatoren.

PZ-regulatoren ses anvendt i figur 6.4, hvoraf det fremgår at systemet er reguleret pænt og stabilt. Styresignalet, som er massestrømmen af hydraulikolie, ligger indenfor arbejdsområdet, lige med undtagelse af det første trin ned, hvor den nedre grænse rammes.



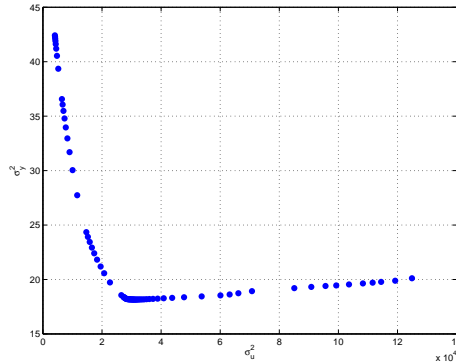
Figur 6.4: Regulering af dampen med pusherhastigheden. Benævnelsen y_{proces} bruges om den sande procesværdi ved forsøget, y_{model} er modellen af processen fundet i afsnit 5.2. $y_{regModel}$ er responset for den regulerede model, mens w_t er referencen, her i form af den transformerede pusherhastighed.

6.4 LQG-regulatoren

I modsætning til MV_0 - og PZ -regulatoren, som i kostfunktionen ikke tager hensyn til brugen af styresignal, tager LQG -regulatoren højde for størrelsen af styresignalet. Kostfunktionen er defineret ved

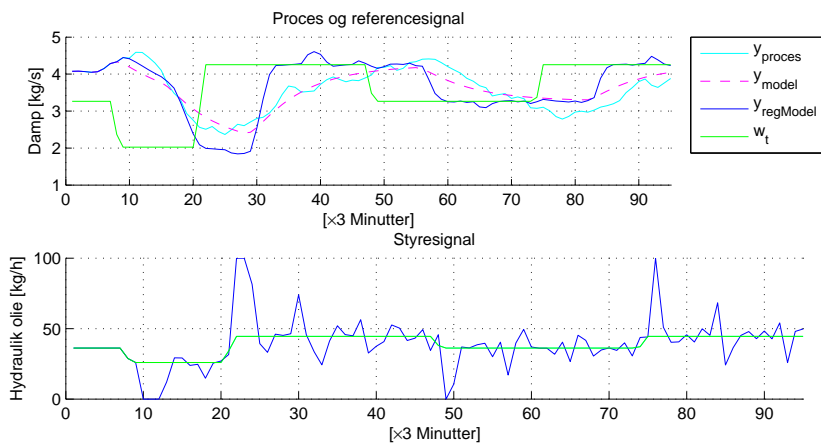
$$\bar{J}_t = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{N} \sum_{i=t}^N (y_i - w_i)^2 + \rho (u_i - u_0)^2 \right] \quad (6.3)$$

Som det fremgår af ligning 6.3 indgår styresignalet med en vægt ρ som angiver hvor stor en vægt bidraget for styre signalet må have i kostfunktionen. Er $\rho = 0$ vil det regulerede respons fra dampproduktionen være det samme som ved MV_0 regulatoren. Er ρ derimod en, fås et respons der ligner modellen af processen til forveksling, da ændringen af input næsten vil være et rent trin. Den indflydelse værdien af ρ har på variansen, i forhold til referencen, af henholdsvis input og output, fremgår af figur 6.5.

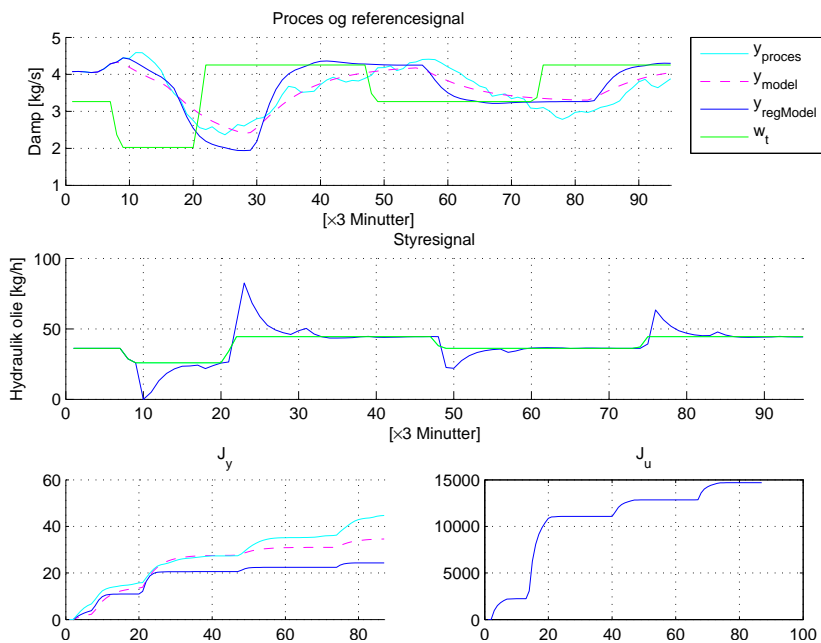


Figur 6.5: Plot af variansen for henholdsvis input (σ_u^2) og output (σ_y^2), med værdier af ρ fra 0,000001 til 0,01.

Den mindste varians af output (σ_y^2) opnås ved $\rho = 0,000048$, men som det fremgår af figur 6.6 er regulatoren stadig meget aktiv. Øges ρ til 0,0005 fås et respons der minder meget om responset fra PZ -regulatoren, se evt. figur E.3. Øges ρ yderligere til 0,001 bliver især variationen af styresignalet dæmpet betydeligt, og dampproduktionen reagerer mere roligt mod at variansen stiger, se figur 6.7.



Figur 6.6: LQG-regulator hvor $\rho = 0.000048$.



Figur 6.7: LQG-regulator hvor $\rho = 0.001$.

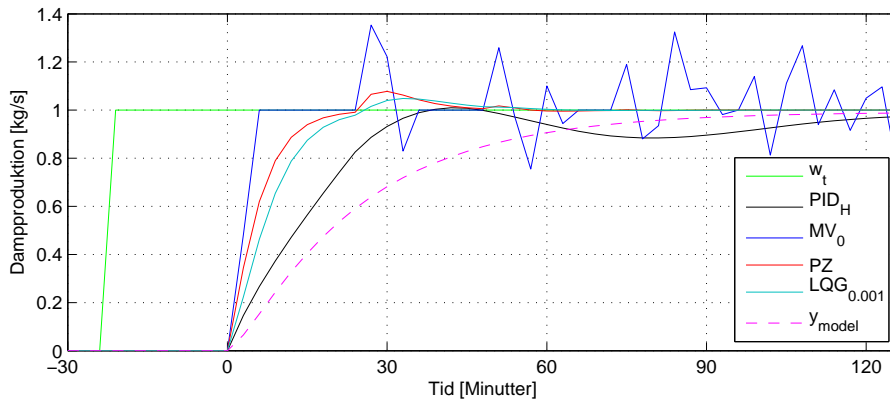
6.5 Sammenligning

Af tabel 6.2 fremgår det at PID_H -regulatoren vil kunne reducere variansen af dampproduktionen i forsøget. Sammenlignes derimod trinresponsen for PID_H -regulatoren med de øvrige regulatorer, se figur 6.8, fremgår det klart at PID regulatoren er meget langsom, i forhold til de modelbaserede stokastiske regulatorer.

	J_y	J_u
y_{proces}	44,74	
y_{model}	34,62	
MV_0	20,46	130.683
PZ	20,92	18.960
PID_H	21,81	10.367
PID_{ZN}	77,88	33.529
$LQG_{0,000048}$	18,15	31.417
$LQG_{0,0005}$	21,82	18.343
$LQG_{0,001}$	24,34	14.697

Tabel 6.2: Tabel over kostfunktionen opdelt i henholdsvis input og output for forsøget med pusherhastigheden.

MV_0 er den af de modelbaserede stokastiske regulatorer, der bruger mest regulator energi på at minimere variansen af dampproduktionen. Det er også den regulator, der er hurtigst til at få gennemført en ændring af dampproduktionen, men den konvergerer ikke roligt omkring en stationær tilstand. Ved at filtrere referenceændringen, PZ -regulatoren, bliver den regulerede proces lidt langsommere til at nå op omkring referenceændringen og variansen/kostfunktionen af dampproduktionen stiger derfor lidt. Men den klare fordel ved denne filtrering er at regulatorenergien reduceres betragteligt, se tabel 6.2. Det samme gør sig gældende for LQG -regulatoren, som minimerer over en horisont og inkluderer et bidrag fra styresignalet.



Figur 6.8: Procesmodellen reguleret med forskellige regulatorer. Den ikke regulerede procesmodel betegnes y_{model} .

Diskussion

7.1 Forsøgsplanlægning

Det var ikke muligt at påvirke forsøgsplanlægningen. Driftsforsøgene blev udført i forbindelse med 2 PSO-projekter og det er disse data der er blevet stillet til rådighed for specialet.

Det idelle havde dog været, hvis forsøgsserierne havde været lange nok til at inddele dem i en test- og en valideringsserie. Det ville også for forsøgenes validering havde været at foretrække en PRBS perturbation af inputtet i stedet for en trinændring. PRBS signalet skulle selvfølgelig designes for det relevante frekvensområde. Med et PRBS signal på styresignalet ville det også være muligt at teste affaldsforbrændingen i lukket sløjfe (Leskens et al., 2002).

Det havde også været en fordel, hvis målingerne var blevet kalibreret inden og ikke under forsøgene. Men det er absolut en fordel at de blev kalibreret.

7.2 Forbrændingsprocessen

Brændværdien af affaldet kan variere meget og hurtigt (van Kessel, 2003). De to elementer, der kan forklarer mest af variansen skal findes ved at sammenligne brændværdien for tørt husholdningsaffald fra tabel A.1 og brandværdien for det våde affald på HAV i forsøgsperioden. Værdien fra tabel A.1 er 19.890 kJ/kg mod 10.463 kJ/kg på HAV, med en spredning på 973 kJ/kg. Denne forskel, på næsten en faktor 2, skyldes hovedsaglig vand (van Kessel et al., 2004) og (Thomsen, 2004).

