

Systemstudie av småskalig ångbaserad kraftvärme

**Examensarbete av Fredrik Björnberg
Handledt av Mohsen Assadi och Inge Johansson**

**Utfört på Avdelningen för Kraftverksteknik
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola**

I samarbete med S.E.P. Scandinavian Energy Project

Förord

Denna rapport är en del av ett examensarbete på civilingenjörsutbildningen i maskinteknik vid Lunds Tekniska Högskola, institutionen för Energivetenskaper inom avdelningen för Kraftverksteknik.

Examensarbetet har utförts på Scandinavian Energy Project S.E.P. som är ett konsultföretag inom energi- och miljöbranschen. Arbetet har pågått mellan april och november 2006.

Först och främst vill jag tacka min handledare Inge Johansson för all hjälp under examensarbetet.

Jag vill också tacka Claes Henningsson för hjälp och granskning av rapporten. Ett stort tack till Anders Kullendorff som lät mig göra examensarbetet på S.E.P. Övrig personal på S.E.P. tackas också för ett trevligt bemötande och stor hjälpsamhet.

Jag vill också tacka professor Mohsen Assadi på Lunds Tekniska Högskola.

De utomstående som varit hjälpsamma med information tackas också, i första hand Johan Vinberg.

Sist men definitivt inte minst vill jag tacka Louise för att Du stödjer och uppmuntrar mig med allt jag gör och alltid finns där för mig!

Askim, november 2006

Fredrik Björnberg

Sammanfattning

Småskalig kraftvärme har på senare tid blivit ett mer intressant alternativ för produktion av värme och el. Tack vare att priset på el stigit kraftigt den senaste tiden är möjligheterna att göra ekonomiskt motiverade investeringar bättre än tidigare, då kraftvärmen haft svårt att konkurrera ur ekonomisk synvinkel. Det finns också uppenbara fördelar med kraftvärme sett ur miljösynpunkt varför det gynnas i den svenska politiken.

Denna rapport behandlar två konkurrerande koncept för småskalig kraftvärme, där skillnaden mellan koncepten är metoden för att framställa ånga.

- Vaporel, en teknik där mättad ånga produceras i en så kallad ”flashbox” av mättat vatten från en hetvattenpanna.
- Ångpanna med ångturbin.

Den huvudsakliga utrustning som ingår för dessa tekniker beskrivs kortfattat för att ge djupare förståelse av de termodynamiska förutsättningarna som gäller. En jämförelse mellan de två koncepten har utförts och diskuteras, primärt fokuserad på de tekniska aspekterna vid varierande förhållanden. Den processtekniska jämförelsen utfördes med hjälp av beräkningsmodeller som tagits fram och presenteras i examensarbetets bilaga. Det har också utretts metoder för att påverka elproduktionen, eftersom det är el som genererar störst intäkter för kraftvärme i dagsläget. Det presenteras också en förenklad metod att uppskatta verkningsgraden för turbiner vid sänkt last under förutsättning att de styrs med strypreglering.

Förutom de tekniska behandlas även de allmänna ekonomiska förutsättningarna för småskalig kraftvärme i Sverige. Det innefattar de politiska styrmedel som påverkar kraftvärmen, i första hand elcertifikat och beskattning. En fallstudie har också genomförts för att ge en bild av den ekonomiska situationen vid investering i kraftvärme med de nämnda teknikerna.

Examensarbetet har utförts i samarbete med konsultföretaget S. E. P. Scandinavian Energy Project.

Summary

Small-scale CHP has lately become a more interesting alternative for heat and power generation. Due to the increased electricity price, the possibilities to make economically motivated investments in CHP are greater than before when it had a hard time competing in an economical point of view. There are also obvious advantages with CHP with environmental aspects, why it is favoured by Swedish politics.

This report considers two competing concepts of small-scale CHP, where the difference between the concepts is the method of steam generation.

- Vaporel, a technique where saturated steam is generated in a so called "flashbox" of saturated water from a hot water boiler.
- Steam boiler with steam turbine.

The main equipment that constitutes these techniques is briefly explained to give a deeper understanding of the thermodynamics of the cycles. A comparison of the concepts has been performed and is discussed, primarily focused on the technical aspects at varying conditions. The technical comparison was performed with calculation models that was obtained and is presented in appendix. Methods to affect electricity production have also been investigated, since electricity generates the largest incomes at the moment. A simplified method for prediction of turbine efficiency at part load is also presented.

Except the technical, also the economical conditions for small-scale CHP in Sweden are treated. That involves the political instruments of control of CHP, primarily electrical certificates and taxes. A case study has also been performed to give a perception of the economical situation when investing in CHP with the mentioned techniques.

The master thesis has been performed in cooperation with the consulting company S.E.P. Scandinavian Energy Project.

Innehållsförteckning

1 Inledning	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte	8
1.3 Metod	8
1.4 Avgränsningar	9
1.5 Klargöranden	9
2 Kraftvärme	10
2.1 Användning	11
2.2 Miljöpåverkan	12
3 Ekonomiska förutsättningar för kraftvärme	13
3.1 Konkurrenssituation	14
3.2 Ekonomiska och miljömässiga styrmedel	15
3.2.1 Handel med utsläppsrätter	15
3.2.2 Elcertifikat	16
3.2.3 Kraftvärmebeskattning	18
3.2.3.1 Beskattning vid förbränning av hushållsavfall	19
4 Förbränning	22
4.1 Värmevärde	22
4.2 Bränsle	23
4.3 Emissioner	24
4.3.1 Val av bränsle	24
4.3.2 Styrning av förbränningsprocessen	25
4.3.3 Tillsatsämnen	25
4.3.4 Rökgasrening	25
5 Utrustning för kraftvärme	26
5.1 Panna	26
5.1.2 Värmeöverföring i pannan	27
5.1.2.1 Ekonomiser	28
5.1.2.2 Förångare	28
5.1.2.3 Överhettare	28
5.1.2.4 Luftförvärmare	28
5.1.3 Förbränningsutrustning	29
5.1.3.1 Rost	29
5.1.3.2 Fluid bädd	29
5.1.4 Rökgasbehandling	31
5.1.4.1 Cyklon	31
5.1.4.2 Elfilter	31
5.1.4.3 Slangfilter	32
5.1.4.4 Torr rening	33
5.1.4.5 Halvtorr rening	33
5.1.4.6 Våt rening	33
5.1.4.7 Rökgaskondensering	34
5.2 Turbin	35
5.2.1 Reglering	37
5.2.1.1 Strypreglering	37
5.2.1.2 Partialreglering	37
5.2.1.3 Glidtrycksreglering	38
5.2.2 Val av turbin	38
5.3 Generator	39
5.4 Kondensator	39
6 Teknik	40
6.1 Ångpanna med ångturbin	40
6.2 Vaporel [®] konceptet	42
7 Teknisk jämförelse	45
7.1 Alfavärde	45
7.2 Elverkningsgrad	45

7.3 Ångtryck.....	47
7.4 Intern elförbrukning	49
8 Metoder för ökat elutbyte.....	51
8.1 Ångdata	52
8.1.1 Tryck	52
8.1.2 Temperatur	53
8.2 Val av turbin.....	56
8.3 Ökat cirkulationsflöde i hetvattenpannan.....	57
8.4 Sänkt mottryck	57
9 Ekonomisk jämförelse.....	59
9.1 Utförande.....	59
9.1.1 Pay-back metoden.....	59
9.1.2 Annuitetsmetoden.....	60
9.2 Tekniskt underlag	60
9.2.1 Tekniska antaganden och förutsättningar	61
9.3 Ekonomiskt underlag.....	62
9.3.1 Ekonomiska antaganden och förutsättningar.....	62
9.4 Resultat.....	63
9.4.1 Elprisets inverkan	65
9.5 Kommentarer till kalkylen.....	66
10 Kraftvärme i framtiden.....	67
11 Diskussion.....	68
11.1 Småskalig kraftvärme.....	68
11.2 Bränsle.....	69
11.3 Nybyggnad	69
11.4 Konvertering.....	70
11.5 Turbin.....	70
12 Slutsatser	72
13 Referenser	73
A.1 Matris 85°C.....	74
A.2 Matris 105°C.....	75
A.3 Matris 115°C.....	76
B Beräkningsmodellen.....	77
B.1 Tillståndstorheter	78
B.2 Energibalans	79
B.3 Steady-flow.....	79
B.4 Adiabatisk process.....	79
B.5 Isentropisk process.....	80
B.6 Vaporelkonceptet.....	81
B.7 Ångpanna med ångturbin.....	83
B.8 Tillämpning av termodynamiska antaganden	85
B.9 Beräkning av komponenter.....	85
B.10 Effektberäkning	91
B.11 Elproduktion	92
B.12 Verifikation.....	92
C.1 Beräkningsmodellens inmatningsfönster	95
C.2 Vaporelcykelns resultatfönster	96
C.3 Vaporelcykelns schemafönster	97
C.4 Ångpannecykelns resultatfönster	98
C.5 Ångpannecykelns schemafönster.....	99
C.6 Vaporelcykel med överhettning resultatfönster	100
C.7 Vaporelcykel med överhettning schemafönster.....	101
D Turbinmodell.....	102
E Ekonomisk kalkyl.....	104
E.1 Grundkalkyl	104
E.2 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 450 SEK/MWh	106
E.3 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 200 SEK/MWh	107
E.4 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 400 SEK/MWh	108
E.5 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 600 SEK/MWh	109

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ångbaserad kraftvärme innebär kombinerad produktion av värme- och elektrisk energi. Elektriciteten genereras då ånga expanderar i en ångturbin och värmen tas tillvara i en efterföljande kondensor. Den kombinerade värme- och kraftproduktionen ger ett effektivt utnyttjande av bränslets energiinnehåll.

Ångan till turbinen kan produceras på ett flertal sätt. Ett alternativ är att använda en ångpanna där mättad eller överhettad ånga genereras. Ångan kan också genereras med en hetvattenpanna kopplad till en flashbox, där varmt trycksatt vatten förångas genom trycksänkning, detta system går under namnet Vaporel.

Tack vare en avreglerad elmarknad och stigande priser finns utrymme för en ökad andel el med ursprung från kraftvärme i Sverige.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att genomföra en systemstudie på småskalig ångbaserad kraftgenerering. Detta kommer att redovisas i form av en matris där olika parametrars inverkan på kraftvärmecyklerna studeras. Matrisen ska innehålla jämförande data som uppskattning av småskaliga kraftvärmeverk i storleksordning 8–20 MW.

För att skapa matrisen kommer en översiktlig modell av ett småskaligt kraftvärmeverk byggas i Excel, både för alternativet med ångpanna och med hetvattenpanna. Denna modell skall då förutom el och värme produktion även ge ungefärlig storlek på pumpar. Resultaten kan sedan vägas in vid beslut om ombyggnad av befintlig hetvattenpanna i jämförelse med ny- eller ombyggnation till ångpanna.

1.3 Metod

Examensarbetet har utförts på följande sätt:

- En litteraturstudie har gjorts inom området.
- Beräkningsmodeller har skapats i programmeringsspråket Visual Basics for Applications inom Excel.
- En ekonomisk jämförelse grundad på data från beräkningsmodellerna har utförts.

1.4 Avgränsningar

- Pannstorlek, 8 - 20 MW
- Panntryck, 16 - 40 bar
- Framledningstemperatur på värmen, 80 - 115°C

De system som studeras är:

- Ångpanna med mättad ånga
- Ångpanna med måttlig överhettning
- Hetvattenpanna + Vaporel utrustning med mättad ånga
- Hetvattenpanna + Vaporel utrustning med måttlig överhettning

1.5 Klargöranden

- Tryck anges i allmänhet som absoluttryck (a).
- Alfvärde innebär kvoten mellan producerad elektrisk effekt och termisk effekt.

$$\alpha = \frac{P_{el}}{P_{värme}}$$

- Elverkningsgrad anger kvoten mellan producerad elektrisk effekt och tillförd bränsleeffekt.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{bränsle}}$$

- Totalverkningsgrad anger kvoten mellan total nyttiggjord effekt och tillförd bränsleeffekt.

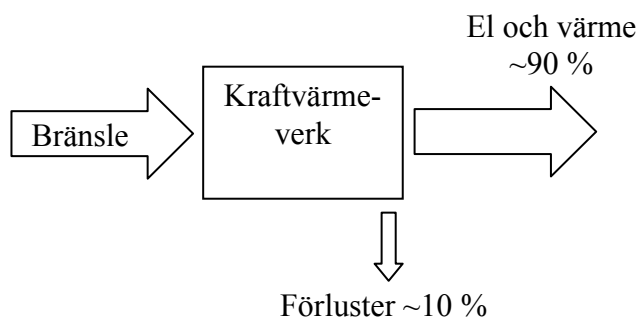
$$\eta_{Total} = \frac{P_{el} + P_{värme}}{P_{bränsle}}$$

2 Kraftvärme

Kraftvärme är benämningen på en process som ger kombinerad produktion av elektricitet och värme från en och samma energikälla.

Kombinerad el- och värmeproduktion innebär ett betydligt bättre tillvaratagande av bränslets energiinnehåll, än vad som är möjligt vid separat elproduktion. Bättre utnyttjande av bränslet sker tack vare att den värme som bildas nyttiggörs, till skillnad från kondenskraft där värme spills till omgivningen och kyls bort.

Genom att ta tillvara på denna värme för uppvärmningsändamål ökas systemets totala verkningsgrad. Det leder till att ett kraftvärmeverk tar tillvara på mellan 70 – 90 % av bränslets energiinnehåll jämfört med ca 35 – 40 procent för kondenskraftverk som enbart producerar el, elutbytet är dock lägre för kraftvärme [1].



Figur 1: Energiomvandling i kraftvärmeverk

Ett kraftvärmesystem innehåller fyra grundpelare, en värmeproducent, en motor, en generator och ett system för värmeupptagning. Vid kraftvärmeproduktion med de tekniker som är aktuella i detta examensarbete används en hetvatten- eller ångpanna som producent av värme och en ångturbin som motor. Ångturbinen driver generatormotorn för att omvandla den mekaniska energin och producera elektricitet. Den värmeenergi som återstår efter turbinen tas slutligen tillvara av en kondensator.

Småskalig kraftvärme har tidigare använts för att försörja värmeproduktionen eller hela anläggningen med el eftersom det varit skattemässigt fördelaktigt. På grund av ökade elpriser och introduktionen av handel med elcertifikat finns nu stora möjligheter att skapa ekonomisk vinst vid produktion av kraftvärme för försäljning såväl som intern försörjning. Det är en av orsakerna till att det satsas mycket på kraftvärme för tillfället. Det finns också politiska åtgärder som gynnar kraftvärmens utbyggnad, i första hand den baserad på förnyelsebara bränslen. Småskalig kraftvärme har annars haft svårt att ta sig in på elmarknaden på grund av ett lågt elpris. Eftersom kraftvärmeanläggningen innebär en stor investering har en installation då varit svår att göra lönsam och konkurrenskraftig.

Det finns ett stort antal fördelar med småskalig kraftvärme jämfört med andra alternativ, både för samhället i stort och för den enskilda producenten. Några av de främsta fördelar som kan nämnas är:

- Effektiv användning av bränslet.
- Mindre utsläpp av skadliga ämnen.
- Minskade kostnader för industriell och kommersiell användning och distribution av värme och el.
- Decentralisering av elproduktionen, vilket leder till ett minskat beroende av de stora producenterna. Det ger ökad säkerhet av el- och värmedistribution till konsumenter och industri.
- Kan minska behovet av importerad el.

[1] - [6]

2.1 Användning

I småskalig form kan kraftvärmeproduktion tillämpas vid mindre värmeverk som producerar fjärrvärme och som även vill producera elektricitet. Det kan även användas hos industrier med behov av processvärme.

Kraftvärme har olika tillämpningsområden vilket medför olika förutsättningar. Behovet av producerad el och värme ser olika ut för olika sektorer. I industrin finns ett relativt konstant behov av både värme och elektricitet året runt såväl som dygnet runt. För distribution till de allmänna näten varierar behovet både över året och dygnet, men denna variation är likartad för värme och el, vilket underlättar regleringen av kraftvärmeproduktionen.

Värmen som produceras i ett kraftvärmeverk används för uppvärmning genom fjärrvärmenäten. Temperaturen hos vattnet till fjärrvärmenäten är normalt mellan 70°C och 120°C. Speciellt i norra Europa och Sverige finns ett stort behov av värme på grund av det kalla klimatet. Sverige har ett väl utbyggt fjärrvärmenät för att försörja delar av värmebehovet och i dagsläget svarar fjärrvärme för ungefär hälften av all uppvärmning. Den del av fjärrvärmen som kan härledas till kraftvärme är dock relativt liten. Elen som produceras saluförs på den gemensamma nordiska elmarknaden Nordpool.

Industriell kraftvärme finns hos industrier med stort behov av processvärme och samtidigt ett behov av el. Det ger goda förutsättningar till att använda sig av kraftvärme både för att försörja el- och värmebehovet. Industriell kraftvärme är vanligt vid bland annat pappers- och massaindustri, raffinaderier och kemisk industri.

Eftersom transport av elektricitet både är enklare och billigare än den av värme, placeras kraftvärmeverket normalt i nära anslutning till värmeförbrukaren och dimensioneras i första hand för att tillgodose värmeunderlaget.

[1], [5], [6]

2.2 Miljöpåverkan

Ur miljösynpunkt innebär övergång till kraftvärme och speciellt bibränsleeldad sådan ett stort steg i rätt riktning. Bättre utnyttjande av bränslet vid kraftvärme innebär lägre bränslebehov och därmed minskade utsläpp jämfört med separat el- och värmeproduktion i förbränningsanläggningar. Biobränsle är det bränsle som är bäst ur miljösynpunkt vid eldning i kraftvärmeverk, till skillnad från fossila bränslen genererar det inget långsiktigt nettotillskott av koldioxid till atmosfären.

