

---

---

Lund University – Faculty of Engineering  
Examensarbete - Master Thesis

*Rening av NO<sub>x</sub> i rökgaser från biobränn-  
sle-  
panna på AAK*

---

---

By

MEDINA SELMANI



Department of Chemical Engineering  
LUND UNIVERSITY  
March 2019



LUND UNIVERSITY



**LTH**  
LUNDS TEKNISKA  
HÖGSKOLA

**Supervisor:** Senior Lecturer, Helena Svensson, LTH

**Supervisor:** Project Manager Special Projects, Lars Greiner, AAK Sweden AB

**Examiner:** Professor, Hans Karlsson, LTH

---

<b>Postal address</b>	<b>Visiting address</b>	<b>Telephone</b>	<b>Fax</b>	<b>Webbsite</b>
P.O. Box 124 SE-221 00 Lund, Sweden	Naturvetarvägen 14	+46 46 222 82 85 +46 46 222 00 00	+46 46 222 45 26	<a href="http://www.chemeng.lth.se">www.chemeng.lth.se</a>

# Förord

Detta examensarbete är min sista uppgift som utförs på Civilingenjörsutbildningen i Kemiteknik med inriktning processdesign. Detta examensarbete är utfört på AAK i Karlshamn.

Jag vill först och främst tacka min handledare på AAK, Lars Greiner, som har varit en exceptionell handledare. Jag vill tacka dig för allt ditt stöd, all din tid, kunskap och energi du har bidragit med under loppet av mitt examensarbete.

Utöver det vill jag även tacka Andreas Thoresson som har hjälpt mig med mätningar och bidragit med kunskaper om Ångcentralen. Ett stort tack till alla operatörer som har hjälpt till att genomföra mina försök och ett speciellt tack till Johan Nilsson som gav mig insiktsfulla råd och hjälpte mig med temperaturmätningarna.

Helena Svensson, min handledare på LTH, förtjänar också ett stort tack för att hon alltid svarar på mina frågor och ger konstruktiv feedback.

Slutligen vill jag tacka min familj och mina vänner som har funnits som ett stöd och en hjälpande hand längs vägen.

## Abstract

The steam power station at AAK has 4 different boilers and the main boiler is a biofuel boiler. The boiler uses household pellets of type A1. During combustion, nitrogen oxides,  $\text{NO}_x$ , are formed and they have many negative effects on the environment and has direct and indirect effects on human health. Today AAKs  $\text{NO}_x$  emission are lower than the restricted regulation value for nitrogen oxide emissions according to the requirements of Regulation 2013:252, which applies to large combustion plants. AAK wants to contribute to reduced  $\text{NO}_x$ -emission and this thesis investigates the possibility of installing an SNCR system on the biofuel boiler. SNCR is a selective non-catalytic reduction that involves injection of a reducing agent in the furnace. The reducing agent, which is injected into the flue gases directly above the combustion zone together with air, could be either ammonia or urea. It reduces nitrogen oxides to nitrogen and water. The temperature profile of the biofuel boiler is unknown and needs to be determined so the right location of the injection zones for the reducing agent can be located.

To determine the temperature profile a thermocouple and an IR thermometer was used. By using these two measuring instruments, the temperature inside the boiler could be measured at three different places of the furnace. The measurements were made at different loads: 14.7 MW, 24 MW, 26.4 MW and 33.2 MW in order to investigate how the temperature changes at different loads. The temperature profile shows that it is possible to use both ammonia or urea as reducing agent. Ammonia solution (24,9 %) was determined as the reducing agent for further calculations of the profitability. This is mainly because ammonia is more effective than urea. By using values for  $\text{NO}_x$  emissions for household pellets, a linear regression has been made on the biofuel boiler. This linear regression shows how higher levels of nitrogen in the fuel results in higher  $\text{NO}_x$  emissions. By using this, it was possible to predict  $\text{NO}_x$  emission values for combustion with industrial pellets. Since the fuel nitrogen is unknown for industrial pellets, three different cases have been applied, with 0.2, 0.25 and 0.3 w-% fuel nitrogen. Three different reduction cases were examined, 40, 50 and 60% reduction.

The cost of an installation and the profitability were examined and estimated. CAPEX for the SNCR system was estimated to approximately 4,4 million SEK. Three different cases were investigated, 40, 50 and respectively 60% reduction.

Industrial pellets that are 10% cheaper than today's household pellets with 0.2 w-% fuel nitrogen and 60% reduction, result in a payback time of 9 months and a profit of 6,2 million SEK/year.  $\text{NO}_x$  emissions today are higher than the predicted emissions with an installed SNCR system and combustion with industrial pellets with 0.2 w-% fuel nitrogen. This means that the installation of an SNCR system is favorable for the environment as well as for AAK, but only profitable when using industrial pellets.

Combustion with household pellets (type A1) with 0.06 w-% fuel nitrogen and 60%  $\text{NO}_x$  reduction, results in a not profitable investment due to a long payback time of 7 years and a small profit of only 700,000 SEK/year. Using industrial pellets for combustion instead of household pellets makes the investment profitable.

## Sammanfattning

Ångcentralen på AAK har 4 olika pannor och huvudpannan är en biobränslepannan. Denna panna benämns även som Panna 4 och eldas idag med hushållspelletts av klass A1. Vid förbränning så bildas kväveoxider,  $\text{NO}_x$ , som har en negativ effekt på miljön och människor. AAK som idag ligger under villkorsvärdet för utsläpp av kväveoxider enligt krav från Förordning 2013:252 som gäller för stora förbränningsanläggningar, vill bidra till minskade  $\text{NO}_x$  utsläpp. I detta examensarbete undersöks möjligheten att installera ett SNCR system på panna 4. SNCR är en selektiv icke-katalytisk reduktion som innebär tillförsel av ett reduktionsmedel i eldstaden. Reduktionsmedlet sprutas in i rökgaserna, direkt ovanför förbränningen i samband med tillförsel av luft. Reduktionsmedlet, som kan vara antingen ammoniak eller urea, reducerar kväveoxiderna till kväve och vatten. För att injicera reduktionsmedlet så behövdes ett lämpligt temperaturområde lokaliseras då reduktionen äger rum inom ett visst specifikt temperaturintervall. Temperaturprofilen på panna 4 är idag okänd och behövde bestämmas.

Undersökningen av temperaturprofilen gjordes med hjälp av ett termoelement och en IR-termometer. Med hjälp av dessa två mätinstrument så mättes temperaturen inne i pannan via tre olika insynshål. Mätningarna gjordes vid olika laster: 14,7 MW, 24 MW, 26,4 MW samt 33,2 MW för att undersöka hur temperaturen ändras vid olika laster på pannan. Temperaturmätningarna låg relativt jämt vid de olika lasterna och indikerar även att möjligheten för en installation av ett SNCR system finns. Temperaturprofilen visar också att det är möjligt att använda ammoniak eller urea som reduktionsmedel. För att gå vidare i undersökningen bestämdes det att ammoniaklösning (24,9%) skulle användas för den ekonomiska analysen. Detta för att ammoniak är mer effektivt än urea och har mindre påverkan gällande beläggningar på utrustningen. Med hjälp av mätvärden för hushållspelletts har en linjär anpassning gjorts på panna 4 för att visa hur högre halter kväve i bränslet, leder till högre  $\text{NO}_x$ -utsläpp. Med hjälp av denna linjära anpassning gick det att prediktera värden för utsläpp av  $\text{NO}_x$  med industripelletts. Eftersom bränslekvävet är okänt för industripelletts har tre olika fall tillämpats, 0,2, 0,25 samt 0,3 vikts-% bränslekväve. Tre olika reduktionsfall undersöktes, 40, 50 samt 60 % reduktion.

Kostnaden för en installation samt lönsamheten undersöktes och uppskattades. Grundinvesteringen för SNCR systemet uppskattades till ungefär 4,4 Mkr. Tre olika fall tillämpades, 40, 50 respektive 60 % reduktion.

Förbränning av industripelletts som är 10 % billigare än dagens hushållspelletts, med 0,2 vikts-% bränslekväve och 60 % reduktion, resulterar i en payback-tid på 9 månader och en vinst på 6,2 Mkr/år. Vid förbränning av hushållspelletts, med 0,06 vikts-% bränslekväve och 60 %  $\text{NO}_x$ -reduktion, visar det sig att investeringen inte är lönsam då payback-tiden är 7 år och vinsten är endast 700 tkr/år. För att investeringen ska vara lönsam har tillämpning av industripelletts för förbränning istället undersökts. Utsläppen idag är högre än vad utsläppen predikteras bli med ett installerat SNCR system och förbränning med industripelletts med 0,2 vikts-% bränslekväve. Detta innebär att installationen av ett SNCR system är gynnsamt för miljön, men däremot endast lönsamt för AAK om hushållspelletts byts ut till industripelletts.

# Innehållsförteckning

<i>Innehållsförteckning</i> .....	6
<b>1. BAKGRUND</b> .....	<b>9</b>
1.1. INTRODUKTION.....	9
1.2. MÅL/SYFTE .....	10
1.3. AVGRÄNSNINGAR.....	10
1.4. ANLÄGGNINGEN – PANNA 4 .....	10
1.4.1. Skivkvarn.....	11
1.4.2. Brännare .....	12
1.4.3. Ångpannan.....	15
<b>2. TEORI</b> .....	<b>18</b>
2.1. FÖRBRÄNNING OCH ÅNGPANNOR.....	18
2.1.1. <i>Generell förbränning</i> .....	18
2.1.2. <i>Ångpannans funktion</i> .....	19
2.2. BRÄNSLE .....	20
2.2.1. <i>Biomassabränsle</i> .....	21
2.2.2. <i>Träpellets</i> .....	21
2.3. NO <sub>x</sub> -BILDNING VID FÖRBRÄNNING.....	22
2.3.1. <i>Termisk NO<sub>x</sub></i> .....	22
2.3.2. <i>Prompt NO<sub>x</sub></i> .....	23
2.3.3. <i>Bränsle NO<sub>x</sub></i> .....	24
2.3.4. <i>Samband mellan termisk NO<sub>x</sub>, prompt NO<sub>x</sub> och bränsle NO<sub>x</sub></i> .....	25
2.4. MILJÖ, LAGAR OCH UTSLÄPPSKRAV .....	25
2.4.1. <i>Miljöpåverkan av kväveoxider</i> .....	25
2.4.2. <i>Miljömål</i> .....	26
2.4.3. <i>Krav på NO<sub>x</sub>-utsläpp</i> .....	26
2.4.4. <i>NO<sub>x</sub> kostnad</i> .....	27
2.5. NO <sub>x</sub> REDUCERANDE ÅTGÄRDER .....	28
2.5.1. <i>Primära åtgärder</i> .....	28
2.5.2. <i>Air Staging</i> .....	28
2.5.3. <i>Fuel staging</i> .....	29
2.5.4. <i>Rökgasåterföring</i> .....	30
2.5.5. <i>Låga NO<sub>x</sub>-brännare</i> .....	30
2.6. SEKUNDÄRA ÅTGÄRDER .....	30
2.6.1. <i>Selektiv katalytisk reduktion</i> .....	30
2.6.2. <i>Selektiv icke-katalytisk reduktion</i> .....	31
2.6.3. <i>Val av reduktionskemikalie</i> .....	32
2.6.4. <i>Ammoniak</i> .....	32
2.6.5. <i>Urea</i> .....	33
2.6.6. <i>Injektionssystem</i> .....	34
2.7. DESIGNPARAMETRAR - SNCR.....	35
2.7.1. <i>Reaktionstemperatur</i> .....	35
2.7.2. <i>Uppehållstid</i> .....	35
2.7.3. <i>Kemikaliemängd</i> .....	36
2.7.4. <i>AGAM mätsystem</i> .....	36
<b>3. METOD</b> .....	<b>37</b>
3.1. METOD .....	37
3.2. MÄTINSTRUMENT .....	38
3.2.1. <i>Termoelement</i> .....	38
3.2.2. <i>Infraröd termometer</i> .....	39
3.2.3. <i>Jämförelse av IR-termometer och termoelement</i> .....	39
3.3. LÖNSAMHET .....	39
3.3.1. <i>Payback-tid</i> .....	40
3.3.2. <i>Nuvärdesmetoden</i> .....	40
3.3.3. <i>Annuitetsmetoden</i> .....	40

<b>4.</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION</b>	<b>40</b>
4.1.	MÄTDATA FRÅN MILJÖDATOR	40
4.2.	PERIODISKA KONTROLLER OCH JÄMFÖRELSER	42
4.3.	PELLETS SPECIFIKATION	43
4.4.	TEMPERATURMÄTNINGAR	44
4.5.	TEORETISKT RÖKGASFLÖDE OCH UPPEHÅLLSTID	46
4.6.	MÄTNINGARNAS OSÄKERHET	46
4.7.	UPPSKATTNING AV NO <sub>x</sub> -UTSLÄPP MED INDUSTRIPELLETS	47
4.7.1.	<i>Osäkerhet vid linjära anpassningar</i>	48
4.8.	PROCESSUTFORMNING	49
4.8.1.	<i>Nödvändig utrustning</i>	49
4.8.2.	<i>Förslag till mätutrustning och reglersystem</i>	50
4.8.3.	<i>Lagring, utlastning och reduktionskemikalie</i>	51
4.8.4.	<i>Styrsystem</i>	52
4.8.5.	<i>Injektionssystem och injektorer</i>	52
4.8.6.	<i>Rördimensionering</i>	53
4.9.	INDUSTRIPELLETS II VS. HUSHÅLLSPELLETS A1	54
4.9.1.	<i>Industripellets</i>	54
4.10.	EKONOMISK ANALYS	54
4.11.	INVESTERINGSKOSTNAD	55
4.12.	DRIFTSKOSTNADER	55
4.13.	EKONOMISK ANALYS	56
4.14.	KÄNSLIGHETSANALYS	59
<b>5.</b>	<b>SLUTSATS</b>	<b>61</b>
5.1.	FRAMTIDA ARBETE	62
	<b>REFERENSER</b>	<b>64</b>
	<b>APPENDIX A – OMVANDLING FRÅN PPM TILL MG/NM<sup>3</sup></b>	<b>67</b>
	<b>APPENDIX B – SYREKONCENTRATION NORMALISERING</b>	<b>68</b>
	<b>APPENDIX C – TEORETISK BESTÄMMELSE AV RÖKGASFLÖDET SAMT UPPEHÅLLSTIDEN</b>	<b>69</b>
	<b>APPENDIX D – RÖRDIMENSIONERING</b>	<b>74</b>
	<b>APPENDIX E – LINJÄRA ANPASSNINGAR</b>	<b>75</b>
	<b>APPENDIX F – MÄNGD REDUKTIONSKEMIKALIE</b>	<b>76</b>
	<b>APPENDIX G – EKONOMISK ANALYS</b>	<b>79</b>
	<b>APPENDIX H – PROCESSHEMA</b>	<b>86</b>
	<b>APPENDIX I – TABELL FÖR NUVÄRDE OCH ANNUITET</b>	<b>87</b>





# 1. Bakgrund

## 1.1. *Introduktion*

AAK är ett världsledande företag som tillverkar vegetabiliska oljor och fetter. Företaget finns på flera ställen runt om i världen och har över 20 olika produktionsanläggningar och försäljningskontor i mer än 25 länder.

Försörjning med ånga, tryckluft, kylvatten, stadsvatten, hetvatten, kvävgas och fjärrvärme till produktionsanläggningen i Karlshamn sker via Ångcentralen. Den installerade effekten på ångcentralen är 80 MW [1]. Ångcentralen som är baserad i Karlshamn har flera sorters pannor och huvudpannan, panna 4, är en biobränslepanna. Denna biobränslepanna drivs med pellets av klass A1, vilket motsvarar hushållspellet. I framtiden finns även en önskan att använda industripellets av klass II. Biobränslepannan producerar 35 bars ånga som sedan används till olika processer i produktionsanläggningen.

AAK arbetar aktivt med miljö-och energifrågor och därför kommer fokus för detta examensarbete ligga på rening av NO<sub>x</sub> i rökgaserna från panna 4.

Kväveoxiderna som bildas vid förbränningsprocesser är giftiga och har negativ effekt på miljön och människor. Kväveoxider orsakar bland annat försurning och bidrar till bildande av marknära ozon. Det är dessutom giftigt och kan irritera luftvägar och slemhinnor. År 1990 infördes en lag gällande utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion. Denna lag gäller för anläggningar med pannor, gasturbiner eller stationära förbränningsmotorer som under ett år redovisat en energiproduktion på minst 25 GWh. Denna energiproduktion gäller både värme-och elproduktion. Detta innebär att en miljöavgift ska betalas till staten enligt denna lag gällande utsläpp av kväveoxider (LAG1990:613) [1].

Då kväveoxiderna har en stor negativ inverkan på miljön och människor så finns en förordning gällande stora förbränningsanläggningar (SFS2013:252) [2]. Förordningen gällande förbränningsanläggningar har baserat villkorsvärdet beroende på den totala anläggningseffekten. Villkorsvärdet avser utsläppen från skorstenen i Ångcentralen. Ångcentralen som använder biomassa som bränsle får inte släppa ut mer än 300 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> då inte anläggningens installerade effekt är högre än 100 MW [2].

Detta examensarbete kommer att undersöka möjligheten att minska NO<sub>x</sub> utsläppen med både primära samt sekundära åtgärder. En sekundär åtgärd kommer att utredas och projekteras genom att undersöka om huruvida NO<sub>x</sub>-utsläppen kan minska.

## **1.2. Mål/Syfte**

Målet/syftet med detta examensarbete är att hitta en passande och hållbar metod för att rena NO<sub>x</sub> från rökgaser från eldning av biomassa. För att undersöka vilken metod som är möjlig att installera på pannan kommer experiment att utföras på den befintliga pannan. Utsläppen från Ångcentralen ligger idag under begränsningsvärdet 300 mg/Nm<sup>3</sup>, men AAK vill bidra till mindre utsläpp och vill därför undersöka möjligheter att minska kväveoxidutsläppen. Då panna 4 är en gammal panna och inga tidigare mätningar på pannan med avseende på temperaturen har gjorts så behövs detta göra för att undersöka temperaturprofilen på pannan. AAK har även en önskan om att använda industripellets istället för hushållspelletts. Målet är även att undersöka om investeringen och installationen av ett kväveoxid-reducerande system är gynnsamt och lönsamt genom att genomföra en teknoekonomisk utvärdering samt om möjligheten finns att byta ut hushållspelletts mot industripelletts.

## **1.3. Avgränsningar**

För att avgränsa examensarbetet så kommer primära åtgärder att nämnas, men inte att undersökas ytterligare. Fokus på examensarbetet kommer att ligga på att gå på djupet och teoretiskt undersöka en sekundär åtgärd och vidare utföra en teknoekonomisk analys samt en processöverblick på processen anpassad på panna 4. Den experimentella delen av mitt arbete kommer att vara att försöka hitta en temperaturprofil i panna 4 med hjälp av ett mätinstrument. Gällande den teknoekonomiska analysen så har investeringskostnaden uppskattats med erfarenhetsvärden. Tidsramen för projektet är 20 heltidsveckor, då detta motsvarar 30 högskolepoäng.

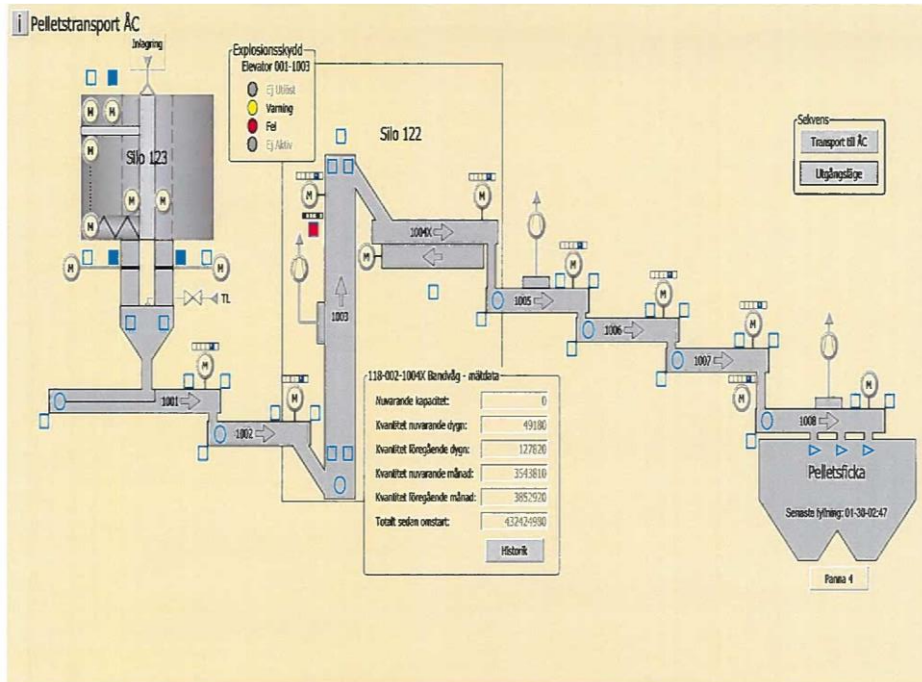
## **1.4. Anläggningen – Panna 4**

Ångcentralen på AAK står för all försörjning till produktionsanläggningen, vilket motsvarar processånga, tryckluft, kylvatten, stadsvatten, hetvatten, kvävgas samt fjärrvärme. Panncentralen består av 4 pannor, där panna 4 eldas med pellets medan resterande pannor kan eldas med bioolja, gasol, eldningsolja eller el. Den totala installerade effekten på ångcentralen är cirka 80 MW. Panna 4 producerar 35 bars ånga med en temperatur kring 380-400°C och har en total effekt på cirka 36 MW vilket motsvarar ca 12 MW per brännare.

[3]

Bränslet som eldas är pellets med en storlek på 6±1 mm i diameter och kvalitén på pelletsen kontrolleras vid varje last och är klassificerad som klass A1. Detta motsvarar svensk standard SS-EN ISO 17225-2:2014. Tidigare har pellets med en diameter på 8±1 mm i diameter använts.

Pelletstransporten i Ångcentralen kan ses i figur 1. När en last med pellets kommer tas ett prov som sedan skickas för analys. Pelletsen registreras och vägs när det kommer in till fabriken. Pelletsen lagras sedan i en pelletssilos där pelletsen tas ut i den övre delen av förvaringssilon och faller sedan ner via ett centralrör [4]. Pelletsen transporteras sedan till två dragfickor som undertill är kopplade till tre skivkvarnar. Från dragfickorna transporteras pelletsen sedan vidare till tre skivkvarnar.

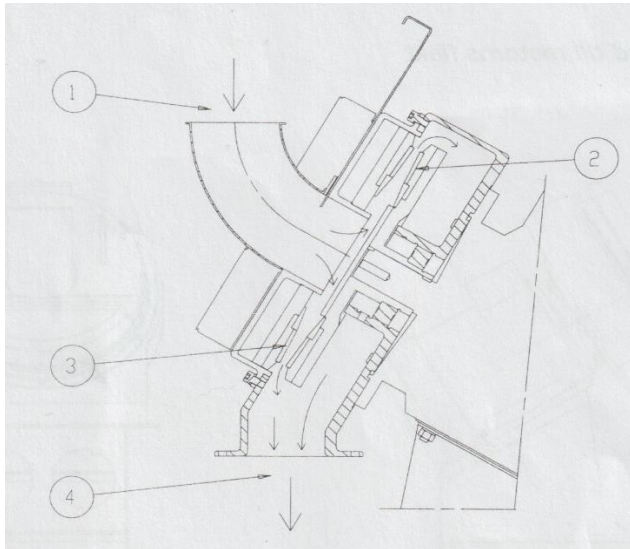


Figur 1. Bilden visar ett schematiskt hur pelletsen transporteras från inlagringen till pelletsfickan [3] [4].

#### 1.4.1. Skivkvärl

Pelletsen, av klass A1, förvaras i en silo och tillförs till en skivkvärl via en doserskruv. Det finns en linjär relation mellan varvtalet på doserskruv och bränsleflödet. I skivkvärnen så sönderdelas pelletsen ner till den storleken pelletsen hade från början. Skivkvärnen kännetecknas av två profilerade skivor som är vända mot varandra. På motoraxeln är den ena skivan monterad och är roterbar [5]. Den andra sitter fastmonterad på kvärnens frontplåt. Detta gör det möjligt att justera den ena skivans avstånd mot den roterande skivan.

Då pelletsen matas in i skivkvärnen så distribueras det in i centrum av den stillastående skivan och träffar den roterande skivan. Den roterande skivan skickar sedan ut materialet i yttre zonen av skivorna, där det sedan passerar spalten mellan de två skivornas profilerade sidor [5]. Förmalningsgraden kan bestämmas genom att reglera spaltöppningen. Genom att reglera spaltöppningen är det möjligt att variera förmalningsgraden till önskad storlek. Figur 2 nedan visar arbetsprincipen för kvärnen. Position 1 visar materialtillförseln, position 2 visar den roterande förmalningsplattan, position 3 visar den fasta förmalningsplattan och position 4 visar utloppet.



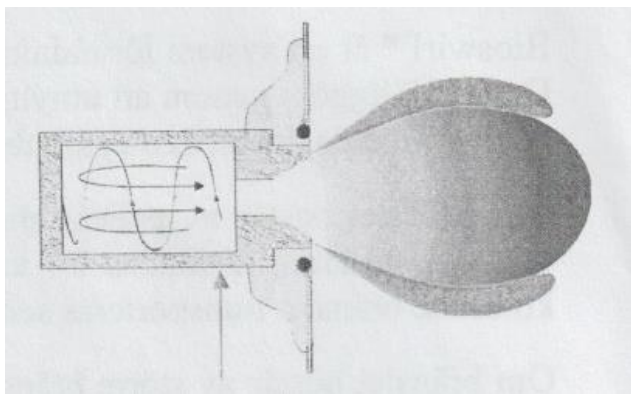
Figur 2. Arbetsprincip för skivkvarn [3] [4].

Här finns även en cellmatare tillgänglig och fungerar som brandskydd, tryckutjämnare samt mot bränslelagring. Den söndermalda pelletsen tillförs genom ett pneumatiskt transportsystem via en bränslesändare. En pneumatisk transport är en effektiv metod för att transportera torrt material som ska färdas längre sträckor inom en produktionsanläggning.

Det finns en säkerhetsfunktion vid för låg hastighet, då transporthastigheten är mindre än tillbakabrandshastigheten, även benämnt flamfrontshastighet, samt vid hög temperatur (över 110°C). Då stängs inmatningen till brännarna av med hjälp av en ventil och samtidigt avbryts dosering av bränslet.

#### 1.4.2. Brännare

Brännarna som finns installerade på panna 4 är tre stycken BioSwirl™ cyklonbrännare. Cyklonen består utav en liggande cylinder och bakgaveln är utbuktad. Metoden innebär att bränslet, fast eller flytande, förgasas inuti brännarens cyklonkammare och inträder i eldstaden i form av brännbar gas. Denna brännbara gas passerar sedan ut i eldstaden genom en specialutformad brännarhals där sekundärluften tillsätts. En illustration av brännarprincipen ses i figur 3.



Figur 3. Brännarprincipen för brännarna i panna 4 [3] [4].

Genom att bränslet roterar inne i brännaren så kan bränsle med olika storlek användas. Däremot påverkar centrifugalaccelerationen uppehållstiden då bränslen med större partikelstorlek befinner sig längre ut från centrum i cyklonen. Detta innebär att ett bränsle med större partikelstorlek kommer att ha en längre uppehållstid under förbränningen och bränsle med liten partikelstorlek väger mindre och får därmed en kortare uppehållstid [5]. Centrifugalkraften ser till att hålla bränslepartiklarna kvar i brännaren.

