



Analys av designalternativ för snabbare dynamik i kolkraftverk med koldioxidavskiljning

David Elofsson
Mia Höök
Viktor Johansson
Mohammed Mahmoud
Adam Therning
Simon Öberg

Institutionen för Energi och Miljö
Avdelningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2014
Kandidatarbete ENMX02-14-04

Analys av designalternativ för snabbare dynamik i kolkraftverk med koldioxidavskiljning

DAVID ELOFSSON
MIA HÖÖK
VIKTOR JOHANSSON
MOHAMMED MAHMOUD
ADAM THERNING
SIMON ÖBERG

Handledare: Stefania Òsk Gardarsdóttir
Fredrik Normann
Examinator: Filip Johnsson

Kandidatarbete
ENMX02-14-04

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för Energi och Miljö
Göteborg, Sverige 2014

Analys av designalternativ för snabbare dynamik i kolkraftverk med koldioxidavskiljning

David Elofsson
Mia Höök
Viktor Johansson
Mohammed Mahmoud
Adam Therning
Simon Öberg

© David Elofsson, Mia Höök, Viktor Johansson, Mohammed Mahmoud,
Adam Therning, Simon Öberg, 2014.

Department of Energy and Environment
Division of Energy Technology
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
SE-412 96 Gothenburg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

COVER:
A coal-fired power plant [© JW Luftfoto].

Printed in Sweden
Reproservice
Gothenburg, Sweden 2014

Förord

Vi vill tacka våra handledare Fredrik Normann och Stefania Òsk Gardarsdóttir som med stort engagemang har väglett oss genom arbetet. Handledarna hade alltid tid för våra frågor och visade ett stort intresse för arbetets utveckling och utmaningar. Handledarna gav oss även utmärkt återkoppling under arbetets gång. Tack till vår examinator Filip Jonsson för att vi fick möjligheten att genomföra arbetet.

Avdelningen för Energiteknik på institutionen för Energi och Miljö på Chalmers har under arbetets gång låtit oss använda avdelningens lokaler, datorer och programvaror, vilket vi är mycket tacksamma för. Vi vill även tacka Tyra von Sydow, som vi delade kontor med, för att hon hade stort tålamod och alltid bemötte oss med glatt humör.

Vi vill även tacka Christoph Jannasch, som arbetar på tyska STEAG Energy Services GmbH, för ovärderlig hjälp med programvaran EBSILON Professional.

Abstract

Combustion of fossil fuels is today the dominating source of energy. During combustion, carbon dioxide is formed. The carbon dioxide accumulates in the atmosphere, which raises the global average temperature on earth through the so called greenhouse effect. The only way to reduce the emissions of carbon dioxide from combustion in a coal fired power plant is through carbon capture and storage (CCS). Post-combustion capture is a technology to separate carbon dioxide from the flue gas after the combustion for efficient transport and storage. The steady state operation of coal fired power plants with post combustion capture has already been thoroughly investigated on a pilot scale, however much work remains to investigate the plants dynamic operation. Due to the increasing amount of intermittent energy sources, such as wind and solar power, the energy system will require that the plants that run as base load today will be able to rapidly respond to changes in load.

The present work investigates the operation of a coal fired power plant with post combustion capture during load changes. The response rate for different design options has been evaluated and discussed with respect to possible operating scenarios. The investigation does not include economic estimations, even though the importance of capture cost is discussed.

According to the modelling it takes 90 to 105 seconds to reduce the electrical output from a power plant with CCS with one percentage point, depending on which load the change is made from. A coal fired power plant without the CCS technology is approximately eight times faster than a power plant with CCS. To increase the response rate of a post combustion system, a method for partial capture of the carbon dioxide was investigated. This method is referred to as CFCC (*Constant Flue gas Carbon Capture*). This option separates a constant amount of carbon dioxide regardless of the power plant load. In this case the system with CCS will change the load as fast as a power plant without CCS because the amount of flue gas and steam will be kept constant. This option is favorable when the power plant runs on low loads most of the time and increases the load to cover for the peaks in electricity demand. In this case the amount of carbon dioxide captured is less affected by the reduced capture capacity.

Another option that was investigated was to temporarily stop the capture unit by reducing the steam extraction to the separation plant to improve the power plant response rate, a method referred to as EDCC (*Emergency Dumping of Carbon Capture*). In that case a lower degree of separation was accepted during the load changes, making it possible to follow the increased demand on electricity. With this method it is possible for a power plant with CCS to make a load change faster than a power plant without CCS. To stop the capture unit is the fastest way to make a load change of all investigated options. Reducing the steam drain to the separation plant for the short period of time required for the power plant to increase in load has only a slight effect on the overall capture rate.

Sammanfattning

Förbränning av fossila bränslen är idag den dominerande tekniken för utvinning av energi. Vid förbränningen bildas oundvikligen koldioxid som ackumuleras i atmosfären. Ökad koldioxidhalt i atmosfären leder till en högre global medeltemperatur genom den så kallade växthuseffekten. Infångning och lagring av koldioxid (CCS) är det enda sättet att minska utsläppen av koldioxid från förbränning i exempelvis kolkraftverk. Post-combustion är en infångningsteknik som innebär att koldioxid separeras från rökgaserna efter förbränningen för att kunna transporteras och lagras kostnadseffektivt. Hur kolkraftverk med post-combustion-avskiljning och koldioxidtransport fungerar vid stationär drift är väl utforskat i pilotskala, men hur den dynamiska driften fungerar är inte lika utforskat. På grund av en ökande andel intermittenta energikällor, som vind- och solkraft, ställs större krav på kraftkällor som normalt går som baslast i elsystemet att snabbt kunna ändra lastfall.

Detta arbete undersöker hur kolkraftverk med post-combustion-avskiljning av koldioxid fungerar vid laständringar genom processimuleringar. Hastigheten vid laständringar för olika designalternativ av avskiljningsanläggningen har undersökts och diskuteras i samband med möjliga framtida driftscenarior. Projektet avgränsas till att inte omfatta ekonomiska beräkningar, även om betydelsen av kostnaderna för koldioxidavskiljning diskuteras.

Resultaten visar att det tar 90 till 105 sekunder att sänka den till nätet levererade effekten med en procentenhet för ett kolkraftverk med post-combustion-avskiljning, beroende av vilka lastfall sänkningen sker mellan. Det innebär att ett kraftverk utan CCS är ungefär åtta gånger snabbare än ett kraftverk med CCS. För att öka den dynamiska prestandan hos post-combustion-system undersöktes alternativet att endast separerar en del av koldioxiden så att en konstant mängd rökgas går genom koldioxidavskiljningsanläggningen, oavsett lastfall. Detta alternativ benämns i studien för CFCC (*Constant Flue gas Carbon Capture*). Kraftverket med CCS kan med denna metod ändra lastfall lika snabbt som ett kraftverk utan CCS, eftersom mängden rökgaser och ånga till avskiljningsanläggningen hålls konstant. Det här alternativet är speciellt lämpligt för kraftverk som arbetar på låg last den största delen av tiden och endast ändrar last för att täcka för toppar i elbehovet, eftersom den totala infångade mängden koldioxid då inte påverkas avsevärt av den lägre avskiljningskapaciteten.

Vidare undersöktes möjligheten att tillfälligt reducera avtappningen av ånga till avskiljningsanläggningen för att på så sätt öka kraftverkets förmåga att följa laständringar. I studien benämns detta som EDCC (*Emergency Dumping of Carbon Capture*). Denna metod innebär att en lägre avskiljningsgrad accepteras under laständringarna för att snabbare kunna följa elbehovet. Med den här metoden kan kraftverket med CCS ändra effekten snabbare än ett kraftverk utan CCS och är därför det alternativ som snabbast kan följa snabba effektändringar i elnätet. Att ångavtappningen reduceras under kort tid ger inte något stort avkall på avskiljningsgraden.

Nomenklatur

IEA	International Energy Agency
EU	Europeiska Unionen
CCS	Carbon Capture and Storage
LP	Lågtryck
IP	Mellantryck
HP	Högtryck
VHP	Väldigt högt tryck
L/G	Massflödet av lösningsmedelsströmmen in i absorbern, dividerat med massflödet av rökgasströmmen in i absorbern
EDCC	Emergency Dumping of Carbon Capture
CFCC	Constant Flue gas Carbon Capture

Symboler

ΔP	Tryckskillnad [Pa]
g	Gravitationskonstant [m/s ²]
ρ	Densitet [kg/s ³]
h_L	Rörförluster [m vattenpelare]
f_f	Friktionsfaktor
L	Längd [m]
D	Diameter [m]
v	Flödes hastighet [m/s]
P	Effekt [W]
h	Entalpi [J/kg]
m	Massflöde [kg/s]
H	Kalorimetriskt värmevärde [J/kg]
Q	Värme flöde [W]
t	Tid [s]

Kemiska ämnen

CO ₂	Koldioxid
MEA	Monoetanolamin
MEACOO ⁻	
MEA ⁺	
MEAH ⁺	Protonerad monoetanolamin
H ₂ O	Vatten
HCO ₃ ⁻	Bikarbonat
H ₃ O ⁺	Oxoniumjon
OH ⁻	Hydroxidjon
CO ₃ ²⁻	Karbonatjon
SO ₂	Svaveldioxid
NO _x	Samlingsnamn för kväveoxider, där x = 1 och 2

Exponentläge/indexläge

l	I vätskefas
g	I gasfas

Innehåll

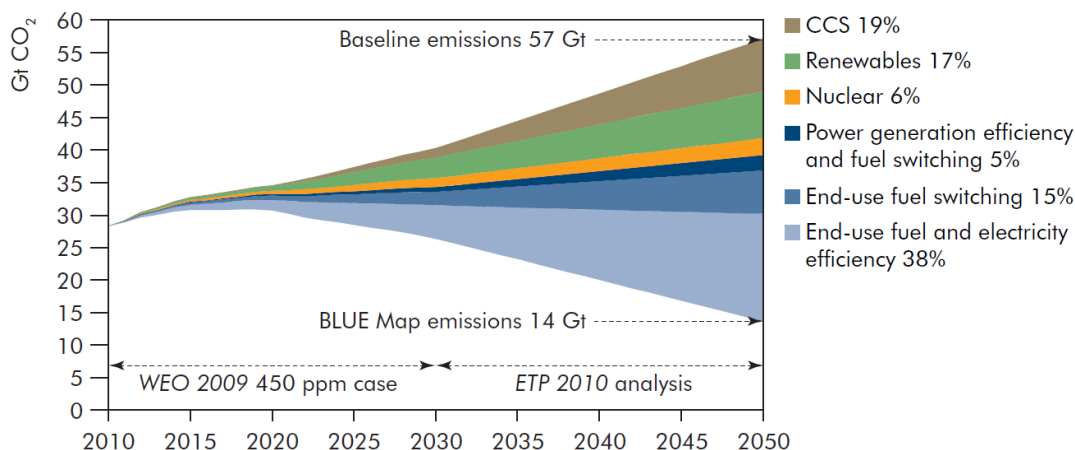
1	Inledning	1
1.1	Syfte och avgränsningar	3
2	Teori	4
2.1	Kraftverket	4
2.1.1	Tid för laständringar	6
2.2	Absorption av koldioxid	7
2.2.1	Sidoreaktioner vid absorption av koldioxid i MEA	9
2.2.2	Värme- och masstransport	10
2.3	Transport och lagring	10
2.4	Intermittent elproduktion	12
3	Metod	13
3.1	Modellering	13
3.1.1	Stationära modeller	14
3.1.2	Dynamisk modellering	15
3.2	Fallstudier av designalternativ	15
3.2.1	Konstant rökgasrening (Constant Flue gas Carbon Capture)	15
3.2.2	Reduktion av ångavtappning (Emergency Dumping of Carbon Capture)	16
3.2.3	Fluktuationsscenarier	17
4	Modellering	18
4.1	Kraftverket	18
4.1.1	Integrering av avskiljningsprocessen	19
4.1.2	Integrering av kompression och transport	20
4.2	Absorptionsprocessen	21
4.2.1	Modellantaganden samt val av fysikaliska modeller	22
4.2.2	Absorbern	22
4.2.3	Desorbern	23
4.2.4	Make-up-mixer och designspecifikationer	24
4.3	Transport	25
4.4	Dynamisk modell	25
4.4.1	Stationär värmebalans	26
4.4.2	Dynamisk värmebalans	27
5	Resultat	29
5.1	Resultat från stationära simuleringar	29
5.1.1	Verkningsgrad	29
5.1.2	Avskiljningsgrad och L/G-förhållande	31
5.1.3	Rökgas- och koldioxidflöden i avskiljningsprocessen	31
5.1.4	Transport och lagring	32

5.2	Dynamiska resultat	34
5.2.1	Dynamisk modell	34
5.2.2	Känslighetsanalys	36
5.3	Designalternativ för att minska den dynamiska trögheten	37
5.3.1	Konstant rökgasrening (CFCC)	38
5.3.2	Reduktion av ångavtappning	39
5.3.3	Fluktuationsscenarier	41
6	Diskussion	43
7	Slutsats	45
7.1	Framtida arbete	46
	Litteraturförteckning	47
	Bilaga A Ekvationer och beräkningar	i

1 Inledning

Ända sedan industrialiseringen har människan förbränt fossila bränslen i stor skala för utvinning av energi. Vid förbränningen bildas koldioxid som släpps ut i atmosfären betydligt fortare än den hinner tas upp av jordens biomassa. Ökningen av koldioxidhalten i atmosfären bidrar till en ökad global medeltemperatur [1]. En ökad medeltemperatur skulle med stor sannolikhet påverka majoriteten av jordens befolkning negativt, därför är den så kallade växthuseffekten en viktig punkt på den politiska dagordningen. I dagsläget diskuteras en mängd olika typer av lösningar för att minska koldioxidutsläppen. Ingen av dessa kan enskilt lösa hela problemet, utan det krävs en kombination av lösningar som angriper problemet från olika aspekter.

Enligt IEA:s (*International Energy Agency*) prognos fram till år 2050 kommer koldioxidutsläppen fortsätta att öka. För att kunna uppnå det så kallade tvågradersmålet behöver ett antal förändringar genomföras. Tvågradersmålet innebär att jordens medeltemperatur inte skall öka med mer än två grader fram till år 2050, jämfört med förindustriell nivå. En möjlig delösning för att nå målet är koldioxidinfångning, så kallad CCS (*Carbon Capture and Storage*) som innebär att koldioxid fångas in vid förbränningsplatsen för att sedan transporteras till en plats där lagring djupt under marken är möjlig. [2] Ett liknande scenario är IEA:s BLUE Map Scenario som går ut på att halvera de globala koldioxidutsläppen fram till år 2050, jämfört med år 2005. Figur 1.1 visar olika potentiella förändringar som krävs för att minska utsläppen till en tillräckligt låg nivå, enligt BLUE Map Scenario. Figuren visar också att CCS skulle kunna stå för en femtedel av minskningen och kan alltså spela en avgörande roll i stävjandet av den globala uppvärmningen. [4]



Figur 1.1: IEA:s förslag på åtgärder för att uppnå IEA:s BLUE Map Scenario. [Energy Technology Perspectives] © OECD/IEA, [2010]

I ett längre tidsperspektiv finns en strävan att helt sluta använda fossila bränslen och istället övergå till förnyelsebara energikällor. En fullständig övergång ligger dock långt i

framtiden och CCS kan därför ses som en tillfällig lösning till dess att en mer permanent och långsiktig lösning tagits fram.

I dagens elproduktion utgörs mer än 40 % av bränslet globalt sett av kol [3]. Prognosen visar att efterfrågan på kolkraft kommer att öka med 20 % till 2035 [5] och att tillgången på kol bedöms vara stor över lång tid framöver. Detta i kombination med en fortsatt ökad global efterfrågan på el betyder att koleldade kraftverk kan antas förbli en dominerande kraftproducent under en överskådlig framtid. [6] Eftersom kolkraften står för en stor del av de totala koldioxidutsläppen kan tillämpning av CCS i kolkraftverk därför ha stor betydelse för att reducera de globala koldioxidutsläppen.

Idag diskuteras i huvudsak tre olika CCS-tekniker: pre combustion capture, oxyfuel combustion och post combustion capture. Pre-combustion capture går ut på att separera koldioxiden från bränslet redan innan förbränningen sker, vilket skulle ge en rökgas endast bestående av kväve och vattenånga. Vid oxyfuel combustion förbränns bränslet med ren syrgas istället för med vanlig luft. Detta resulterar i avgaser som främst består av koldioxid och vattenånga, där koldioxiden enkelt kan avskiljas. Båda dessa metoder har många fördelar, dock finns det en stor nackdel. Då avskiljningsprocessen sker i nära koppling till förbränningen krävs stora ombyggnationer av befintliga kraftverk, vilket både är dyrt och komplicerat. Den tredje tekniken, post combustion capture, skiljer sig åt mot de andra två genom att avskiljningen sker först efter förbränningen. Koldioxiden kan separeras från rökgaserna genom exempelvis kemisk absorption och därefter transporteras till den slutliga förvaringen. Den stora fördelen med denna teknik är att det kan implementeras på befintliga kraftverk utan större ingrepp på själva kraftverket. Metoden anses vara relativt välutvecklad och nära den kommersiella marknaden. [7]

Oberoende av vilken CCS-teknik som används måste den avskilda koldioxiden lagras för att förhindra utsläpp till atmosfären. Efter avskiljningen komprimeras koldioxiden för att sedan transporteras till slutförvaringen, ofta via pipeline. Koldioxiden pumpas därefter ner i porösa hålrum i berggrunden, antingen på land eller under havsbotten. Idag tillämpas koldioxidlagring i småskaliga anläggningar, och en storskalig användning av CCS-tekniker skulle medföra ett ökat behov av lagringskapacitet. Denna kapacitetsökning tros vara tekniskt möjlig men är ännu oprövad. [8]

Historiskt sett har elproduktionen varit förhållandevis stabil och förutsägbar varför kolkraftverk fram till idag har använts som basproduktion för elbehovet. Behovet av el från kolkraftverken blir dock allt mer dynamiskt på grund av en ökad andel el från sol- och vindkraft. Elproduktion från sol- och vindkraft fluktuerar med vädret och dygnets soltimmar och ger upphov till så kallad intermittent el. Denna el är eftertraktad ur ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv, men medför att kolkraftverken behöver parera för dessa svängningar för att undvika under- och överproduktion av elektricitet. De förnyelsebara energikällorna har ökat kraftigt de senaste tio åren och trenden tyder på en fortsatt ökning [9]. Enligt EU:s direktiv för förnybar energi skall 20 % av elproduktionen vid 2020 täckas av förnyelsebara energikällor [2]. Detta medför bland annat stora framtida utvidgningar av vind- och solkraftsproduktion i energisystemen. I dagsläget är

dessa kraftkällor särskilt framträdande i Danmark med 28 % elproduktion från vindkraft och Tyskland med 3 % elproduktion från solkraft [10] [11]. Den ökande graden av intermittenta elproducenter sätter alltså krav på att kolkraftsproduktionen blir mer dynamisk för att kunna följa det fluktuerande produktionsbehovet som förväntas öka med utbyggnaden av sol- och vindkraftsproduktion.