Beroende på vilket bränsle som används vid kraftvärmeproduktionen fås olika emissioner. Som tidigare nämnts ger eldning med biobränsle inget långsiktigt tillskott av koldioxid. Vid en jämförelse med till exempel kol så är energitätheten lägre, vilket gör att större volymer bränsle krävs. Det i sin tur orsakar ökade transporter som också påverkar miljön negativt. De positiva effekterna är dock vida överskridande de negativa vid eldning med biobränsle. [5]

Euroheat & Power, den internationella organisationen för kraftvärme och fjärrvärme/fjärrkyla, uppskattar därför att om EU når sitt mål med 18 % elproduktion genom kraftvärme år 2010 skulle detta vara ett stort tillskott att klara av den minskning av koldioxidutsläpp som åtagits genom Kyotoprotokollet 1990 eftersom det ersätter mindre bra alternativ. [20]

Riksdagen fattade år 1997 ett beslut om en omställning till ett ekologiskt hållbart samhälle. Detta skall åstadkommas genom att elförsörjningen ska komma från ett energisystem baserat på varaktiga, helst inhemska och förnybara energikällor och en effektiv energianvändning.

Produktion av kraftvärme med inhemskt biobränsle kan bli en viktig del för att nå dessa mål. Det är samtidigt viktigt att man har god ekonomi vid denna elproduktion för att kunna säkra dess kontinuitet.

3 Ekonomiska förutsättningar för kraftvärme

Som vid alla stora investeringar är det de ekonomiska förutsättningarna som väger tyngst. Den småskaliga kraftvärmen har tidigare begränsats av den monopoliska elmarknaden i Sverige vilket hindrat möjligheten till att göra förtjänst för mindre anläggningar. Med en öppen marknad kan dock möjligheter ges för producenter att sälja det överskott av el som produceras och därmed också till intäkt. En öppen marknad kan samtidigt ge svårigheter för de små producenterna, om priset på el sjunker på grund av den ökade konkurrensen.

Så har inte trenden visat den senaste tiden och elpriset är nu på väg upp mot rekordnivåer trots den öppna marknaden. Det finns dessutom ett komplement till elpriset i form av handel med elcertifikat. Elcertifikaten ger förutsättningar för att det ska bli mer lönsamt att producera el tillsammans med värme men stödjer endast bibränsleanläggningar. Eftersom priset på värme inte haft en lika markant ökning har elproduktion blivit mer lönsam vilket gör att kraftvärmeproducenterna strävar efter ett ökat elutbyte.

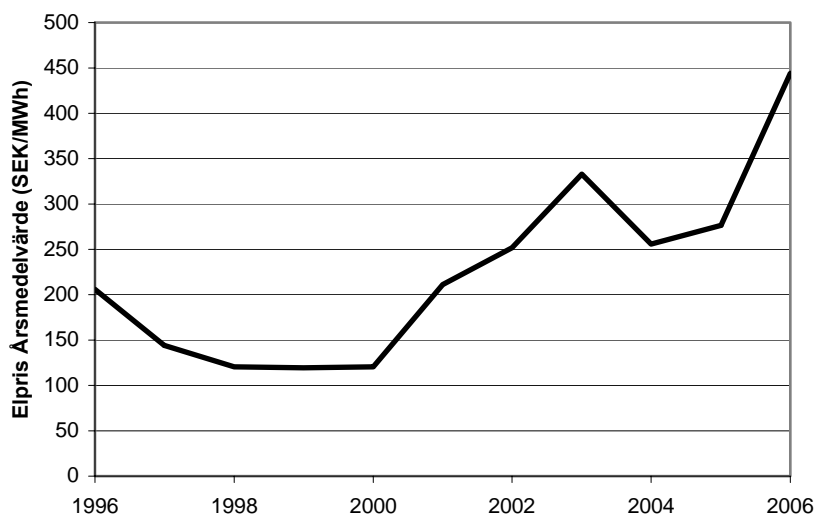


Diagram 1: Elprisets utveckling [21]

Kraftvärme är investeringsintensivt och energipriset är avgörande för vilka möjligheter som finns att göra förtjänst på den värme och el som produceras. Så är även priset på det bränsle som används till elningen.

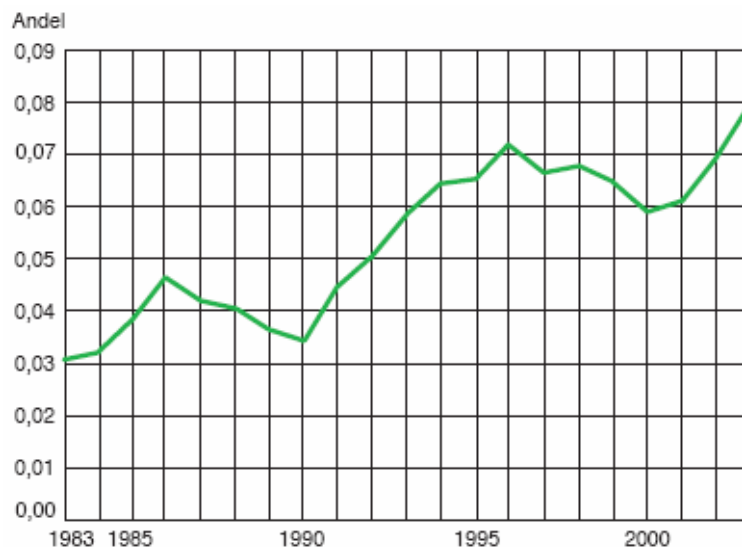
Sammanfattningsvis kan man säga att de faktorer som är mest avgörande för en kraftvärmearbetsanläggnings möjliga lönsamhet är. [5]

- Elpris, inköp och försäljning.
- Intäkter från värme
- Ekonomiska styrmedel
- Bränslekostnader
- Närheten till kunderna
- Underhållskostnader
- Driftkostnader

3.1 Konkurrenssituation

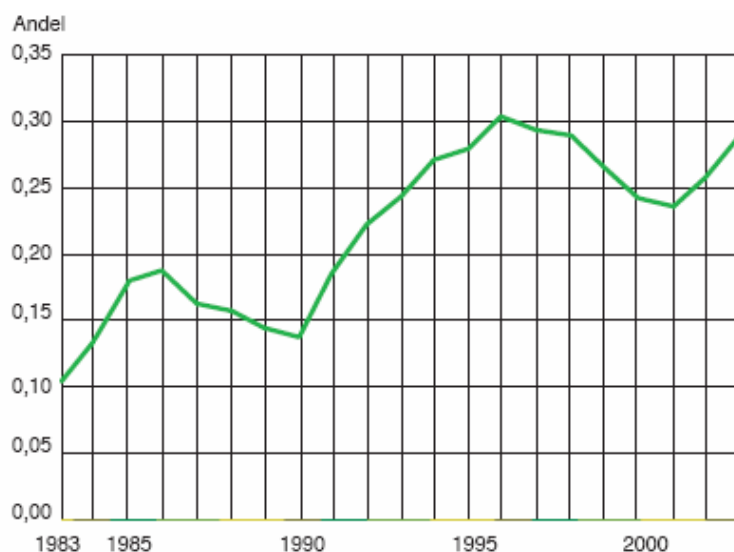
Den konkurrenskraft kraftvärmens besitter, beror huvudsakligen av faktorerna styrmedel, bränslepris, elpris och utvecklingskostnad för tekniken.

På elmarknaden kommer huvudkonkurrensen i Sverige från kärnkraft, vattenkraft, kondenskraft samt till viss del vindkraft. Huvudkonkurrenterna har dock begränsats, dels kärnkraften som ska avvecklas och inte får byggas ut och vattenkraften som ofta begränsas av miljöpolitiska skäl. Kraftvärmens andel på elmarknaden har därför ökat på senare tid.



Figur 2: Kraftvärmens andel på elmarknaden [7]

Värmedistributionen konkurrerar huvudsakligen med alternativ fjärrvärme samt individuell uppvärmning. I dag har vi en relativt låg värmeförsel från kraftvärmeverk, ca 30 % av fjärrvärmens, som i sin tur utgör runt 50 % av den totala uppvärmningen. Det är mycket beroende på att elproduktionen i så stor utsträckning kommer från kärnkraft och vattenkraft.



Figur 3: Kraftvärmens andel på fjärrvärmemarknaden [7]

Ett problem för kraftvärmens utbyggnad är att det innebär ekonomiskt stora risker på grund av att de styrmedel som införts är nya och framtidens utformning inte är helt säkerställd samtidigt som prisnivåerna på såväl el som bränsle är svåra att förutsäga. [8]

En fortsatt prisstegring på elektricitet kan däremot också ha negativ effekt för kraftvärmens utbyggnad, eftersom intäkterna från el då kraftigt överstiger värmeintäkterna och kan leda till utökad satsning på till exempel kondenskraft.

3.2 Ekonomiska och miljömässiga styrmedel

Regeringen har ett uttalat mål att stärka kraftvärmens konkurrensmöjligheter. Sverige har idag en relativt låg andel elproduktion från kraftvärme, vilket innebär ett dåligt utnyttjande av de inhemska resurserna och ökad kraftvärme är därför önskat.

För att åstadkomma ökad kraftvärmeproduktion krävs ofta ekonomiska incitament från politiskt håll. Det finns ett antal medel som staten kan använda sig av för att styra marknadens aktörer, exempelvis skatter, avgifter, bidrag och subventioner. En principiell uppdelning av dessa styrmedel kan göras mellan de som genererar ett tillskott i statskassan och de som innebär utgifter. Det finns också marknadsbaserade styrmedel som har den fördelen att de varken medför tillskott eller utgift för staten, till exempel elcertifikat och utsläppshandel. [8]

De huvudsakliga styrmedel som påverkar kraftvärmens är:

- handel med utsläppsrätter
- elcertifikat
- kraftvärmebeskattning

3.2.1 Handel med utsläppsrätter

Ett gemensamt system om handel med utsläppsrätter inom EU antogs år 2003 för att minska unionens totala utsläpp av växthusgaser.

Systemet är uppbyggt så att EU kommissionen sätter ett tak för hur mycket koldioxid de industrier som ingår i handelssystemet tillåts släppa ut. De industrier som i första skedet ingår är kraft- och värmeverk, oljeraffinaderier, produktion och bearbetning av järn, stål, glas och glasfiber, cement och keramik samt papper och pappersmassa, men fler branscher kan komma att tillföras senare. För Sverige innebär denna indelning att ca 1/3 av de koldioxidutsläpp som genereras ingår i systemet.

De som omfattas av systemet tilldelas ett antal utsläppsrätter. Denna tilldelning grundas på historiska data av utsläpp och förutsättningar att minska utsläppen. Kraftvärmens har särbehandlats i systemet och tilldelas gratis utsläppsrätter, med avsikten att främja energieffektiv teknik. Trots detta är de svenska reglerna för kraftvärme inte lika gynnsam som i andra deltagarländer och svensk kraftvärme tilldelas inte lika många utsläppsrätter som många andra i samma bransch.

Systemet grundar sig på handel med utsläppsrätter där priset beror av tillgång och efterfrågan. Därmed blir antalet utsläppsrätter som delas ut av EU av stor betydelse. Baserat på marknadspriset på utsläppsrätterna kan en berörd aktör besluta om investeringar som medför en sänkning av koldioxidutsläppen kan löna sig gentemot att förvärva ett större antal rätter från någon annan part. Detta medför att de som kan reducera sina utsläpp kostnadseffektivt kommer att göra det för att sedan sälja överskottet av utsläppsrätter till dem som inte lyckats hitta någon lösning. De som inkluderas i handelssystemet ska varje år redovisa sina utsläpp och lämna in motsvarande mängd utsläppsrätter till staten. Om utsläppen överskrider antalet utsläppsrätter kommer en avgift att betalas, till att börja med 40 Euro per ton koldioxid som överskrider antalet utsläppsrätter, efter 2008 höjs avgiften till 100 Euro.

Principiellt innebär uppbyggnaden av systemet att det krävs lägre tillgång än efterfrågan för att positiva miljöeffekter ska erhållas. Visar det sig att detta system ger bra resultat är det stor chans att även andra växthusgaser än koldioxid kan komma att ingå i handelssystemet i framtiden.

[8] - [10]

3.2.2 Elcertifikat

Elcertifikat är ett styrmedel som införts för att främja elproduktion från förnyelsebar energi såsom vind-, vatten- och solkraft samt biobränsle. Eftersom denna elproduktion ofta innebär ökade kostnader ska handel med elcertifikat ge en möjlighet till ökade intäkter. Man har samtidigt beslutat att ta bort det statliga stödet till vindkraft, småskalig vattenkraft och biobränsleeldad kraftvärme som fanns tidigare. Det leder till ett ökat elpris eftersom elcertifikaten ersätter detta stöd. Som första fas har man utformat systemet med mål att öka den årliga elproduktionen från de berörda producenterna med 10 TWh fram till år 2010.

Producenter av förnybar el tilldelas ett elcertifikat för varje MWh el som de producerar, el-användarna är sedan skyldiga att förvärva ett visst antal certifikat i förhållande till sin elförbrukning. Inkomsten från försäljningen av elcertifikat går till producenten av såld el och denna intäkt ska hjälpa till att täcka de eventuella extra kostnader som produktionen av förnyelsebar energi innebär. Antalet certifikat förbrukaren ska förvärva bestäms enligt ett kvotsystem. Den elintensiva industrin har i inledningskedet tilldelats en kvotplikt på 0 % och undkommer alltså denna avgift.

Om kvoten inte uppfylls måste en avgift betalas och det blir då indirekt denna avgift som sätter taket på elcertifikatpriset. Straffavgiften är satt till 150 % av medelpriset på certifikaten under det aktuella kalenderhalvåret. Det fanns till att börja med också ett lägsta pris som garanterades av staten, som var satt för att ge säkerhet åt producenterna. Lyckas producenten minska sina produktionskostnader kommer detta att innebära en ökad vinst och meningen är då att de ska motiveras att effektivisera sin produktion. Systemet med elcertifikat har gjort elproduktion med biobränsle i kraftvärmeverk mer lönsamt och jämfört med tidigare då värme och el gav ungefär likvärdig intäkt har nu intäkten från el ökat kraftigt.

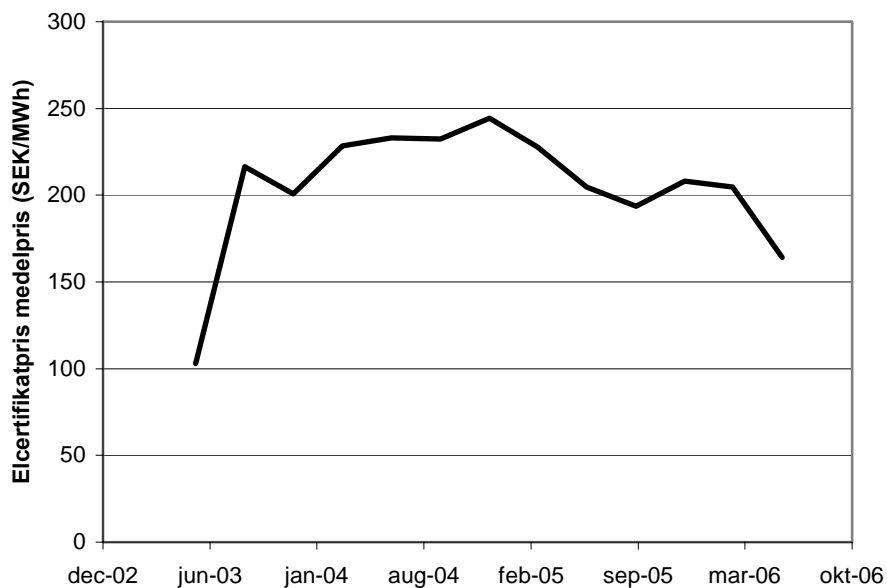


Diagram 2: Prisutveckling för elcertifikat [22]

Handel med elcertifikat inleddes första maj 2003 och efter detta första skede kan fastslås att elcertifikatsystemet haft stor inverkan på kraftvärmebranschen, både gällande elproduktion och gällande val av bränsle. Det är lätt att förstå då man ser hur intäkten från elförsäljningen ökat med hjälp av tillskottet från elcertifikat.

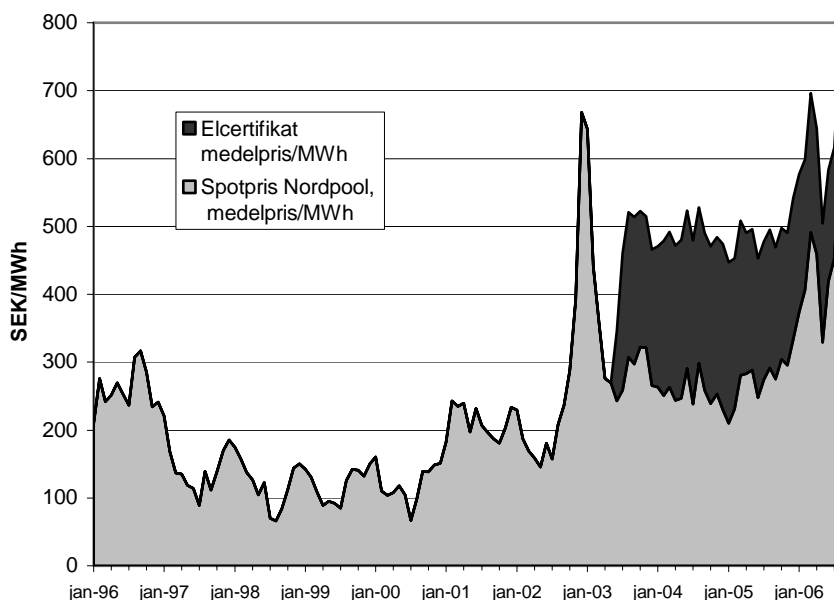


Diagram 3: Total intäkt från el och elcertifikat [21], [22]

De mest framträdande positiva effekter som kan nämnas är att elcertifikatsystemet ger ekonomisk grund för nya investeringar och uppgraderingar, samt att bränslen som omfattas nu används i större utsträckning. En annan positiv effekt är att det gjort det lönsamt att utvidga fjärrvärmenätet, vilket leder till att kunder som tidigare inte varit inkopplade i fjärrvärmenätet

kan anslutas. Fler inkopplade kunder ger ett ökat värmeunderlag och parallellt kan elproduktionen ökas.

De nackdelar runt elcertifikatsystemet som visat sig är främst ovissheten om dess framtida existens och kortsiktiga utformning, fram till år 2010. Detta kan anses något för kortsiktigt för en anläggning som ska nyinvestera i elproduktion med en återbetalningstid längre än så. [8], [10] - [12], [23]

3.2.3 Kraftvärmebeskattning

Beskattning av bränsle för kraftvärmeproduktion sker huvudsakligen i form av energi-, koldioxid- och svavelskatt. Det finns också en kväveoxidavgift.

Bränslet delas upp procentuellt efter vad det åtgår till, värme- eller elproduktion. Det innebär att en del av bränslet beskattas för värmeproduktion medan övrigt bränsle beskattas för elproduktion.