Thomsen (2004) fandt en regressionsligning for affalds brændværdi baseret på indholdet af vand og plastik. Variablene, der var mulige at anvende var *affald*, *plast*, *papir*, *vand* og *andet*. Bestod regressionsligningen alene af vandindholdet kunne 81% af variationen forklare. Blev variabelen plastik inkluderet kunne 94% af variansen forklare. At plast forklarede en god del af variansen kan slutes ud fra en vurdering af brændværdien, samt at plast ikke er hygroskopisk. 70% af den plast der bliver produceret i Danmark har en gennemsnitlig brændværdi, der er 4 gange højere end den gennemsnitlige brændværdi på HAV - ca. 40.000 kJ/kg (Plastindustrien i Danmark, 2006). Brændværdien af forskellige typer plast findes i tabel A.1.

En mekanisk metode til at mindske variationerne i affaldets brandværdi er ved at neddele og homogenisere affaldet inden det kommer i ovnen (Elsam og Elkraft, 1995).

Når affaldsforbrændingen på HAV betragtes, skal det erindres, at affald består af forskellige bestanddele, som hver især har en individuel antændelses temperatur. Forsøgene i van Kessel et al. (2004) og Thunman og Leckner (2001), var udført med et homogent brændsel, træ. Konstruktionsprincippet af risten på HAV er en vipperist, risten bryder affaldet op under transporten ned af risten. Inkluderes konstruktionsprincippet af risten sammen med forskellige materialers antændelsestemperatur, er det mest nærliggende at betragte forbrændingen, som to stadie forbrænding foreslået i van Kessel et al. (2004). Hvilket er med til at øge forstyrrelsen af forbrændingsprocessen.

Ligningen (2.5), der skulle gøre bestemmelsen af ristelaget uafhængigt af flowændringer, er blevet anvendt i trinresponsforsøgene for primærluft til risterne. Her viste beregningerne, at modstandstallet i disse tilfælde var afhængigt af ændringerne i luftflowet, se evt. figur D.3. Dette kan skyldes at flowændringerne er så store, at ikke lineære egenskaber fra fluidiseringsteorien (Hansen, 1999) begynder at få indflydelse f.eks. kanaldannelse, overgang fra laminar til turbulent strømning, m.fl.

7.3 Identifikation af flammefronten

Algoritmen til estimering af flammefrontens placering blev udformet og parametrene valgt således, at estimatet var stabilt i de fleste situationer. Valget af tærskelværdi og ikke mindst farve kombination gav forskellige resultater. De beskrev dog den samme dynamik, men den absolutte værdi for flammefrontens placering var forskellig.

Et af de parametre der blev beregnet var flammeintensiteten. Modsat forventet blev der ikke fundet en korrelation mellem CO og flammeintensiteten. Der er tidligere fundet sammenhæng mellem intensiteten i et IR billede og til en anden gasart i gassen, NO (Zipser et al., 2004). Denne sammenhæng blev ikke fundet i specialet, hvilket sandsynligvis hænger sammen med at der blev anvendt et IR kamera samt en validering af billedet (Zipser et al., 2004).

Der blev fundet en korrelation mellem flammeintensiteten og afstanden til flammefronten, som var modsat det forventede. Når en lyskilde kommer tættere på et kamera, opfattes den kraftigere. Her var det modsat, når forbændingen var ved indfødningen, var flammerne meget intense og koncentreret. Derimod var flammerne mere spredte og dermed svagere, når de var langt nede mod slaggefaldet.

Persson og Helgesson (2004) anvendte forskellige former for optiskefiltre foran et kamera for at få høje gradienter i det gråskalabillede som skulle analyseres. I stedet for at anvende filtre for høje gradienter valgte jeg kun at anvende den røde og gule farve fra kamerarets signal, da de to farver indeholdt store gradienter. Det var således rigeligt at vælge blå farve fra for at få et tilfredsstillende resultat. Endvidere anvendte Persson og Helgesson (2004) en simpel adaptiv tærskelværdi, 50% af den højeste pixelværdi i gråskalabilledet. Men Persson og Helgesson (2004) anvendte også alle tre farver fra kameraet, så farven til gråskalabilledet blev vægtet med $1/3$. Her i specialet, hvor der kun blev anvendt 2 farver, vægtes hver farve til gråskalabilledet med $1/2$. Samtidig blev den fravalgte blå farve, den farve der varierer mest i flammen.

Flammefrontsestimatet filtreres ved at anvende en medianværdi af de foregående 5 minutters flammefrontsestimater. Som alternativ hertil kunne der foregå en valideringsprocedure af selve billedet inden beregningen af flammefrontsestimatet (Müller et al., 1998) og (Zipser et al., 2004).

For at kunne inkludere forstyrrelser der kunne optræde i flammen, blev der anvendt en kantdetektering, hvor alt indenfor flammefronten blev medregnet som flamme. Kantdetektion blev også anvendt i Zipser et al. (2004) og Müller et al. (1998), hvor der skete en kantdetektering af forbrændingszonen. I Zipser et al. (2004) blev forstyrrelserne fjernet ved at anvende et differensfilter, hvor store differencer mellem billeder, blev reduceret med forskellige filtre. I dette speciale blev forstyrrelserne bibeholdt, for at se om der var korrelation mellem den gennemsnitlige flammeintensitet og CO målingen. Men der var ingen korrelation.

I Zipser et al. (2004) var der brug for at ekskludere forstyrrelser, fordi en af parametrene var et massemidtpunkt af forbrændingen. Placeringen af massemidtpunktet af forbrændingen blev fundet korreleret med fugtigheden af brændslet.

7.4 Dataanalyse / modellering

Modellen i dette speciale er forskellig for hvert af de to input, pusherhastigheden og primærluften under rist 2. Den ene er en ARX model af anden ordens ARX, mens den anden er en BJ model af tredje orden. Modellen fra Leskens et al. (2002) er en ARX model af 8×2 . orden. Det giver god mening at beskrive indfødning-/pusherhastigheden som en anden ordens ARX model. Afhængig af polerne for $A(q^{-1})$ polynomiet kan overføringsfunktionen gøres hurtigere eller

langsommere, med reele eller komplekse rødder afhængig af det aktuelle anlæg.

Overføringsfunktionen for pusherhastigheden i van Kessel (2003) har en noget lavere tidsforsinkelse på ca. 10 minutter mod de 24 minutter, der er fundet her. Dog blev det her i specialet observeret at tidsforsinkelsen i et trin op er forskellig fra et trin ned. Modellen i dette speciale er desuden meget langsommere end den der er fundet i van Kessel (2003), som allerede efter ca. 25 minutter svinger over den senere stationært tilstand. Modellen her i specialet er ca. 60 minutter om at nå i nærheden af det stationære niveau. Denne forskel beror sandsynligvis i en fysisk forskel mellem ovnene, f.eks. udmuring, ristepincip, ovnrumsstørrelse m.m.

Den væsentligste forskel i modellen fra van Kessel (2003), van Kessel et al. (2002) og Leskens et al. (2002), til dette speciale er modellen for primær luften. Her i specialet er det BJ model af anden orden, hvor andre har anvendt en ARX model af anden orden. Inputtet i van Kessel (2003) er primær luften generelt, mens inputtet her i specialet er primær luften under rist 2. Sammenlignes de to trinresponsændringer til dampproduktionen, antager responskurverne samme form de første 35 minutter. Men da stepændringerne her i specialet sker hvert 40. minut er det en medvirkende årsag til forskellen. Dog måtte de i van Kessel (2003) manipulere den statiske forstærkning således, at stationær tilstanden for ARX modellen var den samme som whitebox modellen. Det er ligeledes forsøgt her i specialet at manipulere med den statiske forstærkning, ved at danne en differensserie af input. Dog uden den ønskede effekt, trinresponsfunktionen konvergerer for langsomt mod nul.

Det beskrives ikke i van Kessel (2003) om alle parametrene i ARX modellen er signifikante. I dette speciale er alle parametre i modellerne signifikante i et 95% konfidensinterval. Modeller af højere orden end de valgte betød at et eller flere parametre ikke længere var signifikante.

7.5 Regulering

De modelbaserede stokastiske regulatorer, er betydelig hurtigere til at regulere processen end en traditionel *PID*-regulator. *PID*-regulatoren indeholder en integrator, så hvis der kommer en forstyrrelse, reguleres der tilbage til sætpunktet. Modelbaserede stokastiske regulatorer har ikke integratorer, i stedet omskrives regulatoren til at regulere på differensserien af processen og input. Denne form kaldes en moving-average regulator (Åstrom og Wittenmark, 1995).

Integratoren skal først observere en fejl mellem referencen og procesværdien, før den begynder at integrere processen tilbage til referencen. For at imødegå denne dødtid, kan et velvalgt feedforward signal anvendes. Den eksisterende iltmåling er til tiden $t = 0$ højst krydskorreleret med dampproduktionen fem til otte minutter senere, se figur D.1. Iltmålingen vil derfor være et godt feedforward signal. Feedforwardsignalet kunne f.eks. bruges til både at regulere pusher- og ristehastigheden. En ændring af ristehastigheden har nogenlunde samme tran-

siente respons i dampproduktionen som primærluften (van Kessel, 2003), dog ikke så kraftigt. Fordelen ved denne kobling er at ristehastigheden øger dampproduktion med det samme, og senere pga. af tidforsinkelse får den øgede pusherhastighed indflydelse. Desværre var det ikke muligt i dette speciale at belyse det transiente respons i dampproduktionen for ændringer i ristehastigheden.

I van Kessel et al. (2004) anvendes gasmålinger for CO_2 , O_2 og H_2O i røggassen, samt O_2 og H_2O i forbrændingsluften til beregning af brændværdien. Herved opnåes en hurtig bestemmelse af brændværdien på affaldet. Forstyrrelserne i brændværdien kan derfor hurtig imødegås i reguleringen. Brændværdiberegningen kræver en etablering af forholdsvise præcise gasmålinger (van Kessel et al., 2004).