Drift och design av kolkraftverk underlättas genom användning av datormodeller som simulerar anläggningens processer och förlopp på ett snabbt och enkelt sätt. Traditionella kolkraftverk utan CCS är tämligen lätta att modellera, då de typiskt arbetar vid stabila och tidsberoende lastfall. Kolkraftverk med CCS som samspelar med intermittenta elproducenter är mer komplexa att modellera. Detta då simuleringen måste hantera avancerade kemi- och reglertekniska problem som uppstår då kraftverket skall möta elnätets fluktuerande behov i samspel med en avancerad kemisk avskiljningsprocess. Ett kraftverk med CCS innehåller fler delsystem vilket medför tidströgheter som påverkar kraftverkets förmåga att snabbt följa fluktuationer i produktionsbehovet. Dessa tidströgheter kan alltså beskrivas som flaskhalsar som begränsar kraftverkets möjlighet att parera för intermittent el. Forskningsläget idag är att de separata delsystemen för ett kraftverk med CCS har modellerats individuellt eller i liten samverkande skala. Det har gjorts få studier på en fullskalig CCS-anläggning som samverkar med ett kolkraftverk. Fullskalig implementering av CCS skulle kunna påskyndas genom bättre förståelse för de dynamiska förloppen som uppstår då produktionsbehovet varierar. Metoder för dynamisk modellering av kolkraftverk med avskiljningsprocess blir därför allt mer angeläget att utforska. [7]

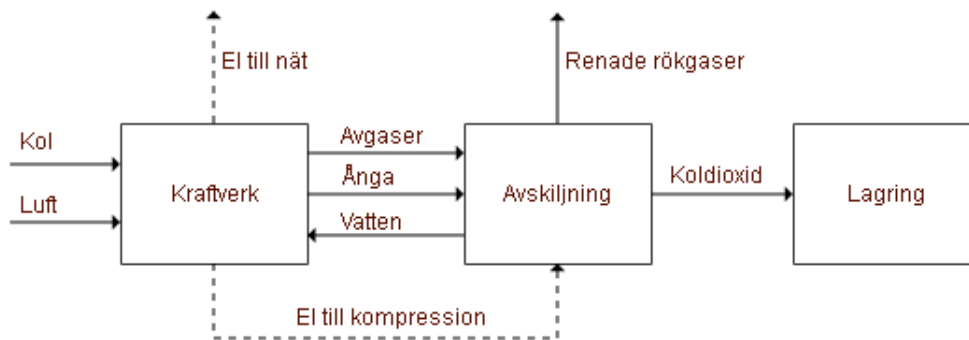
1.1 Syfte och avgränsningar

Kandidatarbetet syftar till att undersöka dynamiken i ett kolkraftverk med CCS. Detta görs med avsikten att utreda hur väl anläggningen interagerar med intermittent elproduktion. Systemet omfattas av ett kolkraftverk med en avskiljningsprocess, samt transporten av koldioxid till en godtycklig lagringsplats. Dessutom skall olika designalternativ för systemet undersökas. Resultatet av projektet skall vara en modell som tar hänsyn till systemets dynamik och trögheter vid laständringar, samt en redogörelse för hur modellen interagerar med ett elnät som utgörs av en ansenlig andel intermittent el. Modellen ska jämföras med de framtagna designalternativen med hjälp av olika körscheman, där koldioxidutsläpp och verkningsgrader analyseras.

Projektet har avgränsats till att behandla ett kolkraftverk med post combustion CCS. Kraftverket geografisk placering ses som obestämd, så att fler generella slutsatser kan dras. Detta underlättar resonemang kring transport och lagring, men även för designmässiga aspekter så som fjärrvärmeproduktion. Vidare förbises de ekonomiska och politiska aspekter som annars kan vara avgörande faktorer för utformning och användning av CCS. Därmed omfattar studien endast de tekniska aspekterna gällande kolkraftsproduktion med CCS.

2 Teori

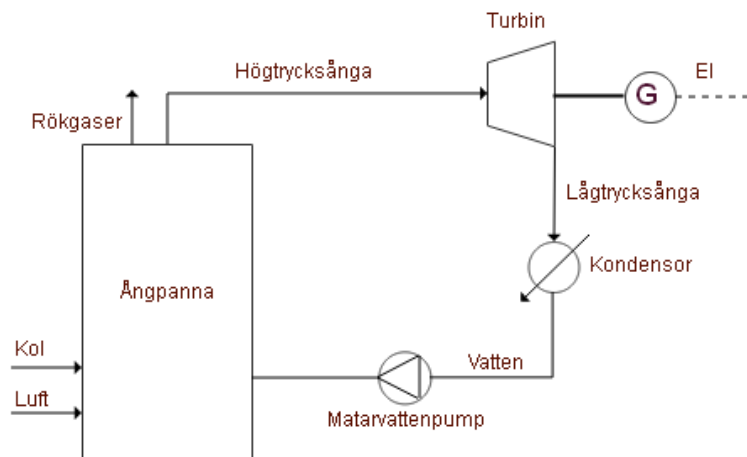
Kolkraftverk med CCS utnyttjar teknik och principer från många olika områden, däribland klassisk energi- och kemiteknik. I detta teorikapitel introduceras ett antal begrepp och förklaringar av systemets delprocesser. Systemet består av ett kolkraftverk, en avskiljningsprocess och en transport- och lagringsdel som visas i figur 2.1. I avsnitt 2.1-2.3 beskrivs de tre delsystemen och i avsnitt 2.4 beskrivs intermittent elproduktion och hur den påverkar elnätet beroende på storlek och utspridning.



Figur 2.1: Blockschema över hela processen vid post combustion CCS.

2.1 Kraftverket

I ett kolkraftverk värms vatten upp genom förbränning av kol. Upphettningen av vattnet leder till en fasövergång från vatten till ånga med högt tryck och hög temperatur. Den upphettade ångan får expandera genom turbiner och skapa ett mekaniskt arbete som kan omvandlas till elektrisk energi i en generator.

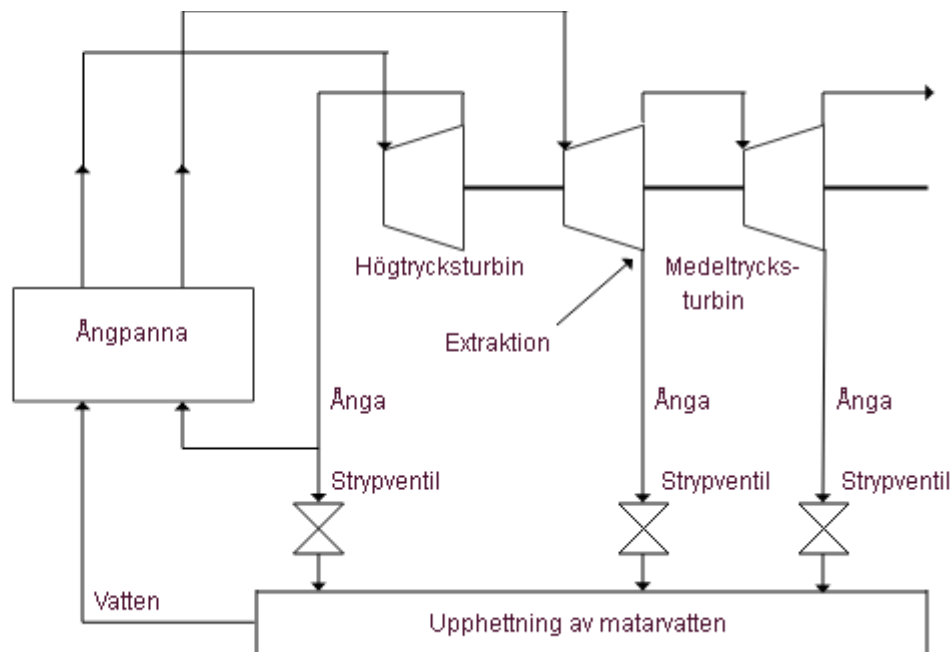


Figur 2.2: Processchema för ett enkelt kolkraftverk.

Figur 2.2 beskriver ångcykeln i ett kolkraftverk med dess mest centrala komponenter. Endast en turbin visas i figur 2.2 men i en verklig anläggning är flertalet turbiner seriekopplade på en gemensam axel för att utnyttja ångan maximalt vid olika tillstånd.

När ångan passerat turbinen kondenseras den till mättat vatten som återcirkuleras till ångpannan via matarvattenpumpar i det så kallade matarvattensystemet. Kondenseringen görs med hjälp av externt kylvatten, vars temperatur påverkar hur mycket arbete som kan utvinnas i det sista turbinsteget. Temperaturen i kylvattnet påverkar trycket i ångan efter sista turbinsteget och en lägre kylvattentemperatur möjliggör ett större uttag av turbinarbete då tryckskillnaden över den sista turbinen blir större.

I ett kolkraftverk utnyttjas möjligheten att fördela ångan från ångpannan till olika processsteg för att maximera ångkraftcykelns verkningsgrad. Genom att mellanöverhätta ångan mellan två turbinsteget kan verkningsgraden på ångcykeln höjas. Mellanöverhettningen ökar även kvaliteten på ångan vilket betyder att fukthalten i ångan minskar. En minskad fukthalt i ångan leder till minskad risk för korrosion i turbinerna. Mellanöverhettning av ångan åskådliggörs i figur 2.3 som är en delvy av en fullständig ångkraftcykel. Ett annat vanligt sätt att höja cykelns verkningsgrad är att en del av ångan som expanderats i turbinen leds till matarvattensystemet där den utnyttjas för förvärmning av matarvattnet, för en effektivare förångningsprocess. Denna process illustreras också i figur 2.3.



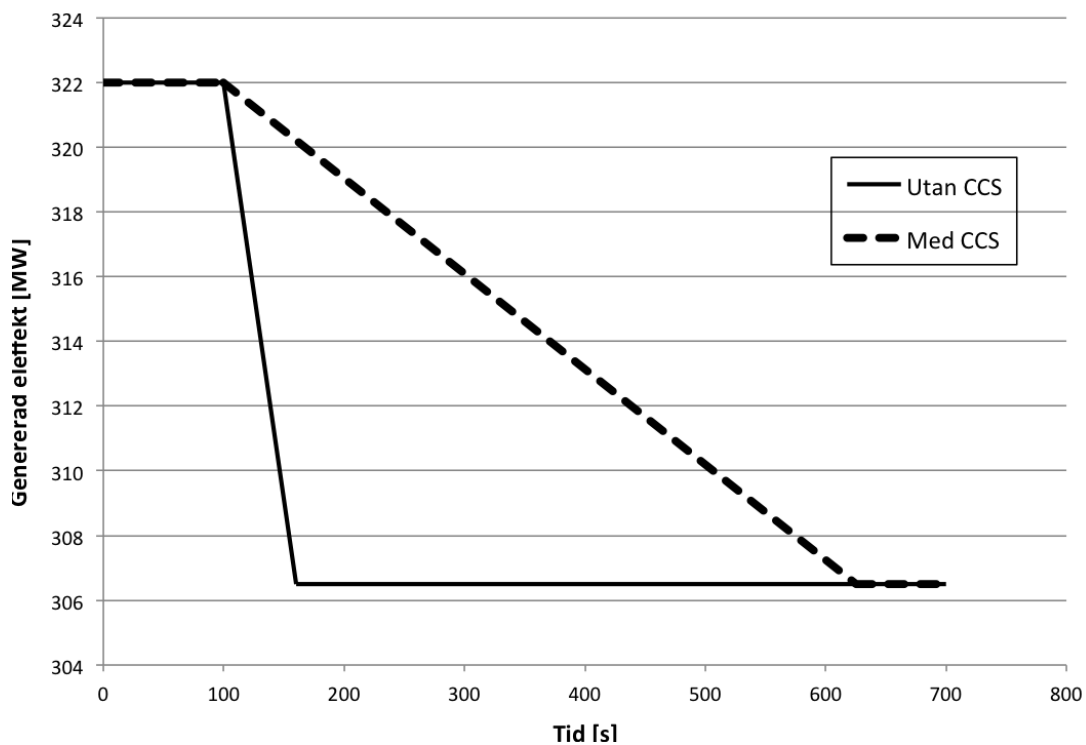
Figur 2.3: Processchema som åskådliggör principen för mellanöverhettning av ångan.

Vid drift av kolkraftverk kan det ibland vara önskvärt att använda sig av ånga från ångcykeln för att driva andra processer. Detta skulle kunna vara en koldioxidavskiljningsprocess för rökgaser, fjärrvärme eller en industriell process. För att tillgodose dessa processers krav på ångans tillstånd kan det vara nödvändigt att extrahera ånga från en turbin. Genom att avleda en del av ångan, innan den expanderat fullständigt över den givna turbinen, kan ett specifikt tillstånd på ångan erhållas. Denna princip för ångextraktion visas över medeltrycksturbinen i figur 2.3. Medeltrycksturbinen ses här uppdelad i två turbindelar, men i verkligheten är den en enda turbin med ångextraktion vid godtycklig punkt mellan turbinens in- och utlopp.

Verkningsgraden för ett kolkraftverk kan uppgå till drygt 45 % för produktion av elektricitet, men det globala medelvärdet är 33 % [12]. För att öka den termiska verkningsgraden utnyttjas i vissa delar av världen möjligheten till fjärrvärme. Detta innebär att en del av ångan används för att värma upp vatten som i nästa steg används till att värma upp bostäder. Med denna metod kan den totala verkningsgraden på ett kolkraftverk uppgå till över 90 %, dock medför det att elverkningsgraden minskar.

2.1.1 Tid för laständringar

En sänkning av ett kraftverks effektgenerering tar idag runt 12 sekunder per procentenhet [13], utan en post combustion-anläggning. Kunskapen om hur integreringen med post combustion-CCS påverkar kraftverkets dynamik är begränsad. En uppskattning av Lawal et al [14] visar att en kolflödesminskning på 5,7 % från 100 % last tar 10 minuter, vilket motsvarar 105 sekunder per procentenhet. Samma författare anger även att motsvarande effektminskning är procentuellt lika stor och tar lika lång tid. I figur 2.4 visas tiden det tar att göra en lastsänkning på 5 procentenheter (ungefär 16 MW) för ett kraftverk med CCS och för ett kraftverk utan CCS. I figur 2.4 har det antagits att effektminskningen kan linjäriseras även till andra laständringar och andra kraftverk än det som använts av Lawal et al. [14]

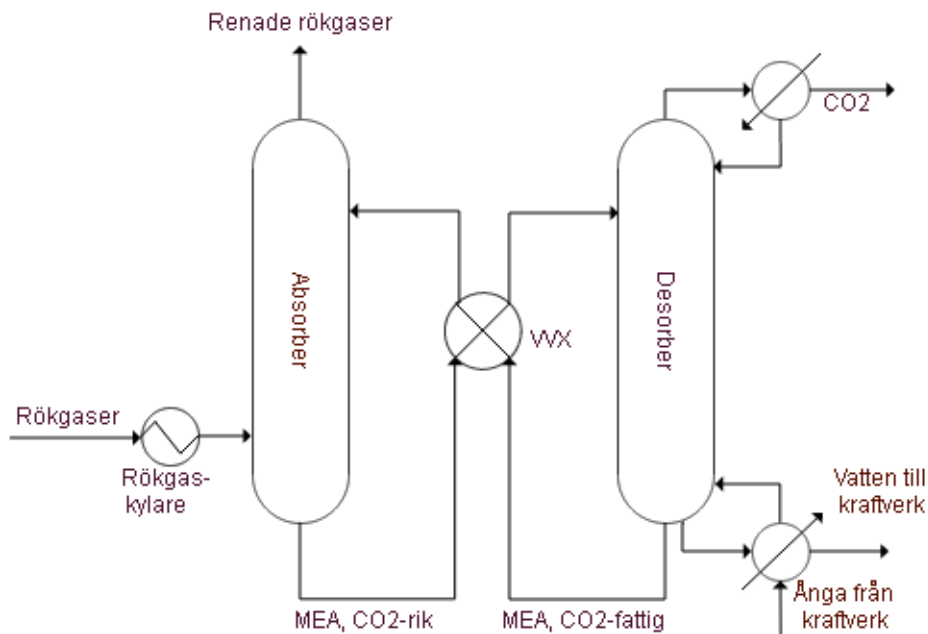


Figur 2.4: Kraftverkssystemets trögheter vid laständringar på 5 %.

Figur 2.4 visar att en kraftverksprocess utan CCS är 8,75 gånger snabbare än en process med CCS när det gäller att ändra nettoeffekten. Vid sänkningen av genererad effekt från ett kraftverk med CCS som visas i figur 2.4 fluktuerar den genererade effekten under cirka 3 timmar innan den ställer in sig på den önskade effekten. Fluktuationerna är av storleksordningen +/- 1 MW och kan anses vara försumbara.

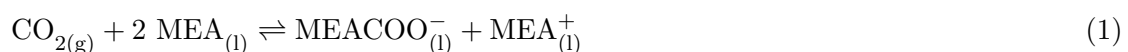
2.2 Absorption av koldioxid

En CCS-anläggning baserad på absorption består av fyra huvudsakliga enhetsoperationer: absorption, desorption, värmeväxling och kylning. Figur 2.5 visar en schematisk bild över anläggningen. I absorbern avskiljs koldioxiden från rökgaserna genom kemisk absorption till ett lösningsmedel. Lösningsmedlet renas sedan från koldioxid i desorbern. I avsnittet kommer även sidoreaktioner samt värme- och masstransport beskrivas.



Figur 2.5: Processchema för en enkel avskiljningsanläggning.

Rökgaserna från kraftverket leds in i botten av absorbern och tas ut i toppen. I toppen av absorbern tillförs lösningsmedel, som rinner genom absorbern och tas ut i botten. Det är vanligt att använda monoetanolamin (MEA) som lösningsmedel vid post combustion CCS [15]. Det finns idag en mängd olika lösningsmedel som kan användas vid koldioxidavskiljning, till exempel blandningar av MEA och andra aminer. I absorbern möts rökgaserna och lösningsmedlet, varvid koldioxiden i rökgaserna reagerar med MEA:n enligt reaktion 1 [16]. Reaktionen innebär att koldioxiden absorberas i lösningsmedlet. Den renade rökgasen som släpps ut till luften i toppen av absorbern har således låga halter av koldioxid.