In till cyklonen tillförs primärluft, sekundärluft, transportluft, bränsle och rökgaser tangentiellt. Den primära luften är luft som tillsätts i cyklonen med bränslet och kontrollerar förbränningshastigheten och sekundärluften är den luft som tillsätts i pannan för att främja förbränningen. Transportluften och bränslet tillförs uppifrån och återförda rökgaser tillförs strax under primärluften i längsgående spalter. I figur 4 kan man tydligt se hur brännaren ser ut inifrån pannan och även här ser man utkanten av brännaren där sekundärluften tillsätts. Här syns den specialutformade brännarhalsen tydligt. I figur 5 nedan kan man även se de längsgående spalterna.

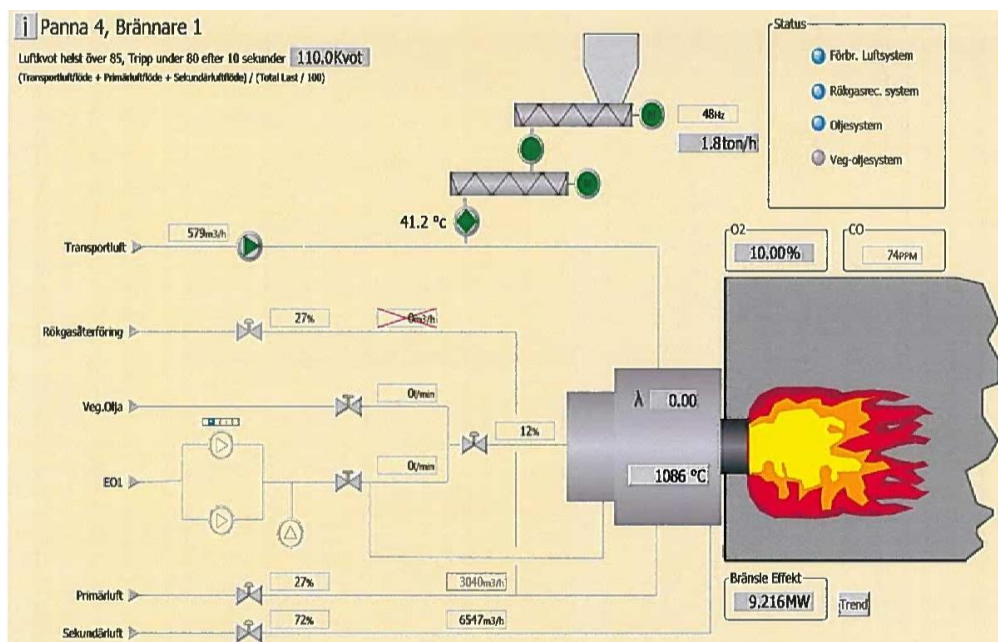


Figur 4. Brännarens utseende inifrån pannan.



Figur 5. Brännarens utseende med en tydlig bild av de längsgående spalterna.

Förbränningen sker understökiometrisk, d.v.s. med luftunderskott, genom riktig inställning av primärluften i förhållande till pelletstillförseln för att kunna hålla rätt temperatur i cyklonen. För att starta brännaren tar man hjälp av en liten oljebrännare med en effekt på 100 kW. Då temperaturen i brännaren har stigit till en tillräckligt hög temperatur, vilket brukar vara när temperaturen är över 800 °C börjar doseringen av pellets. I figur 6 så presenteras en processbild på en brännare i panna 4.



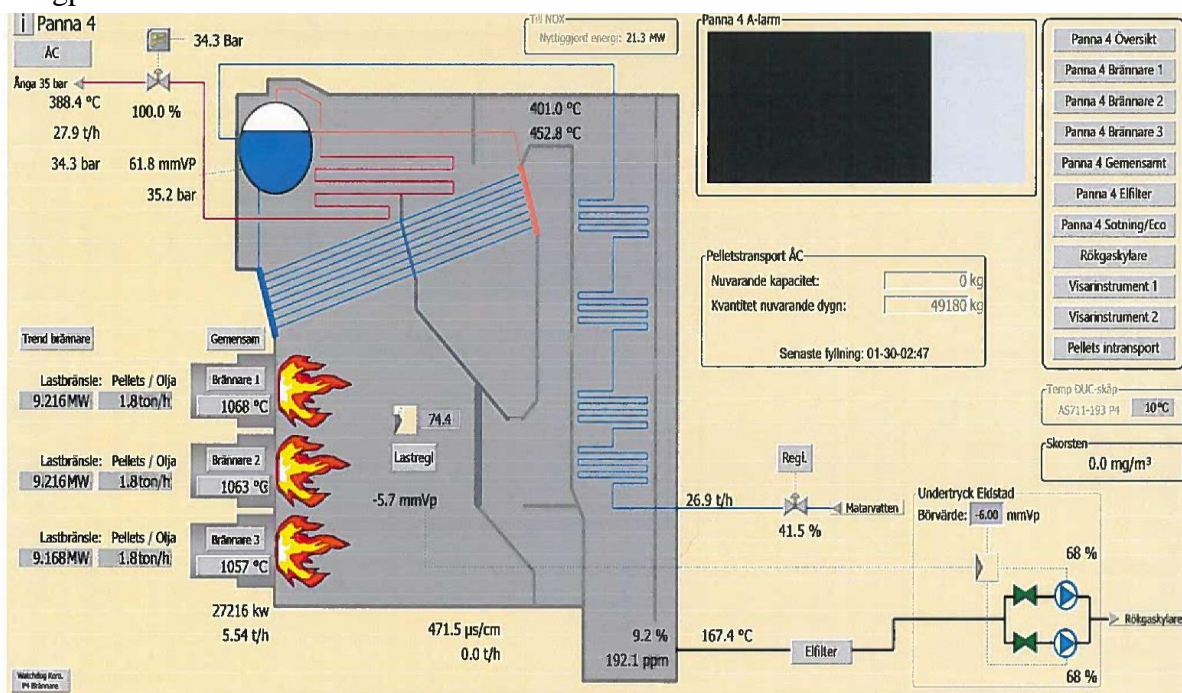
Figur 6. Processbild på brännare 1 i panna 4 [3] [4].

Smälttemperaturen för askan i pelletsen är cirka 1460 °C och därför bör temperaturen i brännaren ligga under denna temperatur [6]. Smält aska är svårt att få bort ur panna och försämrar även verkningsgraden. Temperaturen i cyklonen mäts med tre termoelement varav ett av

termoelementen styr rökgasåterföringen. Temperaturen kontrolleras genom att man återcirkulerar rökgaser tillsammans med den primära luften. Detta innebär att temperaturen regleras genom att blanda in mer eller mindre recirkulerande rökgaser tillsammans med primärluften. Primärluftsflödet mäts genom att mäta tryckfallet över primärluftspalten, eller med flödesmätare som endast finns installerad på brännare 3 idag [4]. Den återförda rökgasen och den primära luften tillförs genom en gemensam varvtalsreglerad fläkt. Mängden rökgaser som cirkuleras styrs av ett spjäll som är reglerbart för att anpassa mängd i förhållande till driftlast. Rökgaserna kan inte, men nästintill, beaktas som en inert gas då de innehåller syre som deltar i förbränningen.

### 1.4.3. Ångpannan

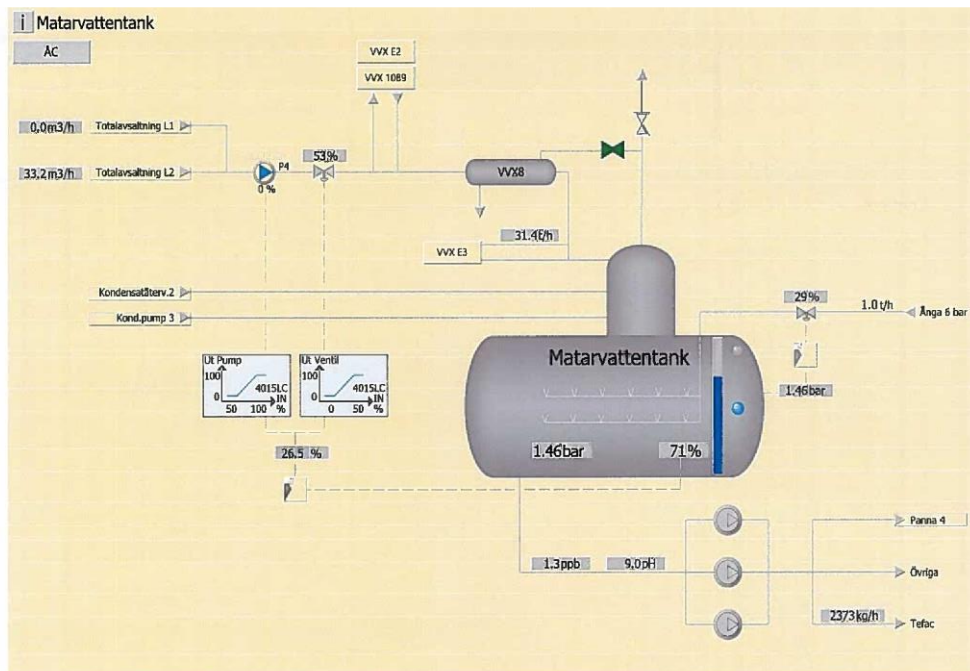
Alla ångpannor har fyra system. Matarvattensystemet, som tillför vatten till pannan, bränslesystemet som transporterar bränslet, driftsystemet som kontrollerar luftflödet för förbränning av bränslet samt ångsystemet som samlar och kontrollerar den producerade ångan. Matarvattenflödet för panna 4 ligger mellan 25-35 ton/h vid normal drift. I figur 7 kan man se processbild av ångpannan.



Figur 7. Processbild för panna 4 på AAK [3] [4].

Matarvattensystemet består av matarvattenpumpar som trycker matarvatten genom en värmeväxlare med två stråk, så kallad economizern, till ångdomen. I figur 8 kan man se principen för matarvattentanken. Temperaturen på matarvattnet bör ligga en bit under vattens kokpunkt då för varmt matarvatten kan ställa till med problem gällande värmeöverföringen om ångkokning skulle ske tidigare.

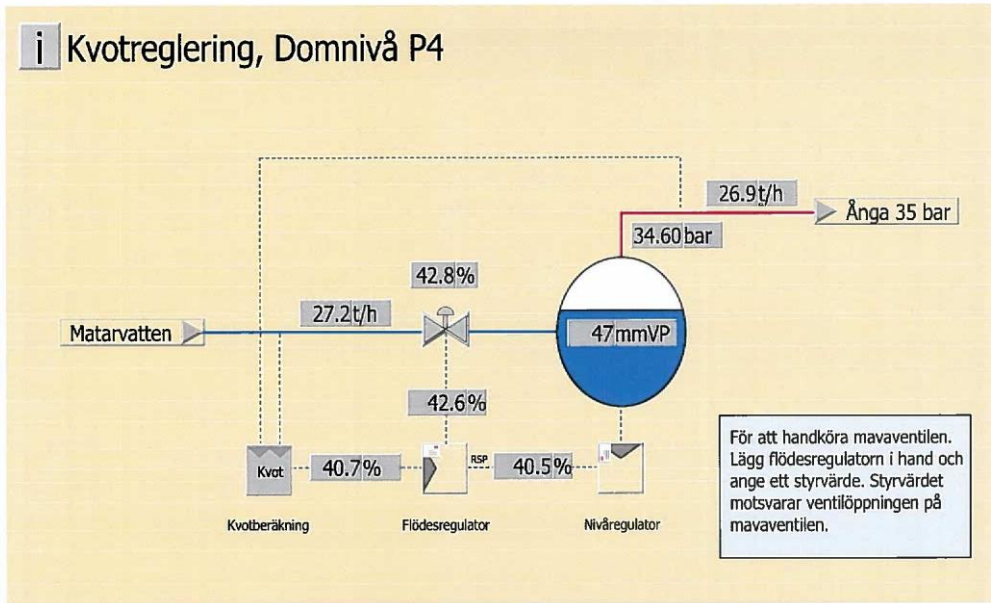
Genom förbränning av pellets omvandlas kemisk energi till termisk energi och rökgaser bildas. Den första värmeabsorptionsenheten i pannan är economizern och då inkommande vatten, matarvattnet, passerar economizern överförs energin från rökgaserna till vattnet, vilket höjer temperaturen på vätskan. Efter economizern mäts temperaturen på rökgaserna och de är cirka 150-200 °C [4]. Därefter så går vattnet igenom ångdomen och flödar sedan ner via ett fallrör och vidare genom ångtuber längs väggarna, där vattnet omvandlas till mättad ånga. Ångan och vätskan separeras i en ångdom innan torr mättad ånga tas vidare till en överhettare, där utgående temperatur är cirka 450°C.



Figur 8. Processbild för matarvattentanken [3] [4].

Nivån i ångdomen styr matarvattenflödet med hjälp av varvtalsreglerande matarvattenpumpar. Det är viktigt att ångdomen aldrig blir tom, då det leder till torrkokning. Torrkokningen kan i sin tur leda till sönderbrända tuber och en ångexplosion i pannan. I figur 9 presenteras en processbild för domnivån.



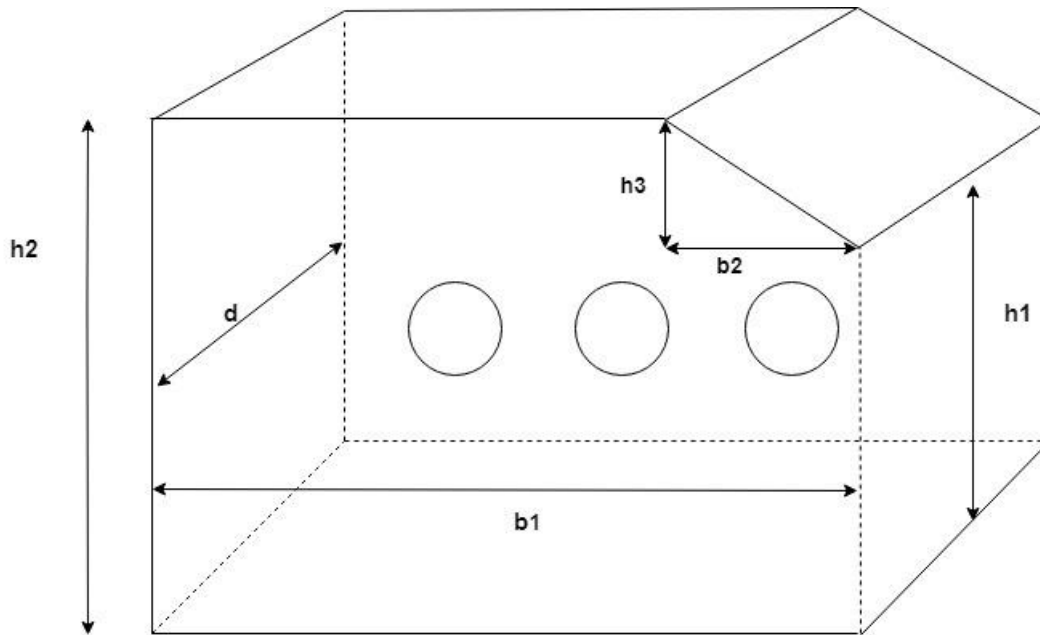


**Figur 9. Processbild över ångdomen [3] [4].**

Om pannan inte har körts på ett tag kan vattenrör och andra metalldelar i pannan expandera när de upphettas för fort. För att skydda pannan så måste värme tillsättas gradvis så att alla komponenter i pannan expanderar i samma förhållande.

I överhettaren, som motsvarar en värmeväxlare, värms ångan ytterligare för att uppnå en högre ångtemperatur. Överhettad ånga definieras som ånga som värms upp över kokpunkten vid ett givet tryck. Det går även enkelt att säga att överhettaren är en värmeväxlare där ytterligare värme läggs till på den mättade ångan och genom att överhetta ånga så reducerar man fuktigheten i ångan.

Panna 4 är nästintill rektangulär, förutom en del som består av en lutande konvektion. Eldstadens utformning kan ses i figur 10 och i tabell 1 presenteras de specifika måtten för ångpannan.



Figur 10. Eldstadens dimensioner.

Tabell 1. Eldstadens specifika mått

	<i>Mått</i>
<b>Höjd 1 (<math>h1</math>)</b>	4,7 m (4m till ångtuber, konvektionsdel)
<b>Höjd 2 (<math>h2</math>)</b>	5,7 m
<b>Höjd 3 (<math>h3</math>)</b>	1 m
<b>Bredd 1 (<math>b1</math>)</b>	6,5 m
<b>Bredd 2 (<math>b2</math>)</b>	1,5 m
<b>Djup</b>	3,8 m
<b>Volym</b>	138 m <sup>3</sup>

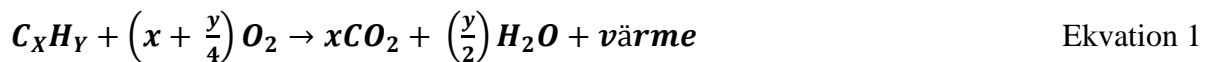
## 2. Teori

### 2.1. Förbränning och Ångpannor

#### 2.1.1. Generell förbränning

En förbränning innebär att bränslets kol och väte oxideras till koldioxid och vatten och den kemiskt bundna energin frigörs. Eftersom reaktionen är exoterm, innebär detta att den avger värme. Förbränningen startar genom att tillföra värme utifrån så att bränslet kan antändas och för att förbränningsprocessen ska fortsätta krävs det syre. Vid låg syretillförsel så finns chansen att förbränningen inte blir fullständig och bildar en giftig gas, kolmonoxid, CO. Det är därför viktigt att kontrollera syretillförseln till förbränningen.

En generell förbränningsreaktion kan ses i ekvation 1.



Mängden syre som ska tillföras bör vara i överskott för att kunna försäkra sig om en fullständig förbränning [7]. Däremot bör syreöverskottet hållas lågt för att undvika värmeförluster.

Vid förbränning av bränslen, både fossila och förnybara, så frigörs kol i form av koldioxid. Koldioxid är en bidragande faktor till växthuseffekten och den globala uppvärmningen av jorden. Det som skiljer fossila och förnybara bränslen åt är att kolutsläppet kan kompenseras vid användning av biobränslen. I teorin talar ofta om koldioxidneutrala biobränslen och detta beror på att mängden utsläppt koldioxid från förbränning tas upp av nya växter igen i form av kol. Skulle inte biobränslena användas till förbränning så kommer ändå denna biomassa, i form av växter, träd etc. förmultna och frigöra i stort sätt samma mängd kol som vid förbränning [8].

Vid förbränning så får man utsläpp av koldioxid, kolmonoxid, kväve, kväveoxider, svaveloxider, syre, vatten samt andra föreningar och partiklar. De flesta utsläppen har en negativ påverkan på miljön och benämns därför som föroreningar. De tre mest allvarliga föroreningarna är kväveoxider (NO<sub>x</sub>), svaveloxider (SO<sub>x</sub>), samt kolmonoxid (CO).

Kolmonoxid, CO, är en väldigt giftig gas som saknar färg, lukt eller smak och effekten av kolmonoxid är att det förhindrar hemoglobinet att fånga upp syre, vilket i sin tur leder till att blodet har problem med att transportera syre från lungorna till kroppen. Svaveloxider i form av svaveldioxid har en negativ påverkan på miljön då det bidrar till försurning som leder till att växter och djur skadas [9]. Kväveoxider leder till både försurning samt övergödning, vilket innebär att växer och djur drabbas då marken urlakas på grund av försurningen vilket innebär ett underskott av viktiga näringsämnen. Vid övergödning så finns det ett överskott av näringsämnen, vilket påverkar djur och växter som trivs att leva i en näringsfattig miljö. Kväveoxiderna bildar också marknära ozon, som har en negativ inverkan på växter och människor då det bland annat påverkar luftvägarna [9].

### 2.1.2. Ångpannans funktion

Den grundläggande arbetsprincipen för en ångpanna är väldigt enkel. En ångpanna fungerar som ett slutet kärl som innehåller vatten och en värmekälla som drivs av olja, kol, gas, el eller biobränsle. Pannan överför värme från värmekällan, det bränsle som har förbränts, till vattenkärlet och omvandlar därmed vattnet till ånga. Denna ånga kan sedan användas för att försörja olika processer i en industri eller fabrik. Ångan som bildas separeras från matarvattnet i ångdomen.

## 2.2. Bränsle

Det finns olika typer av bränslen som ångpannor kan använda för att genomföra en förbränning.

De olika typerna av bränsle är i:

- Fast form, exempelvis kol och trä
- Flytande form, exempelvis diesel eller bränsleolja
- Gas form, exempelvis naturgas eller propan
- Förnybar energi, exempelvis biomassa
- Elektricitet, då ångpannan använder sig av el för att värma upp/förångna vatten.

Då kol, olja och naturgas är fossila bränslen med en begränsad tillgång samt icke-förnybara energikällor är de inte lämpliga som bränsle till en förbränning. Förbränning med fossila bränslen bidrar med en stor negativ effekt av miljön då det bildas bland annat svaveloxider, koldioxid och sotpartiklar. Växthuseffekten påverkas av flera olika gaser, men en av de viktigaste är koldioxid. En av anledningarna till att koncentrationen av växthusgaser i atmosfären ökar är förbränning av fossila bränslen. Vid förbränning av fossila bränslen kan inte växterna ta upp de stora mängder koldioxid som har bildas, vilket gör att mängden växthusgaser ökar. Kol har tidigare motsvarat halva landets energiförsörjning och fram till 1950-talet användes kol mycket i Sverige och var dominant. Därefter så ersattes kol med olja, då oljan var lätthanterlig i jämförelse med kol [9]. Idag består energianvändningen med oljeprodukter av cirka 19 %. Sedan 1970 så har tillförsel av biobränslen ökat med cirka 230 % i Sverige [10].

Det finns två huvudkategorier av bränsleolja som används vid förbränning: destillatoljor och restoljor. Destillatoljor är mer flyktiga och är mindre viskösa än restoljor. Resterande oljor framställs från resterna som finns kvar efter de lättare fraktionerna har tagits bort från råoljan (bensin, destillatoljor) och innehåller större mängd ask, kväve och svavel [11]. Däremot är den största fördelen med bränsleoljepannor att den ger den högsta energitätheten i jämförelse med andra bränslen. På grund av den höga energitätheten hos diesel- och restoljor så är bränslepannor extremt effektiva vid användning av denna typ av bränsle.

En annan resurs som kan ge tillförlitlig värme och har låga kostnader är biomassabränslen. Biomassabränsle är dessutom relativt miljövänliga då det klassas som en förnybar källa. Biomassa består av cellulosa, hemicellulosa, lignin samt olika extraktivämnen. Det är ett mångsidigt bränsle som fungerar som en energibärare då det finns möjligheter att utvinna energi från biomassa. Den energi som är lagrad i biomassan kommer ursprungligen från solen. Genom fotosyntesen omvandlas koldioxid i luften till syre och druvsocker och druvsocker i sin tur är en energikälla som lagras i växter och djur.

### 2.2.1. Biomassabränsle

Det finns flera olika typer av biomassabränsle, så som trä, biogas, bioolja samt olika typer av avfalls- och biprodukter. I jämförelse med fossila bränslen så har biomassabränslen låg energitäthet. Energitätheten representerar mängden energi per volymenhet i ett bränsle [12]. Det innebär att det behövs en större volym biomassabränsle för att generera samma mängd energi som en mindre mängd fossila bränslen producerar. Den höga fukthalten i icke-processad biomassa är en nackdel så det är viktigt att hålla koll på fukthalten då en hög fukthalt i bränslet leder till höga transportkostnader och leder även till en lägre förbränningsprestanda. Variation i fukttinnehåll ger även upphov till en ojämn förbränning med onödiga utsläpp och låg effektivitet. Genom att torka och komprimera biobränslen till pellets fås en högre energitäthet och bättre förutsättningar till förbränning.

### 2.2.2. Träpellets

Träpellets är ofta lokalt tillgängliga och är ett väldigt kostnadseffektivt bränsle i jämförelse med andra biomassabränslen. Det är gjort av sågverksrester som består av bland annat sågspån, träspån och kvarvarande bitar från som finns kvar från skogsindustrin. De kan även vara gjorda av hela stockar, som av olika anledningar inte får användas för massa- och pappersproduktion. När sågverksresterna torkas och pressas får man ett bränsle, pellets, med relativt hög energitäthet. När sågverksresterna ska torkas till pellets så matar man in materialet i en pelletsfabrik där det pressas genom en matris med hål av önskvärd storlek.

Storleken på pelletsen kan variera i storlek men har oftast en diameter på 6-8 mm. Långa pellets (20-70 mm) och pellets med olika längd ger en sämre förbränning och har en längre uppehållstid i förbränningen. Korta pellets (5-20 mm) ger däremot en hög effekt och en jämnare förbränning med en kortare uppehållstid.

Att värma med pellets är oftast väldigt enkelt, men ibland kan det uppkomma förbränningsproblem om exempelvis mängden aska ökar, då det orsakar ett slagg i systemet och effektiviteten minskar. Askan innehåller också svavel, klor och kalium som kan skapa problem i eldstaden så som korrosion. Det är även viktigt att pelletsen har en relativt hög asksmältemperatur, runt 1500 °C för att undvika smält aska i pannan. Problemen med smält aska orsakas ofta då man använder sig utav träpellets av fel kvalitet eller felaktiga anläggningsinställningar. Halten aska i pellets bör inte vara högre än 0,5 vikts-% och frekvent rengöring av utrustningen måste genomföras för att upprätthålla systemet. Om pelletsen är mörka beror det på att de innehåller en mörk typ av trä eller bark, men det kan också orsakas av svärtat trä som är orsakat av en intensiv torkning av vått eller fuktigt råmaterial. Utseendet på pelletsen kan även påverkas vid pressning då sågverksresterna trycks för hårt igenom matrisen då träet bränns och får en mörkare färg. Däremot är inte utseendet på pelletsen ett kvalitetsmått då pelletsen kan vara bra trots den mörka färgen [4].

## 2.3. NO<sub>x</sub>-bildning vid förbränning

Vid förbränning av biobränslen så bildas bland annat kväveoxider. Kväveoxider är luftförore-  
nande föreningar och det är viktigt att förstå hur de bildas för att kunna utveckla metoder för  
att minska NO<sub>x</sub> bildningen. Det finns olika typer av kväveoxider och de tre viktigaste formerna  
av kväveoxider för förbränningsprocesser är kvävemoxid (NO), kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) samt  
dikväveoxid (N<sub>2</sub>O).

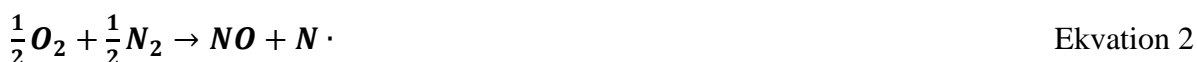
Det finns tre olika reaktionsvägar som orsakar bildandet av NO<sub>x</sub> vid förbränningsprocesser:  
bränsle NO<sub>x</sub>, termiskt NO<sub>x</sub> samt prompt NO<sub>x</sub>.

### 2.3.1. Termisk NO<sub>x</sub>

Termisk NO<sub>x</sub> bildas via en reaktionsmekanism som innefattar syre- och kväveradikaler. Det  
bildas via oxidation av atmosfäriskt kväve vid relativt höga temperaturer och långa uppehålls-  
tider.