Ideen med at bruge ristehastigheden til at regulere hvor langt ned forbrændingen har lov til at komme (Müller et al., 1998), kan sagtens overføres til flammefrontsestimatet i dette speciale. Det behøves måske ikke være en fuzzy-regulator, men en almindelig PI regulator fra flammefronten til pusher- og ristehastigheden, som skal holde et sætpunkt for flammefronten. Fordelen er at flammefronten kun sjældent er korreleret med tilførelsen af forbrændingsluft. Flammefronten er derimod højt korreleret med dampproduktionen, under trinændringerne i pusher- eller ristehastighed. Derfor er det nærliggende at styre netop disse to input med en flammerontsregulator. Det ikke været muligt at finde en overføringsfunktion for ristehastigheden, da dette forsøg er blevet valgt fra.

Konklusion

Det kan konkluderes, at det i forvejen installerede ovnkamera, ved brug af passende algoritme fås et estimat af flammefronten, der beskriver flammefrontens dynamik. Den bedste bestemmelse af flammefronten opnås ved at reducere antallet af farver, således at signalet fra kameraret kun består af rød og grøn eller kun rød. Ved at anvende en kantdetekteringsalgoritme er det muligt at inkludere f.eks. sort røg i flammen. Den gennemsnitlige flammeintensiteten er dog ikke korreleret med CO værdierne. Flammefronten følger ved ændringer i indfødningshastigheden, dampproduktionen. Ved ændringer i primærluften til rist 1 og rist 2, er korrelationen til flammefronten begrænset. Flammefronten kan ikke bruges som feedforwardsignal til dampproduktionen, men den kan give indirekte information om, hvor meget affald, der ligger på ristene.

Modellen af dampproduktionen med indfødningshastigheden som input har et meget langsomt respons og en stor gennemsnitlig tidsforsinkelse. Pga. af processens langsomme respons og ikke mindst tidsforsinkelse, kan det konkluderes at processen med fordel kan reguleres med en modelbaseret stokastisk regulator, især en *PZ*- og *LQG*-regulator. Ved at anvende disse regulatorer gøres processens respons hurtigere. Stigningstiden for processen mindskes og samtidig konvergerer processen hurtigere tilreferencen.

Perspektivering

Til at bestemme flammefronten bruges en algoritme, der anvender en tærskelværdi for middelværdien af den røde og grønne farve, samt en kantdetektion. Middelværdien af flammenintensiteten falder dets tættere på kammeret flammefronten kommer. Der kan derfor arbejdes med at finde en metode til at gøre tærskelværdien adaptiv fx. i forhold til afstanden til kameraet.

Endvidere kan der arbejdes med en verifikationsproces af flammefronten i billedet i stedet for som nu en filtrering af det estimeret. Verifikationsprocessen i billedet kan f.eks. begrænse den maximale ændring af flammefronten mellem hvert billede. De to estimater kan herefter sammenlignes, for senere at afprøve den bedste metode overfor operatørene. I begyndelsen med alarmgrænser, så operatøren bliver opmærksom på en unormal drift. Senere kan dette udvikles til at bruge flammefrontsestimatet i reguleringen. På denne måde kan algoritmen blive evalueret af folk, som arbejder med reguleringen til daglig.

Flammefronten kan ikke anvendes som et feedforward signal til dampproduktionen, her er iltprocenten i røggassen bedre. Flammefronten fortæller derimod en noget om mængden af affald på risten. Denne information kan anvendes i en fuzzyregulator, så hvis dampproduktionen falder samtidig med at flammefronten trækker sig tilbage, skal indfødningshastigheden stige. Men hvis flammefronten trækker sig tilbage uden at dampproduktionen stiger, skal der ikke ske en ændring af indfødningshastigheden. En fuzzyregulator er regelbaseret og kan i princippet opbygges efter hvad den erfarne operatør vil gøre i samme situation. Resultatet er en ikke lineær regulator. Alternativt kan flammefrontsregulatoren installeres med et dødbånd, således at regulatoren kun ændrer på pusher- og ristehastigheden, såfremt en min eller max grænse for flammefronten bliver

overskredet.

Tryktabet over risten er ikke uafhængigt af trinændringerne i luftflowet, baseret på teorien en flowmodstand i et rør. Ved at finde en beskrivelse, der gør tryktabet over risten uafhængigt af flowet, vil det være en indirekte beskrivelse af ristelaget. Denne information vil kunne bruges i en regulering.

Resultaterne af dataanalysen vil kunne bruges til design af fremtidige forsøg. Trinresponsen i modellerne giver en indikation om forstærkning samt frekvensindhold til et eksitationssignal. Eksitationen kan eventuelt foregå i lukketsøjfe med et PRBS signal og på flere input ad gangen. Herved kunne en MIMO model identificeres og regulatorer hertil designes.

De modelbaserede stokastiske regulatorer skal såfremt de implementeres i reguleringen, gøres til Moving-Average regulatorer, også kendt som inkrement regulatorer.

Det kunne i den forbindelse være ønskeligt at have længere dataserie end dem som er anvendt i dette speciale for nærmere at kunne analysere dynamikken, den variende tidsforsinkelse, samt om der skete ændringer af modelparameterne over ugen.

A.1 Eksempler på brændværdier

Brændværdierne er beregnet ved anvendelse af ligning 2.2 på side 9. På Haderslev kraftvarmeværk var den gennemsnitlige værdi for brændværdiberegningen 10,463 MJ/kg i de tre forsøgsuger.

Materiale	Brændværdi MJ/kg
Husholdningsaffald (tør)	19,89
Papir (tør)	17,62
Polyethylen - PE (C_2H_4)	43,72
Polypropylen - PP (C_3H_6)	43,72
Polystyren - PS (C_8H_8)	39,23
Polyurethan - PUR ($C_3H_8O_1N_1$)	30,89
PET ($C_{10}H_8O_4$)	28,78
PVC C_2H_3Cl	

Tabel A.1: Brændværdien for husholdningsaffald (tør) og papir (tør) (Hofbauer, 2006).

Plastforbruget i Danmark

I Danmark fordeler råvareforbruget af de forskellige plasttyper sig på følgende måde, tallene er hentet fra Plastindustrien i Danmark (2006)

Polyethylen	35%
Polypropylen	25%
Polystyren	10%
PVC	15%
PUR, PET, m.fl	15%

60% af råvareforbruget i Danmark har en brændværdi på 43,72 MJ/kg, inklusiv PS er der 70% af råvarene som har en brændværdi på omkring 40 MJ/kg.

Billedanalyse

B.1 Billedopsamlingsprogram

B.1.1 Hovedfunktion

Hovedcallbackfunktionen er bygget op omkring timerfunktioner, hvilket gør det muligt at redigere i de underliggende funktioner, mens timerfunktionen kører i baggrunden. Lige så snart underliggende funktioner er gemt tages den med i næste funktionskald. Nedestående funktion viser endvidere hvordan et frame-grapperkort anvendes i MATLAB

```
function [vidobj, timerobj, logobj]=videoStreamRunit;
% Hovedfil til videostreaming

try
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                               OPSÆTNING AF vid OBJKTET                               %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global vidobj aviobj matobj timerobj
global meanData timeIndex nRun meanDataOld histImg

tic
%% -----  INITIALISERING  -----
meanData=1;
meanDataOld=1;

%% -----  VIDEO OBJEKT  -----
vidobj = videoinput('winvideo',1,'RGB24_720x576')
% -----  REGION OF INTEREST  -----
str = vidobj.VideoResolution; %Aktuel størrelse videoinputtet
red = [100 20 20 6];          %Ønsket beskæring
vidobj.ROIPosition = [red(1) red(2) str(1)-red(1)-red(3) str(2)-red(2)-red(4)];
preview(vidobj);pause(4);closepreview(vidobj);
% -----  HUKOMMELSEN  -----
vidobj.LoggingMode = 'memory';
```

```

%% ----- FRAMEGRABBING -----
%% NOTE:
%% Frame rate, læst under funktionen FrameGrabInterval, er det antal
%% frames i sekundet som videokortet/ramgrabberen yder til systemet.
%% Frame rate er enhedsafhængig og er ikke mulig at sætte op i MatLab.
nFrames = 10;
vidobj.FrameGrabInterval = 1;          %25 svarer til 1 sek.
vidobj.FramesPerTrigger = nFrames;    %Stopper når dette antal opnåes.
vidobj.Timeout = 7;                   %60 svarer til 1 min.

%% ----- BILLED OPSETNING -----
vid.ReturnedColorSpace = 'rgb';       %Default er 'rgb'.
vid.NumberOfBands = 3;                %Antal af farvebånd (i praksis dybden i
                                       %arrayet) der gemmes. 'rgb' = 3 bånd.
                                       %Default = 3;

%% ----- Video streaming timer funktion -----
timerobj = timer('TimerFcn',@callbackVideoStream, ...
    'Period', 10.0, ...
    'ExecutionMode','fixedrate',...
    'StartFcn',@callbackAviFileStart,...
    'StopFcn',@callbackAviFileStop ...
);

toc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%return
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% ----- Gemmer log hver time -----
[y,m,d,H,M,S] = datevec(now);
sampleStart = datenum(y, m, d, H, M+1, 0);
logStart = datenum(y, m, d, H+1, 0, 0); % Starttidspunkt

logobj = timer('TimerFcn',@callbackLogObj, ...
    'Period', 3600.0, ...
    'ExecutionMode','fixedrate');

startat(timerobj,sampleStart)
startat(logobj,logStart)

%% slutning
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
catch
    disp(' Fejl i videoStreamRunit ')
end
end

```

B.1.1.1 Streaming funktion

Parametrene til flammefronts analysen kan ændres, hvis afviklingen af funktionerne sker i MATLAB.

```

function callbackVideoStream(fct,evt)
global vidobj aviobj timerobj
global meanData timeIndex meanDataOld histImg flAreal flIntensitet
tic

%% ----- INITIALISERING -----
try
    color = 'R';          %Parameter for flammefronts algoritme