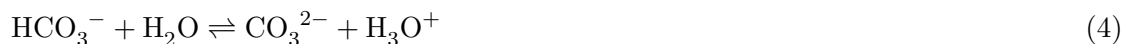
Typiskt avskiljs i absorbern mellan 80 och 100 viktsprocent av koldioxiden i rökgaserna [17]. Reaktionen mellan MEA och koldioxid är en temperaturberoende jämviktsreaktion som vid låga temperaturer går mot att koldioxid binds i vätskan. vid höga temperaturer släpps koldioxid till gasen. Dock är även reaktionshastigheten temperaturberoende, vilket innebär att absorptionen går snabbare upp till en viss temperatur där reaktionshastigheten har ett optimum innan bakåtreaktionen tar över, därför hålls temperaturen i absorbern vid en tillräckligt låg temperatur. En snabb absorption medför att det inte behövs lika stort lösningsmedelsflöde, av den anledningen kyls de varma rökgaserna från kraftverket ned innan de leds in i absorbern [15].

När den koldioxidrika lösningsmedelströmmen har lämnat absorbern leds den in i en värmeväxlare. Den koldioxidrika lösningsmedelströmmen värmeväxlas med den varma koldioxidfattiga lösningsmedelströmmen som kommer från desorbern. Efter värmeväxlingen leds den koldioxidrika lösningsmedelströmmen in i toppen på desorbern. I desorbern är temperaturen tillräckligt hög för att bryta bindningen mellan koldioxiden och MEA:n, reaktion 1 går alltså åt vänster. Koldioxiden desorberas från lösningsmedlet, och återgår därför till gasfas. Den desorberade koldioxiden tas ut i toppen av desorbern. En del av lösningsmedlet är i gasfas i desorbern och följer med koldioxiden ut ur desorbern, varför den utgående gasströmmen låts passera en kondensor. I kondensorn är temperaturen sådan att lösningsmedlet kondenserar och leds tillbaka in i desorbern, medan koldioxiden fortfarande är i gasfas och skickas till transportanläggningen. Renheten på koldioxidströmmen kan uppgå till 99,9 % [17].

När koldioxiden har desorberat från lösningsmedlet, är lösningsmedlet fattigt på koldioxid. En del av det koldioxidfattiga lösningsmedlet leds in i återkokaren i botten av desorbern. I återkokaren värmeväxlas lösningsmedelströmmen med ånga från kraftverket, så lösningsmedlet börjar koka. Det förångade lösningsmedlet leds in i desorbern och på så sätt hålls temperaturen hög. Temperaturen i återkokaren bör inte överstiga 125 °C, för att degraderingen av MEA ska hållas nere [17]. Degradering innebär i detta fall att lösningsmedlet bryts ner och blir oanvändbart. Den del av den koldioxidfattiga lösningsmedelströmmen som inte leds in i återkokaren lämnar desorbern i botten. Därefter leds strömmen genom värmeväxlaren och in i absorberns topp.

2.2.1 Sidoreaktioner vid absorption av koldioxid i MEA

Systemet innehåller elektrolyter och förutom reaktionen mellan MEA och koldioxid sker även ett antal sidoreaktioner som måste tas hänsyn till vid modellering. Dessa sidoreaktioner innefattar autoprotolys av vatten (2), hydrolys av CO₂ (3), dissociation av bikarbonat (4), hydrolys av karbamat (5) samt protonering av MEA (6) [18]:



2.2.2 Värme- och masstransport

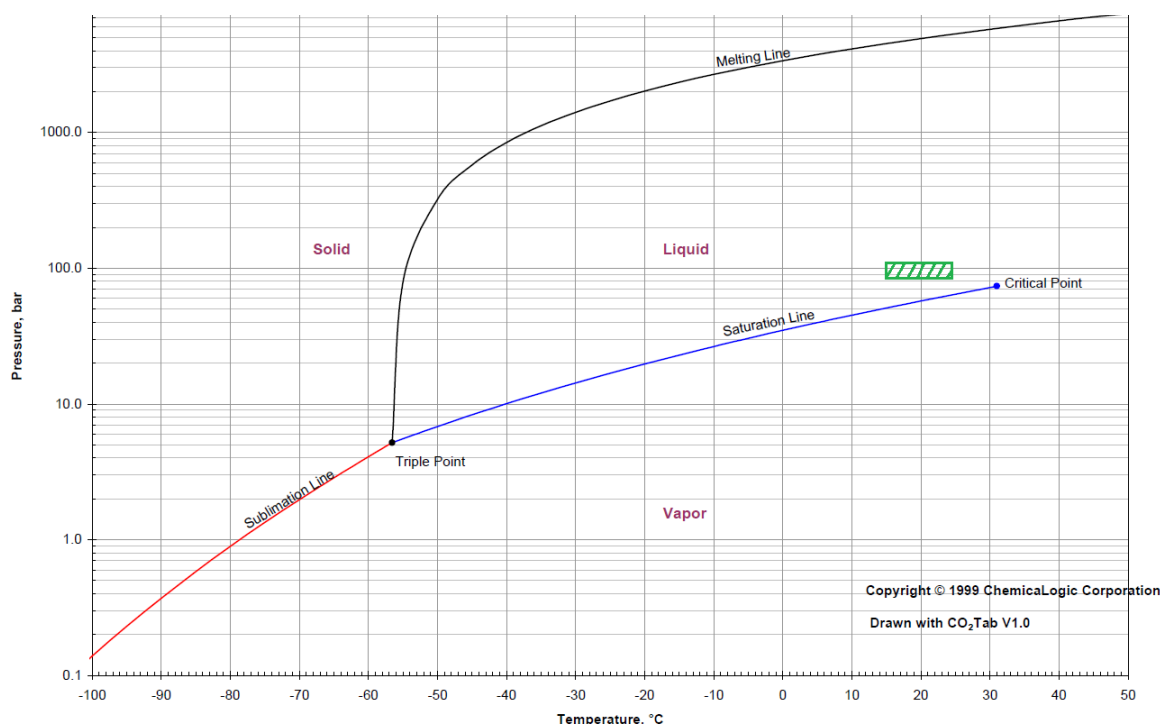
Det finns flera olika modeller som beskriver mass- och värmeöverföring mellan två medier. En av dessa är tvåfilmsteorin som kan användas för att beskriva absorptionsprocessen. I denna beskrivs kontaktytan mellan de två faserna som en vätskefilm och en gasfilm. I filmerna beskrivs transporten mellan faserna med tryck- och koncentrationsgradienter. [19]

För att modellera absorption och desorption kan antingen hastighetsbegränsade eller jämviktsbegränsade modeller användas. Den hastighetsbegränsade modellen används för att beskriva långsamma reaktioner. Den används när temperaturen är låg, då reaktionen inte når jämvikt [20]. Vid hög temperatur är reaktionen snabb och då är det inte reaktionshastigheten som begränsar reaktionen, utan jämvikten. Vid en viss temperatur är framåtreaktionens och bakåtreaktionens hastighet lika stora och reaktionen kan då inte gå vidare. Den jämviktsbegränsade modellen beskriver detta. [21]

2.3 Transport och lagring

En av grundstenarna i CCS är att transport och lagring av den avskilda koldioxiden sker på ett sådant sätt att den med säkerhet inte kan läcka ut i atmosfären. Första steget efter att koldioxiden avskilts från rökgaserna i avskiljningsanläggningen är att rena flödet från andra ämnen än koldioxid, detta eftersom koldioxidflödets fysikaliska egenskaper är mycket beroende av flödets renhet. Några procents orenheter av andra molekyler kan ge drastiska förändringar i egenskaper så som densitet, vilket kan ge negativ inverkan på transporten. Dessutom kan vatten löst i koldioxidflödet leda till korrosion.[22]

När flödet har renats ska det komprimeras till flytande eller superkritisk fas, för att få egenskaper som passar för transport. Optimalt är att transportera koldioxid i flytande fas, eftersom tryckfallet då blir mindre än för superkritisk fas. Figur 2.6 visar ett fas diagram för ren koldioxid. Det mest gynnsamma tillståndet är mellan temperaturer på 15 °C och 25 °C och tryck mellan 85 och 110 bar. Under vissa temperaturförhållanden kan det dock vara svårt att hålla koldioxiden under den kritiska temperaturen 31,1 °C , där den superkritiska fasen börjar uppträda.[22]



Figur 2.6: Fasdiagram för ren koldioxid. Det optimala tillståndsområdet markeras med en streckad fyrkant. [ChemicalLogic Corporation; 1999]

Efter kompressionen kan koldioxiden transporteras med olika metoder. Vanligtvis sker detta via pipeline eller skepp eller kombinationer av dessa. Vilken metod som används beror på hur stor mängd koldioxid som ska transporteras och var slutförvaringen sker. Vid storskalig transport är pipeline det mest realistiska alternativet. För att hålla transporten effektiv måste koldioxiden hållas i samma fas hela sträckan, därför kompenseras tryckfallet i pipelinen med regelbundna pumpstationer då trycket fallit till 85 bar. Anledningen att man inte vill hålla trycket under 85 bar är att hålla en säkerhetsmarginal till fasövergången till gasfas, vilken även den kan påverkas av orenheter i flödet. [22]

Lagringen sker djupt ner under marken i särskilda geologiska formationer, typiskt salina akviferer eller tömda olje- eller gasbrunnar. De salina akvifererna är stängda utrymmen av porös sandsten fyllda med saltvatten. Vid slutförvaringen pumpas koldioxiden ner genom sandstenen och binds i vattnet. Dagens pilotskaliga förvaring sker oftast i salina akviferer, där den största lagringspotentialen tros finnas. Hur bra en lagringskälla är mäts inte enbart i total potentiell lagringsvolym, utan även i injektivitet. Injektivitet innebär med vilken hastighet koldioxiden kan pumpas ner, vilket är en viktig faktor för att avgöra om den avskilda koldioxiden kan tas om hand i tillräckligt hög takt. [23]

2.4 Intermittent elproduktion

Sol- och vindkraftproduktionens inneboende variationer är en faktor som är ofrånkomlig vid studier som berör storskalig implementering i elsystemet. Kortsiktiga variationer i enskilda vindkraftverk är av försumbar storlek för hela elsystemet, men variationer av den totala vindkraftproduktionen i ett elsystem måste beaktas.

En studie som gjordes 2011 av Wan [24] påvisar att minskningen i variation av elproduktion från vindkraft är omvänt proportionell mot den installerade vindkraftskapaciteten. Följaktligen blir vindkraftssystemet mindre känsligt för variationer ju mer det byggs ut. Studien visar att den genomsnittliga fluktuationen per timme i elproduktion uppgår till cirka 2,5 - 3 % av den totala installerade kapaciteten, vilket kan tolkas som ett brus i elproduktionen. [24]

I det svenska elsystemet utgjorde vindkraften 2012 cirka 4,4 % av den totala elproduktionen, med en installerad effekt på 3 607 MW [25]. I Wans studie undersöktes ett vindkraftssystem med 4206 MW installerad effekt vilket är i storlek med det svenska. Studien visar att ett vindkraftssystem av denna storlek kan utsättas för cirka 420-440 stycken rampformade effektvariationer under ett driftsår. Dessa rampformade variationer pågår i snitt under 6 timmar, och är maximalt i storleksordning 70 % av den installerade kapaciteten. Detta kan motsvaras av en effektminskning på upp till 500 MW per timme. Denna effektminskning måste kompenseras i elsystemet av elproduktion från andra kraftkällor. [24]

Liksom vindkraft har elproduktion från solceller en inneboende variation till följd av väder, dygn och årstid. Molntäcken kan plötsligt försämra producerad eleffekt från en större anläggning. Studie av solkraftproduktion från en anläggning med installerad effekt på 5 MW i Arizona visar att eleffekten kan variera upp till 50 % på enbart en minut, då ett moln passerar anläggningen. Sådana variationer i elproduktion skulle i ett större sammanhang innebära stora svängningar i produktionen från solkraftsanläggningar. Med hjälp av geografisk utspridning av anläggningarna kan dessa variationer reduceras, och med väderprognoser kan variationerna förutses och pareras med annan elproduktion. [26]

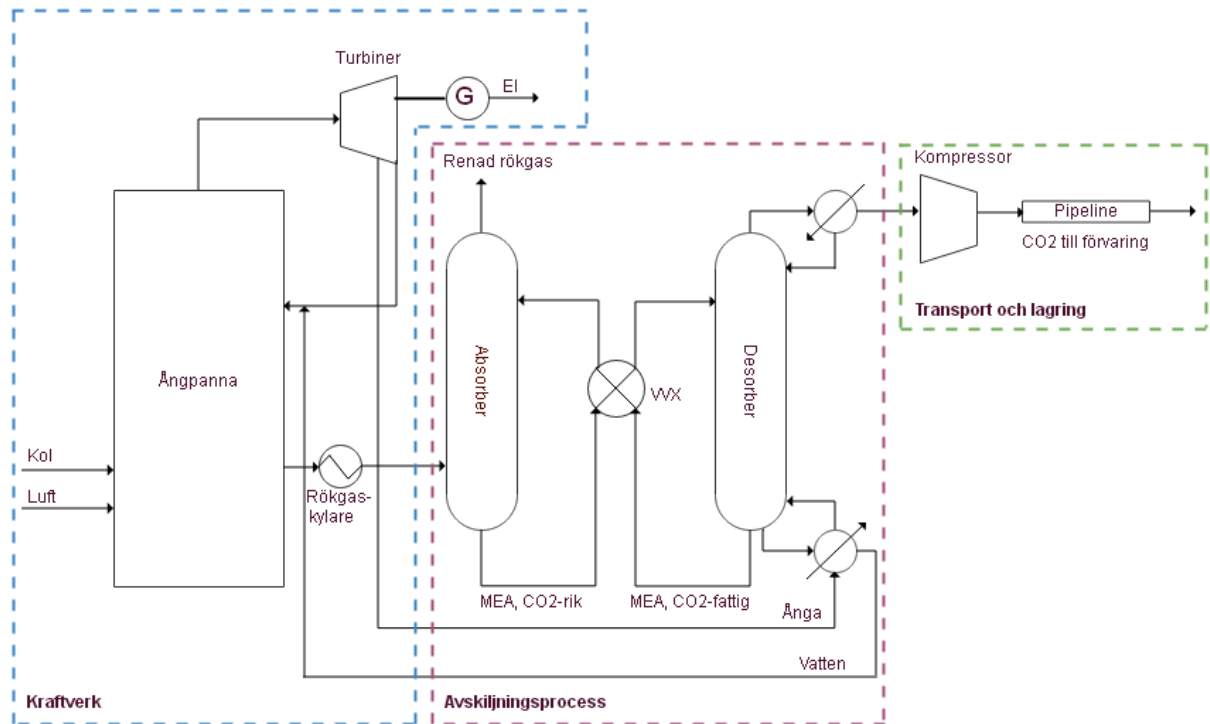
Simuleringar har visat att effektvariationen kan minskas drastiskt då solkraftsproduktionen sprids ut över ett större antal anläggningar. Vid 5 MW installerad effekt utspridd på 1 000 anläggningar á 5 kW kan standardavvikelsen för producerad eleffekt reduceras till nästan en femtedel av standardavvikelsen för den centraliserade anläggningen. Detta innebär att fluktuationerna minskar avsevärt vilket leder till en stabilare elproduktion. [26]

3 Metod

Det finns relativt god kännedom om hur kraftverk med CCS fungerar vid stationär drift, medan kunskapen vid dynamisk drift inte är lika djupgående. I ett första led modellerades delprocesserna vid stationära förhållanden för olika lastfall för att skapa ett utgångsläge för fortsatt dynamisk modellering, vilket presenteras i avsnitt 3.1. Den dynamiska modellen utvärderas tillsammans med alternativa designar i avsnitt 3.2.

3.1 Modellering

För att lättare kunna analysera processen delades den in i tre delar; kraftverk, avskiljningsprocess samt transport och lagring, enligt figur 3.1 . I detta avsnitt redogörs för den metod och de simuleringsverktygen som använts för den stationära modelleringen och integreringen av dessa tre delprocesser, varefter metoden för den dynamiska modelleringen beskrivs.



Figur 3.1: Processchema för ett kolkraftverk med koldioxidavskiljning samt transport och lagring av koldioxid.

3.1.1 Stationära modeller

Vid simuleringen av kraftverket modellerades som utgångspunkt en förenklad version av det danska Nordjyllandsverket som är ett av världens mest effektiva kolkraftverk [27]. Trots att modellen bygger på Nordjyllandsverket ses dess geografiska läge som obestämt, vilket tidigare nämndes i avsnitt 1.1. Simuleringarna är baserade på data och designlayout som tillhandahållits från institutionen för Energi och Miljö på Chalmers tekniska högskola. Vid simulering av olika lastfall beräknar simuleringsverktyget processens massflöden, men behåller samtliga komponenters storlek utifrån den fullskaliga designen. I syfte att säkerställa modellens riktighet validerades den mot känd data från Nordjyllandsverket. Simuleringen utfördes i programvaran EBSILON ®10.0 Professional. Programvaran beräknar de termodynamiska egenskaperna för ångan och sammansättningen av rökgaserna i systemet med hjälp av mass- och energibalanser [28]. Detta medför att verkningsgrader och massflödet av koldioxid i rökgaserna kan bestämmas för olika lastfall. EBSILON användes ej för dynamisk modellering av kraftverket, utan enbart för stationär simulering. Detta innebär att data från EBSILON exporterades och analyserades för dynamisk modellering.

En modell för avskiljningsprocessen byggdes upp och optimerades för kraftverkets storlek vid 100 % last. Detta innebär att rökgasmängden från kraftverket hanterades vid hög energieffektivitet genom användning av lämpliga temperaturer, tryck och material, vilka erhöles från litteraturstudien. Dimensioner för anläggningen bestämdes och fixerades sedan för lasten 100 %. Modelleringen av avskiljningen utfördes i Aspen Plus V8.2, som är en programvara för kemitekniska processsimuleringar. Aspen löser material- och energibalanser, för en stor mängd olika kemitekniska enhetsoperationer. Programmet hanterar endast stationära system, därför exporterades data för att analyseras i den dynamiska modelleringen. [29]

Transportens effekt på kraftverkets totalverkningsgrad beräknades i EBSILON genom simulering av kompressions- och pumparbetet. Simuleringen genomfördes även i Aspen för verifiering av resultatet. Då transporten antogs ske via pipeline beräknades i MATLAB med vilket intervall pumpstationer behövs för att tryckfallet inte skall bli för stort.

I syfte att skapa en helhetsbild över hur processerna samverkar gällande energibehov och verkningsgrad sammodellerades avskiljnings- och transportprocessens effektbehov i samma programvara som kraftverket. Då avskiljningsprocessens energibehov varierar med mängden rökgaser som skall renas, behövde värmebehovet till återkokaren justeras manuellt i kraftverksmodellen. Detta beror på att EBSILON och Aspen inte kan samverka direkt. Följden blev att återkokarens värmebehov i EBSILON itererades mot återkokarens värmebehov i Aspen, då båda modellerna är beroende av rökgasflödet. Itereringen gjordes tills konvergens uppnåts, vilket innebär att differensen mellan värmebehoven i respektive modell var mindre än 0,1 %. När konvergens mellan parametrarna uppnåts för ett givet lastfall kunde den totala verkningsgraden för systemet fastställas. Den sammanslagna modellen och dess resultat användes sedan som grund för arbetet kring systemets totala dynamik.