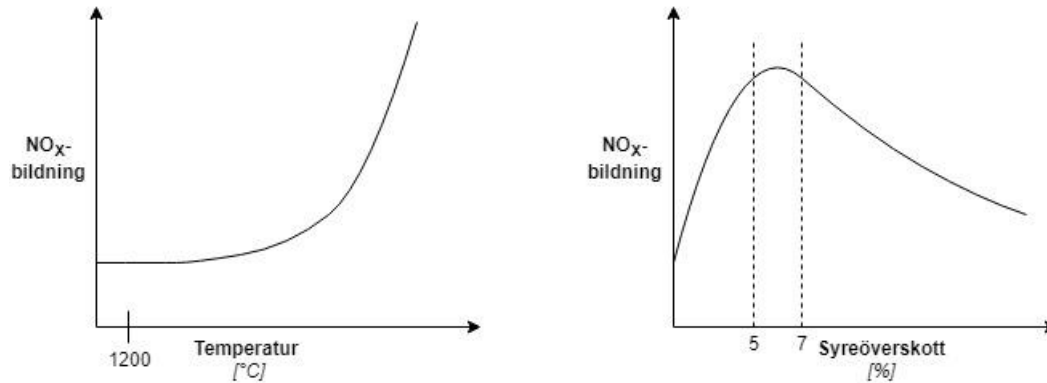
NO<sub>x</sub>-bildningen kan förklaras med en övergripande reaktion enligt ekvation 2. Denna ekvation  
är endast signifikant under reducerande tillstånd. Ekvation 2 är en endoterm reaktion då  $\Delta H^0$   
(298 K) = 90.4 kJ mol<sup>-1</sup>. Denna reaktion är hastighetsbegränsande och på grund av en hög  
aktiveringsenergi kräver reaktionen höga temperaturer.

Den övergripande reaktionen går inte att tillämpa fullständigt då den direkta reaktionen av N<sub>2</sub>  
med O<sub>2</sub> är för långsam för att stå för den signifikanta NO-bildningen. Det finns bland annat fria  
syreatomer, producerade i bland annat flammor genom dissociering av O<sub>2</sub>, som attackerar  
kvävemolekyler och börjar på en kedjemekanism enligt ekvation 3, ekvation 4 och ekvation 5  
[13].



Koncentrationen O<sub>2</sub> är låg i en bränslerik förbränning så ekvation 3 är vanligtvis försumbar  
utom i bränslerika flammor. Dessa reaktioner sker vid temperaturer över 1200 °C och under  
denna temperatur bildas väldigt små koncentrationer av termiskt NO<sub>x</sub>. Bildandet av kväveoxi-  
der är som högst vid ett syreöverskott på 5-7%. Vid lägre syreöverskott stryps reaktionen på  
grund av för låg syrehalt och vid högre syreöverskott så minskar flamtemperaturen och en lång-  
sammare reaktionshastighet fås [14].

Den termiska NO<sub>x</sub>-bildningen i förhållande till syreöverskottet samt temperaturen presenteras i figur 11. Graferna visar hur mycket NO<sub>x</sub>-bildningen ökar i förhållande till de två paramet-rarna.



Figur 11. Bildandet av NO<sub>x</sub> med avseende på temperatur och syreöverskott.

### 2.3.2. Prompt NO<sub>x</sub>

Prompt NO<sub>x</sub> bildas genom att atmosfäriskt kväve reagerar med kolväteradikaler i bränslerika regioner av flammen, oftast i flammans front, som därefter oxideras för att bilda NO via en serie komplexa gasfas reaktioner.

Det finns flera olika typer av kolväteradikaler i flammen så som, C, CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> etc. som kan reagera med molekylärt kväve, N<sub>2</sub>. Prompt NO<sub>x</sub> motsvarar endast en väldigt liten del av den totala mängden NO<sub>x</sub> som bildas vid förbränning. Bildandet av prompt NO<sub>x</sub> är inte lika temperaturberoende i jämförelse med termiskt NO<sub>x</sub> utan är beroende av och styrs av en bränslerik miljö där det finns kolväteradikaler med höga koncentrationer [15].

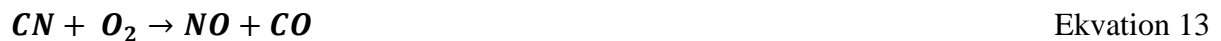
Ekvation 6 är en generell ekvation för prompt NO<sub>x</sub> bildning där CH<sub>x</sub> i ekvationen motsvarar olika typer av kolväten.



Följande reaktioner som kan ses i ekvation 7, ekvation 8 och ekvation 9 motsvarar reaktioner med kväveradikalerna CH<sub>2</sub>, CH samt C.



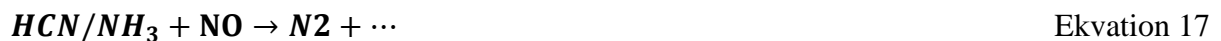
Det som sedan sker är att kolväteradikalerna tillsammans med kvävet främst bildar vätecyanid, HCN, samt ammoniak, NH<sub>3</sub>, och därmed bildar NO och NO<sub>2</sub> i närvaro av syre vilket kan ses i följande ekvationer nedan.



### 2.3.3. Bränsle NO<sub>x</sub>

Oxidation av bränslebundet kväve är en viktig och en stor källa till NO<sub>x</sub>-utsläpp som genereras vid förbränning av pellets.

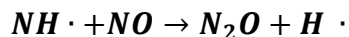
Bränsle NO<sub>x</sub> bildas från kväve som är organiskt bundet i bränslet vilket bildar HCN och NH<sub>3</sub> som oxideras till NO och samtidigt reduceras till N<sub>2</sub> [15]. Processen är komplex och genomgår ett flertal reaktioner men kan enkelt uttryckas enligt ekvation 16 och ekvation 17.



Bränslekväve består av kväveatomer som är bundna till kol eller till andra atomer. Dessa bindningar bryts enklare än diatomiska N<sub>2</sub>-bindningar och bränsle NO<sub>x</sub> bildningshastighet är mycket högre än den termiska bildningshastigheten. Vid temperaturer under 900°C reagerar HCN också till lustgas. Detta kan ses i ekvationerna nedan.







Ekvation 23

#### 2.3.4. Samband mellan termisk $NO_x$ , prompt $NO_x$ och bränsle $NO_x$

Förhållandet mellan förbränningstemperatur och bildningen av  $NO_x$  kan förklaras med termisk  $NO_x$  som ökar snabbt med ökande förbränningstemperatur. I bränslerika förhållande finns det mindre syre som reagerar med kväve i förbränningsluften och det kvävebundna bränslet. I bränslerika förhållanden gynnas därmed prompt  $NO_x$  samtidigt som både termisk  $NO_x$  och bränsle  $NO_x$  begränsas då det kräver syre för att bildas.

## 2.4. Miljö, lagar och utsläppskrav

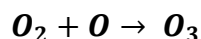
### 2.4.1. Miljöpåverkan av kväveoxider

När syre och kväve reagerar med varandra vid höga temperaturer så bildas kväveoxider i form av NO och  $N_2O$ . Ju högre tryck och temperatur desto större mängd kväveoxider bildas. När dessa kväveoxider släpps ut i atmosfären vid förbränning är det ett hot mot miljön och bidrar till surt regn och övergödning i sjöar, vattendrag och hav [16]. Vid surt regn så försuras marken och detta innebär att viktiga näringsämnen inte längre är tillgängliga och utöver det frigörs även metaller. Övergödning däremot, innebär att näringsämnena förekommer i överskott vilket innebär att man riskerar att utrota arter som trivs i en näringsfattig miljö.

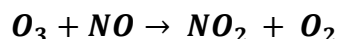
När kvävemoxid, NO, oxideras så bildas kvävedioxid  $NO_2$ .  $NO_2$  reagerar i sin tur vidare och bildar bland annat ozon och salpetersyra [16]. Ekvation 24 nedan visar hur  $NO_2$  delas upp med hjälp av solljus/bryts ner av UV-ljus och bildar NO och en syre atom. I närvaro av syre så reagerar syremolekyler med  $O_2$  och bildar ozon, denna reaktion kan ses i ekvation 25. Det är då kväveoxider reagerar med kolväte i närvaro av dagsljus, som fotokemiska oxidanter, samt flyktiga organiska föreningar (VOC) som ozon bildas. Ozon i den lägre atmosfären, marknära ozon, är skadligt då det orsakar problem i andningssystemet hos människor och andra djur. Det är även farligt för växter då det hindrar fotosyntesen och rubbar vattenbalansen hos växter [16]. I ekvation 26 nedan så reagerar ozon med kvävemoxid och bildar kvävedioxid.



Ekvation 24



Ekvation 25



Ekvation 26

När kväveoxider reagerar i luften med vatten/vattenånga bildas salpetersyra. Vid reaktion med vatten bildar salpetersyran således en vätejon oxoniumjon ( $H^+$ ) som bidrar till försurningen, men även en nitratjon,  $NO_3^-$ , som göder. När fukt i atmosfären som innehåller sura föroreningar

kondenserar och bildar moln, som sedan faller ut och ger snö, regn eller dimma, så kan detta ha en skadlig effekt på vegetationen. Det orsakar bland annat övergödning av hav och sjöar samt bildar korrosion på stål. När kväveoxider reagerar i luften med vatten/vattenånga bildas salpetersyra enligt ekvation 27. Salpetersyra således bildar en oxoniumjon som bidrar till försurningen, men även en nitratjon som göder.



Reaktionerna sker under dagtid då de är beroende av solljus och under natten så omvandlas olika NO<sub>2</sub> oxidationsprocesser till nitratradikaler. Vidare kan nitratradikalerna (NO<sub>3</sub>) reagera vidare med NO<sub>2</sub> och bilda N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dikvävepentaoxid enligt ekvation 28 och ekvation 29.



#### 2.4.2. Miljömål

För att upprätthålla miljökraven för att skapa en framtid fri från farligt utsläpp som tar hänsyn till både människor, djur och natur behövs ett flertal klimatmål följas. Sverige följer flera olika klimatmål och de är: klimatkonventionen via Kyotoprotokollet, nationella klimatmålet samt EU:s klimatmål [17]. Miljömålssystemet innehåller bland annat ett generationsmål, sexton miljö kvalitetsmål och ett tjugotal etappmål. Det nationella klimatmålet för Sverige är att utsläppen bör vara 40 % lägre år 2020 i jämförelse med år 1990. Generationsmålet är en vägledning och ett mål för att lämna över ett samhälle till nästa generation som innebär att stora miljöproblem är lösta utan en ökad miljö- och hälsobelastning utanför Sveriges gränser [17].

Riksdagen har beslutat att nå 16 miljömål som representerar blanda annat en giftfri miljö, frisk luft, ingen övergödning, myllrande våtmarker samt en begränsad miljöpåverkan. Dessa 16 miljömål representerar den nationella miljöpolitiken. Miljömålen gällande frisk luft och ingen övergödning gäller utsläppen av NO<sub>x</sub> då Riksdagens definition av miljömålet är att *”Luften ska vara så ren att människors hälsa samt djur, växter och kulturvärden inte skadas”* samt att *”Halterna av gödande ämnen i mark och vatten ska inte ha någon negativ inverkan på människors hälsa, förutsättningar för biologisk mångfald eller möjligheterna till allsidig användning av mark och vatten”* [18].

För att kunna uppnå generationsmålet samt miljö kvalitetsmålen så finns etappmålen som underlättar möjligheten samt är vägledande.

#### 2.4.3. Krav på NO<sub>x</sub>-utsläpp

För att uppnå miljömålen gällande kväveoxider så infördes år 1990 en lag gällande utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion. Lagen gäller för anläggningar med pannor, gasturbiner eller

stationära förbränningsmotorer som under ett år har redovisat en energiproduktion på minst 25 GWh. Energiproduktionen gäller värme och elproduktion. Enligt denna lag krävs det att en miljöavgift ska betalas till staten gällande utsläpp av kväveoxider (LAG1990:613) [1].

Utöver denna lag finns även en förordning gällande stora förbränningsanläggningar (SFS 2013:252) [2]. Förordningen gällande stora förbränningsanläggningar har baserat begränsningsvärdet beroende på den totala anläggningseffekten. Förordningen gäller för förbränningsanläggningar som har en installerad effekt som är 50 MW eller större.

Kraven för utsläpp till luft enligt begränsningsvärdena i förordning SFS 2013:252 för ett kalenderår om kontinuerliga mätningar visar att:

- inget validerat månadsmedelvärde överskrider begränsningsvärdet
- inget validerat dygnsmedelvärde överskrider 110 procent av begränsningsvärdet
- minst 95 % av de validerade timmedelvärdena understiger 200 procent av begränsningsvärdet.

Begränsningsvärdet för ångcentralen med en installerad effekt på 80MW är 300 mg/Nm<sup>3</sup> [2] och gäller för ett kalenderår. Det som gäller för normal torr gas vid beräkning av utsläpp vid ett fast bränsle så gäller en O<sub>2</sub>-halt på 6 procent. Vid byte av bränsle kan eventuella syrehalter öka eller sänkas, beroende på vilket typ av bränsle som används.

#### 2.4.4. NO<sub>x</sub> kostnad

Miljöavgiften som ska betalas enligt LAG 1990:613 är 50 kronor per kilogram utsläppta kväveoxider, vilket räknas som kvävedioxid, NO<sub>2</sub>. Det som anläggningen behöver rapportera in är hur många kilo kväveoxider som de släppt ut och hur mycket energi anläggningen har producerat.

När företag som är ansluta till ett system och producerar mer än 25 GWh har rapporterat in och deklarerat så beräknas ett tillgodoföringsbelopp ut. Cirka 1 procent går till administrativa kostnader. Resterande pengar fördelas ut beroende på hur mycket energi man har producerat. För att fastställa miljöavgiften så baseras det på återföringsbeloppet. Återföringsbeloppet är med andra ord beloppet som ska betalas eller återbetalas för anläggningen.

Återföringsbeloppet räknas ut genom att multiplicera antal MWh producerad energi med tillgodoföringsbeloppet (kr/MWh) och subtrahera antal kilo NO<sub>x</sub>-utsläpp multiplicerat med NO<sub>x</sub>-avgiften (50 kr). Formeln för att beräkna återföringsbeloppet kan ses i ekvation 30.

$$\text{Återföringsbelopp} = \text{Antal MWh producerad energi} \cdot \text{tillgodoföringsbelopp} \frac{\text{kr}}{\text{MWh}} - (\text{antal kg NO}_x \cdot 50 \text{ kr}) \quad \text{Ekvation 30}$$

Om en anläggning producerar tillräckligt mycket energi och har relativt låga NO<sub>x</sub>-utsläpp, så blir återföringsbeloppet positivt och företaget får tillbaka pengar. Skulle anläggningen däremot ha höga NO<sub>x</sub>-utsläpp så blir återföringsbeloppet negativt och företaget behöver betala in en miljöavgift. Detta innebär att de som anstränger sig för att minska på NO<sub>x</sub>-utsläppen får pengar tillbaka eller en mycket lägre miljöavgift jämfört med de som inte anstränger sig för att åtgärda problemet med NO<sub>x</sub>-utsläppen som får fortsätta betala miljöavgiften.

## **2.5. NO<sub>x</sub> reducerande åtgärder**

Reducering av kväveoxider kan ske på flera olika vis. Det kan ske via primära åtgärder eller med hjälp av sekundära åtgärder.

Justeringar i den befintliga förbränningsanläggningen omfattar en primär åtgärd och innebär att bildandet av NO<sub>x</sub> under förbränningen minskar. En sekundär åtgärd innebär att minska NO<sub>x</sub> som bildats under förbränningen med hjälp av en selektiv katalytisk reduktion, SCR eller en selektiv icke-katalytisk reduktion SNCR.

### *2.5.1. Primära åtgärder*

Det finns flertal primära åtgärder för att minska bildandet av NO<sub>x</sub> vid förbränning. En minskad förbränningstemperatur leder till mindre NO<sub>x</sub> utsläpp då man undviker ideala stökiometriska förhållanden. En viktig aspekt är att minskad temperatur har väldigt lite påverkan på bränslekväve då bränsle NO<sub>x</sub> endast beror svagt på temperaturen.

Flammans egenskaper och utseende beror på om reaktanterna är väl blandade eller inte, flödesmönstret i flammen samt den kemiska sammansättningen i flammen. Flödesmönstret i flammen kan vara antingen laminärt eller turbulent. Dessa tre faktorer påverkar värmeöverföringen och är därför en viktig faktor för NO<sub>x</sub> bildandet.

Det är även viktigt att kontrollera uppehållstiden i eldstaden samt tillgången till syre i förbränningsprocessen då dessa också påverkar bildandet av NO<sub>x</sub>. Förändring i effektivitet samt optimering av pannan är också en relevant åtgärd. En hög last ger högre temperatur och därmed ett högre NO<sub>x</sub> bildning.

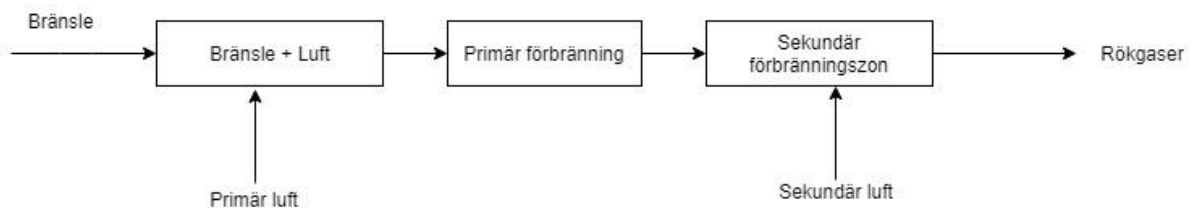
### *2.5.2. Air Staging*

Om zonen där HCN och NH<sub>3</sub> bildas är understökiometrisk bildas molekylärt kväve istället för kvävemonoxid, NO. Detta kan göras genom stegvis tillförsel av luft, en metod som kallas för Air Staging och kan ses i figur 12 [19].

Denna metod baseras på att endast en liten del av förbränningsluften tillsätts i den primära förbränningszonen och därmed fås en understökiometrisk zon med ett underskott av syre och istället för att NO<sub>x</sub> bildas så fås molekylärt kväve, N<sub>2</sub>. Brännbara komponenter så som CO samt

H<sub>2</sub> kommer att finnas kvar på grund av att förbränningen sker med ett underskott av syre. Den återstående luften, sekundärluften, som krävs för fullständig förbränning av bränslet tillsätts och förbränningen blir fullständig vilket gör att rökgaserna innehåller O<sub>2</sub>.

Eftersom att förbränningen sker i två steg sker ett värmeutbyte mellan den primära och sekundära zonen så därför är det viktigt att hålla en låg flamtemperatur. Detta innebär att en temperaturmätning i andra steget är viktig och bör kontrolleras noggrant för att kunna bibehålla låg bildning av termisk NO<sub>x</sub>. Beroende på bränslets fukthalt varierar förhållandet mellan primär- och sekundärluft och desto högre fukthalt i bränslet, desto mer primärluft krävs.



Figur 12. Principskiss för Air Staging.

### 2.5.3. Fuel staging

En annan metod är ”Fuel Staging” även kallad för ”Reburning” och innebär en stegvis tillförsel av ett sekundärt bränsle som reduktionsmedel, principskissen kan ses i figur 13 [19]. Genom att införa en sekundär bränsleinjektion av bränslet efter den första förbränningszonen skapas en reducerad miljö och därmed reduceras bildad NO<sub>x</sub> till molekylärt kväve, N<sub>2</sub>. För att sedan få en fullständig förbränning tillsätts sekundär luft i slutförbränningen.

I det första steget, den primära förbränningszonen, brinner cirka 80 % av bränslet i en miljö där syreöverskottet bör vara så litet som möjlig för att minska bildningen av NO<sub>x</sub>. Det sekundära bränslet bör innehålla 10-20% av det totala energiinnehållet i pelletsen. Temperaturen i denna zon bör vara minst 1000°C. I slutförbränningen injiceras sekundärluft in, vilket leder till överstökiometri, syreöverskott, och här är det bra med en låg temperatur för att kunna bilda molekylärt kväve, N<sub>2</sub>.



Figur 13. Principskiss för fuel staging

#### 2.5.4. Rökgasåterföring

Principen för rökgasåterföring är att man återför kylda rökgaser till förbränningskammaren. Rökgasåterföring i förbränningsprocesser är en teknik för att sänka flammans temperatur. Genom att blanda förbränningsluften med de återförda rökgaserna så sänks syrenehålllet i luften samt att det hämmar bildningen av  $\text{NO}_x$ . De inerta ämnena i rökgaser är  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  och  $\text{H}_2\text{O}$  och deltar inte i reaktionerna som frigör värme i förbränningen, dvs. de exoterma reaktionerna [19]. Detta innebär att det tar mindre tid att värma upp ångan i överhettaren i jämförelse med vanlig luft, samt att man kan sänka flamtemperaturen genom att recirkulera rökgaserna till flammen. Fördelen med rökgasåterföring är inte endast en lägre  $\text{NO}_x$  bildning utan det ökar även verkningsgraden i förbränningsanläggningen. Anledningen till att verkningsgraden ökar är för att rökgasåterföringen kan öka uttaget av effekten i vatten- och ångsystemet. Rökgasåterföring för panna 4 är tillämpat.

#### 2.5.5. Låga $\text{NO}_x$ -brännare

Låga  $\text{NO}_x$ -brännare är konstruerade för att kunna styra bränsle- och luftblandning för varje brännare för att kunna skapa större och mer grenade flammor. Detta innebär att temperaturen på flammans topp reduceras och  $\text{NO}_x$ -bildningen minskas. Genom att förbättra flamstrukturen minskar även mängden syre som finns tillgänglig i den varmaste delen av flammen, vilket förbättrar effektiviteten på brännaren. Vid byte av brännare så är låga  $\text{NO}_x$ -brännare ett bra alternativ då de går att få skräddarsydda för en specifik panna [20].

## 2.6. Sekundära åtgärder

$\text{NO}_x$  minskningen kan effektiviseras ytterligare och då behövs någon form av sekundär åtgärd. Det finns två större metoder för detta och de baseras på att man i slutförbränningssteget renar bort  $\text{NO}_x$  som bildats i processen. SNCR, selektiv icke-katalytisk reduktion samt SCR, selektiv katalytisk reduktion är de två metoderna som är mest lämpliga för biobränslepannan på AAK. Anledningen till att en sekundär åtgärd vill tillämpas på panna 4 är för att minska  $\text{NO}_x$ -utsläppen samt undersöka möjligheten att ändra bränsle från hushållspelletts med klass A1 till industripellets med klass II. Pellets med klass A1 är av bättre kvalitet än vad pellets av klass II anses vara.

#### 2.6.1. Selektiv katalytisk reduktion

SCR, som är en selektiv katalytisk reduktion innebär att man sprutar in reduktionsmedlet direkt in i eldstaden där temperaturen ligger kring  $350\text{ °C}$  [21]. Det som sedan sker är att reduktionskemikalien reagerar med det  $\text{NO}_x$  som har bildats i processen i närvaro av en katalysator. Reaktionen som sker reducerar  $\text{NO}_x$  till kväve och vatten. Reaktionen kan ses i följande ekvationer [22]:



Anledningen till att en katalysator närvarar är på grund av att reaktionerna kan ske vid lägre temperaturen och appliceringstemperaturen ligger idealt runt 350°C.

För SCR finns flera typer av katalysatorer men det vanligaste är att det är katalysatorer som är sammansatta av aktiva metaller eller keramer med en väldigt porös struktur. Den porösa strukturen bidrar till aktivt centrum hos katalysatorn. Det vanliga är att använda vanadin, titan eller volfram, vilket leder till en mindre katalysatorkostnad då man tidigare använde ädla metaller, så som platina. Det är också möjligt att använda metalloxider, så som titanoxid, zirkoniumdioxid och vanadinpentoxid samt kiseloxid [22].

En stor nackdel med SCR är att katalysatorn är känslig för kontaminering och igensättning av katalysatorn, samt att den förlorar sin aktivitet ju mer den används. Det finns olika skäl till att katalysatorn deaktiveras och man tappar aktiva centrum på katalysatorn. Det kan bland annat vara förgiftning, då vissa komponenter som frigörs under förbränning är ett gift för katalysatorn, exempelvis kalciumoxid, kalium, natrium, arsenik, bly etc [22]. Det som händer är att dessa ämnen deaktiverar katalysatorn genom att diffundera till det aktiva centrumet på katalysatorn. En annan anledning till att katalysatorn tappar sin funktion är för att ammoniak- och svavelsalter samt flygaska som finns i rökgaserna pluggar igen katalysator. Dessa föroreningar sätter sig på ytan och i katalysatorns aktiva centrum. Däremot har SCR en hög reduceringsgrad på 60-90%, men är väldigt dyr i drift.

### 2.6.2. *Selektiv icke-katalytisk reduktion*

En annan metod för NO<sub>x</sub>-reducering är tillförsel av reduktionsmedel för NO<sub>x</sub> i eldstaden. Denna metod kallas för SNCR, selektiv icke-katalytisk reduktion. I samband med lufttillförsel så sprutar man in reduktionsmedlet i rökgaserna, direkt ovanför förbränningen. Anledningen till detta är för att få en bra omblandning mellan rökgaserna och reduktanten för att uppnå högsta möjliga rening. Detta reduktionsmedel kan bland annat vara ammoniak, urea eller ammoniumsulfat. SNCR reagerar med kväveoxiderna och reducerar dessa till kväve och vatten.

För att tillämpa SNCR behövs flera injektionspunkter, då temperaturen varierar med lasten i pannan. SNCR är endast effektiv i ett relativt högt men begränsat temperaturområde, cirka 850-1050 °C för ammoniak och är därför inte lämplig för alla applikationer [23]. Beroende på drift- och konstruktionsegenskaperna måste designparameter undersökas för att avgöra om SNCR går att applicera.

Processen består av en tank där reduktionsmedlet lagras, pumpas, injektionssystem (lansar, dysor) samt ett styrsystem som består av ventiler, regulatorer samt givare.

Det är viktigt att injektionspunkterna är placerade korrekt, samt att temperaturen befinner sig i det intervall SNCR kräver för att undvika ett överskott av ammoniak. Överskottet av ammoniak, kallat ammoniakslip, kan kontrolleras genom att upprätta en återkopplande styrslinga för att justera mängden reduktionskemikalie utifrån överskottet ammoniak. Ammoniakslipen påverkar inte NO<sub>x</sub> reduceringen eller mängden NO<sub>x</sub>, så att justera reduktionskemikalien för att minska överskottet slipen kan påverka NO<sub>x</sub> reduktionen.

### 2.6.3. Val av reduktionskemikalie

Reduktionskemikalien väljs beroende på vad som passar pannen bäst och vad man som företag har för möjligheter gällande lagring och hantering då dessa lagras och hanteras på olika vis. De två mest förespråkade reduktionskemikalier är ammoniak och urea. Ammoniak kan levereras antingen i vatten eller vattenfri. Ammoniak i vatten lagras i en tank vid atmosfärstryck medan vattenfri ammoniak som är en gas vid normal atmosfärstemperatur förvaras under ett tryck. Att förvara det under tryck ger upphov till ytterligare säkerhets- och transportfrågor.

Ureapelletts däremot kräver upplösning, spädning och omblandning för att uppnå önskad koncentration. Urea kan också fås levererad med rätt spädning. Urea har flera fördelar om man jämför med ammoniak, då urea är icke-toxisk och en mindre flyktig vätska som kan lagras och hanteras mer säkert än ammoniak.

I tabell 2 nedan så ses de fysikaliska data och egenskaperna för ammoniaklösning [24] respektive urealösning [25].

Tabell 2. Fysikaliska data och egenskaper för ammoniaklösning respektive urealösning.