```

```

    thres = 224;                %Parameter for flammefronts algoritme
    meanDataOld = meanData;
    sizeImg=size(meanData);
    ii = timerobj.TasksExecuted;
catch
    disp('Fejl ved initialisering i "callbackVideoStream.m"')
end

%% ----- STREAMING -----
try

    start(vidobj);
    wait(vidobj);
    stop(vidobj);
    data = getdata(vidobj);
    meanData = uint8(mean(data,4));
    %stdData = std(data,0,4)
    aviobj = addframe(aviobj,meanData);
    try
        timeIndex(ii) = datenum(now);
    catch
        disp( ' Fejl ved timeIndex i "callbackvideoStream.m" ');
    end
catch
    timeIndex(ii) = 0;
    meanData = meanDataOld;
    disp('Fejl ved streaming i "callbackVideoStream.m"');
end

%% ----- PLOT af billed -----
try
    image(meanData); axis image; hold on
catch
    disp(' Fejl i plot af billede ')
end

% %%% FLAMMEFRONT %%%
try
    % Beskæring af billede for hurtigere afvikling af algoritmen
    r1 = 100;
    r2 = 400;
    k1 = 80;
    k2 = 550;
    [x, y, areal, intensitet, flamme]=analyseMorphology(meanData(r1:r2,k1:k2,:), color,thres,2,2);
    flAreal(ii) = areal;
    flIntensitet(ii) = intensitet;
    plot(y+k1,x+r1,'.b');
    hold off;
    title(['Estimat af flammefront [',color,':',num2str(thres),']']);
    % bImg = sparse(x+r1,y+k1,1,sizeImg(1),sizeImg(2)); % Flammefronten
    % histImg = histImg + double(bImg); % Histogram over flammefront
catch
    disp('Billedanalyse ikke fuldført')
end

%% ----- KOMMANDOPROMT OUTPUT -----
try
    tid = toc;
    fprintf('--- Sample nr. %3d, Areal %6.1f, Intensitet %5.1f -> Beregningstid %3.1f sek ---\n ', ...
        ii, areal/100, intensitet, tid)
catch
    try
        fprintf('--- Sample nr. %3d, -> Beregningstid %3.1f sek ---\n ', ii, tid)
    catch
    end
end

```

```

        disp(' Fejl ved print af output i "callbackVideoStream.m"');
    end
end

```

B.1.1.2 Morphologisk analyse

Den morphologisk analyse kan laves med dilation først efterfulgt af erosion eller omvendt først erosion efterfulgt af dilation. Nedenstående funktion udfører først en dilation efterfulgt af en erosion.

```

function [x, y, areal, intensitet, flamme] = analyseMorphology(im, RGB, thres, valg, kerne)
%%
%   [x, y] = analyseMorphology(im, RGB, thres, valg, kerne)
%
% Valg af kant algoritme
%   valg = 1;   Simpel og hurtig kant - en gang erodering.
%   valg = 2;   Kompliseret morphologisk algoritme
%
% Valg af kerne til den morphologiske algoritme
%   kerne = 1;   Fin kant 3x3 kerne
%   kerne = 2;   Grov kant med 5x5 kerne

%% Initialisering
sizeIm2D = size(im(:,:,1));

%% Struktur element
seKant = [1 1 1; 1 1 1; 1 1 1]; % Kant detektion
switch kerne
    case 1
        se = ones(3,3);
    case 2
        se = ones(5,5);
    case 3
        se = ones(7,7);
    otherwise
        disp('Der er ikke valgt en kerne til den morphologiske algoritme')
end

nSe = 2; % Antal gange 'se' skal køres.
nSeRoeg = 2;

%% Løkker
typer = {'Simpel_kant', 'Morphology'};
valg = lower(char(typer(valg)));

switch valg
    case 'simpel_kant'
        [flamme, under] = binaryIm(im, RGB, thres);

        %Finder kanten
        kant = imerode(flamme, seKant);
        kant = flamme - kant;

        %Koordinaterne på kanten
        [x, y] = find(kant == 1);

    case 'morphology'
        [flamme, under] = binaryIm(im, RGB, thres);
        imgZero = zeros(sizeIm2D, 'uint8');
        imgZ = imgZero;
        roeg = imgZ;

```

```

% RØG OG PARTIKLER %
%Erosion af sort røg og partikler
roeg( find(flamme == 0) ) = 1;
for ii=1:nSeRoeg
    roeg = imerode(roeg,se);    %Blotter sorte pletter
end

%Identificere den største sorte plet
[L, n] = bwlabel(roeg,4);    %Label på røg i billed
for ii=1:n
    roegID(ii) = length( find( L == ii) );
end
[Max, labelMax] = max(roegID);
L1 = find(L == labelMax);    %L returneres som double

%Dilatare de sorte omgivelser tilbage
imgZero(L1) = 1;
roeg = imgZero;
for ii=1:nSeRoeg
    roeg = imdilate(roeg,se);
end
L1 = find(roeg == 1);

%Finder flamme
flamme = ones(sizeIm2D,'uint8');
flamme(L1) = 0;

% FLAMME %
%Erosion små selvstændige flammer
for ii=1:nSe
    flamme = imerode(flamme,se); %Blotter selvstændige flammer
end
[L, n] = bwlabel(flamme,4);    %Label på flammerne med 4 kerne
                                %4 kernen er optimal til at fra
                                %sortere flest og hurtigst objekter
                                %L returneres som double ---- meget memory

%Identificere den største flamme
for ii=1:n
    flammeID(ii) = length( find( L == ii));
end
[Max, labelMax] = max(flammeID);
L1 = find(L == labelMax);    %L returneres som double

%Dilatare den største flamme tilbage
imgZ(L1) = 1;
flamme = imgZ;
for ii=1:nSe
    flamme = imdilate(flamme,se);
end

%Finder kanten
kant = imerode(flamme,seKant);
kant = flamme - kant ;
[x y] = find(kant == 1);

otherwise
    disp('Igen aktiv løkke');
end

```

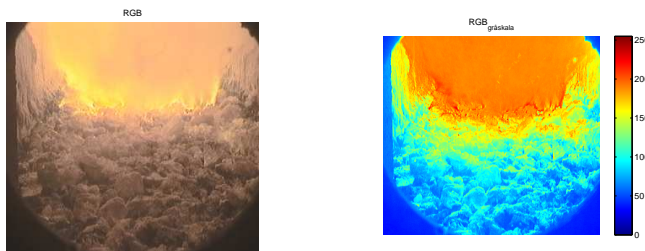
```

%% Flamme intensitet
areal=sum(sum(flamme));
intensitet = sum(sum( im(:,:,2) .* flamme))/areal;
%intensitet = sum(sum( (im(:,:,1)/2 + im(:,:,2)/2) .* flamme))/areal;

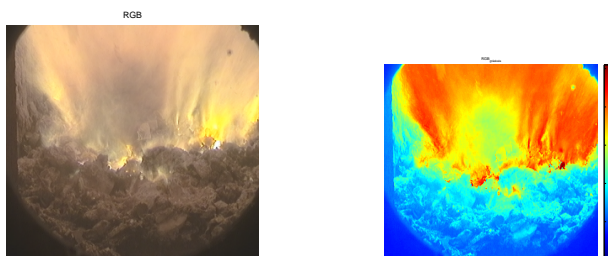
```

B.2 Billeder af to forskellige driftssituationer

Billederne der er vist i figurene drejer sig om to forskellige driftssituationer. Den ene er hvor flammefronten ensartet, hvilket er situationen den 03/03-2006 kl. 08:21:10¹. Den anden situation er hvor flammefronten er udsat for en forstyrrelse, denne situation foregår er fra den 03/03-2006 men kl. 11:03:40².



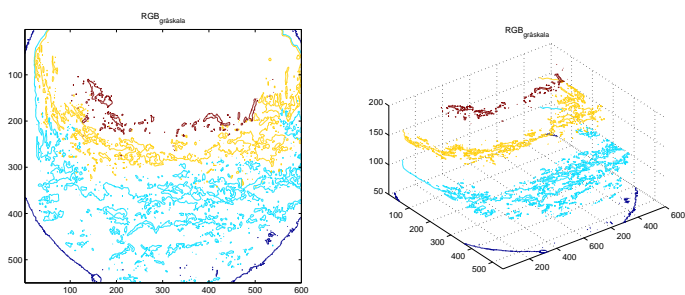
Figur B.1: Driftssituation 1, hvor flammefronten er ensartet



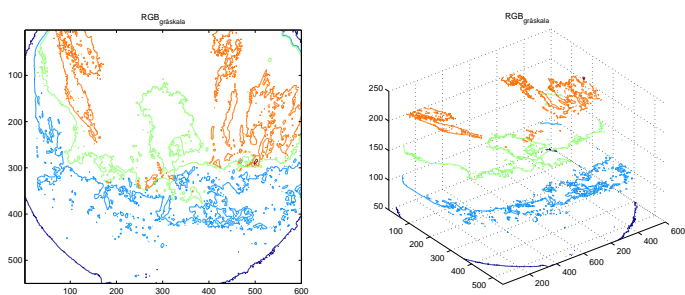
Figur B.2: Driftssituation 2, hvor flammefronten er udsat for en forstyrrelse.

¹Det 127 billede efter kl. 8:00

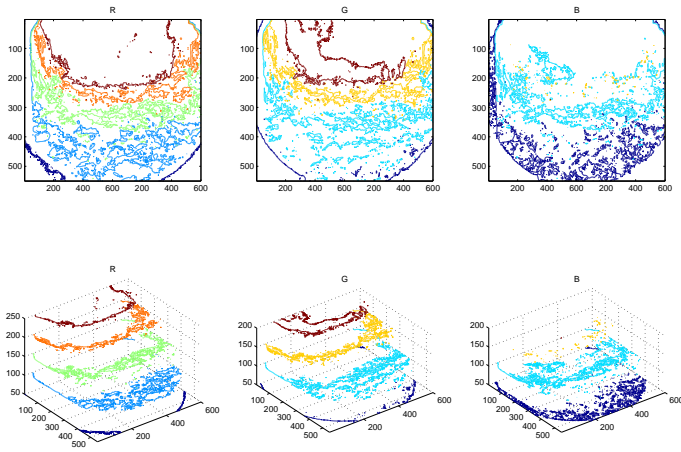
²Det 22 billede efter kl. 11:00



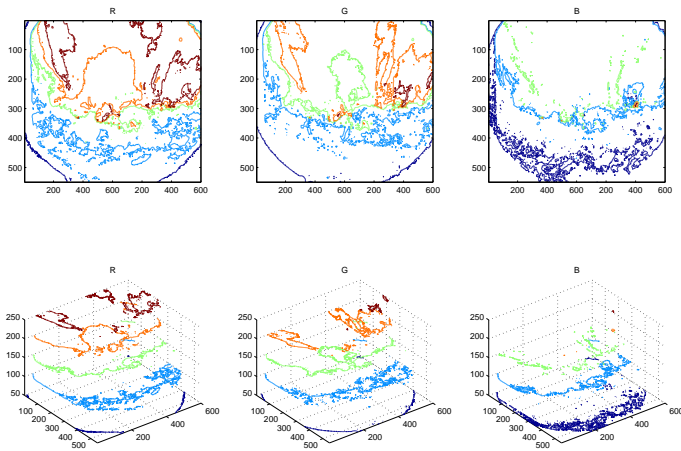
Figur B.3: Driftssituation 1: Konturplot af RGB billedet, hvor hver farve er vægtet $1/3$.