3.1.2 Dynamisk modellering

För att koppla samman kraftverket och avskiljningen med en dynamisk modell sattes först en stationär värmebalans upp över anläggningen. Värmebalansen validerades mot värden för specifika lastfall som erhöles ur EBSILON. För att kunna skapa en dynamisk modell av den stationära modellen avlästes entalpier och flöden för olika lastfall i EBSILON-modellen. Dessa värden plottades sedan mot kolfödet och med hjälp av MATLAB regressions-funktioner kunde samband tas fram, med enbart kolfödet som variabel. Sambanden användes sedan i den stationära värmebalansen.

Värmebalansen kunde sedan göras tidsberoende med hjälp av en differentialekvation. Tidsberoendet för kolfödesförändringar beskrivs i avsnitt 2.1.1 och baserat på det skapades en dynamisk värmebalans. Värden på effekten från den dynamiska balansen validerades genom att en kolfödessänkning genomfördes och att resultatet sedan jämfördes med resultaten för den stationära modellen i EBSILON.

3.2 Fallstudier av designalternativ

I följande avsnitt beskrivs ett designalternativ med rening av konstant rökgasmängd samt ett designalternativ där fluktuationer i elsystemet pareras genom reduktion av ångavtappning till avskiljningen. Slutligen görs en fallstudie där de två designalternativen jämförs mot kolkraftverk med fullskalig CCS. Fallstudien utfördes genom att testa alternativen mot en mängd tänkbara fluktuationer.

3.2.1 Konstant rökgasrening (Constant Flue gas Carbon Capture)

Systemets trögheter har en konstaterad inverkan på hur väl ett kraftverk med CCS-anläggning fungerar. I syfte att reducera inverkan från dessa trögheter undersöktes ett designalternativ där endast 50 % av rökgasmängden vid 100 % last renas, oberoende av vilket lastfall som anläggningen arbetar vid, därav namnet CFCC. Detta innebär att trögheter vid kopplingen mellan kraftverket och avskiljningsprocessen eliminerades eftersom ångbehovet i avskiljningsprocessen hålls konstant. Med hjälp av CFCC renas en mindre mängd rökgaser, men trögheterna i systemet reduceras till följd av att avskiljningsprocessen inte behöver arbeta under dynamiska förhållanden. Anses reningsgraden av koldioxid vara rimlig kan kraftverket användas till att parera snabbare fluktuationer i elnätet. Då mindre mängd energi går till avskiljningsprocessen medför detta ett system med högre verkningsgrad, men med mindre mängd avskild koldioxid. För att undvika problem på grund av dynamiken kan kraftverket inte köra på lastfall lägre än 50 %. För lastfall under 50 % antags anläggningen ha samma dynamik som i fallet 100 % rökgasrening.

För att undersöka vid vilka användningsområden CFCC är relevant skapades två körscheman på årsbasis, vilka presenteras i tabell 3.1. Körschema 1 anses representera vanlig drift av kraftverket som baslast i elnätet, och körschema 2 anses representera drift för att täcka topplaster. Körschema 2 innebär att andra elkällor utgör basen i elnätet, och anläggningen används för att täcka sällan inträffande toppar i produktionsbehovet. Detta är ett framtidsscenario för i dagsläget existerande kolkraftverk som utrustas med CCS-anläggning.

Tabell 3.1: Körschema med specifika tidsandelar för specifika lastfall.

Last [%]	Tidsandel	
	Körschema 1	Körschema 2
100	0,1	0,05
90	0,2	0,05
80	0	0,05
70	0,6	0,10
60	0	0,35
50	0,1	0,40

3.2.2 Reduktion av ångavtappning (Emergency Dumping of Carbon Capture)

Då elnätets behov plötsligt kan ändras krävs det att kraftverket snabbt kan möta detta nya produktionsbehov. Dynamiken i kraftverket med CCS begränsar förmågan till en hastig justering av den producerade effekten. Ett möjligt sätt att kringgå problematiken med kraftverkets långsamma dynamik är att minska avskiljningen till fördel för elproduktionen. Avskiljningen minskas genom att hastigt strypa ångavtappningen till återkokaren (därav EDCC), och istället leda ångan till mellan- och lågtrycksturbinerna för elproduktion. Kraftverket kan då snabbt reglera producerad effekt mot elnätets behov, och när produktionen stabiliserats vid det nya behovet kan förbränningen successivt ökas för att inom en kortare period återuppta fullständig avskiljning.

Då ångavtappningen stryps antogs trögheten i effektändringen reduceras till en procentenhet på 6 sekunder, eftersom ånggenereringen i pannan redan är i full drift för det givna lastfallet. När effektuttaget stabiliserats mot behovet, ökades förbränningen i pannan och ångavtappningen till avskiljningen öppnades, där det antogs att processen behåller sin ursprungliga dynamik. Den effekt som kompressionen kräver har antagits vara konstant då ångavtappningen stryps.

Kapaciteten i ångavtappningen har studerats för att kunna avgöra hur mycket effekt som maximalt kan utvinnas från ångavtappningen. Under en ökning av elbehovet på 10 procentenheter studerades hur mycket koldioxid som infångades, då avskiljningsprocessen antogs vara helt avstängd på grund av att ångan leddes om till turbinerna. Ökningen av

elbehovet antogs ske tre gånger per dygn, och effektökningen antogs vara kortvarig för att sedan återgå till det ursprungliga behovet. Denna infångningsnivå jämfördes sedan med den nivå som anläggningen hade haft om effektuttaget varit oförändrat under ett dygn. Data om lastfall hämtades från EBSILON-modellen.

3.2.3 Fluktuationsscenarier

Fluktuationerna valdes för att exemplifiera hur sol- och vindkraft påverkar produktionsbehovet i kolkraftverket, där solkraften innebar en förändring på minutbasis och vindkraft förändring på timbasis.

För att beräkna om designalternativen är tillräckligt snabba för att möta fluktuationerna valdes tid för effektändring enligt tabell 3.2. För ett kraftverk med fullskalig CCS (designalternativ 1) användes den långsammaste tiden från den dynamiska modellen. För CFCC (designalternativ 2) användes tiden som gäller för ett kraftverk utan CCS enligt avsnitt 2.1.1. För designalternativ 3 (EDCC) användes tiden från avsnitt 3.2.2.

Tabell 3.2: Tid för effektändring för de tre designalternativen.

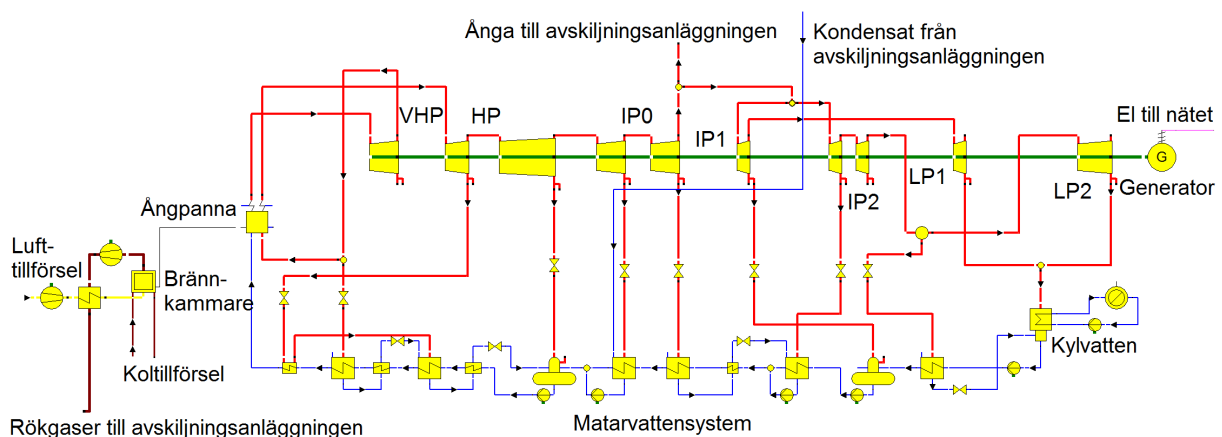
Designalternativ	Tid för ändring av procentenhet effekt [s]
1 (100% CCS)	105
2 (CFCC)	12
3 (EDCC)	6

4 Modellering

I detta avsnitt beskrivs framtagandet av de modeller som utgör grunden för projektets simuleringar och resultat. Här beskrivs hur kraftverket modellerats med integrerad avskiljningsprocess och kompressionsarbete i EBSILON. Dessutom beskrivs hur avskiljningsprocessen och kompressionen modellerades separat i Aspen. En modell som beräknar längden av ett pipelinesegment beskrivs separat i avsnitt 4.3. Slutligen presenteras hur den dynamiska modelleringen gjorts. I varje del visas de antaganden och förenklingar som gjorts vid modelleringen.

4.1 Kraftverket

Kraftverksmodellen i EBSILON åskådliggörs i figur 4.1. Figuren visar kraftverksprocessen med elgeneration via sju turbinsteg, kondensation mot kylvatten, och matarvattenförvärmning. Denna modell användes sedan som utgångspunkt för att studera inverkan av avtappning av ånga till avskiljningsprocessen (avsnitt 4.1.2) samt kompression av koldioxid för transport (avsnitt 4.1.3) på kraftverkets totala verkningsgrad.



Figur 4.1: Den fullständiga kraftverksmodellen i EBSILON.

Designen av kraftverket är baserat på Nordjyllandsverket med följande antaganden och förenklingar:

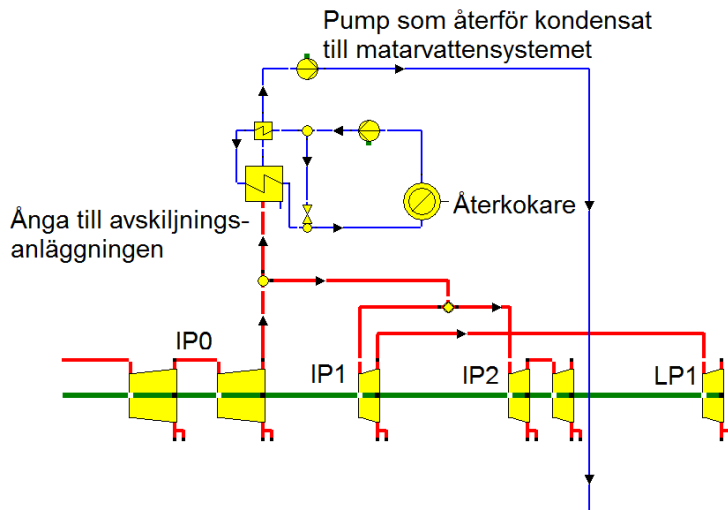
- Mellanöverhettning görs endast i ett steg (två steg i Nordjyllandsverket).
- Ångläckage från turbinerna i ångcykeln försummas.
- Kylvattentemperatur är konstant 15 °C.
- Rening av NO_x , SO_2 och partiklar i rökgaser modelleras ej.
- Bränslets egenskaper antas konstant som kol med kalorimetriska värmevärdet 25120 kJ/kg och bränslesammansättningen enligt tabell 4.1.
- Kraftverket modelleras i kondensdrift (maximal elproduktion).

Tabell 4.1: Bränslesammansättning för kol.

Ämne	Massfraktion
C	0,63
H	0,043
O	0,075
N	0,014
S	0,008
Aska	0,09
Fukt	0,14

4.1.1 Integrering av avskiljningsprocessen

För att kunna addera avskiljningsprocessens värmebehov till simuleringen kompletterades kraftverksmodellen med en värmeväxlare, i figur 4.2 benämnd "återkokare". Värmeväxlaren simulerades genom uppvärmning av vatten med hjälp av ånga från ångcykeln i en värmeväxlare. Värmen i vattnet konsumerades av återkokaren, vars värmebehov dels var beroende av mängden rökgas som skulle renas från koldioxid, men även processtillstånd i avskiljningsprocessen så som bland annat avskiljningsgraden. För att styra så att strömmen in till återkokaren hade rätt temperatur användes en vattenslinga som värmeväxlades mot ångavtappningen. I övrigt modellerades återkokaren med ideal värmeväxling.



Figur 4.2: Ångavtappning och avskiljningsprocess modellerad i kraftverksmodellen.

Ånga avtappades från ångkraftcykeln på ett sådant sätt att tillräcklig temperatur, tryck och massflöde erhöles för återkokaren. Avtappningen kan göras direkt från rörledningar mellan turbiner eller genom extraktion från någon av turbinerna. Efter tester av de

båda principerna implementerades ångavtappningen genom en fördelare i rörledningen mellan turbinstegen "IP0" och "IP1/IP2", som visas i figur 4.2. Fördelaren avtappar 60 % av massflödet till avskiljningsprocessen. När ångan kondenserats via värmeväxling mot avskiljningsprocessen återförs kondensatet till matarvattensystemet för att sluta cykeln.

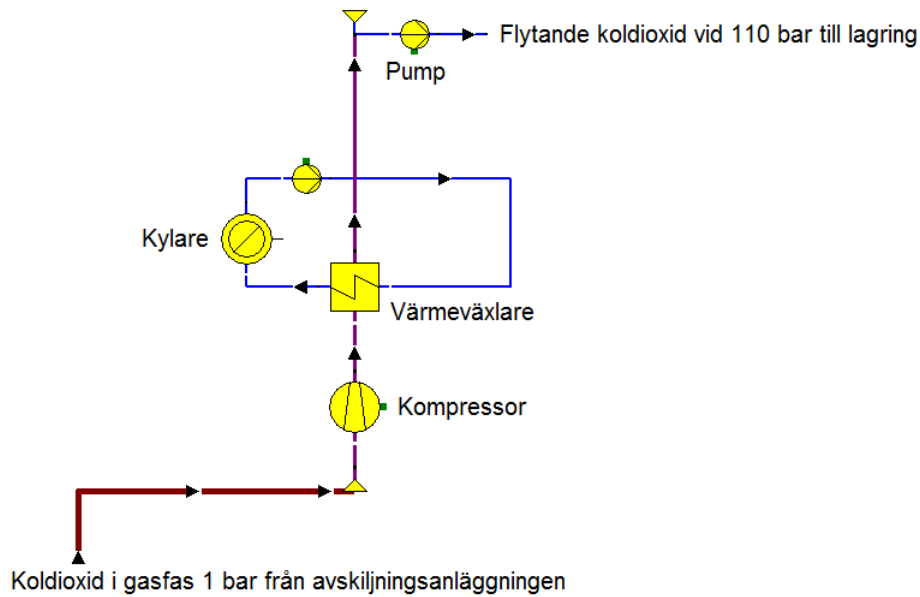
4.1.2 Integrering av kompression och transport

Grundmodellen för kraftverket kompletterades med en modell för kompressions- och pumparbete av koldioxid för vidare transport till slutförvaring. Syftet med denna simulering var att kunna addera de energikostnader som uppkom vid kompression och pumpning av koldioxidströmmen, vilket inverkar på den totala verkningsgraden för kraftverket.

Tabell 4.2: Rökgassammansättning.

Ämne	Massfraktion
N ₂	0,687
CO ₂	0,210
H ₂ O	0,048
O ₂	0,033
Ar	0,011
SO ₂	0,001

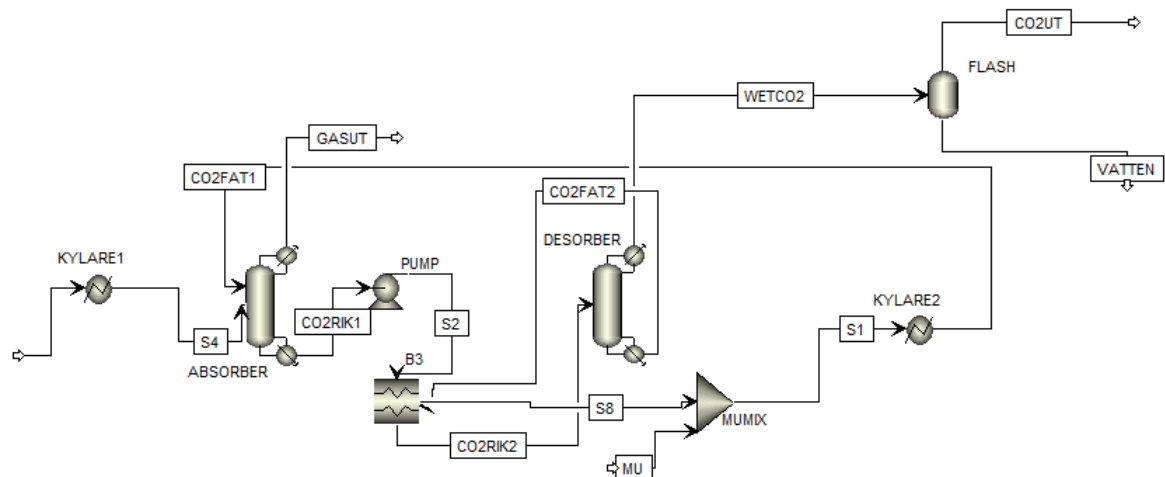
Massfraktionen av koldioxid i rökgaserna var 21 %, enligt tabell 4.2, och 90 % av detta avskildes i avskiljningsprocessen. Med dessa fraktioner kunde massflödet i koldioxidströmmen bestämmas, vilket krävdes för att bestämma effektförbrukningen hos kompressionen och pumparbetet. Kompressionen av koldioxidströmmen simulerades i EBSILON som att ske i ett steg från 1 till 85 bar. I verkligheten skulle kompression troligtvis designas med mellankylning för att minska elbehovet. Det beräknade energibehovet i kompressionen ska alltså betraktas som ett maximum för vad som kommer att krävas i verkligheten. Vid trycket 85 bar och temperaturen 25 °C uppträder koldioxid i flytande fas. Programvaran hanterar dock inte flytande koldioxid och inte heller fasövergången mellan gasfas och flytande fas, därför modellerades komprimeringen utan fasövergång till flytande koldioxid. Efter kompressionen pumpades trycket upp till 110 bar vilket var lämpligt för att hålla koldioxiden flytande under transporten, då man har god marginal till fasövergången till gasfas. Pumpningen från 85 till 110 bar modellerades med vatten. Då trycket pumpas upp från 85 till 110 bar minskar volymiteten för vatten med 0,1 % och 5 % för koldioxid, vilket innebar att det beräknade pumparbetet blir något mindre i modellen än i verkligheten [30]. För att temperaturen på koldioxidströmmen skulle hållas konstant 25 °C vid kompressionen kylades strömmen med en kylslinga, enligt figur 4.3. Pumparbetet för kylmediet vid kompressionen inkluderades i kompressionsarbetet.



Figur 4.3: Simulering av kompression och pumpning av koldioxidström i kraftverksmodellen.