Fysikaliska data/Egenskaper	Ammoniaklösning (24,9%)	Urealösning (40%)
Kemisk formel	NH <sub>3</sub>	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>
Molvikt (g/mol)	17.03	60.06
Aggregationstillstånd vid rums temp.	Vätska	Vätska
Densitet (kg/m <sup>3</sup> , 20 °C)	0,907	1,11
Ångtryck (kPa, 20 °C)	48	6,4
Frys punkt (°C)	-55	0
Kokpunkt vid atm. tryck	38	104
pH	~12	~9

### 2.6.4. Ammoniak

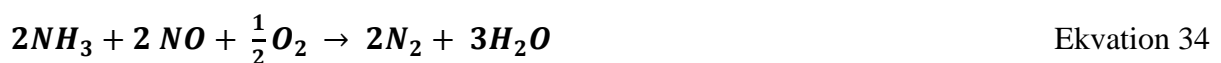
Vid reduktion av NO<sub>x</sub> kan både ammoniaklösning och vattenfri ammoniak användas, NH<sub>4</sub>OH. Ammoniaklösningen som innehåller vatten, framställs via upplösning av ammoniakgas i vatten



till skillnad från vattenfri ammoniak som innehåller 100 % reagens, dvs. är inte utspädd. Fördelarna med vattenfri ammoniak är att det ger en högre effektivitet och minskar transportkostnaderna och att mängden kväveoxider och kolmonoxider som bildas i processen är lägre. Där emot är det en större fördel och säkrare att använda ammoniaklösning då vattnet i lösningen sänker ångtrycket och det innebär att man kan förvara reduktionskemikalien vid normala förhållanden. Vid lagring av ammoniak som är korrosivt så behöver all utrustning vara korrosionstålig. För att erhålla en ammoniaklösning och få ammoniumhydroxid så blandar man ut reduktionskemikalien till en ca 24,9 % lösning med vatten.

Fördelar med ammoniak är att den är mer effektiv än vad urea är då det bildas mindre sekundära reaktioner som i sin tur bildar kväveoxider och kolmonoxid [26]. Ammoniaklösningen är också effektivare än urea i SNCR-system vid högre temperaturer. Risken för korrosion och beläggningar efter insprutning är också mindre.

Vid dosering av ammoniaklösning så frigörs reagentet direkt efter insprutning och efter munstycket. Detta innebär att penetreringen inte är så djup vid användning av ammoniaklösning. Vill man säkerhetsställa penetrationsdjupet så kräver det mer energi pga. att ammoniak har en lägre massa i jämförelse med en vattendroppe. Detta kan uppnås genom att öka mängden drivmedel, dvs. tryckluft. Däremot är en homogen distribution väldigt svår att uppnå då rökgaserna är väldigt viskösa vilket leder till att det är svårt att blanda olika typer av gaser [27]. Totalreaktionen för reduktion med ammoniak kan ses i ekvation 34.



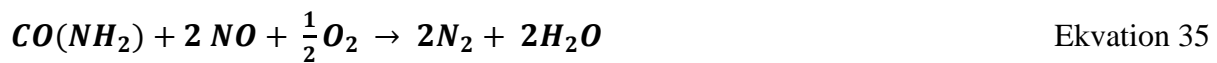
#### 2.6.5. Urea

Urea köps och lagras vanligtvis som en 35-40% vattenhaltig lösning,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  och vid denna koncentration måste urealösningen värmas upp och blandas i kalla klimat då urea kristalliseras vid 0 °C. Även om urea är en dyrare reagens är ångtrycket för urea mycket lägre än för ammoniak. Då urea är mest effektivt vid injektion till rökgaserna gör detta ureainsprutning till en mer flexibel process än med ammoniak och är vanligtvis också mer kostnadseffektiv långsiktigt.

Vid injicering av urea penetrerar reduktionskemikalie längre in i rökgasen, vilket ökar blandningen med rökgaserna. Urea injiceras i pannan som en vattenhaltig lösning och förångas av värmen i pannan. Urea är mindre toxiskt och är även en mindre flyktig vätska och kan hanteras mer säkert än ammoniak. Däremot så bildas beläggningar av ett vitt fällningssalt vid läckage av urealösning vilket får utrustningen att se äldre ut [26].

Ett system som använder sig av urea har en reduktion på cirka 25-60% medan ett system som använder ammoniak som reduktionskemikale får en reduktion på cirka 40-60% [28].

För ammoniak så ligger temperaturintervallet mellan 850-1050°C och ett maximum vid cirka 950°C. För urea så ligger det optimala temperaturintervallet mellan 900-1150°C med ett maximum vid 1010°C. Totalreaktionen för reduktion med urea kan ses i ekvation 35.



### 2.6.6. Injektionssystem

Injektorerna hjälper till vid dispersion och vid blandning av reagenset med rökgasen. Det finns två olika typer av injektorer: vägg och lans. Vägginjektorerna sitter fast på pannans inre vägg på angivna platser och det finns ett munstycke för varje injektorplats. Lanssprutor består av ett litet rör som skjuter ut från pannvägen. Munstycket placeras längs röret direkt i rökgasernas bana. Injektorerna är allmänhet konstruerad av rostfritt stål och möjligheten ska finnas att byta ut dessa då de påverkas av höga temperaturer samt är känsliga för korrosion. Lansinjektorer samt vissa vägginjektorer är infällbara när de inte används för att inte förstöra utrustningen då SNCR processen inte körs på grund av exempelvis säsongsarbete, pannans start, avstängning eller av något annat skäl [28].

Reagenset injiceras under tryck och finfördelas med hjälp av specialdesignade munstycken som bildar droppar med en optimal storlek och fördelning. Hastigheten av injektionen samt sprutvinkeln påverkar reagensens bana [29]. Rökgaserna ger den energi som krävs för reduktionsreaktionen.

Vid insprutning av urea eller ammoniaklösning så injiceras det oftast med en bärgas, oftast luft eller ånga, genom ett munstycke. Detta reagens kan injiceras med ett låg- eller hög- energisystem. Ett låg-energisystem använder lite eller ingen tryckluft medan ett hög-energisystem använder stora mängder tryckluft eller ånga för att injicera och kraftigt blanda lösningen med rökgasen. Lansinjektorer tillämpade i stora pannor använder ofta hög-energisystem. Dessa är dyrare att bygga och driva då de kräver ett mer robust injektionssystem. Utöver det förbrukar det även mer el. För att effektivisera NO<sub>x</sub>-reduceringen så kan man använda enkel- och flernivåinsprutningssystem. Genom att använda sig utav olika injektorkonfigurationer så kan man öka effektiviteten samt minska kapital och driftskostnader. Vid användning av vattenfri ammoniak är reagensinsprutningssystemet mer komplicerat och dyrare än de som används för vattenbaserad ammoniak och urea.

Det är även viktigt att kunna använda sig utav fler lansar som är placerade på olika ställen på pannan, detta för att kunna välja injiceringspunkt efter temperatur [29]. Detta är en fördel då systemet fungerar mer flexibelt och kan få en bättre NO<sub>x</sub> rening. Vid kontroll av mängden insprutad reduktionskemikalie samt placering av reagensinjektion fås ett mer flexibelt system då det går att reglera beroende på variation i driftsförhållanden. För att välja antal injektionspunkter och läge så behövs en temperaturundersökning vid olika laster göras på pannan.

## 2.7. Designparametrar - SNCR

Dimensionering av SNCR kan vara komplicerat och beror på många faktorer. De faktorer som påverkar NO<sub>x</sub> reduktionen beror på bland annat [28]:

- Reaktionstemperatur
- Uppehållstid
- Omblandning/Mixningsgrad
- Okontrollerad NO<sub>x</sub>-mängd (kvävemängd i pellets)
- Kemikaliemängd
- Ammoniak slip

### 2.7.1. Reaktionstemperatur

NO<sub>x</sub> reduktionen sker i ett specifikt temperaturintervall beroende på vilken reduktionskemikalie som väljs. Vid lägre temperatur så är reaktionskinetiken långsam och vid högre temperaturer oxiderar reagenset och ytterligare NO<sub>x</sub> bildas.

Rökgastemperaturen i pannan beror på pannans konstruktion och driftförhållanden som är etablerade för att möta ånggenereringskraven – denna design parameter har inte alltid idealiska förhållanden för SNCR. Rökgastemperaturen i den övre delen av pannan kan variera med  $\pm 150$  °C.

Dessutom påverkar svängningarna i pannbelastningsprofilen temperaturen inom pannan. Vid lägre lastprofiler, är temperaturen inom pannan lägre. Variationer i rökgasens temperatur gör konstruktionen och driften av ett SNCR-system blir svårare. I vissa fall kan temperaturen ligga under optimalt för att uppnå vad som krävs för NO<sub>x</sub>-reduktioner. För att motverka detta är vissa SNCR-system utformade med flera nivåer av reagensinjektionsställen, temperatursensorer och automatisk kontroll för att tillåta växling mellan injektionsportar. Dessa system säkerställer att reagenset alltid injiceras på den position där den optimala temperaturen för NO<sub>x</sub>-reduktion finns.

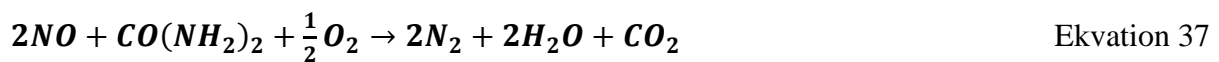
### 2.7.2. Uppehållstid

Uppehållstiden är den tid som reaktanterna är närvarande i en kemisk reaktor. Uppehållstiderna för ett SNCR-system kan variera från 0,001 till 10 sekunder [28]. Däremot vid längre uppehållstider än 0,5 sekunder så är inte NO<sub>x</sub> reduktionen lika effektiv. Uppehållstiden beror på vad för typ av bränsle som används samt brännarinställningar.

### 2.7.3. Kemikaliemängd

Mängden reduktionskemikalie som behövs för NO<sub>x</sub>-rening beror delvis på hur mycket reduktion man vill uppnå, samt vilken reduktionskemikalie man använder. För att definiera mängden reagens som behövs för att reducera NO<sub>x</sub> så nämner man ofta normaliserat stökiometriskt förhållande, även benämnt NSR. Det normaliserade stökiometriska förhållandet, NSR, definierar mängden reagens som behövs för att uppnå en viss mängd NO<sub>x</sub>.

Enligt teorin och ekvation 36 samt ekvation 37 kan 2 mol NO<sub>x</sub> (NO) reduceras med motsvarande 1 mol urea eller 2 mol ammoniak och detta resulterar i NSR<sub>AMMONIAK</sub> = 1 och NSR<sub>UREA</sub> = 0,5 [28].



I praktiken däremot, krävs mer än den teoretiska mängden på grund av komplexiteten i de kemiska reaktionerna som involverar NO<sub>x</sub> och den injicerade reduktionskemikalien. Det finns även blandningsbegränsningar, hastighetskinetik, mellan reduktionskemikalien och rökgaserna.

De faktorer som kan påverka bestämningen av NSR är bland annat hur stor procentuell NO<sub>x</sub> minskning som vill uppnås, okontrollerad NO<sub>x</sub> koncentration i rökgaserna, tillgänglig temperatur och uppehållstid, omblandning i pannan, samt tillåten ammoniakslip [28].

Mängden NO<sub>x</sub> som ska reduceras kan vara mindre än mängden okontrollerad NO<sub>x</sub> i pannan. Detta leder till att det injicerade reduktionsmedlet finns i överskott då det inte har reagerat och det kallas för ammoniak slip.

Det finns flertal negativa effekter med ammoniak och en av effekterna är att ammoniak har en stark stickande detekterbar lukt vid 5 ppm eller högre nivåer. Närmar man sig 25 ppm så utgör även ammoniak ett hälsoproblem.

Vid låga rökstemperaturer så kan överskottsammoniak reagera med svaveloxider som finns i rökgaserna och bilda ammoniumsulfater. Dessa föroreningar kan sedan samlas i filteraskan och bidra till problem med lukt och hantering av restprodukter. Överskottsammoniak kan även reagera vidare med exempelvis, koldioxid, kväveoxider, och saltsyra och vidare bilda ammoniumsalter. Dessa föroreningar kan plugga igen och korrodera utrusningen samt orsaka fouling.

### 2.7.4. AGAM mätsystem

För att säkerhetsställa att reagentet alltid injiceras i rätt temperaturintervall, dvs. i det område där minskningen av NO<sub>x</sub> är högst och ammoniakslipen är som lägst så är en lämplig mätmetod är Acoustic Gas Temperature Measurement (AGAM). Denna metod mäter den riktiga rökgasen utan någon påverkan utifrån och bestämmer en temperaturprofil genom hela förbränningskammaren [27].

Ett system består ett sändar- och mottagarsystem som är monterad på förbränningskammarens väggar och även en identisk, både mekaniskt och elektriskt, extern styrenhet.

När magnetventilen som finns i tryckluftsledningen på sändarsidan är öppen så sker en mätning som genereras via akustiska signalerna. Signalerna registreras samtidigt på både sändar- och mottagarsidan och används för att mäta överföringstiden och då avståndet är känt så kan ljudhastigheten bestämmas [27]. Ljudhastigheten i sin tur konverteras till en temperatur.

I kombination med fler sändare och mottagarenheter som verkar på en nivå så kan man få en tvådimensionell temperaturfördelning. Detta ger en temperaturprofil som är uppdelad i olika sektioner och kan anpassas till enskilda lansar eller fler för att kunna reglera de beroende på den uppmätta rökgastemperaturen. Detta innebär att det injicerade reagentet kommer att injiceras på rätt plats och där det är mest effektivt, även om rökgastemperaturerna snabbt varierar.

## 3. Metod

### 3.1. *Metod*

För att hitta ett optimalt temperaturintervall samt en driftpunkt för att SNCR-systemet ska nå högsta möjliga effektivitet behövs temperaturmätningar göras på pannan. Detta görs med hänsyn till att använda minsta möjliga mängd reduktionsmedel och undvika utsläpp av andra föroreningar. Det är även viktigt att ta hänsyn till att det finns många faktorer som kan bidra och verka störande för experimentet. Att temperaturintervallet stämmer överens med de temperaturer som SNCR-systemet kräver är viktigt för det är inom dessa ramar som reduktionen är optimal.

Temperaturintervallet utvärderas genom att undersöka rökgasernas temperatur i pannan vid olika placeringar på pannan samt vid olika laster. Anledningen till undersökningen vid olika placeringar på pannan är för att kunna fastställa injiceringspunkten för reagensmedlet. Mätningarna på pannan kommer att genomföras vid fyra olika laster för att undersöka hur temperaturprofilen ändras beroende på last. Syftet med temperaturmätningarna är att lokalisera ett temperatursområde i eldstaden där temperaturprofilen passar in för ett SNCR system.

Installering av SNCR-systemet kostar en hel del och lika så driftskostnaderna så därför är det av intresse att undersöka om det är lönsamt att installera detta system vid förbränning av klass A1 pellets. Vid byte av pelletsqualität är det också intressant att undersöka lönsamheten, då industripellets är billigare än hushållspelletsen. Eftersom att priset för industripellets är ökänt

undersöks tre olika fall, där industripelletsen är 5-, 10-, respektive 15 % billigare än klass A1 pellets. För att undersöka lönsamheten undersöks PayBack-tiden med och utan ränta, nuvärdet, annuiteten och internräntan. Beräkningarna baseras på en ekonomisk livstid på 15 år och en kalkylränta på 12 %.

AAK har en miljö dator som visar bland annat månads- och årsvärden på utsläppen från panna 4. Från denna dator kommer värden för NO<sub>x</sub>-utsläppen för år 2017 samt 2018 att användas för att sedan kunna skapa en linjär funktion för att kunna uppskatta framtida utsläpp.

### **3.2. Mätinstrument**

Vid undersökning av temperaturprofil används två olika mätinstrument, termoelement och en IR-pyrometer. Anledningen till att undersökningen görs med två mätinstrument är för att få en bättre översikt över temperaturprofilen. Mätningarna görs vid exakt samma förhållanden och det som kommer att tas hänsyn till är metodnoggrannheten med de två olika instrumenten och dess begränsningar.

#### *3.2.1. Termoelement*

Ett termoelement består av två stycken metalltrådar som är sammanfogade och bildar en sluten krets. Termoelementen baseras på Seebeckeffekten som innebär att två olika material vid sammansvetsning bildar en potentialdifferens, en så kallad termoelektromotorisk kraft som beror på temperaturskillnaden [30]. Beroende på val av material så fås olika spänningar. Detta mäts med ett mätinstrument, multimeter.

Det finns olika typer av termoelement beroende på vilken miljö mätningen sker samt vilken temperatur termoelementet ska klara av. Termoelementen betecknas med en bokstav som motsvarar olika kombinationer beroende på material.

Fördelarna med termoelement är att de reagerar snabbt, är billiga, lätt att placera på svåra mät-punkter samt att det kan mäta temperaturer upp till 1800 °C. Däremot har termoelementen låg känslighet och den behöver kontinuerlig kalibrering då den är olinjär.

Det kan uppstå vissa fel med mätning av termoelementet då temperaturen som sensorn mäter inte motsvarar omgivningens temperatur. Det kan överföras energi i form av strålning, konvektion och konduktion till och från termoelementet, vilket leder till att fel temperatur visas.

De allra vanligaste termoelementen är av typ N och K följda av typ S, R och B. Termoelement av typ R och S består av ädelmetaller.

Termoelementet som användes vid mätning av temperaturen i panna 4 var av typ K och är tillverkat av Nickel/Chromium. Rekommenderat mätområde för detta specifika termoelement är -200°C till +1250°C. Noggrannheten vid område -40°C till +1000°C är ± 1,5°C och +1000°C

till +1250°C är den  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . Mättransmittern som användes var en Fluke 754 "Process Calibrator" som är kontrollerad av ett ackrediterat labb.

### 3.2.2. Infraröd termometer

Alla föremål avger elektromagnetisk strålning i form av vågor, beroende på vilken temperatur föremålet har. Det gör det möjligt att mäta temperaturen på föremålet med hjälp av strålning.

Det finns tre viktiga parameterar gällande strålningens lagar och detta är: emission (E), transmission (T) och reflexion (R). Emissionen är värmen, eller så kallade strålningen, som kommer från kroppen, med andra ord det objekt vi vill mäta [31]. Transmission består av värme som kommer från andra objekt som passerar kroppen. Värme kan också reflekteras från andra föremål och det är detta som kallas för reflexion.

Eftersom att kroppen emitterar värme, så kan en infraröd termometer användas för att beräkna skillnaden mellan den infraröda strålningen från föremålet och omgivningen för att kunna bestämma själva yttemperaturen på föremålet.

IR-termometern som användes till mätningarna på panna 4 är från PeakTech och har ett mätområde från  $-50^\circ\text{C}$  till  $+2200^\circ\text{C}$ .

### 3.2.3. Jämförelse av IR-termometer och termoelement

Vid användning av termoelement så finns det några begränsningar. Ett problem kan vara att enheten visar en temperatur som är lägre än den faktiska temperaturen och kan fånga upp en annan temperatur än det man vill att termoelementet ska mäta. IR-termometern däremot mäter inte temperaturen i omgivningen, utan mäter objektets temperatur via värmestrålning. Det kan bli fel avläsningar för att strålningens reflektion kommer från en kropp som har en annan emissivitet. En IR-termometer kan vara lämplig att använda när man ska mäta temperaturen på objekt som är i rörelse, vid långa avstånd eller där termoelement inte är lämpliga på grund av hög temperatur. I vårt fall så mäter vi pannväggens temperatur då vi riktar IR-termometern mot pannans vägg på andra änden.

Termoelement använder elektrisk spänning för att mäta temperaturer så det enda kravet när termoelementet kommer i direkt kontakt med det material/den omgivning som ska mätas, är att termoelementet är jordat.

## 3.3. Lönsamhet

För att uppskatta lönsamheten för en investering kan man använda sig utav flertal metoder, bland annat payback-tid, nuvärdet samt annuiteten.

### 3.3.1. Payback-tid

Payback-tiden motsvarar återbetalningstiden och den visar hur många år det tar innan investeringen är färdigbetald. Om payback-tiden är kortare än den ekonomiska livslängden är investeringen lönsam teoretiskt, däremot är det vanligt att fastställa att om payback-tiden är 2 år eller under så är investeringen lönsam. Däremot är den investering med kortast återbetalningstid bäst. Payback-tiden räknas ut enligt ekvation 38.

$$\text{Payback} - \text{tid} = \frac{\text{Grundinvestering}}{\text{Inbetalningsöverskott}} \quad \text{Ekvation 38}$$

### 3.3.2. Nuvärdesmetoden

Nuvärdet räknas ut med hjälp av nuvärdemetoden som är ett mått på investeringens lönsamhet. Investeringen är endast lönsam om nuvärdet är större än 0. Nuvärdesmetoden är en bra kalkyl gällande lönsamheten då den tar hänsyn till både ränta och ekonomisk livslängd. Nuvärdet är ett beräknat värde av investeringens framtida kassaflöde då den jämför alla in- och utbetalningar vid tidpunkten för investeringen. Alla inbetalningsöverskott diskonteras med hjälp av vald kalkylränta. Nuvärdet räknas ut enligt ekvation 39. Tabell C i ekvationen hittas i Appendix I.

$$\text{Nuvärde} = \text{Inbetalningsöverskott} \cdot \text{tabell C} - \text{Grundinvestering} \quad \text{Ekvation 39}$$

### 3.3.3. Annuitetsmetoden

Annuiteten fungerar i princip på samma sätt som nuvärdesmetoden, men metoden baseras på att alla in- och utbetalningar är lika stora annuiteter över den ekonomiska livslängden. Investeringen anses vara lönsam endast om den annuiteten är positiv. Annuiteten räknas ut enligt ekvation 40 och tabell D hittas i Appendix I.

$$\text{Annuitet} = \text{Nuvärde} \cdot \text{tabell D} \quad \text{Ekvation 40}$$

## 4. Resultat och diskussion

### 4.1. Mätdata från miljödator

I Ångcentralen finns en miljödator som registrerar utsläpp och drifttillstånd året runt. I miljö-datorn går det att få fram månadsrapporter från bland annat NO<sub>x</sub>-utsläpp. Tabell 3 nedan visar utsläppen, syrehalten och den nyttiggjorda energin för år 2017 samt 2018. I tabell 4 och tabell 5 nedan så redovisas NO<sub>x</sub>-utsläppen för varje månad för år 2017 samt 2018.



Tabell 3. Mätdata för år 2017 och 2018.

År	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [ppm]	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> -utsläpp (vid 6 % O <sub>2</sub> ) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> -utsläpp [kg]	Nyttig- gjord energi (normal drift) [MWh]
2017	60,55	124,2	10,3	174,3	41492	164702
2018	58,37	119,8	9,7	159,3	38576	170296

Tabell 4. Mätdata för år 2017.

2017 Månad	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [ppm]	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> -utsläpp (vid 6% O <sub>2</sub> ) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> -utsläpp [kg]
Januari	65,2	133,8	10,0	182,7	4409
Februari	63,5	130,3	9,7	173,2	3901
Mars	60,0	123,1	10,3	172,8	2759
April	70,4	144,5	10,4	204,7	4362
Maj	73,7	151,2	10,5	216,4	4633
Juni	52,0	106,7	11,6	170,6	1631
Juli	55,5	113,9	11,7	184,1	3701
Augusti	32,3	66,3	14,7	158,5	331
September	64,5	132,4	9,7	175,9	3955
Oktober	62,2	127,6	9,6	168,1	3669
November	66,7	136,9	9,2	174,1	4401
December	60,6	124,4	9,9	168,2	3365

Tabell 5. Mätdata för år 2018.

2018 Månad	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [ppm]	NO <sub>x</sub> -utsläpp (normal drift) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> -utsläpp (vid 6% O <sub>2</sub> ) [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> -utsläpp [kg]
Januari	60,8	124,8	9,6	164,3	3297
Februari	63,3	129,9	9,5	169,6	3859
Mars	87,0	178,5	10,4	253,0	6030
April	61,45	126,1	10,1	173,7	2245

Maj	38,3	78,6	12,8	144,2	1022
Juni	58,5	120,0	9,2	152,7	3732
Juli	55,2	113,3	8,8	139,4	3408
Augusti	53,4	109,6	9,3	140,6	3366
September	52,6	107,9	10,5	154,4	2200
Oktober	54,0	110,8	9,5	144,7	3206
November	51,9	106,5	9,1	134,4	2858
December	51,5	105,7	9,2	134,5	3302

#### 4.2. Periodiska kontroller och jämförelser

På AAK görs två periodiska kontroller per år av DGE Mark och Miljö AB och dessa mätningar omfattar panna 3 och panna 4. Syftet med mätningarna är att kontrollera utsläpp till luft enligt SFS 2013:252. Dessa mätningar utförs under två dagar och de erhållna resultaten redovisas enligt kraven som gäller för föreskrift SFS 2013:252 där det finns ett krav för panna 4 vid 6 % O<sub>2</sub>-halt. Mätningen av utsläpp till luft sker med ett registrerande kemiluminiscens instrument typ Eco Physics CLD 822. Instrumentet har ett mätområde för NO mellan 0-1000 ppm samt för NO<sub>x</sub> med ett mätområde 0-1000 ppm. Mätmetoden följer svensk standard SS-EN 14792 och har kvävgas som grundgas och nollgas.

Mätplatsen för NO<sub>x</sub> placeras före rökgasreningen i en vertikal kanal och mäts vid en normal drift med en pelletstillförsel på 1,2 kg/s samt en effekt på 21,6 MW.

Tabell 6 presenterar värden tagna den 16 april 2018 som representerar medelvärden över denna mätperiod. Resultaten är normaliserade till en temperatur på 0°C och ett tryck på 101,3 kPa normal torr gas. I tabellen så redovisas även jämförelse gentemot gällande krav för utsläpp av NO<sub>x</sub> vid förbränning med pellets.

Även rökgasflödet mäts till  $44\,200 \pm 3\,100 \text{ m}^3\text{ntg/h}$  och är normaliserad till temperaturen 0°C och trycket 101,3 kPa torr gas (ntg). Rökgasflödet bestämdes med en mikromanometer och S-pitorör.

Tabell 6. Mätdata från den 16 april 2018 gjorda av DGE Mark och Miljö AB.

	<b>Panna 4</b> (normal drift)	Panna 4 (vid 6 % O <sub>2</sub> )	SFS 2013:252	Mätosäkerhet (% av mätvärde)
<b>NO<sub>x</sub></b> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	110,9 ± 8,8	144,9 ± 14	300	± 8
<b>O<sub>2</sub></b> [vol-%]	9,5 ± 0,5	-	-	± 5

Andelen kvävedioxider, NO<sub>2</sub> av den totala NO<sub>x</sub>-halten mättes också av det externa bolaget. Resultaten kan ses i tabell 7.

**Tabell 7. Andel kväveoxider uppmät av DGE Mark och Miljö AB.**

NO <sub>x</sub> [ppm]	53,4
NO <sub>2</sub> [ppm]	1,4
Andel NO <sub>2</sub> av NO <sub>x</sub> [%]	2,7

### 4.3. Pellets specifikation

Specifikationerna i följande tabeller kommer från RISE, Research Institutes of Sweden, som utför analyser på AAKs pellets. I tabell 8 nedan så ses specifikationerna för pellets på prov i inlämningstillstånd samt på torrt prov från en leverans i maj 2018. I

Tabell 9 visas specifikationer på inaskat prov vid 550 °C och värdena representerar askans

Krympningstemperatur, SST [°C]	Ej detekterbar
Deformationstemperatur, DT [°C]	1460
Halvsfärtemperatur, HT [°C]	1490
Flyttemperatur, FT [°C]	>1500

smältförlopp i oxiderande atmosfär i grader celcius. Kvävehalten i denna last pellets på prov i inlämningstillstånd ligger

på 0,03 vikt-% vilket är väldigt lågt då man strävar efter en kvävehalt under 0,05 i vikts-%. Vikts-% anges i g/kg bränsle.