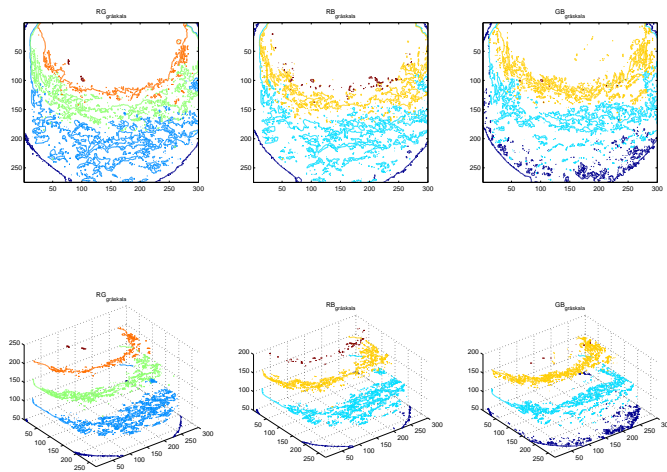
Figur B.4: Driftssituation 2: Konturplot af RGB billedet, hvor hver farve er vægtet $1/3$.



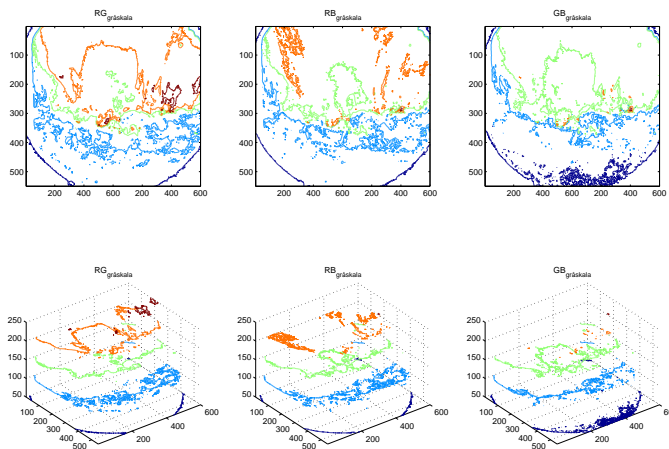
Figur B.5: Driftssituation 1: Konturplot af de enkelte farver.



Figur B.6: Driftssituation 2: Konturplot af de enkelte farver.

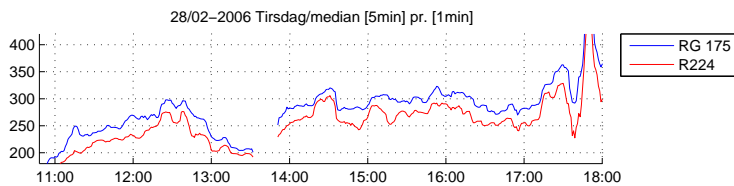


Figur B.7: Driftssituation 1: Konturplot af pixelværdierne for forskellige kombinationer af 2 farver, hvor hver farve er vægtet med $1/2$.

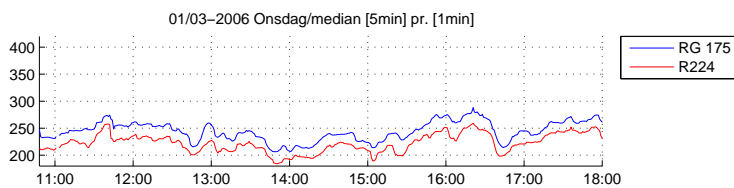


Figur B.8: Driftssituation 2: Konturplot af pixelværdierne for forskellige kombinationer af 2 farver, hvor hver farve er vægtet med $1/2$.

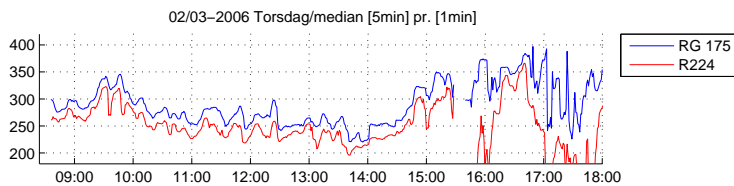
B.3 Forsøg med forskellige tærskelværdier



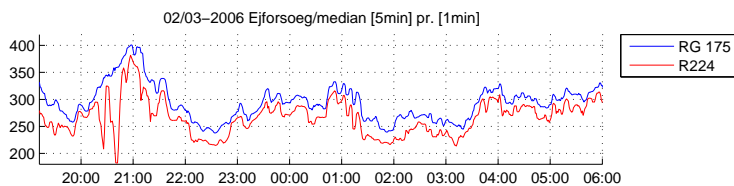
Figur B.9:



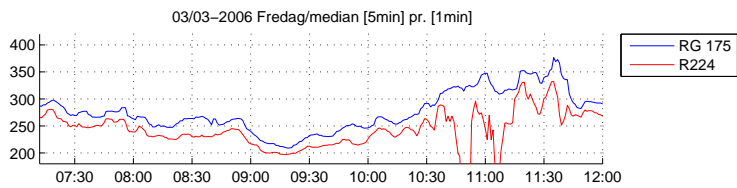
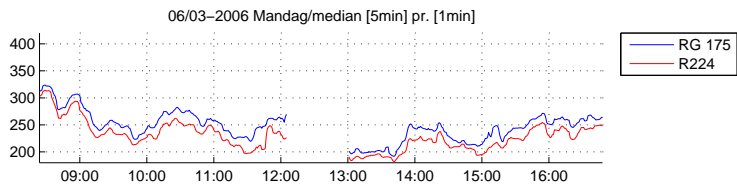
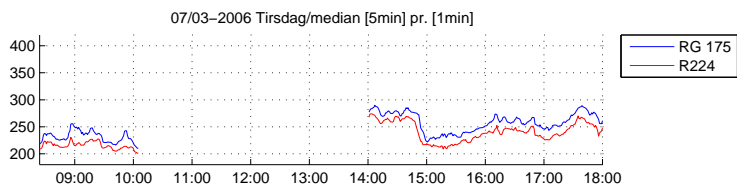
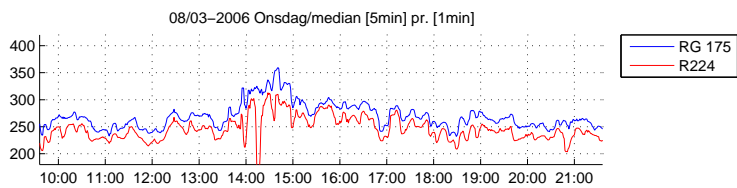
Figur B.10:

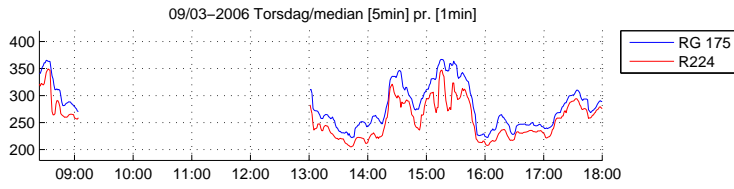


Figur B.11:

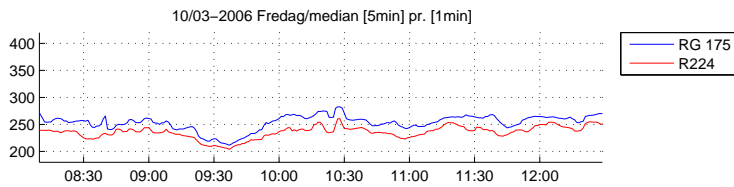


Figur B.12:

*Figur B.13:**Figur B.14:**Figur B.15:**Figur B.16:*



Figur B.17:



Figur B.18:

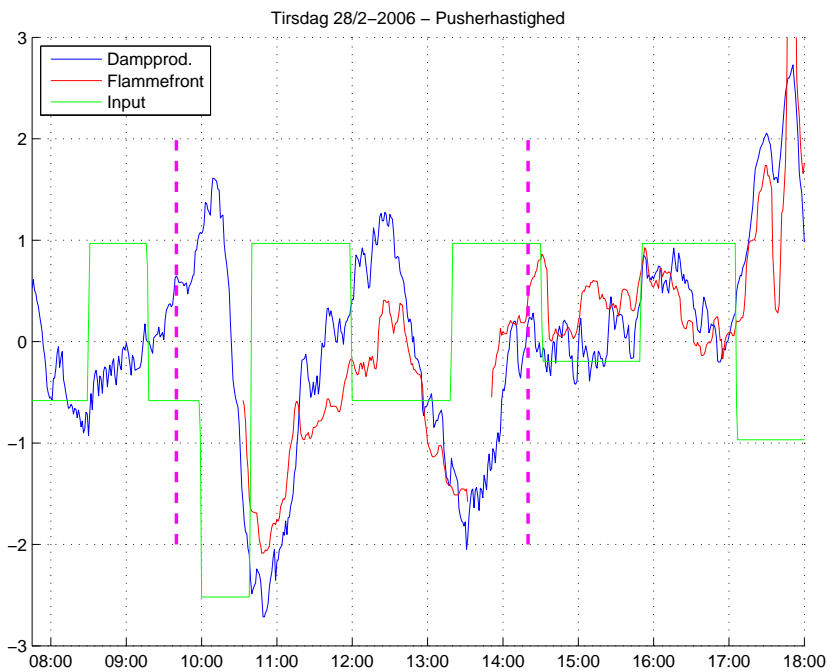
Databeskrivelse

C.1 Flammefront og dampdata

C.1.1 Pusherhastighed

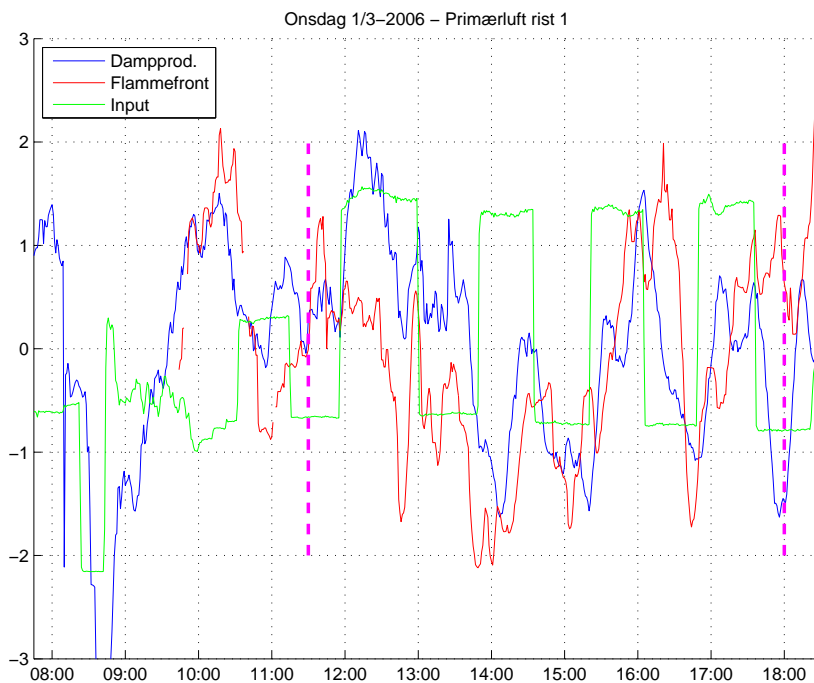
Væsentlige uddrag af hændelsesloggen:

- Kl. 7:45 tages ovnsens regulering i manuel.
- Kl. 7.45 pusherhastigheden reduceres lidt inden første stepforsøg, pga. af høj brændværdi.
- Kl. 10:00 brændværdien synes at have været stigende.
- Kl. 10:00 steppes fra 1 til 0,5, driften nævner at 0,8 normalt er minimum for pusherne, men dette gøres for at for ovnen ned i produktion.
- Ingen indgriben noteret i hændelsesloggen udover pusherstep.
- Kl. 18:00 sættes ovnsens regulering tilbage i automatik.



Figur C.1: Forsøg med pusherhastigheden fra kl. 8:15 til kl. 18:00. Starttidspunktet er en $\frac{1}{2}$ time efter sidste ændring i reguleringsparametrene. Målingerne i denne periode danner grundlaget for databehandlingen.

C.1.2 Primærluft til rist 1

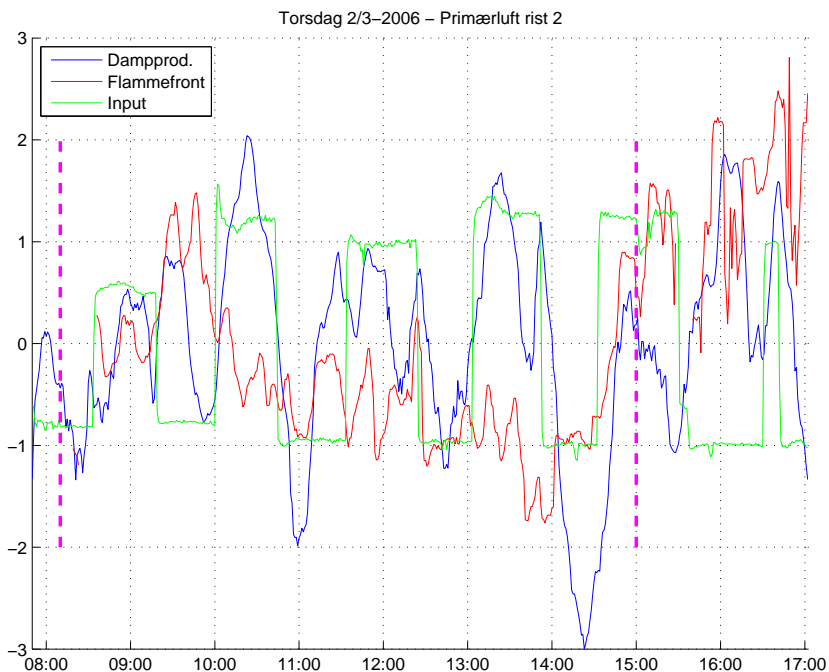


Figur C.2: Forsøg med primærluften til rist 1 fra kl. 10:05 til kl. 18:20. Målingerne i denne periode danner grundlaget for databehandlingen.

Væsentlige uddrag af hændelsesloggen:

- Kl. 7:45 tages ovnens regulering i manuel første gang.
- Kl. 8:10 ovnen tripper pga. høj temperatur på bypass-stationen.
- Kl. 8:50 startes ovnen op igen med reguleringen i automatik.
- Kl. 10:05 tages ovnens regulering i manuel igen.
- Ingen indgriben noteret hændelsesloggen udover steppene i primærluften til rist 1.
- Kl. 18:00 sættes ovnens regulering tilbage i automatik.

C.1.3 Primærluft til rist 2

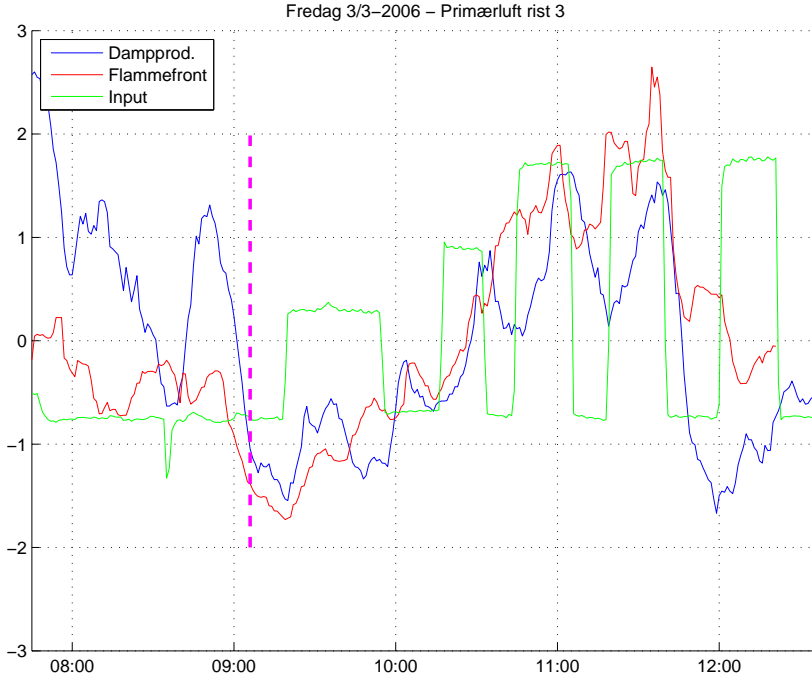


Figur C.3: Forsøg med primærluften til rist 2 fra kl. 7:50 til kl. 17:12. Sluttidspunktet er valgt til en $\frac{1}{2}$ time efter sidste notat i hændelsesloggen. Målingerne i denne periode danner grundlaget for databehandlingen.

Væsentlige uddrag af hændelsesloggen:

- Kl. 7:50 tages ovns regulering i manuel.
- Kl. 13:30 til kl. 14:00 skiftes brændsel, dette har muligvis en lavere brændværdi.
- Ingen indgriben noteret i hændelsesloggen udover steppene i primærluften til rist 2.
- Kl. 16:42 sidste notat i hændelsesloggen er om step ned for primærluften til rist 2. Intet om hvornår regulering sættes i automatik.

C.1.4 Primærluften til rist 3

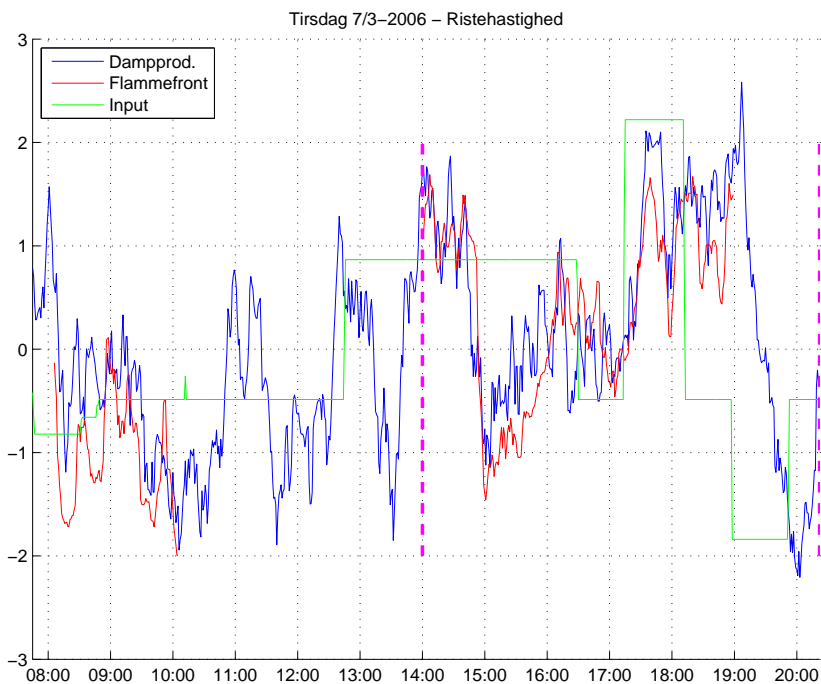


Figur C.4: Forsøg med primærluften til rist 3 fra kl. 9:06 til kl. 12:37. Starttidspunktet er valgt $\frac{1}{2}$ time efter sidste indgriben i systemet, for at det falder kan falde til ro. Sluttidspunktet er valgt pga. indgrebene skaber en unødvendig forstyrrelse. Målingerne i denne periode danner grundlaget for databehandlingen

Forsøg med primærluften til rist 3 Væsentlige uddrag af hændelsesloggen:

- Kl. 7:45 tages ovnen i manuel.
- Kl. 8:30 til kl. 8:36 forskellig indgriben i primærluft til rist 1, primærluft til rist 2 samt ristehastighed til rist 2. Normaliseret igen kl. 8:36.
- Kl. 12:37 til kl. 12:40 udføres et kort step i primærluften til rist 2 med 90 % i øget mængde.
- Kl. 12:43 til kl. 12:49 udføres igen step i primærluften til rist 2 med 90 % i øget mængde.
- Kl. 13:00 sættes ovnens regulering tilbage i automatik.