4.2 Absorptionsprocessen

För att kunna modellera avskiljningsprocessen har antaganden, approximationer och tester i Aspen gjorts. Dessa beskrivs närmare för hela avskiljningsprocessen och dess enhetsoperationer i detta avsnitt. I figur 4.4 åskådliggörs den i Aspen uppbyggda modellen.



Figur 4.4: Aspen-modellen för avskiljningsprocessen.

Absorptionsprocessen har modellerats i Aspen. I figur 4.4 åskådliggörs den i Aspen uppbyggda modellen. Huvudkomponenterna i figur 4.4 är desamma som i figur 2.5 men innehåller några skillnader, bland annat har en flash och en make-up-mixer (MUMIX) lagts till. Dessa komponenter beskrivs i avsnitt 4.2.3 och 4.2.4.

4.2.1 Modellantaganden samt val av fysikaliska modeller

I detta arbete användes ELEC-NRTL (Electrolyte Non-Random-Two-Liquid) som fysikalisk modell. ELEC-NRTL är lämplig för system som innehåller elektrolyter och är polärt. Elektrolyter är ämnen eller blandningar av ämnen som innehåller joner och kan leda ström. Anledningen till att det krävs en speciell modell för att uppskatta egenskaperna hos elektrolytsystem, är att de elektrostatiska krafterna mellan elektrolyter är mycket starkare än mellan icke-elektrolyter [31]. ELEC-NRTL används i modelleringen eftersom systemet innehåller aminer och därför är polärt. [17]

Tvåfilmsteorin har använts för att beskriva masstransporten mellan vätske- och gasfasen. En anledning är att tvåfilmsteorin är standardinställningen för att modellera massöverföring i Aspen. [32] En annan anledning är att tvåfilmsteorin kan approximera massöverföringen i komplexa absorptionsprocesser med bra resultat [33].

Det har antagits att NO_x och SO_2 renas från rökgaserna innan de kommer till avskiljningsanläggningen. Ädelgaser och partiklar i rökgaserna försummas. Rökgaserna antas endast bestå av kvävgas, koldioxid, vatten och syrgas som tillsammans står för 97,7 % av rökgasernas massa, enligt tabell 4.2. Ett annat antagande är att MEA inte degraderas. Det har också antagits att varken MEA eller vatten lämnar avskiljningssystemet med koldioxidströmmen eller den reade rökgasströmmen. Dessutom har alla komponenter modellerats utan värmeförluster till omgivningen.

4.2.2 Absorbern

Temperaturen på rökgaserna in i absorbern bör vara mellan $40\text{ }^\circ\text{C}$ och $50\text{ }^\circ\text{C}$ för att avskiljningen av koldioxid ska få hög effektivitet [14]. Från kolkraftverket var rökgasernas temperatur strax över $100\text{ }^\circ\text{C}$, därför sänktes flödets temperatur i en kylare till $40\text{ }^\circ\text{C}$ innan absorptionstornet. Även lösningsmedelsströmmen in i absorbern gavs den temperaturen. Anledningen till att just $40\text{ }^\circ\text{C}$ valdes som temperatur var att störst andel koldioxid då avskildes, enligt de tester av temperaturberoendet som gjordes i Aspen.

Rökgasflödet från kraftvärmeverket genomgick ingen tryckförändring innan det tillfördes absorbern. Detta är det vanliga tillvägagångssättet i industrin, eftersom det är energikrävande att ändra trycket på en gas. [15] Av denna anledning var trycket i absorbern samma som trycket i rökgasflödet, det vill säga 1,08 bar. Tryckfallet genom systemet försumrades.

L/G-förhållandet (*Liquid/Gas*) för absorberna anger hur stort massflödet av lösningsmedelsströmmen in i absorberna är i förhållande till massflödet rökgaser in i absorberna. För att absorptionsprocessen ska vara energieffektiv bör lösningsmedelsströmmen vara så liten som möjligt, vilket medför ett lågt L/G-förhållande. Artanto et al [34] har använt L/G-förhållanden kring 4,0 för att uppnå renheter mellan 85 % och 95 %. Detta användes som utgångspunkt för att hitta det optimala L/G-förhållandet för denna modell, vilket redovisas i avsnitt 5.1. Vid varje L/G-förhållande hade absorberna en optimal diameter, vilken beräknas av den i Aspen inbyggda funktionen för ändamålet.

Det finns två huvudtyper av packningar: Slumpmässigt ordnade och strukturerat ordnade. De slumpmässigt ordnade packningarna är billigare att tillverka, men effektiviteten är ofta något sämre än för strukturerat ordnade packningar. I den här modellen opererade absorberna nära atmosfärstryck, då är det vanligast att använda någon typ av slumpmässigt ordnad packning. När absorberna verkar nära atmosfärstryck är kraven på materialet som absorberna är byggd av inte så stora som vid högre tryck. Om då både materialet och packningarna är billiga möjliggör det att bygga absorberna lite högre utan att den ekonomiska aspekten berörs nämnvärt. I fall där absorberna arbetar vid höga tryck måste materialet vara mer tryck-tåligt, vilket även innebär att det är mer ekonomiskt att använda strukturerat ordnad packning, som är dyrare och effektivare, för att minska höjden. [35]

Separationen i absorberna modellerades som reaktionshastighetsbegränsad, eftersom reaktionerna i absorberna anses jämviktsbegränsade [14]. Absorberna har modellerats med Raschig Pall Rings, som är en slumpmässigt ordnad packning. Anledningen var att den här typen av packning ger lågt tryckfall, fördelar vätskan bra och är en av de vanligaste packningarna [36]. Kunesh [37] anger att det är vanligt att använda plastpackningar i koldioxidavskiljningsanläggningar, därför valdes plast som packningsmaterial. I Aspen finns flertalet olika packningsstorlekar att välja mellan för den valda packningstypen. Efter tester på olika packningsstorlekarna för Raschig Pall Rings erhöles att en diameter på 90 mm fungerade bäst.

4.2.3 Desorberna

I desorberna var temperaturen hög för att koldioxid ska släppa lösningsmedlet. Att temperaturen var hög leder också till att reaktionshastigheten blev väldigt snabb, vilket gjorde att antagandet om att separationen var jämviktsbegränsad kunde göras [36]. Eftersom reaktionen var jämviktsbegränsad behövdes varken botten eller packning väljas, och heller inte höjd eller diameter av desorberna eftersom jämvikten ställde in sig oavsett val. Temperaturen i modellens återkokare, som är den varmaste komponenten i desorberna, sattes till 120 °C för att kunna anta att ingen degradering skedde, men ändå ha tillräckligt hög temperatur för att separationsreaktionen skulle kunna antas vara jämviktsbegränsande.

Det finns två vanliga typer av återkokare "kettle"- och "thermosyphon"-återkokare. Återkokare av "thermosyphon"-typen används när bottenprodukten innehåller termiskt känsliga ämnen, när trycket i botten av desorbern är högt, när endast en liten temperaturskillnad finns att tillgå för värmeväxlingen eller när det råder stor risk för beläggningar [15]. I den här modellen antogs att MEA inte degraderade, vilket innebär att det ej var termiskt känsligt, därmed gällde ingen av punkterna för modellen, varför en "kettle"-återkokaren valdes. En annan anledning till att den valdes var att det innebär enklare beräkningar än för "thermosyphon"-typen.

Kondensorn i toppen av desorbern valdes till en partialkondensator, som endast kondenserar en del av flödet. Temperaturen i partialkondensorn sattes till 80 °C, eftersom det mesta av vattenånga i gasströmmen på väg ut från desorbern då kondenseras. Kondensatet återcirkuleras och gasflödet fortsatte till en flash där den sista mängden vattenånga separerades från koldioxiden vid temperaturen 25 °C. Anledningen att inte all vattenånga läts kondenseras i kondensorn, var att det återcirkulerade vattnet då skulle ha en temperatur på 25 °C. Att värma allt kondensat från 25 °C hade ökat energibehovet i återkokaren avsevärt i jämförelse mot att bara värma den största delen av vattnet från 80 °C.

Den till desorbern ingående strömmens tryck valdes till 1,4 bars tryck då tester i Aspen visade att ett lägre tryck krånglade och ett högre tryck inte gav någon förbättring. Enligt Seader et al [15] sätts ofta trycket i desorbern till samma tryck som den ingående strömmen har, därför valdes trycket i desorbern till 1,4 bar.

4.2.4 Make-up-mixer och designspecifikationer

Små mängder MEA och vatten följer med produktströmmen som lämnar desorbern. De två komponenterna följer även med de renade rökgaserna ut ur absorbern. För att systemet inte skall urlakas återförs de förlorade volymerna systemet genom en make-up-mixer. MEA:n och vattnet som lämnar systemet med den renade rökgasströmmen har temperaturen 66 °C och de som lämnar med koldioxidströmmen från desorbern har temperaturen 25 °C. Påfyllnadsströmmens temperatur sattes därför till 40 °C som är ett viktat medelvärde av temperaturerna på mängden MEA och vatten som läcker ut.

Lean loadingen valdes till 0,28 [mol CO₂/mol MEA], eftersom det är ett värde som används i litteraturen [34]. Lean loading erhålls genom att dividera substansmängden koldioxid bunden till MEA-molekylerna med den totala substansmängden MEA i den koldioxidfattiga lösningsmedelsströmmen. För att fixera lean loadingen vid det valda värdet användes funktionen "designspecifikation" i Aspen. Utifrån den valda lean loadingen beräknar programmet vilken effekt som måste tillföras i återkokaren. Designspecifikation-funktionen används även för att beräkna med vilken hastighet flödet ur desorbern lämnar systemet, för att nå den ansatta kondensortemperaturen.

4.3 Transport

Modelleringen av koldioxidtransporten består av kompressions- och pumparbetsberäkningar samt tryckfallsberäkningar över sträckan som koldioxiden transporteras i pipeline. Denna beräkning ger en längd för hur långt ett pipelinesegment kan vara innan trycket gått ner från 110 bar till 85 bar, där det åter pumpas upp till 110 bar i en pumpstation, för fortsatt transport i nästa pipelinesegment. Dessa beräkningar på en pipeline med pumpstationer har simulerats i MATLAB. Vid beräkningarna antogs flödes hastigheten vara 1 m/s vilket tillsammans med ett koldioxidflöde på 88 kg/s och ett tryck på 110 bar gav att pipelinens innerdiameter av 0,37 m krävs. För beräkning av längden av ett pipelinesegment slogs ekvation 7 och 8, för rörförluster, ihop till ekvation 9 [19].

$$h_L = \frac{\Delta P}{g \cdot \rho} \quad (7)$$

$$h_L = 2 \cdot f_f \cdot \frac{L \cdot v^2}{g \cdot D} \quad (8)$$

$$L = \frac{\Delta P \cdot D}{v^2 \cdot 2 \cdot f_f \cdot \rho} \quad (9)$$

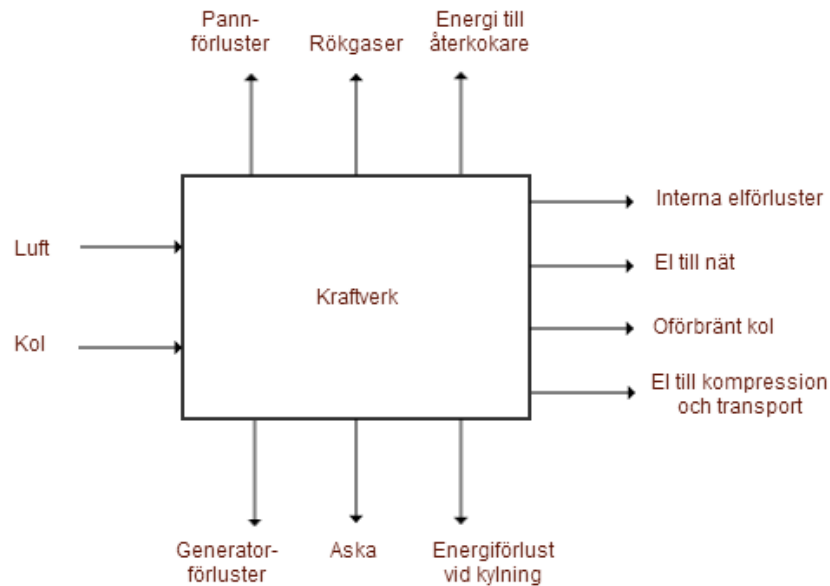
Där L är längden av ett pipelinesegment, ΔP är tryckfallet D är pipelinens innerdiameter, v är flödes hastigheten, f_f är friktionsfaktorn mellan flödet och pipeline och ρ är koldioxidens densitet. För att beräkningen skulle bli så bra som möjligt delades beräkningen upp i 25 steg, med tryckfallet 1 bar i varje steg, där koldioxidens fysikaliska egenskaper hämtades för varje tryck. Förenklingar i MATLAB-modellen är att transporten antas ske isotermt med temperaturen 25 °C, att koldioxidflödet är helt rent från andra ämnen, att transporten sker helt horisontellt utan svängar eller höjdförändringar samt att friktionsfaktorn är konstant för hela transporten. Alla dessa förenklingar gör att tryckförlusten blir mindre än i det verkliga fallet.

4.4 Dynamisk modell

I detta avsnitt beskrivs hur den dynamiska modellen för hela systemet togs fram och modellerades. Den dynamiska modellen baseras på resultaten från de stationära modellerna beskrivna ovan.

4.4.1 Stationär värmebalans

För att sätta upp den stationära värmebalansen drogs systemgränsen så att systemet innefattade kraftverket, enligt figur 4.5. Avskiljningsanläggningen och transportanläggningen ligger utanför systemgränsen, men tas hänsyn till genom att en energiström passerar systemgränsen till återkokaren i avskiljningsanläggningen och att en annan energiström kopplas till kompressions- och pumparbete i transporten.



Figur 4.5: Värme- och materialflöden in och ut ur kraftverket.

Efter att systemgränsen var dragen identifierades alla flöden in och ut ur systemet. In till kraftverket kommer luft- och kolflöden. Från kraftverket levereras elektricitet till elnätet och värmeenergi till CCS-anläggningen, i form av ånga. Varma rökgaser lämnar systemet och det finns även förluster i form av aska, oförbränt material och andra pannförluster vilket visas i figur 4.5. En annan förlust är den som uppstår i generatortill följd av magnetiska och mekaniska förluster. Ångan efter den sista turbinen i kraftverket värmeväxlas med kylvatten, vilket även gav en värmeförlust. Dessutom tas elektricitet ut från kraftverket för att driva kompressions- och pumparbetet vid komprimering och transport av koldioxiden. Kraftverket har även interna pump-, turbin- och motorförluster som till följd av värmeförluster i komponenterna, vilket även måste beaktas. Ekvation 10 visar den stationära värmebalansen.

$$\begin{aligned}
P_{\text{elnät}} = & m_{\text{luft}} \cdot h_{\text{luft}} + m_{\text{kol}} \cdot (h_{\text{kol}} + H_{\text{förbränningsvärde,kol}}) - (Q_{\text{ånga}} + m_{\text{rökgaser}} \cdot \\
& \cdot h_{\text{rökgaser}} + Q_{\text{pannförluster}} + Q_{\text{oförbränt}} + m_{\text{aska}} \cdot h_{\text{aska}} + Q_{\text{generatorförlust}} + \\
& + Q_{\text{kylvattenförlust}} + P_{\text{transport}} + Q_{\text{internaförluster}})
\end{aligned} \tag{10}$$

Ur den stationära EBSILON-modellen erhöles värden på de olika flödena och entalpierna vid olika lastfall, mellan 100 % och 40 % last, med 5 %-enheters intervall. De enda värdena som inte sätts in direkt från EBSILON i värmebalansen är energiförlusten hos de interna pumparna, turbinerna och motorerna. De interna värmeförlusterna tas med i beräkningarna trots att de inte ingår som en separat term i värmebalansen, på grund av det sätt som EBSILON är uppbyggt på. På grund av det här resonemanget kommer den förlusttermen att utelämnas i de nedanstående värmebalanserna. Värmeförlusterna i de olika turbinerna försumrades då massflödena genom de olika turbinerna varierar kraftigt beroende på lastfall, vilket innebar att de var svåra att generalisera i en matematisk modell.

För att få kolflödet som enda oberoende variabel plottades de olika steady-state-flödena i värmebalansen mot massflödet av kol. Med hjälp av funktionen "Basic fitting" i MATLAB anpassades funktioner till plottarna. Med dessa funktioner kunde de andra variablerna i värmebalansen uttryckas som funktioner av kol. Hur de olika variablerna beror av massflödet kol kan ses i ekvationerna 13–20, som finns i Appendix A.

Förhållandet mellan tillförd massa luft och kol är samma oberoende av lastfall. Förhållandet erhålls från EBSILON och visas i ekvation 21 i Appendix A. Entalpierna för kolet och dess förbränningsentalpi, luften in i förbränningskammaren och askan ut var konstanta. Entalpin på rökgaserna varierade med lastfallen och dess beroende av kolets massflöde anges i ekvation 22 i Appendix A. Ekvation 13–22 sattes in i ekvation 10, och då erhöles en stationär värmebalans, där effekten levererad till elnätet kan beräknas om massflödet kol är känt. Den stationära värmebalansen (ekvation 23) kan hittas i Appendix A.

För att validera att steady-state-modellen gav korrekta värden på eleffekten jämfördes den eleffekt som erhöles ur den framtagna värmebalansen med de effekter som EBSILON-modellen levererade vid samma kolflöde. Felet i den framtagna steady-state-modellen var maximalt 0,74 % jämfört med modellen i EBSILON, vid 70 % last.

4.4.2 Dynamisk värmebalans

Den dynamiska värmebalansen baseras på värden för hur snabbt massflödet kol in i kol-kraftverket kan ändras för att levererad eleffekt och infångningsgrad ska vara stationära i sluttillståndet, från Lawal et al [14].

Med värdena från Lawal et al kunde kolfödets retardation K under sänkningen $\frac{dm}{dt}$ beräknas. Retardationen anger hur stor sänkning av kolfödet som sker varje sekund och har enheten $\frac{kg}{s^2}$. Även hur många sekunder det tar att sänka en procentenhet av kolfödet beräknades. Den kända retardationen ger en differentialekvation, enligt ekvation 11.

$$\frac{dm_{kol}}{dt} = K \quad (11)$$

Differentialekvationen löses enligt ekvation 24 och 25 i Appendix A. Då erhålls ekvation 12.

$$m_{kol,slut} = m_{kol,start} + \frac{dm_{kol}}{dt} \cdot t + C \quad (12)$$

Från EBSILON-modellen ges start- och slutvärden för kolfödena och konstanten C kan bestämmas. Integrationskonstanten varierar med storleken på sänkningen av kolfödet. Dessutom berodde konstantens storlek på vilket lastfall som sänkningen gjordes ifrån. Konstanten måste därför beräknas för en mängd olika sänkningar och lastfall, och valdes efter vilken sänkning som skulle göras.