**Tabell 8. Pellets specifikation på prov i inlämningstillstånd samt torrt prov**

	Prov i inlämningstillstånd	Torrt prov
Total fukt [vikt-%]	6,6	-
Aska [vikt-%]	0,4	0,5
Svavel, S [vikt-%]	<0,02	<0,02

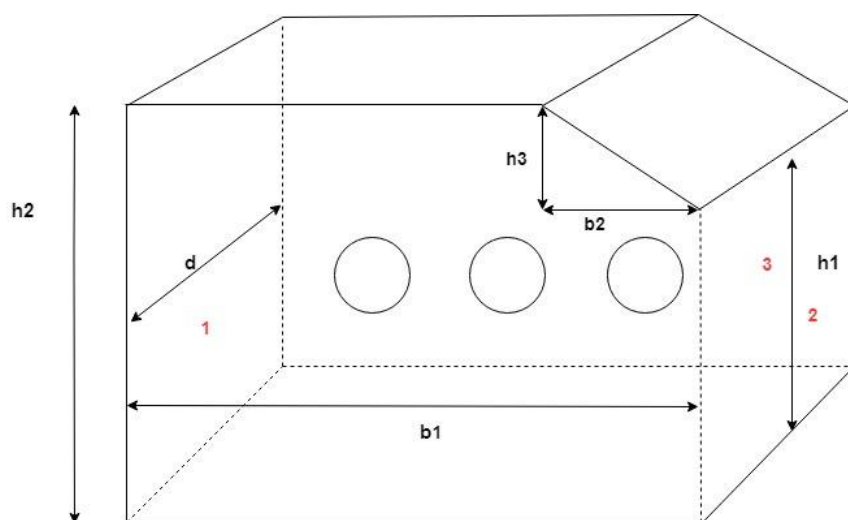
Kol, C [vikt-%]	46,9	50,2
Väte, H [vikt-%]	6,3	6,0
Kväve, N [vikt-%]	0,03	0,04
Kalorimetriskt värmevärde vid konstant volym [MJ/kg]	18,74	20,07
Effektivt värmevärde vid konstant tryck [MJ/kg]	17,36	18,76
Finfraktion <3, 15 mm [vikt-%]	0,1	-
Andel 8mm [antal per 100 pellets]	<4	-
Flyktiga ämnen [vikt-%]	-	79,8

Tabell 9. Pellets specifikation på inaskat prov vid 550 °C.

Krympningstemperatur, SST [°C]	Ej detekterbar
Deformationstemperatur, DT [°C]	1460
Halvsfärtemperatur, HT [°C]	1490
Flytttemperatur, FT [°C]	>1500

#### 4.4. *Temperaturmätningar*

Rökgastemperaturerna mättes med hjälp av en IR-termometer och ett termoelement av typ K. Temperaturmätningarna skedde först vid normal last, dvs. vid ett ångflöde på 28,8 ton/h och en last på cirka 24 MW. Efter att en lämplig mätposition hade lokaliserats så varierades lasten med en låg last, en hög (max) last samt en medel last. Till en början testades 3 olika mätpositioner, två på första plan den tredje mätpositionen på plan två, dvs. en trappa upp. Mätpositionerna är utplacerade i figur 14 med siffrorna 1, 2 och 3.



Figur 14. Lämpliga mätpositioner på pannan markerade med 1, 2 samt 3 i rött.

Resultaten för mätningarna vid de olika positionerna redovisas i Tabell 10. Mätvärdet vid position tre var väldigt litet och det var svårt mäta med IR-kameran, vilket resulterade i mätning med endast termoelement vid mätposition 3.

Tabell 10. Mätvärden för IR-termometern samt termoelementet vid de tre olika positionerna med en last på ca 24 MW.

Last: ca 24 MW	Temperaturer	
	IR-termometer [°C]	Termoelement [°C]
1	1150	850-900
2	1170-1250	1180-1200
3	-	950-1000

Efter det första mätförsöket vid de tre olika positionerna så valdes position 3 ut som mest lämplig mätposition, då temperaturintervallet var som mest passande.

I båda mätningar så visar termoelementet en längre temperatur och beror på att termoelementen påverkas av värmeutbytet som sker i pannan genom bland annat strålning och konvektion. Nästkommande försök utfördes på mätposition 3 vid en last på 14,7 MW, 26,4 MW samt 33,2 MW. I Tabell 11 presenteras mätvärdena vid de olika lasterna.

Tabell 11. Mätvärden för position 3 vid låg last, låg/medel last, medel/hög last samt hög last.

Last	14,7 MW (låg)	19,4 MW (låg/medel)	26,4 MW (medel/hög)	33,2 MW (hög/max)
Matarvattenflöde	-	32,1 t/h	35,1 t/h	34,8 t/h

O2-halt	-	12,1 %	8,1 %	8,0 %
Pellets mängd	2,9 ton/h	3,9 ton/h	5,3 ton/h	6,7 ton/h
Ångflöde	-	24,0 ton/h	31,2 ton/h	34,5 ton/h
Tryck i eldstad	-2,5 mmVp	-4,1 mmVp	-4,5 mmVp	-3,4 mmVp
Temp ånga efter ö.h.	-	379°C	388°C	388°C

I Tabell 12 nedan presenteras temperaturerna för de olika mätningarna, uppmätta med termoelementet vid mätposition 3.

Tabell 12. Temperaturer för de olika mätningarna mätta vid mätposition 3.

Mätposition 3	Temperatur, termoelement [°C]
Last: ca 14,7 MW	850-900
Last: ca 24 MW	950-1000
Last: ca 26,4 MW	900-910
Last: ca 33,2 MW	930-955

#### 4.5. Teoretiskt rökgasflöde och uppehållstid

Den teoretiska uppehållstiden kan räknas ut med hjälp rökgasflödet samt volymen på pannan. Specifika uträkningar för rökgasflödena och uppehållstiderna finns i Appendix C. I tabell 17 presenteras de uträknade rökgasflödena och uppehållstiderna för 3 olika laster.

Tabell 13. Uträknade rökgasflöden och uppehållstider.

	Rökgasflöde [m <sup>3</sup> /s]	Upphållstid [s]
Låg last (14,7 MW)	22,5	6,13
Medel last last (26,4 MW)	43,4	3,19
Hög last (33,2 MW)	56,6	2,44

#### 4.6. Mätningarnas osäkerhet

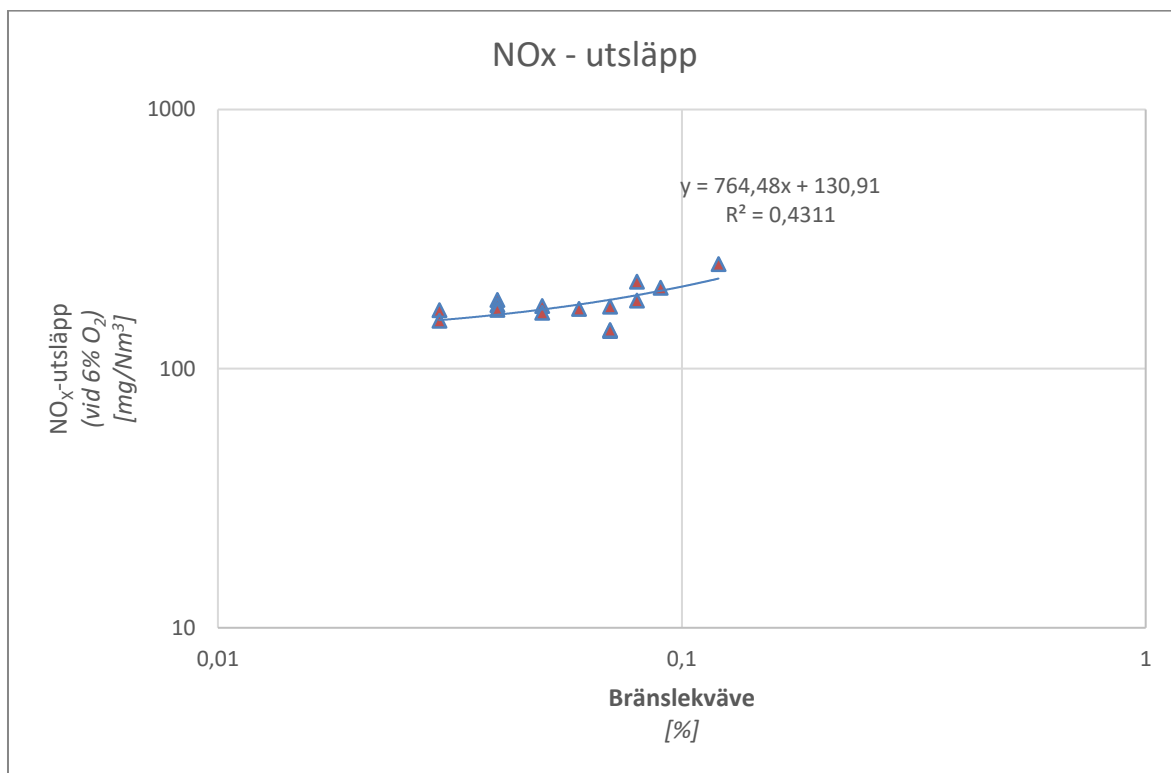
Mätningarna kan ge en hel del osäkerheter, som bland annat hur långt in i pannan man mäter med termoelementet. Det kan uppstå en del funderingar om huruvida mätningen sker för nära

pannväggen eller för nära flammen. Det framgår även en hel del osäkerheter vid reglering av lasten, då risken finns att pannan inte hunnit stabilisera sig fullständigt innan nästa last tillämpas på pannan. För att minska osäkerheten bör fler mätningar göras på pannan för att hitta rätt temperaturområde. Detta är speciellt viktigt innan projektering om man skulle vilja tillämpa

#### 4.7. Uppskattning av $NO_x$ -utsläpp med industripellets

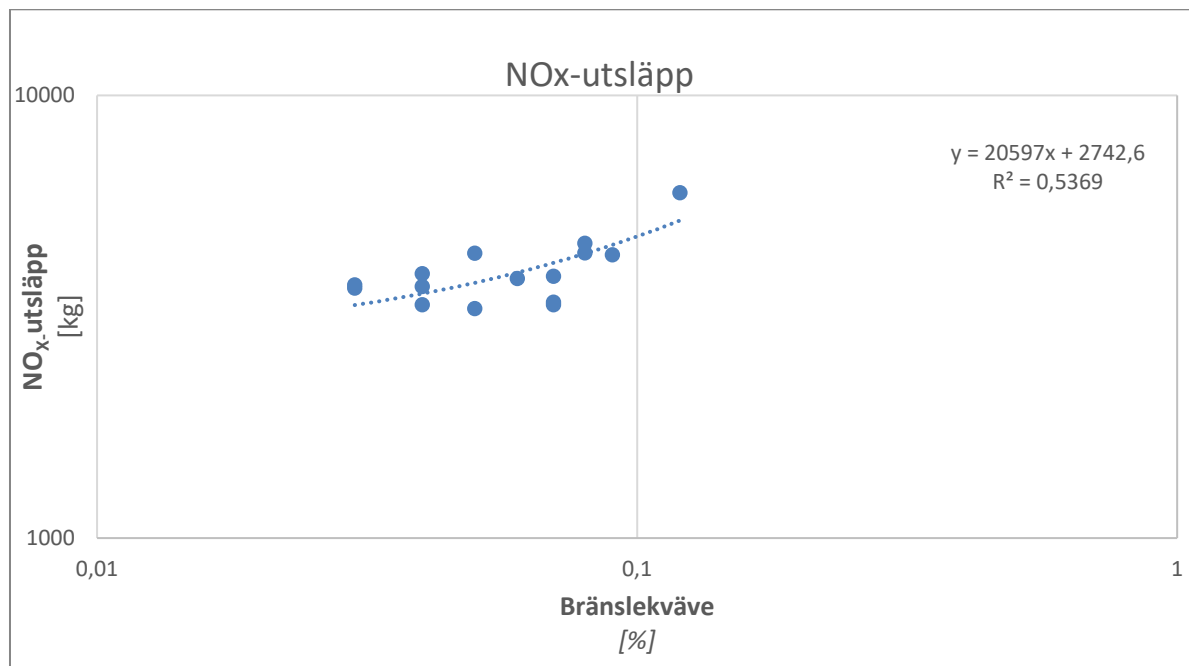
Genom att skapa en tabell där x-axeln motsvarar mängden kväve som finns i bränslet och y-axeln, även kallad för responsvariabel, motsvarar mängden  $NO_x$  som släpps ut genom skorstenen går det att få fram en linjär anpassning. Bränslekvävet motsvarar den förklarande variabeln och  $NO_x$ -utsläppet motsvarar därmed responsvariabeln.

Genom att tillämpa en linjär regression så går det att få en modell som beskriver sambandet mellan dessa två variabler. Genom att anpassa en linjär regression så kan man förutse vad man kan få för värde på  $NO_x$ -utsläppet vid en annan mängd bränslekväve. Däremot är det viktigt att ta hänsyn till osäkerheten som diskuteras i kapitel 5.5.1. Värden som ligger till grund dessa linjära anpassningar presenteras i Appendix D. Den linjära anpassningen presenteras i figur 15.



Figur 15. Linjär anpassning med avseende på bränslekväve i förhållande till  $NO_x$ -utsläpp i mg/Nm<sup>3</sup>.

För att uppskatta mängden  $NO_x$  som släpps ut i kg så skapas ett samband för att se hur mängden  $NO_x$  ökar i jämförelse till bränslekvävet. Detta illustreras i figur 16.



Figur 16. Linjär anpassning med avseende på bränslekväve i förhållande till NO<sub>x</sub>-utsläpp i kg.

#### 4.7.1. Osäkerhet vid linjära anpassningar

För att avgöra om huruvida den linjära anpassningen representerar ett bra samband så tittar man på korrelationskoefficienten. Korrelationen anger hur väl punkten ligger i förhållande till den linjära regressionen. Korrelationskoefficienten kan anta ett värde mellan -1 och +1, då negativa värden visar en negativ korrelation och ett positivt värde visar en positiv korrelation. Ju närmre 1 korrelationskoefficienten befinner sig desto bättre korrelation och vid 0 så innebär det att det inte finns någon korrelation alls.

Vi kan se i figur 15, gällande bränslekväve och NO<sub>x</sub>-utsläpp i mg/Nm<sup>3</sup> att korrelationskoefficienten, R<sup>2</sup>, är 0,4311 och gällande bränslekväve och NO<sub>x</sub>-utsläpp i kg har en korrelationskoefficient på 0,5369. Anledningen till att det linjära sambandet som visas i figur 15 har en lägre korrelation kan vara att NO<sub>x</sub>-utsläppet i mg/Nm<sup>3</sup> också beror på nyttiggjord energi och är inte endast beroende på av mängden NO<sub>x</sub> som släpps ut.

Korrelationer under 0,3 har en liten positiv linjär korrelationer och värden mellan 0,5 och 0,7 indikerar på någorlunda korrelation. Trots att korrelationskoefficienten är rätt så låg i de båda linjära anpassningarna, kan man dra någorlunda slutsatser om hur förändringar i bränslekvävet påverkar utsläppen.

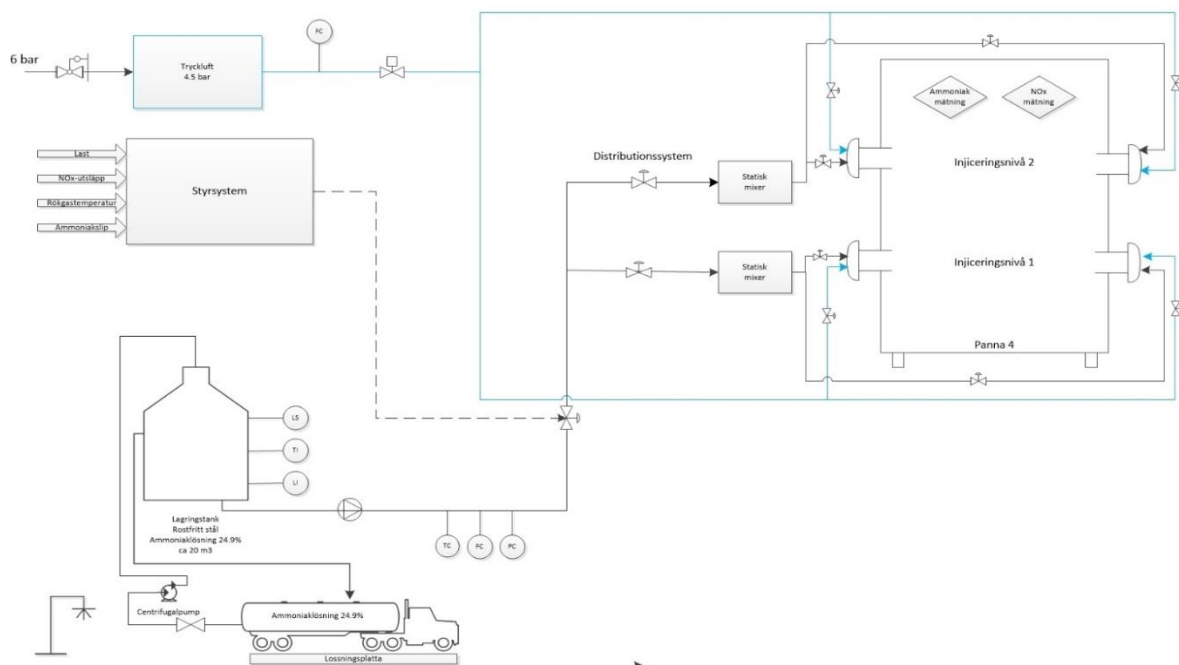
Vid extrapolation så gör man ett antagande att den linjära trenden fortsätter för värden högre än de observerade på x-axeln. Det behöver inte vara så, så därför bör man vara försiktig när man hanterar extrapolerade värden. Spridningen som tydligt ses i figurerna kan också bero på att termisk NO<sub>x</sub> och prompt NO<sub>x</sub> varierar.



## 4.8. Processutformning

Applikation av ett SNCR-system på panna 4 kräver bland annat en tank för lagring av reduktionskemikalien, pumpar som leder från tanken till injektionssystemet samt lansar och dysor som är direkt kopplade till styrsystemet. Det behövs även ventiler, regulatorer och givare. Temperaturmätningarna som är utförda på panna 4 är utförda med en IR-termometer och ett termoelement, men bör mätas noggrannare. Ett lämpligt temperaturmätningssystem bör installeras på pannan, exempelvis ett AGAM mätsystem. Efter att temperaturmätningarna har utförts med ett mer exakt mätinstrument, kan designparametrarna för installationen bestämmas.

Den förenklade processbilden som kan ses i figur 17 visar hur uppbyggnaden av ett SNCR-system skulle kunna modifieras på panna 4 på AAK. Den går även att se i ett större format i Appendix G.



Figur 17. Överblick på processchema för SNCR tillämpat på panna 4.

Figuren visar ett SNCR-system med två stycken injektionsnivåer, två statiska mixer, ett styrsystem och en lagringstank. Utöver det finns det ventiler, flödesmätare, temperaturmätare och tryckmätare. Det finns även en ammoniakmätning i pannan för att se hur mycket ammoniak som finns kvar oreagerat i pannan.

### 4.8.1. Nödvändig utrustning

För SNCR-systemet krävs olika antal komponenter och en uppskattad mängd utrusning kan ses i Tabell 14.

Tabell 14. Utrustning som krävs för SNCR systemet.

Utrustning	Beskrivning
<b>Temperaturmätning</b>	Termoelement av typ K med keramiskt hölje (4st) alternativt AGAM-temperatur mätning
<b>Utlastning</b>	Centrifugalpumpar med slangar som kan kopplas ihop med tankbilen, tryckavlastningsventil
<b>Lagringstank</b>	Cirka 20 m <sup>3</sup> , utrustad med en ventil och stege, Ammoniaksensor (2st) Nöddusch (2st) Lagringstank ammoniak (1st) Lagringstank vatten (1st) Nivåmätare (2st)
<b>Injektionssystem</b>	Isolerad rörledning Skruvpump (2st) Centrifugalpump (1st) Reglerventil (12 st) Reduceringsventil (1st) Avstängningsventil (1st) Säkerhetsventil (1st) Termometer/Manometer (8st) Flödesmätare (3st) Tryckmätare (2st) Temperaturmätare (2st)
<b>Distributionssystem</b>	Statisk mixer (2st)
<b>Injektorer</b>	Lansar med munstycke (16st) Kulventil (2st) Styrsystem (1st) Mätsystem ammoniak (1st)

#### 4.8.2. Förslag till mätutrustning och reglersystem

För att undersöka om huruvida SNCR går att tillämpa på den befintliga pannan behövs noggranna temperaturmätningar vid möjliga positioner där det går att spruta in reduktionsmedlet. Termoelementen som finns installerade vid pannväggen påverkas av strålning från flammen. Vid användning av en sugpyrometer som består av en vattenkyld lans med ett termoelement av typ K (Ni-CrNi) så påverkas inte temperaturen av strålningen från flammen. Termoelementet består av ett keramiskt hölje som skyddar mot strålning. Det som sker är att de varma rökgaserna sugas in i lansens och på så sätt mäts den verkliga temperaturen på rökgaserna. Denna metod är lämplig att använda vid bestämning av injektionspunkter.

Genom att använda ett system som beräknar en temperaturprofil vilket i sin tur reglerar vilka lansar som behövs använda vid ett visst drifttillstånd så får man en högre verkningsgrad på systemet, lägre NO<sub>x</sub> utsläpp, lägre ammoniakslip och även en mindre förbrukning av reagenset. Ett exempel på detta är som tidigare nämnt i rapporten ett AGAM-system.

#### 4.8.3. Lagring, utlastning och reduktionskemikalie

Viktigt att tänka på är att undvika utsläpp i avlopp, på marken och i vattenmiljö. Det är även viktigt att ammoniaklösningen hanteras på ett korrekt sätt då det behöver skyddas från värme, gnistor och öppen eld. Det behöver även vidtas åtgärder mot statisk elektricitet. Ammoniaklösningen bör lagras på ett svalt och en väl ventilerad plats.

Lagring av ammoniak bör ske i en tank på ca 20 m<sup>3</sup>, då detta är mest lämpligt storleksmässigt för lagring i området. Tankens insida bör vara explosions skyddat för högsta möjliga skydd och bör bestå av rostfritt stål. Tanken fylls på via en tankbil, vilket innebär att det behövs en centrifugalpump för att fylla tanken från en tankbil. Det behövs även ammoniaksensorer som mäter mängden ammoniak i tanken, flamskydd och skyddsutrustning i form av helkroppss- och ögon-duschar. Det bör också finnas ett kopplat rörsystem, ett för att fylla tanken och ett för gasåter-föring.

Det är viktigt att ständigt ta hänsyn till ammoniaklösningen i tanken och i rören, gasformig ammoniak som bildas efter förångning som ligger över vätskan i tanken och gasformig ammoniak vid läckage.

24,9%-ammoniaklösning har en fryspunkt vid -55 °C och behöver därför inte isolering eller uppvärmning av tanken, vilket måste tas hänsyn till ifall man istället väljer att använda sig utav urea.

Gällande krav för rörledningar så är ett minimumkrav att de måste vara av minst typ PN10. PN står för pression nominell vilket är en klassificeringsbeteckning och 10 är ett beteckningsnummer som indikerar ungefärligt tryck i rören, i detta fall 10 bar. Allt material och alla tillbehör kräver 3.1-certifikat. Det innebär att en leverantör som har ett 3.1-intyg intygar att produkterna som levereras lever upp till kraven i materialstandarden.

Vid applikation av ett SNCR-system så används ofta en 24,9 % ammoniaklösning och vid användning av en ammoniaklösning innebär detta en större risk än vid användning av urea och då man behöver lagras detta i en tank behöver undersöka vad som gäller enligt SEVESO lagen. Enligt SEVESO så listas endast vattenfri ammoniak och då är den lägre kravnivån 50 ton. Efter kontakt med lämplig leverantör bör det ske en kontroll med leverantörens säkerhetsdatablad och klassning, men med stor sannolikhet så har inte ammoniak i vattenlösning ingen påverkan på SEVESO-klassningen.

För att minimera antalet kemikalieolyckor så har Sverige infört Sevesodirektivet. Det omfattar åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor. Det finns krav

för en hög nivå och för en lägre nivå. Den högre kravnivån innebär att man har ett krav på en hög säkerhetsnivå då en händelse kan påverka mycket och orsaka konsekvenser. Den lägre kravnivån gäller företag som hanterar farliga kemikalier men i mindre mängder. Seveskodirektivet följer LAG 1999:381 som står för åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor samt Förordning 2015:236 och Förordning 2016:986. Förordning 2015:236 gäller åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor och Förordning 2016:986 gäller avgifter för tillsyn av åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor.

#### 4.8.4. *Styrsystem*

Styrsystemet, som reglerar mängden reduktionskemikalie, kontrolleras av en PLC vilket är ett programmerbart styrsystem som kontrollerar processen. Styrsystemet justerar injektionssystemet och justerar flödes hastigheter, aktiverar/inaktiverar injektionslansar vid förändringar i driftförhållande kan bero på temperatur, NOx koncentration, pannlasten eller pellets kvalitet.

Styrsystemet bör vara automatiskt för att snabbt kunna reagera vid förändringar i driftförhållandet då det ger ett bättre resultat. Vid haveri av det automatiska styrsystemet behövs även styrsystemet kunna regleras manuellt. Styrsystemet består av olika moduler som mäter alla flöden, blandar reagenset med processvatten och stoppar tillförsel av reagens vid driftsproblem. Man talar ofta om injektionszonmätare, IZM och beroende på hur stor pannan är så krävs 1-5 stycken IZM-moduler. IZM-modulerna är kopplade till styrsystemet samt PLC:n och svarar på signaler därifrån. Eftersom förslaget på antal injektionsnivåer är 2 stycken så behövs endast ett styrsystem för att distribuera reagenset till injektionslansarna.

I styrsystemet behövs även ammoniakdetektorer installeras som utlöser ett larm vid 400 ppm ammoniak och en automatisk avstängning av pumparna vid 800 ppm.

#### 4.8.5. *Injektionssystem och injektorer*

Panna 4 ger vissa temperaturförändringar vid jämförelse med låg last och hög last, uppemot en skillnad på 100-150 °C. På grund av detta så är det att föredra 2 injektionsnivåer som tidigare nämnt. Ju fler injektionsnivåer desto lättare blir det att injicera i rätt område. Däremot så är inte panna 4 så hög och består även av en konvektionsdel, så är bottenplan och en våning upp är att föredra som injektionsnivåer. Injektorerna bör anpassas så att injektorerna på de olika sidorna av pannan är oberoende av varandra, dvs. så att varje injektionslans kan aktiveras eller inaktiveras. Komplexiteten blir större ju fler injektionsnivåer som behövs appliceras på pannan då varje nivå behöver en temperaturprofil.

Från distributionssystemet så fortsätter reduktionsmedlet vidare till injektorerna. Injektorerna kan vara oberoende av varandra eller vara sammankopplade i grupper. Antalet injektorer som ska vara aktiva, samt vilka dessa är och vilken injektionsnivå dessa befinner sig på beror på temperaturen i pannan. Detta styr regulatorerna som i sin tur styr de olika reglerventilerna.

Tidigare nämnt så är det optimala antalet injektionsnivåer 2 stycken. För varje injektionsnivå behövs mellan 4-12 stycken injektorer i form av lansar, vilket innebär att 8-24 stycken behövs för två injektionsnivåer

Ammoniaken finfördelas innan den injiceras med hjälp av tryckluft. Trycket på vätskan och tryckluften beror på hur djup in i pannan reagenset ska penetrera samt droppstorleken. Vanligtvis ligger trycket på 3,5-4 bar vid början av injektionslansen, men eftersom det förekommer tryckförluster i styrsystemet och i rören som leder till lansarna så bör trycket ligga lite högre, uppemot 4-4,5 bar. Detta innebär att det behövs en tryckgivare. Alla delar i modulen är inrymt i ett skåp för att undvika damm, vatten och för att skydda utrustningen mot andra risker.