C.1.5 Ristehastighed



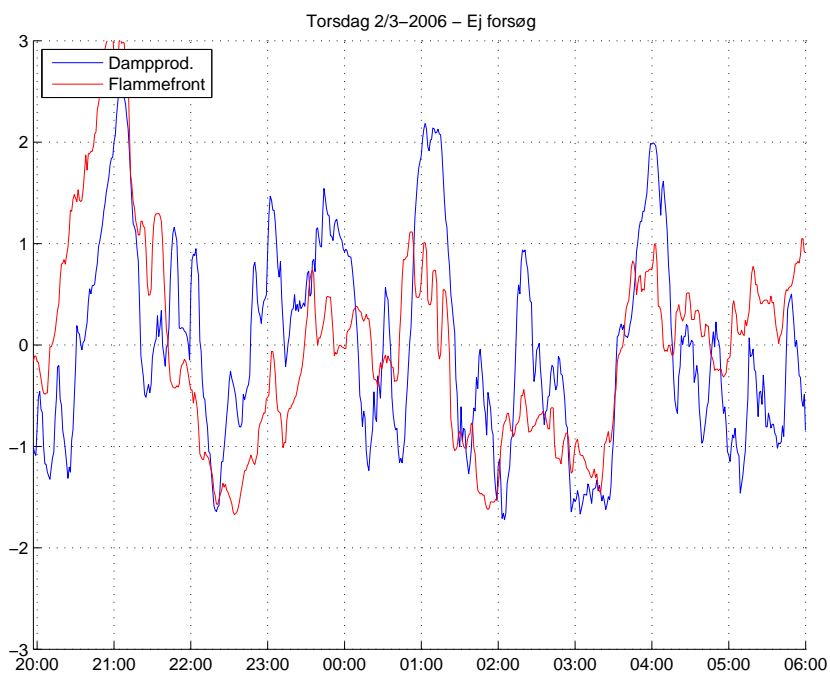
Figur C.5: Ristehastighedsforsøg fra kl. 12:15 til kl. 20:22. Starttidspunktet er valgt $\frac{1}{2}$ time inden første step og sluttidspunktet er $\frac{1}{2}$ time efter sidste notat i hændelsesloggen. Målingerne i denne periode danner grundlaget for databehandlingen.

Væsentlige uddrag af hændelsesloggen:

- Kl. 7:45 tages ovnen i manuel.
- Kl. 8:30 og kl. 9:00 justeres lasten lidt grundet lav brændværdi.
- Kl. 9:30 til kl. 12:30 udføres sondeforsøg vedr. belægninger.
- Kl. 12:45 første step i ristehastighed.
- Kl. 13:30 til 16:30 nyt belægningforsøg med sonde.
- kl. 19:52 er det sidste notat i hændelsesloggen om at ristehastigheden normaliseres. Intet om hvornår regulering sættes i automatik.

C.1.6 Ej forsøg

Nedenfor ses damp og flammefront for natten mellem torsdag 2/3-2006 og fredag 3/3-2006. Dette er det eneste tidspunkt, der blev lagret billeder fra forbrændingen med ovnens regulering i automatik.

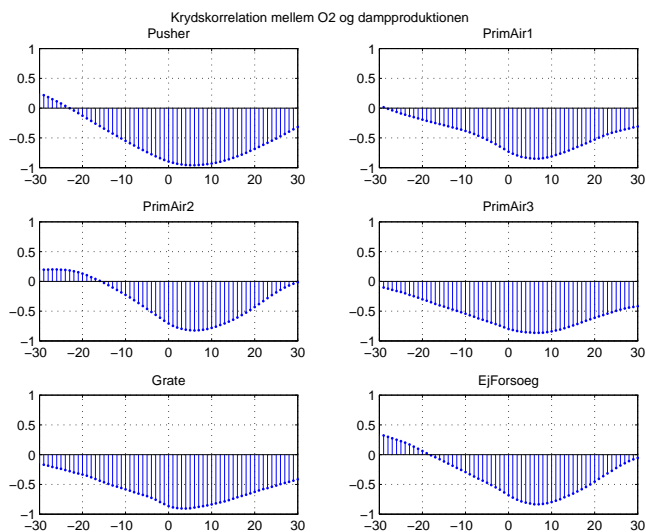


Figur C.6: Flammefront og dampdata med ovnreguleringen i automatik.

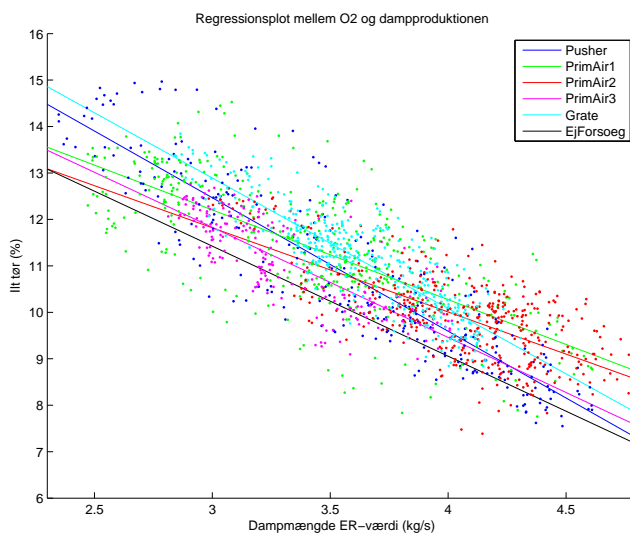
BILAG D

Dataanalyse

D.1 Ilt og dampproduktion

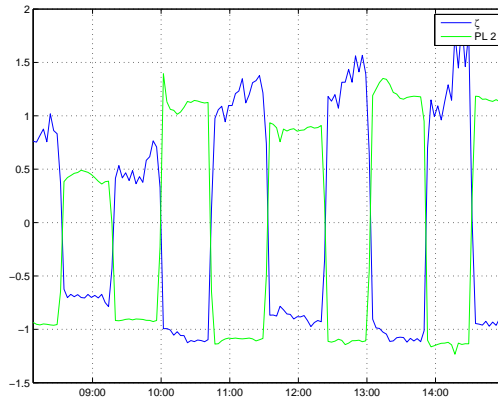


Figur D.1: Figureerne viser krydskorrelationen mellem flammefronten og ilt koncentrationen i en tør røggas. Alle plot viser samme korrelationsfunktion, at en lavere iltmåling til tiden $t=0$ betyder en højere dampproduktion efter 5-8 minutter, og omvendt. Observationerne er baseret på 1 minuts middelværdier.



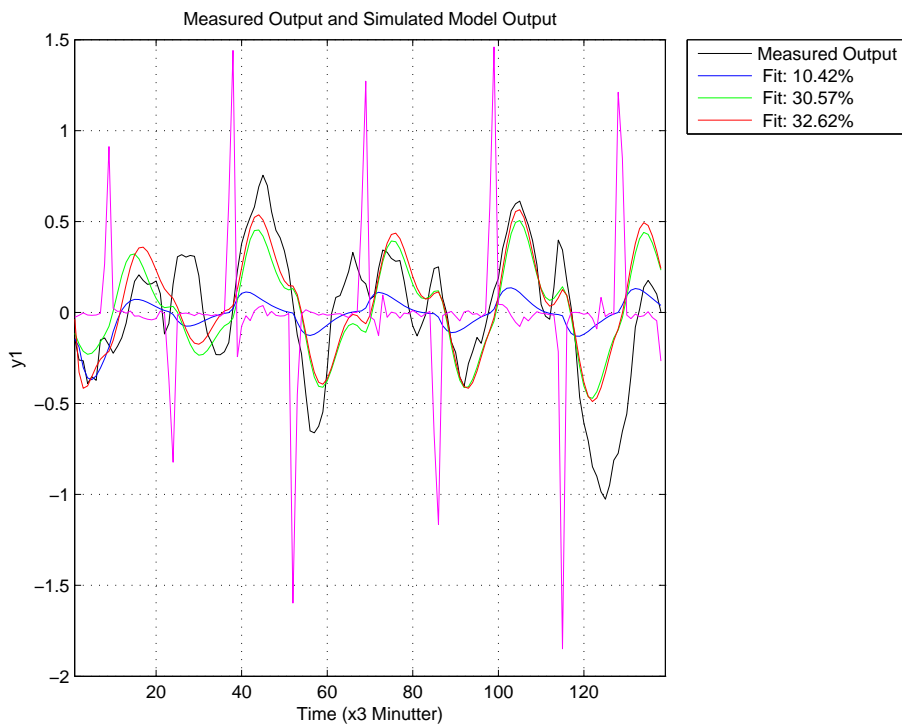
Figur D.2: Figuren viser xy -plot af flammefronten og ilt koncentrationen i en tør røggas samt tilhørende regressionsligninger. Observationerne er baseret på 1 minuts middelværdier.

D.2 Modstandskoefficienten (ζ) over risten



Figur D.3: Centerede og skalerede data fra forsøget med primærluften under rist 2 og det beregnede modstandstal fra ligning 2.5. Modstandstallet er ikke uafhængigt af flowet.