Ekvation 12 används för att beräkna kolfödet vid några olika tidpunkter. Den första tidpunkten är $t = 0$ s och den sista är $t = t_{slut}$ och resten av punkterna är jämnt fördelade däremellan. Eftersom ekvation 12 är av första ordningens, erhålls att systemets tidsberoende också är av första ordningen. Det tidsberoende kolfödet – ekvation 12 - ersätter det tidsberoende kolfödet i ekvation 13-23 i den stationära värmebalansen. Då fås en tidsberoende värmebalans. Ekvation 23 var efter insättning endast beroende av kolfödet som enda variabel som i sin tur var beroende av tiden, därmed hade en funktion som kunde beräkna den levererade effekten under transienterna tagits fram.

Innan $t = 0$ s var systemet stationärt. Vid $t = 0$ s började justeringarna av instoppat kol till kraftverket. Vid $t = t_{slut}$ hade steady-state uppnåtts. För en sänkning från 100 % last till 95 % last är felet 0,06 % i startvärdet och 0,74 % fel i den levererade effekten.

5 Resultat

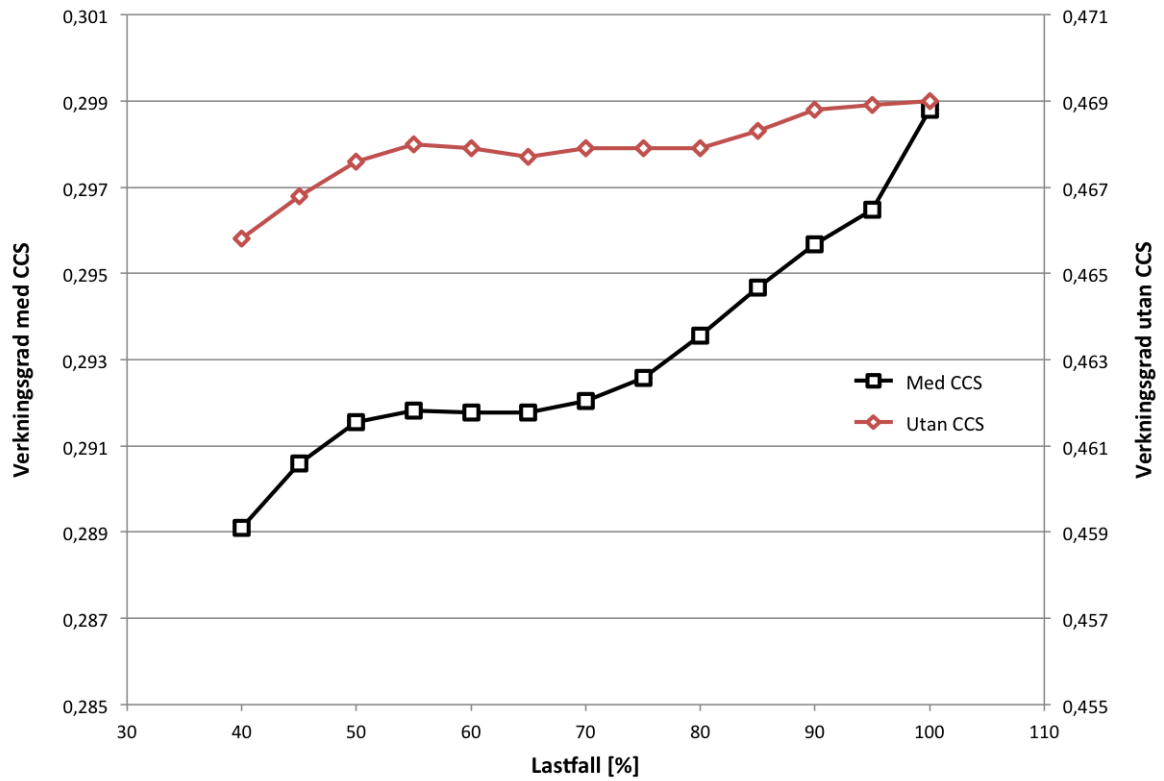
Resultaten från de stationära simuleringarna i avsnitt 5.1 används som referensdata för olika lastfall och ligger till grund för den dynamiska analysens resultat som redovisas i avsnitt 5.2. Utöver detta presenteras alternativa designlösningar som undersöker hur dynamiken i systemet förenklas om rökgasflödet till avskiljningsprocessen hålls konstant, samt hur systemet påverkas om ångavtappningen till avskiljningen stryps i avsnitt 5.3.

5.1 Resultat från stationära simuleringar

De stationära resultaten baseras på simuleringar som är genomförda i EBSILON och Aspen. Resultat gällande modellens verkningsgrad och processtillstånd så som avskiljningsgrad och L/G-förhållande presenteras här. Vidare redogörs även för rökgas- och koldioxidflödena in och ut ur avskiljningsprocessen där koldioxidflödet direkt påverkar komprimeringsarbetet inför vidare transport. Även effektförbrukning och tryckfall vid transporten samt lagringsmöjligheter för koldioxiden redovisas i detta avsnitt. Resultaten baseras på att kraftverket körs på 100 % last där värden i processen avläses vid varje femprocentsintervall ner till 40 % av maxlasten.

5.1.1 Verkningsgrad

I figur 5.1 plottas elverkningsgraden för kraftverket med och utan CCS mot de olika lastfallen. Verkningsgraden för kraftverket utan CCS är 47 % vid full last jämfört med kraftverket med CCS på 30 % vid full last. Elverkningsgraderna på kolkraftverken i Norden ligger i snitt på 40 % [29]. Det beror på att energi som annars skulle använts till att producera el istället måste användas i avskiljningsprocessen och i transporten. Verkningsgraden för lasten 100 % är den högsta eftersom anläggningen är dimensionerad och optimerad för det lastfallet. För att tydligare åskådliggöra hur verkningsgraden varierar för kraftverk med eller utan CCS, plottades verkningsgraderna för de två fallen mot individuella vertikala axlar.

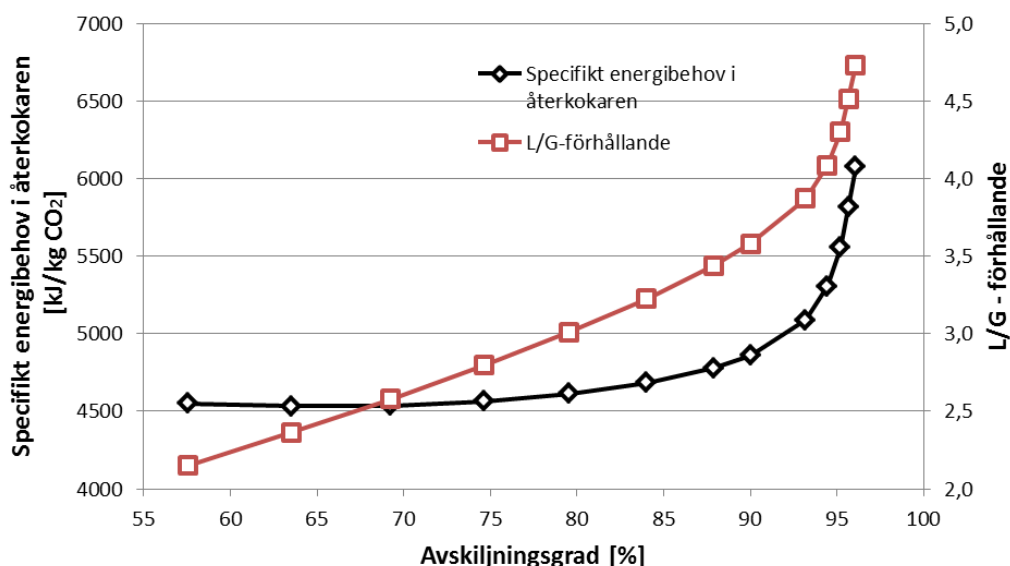


Figur 5.1: Verkningsgrader vid olika lastfall, med och utan CCS (anpassade axlar).

Skalan på de vertikala axlarna i figur 5.1 är väldigt liten. Därför är förändringarna av verkningsgraden mellan de olika lastfallen inte är särskilt stora. För fallet med CCS skiljer verkningsgraden vid 40 % och 100 % last mindre än en procentenhet, vilket är en mycket liten skillnad. Verkningsgraden för kraftverket utan CCS varierar ännu mindre än verkningsgraden för kraftverket med CCS. De här små variationerna antyder att verkningsgraden är i princip konstant över alla lastfall.

5.1.2 Avskiljningsgrad och L/G-förhållande

I figur 5.2 plottas det specifika energibehovet i återkokaren och L/G-förhållandet mot avskiljningsgraden.



Figur 5.2: Specifikt energibehov i återkokaren samt L/G-förhållande vid givna avskiljningsgrader vid 100 % last.

Anläggningen modellerades med 90 % avskiljningsgrad och L/G-förhållandet 3,6. Anledningen till det är att avskiljningsgraden blir hög till ett relativt lågt energibehov i återkokaren per avskilt kilogram koldioxid. I figur 5.2 kan ses att L/G och energibehovet ökar kraftigt efter 90 % avskiljningsgrad. Det enda som varierades när avskiljningsgraden och L/G-förhållandet bestämdes var lösningsmedelsströmmens storlek och diametern på absorberna. Höjden var konstant 50 m. Vid den valda operationspunkten var den optimala diametern 14,5 m.

5.1.3 Rökgas- och koldioxidflöden i avskiljningsprocessen

Koldioxidflödet ut från avskiljningsprocessen beror direkt på rökgasflödet, eftersom rökgaserna innehåller all koldioxid i processen. Koldioxidandelen i rökgasflödet är 21 % och redovisas tillsammans med övriga massfraktioner i rökgaserna i tabell 4.2. Avskiljningsgrad 90 % används, enligt föregående avsnitt. Tabell 5.1 visar rökgasflödet in till avskiljningsprocessen samt koldioxidflödet ut från densamma, för ett antal lastfall.

Tabell 5.1: Rökgasflöde in och koldioxidflöde ut från anläggningen. Koldioxidflödet är linjärt beroende av rökgasflödet.

Last [%]	Rökgasflöde in [kg/s]	Koldioxidflöde ut [kg/s]
100	466,5	88,2
90	425,5	79,4
80	381,2	72,0
70	335,3	63,4
60	287,2	54,3
50	238,8	45,1
40	191,4	36,2

Avskiljningsprocessen är modellerad så att tryck, temperatur och massfraktion av koldioxid är konstant för alla lastfall. Resultatet betyder att transportprocessen endast behöver ta hänsyn till ett varierande massflöde på inkommande koldioxidström för olika lastfall, vilket påverkar kompressions- och pumparbetet.

5.1.4 Transport och lagring

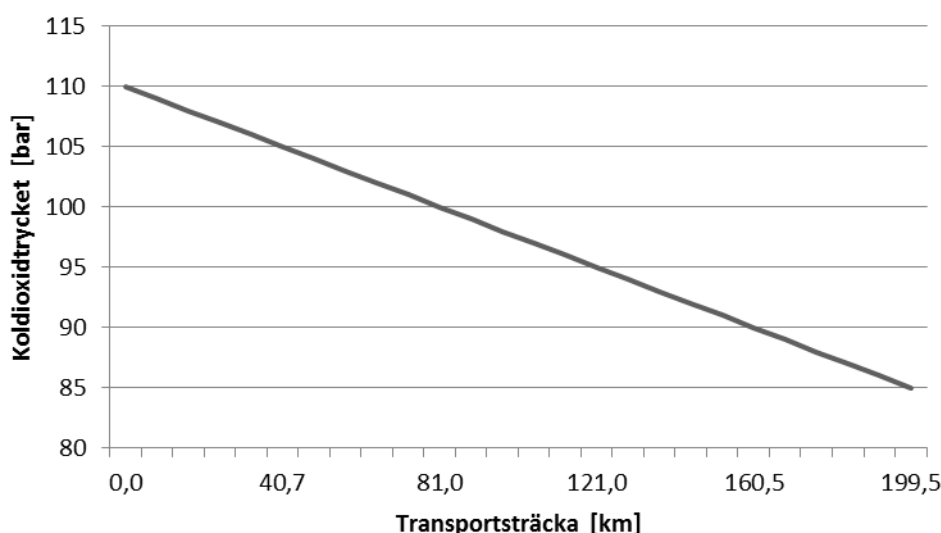
Utöver effektförlusten på grund avskiljningsprocessens ångbehov går även en ansevärd mängd el åt att komprimera den avskilda koldioxiden till rätt tryck för vidare transport. Beräkningarna visar att den största elförbrukningen för transporten uppkommer vid kompressionen av gas och att endast en liten del går till pumparbetet, se tabell 5.2. Tabellen visar även de olika eleffektsförlusterna som uppstår för kraftverket då en avskiljningsanläggning byggs till. Tabellen visar förlusterna gentemot ett kraftverk utan avskiljningsanläggning, där andra och tredje kolonnen visar effekten som krävs för kompression och pumparbete. Tabellens fjärde kolonn visar hur mycket eleffekt som måste uppoffras då ånga används i CCS-anläggningen istället för att generera ett arbete i turbinerna.

Tabell 5.2: Kompressions- och pumparbete, samt effektförlust på grund av avskiljningsprocessen för tre lastfall.

Last [%]	Kompressionsarbete (1 till 85 bar) [MW]	Pumparbete (85 till 110 bar) [MW]	Eleffektförlust, avskiljningsprocessen [MW]
100	50,5	0,33	132,9
80	42,5	0,27	111,7
60	34,1	0,22	89,8

Elförbrukningen för pumparbetet (85 till 110 bar) är i storleksordningen 150 gånger

mindre än den initiala kompressionen (1 till 85 bar) och 400 gånger mindre än den effekt som krävs i avskiljningsprocessen. Under transporten krävs det även att koldioxiden trycksätts regelbundet för att kompensera för det tryckfall som sker i pipelinen. Detta pumparbete är det samma som i tabell 5.2 och figur 5.3 visar att det behöver ske var 200 km. Kompressionen har gjorts i ett steg vilket ger högre effektförbrukning än om det görs i delsteg.



Figur 5.3: Tryckfallet över transportsträckan.

Då modelleringen sker med antagandet att kraftverket ligger på en godtycklig geografisk plats, går det inte att exakt beräkna antal pumpstationer som behövs för att transportera koldioxiden till en lämplig lagringsplats. Detta i kombination med att elförbrukningen för en pumpstation är förhållandevis liten och att det bara behövs pumpstationer var 200:e km så beaktas endast den första pumpstationen vid beräkning av kraftverkets verkningsgrad i avsnitt 5.1.1.

Då lasten i kraftverket sänks kommer koldioxidflödet som ska transporteras att minska. En lägre flödes hastighet kräver i sin tur ett mindre pumparbete. Dock gör en flödesminskning i övergången mellan högt och lågt flöde att risken för gasbubblor ökar, vilket innebär att snabba dynamiska ändringar skulle kunna göra att koldioxiden övergår från flytande fas till gasfas eller superkritiskt tillstånd. Det innebär att det kan krävas mer eller mindre kompressions- och pumparbete för att transportera koldioxiden i laständringarna.

Väl trycksatt och transporterad skall koldioxiden lagras på lämplig plats. Huruvida en plats är lämplig beror på kapaciteten och injektiviteten. Vid full drift avskiljs det 88,2 kg/s koldioxid enligt tabell 5.1, vilket blir nästan 2.8 miljoner ton per år. I dag finns två lagringsanläggningar i den denna storleksordning, Gorgon (utanför Australiens västkust) och Weyburn (utanför Midale i Canada). Gorgon och Weyburn har årliga injektivite-

ter på 4.9 respektive 2.7 miljoner ton koldioxid, och väntas ha totalkapacitet på 129 respektive 20 miljoner ton. Det skulle innebära kapacitet för 26 respektive 7 år.

5.2 Dynamiska resultat

I det här avsnittet beskrivs hur kraftverkets dynamik påverkas av implementeringen av avskiljningsprocessen genom att analysera erforderlig tid för att sänka lasten från 100 %. Det kommer även att presenteras en känslighetsanalys för den dynamiska modellen. En modell för att alltid avskilja en konstant mängd rökgaser kommer att presenteras (CFCC). Hur EDCC-principen påverkar den levererade effekten och mängden avskild koldioxid kommer att visas. De tre modellerna kommer att testas mot två olika konstruerade fluktuationsscenarier.

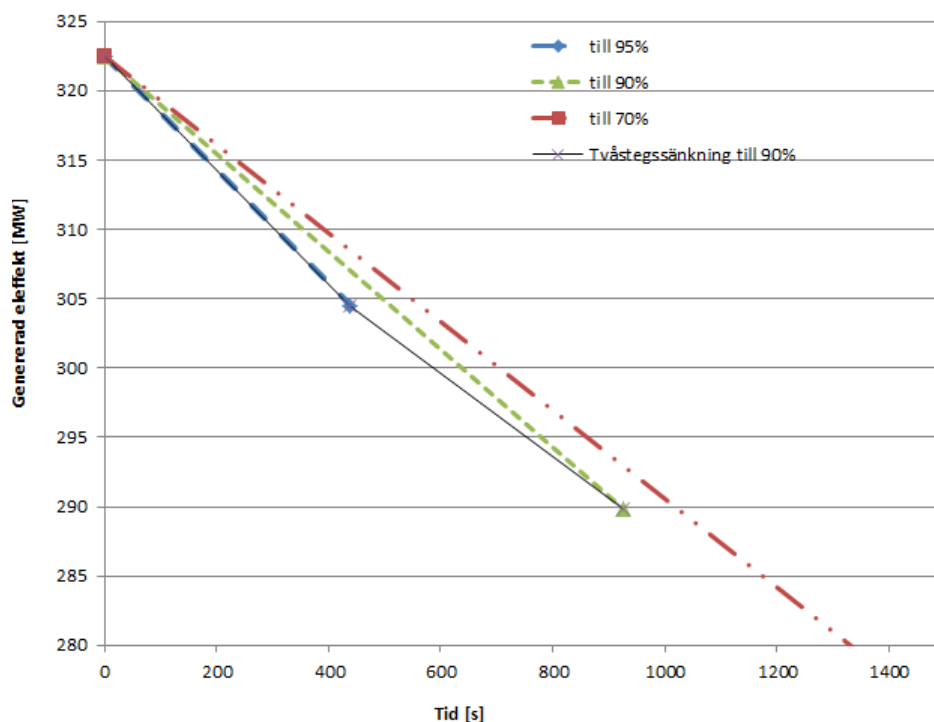
5.2.1 Dynamisk modell

I tabell 5.3 visas hur lång tid det tar att sänka lasten från 100 % till fem andra olika lastfall. Effekten som erhålls från den dynamiska modellen jämförs med effekten som erhålls från den stationära EBSILON-modellen. Felmarginalen är låg för de undersökta sänkningarna, vilket innebär att det stationära tillståndet har nåtts. Kolflödet vid 100 % last är 42,9 kg/s och effekten är 322,3 MW.

Tabell 5.3: Tiden det tar för att sänka lasten från 100 % till respektive lastfall, samt genererad eleffekt vid de olika lastfallen enligt EBSILON och den dynamiska modellen.