Munstyckena in till pannan är speciellt utformade för att anpassa en viss droppstorlek och reagensets hastighet. Varje injektionslans förekommer med en eller flera munstycken för att kunna säkerställa en jämnfördelning av reagenset in i rökgasen. Som drivmedel används tryckluft. Förslaget är att injektionslansarna är väggglansar just för att undvika slitage och korrosion som uppstår från de varma rökgaserna.

Vid mätning av NO<sub>x</sub> förekommer en fördröjning från injektion till förbränning. Detta innebär att mängden ammoniaklösning som ska sprutas in måste beräknas i förväg för att kunna ge respons vid ändrade driftsförhållande. För att undvika att mängden ammoniaklösning varierar så är en konstant basvolym applicerad som beror på det förväntade driftförhållandet. Därefter tillsätts mer reagens beroende på styrsystemets krav gällande temperatur och utsläpp.

#### 4.8.6. Rördimensionering

Det går att uppskatta rördiametern med hjälp av ekvation 41. Hastigheten som används i ekvationen är enligt tumregeln 2 m/s. Rören motsvarar det totala flödet av ammoniaklösningen (24,9%)

$$D^2 = \frac{4m}{\rho \cdot \pi \cdot v} \quad \text{Ekvation 41}$$

Rördiametern har uppskattats för industripellets med 0,2 % bränslekväve för 40, 50 respektive 60 % reduktion och redovisas i Tabell 15. För högre reduktion rekommenderas DN15 rör i stamledning då det ger en högre hastighet och mindre rör till respektive injektor.

Tabell 15. Rördiametern vid förbränning med industripellets med en halt på 0,2 % bränslekväve.

Reduktion	Rördiameter [mm]
40 %	1,6
50 %	1,8
60 %	2,0

## 4.9. Industripellets II vs. Hushållspellets A1

### 4.9.1. Industripellets

Vid tillämpning av SNCR är det av intresse att byta pelletskvalité från hushållspellets av klass A1 till industripellets av klass II. Konsekvenserna av att byta från hushållspellets till industripellets är bland annat mängden bränslekväve i pelletsen. Industripellets innehåller mer bränslekväve än hushållspellets men eftersom det inte körts på pannan tidigare så behövs kväveutsläppet predikteras. Med hjälp av de två linjära samband som anpassats i kapitel 5.5 motsvarande figur 15 och figur 16 så går det att prediktera NO<sub>x</sub>-utsläppet och resultatet presenteras i Tabell 16.

Tabell 16. Prediktion av NO<sub>x</sub>-utsläppet för industripellets med 0,2, 0,25 respektive 0,3 % bränslekväve.

<b>Industripellets</b>	<b>NO<sub>x</sub>-utsläpp</b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]	<b>NO<sub>x</sub>-utsläpp</b> [kg]	<b>NO<sub>x</sub>-utsläpp med</b> <b>SNCR 60 % reduktion</b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]
<b>0,2 % N</b>	284	82344	114
<b>0,25 % N</b>	322	94702	129
<b>0,3 % N</b>	360	107060	155

Resultaten visar tydligt att industripellets med en kvävehalt på 0,2-0,3 % inte är lämpliga att använda utan ett installerat SNCR-system då NO<sub>x</sub>-utsläppen är nära, eller överskrider begränsningsvärdet som är 300 mg/Nm<sup>3</sup>.

Tabell 20 visar även vad NO<sub>x</sub>-utsläppen blir med ett installerat SNCR system och en reduktion på 60 %. För alla tre typer av industripellets så ligger utsläppen lägre än vad de gör idag, då utsläppen för hushållspellets idag ligger på cirka 160 mg/Nm<sup>3</sup>.

Med hjälp av dessa prediktioner går det att räkna ut en approximerad miljöavgift för SNCR-systemet som redovisas i kommande kapitel.

## 4.10. Ekonomisk analys

För att utvärdera hur mycket ett SNCR system hade kostat och huruvida det är gynnsamt eller inte har en teknoekonomisk utvärdering gjorts. Den teknoekonomiska analysen utgår ifrån ett ammoniakbaserat system (24,9%) och är baserad på investering- och driftskostnader.

#### 4.11. Investeringskostnad

Investeringskostnaden inkluderar utrustningen som behövs för SNCR systemet och den specifika utrustningen som behövs kan ses i Appendix G. I tabell 21 presenteras en överblick av investeringskostnaden

Tabell 17. Utrustningskostnader för SNCR-systemet.

Utrustning	Kostnad [tkr]
AGAM-system	100
Ventiler	378
Pumpar	100
Mätsystem för utsläpp	100
Mixer	30
Mätinstrument	212
Lagringstank	1700
SNCR	380
Rörledningar PN16/DN15	300
Installation	300
Programmering	140
<b>Delkostnad</b>	3700
<b>Projektering</b>	290
<b>Total kostnad ex. oförutsedda händelser</b>	3990
<b>Oförutsedda händelser</b>	400
<b>Total investeringskostnad</b>	4400

Den totala investeringskostnaden för att installera ett SNCR-system på panna 4 beräknas kosta cirka 4,4 miljoner kronor. Kostnaderna för projektering uppskattas till cirka 8 % av delkostnaden och kostnaden av oförutsedda händelser uppskattas till cirka 10 % av den totala kostnaden.

#### 4.12. Driftskostnader

Driftskostnaden för SNCR-systemet beror till stor del på förbrukningen ammoniak. Mängden ammoniak som behövs för reducering beror på hur hög reducering man vill uppnå. I tabell 18 så presenteras ammoniakkostnaderna för 40 % reduktion, 50 % reduktion samt 60 % reduktion för klass A1 pellets samt klass I1 pellets med tre olika bränslekväve innehåll. I Appendix F redovisas alla uträkningar gällande ammoniakförbrukningen. Även driftskostnaden hittas i denna tabell. Ammoniakpriset är det pris som ligger ute på världsmarknaden enligt ICIS [32]. Driftskostnaden ökar desto högre reduktion man vill uppnå, samt desto högre kvävehalt det finns i bränslet.

Övrig del av driftskostnaden består av underhåll och reparation. I alla fall bortses kostnader för drift av bland annat pumpar och mixers.

Tabell 18. Ammoniakkostnad för 40, 50 respektive 60 % reduktion samt driftskostnaden/år för SNCR-systemet.

<b>Driftskostnad – Ammoniäklösning</b>			
<b>Ammoniäkkostnad [kr/ton]</b>	2800 kr (världsmarknadspris)		
	<b>40 % red [tkr]</b>	<b>50 % red [tkr]</b>	<b>60 % red [tkr]</b>
<b>A<sub>1</sub> pellets</b>	175,3	219,2	263,2
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,2% N)</b>	308,9	388,7	467,9
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,25% N)</b>	353,1	441,6	529,8
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,3% N)</b>	388,7	485,5	582,7
<b>Driftskostnad – Underhåll och reparation (5 % av totala investeringskostnaden)</b>			220 tkr

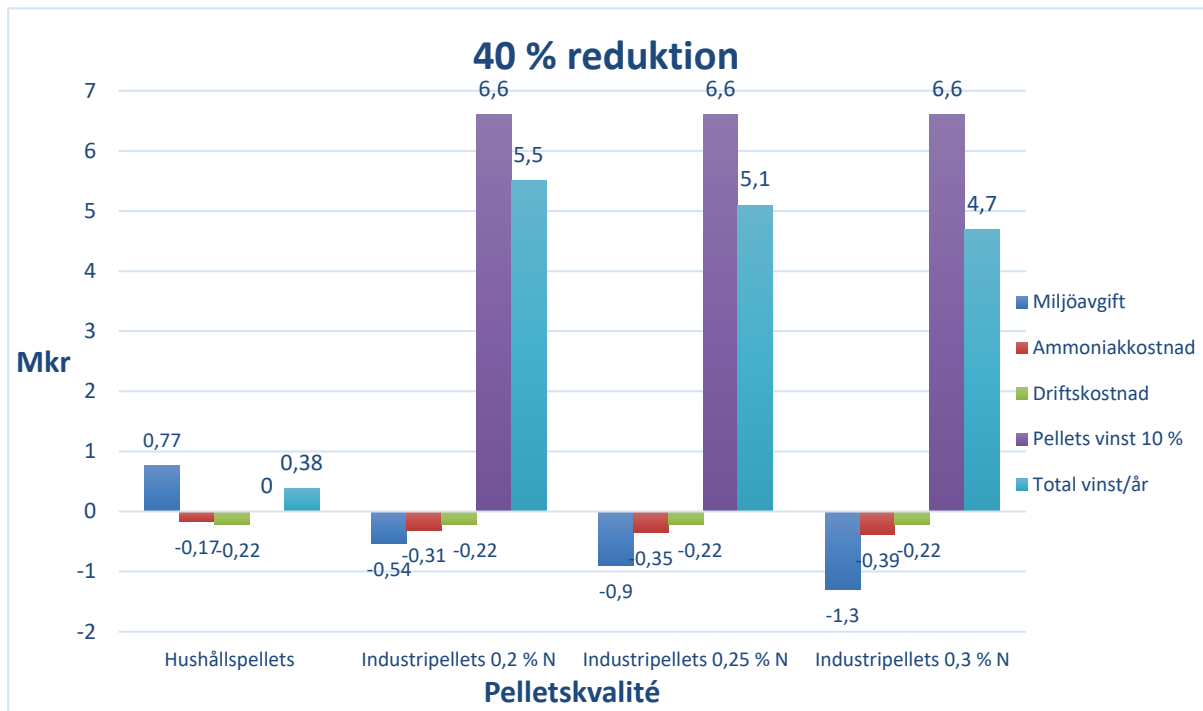
Underhåll och reparation av SNCR-systemet uppskattas till cirka 5 % av den totala investeringskostnaden och resulterar i en kostnad på 220 tkr.

#### **4.13. Ekonomisk analys**

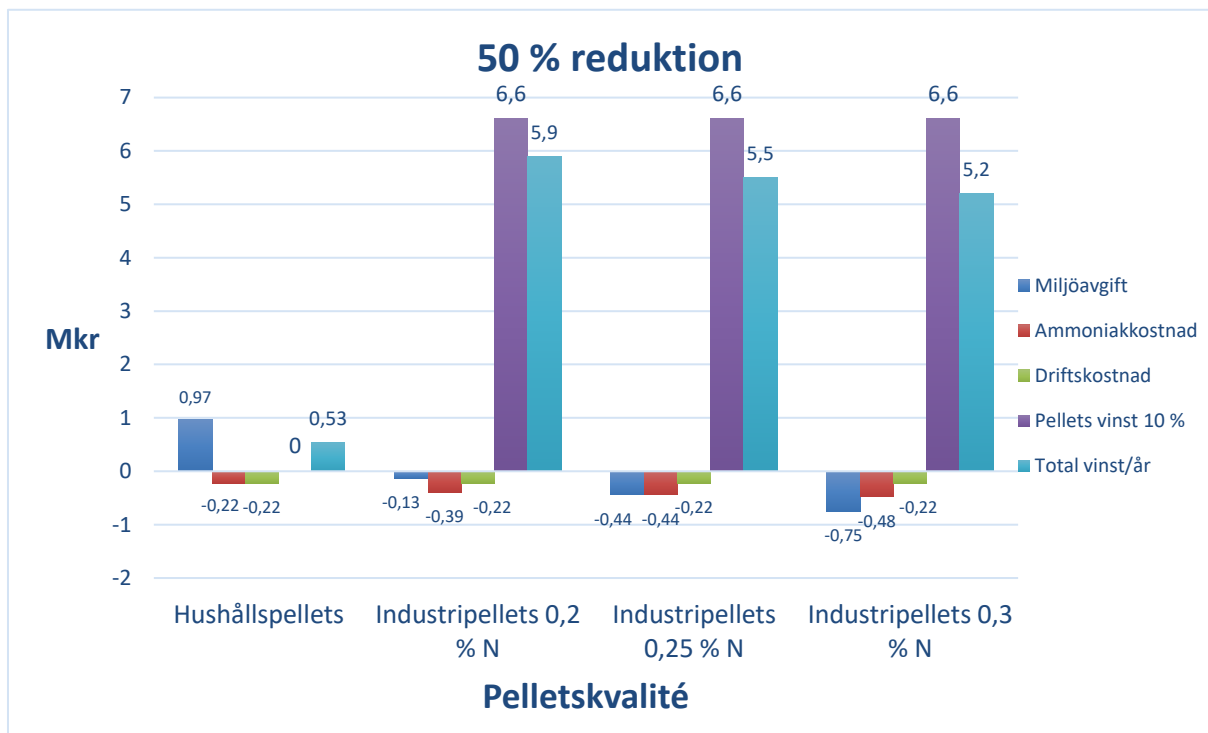
I figur 18 presenteras kostnader samt vinst för 40 % NO<sub>x</sub>-reduktion och baseras på ett 10 % billigare pelletspris. Gällande A<sub>1</sub>, hushållspelletsen får man tillbaka pengar istället för att betala en miljöavgift, vilket inte gäller för industripelletsen. Däremot sparar man 6,6 miljoner kronor om pelletspriset för industripelletsen skulle vara 10 % billigare än nuvarande hushållspelletsen.



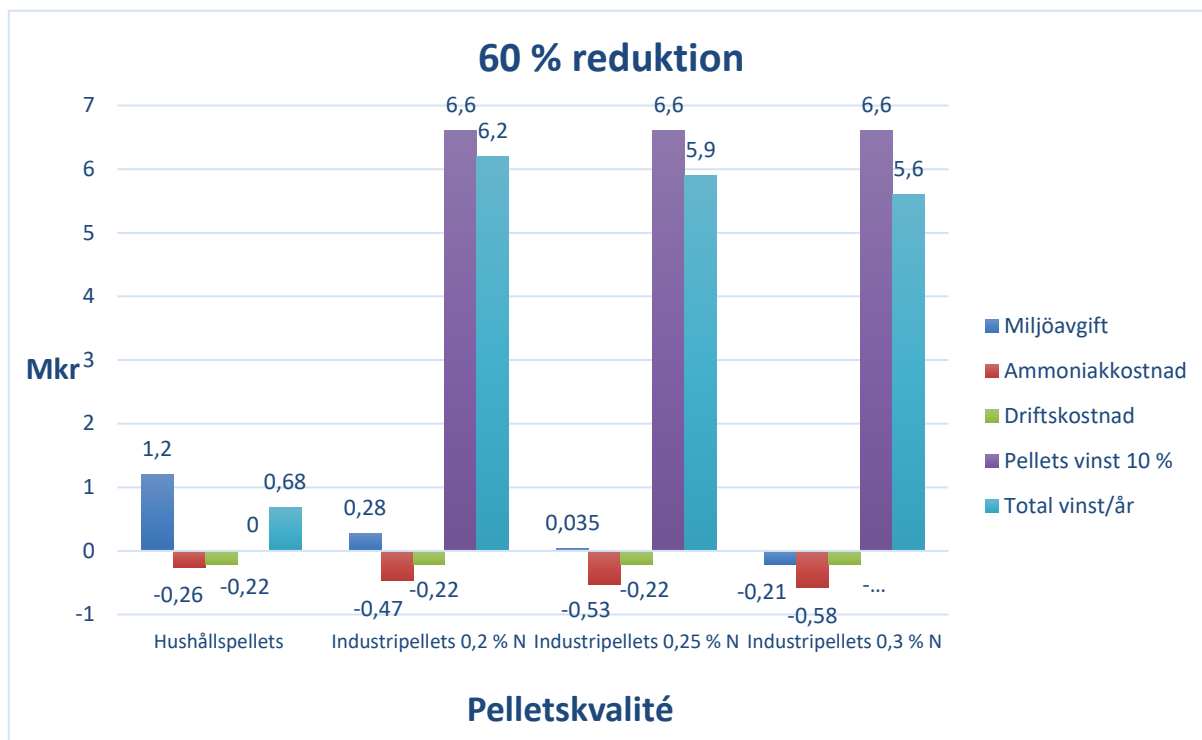
I figur 19 och figur 20 presenteras kostnader och vinsten, vid 50 respektive 60 % reduktion.



Figur 18. Ekonomisk analys för 40 % reduktion.



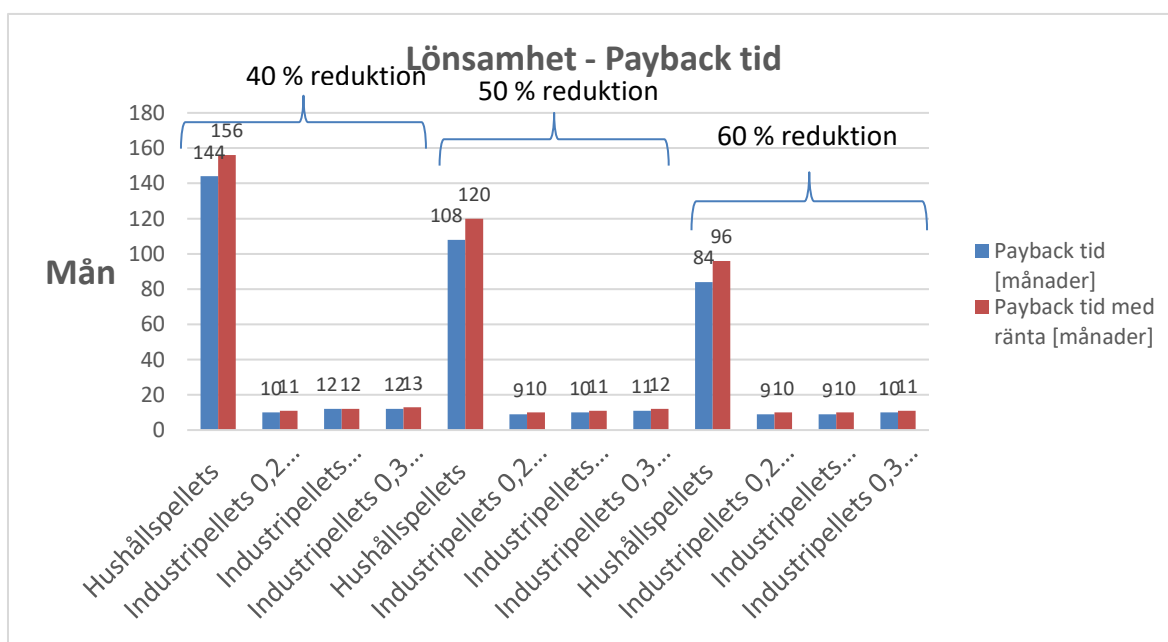
Figur 19. Ekonomisk analys för 50 % reduktion.



Figur 20. Ekonomisk analys för 60 % reduktion.

Utifrån resultaten för både, 40, 50 respektive 60 % NO<sub>x</sub>-reduktion kan man dra samma slutsats för alla tre fall. Med ett SNCR system går man i vinst, oavsett vilken pelletsqualitäté som används. Däremot är vinsten för hushållspelletts väldigt låg i jämförelse för vinsten som fås vid byte av pellets till industripelletts.

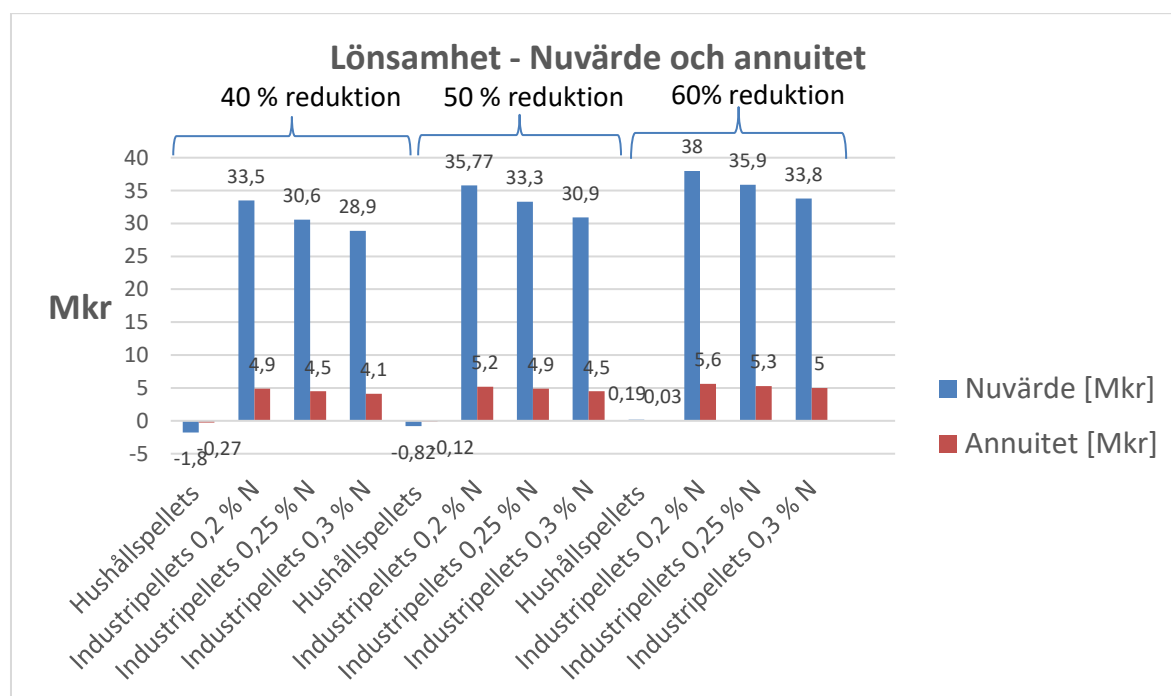
Figur 21 presenterar lönsamheten med avseende på Payback tid, med och utan ränta för 40, 50 samt 60 % reduktion.



Figur 21. Payback-tiden för hushållspelletts och industripelletts med bränslekväve på 0,2, 0,25 samt 0,3 %.

Resultaten som presenteras visar att payback-tiden för hushållspelletts endast är teoretiskt lönsamma, då både 40, 50 och 60 % reduktion resulterar i en payback-tid som är mindre än den ekonomiska livslängden på 15 år, 12, 9 respektive 7 år vid en payback-tid utan ränta. Däremot är det inte att föredra då man anser att det endast är lönsamt i praktiken om payback-tiden är 2 år eller kortare. Industripelletts, oavsett vilken mängd bränslekväve, resulterar i en payback-tid som är mindre än 2 år och är därmed lönsam.

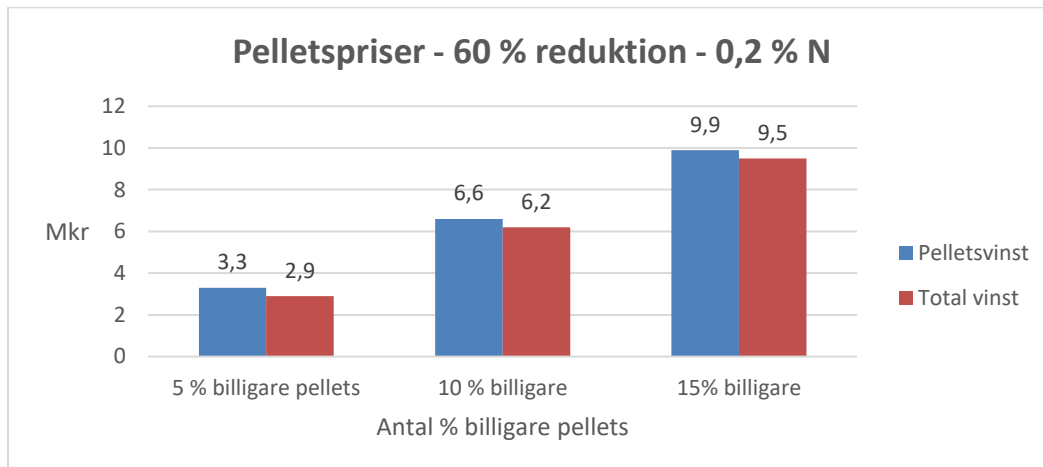
Figur 22 nedan presenterar nuvärdet och annuiteten för de olika typerna av pellets. Resultaten visar att nuvärdet och annuiteten för hushållspelletts är negativ för 40 respektive 50 % reduktion. Vid 60 % reduktion är både nuvärdet och annuiteten större än noll, vilket enligt teorin innebär att investeringen är lönsam. Däremot är de väldigt låga, 190 tkr respektive 30 tkr, vilket inte innebär någon större vinst. Användning av industripelletts, som tidigare nämnt, resulterar i en besparing på 6,6 miljoner kronor, vilket i sin tur resulterar i ett högt nuvärde och en hög annuitet. Vilken investering som är mest lönsam väljs enligt högst nuvärde och annuitet, och vilket rimligtvis sker vid 60 % reduktion. Däremot ligger nuvärdet och annuiteten relativt jämt mellan de tre olika typerna av industripelletts och vid de olika reduktionerna. Anledningen till att 40, 50 och 60 % reduktion undersöks är för att försäkra sig om att investeringen är lönsam även om det inte finns möjlighet att reducera upp till 60 %.



Figur 22. Nuvärde och annuitet för hushållspelletts och industripelletts med bränslekväve på 0,2, 0,25 samt 0,3 %.

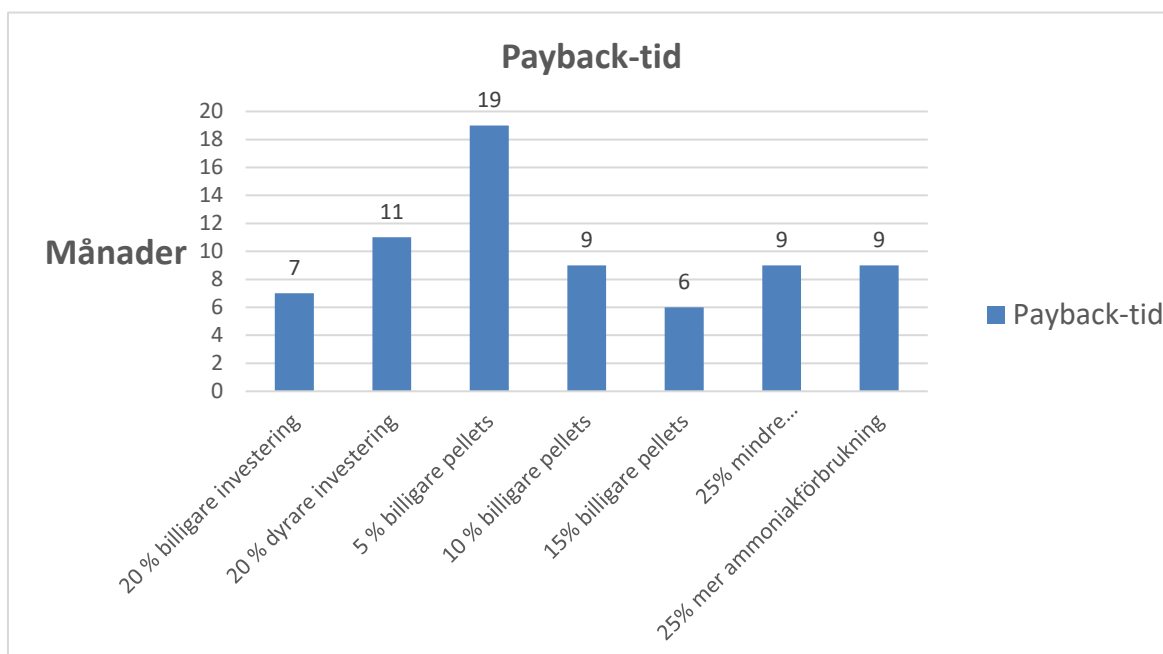
#### 4.14. Känslighetsanalys

Figur 23 visar hur mycket man kan gå i vinst genom att köpa in billigare pellets. Fallet gäller för 0,2 % bränslekväve vid 60 % reduktion. För varje 5 % billigare pelletsen kan köpas in för, går man i vinst med 3,3 miljoner kronor.