Bränsle för värmeproduktion beläggs med koldioxidskatt, proportionell mot bränslets fossila innehåll. Biobränsle är därmed befriat från koldioxidbeskattning både för värme- och elproduktion. Den del bränsle som går till produktion av el är i de flesta fall befriad från både energi- och koldioxidskatt oavsett bränsle.

I januari 2004 antogs nya skatteregler, som gäller enligt Tabell 1. Dessa innebär att bränslen för värmeproduktion i kraftvärmeverk endast belastas med 21 % koldioxidskatt och ingen energiskatt. Andelen bränsle som åtgår för elproduktion är helt fri från dessa skatter. Denna regel i sig medför att det blivit mindre fördelaktigt att använda biobränsle i kraftvärmeverk som därmed fått något försämrade konkurrenskraft. [5], [8], [11], [23], [26]

Tabell 1: Beskattning av bränslen för värme och kraftvärme.

	Kraftvärme från fossila bränslen	Kraftvärme från biobränsle (inkl. industriavfall)	Värmeverk (exkl. biobränsle)
Värme	0 % energiskatt 21 % koldioxidskatt	0 % energiskatt 0 % koldioxidskatt	100 % energiskatt 100 % koldioxidskatt
El	0 % energiskatt 0 % koldioxidskatt	0 % energiskatt 0 % koldioxidskatt	- -

De skattesatser som gäller beror på vilket bränsle som används vilket framgår av Tabell 2:

Tabell 2: Förbränningskatt vid värmeproduktion med olika bränslen [19]

Energi och miljöskatter	Industri					Övriga				
	Energi	CO ₂	Svavel	Totalt	kr/MWh	Energi	CO ₂	Svavel	Totalt	kr/MWh
Eldningsolja 1 (kr/m ³)	-	551	-	551	55	739	2623	-	3362	337
Eldningsolja 5 (kr/m ³)	-	551	108	659	62	739	2623	108	3470	328
Kol (kr/ton)	-	479	150	629	83	315	2282	150	2747	363
Gasol (kr/ton)	-	579	-	579	45	145	2759	-	2904	227
Naturgas (kr/1000 m ³)	-	413	-	413	41	239	1965	-	2204	221
Torv (kr/ton)	-	-	50	50	18	-	-	50	50	18
Råtallolja (kr/m ³)	551	-	-	551	56	3362	-	-	3362	343

3.2.3.1 Beskattning vid förbränning av hushållsavfall

En ny lag infördes 1 juli, 2006 som innebär att hushållsavfall som bränsle vid förbränning för värmeproduktion i kraftvärmeverk beläggs med energi- och koldioxidskatt. Det är en förändring då avfall tidigare beskattats som biobränsle både för värme- och kraftvärmeproduktion. Denna skatt påverkar dock ej industriavfall som fortfarande beskattas som biobränslen. Hela mängden avfallsbränsle beskattas inte utan endast det fossila innehållet, vilket baseras på ett schablonvärde satt till 12,6 % av den totala bränslemängden.

Skattelättnad sker om man samtidigt producerar el, vilket gör en konvertering till kraftvärme mycket gynnsam. Avgörande för skattelättnaden är processens elverkningsgrad, det vill säga förhållandet mellan den producerade eleffekten och den tillförda effekten i form av bränsle.

Det är en stigande skala av skattelättnad, med krav på lägst 5 % elverkningsgrad som ger skattebefrielse med 19 % av koldioxidskatt och fullt avdrag av energiskatt. Befrielsegraden stiger stegvis upp till 15 % elverkningsgrad som ger 79 % befrielse från koldioxidskatt och full befrielse från energiskatt, vilket är maximalt. Befrielsegraden beräknas med formeln: $19 + (X \cdot 6) \%$ där X anger antal procent elverkningsgrad som överstiger 5. Resultatet av detta avdrag kan ses i Diagram 4.

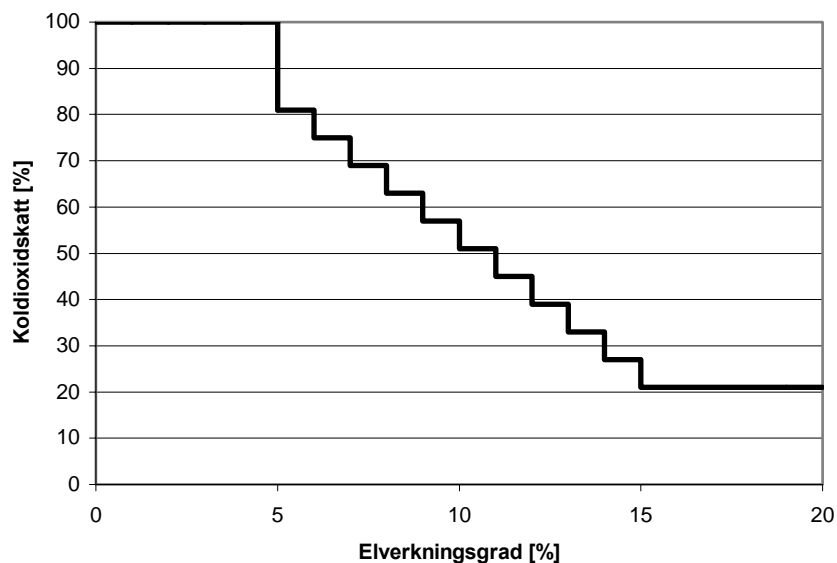


Diagram 4: Koldioxidskatt på värmeproduktion vid förbränning av hushållsavfall

Skattereduktion berör endast den andel bränsle som åtgår för värmeproduktion och andelen till elproduktion är skattefri. Uppnås inte elverkningsgraden 5 % är skattenivån samma som vid värmeproduktion det vill säga 100 % energi- och koldioxidskatt men fortfarande endast på bränslets fossila innehåll och på bränsle för värmeproduktion.

De skattesatser som gäller för avfall som bränsle vid värmeproduktion är:

- Energiskatt: 150 kr per ton fossilt innehåll i bränslet.
- Koldioxidskatt: 3374 kr per ton fossilt innehåll i bränslet.

Diagram 5 visar hur skattelättnaden påverkar den totala energi- och koldioxidskatten på varje ton avfall som förbränns.

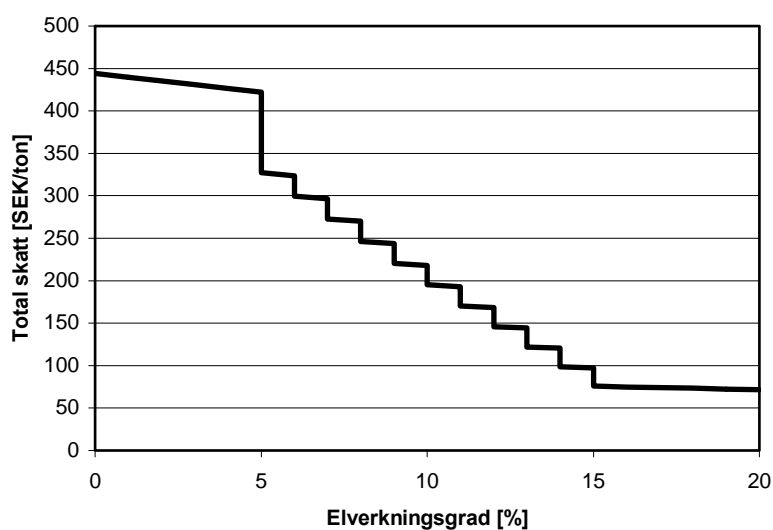


Diagram 5: Skatt på avfall som bränsle för kraftvärmeproduktion

Skattelättnaden baseras på momentan mätning och inte på högsta möjliga elverkningsgrad vilket resulterar i en varierande skattesats.

Orsaken till att förändringen av avfallsbeskattningen genomförts anges vara:

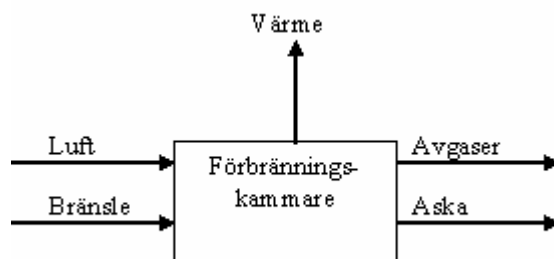
- Öka återvinningen av plast.
- Minska koldioxidutsläpp.
- Öka kraftvärmeproduktionen.
- Likställa det fossila innehållet i avfall med andra fossila bränslen.

[13], [25], [26]

4 Förbränning

Vid förbränning genomgår bränslet stadierna torkning, förgasning och förbränning av förgasade ämnen. Bränslets brännbara substans består till största del av kol, väte samt lite svavel och föreligger i fast form eller som flyktiga beståndsdelar, det vill säga ämnen som förgasas vid uppvärmningen.

För att förbränning ska ske krävs förutom bränslet också syre. Dessa omvandlas vid förbränningen till avgaser, aska och värme.



Figur 4: Omvandling i förbränningskammaren

För fullständig förbränning krävs tillförsel av luft i rätt mängd. Det är också av vikt att eldstaden är utformad på ett sådant sätt att luft och bränsle blandas väl för att fullständig förbränning ska ske. Vid ofullständig förbränning förenar sig inte alla brännbara substanser med syret vilket ger oönskade restprodukter samt att mindre energi utvinns ur bränslet. De faktorer som avgör om fullständig förbränning ska ske är: tillgång till rätt mängd syre, hög temperatur, god bränsle-luftomblandning och tillräckligt med tid för att förbränningen ska hinna avslutas innan rökgaserna lämnar eldstaden.

4.1 Värmevärde

Värmevärdet är ett mått på hur stor värmemängd per massenhet som frigörs vid fullständig förbränning av ett bränsle. Det finns två olika värmevärden som används, ett undre och ett övre. Orsaken till att två olika värmevärden existerar är det vatten som är bundet i bränslet. Vid förbränning avgår vattnet i form av ånga, vilket gör att vattnets ångbildningsvärme inte utnyttjas. Det undre värmevärdet anger därför den värmemängd som utvecklas då allt vattnet är i ångform och det övre värmevärdet då allt vatten befinner sig i vattenform. [2]

4.2 Bränsle

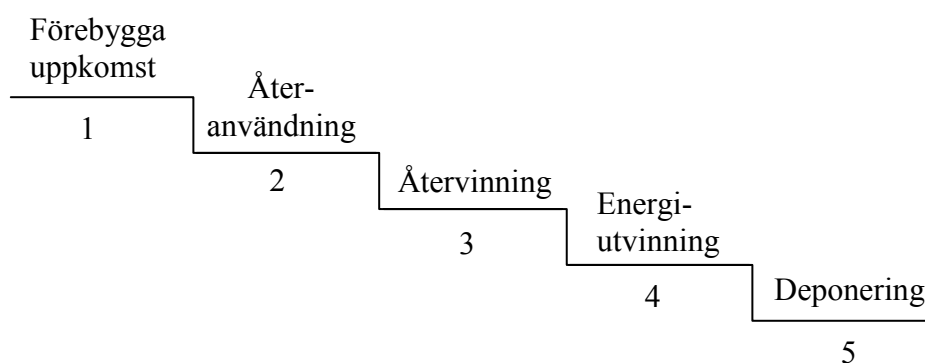
De bränslen som används kan vara i fast, flytande eller gasform. Med avseende till de nämnda faktorer som styr förbränningen är gasformiga bränslen enklast att ge fullständig förbränning följt av vätskeformiga. Fastbränslen är svårast att förbränna fullständigt och de behöver därför normalt torkas och förgasas innan förbränningen sker. Det kommer i första hand fokuseras på fastbränsleanläggningar i denna rapport.

Pannorna kan eldas med olika bränslen och anpassas normalt efter en typ av bränsle. Vilket bränsle som används innebär specifik utformning av pannans eldstad beroende ett antal faktorer. Bränslets värmevärde, eller energiinnehåll, varierar mellan olika bränslen, lågt energiinnehåll ger behov av en större mängd bränsle för samma värmeeffekt och därmed en större eldstad. Fukthalt och förbränningstid har också inverkan på hur eldstaden utformas. Olika bränslen ger också upphov till olika emissioner, vilket gör det nödvändigt att anpassa metoden för rökgasrening efter bränsle. [2]

De bränslen som är vanligast vid kraftvärme- och värmeproduktion i Sverige idag är biobränsle och avfall.

Biobränsle är ett vitt begrepp där ett flertal olika bränslen innefattas. Gemensamt för dessa är att de består av levande material och att de därmed via fotosyntesen bundit koldioxid, vatten och solenergi. Vid förbränning frigörs dessa och det genereras därmed inget nettoutsläpp av koldioxid. Biobränsle är därför ansett som ett miljövänligt bränsle och ökad användning av i kraftvärmesektorn är ett medel att minska växthuseffekten som verkar på jorden. Det är också därför som biobränsle nu är mycket aktuellt och gynnas från politiskt håll. [11]

Avfall uppstår från mänsklig aktivitet, dels i form av hushållsavfall, men även som rester från industrier och övriga sektorer. För att minska andelen avfall som går till deponering finns ett antal åtgärder. Första steget är att minska uppkomsten av avfall. För att den energi som är bunden i avfallet från tillverkning och material inte ska gå till spillo återanvänds och återvinns det. Det kan då sorteras och återskapas vid nyttillverkning. En del avfall används istället för energiutvinning. Avfallets energi utvinns då det eldas som bränsle i avfallspannor, ofta i värmeverk men även för kraftvärmeändamål.



Figur 5: Avfallshierarkitrappa

På grund av den vida klassningen av brännbart avfall har det som bränsle varierande egenskaper i form av värmevärde och fukthalt. På grund av de varierande egenskaperna utformas pannans eldstad efter största möjliga reglerområde för att tillåta avfallet förbrännas effektivt utan tillsatsbränsle. [2]

4.3 Emissioner

Förbränningsprocessen ger som nämnts, förutom den nyttiga värmen, också upphov till vissa mindre önskvärda biprodukter. Biprodukterna är oundvikliga men processen kan styras för att de ska minimeras. De biprodukter som genereras är gaser, stoft, aska och vatten.

Vilken art och mängd som skapas beror på bränslets sammansättning och förbränningsutrustningen, de varierar därför kraftigt.

Ett stort antal miljöskadliga ämnen kan produceras vid förbränning i kraftvärmeanläggningar från bio- och fossila bränslen samt avfall.

I gasform är de huvudsakliga emissionerna:

- Koloxider
- Svaveloxider
- Kväveoxider
- Saltsyra
- Dioxiner
- Ammoniak
- Polyaromatiska kolväten
- Kvicksilver

Som stoft:

- Aska
- Additiver
- Tungmetaller

Dessa är alla mer eller mindre skadliga för miljön och det finns metoder för att minska dem vid förbränningen.

4.3.1 Val av bränsle

Olika bränsle ger upphov till olika emissioner. Exempel på detta är biobränsle som inte ger något långsiktigt tillskott av koldioxid. Avfall är ett bränsle som kan innehålla mer oönskade och skadliga ämnen från till exempel plast och metaller.

4.3.2 Styrning av förbränningsprocessen

Genom rätt utformning av pannan och styrning av processen som beskrivits tidigare, ges bättre förbränning vilket gör att emissionerna av skadliga ämnen reduceras.

4.3.3 Tillsatsämnen

Det är vanligt att ämnen injiceras, för att reagera med skadliga ämnen i rökgaserna som då omvandlas till en mindre skadlig form. Exempel på detta är ammoniak som tillsätts för att minska utsläppet av kväveoxider. Det är då viktigt att rätt mängd tillsatsämne tillförs, annars kan det bidra till ökade utsläpp. Ett annat exempel är kalksten som tillförs för att absorbera bland annat kvicksilver och svavel.

4.3.4 Rökgasrening

Det finns en stor variation av rökgasreningssystem som används för att rena gaserna från stoft och partiklar. Dessa förklaras mer ingående senare i rapporten.

5 Utrustning för kraftvärme

Som tidigare nämnts krävs utrustning för ångproduktion samt tillvaratagande av ångans energi för att göra den användbar för kraftvärme. Följande kapitel är avsett att kortfattat förklara denna utrustning.

5.1 Panna

En av kraftvärmecykeln huvudkomponenter är pannan, där större delen av energin tillförs, de pannor som är aktuella i detta examensarbete är hetvatten- och ångpannor.

Energiomvandling sker vid förbränning av bränsle i pannans eldstad där den kemiskt bundna energin övergår till värmeenergi. Överföringen utförs genom att de heta rökgaser som utvecklas vid förbränning värmeväxlas i pannan mot vatten. [2]

Ångpannan är konstruerad för att omvandla en del av det cirkulerande vattnet till ånga. Det sker genom att man värmer vattnet i flera steg då rökgaserna passerar olika delarna av pannan. Det är möjligt att producera mättad eller överhettad ånga i pannan. Vid produktion av överhettad ånga, sker det i en överhettare.

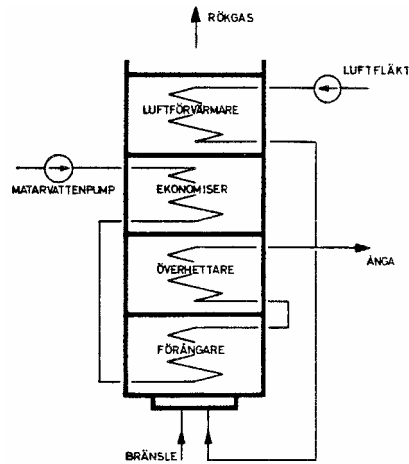
I hetvattenpannan sker uppvärmning av det cirkulerande vattnet, maximalt upp till mättnadstemperaturen vid rådande drifttryck. För att kallas hetvattenpanna krävs att vattentemperaturen överstiger 120°C, annars är det endast ett varmvattensystem.

Tillvägagångssättet är liknande det för ångpannor, men med avsaknaden av delar för förångning och överhettning samt ångdom. [2]

Det finns dessutom en blandning av hetvatten- och ångpanna som kallas för halvångpanna. Hetvattenpannor utförs ibland med ångdom för tryckhållning och som expansionskärl. En mindre del ånga kan då också tas ur domen för eventuella lokala behov. Pannan kan byggas för att öka ångproduktionen så att drygt halva panneffekten tas ut som ånga, vilket gör att tillräckligt med ånga genereras för att producera kraftvärme. Det är dock en stor nackdel att inte hela panneffekten används till ångproduktion. [11]

En panna kan i sin enklaste form ses som ett kärl med vatten som tillförs värme utifrån vilket gör att vattnet värms upp till förångning eller till mättat vatten. Förutom de delar som är avsedda för värmeöverföring i pannan, finns också ytterligare utrustning för förbränning och rökgasbehandling vilka kan sägas ingå i pannan.