D.3 Simulering

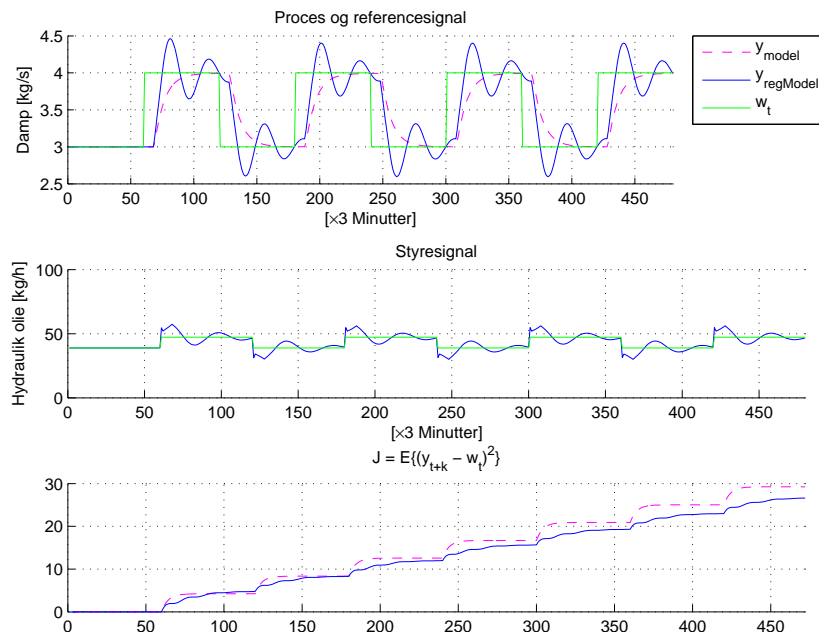


Figur D.4: Den blå kurve er en simulering af $BJ(1,0,2,3)$ baseret på differensserien af primærluften under rist 2, som input.

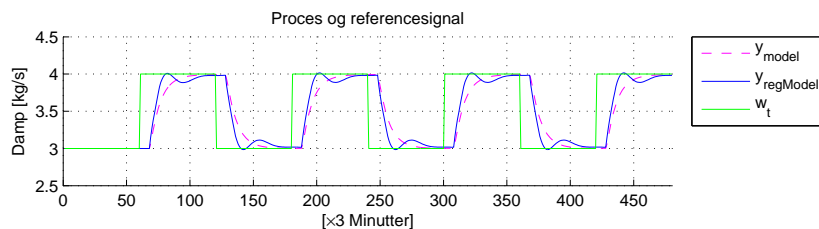
BILAG E

Regulering

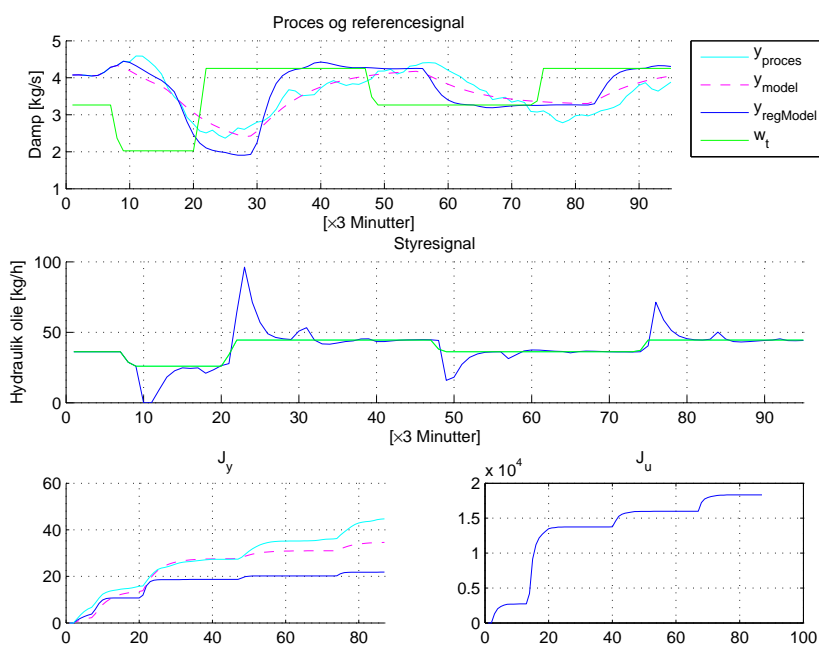
E.1 Regulering af dampproduktionen med pusterhastigheden



Figur E.1: PID regulering af dampen med pusherhastigheden med Ziegler-Nichols parametre, hvor referenceændringen er $\pm 0,5$ [kg/s], hver 3. time i 24 timer.



Figur E.2: PID regulering af dampen med pusherhastigheden med Heilmanns parametre, hvor referenceændringen er $\pm 0,5$ [kg/s], hver 3. time i 24 timer.



Figur E.3: Regulering af dampproduktionen med LQG-regulatoren hvor $\rho = 0,0005$.

Litteratur

- Åstrom, K. J. og B. Wittenmark (1995). *Adaptiv Control* (2 ed.). Addison Wesley Series in Electrical Engineering: Control Engineering. Addison Wesley.
- Beredskabsstyrelsen (2006). http://www.brs.dk/laereboeger/lbbra/5594_kap08a3.html.
- BS Miljøteknik A/S (1991). *Kapacitetsdiagram, Ovn- og kedelanlæg, 4,5t/h, Pos. 2, Bilag1*.
- BS Miljøteknik A/S (1992). *Montagevejledning, ristetæppe, generelt, side 2*.
- Carstensen, J. M. (Red.) (2002). *Image analysis, vision and computer graphics*, Chapter 7. IMM/Informatik og Matematisk Modellering. Mathematical morphology.
- Cebe og Hoffmann (1999). *Einführung in die Thermodynamik* (12 ed.). Carl Hanser Verlag München Wien.
- Christensen, T. H. (Red.) (1998). *Affaldsteknologi* (1 ed.). Teknisk Forlag.
- Clarke, D. W., C. Mohtad, og P. S. Tuffs (1987). Generalized Predictive Control - Part I. The Basic Algorithm. *Automatica* 23(2), 137–148.
- Danish Board of District Heating (2006). <http://www.dbdh.dk/dansk/historie/historie.html>.
- Elsam og Elkraft (1995). Neddeling og homogenisering af affald til affaldskraftvarmeværker. Technical report.
- Elsam Engineering A/S (2006). Fordeling af forbrændingsluft, hav. Technical report. Internt notat af den 3. juli 2006.
- Force Technology, Elsam, og Energi E2 (2005). Reducerede emissioner ved optimeret forbrænding. Technical report, Elkraft System. BRO-91.015, FU nr. 1201.

- Hansen, L. A. (1999). *Enhedsoperationer i den kemiske industri* (4 ed.), Volume 1. Polyteknisk forlag.
- Hastie, T., R. Tibshirani, og J. Friedman (2001). *The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer Series in Statistics. Springer.
- Heilmann, T. (1998). *Praktisk regulering og instrumentering* (3 ed.). Heilmanns Forlag.
- Hofbauer, H. (2006). *BIOBIB - A Database for biofuels*. University of technology Vienna, Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology. <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/search.html>.
- Jannerup, O. og P. S. Sørensen (2000). *Introduktion til regulerings teknik* (2 ed.). Polyteknisk Forlag.
- Kleis, H. og S. Dalager (2003). 100 År med affaldsforbrændning i Danmark. Holbæk Exprestrykkeri.
- Krex, H. E. (Red.) (1997). *Maskin ståbi* (7 ed.), Volume 4. Teknisk Forlag A/S.
- Leskens, M., L. B. M. van Kessel, og P. M. J. van den Hof (2002). MIMO closed-loop identification of an msw incinerator. *Control Engineering Practice* 10(3), 315–326.
- Ljung, L. (1999). *System identification* (2 ed.). PTR Prentice hall information and system sciences series.
- Madsen, H. (1998). *Tidsrækkeanalyse* (3 ed.). IMM/Informatik og Matematisk Modellering.
- Marskell, W. G., J. M. Miller, og M. R. Webb (1946). Mode of combustion of coal on chain grate stoker. *Fuel* 25(6), 159–162.
- Miljøministeriet (2003). Bekendtgørelse om anlæg, der forbrænder affald. BEK nr. 162 af 11/03/2003 (Gældende).
- Miljøministeriet (2005). Affaldsstatistik 2004, orientering fra miljøstyrelsen nr. 7 2005. Technical report, Miljøstyrelsen.
- Müller, B., H. B. Keller, og E. Kugele (1998). Fuzzy control in thermal waste treatment. *6th European Congress on Intelligent Techniques and soft computing, EUFIT '98*, 1497–1501 vol. 3.
- Nielsen, T. S. (2002). *Online prediction and control in nonlinear stochastic systems*. Ph. D. thesis, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.

- Palsson, O. P., H. Madsen, og H. T. Søgaard (1994). Generalized predictive control for non-stationary systems. *Automatica* 30(12), 1991–1997.
- Persson, A. og J. Helgesson (2004). Indikation av förbränningsituation genom bildanalys av rostens eldstad. Technical report, VÄRMEFORSK Service AB, 101 53 Stockholm. Projekt: P4-319.
- Plastindustrien i Danmark (2006). <http://www.plast.dk>.
- Poulsen, N. K. (1999). *Stokastisk adaptiv regulering, bind I-V*. Lyngby, Denmark: IMM/Informatik og Matematisk Modellering.
- Regeringen (2003). Affaldsstrategi 2005-2008. Technical report, Miljøministeren.
- Thomsen, S. N. (2004). Multivariabel statistik, mini projekt 2. Baseret på udleveret data fra Professor Bjarne Ersbøl.
- Thunman, H. og B. Leckner (2001). Ignition and propagation of a reaction front in cross-currentbed combustion of wet biofuels. *Fuel* 80(4), 473–481.
- van Kessel, L. B. M. (2003). *Stochastic disturbances and dynamics of thermal processes*. Ph. D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- van Kessel, L. B. M., A. Arendsen, P. D. M. de Boer-Meulman, og G. Brem (2004). The effect of air preheating on the combustion of solid fuels on a grate. *Fuel* 83(9), 1123–1131.
- van Kessel, L. B. M., A. R. J. Arendsen, og G. Brem (2004). Online determination of the calorific value of solid fuels. *Fuel* 83(1), 59–71.
- van Kessel, L. B. M., M. Leskens, og G. Brem (2002). Online calorific value sensor and validation of dynamic models applied to municipal solid waste combustion. *Process safety and environmental protection* 80(5), 245–255.
- Wellstead, P. E. og M. B. Zarrop (1995). *Self-tuning Systems, Control and Signal Processing*. John Wiley & Sons.
- Zipser, S., A. Gommlich, J. Matthes, H. B. Keller, C. Fouda, og R. Schreiner (2004). On the optimization of industrial combustion processes using infrared thermography. *Proceedings of the 23rd IASTED International Conference Modelling, identification and control* (vol.23), 386–391.