**Figur 23. Känslighetsanalys på pelletspriset**

Det är även av intresse att undersöka vad som händer med payback-tiden då grundinvesteringen skulle vara 20 % billigare, samt 20 % dyrare. Även ammoniakförbrukningen bör det göras en känslighetsanalys på för att se huruvida investeringen påverkas om man skulle behöva använda mer eller mindre ammoniak. Tillsammans med dessa två känslighetsanalyser så vill man även se hur payback-tiden påverkas av pelletspriset. Detta presenteras i figur 24. Känslighetsanalysen visar att lönsamheten inte påverkas något märkvärdigt utan payback-tiden hålls fortfarande stadigt under 2 år.



**Figur 24. Payback-tiden för billigare/dyrare investering, mer/mindre ammoniakförbrukning samt reducering av pelletspris.**

## 5. Slutsats

Temperaturmätningarna som gjordes på panna 4 gav varierande temperaturer beroende på vilken mätposition man mätte vid. Mätningarna visar att position 3 är den mest lämpliga mätpunkten för att hitta ett optimalt temperaturområde. Mätningarna i kapitel 3 som är gjorda med termoelementet ger det lämpligaste temperaturintervallet vid position 3 då position 1 har för lågt temperaturintervall och position 2 ett för högt temperaturintervall. Vid jämförelse av en last med 24 MW respektive 26,4 MW visar den lägre lasten en högre temperatur i jämförelse med den högre lasten. Detta kan bland annat bero på att vid reglering av last, från låg till medel (14,7 MW till 26,4 MW) så har inte pannan riktigt hunnit stabilisera sig och därmed ligger temperaturen lite lägre för medellasten, 26,4 MW, i förhållande till försöket med en last på 24 MW då lasten inte hade reglerats innan försöket.

Mätningarna som har gjorts på panna 4 ger en indikation om att ett lämpligt temperaturintervall går att hitta i pannan, däremot behövs noggrannare temperaturmätningar. I avsnitt 2.9 så nämns Acoustic Gas Temperature Measurement (AGAM) och är väldigt fördelaktigt. Vid installation av ett sådant instrument så får man en bättre koll på temperaturprofilen och det blir lättare att tillämpa SNCR-anpassningen då temperaturprofilen tydligt visar var det är lämpligt att injicera reduktionskemikalien. Reduktionskemikalien i denna undersökning baseras på ammoniaklösning (24,9%).

Detta för att ammoniak är mer effektiv än vad urea är och man kan uppnå högre reduktion, samt att risken för korrosion och beläggningar är mindre.

Lönsamheten är av intresse att undersöka då det är viktigt att investeringen och kostnaderna per år är lönsamma för AAK. Enligt uträkningar så är inte investeringen lönsam vid användning av hushållspelletts av klass A1 trots att det blir en vinst varje år. Vinsten är väldigt låg vilket resulterar i att investeringen inte är lönsam. Användning av hushållspelletts ger en lång payback-tid samt är nuvärdet och annuiteten båda är negativa vid 40 och 50 % reduktion. Vid 60 % reduktion är nuvärdet och annuiteten positiva på grund av en högre vinst per år men är däremot väldigt låga och har fortfarande en lång payback-tid (7 år).

Eftersom att förbränning med industripelletts ligger högre än begränsningsvärdet så måste man installera en NO<sub>x</sub> rening. Vid byte till industripelletts ökar lönsamheten betydligt och den största delen av vinsten beror på att industripelletts är billigare än hushållspelletts. Eftersom att industripelletts inte har körts tidigare finns ingen specifikation på hur mycket kväve bränslet innehåller. Därför behövdes en linjär funktion skapas utifrån specifikationer från hushållspellettsen. Detta är en grov uppskattning och ger endast en överblick om hur lönsamheter kan komma att se ut. Enligt kalkylering från uppskattningar som gjorts så kan man spara cirka 3,3 miljoner kronor för varje 5 % billigare pelletspriset blir. Detta gäller vid 60 % reduktion med ett bränslekväve på 0,2 %.

Känslighetsanalysen som gjordes på pelletspriset, ammoniakförbrukningen samt grundinvesteringen påverkar inte märkvärdigt lönsamheten för investeringen. Känslighetsanalysen är viktig för

att fastställa att investeringen ändå är lönsam vid förändringar, då många värden är predikterade och inte alls säkra.

En av flera förutsättningar för att byta från hushållspelletts av klass A1 till industripelletts av klass I1 är att installera NO<sub>x</sub> rening för att ligga under miljövillkoret. Klass A1 pellets klarar idag villkorsvärdet, men vid byte av industripelletts hamnar man på gränsen eller strax över.

Vid installering av ett SNCR-system och samtidigt byte av hushållspelletts till industripelletts gynnas både miljön och AAK. Utsläppen blir lägre än vad de är idag, samtidigt som payback-tiden är under 2 år.

### **5.1. Framtida arbete**

Den efterföljande optimeringsfasen kräver en väldigt noggrann mätning av temperaturprofilen för att definiera vilka lansar som ska användas vid de olika driftsförhållande. Lanserna drivs beroende på temperaturen och ställs sedan in vid vilken temperatur växlingen mellan de olika lansarna och nivåerna ska ske. Därefter så måste inställningar av tryck, flödes hastigheten på vätskorna samt tryckluften/ånga anpassas enligt driftsförhållanden.

Efter att systemet varit i gång kan man installera en liten katalysator i slutet av pannan som håller ammoniakslipen låg. Här kan en uträkning göras i efterhand för att se om katalysatorn blir gynnsam för processen.

Det hade även varit en fördel att utföra en CFD (Computational Fluid Dynamics) beräkningsvätskedynamik och en CKM (Chemical Kinetic Modeling) kemisk kinetisk modellering då varje panna har en unik temperatur- och flödesprofil. CFD modellen kan förutse reaktioner och reaktionshastigheter i pannan och kan uppskatta NO<sub>x</sub>-reduktionen. Denna modell kan även prediktera olika designparametrar som NSR, injektionspunkter, optimal droppstorlek samt fördelning.

För att ytterligare minska NO<sub>x</sub>-utsläppen är det intressant att undersöka möjligheten att byta ut brännarna till låga NO<sub>x</sub> brännare. Dessa brännare går att få skraddarsydd för att anpassa pannan.

Det är även viktigt att ta hänsyn till industripelletsen och vidare undersöka hur de påverkar pannan. Pellets av klass A1 har en lägre specifikation gällande askhalt i pellets ( $\leq 0,7$  vikts-%) och industriella pellets har en högre specifikation ( $\leq 1$  vikts-%), vilket innebär att risken för att industripelletts innehåller mer aska är befintlig. Industripelletts är av sämre kvalitet och har inte testats på pannan förut så effekterna av att köra industripelletts på panna 4 är okända.

I nuläget har enligt svensk standard, SS-EN ISO 17225-2:2014, har industripelletts samma specifikation för värmevärde vilket inte säger något om industripelletts har bättre eller sämre värmevärde. Ett högre värmevärde ger mer energi och mindre pellets behöver eldas i jämförelse med en pelletssort med lägre värmevärde, då mer pellets behöver förbrännas för att få ut samma

mängd energi. Eftersom industripelletsen är av sämre kvalitet finns risken att de har ett lägre värmevärde, vilket resulterar i mindre energi och att man behöver elda mer pellets för att uppnå samma mängd energi som vid användning av A1 pellets. Detta i sin tur påverkar driftskostnaden då mer pellets går åt vid förbränning.

## Referenser

- [1] "Riksdagen, Miljö- och Energidepartementet," 14 06 1990. [Online]. Available: [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-1990613-om-miljoavgift-pa-utslapp-av\\_sfs-1990-613](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-1990613-om-miljoavgift-pa-utslapp-av_sfs-1990-613). [Använd 19 11 2018].
- [2] "Riksdagen, Miljö- och Energidepartementet," 08 05 2013. [Online]. Available: [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2013252-om-stora\\_sfs-2013-252](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2013252-om-stora_sfs-2013-252). [Använd 19 11 2018].
- [3] AAK SWEDEN AB.
- [4] L. Greiner, Interviewee, *Project Manager Special Projects*, AAK. [Intervju].
- [5] T. P. A. TPS, Karlshamn.
- [6] R. I. o. S. A. RISE, *Resultat*, 2018.
- [7] "Energihandbok, förbränning," [Online]. Available: <http://www.energihandbok.se/forbranning>. [Använd 10 03 2019].
- [8] "Bioenergiportalen," 11 01 2012. [Online]. Available: <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1416&m=878>. [Använd 13 11 2018].
- [9] Naturvårdsverket, "Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering," 02 03 2005. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8196-9.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [10] "Energikunskap, Biobränslen," [Online]. Available: <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Fornybar-energi/Biobransle/>. [Använd 10 03 2019].
- [11] "Environmental Protection Agency, Fuel Oil Combustion," [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fnoxdoc.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [12] Nationalencyklopedin, "Nationalencyklopedin," [Online]. Available: <http://www.ne.se/ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/energitathet>. [Använd 13 11 2018].
- [13] "Environmental Protection Agency, Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled," [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fnoxdoc.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [14] I. Allied Environmental Technologies, "AlenTec," [Online]. Available: <https://www.alentecinc.com/>. [Använd 19 11 2018].
- [15] P. K. Ron Zevenhoven, "Control of pollutants in flue gases and fuel gases," 2002.
- [16] SMHI, "SMHI," 23 01 2012. [Online]. Available: <http://www.smhi.se/reflab/om-luftforeningar/luftforeningar/kvavedioxid-1.19620>. [Använd 19 11 2018].
- [17] I. Lövin och E. Abresparr, "Regeringen, Lagrådsremiss," 02 02 2017. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/48fe53/contentassets/033bd3e0a16a4d088e20c6e6b5d6b3d3/ett-klimatpolitiskt-ramverk-for-sverige.pdf>. [Använd 19 11 2018].



- [18] "Naturvårdsverket, De svenska miljömålen," [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8619-0.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [19] Jernkontoret, "Energihandbok, Brännarteknik," [Online]. Available: <http://www.energihandbok.se/brannarteknik/>. [Använd 10 03 2019].
- [20] Fortum, "Fortum, Combustion technologies," [Online]. Available: [https://www.fortum.com/sites/g/files/rkxjap146/files/documents/performance\\_services\\_combustion\\_technologies2\\_en\\_1.pdf](https://www.fortum.com/sites/g/files/rkxjap146/files/documents/performance_services_combustion_technologies2_en_1.pdf). [Använd 10 03 2019].
- [21] "Yara, SCR," [Online]. Available: <https://www.yara.se/miljoframjande-losningar-och-kemikalier/nox-reduktion-for-stationara-anlaggningar/scr-sncr-eller-hybridssystem/scr-teknik/>. [Använd 10 03 2019].
- [22] "Environmental Protection Agency, Selective Catalytic Reduction," [Online]. Available: [https://www3.epa.gov/ttn/ecas/docs/SCRCostManualchapter7thEdition\\_2016.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/ecas/docs/SCRCostManualchapter7thEdition_2016.pdf). [Använd 10 03 2019].
- [23] "Yara, SNCR," [Online]. Available: <https://www.yara.se/miljoframjande-losningar-och-kemikalier/nox-reduktion-for-stationara-anlaggningar/scr-sncr-eller-hybridssystem/sncr-system/>. [Använd 10 03 2019].
- [24] F. Holmberg, "Holmberg," 2 02 2014. [Online]. Available: <http://www.holmberg.se/upload/product/files/sds-ammonia-solution-249-eng-2014-02-06---703.pdf>. [Använd 17 12 2018].
- [25] I. Cervantes-Delgado, "Cervantes Delgado," 6 1 2015. [Online]. Available: <http://www.cervantes-delgado.com/images/PDF/products/SDS/SDS-Urea-Solution-40-Industrial.pdf>. [Använd 17 12 2018].
- [26] "Yara, Ammoniaklösning," [Online]. Available: <https://www.yara.se/miljoframjande-losningar-och-kemikalier/nox-reduktion-for-stationara-anlaggningar/reduktionsmedel-for-nox-kontroll/ammoniaklosning/>. [Använd 02 03 2019].
- [27] "Mehldau & Steinfath Umwelttechnik GmbH, SNCR Process," [Online]. Available: [https://www.ms-umwelt.de/wp-content/uploads/downloads/denox/en/SNCR-Best\\_Available\\_Technology\\_for\\_NOx\\_Reduction\\_in\\_Waste\\_To\\_Energy\\_Plants.pdf](https://www.ms-umwelt.de/wp-content/uploads/downloads/denox/en/SNCR-Best_Available_Technology_for_NOx_Reduction_in_Waste_To_Energy_Plants.pdf). [Använd 10 03 2019].
- [28] "Environmental Protection Agency, Selective Noncatalytic Reduction," [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttn/ecas/docs/SNCRCostManualchapter7thEdition2016.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [29] L. Karlson, Interviewee, *Sales Manager, Yara*. [Intervju].
- [30] Pentronic, "Pentronic, Termoelement teori," [Online]. Available: <https://pentronic.se/start/temperaturgivare/teori-om-givare/teori-om-termoelement.aspx>. [Använd 02 03 2019].
- [31] "Nordtech, IR-temperaturfatkta," [Online]. Available: <https://www.nordtec.se/fakta-matteknik/ir-temperatur>. [Använd 10 03 2019].
- [32] O. Wallberg, Interviewee, [Intervju].
- [33] "Palgo, formelsamling," [Online]. Available: [http://www.palgo.se/uploads/userfiles/files/FORMELSAMLING\\_ver2-32\(1\).pdf](http://www.palgo.se/uploads/userfiles/files/FORMELSAMLING_ver2-32(1).pdf). [Använd 10 03 2019].

- [34] "Naturvårdsverket, Lathund," [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-4438-9.pdf>. [Använd 10 03 2019].
- [35] "Naturvårdsverket, Rökgasflödesberäkning," [Online]. Available: <http://naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/energi/kvaveoxidavgiften/kvaveoxidavgift-berakning-rokgasflode.pdf>. [Använd 10 03 2019].

## Appendix A – Omvandling från ppm till mg/Nm<sup>3</sup>

Omvandling från ppm till mg/Nm<sup>3</sup>-

Från miljödatorm i Ångcentralen fås utsläppen i ppm men eftersom att begränsningar och riktvärden är benämnda med enheten mg/Nm<sup>3</sup>, så används denna enhet för enkelhetens skull vid jämförelse av olika värden.

Enheter ppm avser volymsppm och ppm står för *parts per million*, dvs. miljondelar och är oberoende av tryck och temperatur [33].

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ ml}}{1 \text{ m}^3}$$

Vid omvandling av ppm till mg/Nm<sup>3</sup> använder man sig av volymen vid 1 mol ideal gas vid 1 atm och 0 °C enligt formel x. Detta är på grund av att "Nm<sup>3</sup>" står normal kubikmeter, och syftar på volymen gas som får plats i en kubikmeter vid 0 °C och 1 atm tryck. Den molära volymen av en ideal gas kan räknas ut genom att tillämpa den allmänna gaslagen enligt följande ekvation:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{1 \text{ mol} \cdot 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 273,15 \text{ K}}{101\,325 \text{ Pa}} = 0,022413 \text{ Nm}^3$$

Genom att dividera molvikten för NO<sub>x</sub> med volymen, V, som räknats ut i ekvation X så kan man räkna ut utsläppet med enheten mg/Nm<sup>3</sup>.

Eftersom att NO<sub>x</sub> är en blandning av kväveoxider så kan molmassan vara svår att definiera, däremot så är mängden NO<sub>2</sub> störst och NO oxiderar till NO<sub>2</sub> i atmosfären, där av så behandlas NO<sub>x</sub>-utsläppen som NO<sub>2</sub>. Vid omvandling av NO<sub>x</sub> i ppm till mg/Nm<sup>3</sup> är molmassan  $M_{NO_2} = 46,0 \text{ g/mol}$ .

$$1 \text{ ppm NO}_x = \frac{M_{NO_x}}{V} = \frac{46,0}{0,022413} = 2052 \frac{\text{g}}{\text{Nm}^3} = 2,052 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

## Appendix B – Syrekonzentration normalisering

Den senaste miljölagstiftningen kräver att alla förorenade koncentrationer normaliseras till det referensvärde för syre som är angivet i lagen [34].

Mätvärdena som är tagna från NO<sub>x</sub>-datoren fås vid normal drift och vid jämförelse med SFS 2013:253, Förordning om stora förbränningsanläggningar, måste syrekonzentrationen normaliseras till 6 % O<sub>2</sub> som gäller för fast bränsle, i detta fall pellets. Omvandlingen är baserad på att det finns cirka 20,95 % syre i luften och kan ses i ekvation 42. O<sub>2</sub> är mängden uppmätt syrekonzentration i %. För att sedan få ett riktigt värde av utsläppen multipliceras rökgasutsläppen med O<sub>normaliserad</sub>.

$$O_{normaliserad} = \frac{20.95 - O_2 \text{ (referens värde)}}{20.95 - O_2 \text{ (uppmätt värde)}} \quad \text{Ekvation 42}$$

## Appendix C – Teoretisk bestämmelse av rökgasflödet samt uppehållstiden

Vid beräkning av en ett teoretiskt rökgasflöde så görs antagandet att torr luft innehåller syre (O<sub>2</sub>), kväve (N<sub>2</sub>), koldioxid (CO<sub>2</sub>) och argon (Ar).

Torr luft beräknas innehålla 0,2095 volymdelar syre och 0,7905 volymdelar kväve som i sin tur motsvarar 1 mol O<sub>2</sub> per 3,77 mol N<sub>2</sub> och totalt 4,77 mol torr luft.

Beräkningen av det teoretiska rökgasflödet antar också att kol, väte och svavel bildar koldioxid, vattenånga och svaveldioxid vid fullständig förbränning.

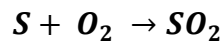
Luftbehovet och rökgasmängderna går att beräkna vid stökiometrisk förbränning med hjälp av bränslets elementarsammansättning [35]. Elementarsammansättningen för pellets som används på panna 4 i Ångcentralen redovisas i Tabell 19. Elementarsammansättningen är baserad på ett uttag av torrt prov samt prov i inlämningstillstånd.

**Tabell 19. Bränslets elementarsammansättning.**

	Prov i inlämningstillstånd	Torrt prov
Aska [vikt-%]	0,4	0,5
Total fukt [vikt-%]	6,6	-
Svavel, S [vikt-%]	<0,02	<0,02
Kol, C [vikt-%]	46,9	50,2
Väte, H [vikt-%]	6,3	6,0
Kväve, N [vikt-%]	0,03	0,04
Syre, O (differens) [vikt-%]	-	43

De olika reaktionerna vid stökiometrisk förbränning kan ses i de tre följande ekvationerna. De representerar förbränning av kol, väte och svavel.





## Ekvation 45

Beräkningen av det stökiometriska syrebehovet utgår från ekvation 43, ekvation 44 och ekvation 45. Här behövs även volymen för ideal gas användas i förbränningsberäkningar. Denna volym är uträknad i appendix A och är  $0,022413 Nm^3$ .

Det första steget är att omvandla innehållet av elementärsammansättningen i pelleten till mol. Aska medverkar inte i förbränningen eller i rökgaserna så det kommer inte att inkluderas i uträkningar.

Nästa steg är att räkna ut syrebehovet med hänsyn till de stökiometriska ekvationerna som vis. Viktigt att poängtera är att syret som finns tillgängligt i bränslet vill reducera mängden luft som behövs för förbränning. Vatten reagerar inte med syre och kväve kan anses vara inert. Eftersom att halten svavel är  $<0,02$  vikts-% vid pellets specifikationer är så är inte detta inkluderat i beräkningarna.

Syrebehovet för respektive ämne (kol, väte, syre) räknas ut genom att ta ämnets vikts-% dividerat med molvikten för respektive ämne.

$$\text{För kol gäller följande: } \frac{50,02 \cdot 10}{12,01} = 47,8$$

$$\text{För väte gäller följande: } \frac{6 \cdot 10}{2,016} = 30,0$$

$$\text{För syre gäller följande: } \frac{43 \cdot 10}{32,0} = 13,4$$

Ämne	Vikts-% [g/kg]	Bränsle		Syrebehov
		Molvikt	mol/kg bränsle	O <sub>2</sub>
Kol, C	50,2	12,01	47,8	47,8
Väte, H <sub>2</sub>	6,0	2,016 (H <sub>2</sub> )	30,0	15,0
Syre, O <sub>2</sub>	43,0	32,00 (O <sub>2</sub> )	13,4	-13,4
Kväve, N <sub>2</sub>	0,04	28,01 (N <sub>2</sub> )	0,014	
Vatten, H <sub>2</sub> O	?	18,016		
Svavel, S	<0,02	32,0	-	-
Totalt				49,4

Eftersom cirka 79 % av luften består av kväve ingår detta också i förbränningen och bör räknas ut:

$$N_{2,luft} = 3,77 \cdot O_{2,behov} = 3,77 \cdot 49,4 = 186,2$$

		Rökgaser		
Ämne	Bränsle [mol/kg bränsle]	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Kol, C	47,8	47,8		
Syre, O <sub>2</sub>	13,4			
Väte, H <sub>2</sub>	30,0		30,0	
Kväve, N <sub>2</sub>	0,014			0,014
N <sub>2</sub> i luft, tot				186,214

### Luftbehov, torr luft

Vid stökiometrisk förbränning är den mängd torr luft som behövs enligt följande ekvation:

$$L_{0,torr} = (\sum O_2 + 3,77 \cdot \sum O_2) \cdot \frac{22,413}{1000} = (49,4 + 186,2) \cdot 0,022413 = 5,28 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

### Luftbehov, fuktig luft

I den tidigare nämnda ekvationen så är luftbehovet baserat på torr luft, med en sammansättning på 20,95 % O<sub>2</sub> och 79,05% N<sub>2</sub>. Däremot så är luften som finns tillgänglig i atmosfären alltid fuktig och om man ska ta hänsyn till denna fuktighet så behöver man bestämma partialtrycket för vattenånga.

Är luftens temperatur och den relativa fuktigheten känd så kan det aktuella partialtrycket för vattenånga ( $p_{wl}$ ) räknas ut med hjälp av fysikaliska tabeller över vattenångans maximitryck.

Vid en relativ fuktighet på 60 % och en temperatur på 20° C är det aktuella partialtrycket för vattenånga,  $p_{wl} = 1,4 \text{ kPa}$

Därmed blir behovet för fuktig luft,  $L_{0,fuktig}$  följande:

$$L_{0,fuktig} = \frac{101,3 \cdot L_{0,torr}}{101,3 - p_{wl}} = \frac{101,3 \cdot 5,28}{101,3 - 1,4} = 5,35 \frac{\text{Nm}^3 \text{ fuktig luft}}{\text{kg bränsle}}$$

Stökiometrisk mängd torr rökgas samt stökiometrisk mängd fuktig rökgas

$$G_{0,torr} = (N_{2,luft} + 0,014 + 47,8) \cdot 0,022143 = 5,18 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

$$G_{0,fuktig} = R_{0,torr} + 30 \cdot 0,022143 = 5,84 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Stökiometrisk mängd	Nm <sup>3</sup> /kg
Luftbehov, torr luft, $L_{0,torr}$	5,28

Luftbehov, fuktig luft, $L_{0,fuktig}$	5,35
Torr rökgas, $G_{0,torr}$	5,18
Fuktig rökgas $G_{0,fuktig}$	5,84

Verklig mängd torr rökgas samt verklig mängd fuktig rökgas

För att få en fullständig förbränning behöver man ett överskott av luft och överskottet beror på hur eldstaden ser ut och vad pannan utsätts för belastning. Enligt 2017 års rapport så är syrehalten 10 % för panna 4. I tabell x

$$m = 1 + \frac{G_{0,torr}}{L_{0,torr}} \cdot \frac{O_{2,torr}}{21 - O_{2,torr}}$$

$$G_{torr} = G_{0,torr} + L_{0,torr} (m - 1)$$

$$G_{fuktig} = G_{0,fuktig} + L_{0,fuktig} (m - 1)$$

Verklig mängd	Nm <sup>3</sup> /kg
Luftfaktor, $m$	1,89
Verklig mängd torr rökgas, $G_{torr}$	9,88
Verklig mängd fuktig rökgas, $G_{fuktig}$	10,60

Det fuktiga rökgasflödet görs om enligt följande ekvation:

$$R_{fuktig} = \frac{\text{Bränslemängd}}{3600 \frac{s}{h}} \cdot 640 \frac{kg}{m^3} \cdot 10,60 \frac{Nm^3}{kg}$$

Vid låg last, 14,7 MW så är tillförd bränslemängden cirka 2,9 ton pellets/h och detta innebär att det fuktiga rökgasflödet är  $5,46 \frac{Nm^3}{s}$

Vid medel last, cirka 26,4 MW så är tillförd bränslemängd 5,3 ton pellets/h vilket innebär att det fuktiga rökgasflödet är  $9,99 \frac{Nm^3}{s}$

Vid en hög last, cirka 33,2 MW är tillförd bränslemängd 6,7 ton pellets/h vilket innebär att det fuktiga rökgasflödet är  $12,63 \frac{Nm^3}{s}$



	Rökgasflöde [Nm <sup>3</sup> /s]
Låg last	5,46
Medel last	9,99
Hög last	12,63

Som tidigare nämnt i Appendix A så gäller Nm<sup>3</sup> vid standardtillstånd, d.v.s. vid 0 °C och 1 atm. Vid användning av allmänna gaslagen, ekvation x, går det att omvandla rökgasflödena till  $\frac{m^3}{s}$ . Det ena tillståndet motsvarar standardtillståndet, det andra motsvarar pannans tillstånd och trycken antas vara samma ( $P_1=P_2$ )

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Temperaturerna vid låg last, medel last och hög last kan ses i ekvation x och behövs för att räkna om rökgasflödet.

	Rökgastemperatur [°C]
Låg last	850
Medel last	910
Hög last	950

$$R_{fuktig} (\text{låg last}) = \frac{(850+273)}{273} \cdot 5,46 = 22,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R_{fuktig} (\text{medel last}) = \frac{(910+273)}{273} \cdot 9,99 = 43,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R_{fuktig} (\text{hög last}) = \frac{(950+273)}{273} \cdot 12,63 = 56,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

	Rökgasflöde [m <sup>3</sup> /s]
Låg last	22,5
Medel last	43,3
Hög last	56,6

Den teoretiska uppehållstiden räknas ut med hjälp det fuktiga rökgasflödet,  $R_{fuktig}$  och pannans volym enligt ekvation x. Pannans volym är enligt tidigare uträkningar 138 m<sup>3</sup>.

$$t = \frac{V}{R_{fuktig}}$$

$$t_{\text{låg last}} = \frac{138}{22,5} = 6,13 \text{ s}$$

$$t_{\text{medel last}} = \frac{138}{43,3} = 3,19 \text{ s}$$

$$t_{\text{hög last}} = \frac{138}{56,6} = 2,44 \text{ s}$$

## Appendix D – Rördimensionering

Det går att uppskatta rördiametern med hjälp av ekvation 46. Hastigheten,  $v$ , som används i ekvationen är enligt tumreglen 2 m/s. Massflödet fås från Appendix F. Densiteten för ammoniaklösningen är  $907 \text{ kg/m}^3$ .

$$D^2 = \frac{4\dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot v}$$

**Ekvation 46**

Rördiametern har uppskattats för industripellets med 0,2 % bränsleväve för 40, 50 respektive 60 % reduktion och redovisas i tabell 24. För högre reduktion rekommenderas DN15 rör i stamledning då det ger en högre hastighet och mindre rör till respektive injektor.

**Tabell 20. Rördiametern vid förbränning med industripellets med en halt på 0,2 % bränsleväve.**

<b>Reduktion</b>	<b>Rördiameter [mm]</b>
40 %	1,6
50 %	1,8
60 %	2,0

## Appendix E – Linjära anpassningar

De linjära anpassningarna är baserade på värden från 2017 och 2018 och kan ses i tabell 25 nedan.