De huvudkomponenter som kan utgöra pannan är enligt Figur 6, men alla delar ingår inte i alla ångpannor eftersom konstruktionen varierar beroende på förutsättningar och behov. Som nämnts ingår heller inte alla delar i hetvattenpannan eftersom ångbildning inte ska ske då det kan skada pannan.



Figur 6: Ångpannas uppbyggnad [2]

På vatten- och ångsidan

- Matarvattenpump
- Ekonomiser
- Förångare
- Överhettare

På Luft/rökgassidan

- Luftfläkt
- Luftförvärmare
- Rökgasfläkt
- Rökgasreningstrustning
- Skorsten

På bränslesidan

- Bränsleberednings- och förbränningsutrustning

I varje del av vatten- och ångsidan överförs värme från rökgaserna till vattnet/ångan för uppvärmning och i ångpannan förångning för att slutligen generera den önskade ångan eller hetvattnet. För att få höga temperaturer är trycket högt i pannan, högt tryck innebär högre mättnadstemperatur. Trycket begränsas och olika panntryck används beroende på ändamålen. För elproduktion är högt tryck önskvärt men det ger samtidigt ökade dimensioner och kostnader. [2]

5.1.2 Värmeöverföring i pannan

Överföring av värme till vattnet i pannan sker genom strålning och konvektion. Värmeöverföring genom konvektion utförs då de rökgaser som utvecklas vid förbränningen passerar vattnet i olika delar av pannan. Överföring genom strålning sker i eldstaden från den öppna elden till tuber med vatten som sitter vid eldstadens väggar.

Värmeöverföringen från rökgaserna till vattnet kan ske genom två olika konstruktionstekniker, eldrör och vattenrör.

I eldrörspannor strömmar de heta rökgaserna i tuber som omges av vatten. Dessa byggs vanligtvis för effekter upp till ca 12 – 15 MW, vid högre effekter blir belastningen på pannans gavelplåtar för hög. Eldrörspannor har också ett begränsat konstruktionstryck, bland annat på grund av maximal tillåten godstjocklek på gavelplåtar till mellan 16 och 32 bar.

Alternativet är vattenrörspannor, där strömmar istället vattnet i tuber och rökgaserna utanför. Dessa kan byggas i större format och är därför vanliga vid högre panneffekter.

Beroende på utformning och placering inuti pannan erhåller de värmeöverförande ytorna olika namn och syfte. [14]

5.1.2.1 Ekonomiser

Ekonomisern är en del av eftereldytorna i pannan, där rökgaserna passerar vid en lägre temperatur, strax innan de förs ut genom skorstenen. Här sker en första uppvärmning av matarvattnet.

5.1.2.2 Förångare

Förångningen sker huvudsakligen i förångaren som består av de rör som utgör eldstadens väggar, tak och botten. Till dessa överförs värmen i första hand genom strålning.

5.1.2.3 Överhettare

I överhettaren höjs ångans temperatur över mättnadstemperaturen vid det aktuella trycket. Överhettaren i pannan består vanligtvis av parallellkopplade tuber där ångan strömmar inuti, och rökgaserna utanför. Överhettningen kan ske genom konvektion eller strålning, beroende på var den placeras. I en konvektionsöverhettare sker överhettningen genom konvektion och överhettaren placeras då efter eldstaden och skyddas från strålning. Om överhettningen sker genom strålning placeras tuberna istället i eldstaden för att ta upp värme.

5.1.2.4 Luftförvärmare

Genom att höja förbränningsluftens temperatur får man sänkt avgastemperatur, vilket leder till att pannans verkningsgrad ökar. Höjningen utförs i luftförvärmaren som är en del av eftereldytorna där rökgaserna används för att värma förbränningsluften. [2]

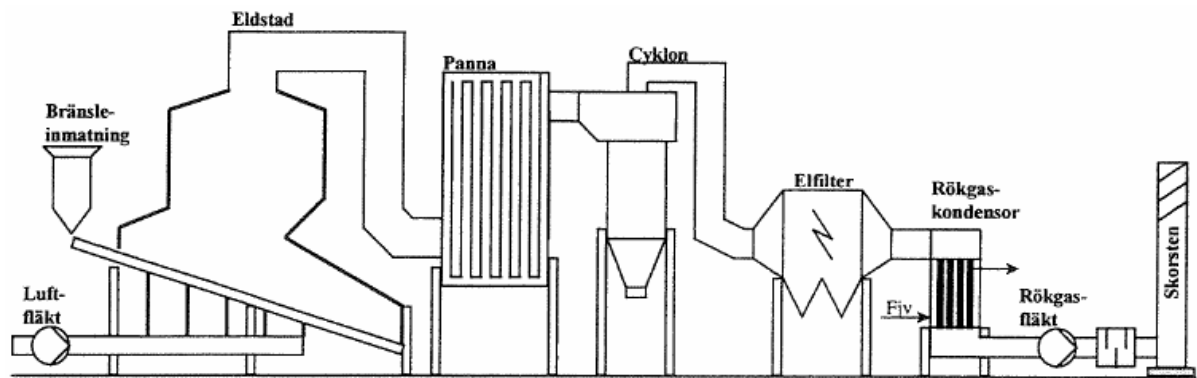
5.1.3 Förbränningsutrustning

Det finns två vanliga tekniker som används vid förbränning av fastbränsle i Sverige idag, rost och fluid bädd. Rosttekniken är vanligast, framförallt i det lägre effektområdet på grund av sin enklare konstruktion. Fluid bädd används oftare vid högre panneffekter men också då inhomogena bränslen förbränns. Fluid bädd tekniken kan tillämpas som cirkulerande- eller bubblande fluid bädd.

5.1.3.1 Rost

I en rost ligger bränslet på ett galler som är mer eller mindre lutande. Luft strömmar igenom gallret och detta tillsammans med strålningen från eldstadsväggarna ger en första torkning och förgasning av bränslet, medan återstoden ligger kvar på rosten för att sedan förbrännas. De flyktiga beståndsdelarna som avgår förbränns också, ovanför rosten, vilket kräver tillförsel av sekundär- och eventuellt tertiärluft för att undvika understökiometrisk förbränning. Var i eldstaden torkning, förgasning och förbränning sker beror på hur bränslet matas in till rosten. Det kan antingen tillföras ovanifrån eller underifrån.

Det finns ett flertal olika typer av rost men de kan delas in i två huvudgrupper, fast eller rörlig rost beroende på hur bränslet matas fram. I en rörlig rost drivs bränslet fram mekaniskt och i en fast rost sker det med hjälp av tyngdkraften då rosten är lutande.



Figur 7: Exempel på rosterpanna med kringutrustning [14]

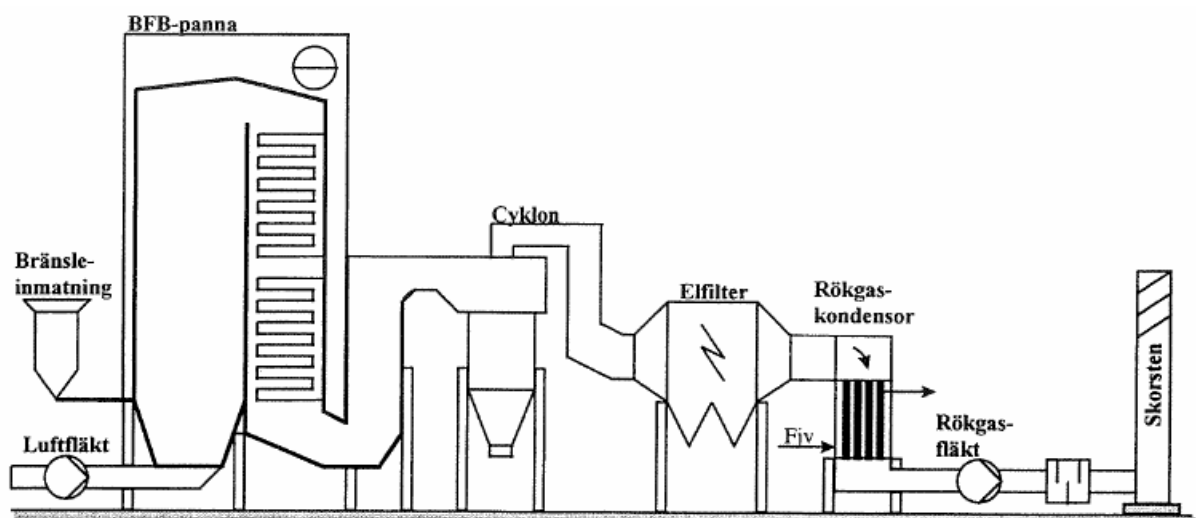
5.1.3.2 Fluid bädd

Med fluid bädd avses det tillstånd som uppstår då en massa av eldfasta partiklar genomblåses av en gas underifrån med tillräckligt hög hastighet. Genomblåsningen gör att massan antar ett vätskelikt tillstånd. Vid en viss minsta hastighet på genomströmningsluften uppstår detta vätskelika tillstånd, ökas hastigheten ytterligare bildas gasbubblor i bädden och man får en bubblande fluidiserad bädd. Vid ytterligare ökning blir bädden först turbulent för att till sist nå en hastighet som får partiklarna att sväva.

I en cirkulerande fluidiserande bädd använder man sig av höga hastigheter och genom att man separerar partiklarna från rökgasströmmen i en cyklon och återför dem till botten av bädden erhålls en cirkulerande rörelse, d.v.s. en cirkulerande fluidiserande bädd.

Den fluidiserade bädden består av eldfasta partiklar, till exempel sand och aska som blandas med det bränsle som ska förbrännas. Bränslet tillförs på något sätt till bädden där det sker förbränning och askan som blir kvar förs bort, delvis antingen genom ett hål i botten, eller vid ytan genom ett bräddavlopp och delvis av en grovavskiljare som tar bort den aska som följer med rökgaserna. Efter förbränningen passerar rökgaserna de olika konvektionsytorna där de kyles samtidigt som mediet värms upp.

Fördelen med fluidiserande bädd jämfört med rost är att man kan använda sig av bränslen med varierande kvalitet och energiinnehåll, samt bränslen med högre fukthalt. [2], [11]



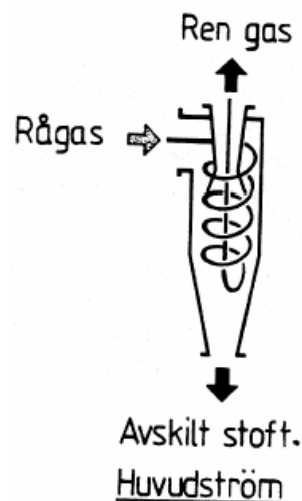
Figur 8: Exempel på bubblande fluidiserad bädd med kringutrustning [14]

5.1.4 Rökgasbehandling

Vid förbränning utvecklas skadliga ämnen i form av stoft och gaser, varför det behövs rening av rökgaserna. Rökgasrening kan ske genom ett antal olika metoder, vilken metod som används bestäms av de restprodukter som följer med rökgaserna. Avgörande faktorer för valet av reningsmetod är stoftmängd och partikelstorlek. Man kan ibland behöva kombinera flera metoder för att få bättre rening.

5.1.4.1 Cyklon

Cyklonen är en koniskt formad dynamisk avskiljare, där tröghetskrafter får stoftpartiklar att avskiljas från gasen. Gasen ges en cirkulerande rörelse genom att inloppet placeras tangentiellt eller med hjälp av ledskenor. Därmed drivs de tyngre partiklarna ut mot cyklonens mantelytor av centrifugalkrafterna och separeras från gasen. Partiklarna förs sedan ut genom att sekundärvirvlar uppstår och gasen går vidare renad. Det finns två principer för rening med cyklon, cykloner med stor diameter, vanligen 30 – 180 cm och multicykloner där flera små cykloner parallellkopplas.



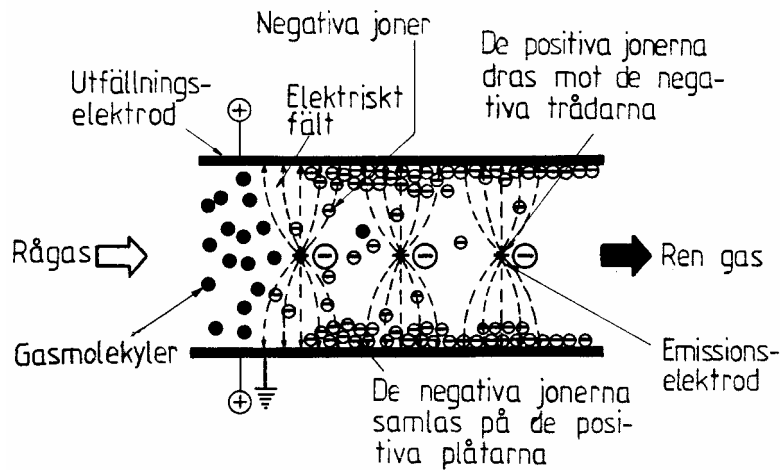
Figur 9: Cyklonavskiljare [2]

De stora cyklonerna har sämre avskiljning av små partiklar, mindre än 5 μm , multicykloner kan avskilja partiklar ner till 1 μm . [2], [15]

5.1.4.2 Elfilter

Ett elfilter använder de krafter som uppstår då en laddad partikel befinner sig i ett elektriskt fält. Rökgaserna leds till en kammare besatt med vertikala plåtrådor och passerar med inspända trådar. Genom att en spänning tillförs uppstår ett elektriskt fält mellan trådarna och plåtrådorna. En elektrisk urladdning sker då i emissionselektrodena och gasen blir joniserad. De positiva jonerna dras till emissionselektrodena och sorteras bort, medan de negativa gasmolekylerna slås samman med de neutrala, vilket ger en negativt laddad jon.

Under vandringen mot plåtridåerna fastnar stoftpartiklarna i dessa joner och när de når fram laddas jonerna ur och stoftpartiklarna fastnar i plåtridån medan gasmolekylerna vandrar vidare. Stoftet kan rensas från ridåerna genom bankning eller vattenspolning.

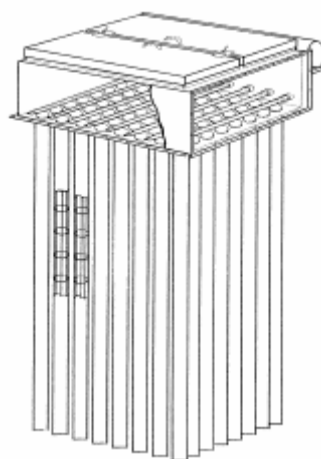


Figur 10: Elfilter [2]

Elfilter är en effektiv metod för avskiljning av små partiklar eftersom vandringshastigheten i fältet inte är storleksberoende under $1\ \mu\text{m}$. Andra faktorer som påverkar vandringshastigheten och därmed förmågan att rena gasen är bland annat partiklarnas resistivitet, viskositet, elektrisk fältstyrka och gasens temperatur. [2]

5.1.4.3 Slangfilter

I ett slangfilter, eller spärrfilter förs partiklarna bort från rökgasen då de passerar ett fibermaterial som verkar som en sil. Man kan använda plana filtertytor, eller slangar, vilket är vanligast. Denna metod ger hög avskiljning, ca 99,9 % även för små partiklar.



Figur 11: Slangfilter [15]

De material som används i slangfilter är glasfiber, teflon, aramid och polyakrylnitril men teflon är det vanligaste. Slangfiltret begränsas av vilket filtermaterial som används och dess

förmåga att rengöras, dess resistens mot angrepp och påfrestningar. Efter en period av drift måste filtren rengöras eftersom det bildas en stoftkaka på dem.

En nackdel med denna metod är att det finns en uppenbar brandrisk, speciellt vid förbränning som genererar en stor del oförbränt stoft. Man kan då komplettera med en grovavskiljare innan spärrfiltret. [2]

5.1.4.4 Torr rening

Vid torr rening i skrubber förs gasen in i en reaktionskammare där adsorptionsmedel i form av kalk/natriumkarbonat och/eller aktivt kol injicerats. Adsorptionsmedlet är fluidiserat och i reaktionskammaren sker reaktion med rökgaserna vilket neutraliserar vissa ämnen. Det resulterar i ett torrt material som sedan samlas i ett slangfilter. Torr rening är vanligt förekommande vid avfallsförbränning. [15]

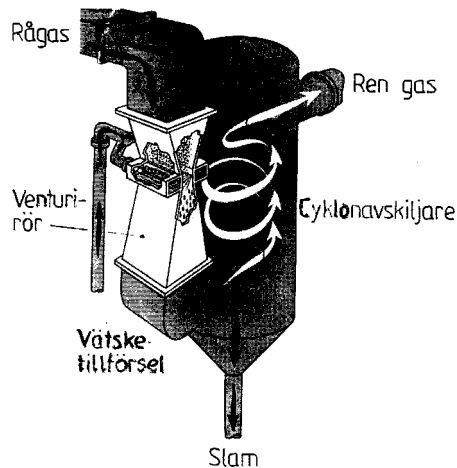
5.1.4.5 Halvtorr rening

Vid halvtorr rening sprayas rökgaserna med en blandning av kalk och vatten i en adsorptionskammare ofta kallad reaktor. Det ger reaktion med rökgasernas sura beståndsdelar samtidigt som vätskan förångas. När vätskan förångats och blandningen torkat samlas den upp i ett slangfilter. Innan slangfiltret placeras också aktivt kol för avskiljning av dioxiner. [15]

5.1.4.6 Våt rening

Våt rening sker normalt genom att rökgaserna passerar två skrubbrar. I den första sker avskiljning av sura gaser. I den andra sprutas en kalklösning eller lut in för att reagera med svavel.

Venturiskrubbern är den mest effektiva skrubbern för rening av partiklar. I den accelereras gasen tillsammans med en stor mängd mycket små vattendroppar, för att ge kollisioner mellan vatten och partiklar och få dem att fastna. Därefter separeras vattnet till exempel i en cyklon.