Last [%]	Effekt EBSILON [MW]	Effekt dynamisk modell [MW]	Tid [h]	Fel i effekten [%]
95	306,5	304,5	0,12	0,65
90	290,9	289,4	0,26	0,53
70	226,4	228,1	0,82	0,75
55	177,4	178,7	1,28	0,73
40	127,9	127,3	1,72	0,48

Tabell 5.3 visar även att tiden det tar att sänka 10 procentenheter är mer än dubbelt så stor som den tiden det tar att sänka 5 procentenheter. Detta gäller för alla sänkningar och det innebär att sänkningens förändringshastighet är lägre ju större sänkningen är. Detta åskådliggörs i figur 5.4 där tre av sänkningarna från tabell 5.3 har plottats mot tiden.



Figur 5.4: Jämförelse av förändringshastigheten vid sänkning från 100 % drift till lastfallen 95 %, 90 % och 70 %.

Figur 5.4 visar att lutningen på de olika fallen inte är samma. Detta beror på att en procentuell lastsänkning inte motsvarar en lika stor procentuell sänkning i kolflödet, vilket visas i tabell 5.4. Anledningen till detta är att anläggningen är optimerad för 100 % last, vilket ger en större procentuell kolförbrukning per genererad effekt för körningar vid lägre last. Utöver detta så är inte alla samband mellan kolflödet och övriga parametrar linjära, vilket även det gör att kolflödet inte förändras i samma takt som effektgenereringen.

I figur 5.4 visas att sänkningen från 100 % last direkt till 90 % last tar lika lång tid som sänkningen från 100 % last, till 95 % och därefter till 90 %. På grund av förenklingar i den matematiska modellen tas ett medelvärde på effektens förändringshastighet över det valda intervallet. Eftersom ett medelvärde av förändringhastigheten används kommer lutningen att vara konstant över intervallet. Om intervallet delas i hälften kommer det att bestå av två linjer med olika lutning, som är fallet för tvåstegssänkningen i figur 5.4.

Tabell 5.4: Med utgång från 100 % last sänks effekten till lastfallen i tabellens vänstra kolumn.

Last [%]	Kolflöde EBSILON [kg/s]	Kolflöde dynamisk modell [kg/s]	Sänkning av kolflödet [%-enheter]
95	41,1	41,1	4,2
90	39,2	39,2	8,8
70	30,9	30,9	28,1
55	24,2	24,2	43,7
40	17,6	17,6	59,0

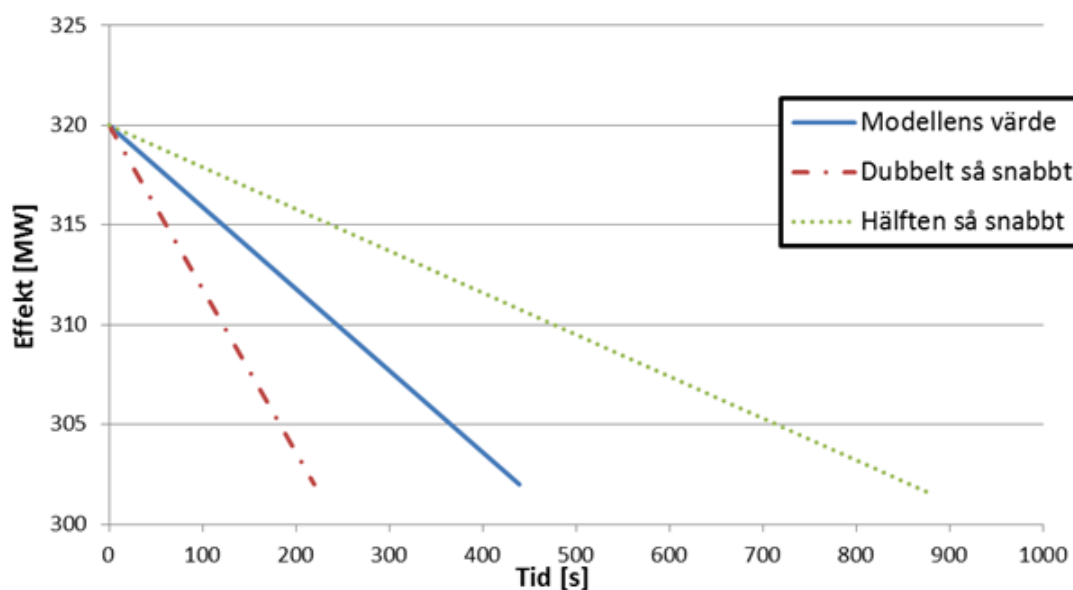
Tabell 5.5 visar tid per procentenhet för effektsänkningen från 100 % last till fem andra lastfall. Tabellen visar att tiden för effektsänkningen per procentenhet är längre för större effektsänkningar, vilket även figur 5.4 visar. Dessa tider skiljer sig åt gentemot den tiden på 105 sekunder per procentenhet från Lawal et al.

Tabell 5.5: Tid per procentenhet för en effektsänkning från 100 % last till fem andra lastfall.

Last [%]	Tid för effektsänkning [s/%-enhet]
95	87,6
90	92,4
70	98,6
55	102,1
40	103,4

5.2.2 Känslighetsanalys

För att undersöka hur den dynamiska modellen påverkas om kolflödets retardation skulle vara större eller mindre än den som antagits, har en känslighetsanalys utförts. Resultatet av känslighetsanalysen har plottats i figur 5.5, för en sänkning från 100 % till 95 % last.



Figur 5.5: Figuren visar hur lång tid en effektsänkning på 5 procentenheter tar ifall man skulle anta en större eller mindre kolflödesretardation. Den heldragna linjen motsvarar modellens kolflödesretardation.

Tiden det tar för den framtagna dynamiska modellen att gå mellan lastfallen, visas i figur 5.5 och benämns "Modellens värde". Om det hade använts en kolflödesretardation som är dubbelt så snabb som den som antogs i modellen, kan kolflödet ändras dubbelt så snabbt, vilket även innebär att det stationära tillståndet inställer sig dubbelt så snabbt. Skulle en hälften så snabb kolflödesretardationen ha använts, skulle tiden att nå det stationära tillståndet bli dubbelt så lång.

I figur 5.5 kan ses att transienterna är linjära, trots att den dynamiska värmebalansen innehåller några icke-linjära termer. Det beror på att koefficienterna framför de kvadratiske och kubiska termerna är små i förhållande till koefficienterna framför de linjära termerna.

5.3 Designalternativ för att minska den dynamiska trögheten

I detta avsnitt presenteras resultat för designalternativ som på olika sätt reducerar trögheterna vid dynamisk drift av kraftverket. Aspekter som har undersökts är bland annat alternativ dimensionering av rökgasreningen, och för vilka driftscenarion detta alternativ är bäst lämpat. Utöver detta undersöktes möjligheten att vid extrema fluktuationer i elnätet reducera ångavtappningen till koldioxidavskiljningen, i syfte att möjliggöra en snabb förändring i kraftverkets elproduktion. Denna förändring blir avsevärt snabbare då kolkraftverket inte behöver samspela med avskiljningsanläggningens dynamik.

5.3.1 Konstant rökgasrening (CFCC)

Designalternativ 1 och 2 har undersökts, där 100 % av rökgaserna alltid avskiljs och där en konstant mängd motsvarande 50 % av rökgaserna vid 100 % last, renas från koldioxid. Som jämförelse inkluderas även en anläggning utan CCS. Rökgasflödet är 466,5 kg/s vid 100 % last. På grund av försämrad verkningsgrad till följd av CCS, se figur 5.1, kontra fallet utan CCS. Denna effektreduktion kan dock vägas upp av att rökgasreningen tillåter avskiljning av koldioxid från rökgaserna. Data för designalternativen vid 100 % last redovisas i tabell 5.6 med jämförelse mot 0 % rökgasrening.

Tabell 5.6: Verkningsgrad, effekt och mängd avskild koldioxid för tre nivåer av rökgasrening. 0 % motsvarar drift utan CCS. Anläggningen körs vid 100 % last.

Renad rökgasmängd [%]	Verkningsgrad [%]	Effekt [MW]	Avskild koldioxid [kg/s]
0	45,5	489,5	0
50	37,7	406,5	44,1
100	29,9	322,3	88,2

Tabell 5.6 bygger på ett designfall med 100 % last. För att sätta dem i ett sammanhang genomförs en fallstudie där alternativen jämförs utifrån två förutbestämda körscheman, som redovisas i tabell 3.1 i avsnitt 3.2.1.

Syftet med undersökningen var att utreda för vilka körscheman som 50 % rökgasrening kan vara ett relevant alternativ till 100 % rökgasrening. 50 % rökgasrening ter sig fördelaktigt då kraftverket körs för att täcka topplasten enligt körschema 2. I körschema 2 är snittlasten 61,5 % och för körschema 1 är snittet 75 % last. Körschema 2 har alltså ett rökgasflöde som är bättre anpassat för 50 % rökgasrening. Detta medför att infångningsgraden är högre för körschema 2, varför designalternativet med 50 % rökgasrening lämpar sig bäst för topplastdrift. Detta visas i tabell 5.7 då infångningsgrad jämförs för körschema 1 och 2 vid konstant rening av den mängd som 50 % av rökgaserna vid 100 % last utgör.

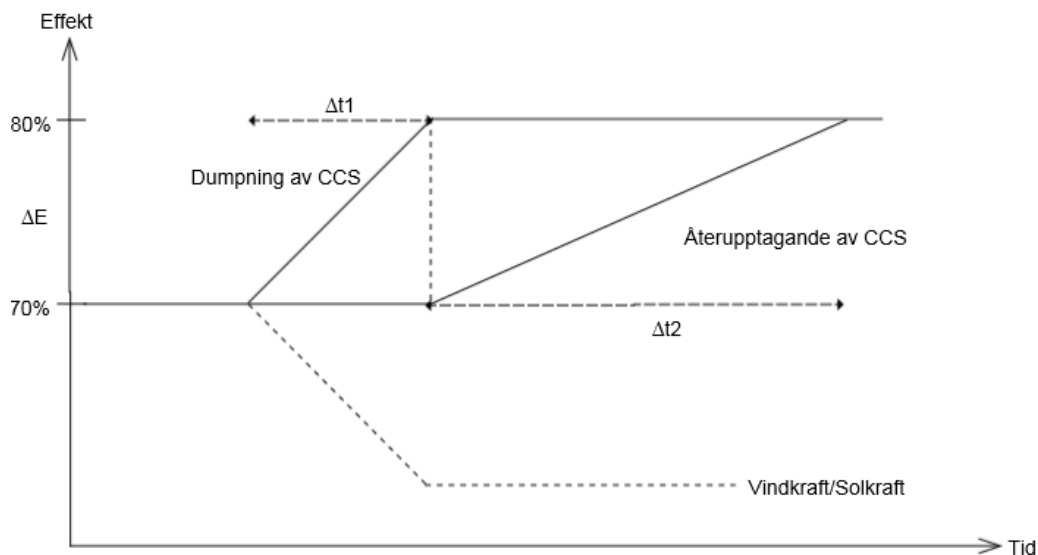
Tabell 5.7: Resultat från körschema 1 och 2 där fokus ligger på jämförelse av 50 % rökgasrening. Infångningsgraden visar att körschema 2 är lämpligast.

	Körschema 1			Körschema 2		
	<i>0</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>50</i>	<i>100</i>
Rökgasrening [%]						
Elproduktion [GWh/år]	3216	2421	2118	2637	1869	1736
Producerad CO ₂ [Mton/år]	2,32	2,32	2,32	1,90	1,90	1,90
Infångad CO ₂ [Mton/år]	0,0	1,32	2,09	0,0	1,39	1,71
Infångningsgrad	0,0	0,60	0,90	0,0	0,73	0,90

För båda körscheman är infångningsgraden av koldioxid högre vid 100 % rökgasrening än vid 50 % rökgasrening. Detta måste dock vägas mot de starka fördelar som 50 % rökgasrening medför, då dynamiken i kraftverket kraftigt reduceras och möjligheten att följa hastiga fluktuationer i elnätet är avsevärt bättre. Detta gäller i synnerhet för körschema 2, som beskriver topplastdrift, där 100 % rökgasrening medför långsam dynamik och en överdimensionerad anläggning med omotiverat hög investeringskostnad.

5.3.2 Reduktion av ångavtappning

Syftet med leda om ångan är att tillåta en snabbare effektjustering för kraftverket. Detta undersöktes genom att studera en lastökning från 70 % till 80 %, vilket innebär en effektökning på 32,2 MW. En procentenhet av effekten är 3,22 MW, och denna förändring kan genomföras på 6 sekunder. Beräkningar för detta scenario redovisas och förklaras nedan. Scenariot visas schematiskt i figur 5.6.



Figur 5.6: Dumpningen av CCS innebär att ångavtappningen till avskiljningsprocessen stryps för att snabbt kunna öka effektuttaget. Återupptagandet av CCS innebär en ökad förbränning så att avskiljningen kan återupptas på det nya lastfallet.

Utifrån antagandet att effektuttaget kunde justeras en procentenhet på 6 sekunder, erhöles att effektens förändringshastighet var 0,53 MW/s. Erforderlig tid för effektökningen blev således 60 sekunder. Under denna tid genomfördes ingen avskiljning och därför släpptes det ut 3,76 ton koldioxid, som i normalfallet hade fångats in.

$$\Delta E = 32,2 \text{ MW}$$

$$\frac{dE_{\text{snabb}}}{dt} = 0,53 \text{ MW/s}$$

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta E}{\frac{dE_{\text{snabb}}}{dt}} = 60 \text{ s}$$

$$\text{CO}_{2,\text{capt},70} = 61,7 \text{ kg/s}$$

$$\text{CO}_{2,\text{loss},1} = \Delta t_1 \cdot \text{CO}_{2,\text{capt},70} = 3,76 \text{ ton}$$

Kraftverket befann sig efter denna tid i jämvikt med det efterfrågade elbehovet, och förbränningen tilläts då öka för att återuppta avskiljningsprocessen. Anläggningens kapacitet ökades då med 0,03 MW/s, vilket medför att anläggningen är i jämvikt med fullständig avskiljning efter 1 073 sekunder. Under denna tid släppte kraftverket ut 35,46 ton koldioxid. Under detta förlopp antogs att hälften av koldioxidflödet infångas, då återupptagandet av fullständig avskiljning medför viss infångning.

$$\frac{dE_{\text{långsam}}}{dt} = 0,03 \text{ MW/s}$$

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta E}{\frac{dE_{\text{långsam}}}{dt}} = 1073 \text{ s}$$

$$\text{CO}_{2,\text{capt,medel } 70-80} = 66,1 \text{ kg/s}$$

$$\text{CO}_{2,\text{loss},2} = \Delta t_2 \cdot \text{CO}_{2,\text{capt,medel } 70-80} \cdot \frac{1}{2} = 35,46 \text{ ton}$$

Det sammanlagda utsläppet var 39,2 ton per scenario och med antagandet om tre sådana per dygn resulterade detta i 117,6 ton utsläppt koldioxid per dygn. Denna mängd skall inte förväxlas med den mängd koldioxid som oundvikligen släppts ut till följd av 90 % avskiljningsgrad i absorberna. Med tre perioder av utebliven infångning per dygn för att kompensera för plötsligt effektbehov erhålls en infångningsgrad på 97,8 % av de 5331 ton som maximalt kunde fångats in vid 70 % last.

$$\text{CO}_{2,\text{loss}} = \text{CO}_{2,\text{loss},1} + \text{CO}_{2,\text{loss},2} = 39,2 \text{ ton}$$

$$\text{Relativ infångningsgrad} = \frac{5331 - 39,2 \cdot 3}{5331} = 97,8 \%$$

Denna princip är beroende av att det finns tillräckligt stor effekt att hämta från avskiljningsprocessens ångavtappning. Tabell 5.2 visar den eleffekt som ångavtappningen motsvarar. Modelleringen har utförts för lastfall större än 40 %, och för alla lastfall större än eller lika med 40 % är en momentan effektökning på minst 20 procentenheter möjlig.

Om den momentana effektökningen är mindre än 20 procentenheter behöver ångavtappningen inte strypas fullständigt, vilket möjliggör en viss avskiljning under omställningen. Möjligheten att omedelbart justera effektuttaget till 100 % finns för alla lastfall högre än 69 %. För lastfallen större än 69 % finns den potentiella möjligheten att strypa ångavtappningen och på så vis producera effektuttag som motsvaras av ett kraftverk utan CCS-anläggning, och därmed producera mer än 100 % effekt. Detta skulle alltså kortvarigt kunna täcka extrema fluktuationer i elnätet. Beräkningar som genomfördes visade att en akut höjning från 90 % last till en överproduktion på 120 % last resulterar i en relativ infångningsgrad på 95,9 % 120 % last under en timme. För fallet då kraftverket arbetade på 120 % last under två timmar två gånger på ett dygn blev infångningsgraden 89,4 %.

5.3.3 Fluktuationsscenarier

Tre designalternativ undersöktes för två olika scenarier som motsvarar fluktuationer för sol- respektive vindkraft. Scenarierna utgår från att kraftverket arbetar på 50 % last, och utsätts för en effektförändring enligt de vänstra kolumnerna i tabell 5.8 och 5.9.

För solkraftsproduktion sker fluktuationerna på minutbasis, vilket innebär att det blir svårare för kraftverket att följa dessa förändringar. Tabell 5.8 visar att designalternativ 3 (reduktion av ångavtappning) var det alternativ som var bäst lämpat för att möta fluktuationer i solkraftproduktionen. Designalternativ 1 (dynamisk modell) klarade inte av att snabbt nog parera för någon av de tre fluktuationerna.

Tabell 5.8: Designalternativens förmåga att följa tre fluktuationer för solkraftsproduktion. Tid inom parentes anger hur lång tid effektförändringen tog.

Effektändring på 1 min [MW]	Designalternativ		
	1 (100 %)	2 (CFCC)	3 (EDCC)
15	Nej (8,2 min)	Ja (0,94 min)	Ja (0,47 min)
30	Nej	Nej (1,87 min)	Ja (0,94 min)
40	Nej	Nej	Nej (1,26 min)

För vindkraftsproduktionen sker fluktuationerna på timbasis, vilket gör det betydligt enklare för designalternativen att följa effektförändringarna. Samtliga designalternativ klarade av att följa måttliga fluktuationer, men designalternativ 3 utmärkte sig med en extremt god tidsmarginal. Vid effektförändringen på 290 MW överskrider designalternativ 3 lastfallet för 100 % drift. Designalternativ 1 kan på grund av sin tröghet maximalt täcka en 112 MW effektförändring, vilket motsvarar att gå från 50 % till 85 % last.

Tabell 5.9: Designalternativens förmåga att följa tre fluktuationer för solkraftsproduktion. Tid inom parantes anger hur lång tid effektändringen tog.