**Tabell 21. Värden till de linjära anpassningarna.**

<b>Bränslekväve</b> <i>[vikts-%]</i>	<b>NO<sub>x</sub>-utsläpp</b> <b>(vid 6% O<sub>2</sub>)</b> <i>[mg/Nm<sup>3</sup>]</i>	<b>NO<sub>x</sub>-utsläpp</b> <i>[kg]</i>
0,03	168,1	3669
0,03	152,7	3732
0,04	184,1	3701
0,04	175,9	3955
0,04	168,2	3365
0,05	174,1	4401
0,05	164,3	3297
0,06	169,6	3859
0,07	140,6	3408
0,07	139,4	3366
0,07	173,2	3901
0,08	182,7	4409
0,08	216,4	4633
0,09	204,7	4362
0,12	253	6030

## Appendix F – Mängd reduktionskemikalie

NOX-utsläppen år 2017 för panna 4 var 159(≈160) mg/Nm<sup>3</sup> och begränsningsvärdet är 300 mg/Nm<sup>3</sup>. Eftersom att reningsgrader för SNCR är cirka 40-60% så kommer tre olika fall att utvärderas. Reduktion av NOx med 40-, 50, respektive 60% .

Tidigare i rapporten är det nämnt att 2 mol NOX kan reduceras med 2 mol ammoniak eller 1 mol urea.

Vid reduktion av 1 kg NOX, räknat i NO<sub>2</sub>, så behöver man 1,5 kg ammoniak (24,5%). Däremot som tidigare nämnt i rapporten krävs det en större mängd reduktionskemikalie för att uppnå en bra reduktion.

Det går att definiera NSR, normaliserat stökiometriskt förhållande, som verkligt molförhållande och teoretiskt stökiometrisk förhållande. Ett högt NSR ger en större mängd ammoniak som behövs för injicering och därmed en hög reduktionsgrad. Ekvationen nedan beskriver NSR där  $SR_T$  är 1 för ammoniak och  $SRT$  står för teoretiskt stökiometrisk förhållande. Molmassan för NO<sub>x</sub> beräknas som molmassan för NO<sub>2</sub> och är  $46,0 \frac{kg}{kmol}$  och för ammoniak är molmassan  $17,03 \frac{kg}{kmol}$ . Det torra rökgasflödet är  $10,36 \frac{Nm^3}{s}$

$$NSR = \frac{n_{NH_3}/n_{NOx}}{SR_T}$$

$$\dot{M}_{ammoniak} = \dot{M}_{NOx} \cdot NSR \cdot \eta_{NOx}$$

$$\dot{M}_{NOx} = \frac{R_{torr} \cdot C_{NOx,in}}{M_{NO_2}}$$

$$\dot{m}_{ammoniak} = \dot{M}_{ammoniak} \cdot M_{ammoniak}$$

$$\dot{m}_{ammoniaklösning (24,9 \%)} = \frac{\dot{m}_{ammoniak}}{C_{ammoniaklösning 24,9 \%}}$$

Tabell 22. Beteckningar och betydelser för uträkningarna av rökgasflödet.

Beteckning	Betydelse
$\dot{M}$	Molflöde, ammoniak [mol/s]
NSR	Normaliserad stökiometrisk ratio
$\eta$	Reduceringsgrad [%]
$R_{torr}$	Rökgasflöde (torr) [Nm <sup>3</sup> /s]
$M$	Molmassa [kg/kmol]
$n_{ammoniak}$	Antal mol
$C$	Koncentration [vikts-%]
$\dot{m}$	Massflöde [kg/s]

Tabell 23. Mängden reduktionskemikalie för hushållspellet.

<b>Hushållspellet A1</b>			
<b>Reduceringsgrad</b> [%]	40	50	60
<b>Normaliserad stökiometrisk ratio</b> [NSR]	2		
<b>NO<sub>x</sub>-koncentration in, <math>C_{NOx,in}</math></b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]	159		
<b>Molflöde NO<sub>x</sub>, <math>\dot{M}_{NOx}</math></b> [mol/s]	0,036		
<b>NO<sub>x</sub>-koncentration ut, <math>C_{NOx,ut}</math></b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]	95,4	79,5	63,6
<b>Massflöde ammoniak,</b> $\dot{m}_{ammoniak}$ [kg/s]	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
<b>Massflöde ammoniaklösning,</b> $\dot{m}_{ammoniaklösning}$ [kg/s]	0,0020	0,0025	0,0030
<b>Drifttid</b> [timmar/år]	8760	8760	8760
<b>Mängd ammoniaklösning</b> [ton/år]	62,6	78,3	94,0

Tabell 24. Mängden reduktionskemikalie för industripellets.

	0,2 % N			0,25 % N			0,3 % N		
<b>Reduceringsgrad</b> [%]	40	50	60	40	50	60	40	50	60
<b>Normaliserad stökiometrisk ratio</b> [NSR]	2			2			2		
<b>NO<sub>x</sub>-koncentration in, C<sub>NO<sub>x</sub>,in</sub></b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]	284			322			360		
<b>Molflöde NO<sub>x</sub>, <math>\dot{M}_{NO_x}</math></b> [mol/s]	0,064			0,073			0,081		
<b>NO<sub>x</sub>-koncentration ut, C<sub>NO<sub>x</sub>,ut</sub></b> [mg/Nm <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> ]	170	142	114	193	161	129	216	180	144
<b>Massflöde ammoniak, <math>\dot{m}_{ammoniak}</math></b> [kg/s]	8,7·10 <sup>-4</sup>	1,1·10 <sup>-3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>	9,9·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	1,1·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,7·10 <sup>-3</sup>
<b>Massflöde ammoniaklösning, <math>\dot{m}_{ammoniaklösning}</math></b> [kg/s]	0,0035	0,0044	0,0053	0,0040	0,0050	0,0060	0,0044	0,0055	0,0066
<b>Drifttid</b> [timmar/år]	8760			8760			8760		
<b>Mängd ammoniaklösning</b> [ton/år]	110,3	138,8	167,1	126,1	157,7	189,2	138,8	173,4	208,1

Tabell 25. NO<sub>x</sub>-utsläpp för hushållspelletts samt predikterade värden för industripellets.

	Utsläpp av NO <sub>x</sub> i kg			
	Ingen reduktion	40 % red [kg/år]	50 % red [kg/år]	60 % red [kg/år]
<b>A<sub>1</sub> pellets</b>	38576	23150	19290	15430
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,2% N)</b>	82340	49400	41200	32900
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,25% N)</b>	94700	56800	47300	37900
<b>I<sub>1</sub> pellets (0,3% N)</b>	107000	64200	53500	42800

## Appendix G – Ekonomisk analys

Tabell 26. Kostnadsuppskattning för utrustning till SNCR.

Utrustning	Antal [st]	Pris/st [kr]	Total kostnad [kr]	Övrigt
Termoelement	0	4000	0	
AGAM-system	1	100000	100000	Uppskattad
Skruvpump	2	25000	50000	
Reduceringsventil	1	10000	10000	
Avstängningsventil	1	10000	10000	
Säkerhetsventil	1	15000	15000	
Reglerventil	12	25000	300000	
Centrifugalpump (lossning)	1	50000	50000	
Statisk mixer	2	15000	30000	
Lansar med munstycke	16	15000	240000	
Kulventil	2	10000	20000	
Styrssystem	1	50000	50000	
Mätsystem NOx	0	100000	0	Befintlig antas funka
Mätsystem ammoniak	1	100000	100000	
Reduceringsventil	1	15000	15000	
Termometer/Manometer	8	1000	8000	
Flödesmätare	3	15000	45000	
Tryckmätare	2	15000	30000	
Temperaturmätare	2	2000	4000	
Ammoniaksensor	2	25000	50000	
Nöddusch	2	20000	40000	
Lagringstank NH <sub>4</sub> OH	1	1700000	1700000	20m <sup>3</sup> + 2bar designtryck
Lagringstank vatten	1	50000	50000	
Nivåmätare	2	20000	40000	
Rörledningar PN16/DN15	100	3000	300000	Varierande dimensioner
Elinstallation			250000	
Programmering	29	4000	140000	
Apparatinstallation			50000	
<b>Delkostnad</b>			<b>3697000</b>	

<b>Engineering/Projektering</b>	295760	8 % av delkostnad
<b>Total kostnad</b>	3992760	
<b>Oförutsedda händelser</b>	399276	10 % av total kostnad
<b>Total kostnad</b>	4392036	

Tabell 27. Lönsamhet vid byte av pellets till industripellets.

<b>Pellets</b>			
<b>Pris idag [Mkr]</b>	66,3		
<b>I1 antal % billigare än A1</b>	5	10	15
<b>Vinst [Mkr]</b>	3,3	6,6	9,9

Tabell 28. Driftskostnad för ammoniaklösning (24,9%) samt underhåll och reparation, kostnad för miljöavgiften och mängd nyttiggjorde nergi redovisas i denna tabell.

<b>Driftskostnad – Ammoniaklösning</b>			
<b>Ammoniakkostnad [kr/ton]</b>	2800 kr (världsmarknadspris)		
	<b>40 % red [tkr]</b>	<b>50 % red [tkr]</b>	<b>60 % red [tkr]</b>
<b>A1 pellets</b>	175,3	219,2	263,2
<b>I1 pellets (0,2% N)</b>	308,9	388,7	467,9
<b>I1 pellets (0,25% N)</b>	353,1	441,6	529,8
<b>I1 pellets (0,3% N)</b>	388,7	485,5	582,7
<b>Driftskostnad – Underhåll och reparation (5 % av kapitalkostnaden)</b>	Ca 220 tkr		
<b>Miljöavgift</b>			
<b>Tillgodoföringsbelopp (2018)</b>	8,41		
<b>NOx-avgift [kr/kg]</b>	50		
<b>Nyttiggjord energi (2018)</b>	170300		

Tabell 29. Lönsamhet vid användning av hushållspelletts vid 40 %, 50 % respektive 60 % reduktion.



<b>Fall 1 – A1 pellets</b>	<b>40 % reduktion</b> <i>[tkr]</i>	<b>50 % reduktion</b> <i>[tkr]</i>	<b>60 % reduktion</b> <i>[tkr]</i>
<b>Miljöavgift</b> <i>[tkr]</i>	770	965	1200
<b>Ammoniakkostnad</b> <i>[tkr]</i>	-1705	-220	-265
<b>Driftskostnad</b> <i>[tkr]</i>	-220	-220	-220
<b>Total vinst</b> <i>[tkr]</i>	380	525	675
<b>Investeringskostnad</b> <i>[Mkr]</i>	4,4	4,4	4,4
<b>Investeringsberäkning</b>			
<b>Pay-Back utan ränta</b> <i>[år]</i>	12	9	7
<b>Pay-Back med ränta (12%)</b> <i>[år]</i>	13	10	8
<b>Nuvärde</b> <i>[tkr]</i>	-1800	-820	190
<b>Annuitet</b> <i>[tkr]</i>	-270	-120	30

Tabell 30. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,2 % bränslekväve vid 40 %, 50 % respektive 60 % reduktion.

<b>Fall 2 – I1 pellets 0,2 %</b>	<b>40 % reduktion</b>	<b>50 % reduktion</b>	<b>60 % reduktion</b>
<b>Miljöavgift</b> <i>[tkr]</i>	-540	-130	280
<b>Ammoniakkostnad</b> <i>[tkr]</i>	-310	-390	-470
<b>Driftskostnad</b> <i>[tkr]</i>	-220	-220	-220
<b>Pelletsvinst (10 % billigare)</b> <i>[tkr]</i>	6600	6600	6600
<b>Total vinst</b> <i>[Mkr]</i>	5,5	5,9	6,2
<b>Investeringskostnad</b> <i>[Mkr]</i>	4,4	4,4	4,4
<b>Investeringsberäkning</b>			
<b>Pay-Back utan ränta</b> <i>[mån]</i>	10	9	9
<b>Pay-Back med ränta (12 %)</b> <i>[mån]</i>	11	10	10

<b>Nuvärde</b> [Mkr]	33,5	35,7	38,0
<b>Annuitet</b> [Mkr]	4,9	5,2	5,6

Tabell 31. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,25 % bränslekväve vid 40 %, 50 % respektive 60 % reduktion.

Fall 3 – I1 pellets 0,25 %	40 % reduktion	50 % reduktion	60 % reduktion
<b>Miljöavgift</b> [tkr]	-900	-440	35
<b>Ammoniakkostnad</b> [tkr]	-350	-440	-530
<b>Driftskostnad</b> [tkr]	-220	-220	-220
<b>Pelletsvinst (10% billigare)</b> [tkr]	6600	6600	6600
<b>Total vinst</b> [Mkr]	5,1	5,5	5,9
<b>Investeringskostnad</b> [Mkr]	4,4	4,4	4,4
<b>Investeringsberäkning</b>			
<b>Pay-Back utan ränta</b> [mån]	12	10	9
<b>Pay-Back med ränta (12%)</b> [mån]	12	11	10
<b>Nuvärde</b> [Mkr]	30,6	33,3	35,9
<b>Annuitet</b> [Mkr]	4,5	4,9	5,3

Tabell 32. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,3 % bränslekväve vid 40 %, 50 % respektive 60 % reduktion.

Fall 4 – I1 pellets 0,3 %	40 % reduktion	50 % reduktion	60 % reduktion
<b>Miljöavgift</b> [tkr]	-1300	-750	-210
<b>Ammoniakkostnad</b> [tkr]	-390	-485	-580
<b>Driftskostnad</b> [tkr]	-220	-220	-220

<b>Pelletsvinst (10 % billigare)</b> [tkr]	6600	6600	6600
<b>Total vinst</b> [Mkr]	4,7	5,2	5,6
<b>Investeringskostnad</b> [Mkr]	4,4	4,4	4,4
<b>Investeringsberäkning</b>			
<b>Pay-Back utan ränta</b> [månader]	12	11	10
<b>Pay-Back med ränta (12 %)</b> [månader]	13	12	11
<b>Nuvärde</b> [Mkr]	28,9	30,9	33,8
<b>Annuitet</b> [Mkr]	4,1	4,5	5,0

Tabell 33. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,2 % bränslekväve vid 60 % reduktion med 5 %, 10 % respektive 15 % billigare pellets.

<b>Fall 5 – 60 % Reduktion I 0,2 % N</b>	<b>5% billigare pellets</b>	<b>10 % billigare pellets</b>	<b>15 % billigare pellets</b>
<b>Miljöavgift</b> [tkr]	280	280	280
<b>Ammoniakkostnad</b> [tkr]	-470	-470	-470
<b>Driftskostnad</b> [tkr]	-220	-220	-220
<b>Pelletsvinst</b> [Mkr]	3,3	6,6	9,9
<b>Total vinst</b> [Mkr]	2,9	6,2	9,4
<b>Investeringskostnad</b> [Mkr]	4,4	4,4	4,4
<b>Investeringsberäkning</b>			
<b>Pay-Back utan ränta</b> [mån]	19	9	6
<b>Pay-Back med ränta (12 %)</b> [mån]	21	10	7
<b>Nuvärde</b> [Mkr]	15,5	40,0	60,6
<b>Annuitet</b> [Mkr]	2,3	5,6	8,9

Tabell 34. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,2 % bränslekväve vid 60 % reduktion med 20 % billigare grundinvestering respektive 20 % dyrare grundinvestering.

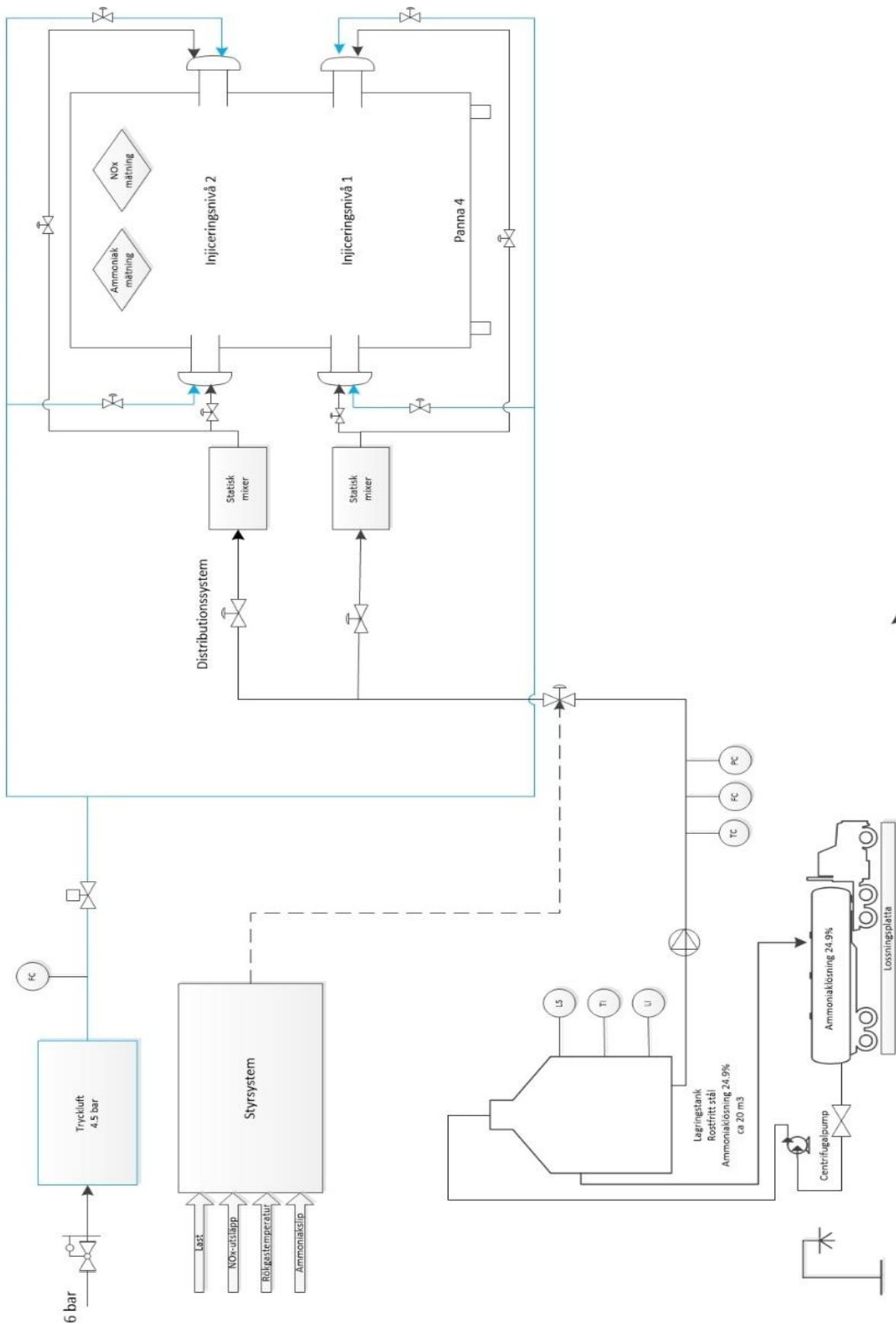
<b>Fall 6 – 60 % Reduktion II 0,2 % N</b>	<b>20% billigare grundinvestering</b>	<b>20 % dyrare grundinvestering</b>
<b>Miljöavgift</b> [tkr]	280	280
<b>Ammoniakkostnad</b> [tkr]	-470	-470
<b>Driftskostnad</b> [tkr]	-220	-220
<b>Pelletsvinst (10 % billigare)</b> [Mkr]	6,6	6,6
<b>Total vinst</b> [Mkr]	2,2	6,2
<b>Investeringskostnad</b> [Mkr]	3,5	5,3
<b>Pay-Back utan ränta</b> [månader]	7	11
<b>Pay-Back med ränta (12 %)</b> [månader]	8	12
<b>Nuvärde</b> [Mkr]	37,0	37,1
<b>Annuitet</b> [Mkr]	5,4	5,4

Tabell 35. Lönsamhet vid användning av industripellets med 0,2 % bränslekväve vid 60 % reduktion med 25 % mindre ammoniakförbrukning respektive 25 % mer ammoniakförbrukning.

<b>Fall 7 – 60 % Reduktion II 0,2 % N</b>	<b>25 % mindre ammoniak- förbrukning</b>	<b>25 % mer ammoniakför- brukning</b>
<b>Miljöavgift</b> [tkr]	280	280
<b>Ammoniakkostnad</b> [tkr]	-585	-350
<b>Driftskostnad</b> [tkr]	-220	-220
<b>Pelletsvinst (10 % billigare)</b> [Mkr]	6,6	6,6

<b>Total vinst</b> <i>[Mkr]</i>	6,1	6,3
<b>Investeringskostnad</b> <i>[Mkr]</i>	4,4	4,4
<b>Pay-Back utan ränta</b> <i>[månader]</i>	9	9
<b>Pay-Back med ränta (12 %)</b> <i>[månader]</i>	10	10
<b>Nuvärde</b> <i>[Mkr]</i>	38,9	37,1
<b>Annuitet</b> <i>[Mkr]</i>	5,7	5,4

# Appendix H – Processchema



## Appendix I – Tabell för nuvärde och annuitet

**Tabell C** - nusummefaktor,

nuvärdet av årligen återkommande lika stora belopp under n år enligt formeln,  $(1-(1+r)^{-n}) / r$

sid 1 [1]  
www.biz4you.se

År	4%	5%	6%	8%	10%	12%	15%	18%	20%	25%
1	0,9615	0,9524	0,9434	0,9259	0,9091	0,8929	0,8696	0,8475	0,8333	0,8000
2	1,8861	1,8594	1,8334	1,7833	1,7355	1,6901	1,6257	1,5656	1,5278	1,4400
3	2,7751	2,7232	2,6730	2,5771	2,4869	2,4018	2,2832	2,1743	2,1065	1,9520
4	3,6299	3,5460	3,4651	3,3121	3,1699	3,0373	2,8550	2,6901	2,5887	2,3616
5	4,4518	4,3295	4,2124	3,9927	3,7908	3,6048	3,3522	3,1272	2,9906	2,6893
6	5,2421	5,0757	4,9173	4,6229	4,3553	4,1114	3,7845	3,4976	3,3255	2,9514
7	6,0021	5,7864	5,5824	5,2064	4,8684	4,5638	4,1604	3,8115	3,6046	3,1611
8	6,7327	6,4632	6,2098	5,7466	5,3349	4,9676	4,4873	4,0776	3,8372	3,3289
9	7,4353	7,1078	6,8017	6,2469	5,7590	5,3282	4,7716	4,3030	4,0310	3,4631
10	8,1109	7,7217	7,3601	6,7101	6,1446	5,6502	5,0188	4,4941	4,1925	3,5705
11	8,7605	8,3064	7,8869	7,1390	6,4951	5,9377	5,2337	4,6560	4,3271	3,6564
12	9,3851	8,8633	8,3838	7,5361	6,8137	6,1944	5,4206	4,7932	4,4392	3,7251
13	9,9856	9,3936	8,8527	7,9038	7,1034	6,4235	5,5831	4,9095	4,5327	3,7801
14	10,5631	9,8986	9,2950	8,2442	7,3667	6,6282	5,7245	5,0081	4,6106	3,8241
15	11,1184	10,3797	9,7122	8,5595	7,6061	6,8109	5,8474	5,0916	4,6755	3,8593
16	11,6523	10,8378	10,1059	8,8514	7,8237	6,9740	5,9542	5,1624	4,7296	3,8874
17	12,1657	11,2741	10,4773	9,1216	8,0216	7,1196	6,0472	5,2223	4,7746	3,9099
18	12,6593	11,6896	10,8276	9,3719	8,2014	7,2497	6,1280	5,2732	4,8122	3,9279
19	13,1339	12,0853	11,1581	9,6036	8,3649	7,3658	6,1982	5,3162	4,8435	3,9424
20	13,5903	12,4622	11,4699	9,8181	8,5136	7,4694	6,2593	5,3527	4,8696	3,9539
25	15,6221	14,0939	12,7833	10,6748	9,0770	7,8431	6,4641	5,4669	4,9476	3,9849
30	17,2920	15,3724	13,7648	11,2578	9,4269	8,0552	6,5659	5,5168	4,9789	3,9950
40	19,7928	17,1591	15,0463	11,9246	9,7790	8,2438	6,6418	5,5482	4,9966	3,9995
50	21,4822	18,2559	15,7619	12,2335	9,9148	8,3044	6,6605	5,5541	4,9994	3,9999

**Tabell D** - annuitetsfaktor,

visar vilken serie av återkommande belopp som motsvarar ett visst belopp idag enligt formeln,  $r / (1-(1+r)^{-n})$

sid 1 [1]  
www.biz4you.se

År	4%	5%	6%	8%	10%	12%	15%	18%	20%	25%
1	1,0400	1,0500	1,0600	1,0800	1,1000	1,1200	1,1500	1,1800	1,2000	1,2500
2	0,5302	0,5378	0,5454	0,5608	0,5762	0,5917	0,6151	0,6387	0,6546	0,6944
3	0,3603	0,3672	0,3741	0,3880	0,4021	0,4164	0,4380	0,4599	0,4747	0,5123
4	0,2755	0,2820	0,2886	0,3019	0,3155	0,3292	0,3503	0,3717	0,3863	0,4234
5	0,2246	0,2310	0,2374	0,2505	0,2638	0,2774	0,2983	0,3198	0,3344	0,3718
6	0,1908	0,1970	0,2034	0,2163	0,2296	0,2432	0,2642	0,2859	0,3007	0,3388
7	0,1666	0,1728	0,1791	0,1921	0,2054	0,2191	0,2404	0,2624	0,2774	0,3163
8	0,1485	0,1547	0,1610	0,1740	0,1874	0,2013	0,2228	0,2452	0,2606	0,3004
9	0,1345	0,1407	0,1470	0,1601	0,1736	0,1877	0,2096	0,2324	0,2481	0,2888
10	0,1233	0,1295	0,1359	0,1490	0,1628	0,1770	0,1992	0,2225	0,2385	0,2801
11	0,1142	0,1204	0,1268	0,1401	0,1540	0,1684	0,1911	0,2148	0,2311	0,2735
12	0,1066	0,1128	0,1193	0,1327	0,1468	0,1614	0,1845	0,2086	0,2253	0,2684
13	0,1001	0,1065	0,1130	0,1265	0,1408	0,1557	0,1791	0,2037	0,2206	0,2645
14	0,0947	0,1010	0,1076	0,1213	0,1358	0,1509	0,1747	0,1997	0,2169	0,2615
15	0,0899	0,0963	0,1030	0,1168	0,1315	0,1468	0,1710	0,1964	0,2139	0,2591
16	0,0858	0,0923	0,0990	0,1130	0,1278	0,1434	0,1680	0,1937	0,2114	0,2572
17	0,0822	0,0887	0,0954	0,1096	0,1247	0,1405	0,1654	0,1915	0,2094	0,2558
18	0,0790	0,0856	0,0923	0,1067	0,1219	0,1379	0,1632	0,1896	0,2078	0,2546
19	0,0761	0,0828	0,0896	0,1041	0,1196	0,1358	0,1613	0,1881	0,2065	0,2537
20	0,0736	0,0802	0,0872	0,1018	0,1175	0,1339	0,1598	0,1868	0,2054	0,2529
25	0,0640	0,0710	0,0782	0,0937	0,1102	0,1275	0,1547	0,1829	0,2021	0,2510
30	0,0578	0,0650	0,0726	0,0888	0,1061	0,1241	0,1523	0,1813	0,2008	0,2503
40	0,0505	0,0583	0,0665	0,0839	0,1023	0,1213	0,1506	0,1802	0,2001	0,2500
50	0,0466	0,0548	0,0634	0,0817	0,1009	0,1204	0,1501	0,1800	0,2000	0,2500