Figur 12: Venturiskrubber [2]

En annan skrubbertyp är packad-bädd skrubbern som används för att avlägsna sura gaser. Det sker då gasen absorberas i skrubbervätskan och neutraliseras. För att bibehålla ett neutralt pH-värde krävs tillförsel av en basisk lösning. [15]

5.1.4.7 Rökgaskondensering

Eftersom bränslet innehåller vatten som förångas vid förbränningen, försvinner nyttig energi genom skorstenen med rökgaserna. Hur stor mängd energi som tas tillvara beror på hur mycket förångat och vid förbränningen bildat vatten som rökgaserna bär med sig. Bränslen med hög fukthalt ger därför mer kondenseringsvärme. Rökgaskondensering omfattar runt 20 % av den totala värmeeffekten men varierar beroende på bränsle och kondensor.

Genom att mer värme tas tillvara förbättras processens totalverkningsgrad. Beräknad verkningsgrad för en sådan process blir något missvisande, då verkningsgraden kan överstiga 100 %. Förklaringen till det är att undre värmevärdet per definition används som mått på bränslets energiinnehåll i Sverige. Eftersom förångningsenergin inte är medräknad som tillförd energi kan mer värme utvinnas än vad som tillförs enligt definitionen.

Samtidigt som totalverkningsgraden ökar, minskar alfavärdet eftersom värmeproduktionen ökar. Vid tillfällen då elproduktion är mer lönsam än värmeproduktion kopplas ofta rökgaskondensorn bort. Orsaken till detta är att den ökade värmeproduktion som tillåts med rökgaskondensering samtidigt minskar den möjliga elproduktionen. Eftersom alfavärdet ökar krävs en lägre pannlast för att tillgodose värmebehovet, vilket ger lägre elproduktion. Pannverkningsgraden minskar också något eftersom rökgastemperaturen måste vara högre vid rökgaskondensering än utan. Rökgasernas energi tas inte upp lika mycket i pannan då en del energi som normalt används inom pannan tillgodogörs i rökgaskondensorn.

Vid rökgaskondensering krävs också en ökning av rökgasfläktens kapacitet. Antingen ersätts den befintliga fläkten med en större, alternativt installeras en boosterfläkt. Den extra fläktkapaciteten ökar den interna elförbrukningen. [5], [16]

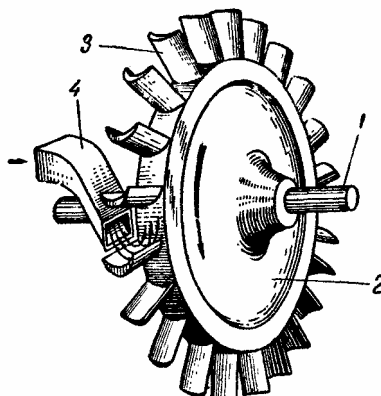
5.2 Turbin

Turbinens uppgift i kraftvärmecykeln är att omvandla så mycket av ångans energi till mekanisk rörelse som möjligt.

Turbiner delas upp beroende på arbetsprincip och finns som aktions- och reaktionsturbiner. Uppdelningen baseras på turbinens reaktionsgrad. Reaktionsgraden bestäms av hur stor del av ångans energiförändring som utgörs av statisk respektive dynamisk tryckenergiförändring. Reaktionsgrad 0 innebär att ingen statisk energiförändring och därmed ingen expansion sker i turbinhjulet. Då reaktionsgraden är över 0 överförs energi både statiskt och dynamiskt i hjulhuset genom expansion och hastighetsförändring. Man kan också se denna faktor som ett mått på hur stor del av energiomvandlingen som sker via reaktions- respektive impulsenergi.

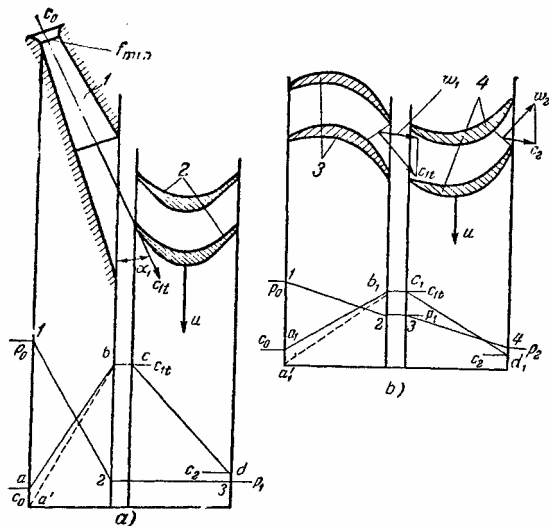
$$R = \frac{W_{\text{Reaktion}}}{W_{\text{Total}}}$$

I sin enklaste form består en turbin av ett hjul bestyckat med skovlar. Ånga strömmar in i ett munstycke med ett initialt tryck och entalpi, i munstycket expanderar ångan vilket gör att dess hastighet ökar. När ångan träffar turbinskovlarna utsätts de för en impuls kraft som får hjulet att rotera. Turbiner som arbetar efter denna princip, där all expansion sker i fasta kanaler som munstycken är alltså aktions- eller impuls turbiner.



Figur 13: Enkel aktionsturbin [17]

Den andra möjliga arbetsprincipen som finns utgörs som nämnts av reaktionsturbiner. Dessa har normalt en reaktionsgrad runt 0,5. I reaktionsturbinen passerar ånga genom fasta ledskenor, där expansion sker. När den sedan strömmar genom de roterande skovlarna sker ytterligare expansion. Alltså utförs en kontinuerlig expansion genom både ledskenor och skovlar och häri ligger skillnaden mellan reaktions- och impulstekniken.



Figur 14: Aktions och reaktionssteg [17]

Två motsatta rader bestående av ledskenor och skovlar bildar ett turbinsteg. Det är möjligt att använda flera steg i följd i turbinen. Då kommer ångan ur första skovel raden att ledas in i efterföljande ledskenor och så vidare. En turbin med flera sådana uppsättningar benämns flerstegsturbin. Reaktionsturbiner är normalt uppbyggda av flera steg.

Det finns också en uppdelning av turbinen efter strömningsriktningen in i turbinen, axial eller radial, men i princip tillämpas endast axial strömning i ångturbiner.

Beroende på trycket som verkar på ångan ut ur turbinen finns mottrycks- och kondensurbiner. Kondensurbinen är direkt kopplad till en kondensator vars temperatur bestämmer utloppstrycket. Syftet med kondensurbiner är att producera maximal möjlig effekt, varför lägsta möjliga kondensortryck eftersträvas. Även mottrycksurbiner är kopplade till en kondensator men har ett högre mottryck. Ångan från turbinutloppet är avsedd att användas för uppvärmning och kondenseras därför vid en högre temperatur. Temperaturen och därmed mottrycket bestäms av värmeförbrukaren vilket gör att den normalt är mellan 70 - 120°C.

Turbiner som ger total kondensation av ånga ger störst elproduktion, men den värme som erhålls efter turbinen blir så låg att den är i det närmaste otjänlig vid kraftvärmeproduktion. Det finns då en möjlighet att avleda ånga ur turbinen i ett tidigare skede för att på så sätt erhålla en större värmemängd om den skall ingå i en kraftvärmecykel, men det ger samtidigt minskad elproduktion.

Vid kraftvärmeproduktion med en ångturbin är det därför normalt mottrycksurbiner som används. Det är den enklaste och mest passande varianten för detta ändamål. Ånga kommer ur turbinen med ett relativt lågt tryck men fortfarande i ångfas vilket gör att energiinnehållet är högt och kan tas tillvara i kondensorn. Även i mottrycksurbinen är det möjligt att avleda en del av ångan tidigare för att tillfredsställa ett större värmebehov men det sker även då på bekostnad av elproduktionen. [1], [2], [5], [17]

5.2.1 Reglering

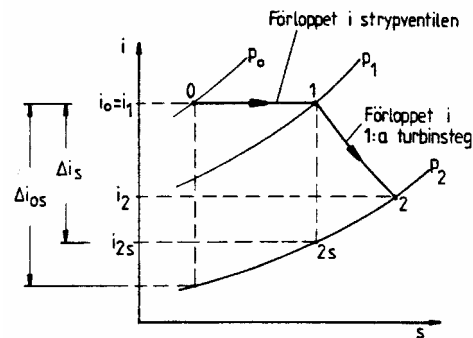
Lasten som en kraftvärmeanläggning drivs vid är baserad på till exempel det värmeunderlag som finns. Eftersom det periodvis inte finns något stort värmeunderlag kommer man då inte att elda pannan för fullt. Det innebär att anläggningen drivs vid dellast och då kan cykeln inte uppvisa samma alfavärde som vid full last.

Orsaken till sänkningen av alfavärde är att turbinen är dimensionerad för ett visst drifttillstånd där effektiviteten är i det närmaste maximal och turbinen drivs med minimal specifik värmemängd per kW, när man avviker från detta tillstånd kommer turbinens totala verkningsgrad att sjunka. Det gör att man producerar mindre elektricitet jämfört med värme.

Eftersom turbinen är dimensionerad för ett visst flöde och tillstånd vid inloppet, måste detta regleras när man ändrar lasten. En laständring kommer att försämra turbinens verkningsgrad olika mycket beroende av vilken reglermetod som används. Turbinen kan regleras med stryp-, partial- eller glidtrycksreglering.

5.2.1.1 Strypreglering

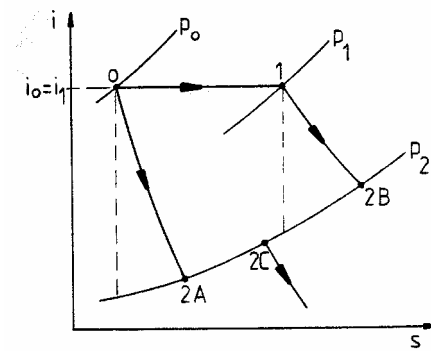
Vid strypreglering stryps flödet i en ventil före turbininloppet, vilket minskar inloppstrycket till första steget. Vid strypningen är entalpin konstant men entalpifallet som sker till mottrycket kommer att minska och man får därför strypförluster. Dessa förluster blir relativt stora, speciellt när man går ner på låga laster och man får då en väsentligt lägre totalverkningsgrad än vid fulldrift. [2]



Figur 15: Entalpi-Entropi diagram av förloppet vid strypreglering [2]

5.2.1.2 Partialreglering

Partialreglering sker genom att ångan tillförs genom flera munstycken, där varje munstycke kan stängas med en ventil. Genomströmningsarean vid varje enskilt munstycke kan minskas oberoende av de andra då lasten minskas. Det ger mindre förluster än vid strypning av hela flödet och man får då en blandning av strypt och ostrypt flöde. Fördelen med detta är att ångan som strömmar genom de helt öppna ventilerna inte stryps och man får då inte några strypförluster över dessa. [2]



Figur 16: Entalpi - entropi diagram av förloppet vid partialreglering [2]

5.2.1.3 Glidtrycksreglering

Glidtrycksreglering innebär att man reglerar trycket före turbinen genom att ändra panntrycket som sänks för att ge den önskade delasten. Man behöver då inte utföra någon strypning vilket resulterar i ett konstant volymflöde genom turbinen. [2]

5.2.2 Val av turbin

Valet av turbin beror på vilket fokus man har på anläggningen, vill man ha en låg investeringskostnad väljs en enklare variant till exempel enstegsturbin men för bättre verkningsgrad behövs ofta en lite dyrare turbin och man kan då optimera elutbytet i förhållande till investering genom att välja rätt sorts turbin.

Beroende på ångdata väljs en passande turbin. Vid mättad ånga används ofta en enklare aktionsvariant, men vid överhettad ånga används normalt en mer avancerad turbin.

Eftersom en hög fukthalt vid turbinens utlopp kan medföra skador på turbinen krävs att turbinens verkningsgrad är anpassad för de driftförhållande som råder. En turbin med hög verkningsgrad tillgodogör sig mer av ångans energi, vilket samtidigt leder till att fukthalten i ångan ökar. Det är då nödvändigt att ha en hög temperatur in i turbinen för att begränsa fukthalten. Begränsningen för hur hög halt som kan tillåtas brukar sättas till ca 12 % men moderna turbiner kan klara upp till 15-16 %. [18] Vid de tryck som rapporten begränsats till är dock fukthalten normalt inget problem utan det kan ha större inverkan vid höga tryck.

För pannor med låg effekt används normalt en enkel turbin, eftersom flerstegsturbiner oftast tillverkas för ett större effektuttag än vad dessa kan producera. Dessa är också mycket billigare än de avancerade turbinerna.

5.3 Generator

För att omvandla den mekaniska energin från turbinen till användbar el används en generator. Generatoren är en elektrisk roterande maskin som drivs av turbinen och allmänt kännetecknande för sådana är att de omvandlar mekanisk energi till elektromagnetisk.

Generatoren består av två delar, en fast stator och en roterande rotor. Turbogeneratoren använder fenomenet att magnetfält kan skapas genom att ström flödar genom ledare. Då ledarna tvingas forcera magnetfältet uppstår en spänning. Generatorer finns som synkrona och asynkrona och synkrona generatorer är vanligast som turbogeneratorer. Dessa har till skillnad från de asynkrona ett konstant varvtal.

5.4 Kondensor

Kondensorn kopplas in för att göra det möjligt att ta tillvara på energin hos ångan från turbinen och överföra den till vatten som används för uppvärmning i form av till exempel fjärrvärme. En stor mängd energi kan utvinnas ur fasförändringen som sker vid kondensation. Det sker genom att returvattnet från värmenätet värmeväxlas mot den ånga som kommer från turbinen. Ångan kondenserar och kondensationsenergin överförs till returvattnet som värms upp. Det pumpas sedan åter till fjärrvärmenät eller andra förbrukare.

Kondensorer kan vara uppbyggda på många olika sätt men huvudprincipen är enkel. Man överför värme från ett hett medium till ett kallt utan att de kommer i kontakt eller blandas. Det utförs genom att det varma mediet strömmar runt det kalla som är inuti ett rör eller dylikt vilket gör att det kalla vattnet värms av kondenseringsenergin från ångan kondensation. [3]

6 Teknik

Det finns flera olika tekniker som kan användas för kraftvärmeproduktion. Detta examensarbete kommer endast att behandla och jämföra två olika typer, där metoden för ånggenerering är den huvudsakliga skillnaden.

De tekniker som jämförs är ångpanna med ångturbin samt ett annat koncept som går under namnet Vaporel.

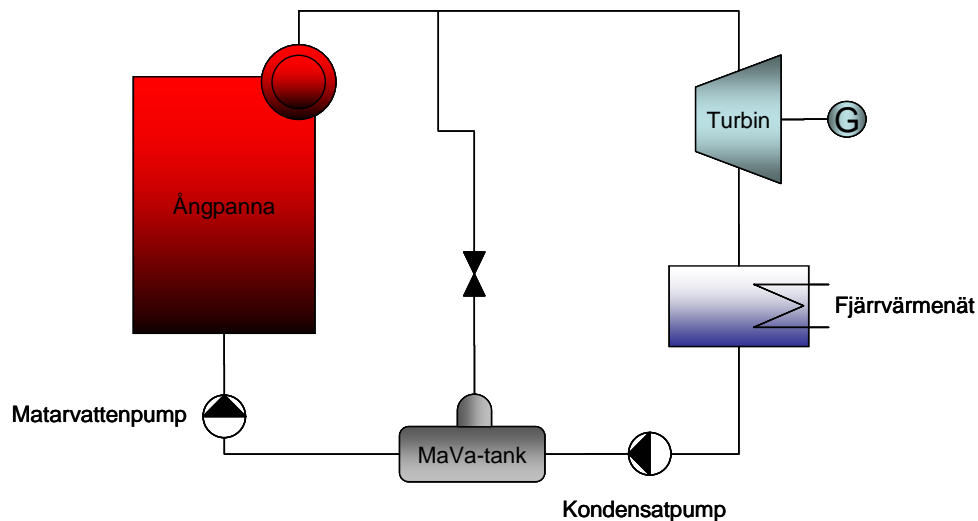
6.1 Ångpanna med ångturbin

Ångpanna med ångturbin är den äldsta och vanligaste tekniken som används för kraftvärme, den utgår från den så kallade Rankine cykeln. Tekniskt sker kraftvärmeproduktionen genom att mättad eller överhettad ånga genereras i en ångpanna. Ångdata beror på behov och förutsättningar, men överhettning ger cykeln bättre prestanda.

Ångan leds från pannan direkt in i en mottrycksturbin där den får expandera till det mottryck som bestäms av kondensorn. Den mekaniska energi som utvecklas vid expansionen i turbinen tas till vara av en generator som genererar elektricitet.

Ångan lämnar turbinens utlopp för att kondenseras i en värmekondensator. Kondensationsvärmes används för uppvärmning genom till exempel fjärrvärmenätet. Kondensatet pumpas därefter till en matarvattentank och sedan åter till ångpannan för att genomgå samma cykliska process igen.

En viss del av ångan från pannan leds direkt ner till matarvattentanken för uppvärmning till en bestämd temperatur på vattnet in till pannan. Denna temperatur är beroende av trycket eftersom mättnadstillstånd råder. Matarvattentanken är nödvändig dels för avgasning av vattnet men också för att temperaturen på vattnet in till pannan inte ska vara för låg. Låg temperatur kan medföra korrosion i pannan. Det finns också möjligheten att använda en avtappningsturbin för att höja matarvattentemperaturen samtidigt som man kan tillgodogöra sig mer av ångans energi till elgenerering. Vid ett sådant fall passerar en del av ångan delvis turbinen som då kan tillgodogöra sig mer energi. Andelen ånga som leds från panna direkt till matarvattentanken minskas och på detta sätt kan man höja cykelns verkningsgrad [2], [11]



Figur 17: Ångpanna med ångturbin

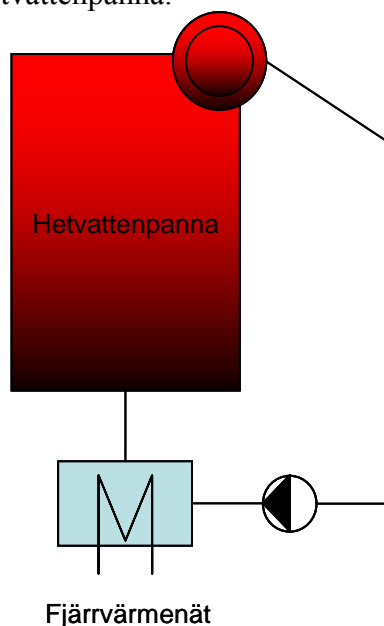
Som tidigare nämnts finns en variant av ångpanna i form av halvångpanna, som är ett alternativ vid konvertering av hetvattenpanna. För att det ska vara möjligt att bygga om en hetvattenpanna till halvångpanna krävs att pannan har ångdom och är av vattenrörstyp. En del av panneffekten tas då ut på toppen av den befintliga ångdomen i form av mättad ånga. Man kan även behålla den ursprungliga hetvattenproduktionen vid tillfällen då turbinen inte är i drift och ånga inte är nödvändig, vilket gör att ingen reservkondensator är nödvändig.