Effektändring på 60 min [MW]	Designalternativ		
	1 (100 %)	2 (CFCC)	3 (EDCC)
50	Ja (26,4 min)	Ja (3,13 min)	Ja (1,57 min)
145	Nej (76,8 min)	Ja (9,06 min)	Ja (4,56 min)
290	Nej	Nej	Ja (9,12 min)

6 Diskussion

Det är uppenbart att en förändring av energisystemet är nödvändig för att kunna möta framtidens krav på minskade koldioxidutsläpp och en ökad andel förnyelsebar energi. CCS-tekniken medför en möjlighet att reducera koldioxidutsläppen men innebär även att verkningsgraden på elproduktionen minskar kraftigt. Parallellt med detta ökar graden av förnyelsebara energikällor som är en förutsättning för en hållbar energiförsörjning. Dessa energikällor ökar dock andelen intermitterent el.

Samspelet mellan ett kolkraftverk och dess fullskaliga CCS-anläggning är en avgörande faktor för hur bra ett kolkraftverk kan följa fluktuationer i elnätet som orsakas av både intermitterent el och ett varierande behov från konsumenterna. Kraftverk med CCS karaktäriseras oftast av en trög dynamik vilket skulle försvåra dess förmåga att följa fluktuationerna i elnätet. Dessutom dimensioneras CCS-anläggningar ofta efter full last, vilket innebär att de är överdimensionerade för övriga lastfall. För att lättare kunna tillgodose elbehovet under fluktuationerna, och utnyttja en mer rimligt dimensionerad CCS-anläggning, är det därför nödvändigt att ta fram snabbare och för behovet bättre anpassade designalternativ.

Designalternativet för konstant rökgasflöde (CFCC) är lämpligast för topplastade körsche-man, där alternativets snabba dynamik tillåter topparnas hastiga fluktuationer. Ett framtidsscenario skulle kunna vara att kolkraftverk med konstant rökgasrening utnyttjas för att följa topplaster. Då driften för topplastade kraftverk mestadels ligger nära det lastfall för vilket avskiljningen är dimensionerad för, erhålls trots den nedskalade CCS-anläggningen en god infångningsgrad. Fördelen är med andra ord att en stor del koldioxid ändå avskiljs och att kraftverket är tillräckligt snabbt för att följa merparten av fluktuationerna i elnätet. Detta framtidsscenario skulle kunna bygga på att dagens befintliga kolkraftverk kompletteras med CCS-anläggningar som är dimensionerade för ett konstant rökgasflöde. Scenariot medför inte enbart en snabbare dynamik utan även lägre investeringskostnader för anläggningen. Särskilt gynnsamt blir detta då i jämförelse med en fullskalig CCS-anläggning som är både dyrare och har sämre dynamik.

Anledningen till att designalternativ 3 (EDCC-principen) togs fram var att det behövdes ett kraftverk som kunde följa de mest extrema fluktuationerna som kommer från solkraftsproduktion. Potentialen i framtida solkraftsproduktion får anses vara väldigt stor, varför det redan nu är relevant att utforska möjligheter att följa den hastiga typ av fluktuationer som solkraften medbringrar. EDCC är tillräckligt snabbt för att parera för solkraftens fluktuationer, vilket visas i avsnitt 5.4. När EDCC används minskar avskiljningen avsevärt, men eftersom att detta endast sker under korta begränsade tidsperioder så blir infångningsgraden endast marginellt sämre. Ytterligare en intressant effekt som uppkommer med detta designalternativ är att kraftverket kan generera en effekt som motsvarar mer än 100 % av den effekt som ett kraftverk med fullskalig CCS kan generera. Detta medför möjligheten att täcka stora och snabba fluktuationer i elnätet trots att kraftverket är utrustat med en CCS-anläggning, och utan att infångningsgraden minskar nämnvärt. Detta designalternativ skulle även kunna kombineras med en konstant rökgasrening (CFCC-tekniken) för att på så sätt göra även detta designalternativ mer dynamiskt.

Det skall även tilläggas att flera antaganden i processen för att ta fram EDCC-konceptet kan anses vara något konservativa. Till att börja med så startades inte förbränningen för att höja ångproduktionen förrän det nya effektbehovet var tillgodosett, vilket skulle minska den tid som avskiljningen antogs vara avstängd, och därmed den mängd koldioxid som inte fångades in. När det gäller avskiljningen så antogs det att den var helt avstängd under den första minuten och att den sedan successivt ökades till fullständig kapacitet. Fullständig avstängning skulle i verkligheten vara problematiskt då avskiljningsprocessen är mycket tidskrävande att starta upp. Detta scenario är dock osannolikt, då det för de flesta rimliga fluktuationer finns så pass mycket effektkapacitet i ångavtappningen att all denna effekt inte skulle behövas för att höja effektuttaget. Avskiljningen skulle därför inte behöva stängas av helt, utan istället arbeta på en reducerad nivå och på det sättet ytterligare minska utsläppet av koldioxid.

7 Slutsats

Kandidatarbetet har, i enlighet med syftet, undersökt möjligheten för ett kraftverk med CCS att följa fluktuationerna i ett elsystem som uppkommer på grund av en stor andel intermittent el från sol- och vindkraft. En dynamisk modell har tagits fram med hjälp data för stationära simuleringar i EBSILON Professional och Aspen Plus. Resultaten visar att ett kraftverk med fullskalig CCS inte är tillräckligt snabbt för att kunna följa alla de fluktuationer som förekommer i elnätet. Resultatet visar också att verkningsgraden inte är beroende av vilken last som kraftverket arbetar på och att den därför kan ses som konstant. Verkningsgraden skiljer sig dock stort från ett kraftverk utan CCS och denna effektminskning behöver på något sätt kompenseras för, antingen av fler kolkraftverk eller av andra elproducenter.

Med detta som bakgrund presenteras även två nya designalternativ som har för avsikt att ge kraftverk med CCS en snabbare dynamik och bättre förutsättningar att kunna följa fluktuationer i elnätet. Det första designalternativet, CFCC (Constant Flue gas Carbon Capture), utgår från tanken att rena en konstant mängd rökgaser, oavsett vilken last kraftverket arbetar på. Detta medför en konstant ångavtappning och därmed en dynamik som motsvarar ett kraftverk utan CCS när kraftverket producerar mer rökgaser än vad avskiljningen är dimensionerad för. När kraftverket producerar mindre rökgaser följer ångavtappningen avskiljningens ångbehov och kraftverkets dynamik blir samma som med en fullskalig avskiljningsanläggning. Resultatet visar att denna typ av kraftverk lämpar sig bäst för topplastdrift då det ger en god infångningsgrad och en dynamik som på ett bra sätt klarar av att följa fluktuationerna i elnätet.

Designalternativ två, EDCC (Emergency Dumping of Carbon Capture), har tagits fram för att kunna klara av de mest extrema fluktuationerna som uppkommer då mycket solkraftsproduktion är kopplat till elsystemet. Genom att momentant ändra ångavtappningen kan effektgenereringen ökas betydligt snabbare än för ett kraftverk utan CCS vilket möjliggör att kraftverket kan följa betydligt större och snabbare fluktuationer än tidigare. Avskiljningen minskar givetvis under denna period som ångavtappningen är avstängd eller nedsatt, men beräkningar visar att den infångade koldioxiden minskar förhållandevis lite för denna typ av ingrepp. Till sammanhanget skall det tilläggas att det primära är att tillgodose effektbehovet, och att det är mer sekundärt hur mycket koldioxid som avskiljs.

7.1 Framtida arbete

För att fortsätta undersöka hur dynamiken för kraftverk med CCS ser ut så har fyra viktiga områden identifierats som behöver studeras närmare. Dessa är regleringen mellan kraftverk och avskiljning, flaskhalsar på komponentnivå, säkerställande av de nya designalternativen samt hur kraftverkens produktionsbehov påverkas av elnätets egenskaper.

- En viktig del som påverkar hur snabb processen är ligger i regleringen mellan kraftverket och avskiljningsanläggningen. Om effektbehovet kan förutspås och regleringen optimeras utefter detta så borde det finnas stora möjligheter att förbättra dynamiken för systemet.
- Det är även av stor vikt att identifiera flaskhalsar på komponentnivå som kan vara kopplade till systemets trögheter, och därefter undersöka hur dessa trögheter minskas så systemet blir mer följsamt.
- Mer arbete behöver även genomföras på de nya designalternativen som har presenterats i rapporten. Framförallt är det intressant att undersöka exakt hur snabb effektökningen blir i ett kraftverk när ångavtappningen stängs av momentant, något som endast har antagits till 6 sekunder per procentenhet effekt.
- För att verkligen kunna dimensionera kraftverken och dess avskiljningsprocess behöver fluktuationerna vara kända och de får antas vara starkt beroende av hur elnätet är uppbyggt och hur det fungerar. Det är därför av stort intresse att i ett större perspektiv undersöka hur fluktuationerna i de förnyelsebara energikällorna verkligen påverkar kraftverken, och hur elnätets uppbyggnad påverkar detta.

Litteraturförteckning

- [1] Naturvårdsverket. *FN:s klimatpanel 2007: Den naturvetenskapliga grunden*. Stockholm; 2007. Rapport 5677
- [2] Widén J, Ågerg M, Henning D. Impacts of large-scale solar and wind power production on the balance of the Swedish power system. *World Renewable Energy Congress*. 2013;37:1585-1596.
- [3] World Energy Resources. World Energy Council. *World Energy Resources; 2013 Survey: Summary*. London; 2013.
- [4] IEA. *CO2 Capture and storage: A key carbon abatement option* . 2008, s. 25.
- [5] IEA, 2010b: *World Energy Outlook 2010* . s. 77.
- [6] IEA, *Coal* . [Internet], 27 feb 2014, Tillgänglig från <https://www.iea.org/topics/coal/>
- [7] Chikukwa A, Enaasen N, Kvamsdal HM, Hillestad M. Dynamic Modeling of Post-combustion CO2 Capture Using Amines – A Review. *Energy Procedia*. 2012;23:82-91.
- [8] IPCC, 2005: *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz B, Davidson O, de Coninck HC, Loos M, Meyer LA (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 17.
- [9] IEA. *Renewable* . [Internet], 27 feb 2014, Tillgänglig från <https://www.iea.org/topics/renewables/>
- [10] Denmark. *Wind-Energy*. [Internet], 22 apr 2014, Tillgänglig från <http://denmark.dk/en/green-living/wind-energy/>
- [11] Reuters. *German solar power output up 60 pct in 2011* . [Internet], 22 apr 2014, Tillgänglig från <http://af.reuters.com/article/commoditiesNews/idAFL6E7NT1WK20111229?sp=true>
- [12] World Coal Association. *Improving Efficiency*. [Internet], 6 maj 2014, Tillgänglig från <http://www.worldcoal.org/coal-the-environment/coal-use-the-environment/improving-efficiencies/>
- [13] Emilsdottir S, Òsk Gardarsdóttir S. *Transient behavior of post-combustion CO2 capture with MEA in coal fired power plants*. Göteborg; 2012.
- [14] Lawal A, Wang M, Stephenson P, Obi O. Demonstrating full-scale post-combustion CO2 capture for coal fired power plants through dynamic modelling and simulation. *Fuel*. 2010;101(11):115-128.

- [15] Seader JD, Henley E, Roper K. *Separation Process Principles*. Asien; 2011. s. 225, 230.
- [16] Johnson JK, Zhang Y, Zhou Y, Xie H-B. Reaction Mechanism of Monoethanolamine with CO₂ in Aqueous Solution from Molecular Modeling. *The Journal of Physical Chemistry*. 2010;114(43):11844-11852.
- [17] Biliyok C, Lawal A, Seibert F, Wang M. Dynamic modelling, validation and analysis of post-combustion chemical absorption CO₂ capture plant. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2012;9:428-445.
- [18] Chen CC, Zhang Y. Modeling CO₂ absorption and desorption by aqueous monoethanolamine solution with Aspen rate-based model. *Energy Procedia*. 2013;37:1584-1596.
- [19] Welty JR, Wicks CE, Wilson RE, Rorrer GL. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5 th ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc; 2008. s. 173-175, 554-555.
- [20] Roberts GW. *Chemical Reactions and Chemical Reactors*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc; 2009. s.17,142.
- [21] Ramaswamy S, Huang HJ, Ramarao BV. *Separation and Purification Technologies in Biorefineries*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc; 2013. s. 450.
- [22] Serpa J, Morbee J, Tzimas E. *Technical and Economic Characteristics of a CO₂ Transmission Pipeline Infrastructure*. Netherlands. European Commission, Joint Research Centre, Insititute for Energy; 2011. Report No.: JRC62502.
- [23] Hosa A, Esentia M, Stewart J, Haszeldine S. Injection of CO₂ into saline formations: Benchmarking worldwide projects. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011;89(9):1855-1864.
- [24] Wan Y. *Analysis of Wind Power Ramping Behavior in ERCOT*. Springfield; 2011. USA National Renewable Energy Laboratory.
- [25] Statens energimyndighet. *Vindkraftsstatistik 2012*. Sverige; 2013.
- [26] Hoff TE, Perez R. Quantifying PV Power Output Variability. *Solar Energy*. 2010;84:1782-1793.
- [27] Vattenfall. *Nordjyllandsvaerket*. [Internet], 5 maj 2014, Tillgänglig från <http://produktion.vattenfall.se/powerplant/nordjyllandsvaerket-0>
- [28] STEAG Energy Services GmbH. *EBSILON Professional*. [Internet], 25 mar 2014.
- [29] AspenTech. *Aspen Plus*. [Internet], 19 maj 2014. Tillgänglig från <http://www.aspentech.com/products/aspen-plus.aspx>
- [30] NIST. *Thermophysical Properties of Fluid Systems*. [Internet], 6 maj 2014, Tillgänglig från <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

- [31] Carlson EC. Don't Gamble With Physical Properties for Simulations. *Chemical Engineering Processes*. 1996:10:35-46.
- [32] Moioli S, Pellegrini LA. Regeneration Section of CO₂ Capture Plant by MEA Scrubbing with a Rate-Based Model. *Chemical Engineering Transactions*. 2013:32:1849-1854.
- [33] Bolouri O, Montazer-Rahmati MM, Falahat R. Rate-based modelling of reactive absorption of acid gases in an aqueous methyldiethanolamine (MDEA) solution. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2011:89(1):132-138.
- [34] Artanto Y, Jansen J, Pearson P, Do T, Cottrell A, Meuleman et al. Performance of MEA and amine-blends in the CSIRO PCC pilot plant in Loy Yang Power in Australia. *Fuel*. 2012:101(11):254-275.
- [35] Kolev N. *Packed Bed Columns - For Absorption, Desorption, Rectification and Direct Heat Transfer*. Amsterdam: Elsevier; 2006: s. 161-163, 386.
- [36] Theodore L, Ricci F. *Mass Transfer Operations for the Practicing Engineer*. Wiley, Hoboken, NJ, USA. 2011. s. 39, 193.
- [37] Kunesh J. Practical Tips on Tower Packing. *Chemical Engineering*. 1987:94(18):103.

A Ekvationer och beräkningar

I bilaga A presenteras ekvationer och beräkningar som används i avsnitt 4.3.

1.1 Variablers beroende av massflödet kol

$$Q_{\text{oförbränt}} = 3.3 \cdot 10^5 \cdot m_{\text{kol}} - 84 \quad (13)$$

$$Q_{\text{kylvattenförlust}} = 4.8 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 2.3 \cdot 10^6 \quad (14)$$

$$Q_{\text{pannförlust}} = 1.2 \cdot 10^3 \cdot m_{\text{kol}}^2 + 1.6 \cdot 10^5 \cdot m_{\text{kol}} - 4.7 \cdot 10^5 \quad (15)$$

$$Q_{\text{generatorförlust}} = -1.2 \cdot 10^3 \cdot m_{\text{kol}}^3 + 9.4 \cdot 10^4 \cdot m_{\text{kol}}^2 - 2.1 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 2.4 \cdot 10^7 \quad (16)$$

$$Q_{\text{ånga}} = 1 \cdot 10^7 \cdot m_{\text{kol}} + 1.1 \cdot 10^5 \quad (17)$$

$$P_{\text{transport}} = 1 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 7 \cdot 10^6 \quad (18)$$

$$m_{\text{rökgas}} = 11 \cdot m_{\text{kol}} + 9.3 \cdot 10^8 \quad (19)$$

$$m_{\text{aska}} = 0.0045 \cdot m_{\text{kol}} + 0.00016 \quad (20)$$

$$m_{\text{luft}} = 9.8730 \cdot m_{\text{kol}} \quad (21)$$

$$h_{\text{rökgas}} = -1.1 \cdot m_{\text{kol}}^3 + 1.2 \cdot 10^2 \cdot m_{\text{kol}}^2 - 2.7 \cdot 10^3 \cdot m_{\text{kol}} + 9.8 \cdot 10^4 \quad (22)$$

1.2 Stationär värmebalans

$$\begin{aligned} P_{\text{elnät}} = & 9.8730 \cdot m_{\text{kol}} \cdot h_{\text{luft}} + m_{\text{kol}} \cdot (h_{\text{kol}} + H_{\text{förbränningsvärde}}) - (1 \cdot 10^7 \cdot m_{\text{kol}} + \\ & + 1.1 \cdot 10^5 + (11 \cdot m_{\text{kol}} + 9.3 \cdot 10^8) \cdot (-1.1 \cdot m_{\text{kol}}^3 + 1.2 \cdot 10^2 \cdot m_{\text{kol}}^2 - 2.7 \cdot 10^3 \cdot \\ & \cdot m_{\text{kol}} + 9.8 \cdot 10^4) + 1.2 \cdot 10^3 \cdot m_{\text{kol}}^2 + 1.6 \cdot 10^5 \cdot m_{\text{kol}} - 4.7 \cdot 10^5 + 3.3 \cdot 10^5 \cdot m_{\text{kol}} - \\ & - 84 + (0.0045 \cdot m_{\text{kol}} + 0.00016) \cdot h_{\text{aska}} - 1.2 \cdot 10^3 \cdot m_{\text{kol}}^3 + 9.4 \cdot 10^4 \cdot m_{\text{kol}}^2 - 2.1 \\ & \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 2.4 \cdot 10^7 + 4.8 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 2.3 \cdot 10^6 + 1 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{kol}} + 7 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (23)$$

1.3 Lösning av ekvation 11

$$\int_{m_{\text{kol,start}}}^{m_{\text{kol,slut}}} dm = K \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{slut}}} dt \quad (24)$$

$$m_{\text{kol,slut}} - m_{\text{kol,start}} = K(t_{\text{slut}} - t_{\text{start}}) + C \quad (25)$$

Med $t_{\text{start}} = 0$ s och $K = \frac{dm_{\text{kol}}}{dt}$ erhålls ekvationen nedan (ekvation 11 tidigare i rapporten).

$$m_{\text{kol,slut}} = m_{\text{kol,start}} + \frac{dm_{\text{kol}}}{dt} \cdot t + C$$