Halvångpannan kan kompletteras med en överhettare, vilket gör att ånga kan produceras med ångdata anpassat till pannans tryckklass. Eftersom en del av panneffekten går till överhettning minskas då ångproduktionen. [4]

Ett annat alternativ vid ombyggnad är att byta de tryckbärande delarna i pannanläggningen till ett nytt tryckkärl som tål högre tryck. Detta innebär ett stort ingrepp i pannan och stora delar av anläggningen måste bytas. Höga ångdata innebär samtidigt ökade godstjocklekar och därmed ökade dimensioner och vikt. Det är en av begränsningarna vid konvertering med denna metod. [14]

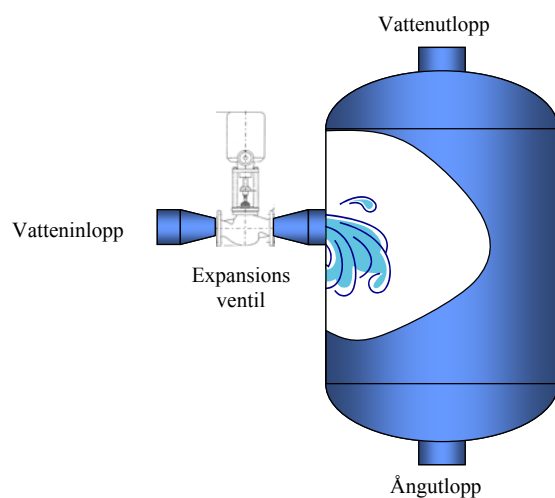
6.2 Vaporel[®] konceptet

Vaporelkonceptet är en alternativ metod för ångbaserad kraftvärme, som utgår från en värmeproduktionscykel med hetvattenpanna.



Figur 18: Värmeproduktionscykel

Fördelen med denna teknik är alltså att ingen ångpanna är nödvändig för att ge ånga och därmed ångbaserad kraftvärme. Ångproduktion i Vaporelcykeln sker istället i en flashbox. Flashboxen är den utmärkande komponenten i Vaporelkonceptet. Det är en ånggenerator av direkt typ som får mättat vatten från hetvattenpannan. Genom att trycket som verkar på vattnet sänks i en reglerventil vid konstant entalpi, omvandlas en mindre del av vattenflödet till mättad ånga. I flashboxen separeras ånga från vatten och leds via en droppavskiljare vidare till turbinen medan det mättade vattnet leds ut för att blandas med kondensatet från kondensorn. [24]

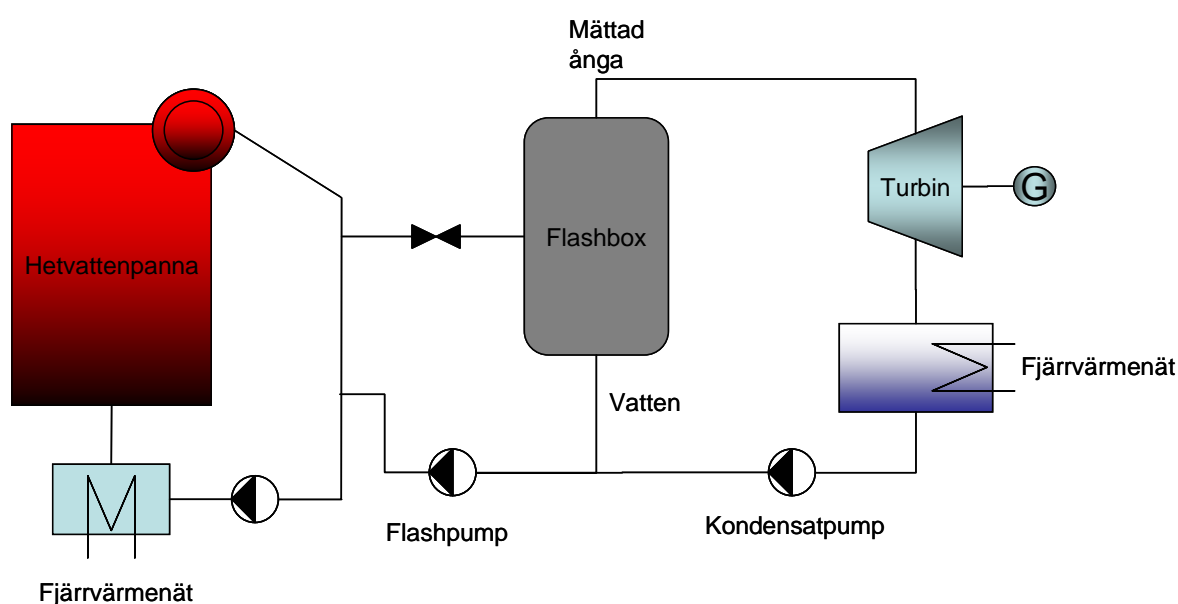


Figur 19: Flashbox

Den ånga som utvecklats i flashboxen leds vidare till en ångturbin för elproduktion på samma sätt som nämnts tidigare. Efter turbinen kondenseras ångan i en kondensator vid värmewäxling mot vatten till fjärrvärme eller processändamål.

Kondensatet tillförs energi efter kondensorn av en kondensatpump, för att erhålla samma tryck som vattnet från flashboxen, det vill säga ångtrycket innan turbinen. Vattnet som leds ur flashboxen blandas med kondensatet och tillförs energi av en flashpump som höjer trycket till pannans utloppstryck. Det pumpas därefter in till pannan för att sluta cykeln.

Vid fulldrift ska allt värmebehov täckas av den energi som kondenseringen i kondensorn genererar, men det kan behövas ytterligare värmning av returvattnet och detta sker då i en efterföljande värmewäxlare som är kvar från den ursprungliga värmecykeln.



Figur 20: Vaporel

Eftersom det sker en trycksänkning i reglerventilen före flashboxen är det en förutsättning att pannans tillåtna driftstryck är någorlunda högt, för att kunna uppvisa tillfredställande alfavärde, vilket diskuteras ytterligare senare i rapporten.

Vaporel tillämpas i första hand som ombyggnadskoncept. I värmeverk är pannan ofta konstruerad för ett högre tryck än vad den drivs vid vilket gör Vaporel-tekniken användbar då drifttrycket kan ökas. Det är dock möjligt att den kringutrustning som används är anpassad till det drifttryck som används vid värmeproduktionen och den måste då uppgraderas.

De främsta fördelar som kan nämnas i samband med en konvertering är att:

- Ingen ombyggnad av hetvattenpannan är nödvändig
- Det behövs endast två nya huvudkomponenter, flashbox och turbin med kondensor och generator.
- Hela panneffekten kan tas ut som ånga.
- Ingen dyr ombyggnad av trycksatta kärl eller kringutrustning behövs.

Och nackdelarna är:

- Relativt låg elverkningsgrad och alfavärde.
- Relativt stor del, ca 10 % av producerad el går till cirkulationspumpen.
- Endast produktion av mättad ånga.

[11], [14]

7 Teknisk jämförelse

Ett huvudsyfte med examensarbetet var att utföra en teknisk jämförelse mellan Vaporel och ångpanna med ångturbin. Följande kapitel behandlar denna jämförelse.

Vid jämförelse mellan kraftvärmecykler finns nyckeltal som används för att ge en bedömning av hur de står emot varandra. Två vanliga tal som används är alfavärde och elverkningsgrad. Dessa är bättre än att till exempel jämföra elproduktionen eftersom den är proportionell mot panneffekten.

7.1 Alfavärde

Det nyckeltal som i första hand används och som är vanligt förekommande i litteratur, är hur mycket el i förhållande till värme som genereras. Denna kvot kallas för alfavärde och det definieras som:

$$\alpha = \frac{P_{el}}{P_{värme}}$$

Vid beräkning av alfavärdet kan antingen brutto- eller nettovärdet användas, för bruttovärdet används den eleffekt som kan mätas vid generatorklämman och för nettovärdet används den eleffekt som kvarstår då cykelns interna förbrukning är subtraherad.

7.2 Elverkningsgrad

Ett annat nyckeltal som är vanligt är cykelns elverkningsgrad, som anger förhållandet mellan nettoproduktion av el och tillförd bränsleeffekt. Den definieras därmed som:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{bränsle}},$$

Tillförd bränsleeffekt kan också användas för att bestämma pannans verkningsgrad.

$$P_{bränsle} = \frac{P_{panna}}{\eta_{panna}}$$

Med de framtagna beräkningsmodellerna har processberäkningar av koncepten gjorts för att jämföra deras utförande vid olika förutsättningar. Som presentationsform för jämförelsen skapades de matriser som utgör Bilaga 1.

En grafisk jämförelse baserad på data från Bilaga 1 presenteras nedan och visar hur alfavärdet varierar för de två koncepten vid olika driftfall i form av ändrat panntryck och framledningstemperatur. Övriga förutsättningar gäller enligt Bilaga 1.

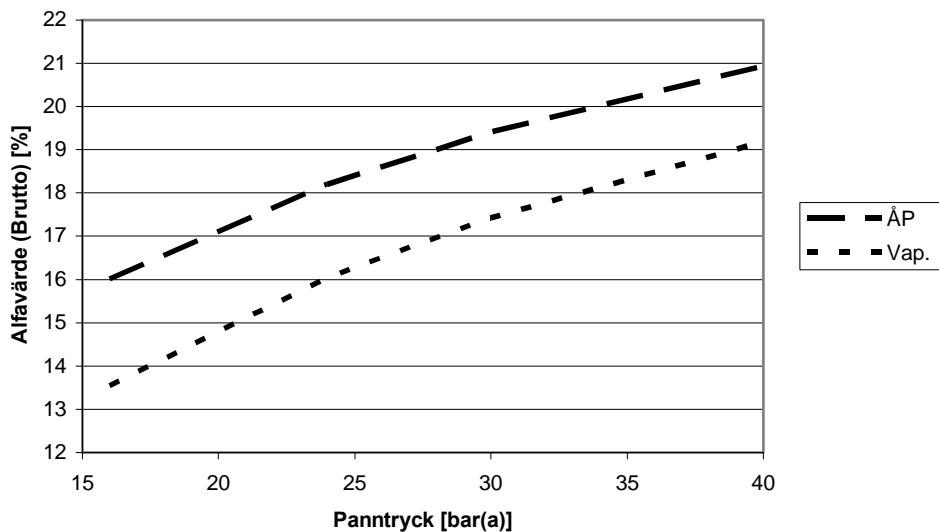


Diagram 6: Alfavärde vid 85°C framledningstemperatur

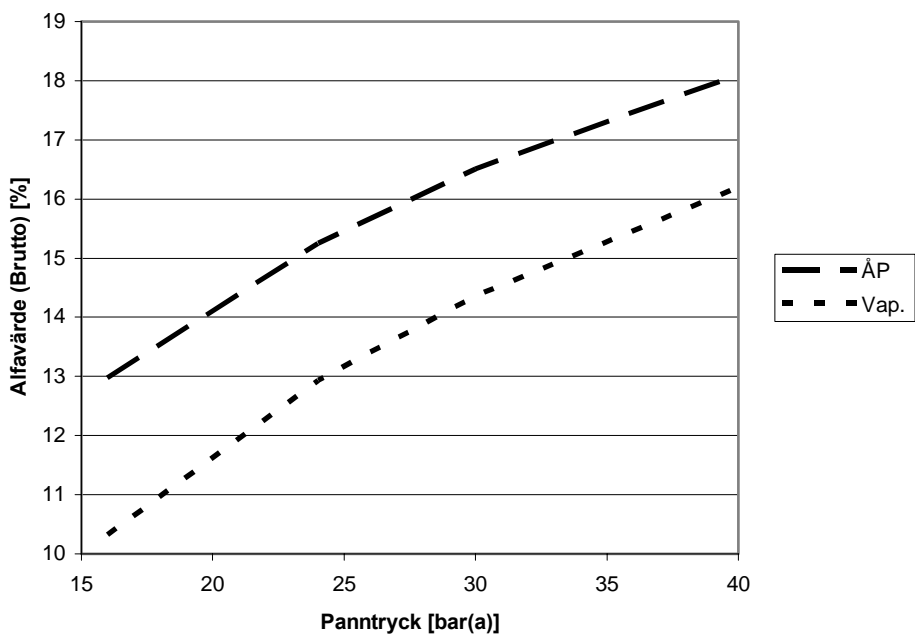


Diagram 7: Alfavärde vid 105°C framledningstemperatur

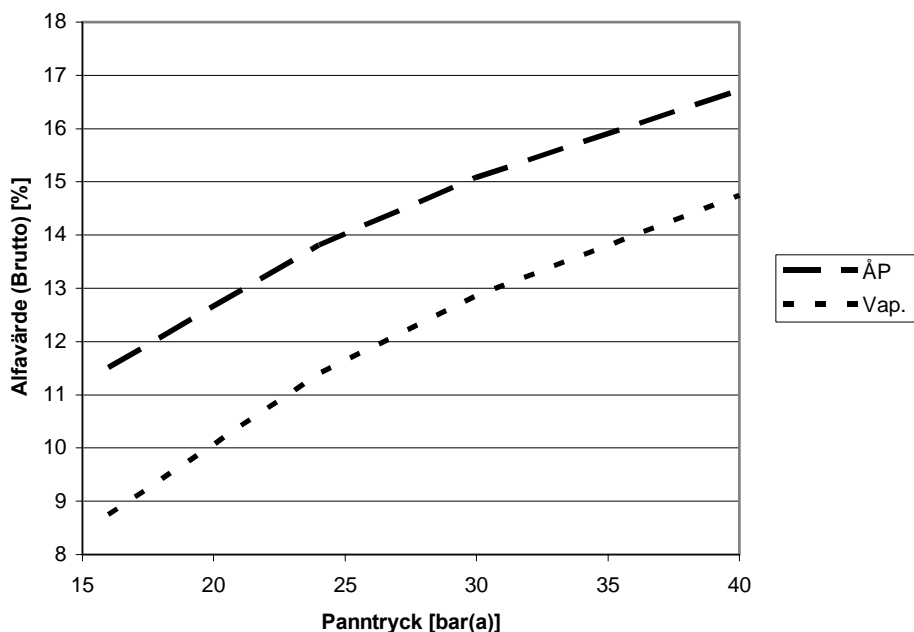


Diagram 8: Alfavärde vid 115°C framledningstemperatur

Resultatet från jämförelsen mellan de två kraftvärmecyklerna som visas i diagrammen är entydigt att ångpanna med ångturbin uppvisar större procentuell elproduktion än Vaporel vid likvärdiga förutsättningar.

Ett annat resultat från beräkningarna är att den procentuella skillnaden mellan alfavärde för Vaporel och ångpanna ökar med stigande framledningstemperatur. Det går även att se att denna procentuella skillnad minskar då panntrycket ökas.

De begränsningar satta för examensarbetet som påverkar alfavärdet är:

- Panntryck: 16 – 40 bar
- Framledningstemperatur: 80-115°C

Ytterligheterna av dessa samt med olika turbinverkningsgrad och cirkulationsflöde visar att Vaporel kan uppvisa alfavärden mellan 4 – 22 %. Ångpannan i sin tur ligger mellan 9 – 25 % med motsvarande förutsättningar.

7.3 Ångtryck

Orsaken till att cykeln med ångpanna ger mer el är att trycket som verkar på ångan vid turbininloppet är det samma som panntrycket. Med Vaporel utförs en trycksänkning och turbinen utvinner då inte lika mycket energi eftersom entalpifallet minskas. Det gör att Vaporel ungefär ger samma alfavärde som en ångpanna hade gjort vid det lägre ångtrycket. Ångtrycket i Vaporel är beroende av förutsättningarna, det är det tryck som ger jämvikt i cykeln.

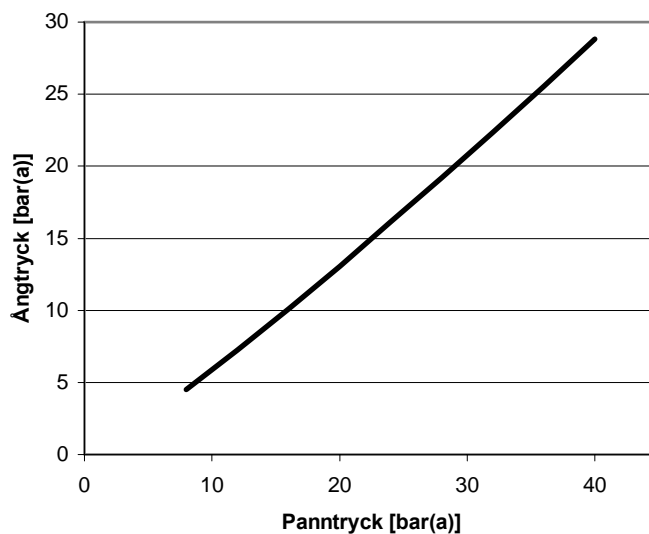


Diagram 9: Ångtryck jämfört med panntryck för Vaporel vid 90 kg/s cirkulationsflöde.

Som kan ses i Diagram 9 är ökningen av ångtrycket inte helt linjär mot panntrycket, vilket innebär att den procentuella trycksänkningen i flashboxen minskar vid högre panntryck. Det är förklaringen till varför Vaporel närmar sig alfavärdet för cykeln med ångpanna vid högre panntryck. Samma data ligger till grund för Diagram 10 där det är enklare visualiserat.

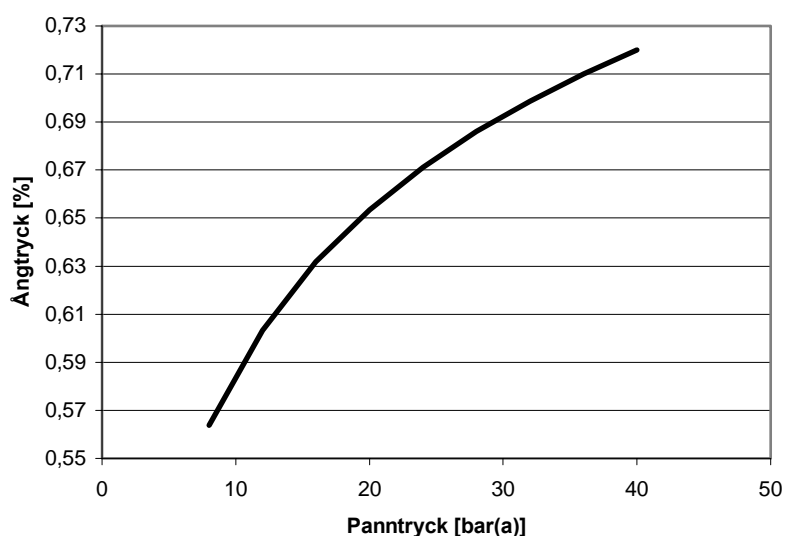


Diagram 10: Ångtryck jämfört med panntryck för Vaporel vid 90 kg/s cirkulationsflöde.

Kurvans branta lutning vid låga panntryck visar varför det strävas efter högt panntryck och varför det är nödvändigt att höja detta vid konvertering.

Ångtrycket är förutom panntryck också till stor del beroende av cykelns cirkulationsflöde, den kurva som visas representerar endast förhållandet vid ett visst cirkulationsflöde, men trenden är likadan för alla flöden.

7.4 Intern elförbrukning

Förutom att bruttoproduktionen av el är lägre, förbrukas dessutom mer el internt för att driva pumparna i Vaporel än ångpanna med ångturbin. Det beror på ett större vattenflöde, vilket kräver mer effekt för att trycket ska höjas. Störst förbrukare är flashpumpen, som i princip höjer trycket från ångtrycket åter till panntrycket.

På grund av det stora vattenflödet genom flashpumpen blir dess effektförbrukning hög, runt 10 % av den producerade eleffekten. Den pumpeffekt som krävs är beroende av vilket ång- och panntryck som används.

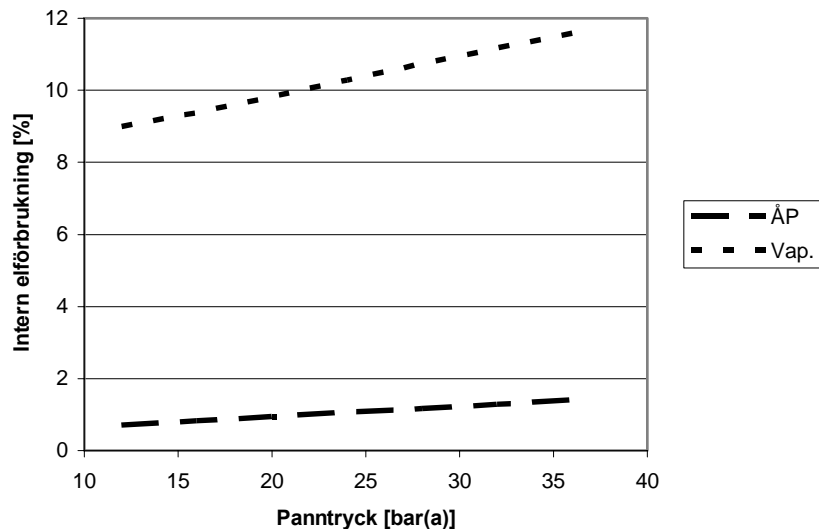


Diagram 11: Intern elförbrukning för pumpdrift, % av producerad el.

Hur stor andel som går till pumpdrift beror på ett antal faktorer. Förutom panntryck, vilket visas i diagrammet ovan, påverkar även cirkulationsflöde och tryckfall i pannan. Den beror också på turbinverkningsgraden eftersom pumpeffekten då är konstant men elproduktionen ändras.

På grund av den höga interna elförbrukningen blir skillnaden mellan brutto- och nettoalfavärde för Vaporel större än för ångpanna med ångturbin. Den energi som tillförs av pumparna går dock inte till spillo utan tillgodogörs cykeln i form av värme. En ungefärlig bild av hur brutto och nettoalfavärdet förhåller sig till varandra kan ses i diagram 12. Ångtrycket styrs här av cirkulationsflödet i cykeln, vilket förklarar att skillnaden mellan brutto- och nettovärde ökar med ångtryck. Ökat vattenflöde vid konstant effekt ger högre ångtryck. Skillnaden mellan netto- och bruttovärde beror också på pumparnas verkningsgrad och andra indata till cykeln.

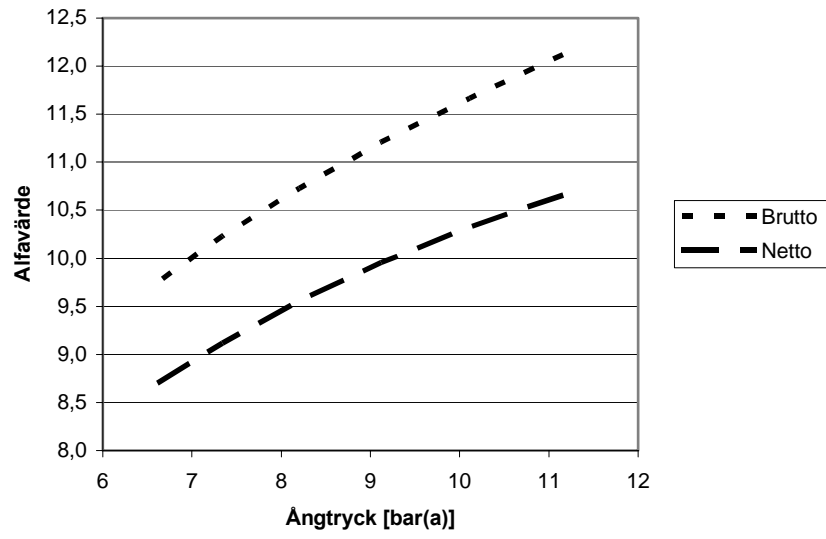


Diagram 12: Brutto- och nettoalfavärde vid olika ångtryck, Panntryck 16 bar

8 Metoder för ökat elutbyte

Det finns ett antal faktorer som styr hur stor andel elektricitet som kan fås ur en kraftvärmeprocess. Huvudsakligen anpassas kraftvärmeverket efter värmebehovet och elproduktionen har varit en mindre viktig del. Eftersom det på senare tid blivit mer lönsamt att öka elproduktionen är det intressant att utvärdera resultaten av de metoder som kan användas. Det är också av stort intresse då man undersöker möjligheten att producera el efter en konvertering av ett värmeverk. Vid en konvertering har man inte lika stora möjligheter att påverka cykeln eftersom den då är anpassad för en viss drift, vilket gör att vissa metoder inte är möjliga att använda, utan större ingrepp i kretsen.

Man måste också vara medveten om att en anpassning för ett ökat elutbyte samtidigt leder till en minskad värmeproduktion eftersom panneffekten hålls konstant. Om efterfrågan på värme är stor kan man kompensera detta bortfall med tre olika metoder. [14]

- Genom att öka fjärrvärmeproduktionen i andra anläggningar i systemet efter konverteringen
- Genom att dimensionera anläggningen för en högre effekt.
- Genom att minska elproduktionen.

Vilket alternativ som är bäst beror på anläggningens utseende, t.ex. om det finns andra pannor i anläggningen som kan producera värme.

I utredande syfte har beräkningsmodellerna använts för att beräkna vilken produktion som kan väntas vid olika driftfall och anläggningsdimensioner. Det har då utretts ett flertal metoder som används för att ge ökad elproduktion, samt vilken positiv effekt dessa metoder faktiskt kan generera.

Diagrammen används i första hand för att urskilja trender vid förändringar av förutsättningarna, vilka kan vara intressanta att utreda ytterligare. Alfavärdet är baserat på bruttoproduktionen av el.

Övriga indata som används om inget annat anges är:

- Panntryck: 16 bar (a)
- Cirkulationsflöde i Vaporel: 75 kg/s
- Framledningstemperatur: 85°C
- Temperaturskillnad mellan varm och kall sida i kondensorn: 4°C
- Matarvattentemperatur: 120°C
- Turbinverkningsgrad 57 %
- Pumpverkningsgrad 80 %
- Generatorverkningsgrad 96 %

8.1 Ångdata

Valet av ångdata är den enskilt viktigaste faktor som avgör vilka produktionsmöjligheter som en kraftvärmecykel kan uppvisa. Höga ångdata, det vill säga hög temperatur och högt tryck, ger möjligheten att få mer el ur processen och därmed högre alfavärde.

8.1.1 Tryck

Som nämnts tidigare är ångtrycket av stor betydelse för elproduktionen. Genom att höja ångtrycket ges samtidigt en höjning av ångans mättnadstemperatur och ett ökat energiinnehåll per massenhet. Med konstant mottryck ges också ett ökat tryckfall över turbinen vilket innebär ett större entalpifall och mer utvunnen el. Högt ångtryck eftersträvas därför vid kraftvärmeproduktion.

Högt tryck ställer krav på utrustningen eftersom påfrestningarna ökar. Vid konvertering är möjligheterna att påverka panntrycket begränsade och man får då anpassa sig efter det tryck som pannan är dimensionerad för.

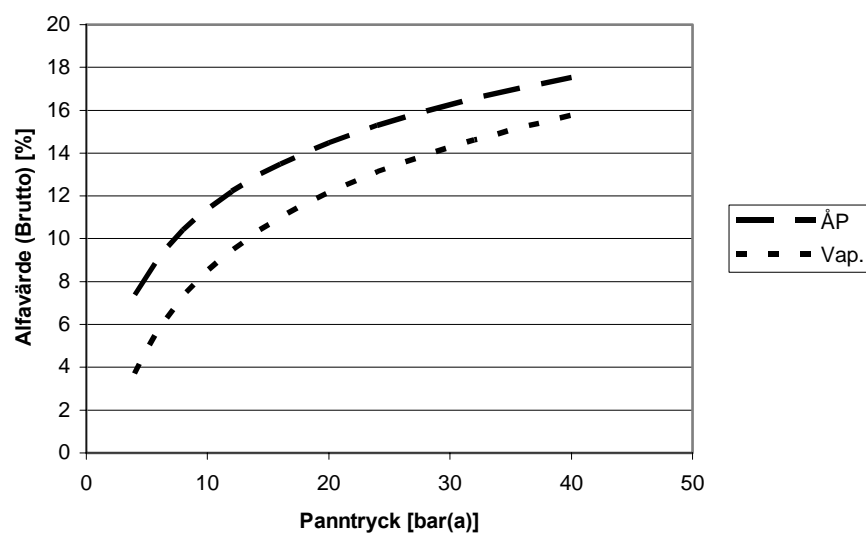


Diagram 13: Alfavärde vid varierande panntryck.

8.1.2 Temperatur

Ångtemperaturen höjs genom att den mättade ångan överhettas. Vid överhettningen ökas ångans energiinnehåll per massenhet och då kan elutbytet ökas.

Detta är inga problem då en ångpanna används som producent av ånga, eftersom de ofta utförs med inbyggd överhettare och ger överhettad ånga direkt ur pannan. Det är dock inte möjligt med Vaporel eftersom ångan måste överhettas efter flashboxen där den bildas.

För att utreda vilken inverkan en överhettning av ångan till turbinen kan innebära för Vaporelcykeln, har därför en extern överhettare tillförts efter flashboxen. Det bör noteras att energi måste tillföras utifrån vid extern överhettning, det innebär att ångproduktionen är lika stor som vid fallet utan överhettning. För ångpannan där överhettningen sker med hjälp av panneffekten leder överhettning till en minskad ångproduktion. En jämförelse av elproduktionen rakt av blir därför missvisande, eftersom den totala effekttillförseln är större för Vaporel med överhettning än för en ångpanna.

I Diagram 14 redovisas alfavärdets utveckling då överhettning av ångan sker samtidigt som turbinens verkningsgrad är konstant 65 %. Som kan ses är ökningen av alfavärdet vid den måttliga överhettning som utreds, inte av avgörande karaktär men inverkar mer vid högre överhettningstemperatur.

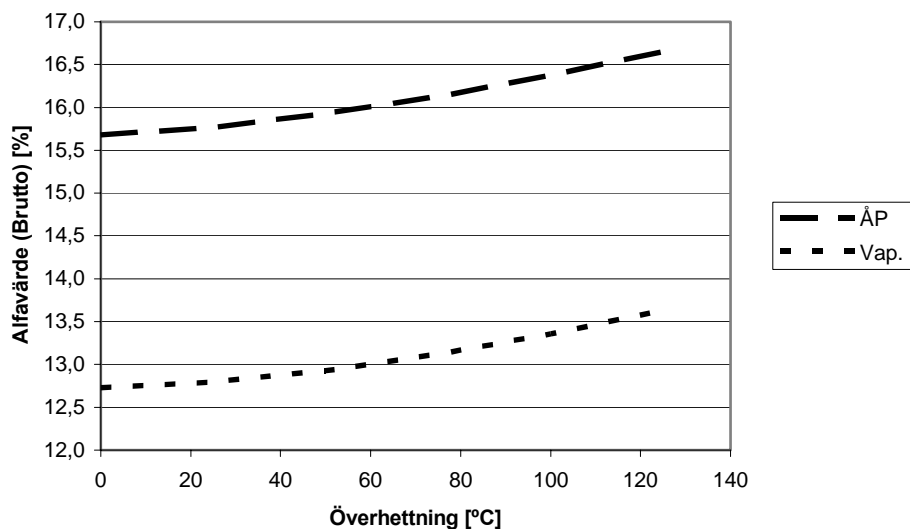


Diagram 14: Alfavärdets utveckling vid överhettning

Det kan ändå fastställas att överhettningen ger något ökad elproduktion. För att ge avgörande skillnader krävs dock relativt stor överhettning. Det är därför i första hand ett alternativ vid höga ångtryck. Diagram 15 visar den ökade elproduktionen som sker vid överhettning i Vaporel jämfört med den effekttillförsel som krävs.

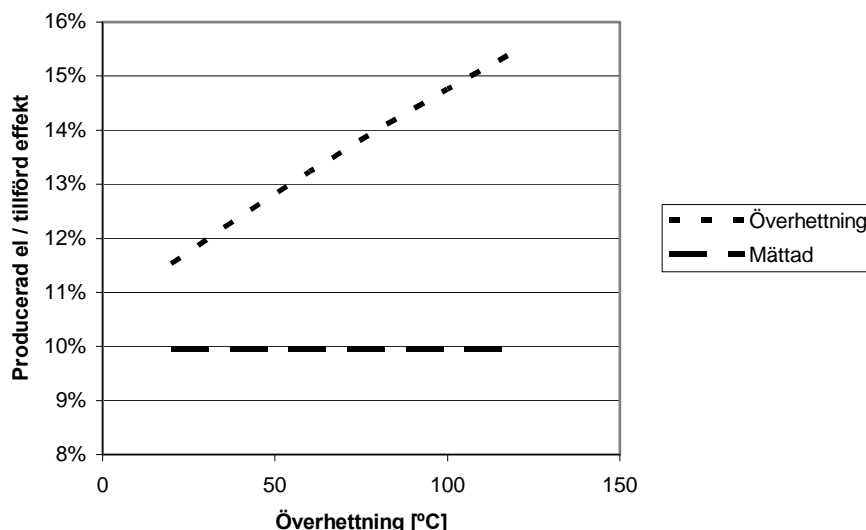


Diagram 15: Elproduktion per tillförd effektmängd vid överhettad och mättad ånga.

Diagrammet visar att den procentuella ökningen av elproduktion per tillförd effektmängd ökar då överhettning sker. Den energi som tillförs för överhettning ger därför ett större tillskott till elproduktionen än den energi som tillförs i pannan och ger därmed högre specifik elproduktion.

Principiellt ska alltså den överhettning som sker öka elproduktionen på tack vare ökat energiinnehåll, men det sker samtidigt ett mindre tryckfall då ångan passerar överhettaren. Tryckfallet tar ut en del av den positiva effekten av överhettningen.

Nedan visas ändringen av producerad el relativt den nödvändiga tillförseln av energi som krävs för att uppnå överhettning vid rådande tryckfall, det vill säga kvoten: $\frac{P_{\text{överhettad}} - P_{\text{mättad}}}{P_{\text{överhettning}}}$.

Tryckfallet gör att den extra el som produceras vid låga överhettningstemperaturer kräver större effekttillförsel per kW än utan överhettare. Under 0 % innebär dessutom tryckfallet att den totala elproduktionen sjunker trots att energi tillförs. Kurvorna för överhettning viker av vid ökande temperatur, vilket beror på att ångan då är överhettad även vid turbinutloppet eftersom en turbin med den valda verkningsgraden inte kan utvinna tillräckligt med energi.

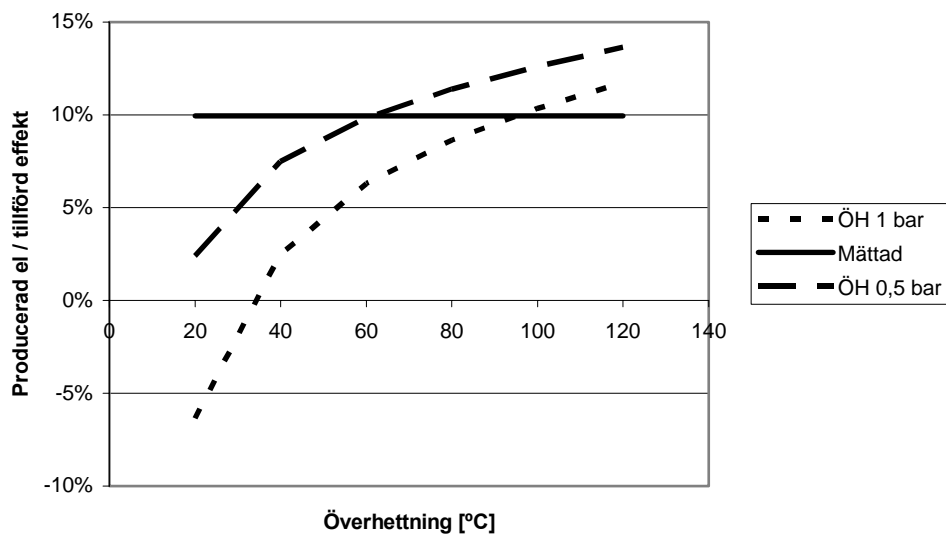


Diagram 16: Elproduktion vid överhettad och mättad ånga, tryckfall i överhettaren.

Det är därför av avgörande betydelse om överhettare används att den ger ett så litet tryckfall som möjligt för att minimera förlusterna. Tryckfallet i överhettaren påverkar alfavärdet betydligt mer vid de lägre panntrycken än vid de högre, på grund av att det då procentuellt blir större jämfört med ångtrycket. Trenden för alfavärdets variation vid olika tryckfall i överhettare kan ses i Diagram 17.

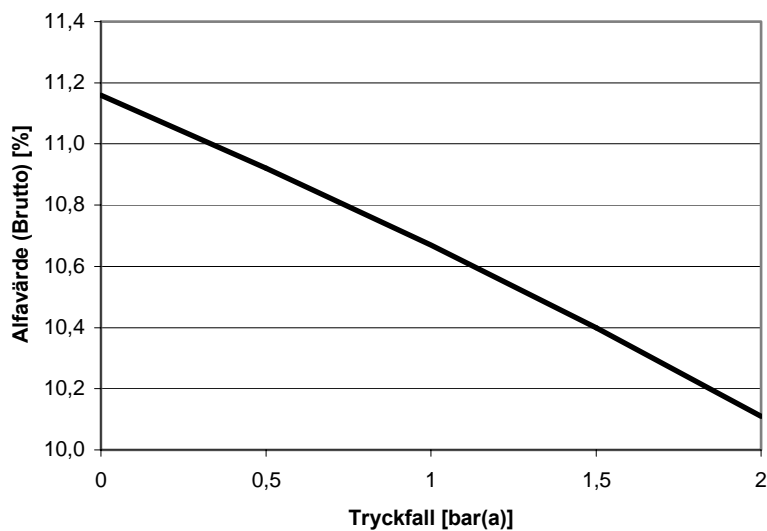


Diagram 17: Alfavärdets variation vid ökande tryckfall vid extern överhettning av Vaporel.

8.2 Val av turbin

Eftersom turbinen är den komponent som omvandlar ångans energi är dess prestanda mycket viktig för elproduktionen, turbinens verkningsgrad är direkt avgörande för alfavärdet. Diagrammet nedan visar hur alfavärdet varierar med turbinverkningsgraden med de valda förutsättningarna.

Enligt Diagram 18 kan det åter fastställas att överhettning av ångan inte är avgörande för alfavärdet men ger viss effekt, det är dock likvärdigt vid måttlig överhettning och mättad ånga. Detta gäller dock endast om turbinverkningsgraden är samma vid båda fallen.

Turbinverkningsgraden är dock begränsad och beror av tryck och temperatur. Hög turbinverkningsgrad innebär ett större energiuttag ur ångan och därmed viss kondensation i turbinen vilket skapar vattendroppar. Det krävs då överhettning för att tillåta hög verkningsgrad. Vid det tryck som gäller i turbininloppet med 16 bar panntryck och mättad ånga begränsas turbinverkningsgraden till 60 - 65 %, överhettas ångan ökar samtidigt den maximalt möjliga verkningsgraden. Det kan räcka med en relativt liten överhettning för att turbinverkningsgraden ska kunna höjas 5 – 10 % eftersom det innebär mindre vattendroppar i turbinen. Det är det huvudsakliga motivet till överhettning.

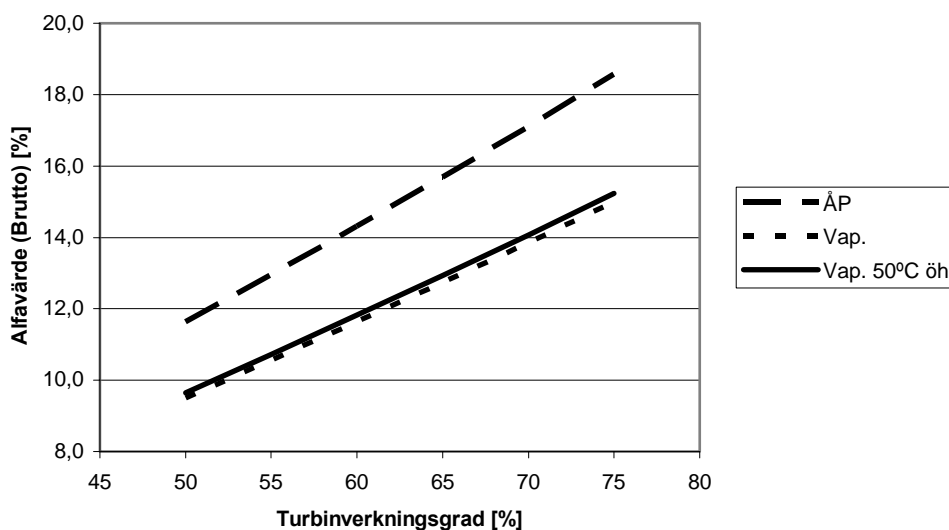


Diagram 18: Alfavärde vid varierande turbinverkningsgrad

Måttlig överhettning bör endast appliceras om det krävs för en turbin med högre verkningsgrad än vad som är möjligt med mättad ånga. Överhettning av ånga är samtidigt en förutsättning då turbiner med hög verkningsgrad används tillsammans med ett högt ångtryck.

8.3 Ökat cirkulationsflöde i hetvattenpannan

En annan variabel som påverkar alfavärdet för Vaporelcykeln i relativt stor grad är cirkulationsflödet. Genom att öka cirkulationsflödet i cykeln kan mer el genereras ur processen.

Ett värmeverk har normalt relativt lågt cirkulationsflöde. En ökning av detta vid konstant panneffekt skulle ge en betydande förbättring av alfavärdet, vilket visas i Diagram 19. Den procentuella vinsten som kan göras av denna ändring är större vid låga panntryck och avtar vid ökande tryck.

För att öka cirkulationsflödet krävs att temperaturen på vattnet till pannan ökas, vilket också kräver högre rökgastemperatur. Det medför samtidigt att pannverkningsgraden minskar något. [14]

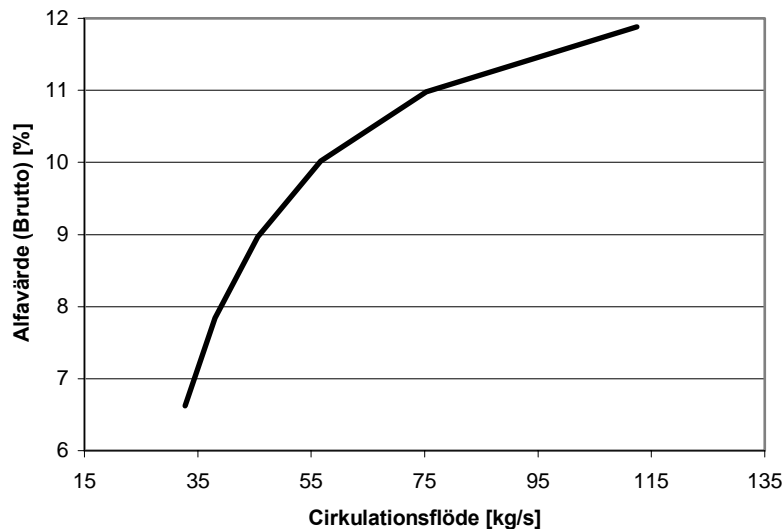


Diagram 19: Alfavärdets variation vid olika cirkulationsflöde i pannan.

8.4 Sänkt mottryck

Som framgick av den tekniska jämförelsen har framledningstemperaturen till värmenätet inverkan på alfavärdet. Mottrycket som gäller efter turbinutloppet är beroende av framledningstemperaturen och skillnaden mellan kondensorns kalla och varma sida. Genom att sänka framledningstemperaturen ut till fjärrvärmenätet kan man alltså sänka trycket efter turbinen, vilket resulterar i ett större tryckfall då inloppstrycket är konstant. På så sätt genereras en större mängd elektricitet när framledningstemperaturen minskas, vilket framgår av Diagram 20. Detta är dock en faktor som är ganska svår att förändra eftersom det begränsas av det värmebehov som råder och denna begränsning är ofta stark.

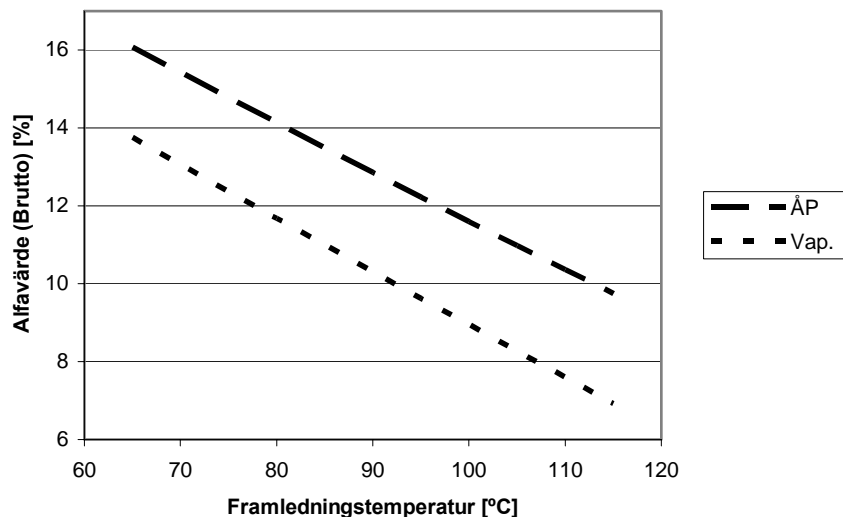


Diagram 20: Alfavärde vid ändrad framledningstemperatur

En variant av detta är att minska temperaturskillnaden mellan kondensorns varma och kalla sida, vilket också kallas grädigheit. Det ger samma resultat, alltså sänkt tryck vid turbinutloppet, eftersom temperaturen och därmed mottrycket ur turbinen blir lägre. En förändring av grädigheit kan åstadkommas genom att den värmeöverförande ytan ökas. Det betyder också att kondensorn blir mer utrymmeskrävande och även något dyrare. Ett normalt värde på grädigheit är ca 3 – 4°C och enligt diagrammet är ökningen av alfavärde ganska liten om detta sänks, men ändå ett möjligt alternativ om alfavärde ska optimeras vid nybyggnad.

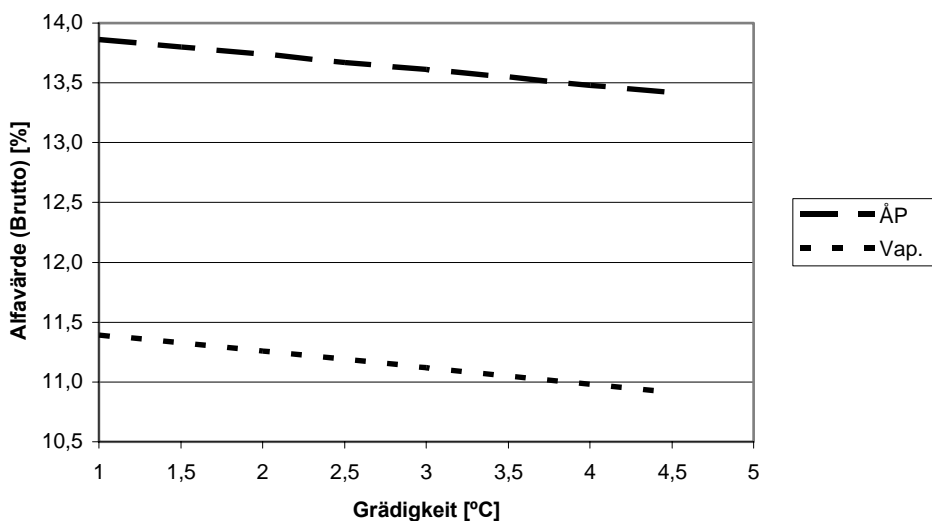


Diagram 21: Alfavärde vid varierande grädigheit.

9 Ekonomisk jämförelse

För att ge en översiktlig bild av den ekonomiska situationen vid konvertering har en jämförelse mellan Vaporel och ångpanna med ångturbin utförts. Som referensanläggning har en avfallspanna valts eftersom förutsättningarna för dessa ändrats nyligen. Det är intressant att se vilken inverkan förändringarna innebär och kalkylen är avsedd att illustrera effekten av ändringarna, inte att ge exakt resultat.

De tekniska koncept som har studerats är Vaporel och ångpanna med ångturbin, bränsle som används antas vara hushållsavfall. För båda koncept har två olika fall antagits där skillnaden är vilken turbinverkningsgrad som används.

Prisuppgifterna för investering är uppskattade belopp, baserade på uppgifter från tidigare projekt hos S.E.P. samt uppgifter från turbinleverantör Q & W Weckman AB, noggrannheten i dessa siffror är därför mycket osäker. Priset för konvertering kan variera beroende på anläggningens förutsättningar. Avsikten med den ekonomiska jämförelsen är därför att ge en bild av de ungefärliga kostnader och intäkter som en konvertering i den valda storleksklassen kan medföra.

9.1 Utförande

Investeringskalkylerna har utgått från de merkostnader och ökade intäkter som elgenerering innebär jämfört med grundfallet med enbart värmeproduktion.

9.1.1 Pay-back metoden

Rörliga kostnader (RK) och rörliga intäkter (RI) används för att beräkna täckningsbidrag (TB), enligt formeln: $TB = RI - RK$

Tabell 3: Faktiska intäkter och kostnader efter konvertering

Rörliga Intäkter	Rörliga Kostnader
Elförsäljning	Drift & Underhåll
Värmeförsäljning	Elcertifikat
Förbränning av avfall	Ökad elkonsumention
	Koldioxidskatt
	Energiskatt

Eftersom en jämförelse mot referensalternativet har utförts uppstår besparingar tack vare minskad energi- och koldioxidskatt. Minskad skatt räknas därför som intäkt för kraftvärmeanläggningarna. Försäljningen av värme blir lika för alla alternativ eftersom konstant värmeproduktion är antagen, det skapas därför ingen relativ intäkt från värme för något alternativ.

Tabell 4: Relativa intäkter och kostnader

Rörliga Intäkter	Rörliga Kostnader
Elförsäljning Minskad koldioxidskatt Minskad energiskatt Förbränning av extra avfall	Drift & Underhåll Elcertifikat Ökad elkonsumention

För lönsamhetsberäkning har pay-back metoden använts, den redovisas genom grund investeringens återbetalningstid som beräknas enligt:

$$Pay - back = \frac{Investering}{Täckningsbidrag}$$

9.1.2 Annuitetsmetoden

En alternativ investeringsbedömning utförs med hjälp av annuitetsmetoden. I den slås återbetalningen ut på ett antal lika stora belopp, antalet betalningar bestäms av investeringens avskrivningstid. Metoden tar hänsyn till kalkylräntan och den ekonomiska livslängden. En investering är enligt annuitetsmetoden lönsam om avkastningen överstiger den årliga kapitalkostnaden.

9.2 Tekniskt underlag

Referensalternativet är antaget som hetvattenpanna för värmeproduktion. Det tekniska underlaget är framtaget från beräkningsmodellerna för kraftvärmecyklerna.

Eftersom pannan inte eldas för fullt har värmeproduktionen satts till ett uppskattat medelvärde som därmed bestämmer ett medelvärde för lasten. Lasten för kraftvärmecyklerna blir högre eftersom de antas ge samma värmeproduktion, men tillsammans med el. Övriga värden som är lastberoende är också antagna vid medellast.

9.2.1 Tekniska antaganden och förutsättningar

- Pannan antas vara uppkopplad mot ett större värmenät med kapacitet att svälja hela värmeproduktionen.
- Bränsle antas vara 100 % hushållsavfall.
- Pannans maximala effekt är satt till 10 MW.
- Värmeproduktionen är antagen till ett medelvärde av 8 MW.
- Referensanläggningens last har antagits till ett medelvärde på 80 % och medelvärde för kraftvärmeanläggningarnas last baseras på värmeproduktionen.
- Turbinverkningsgraden har korrigerats för varje enskilt fall vid aktuell last.
- Värmevärde för avfall antas vara 10 MJ/kg vilket motsvarar ungefär 2,8 MWh/ton
- Pannverkningsgraden är satt till 87 %.
- Bränslemängden har bestämts från bränslets värmevärde, nyttiggjord effekt och pannans verkningsgrad: $P_{bränsle} = \frac{P_{panna}}{\eta_{panna}}$, $m_{bränsle} = \frac{P_{bränsle}}{H_u}$
- Drifttid har antagits till 7500 timmar vid beräknad last per år för alla alternativ.
- Turbinverkningsgraderna är beräknade från två grundfall, 53 % och 65 %. De har sedan korrigerats för lasten.

Tabell 5: Tekniskt underlag för fallstudie av konvertering.

	Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	Ångpanna alt. 1	Ångpanna alt. 2
Panntryck (bar)	14,5	14,5	14,5	14,5
Ångtryck (bar)	9,03	9,51	14,5	14,5
Bränsleeffekt (MW)	10,0	10,29	10,3	10,61
Bränslemängd (Ton/h)	3,6	3,7	3,71	3,82
Värmeeffekt (MW)	8,0	8,0	8,0	8,0
Eleffekt, brutto (kW)	792	1003	931	1190
Eleffekt, netto (kW)	687	896	921	1180
Alfavärde, netto (%)	8,6	11,2	11,51	14,75
Elverkningsgrad, Brutto (%)	8,17	9,74	9,04	11,22
Turbinverkningsgrad (%)	50,5	62,5	51,1	63,4

9.3 Ekonomiskt underlag

9.3.1 Ekonomiska antaganden och förutsättningar

- Pannan har antagits elda hushållsavfall för att påvisa de skattemässiga fördelar en sådan konvertering kan innebära.
- Intäkten för förbränning av avfall antas uppgå till 400 SEK/ton avfall.
- Elpriset är baserat på medelvärdet fram till augusti 2006 på elbörsen Nord Pool och är satt till 450 SEK/MWh.
- Värmepriset är satt till 500 SEK/MWh
- Elcertifikat priset är satt till 200 SEK/MWh
- 10 % av den ökade elanvändningen antas kräva elcertifikat.
- Avdrag på energi- och koldioxidskatt är baserat på elverkningsgradens medelvärde.
- Koldioxidskatten är 3374 SEK/ton_{fossilt}.
- Energiskatten är 150 SEK/ton_{fossilt}.
- Mängden fossilt innehåll beräknas som 12,6 % av total bränslemängd.
- Kostnader för drift och underhåll har antagits till 2 % av grundinvesteringen.
- Kalkylräntan är satt till 6 %

Investeringsbeloppen är som nämnts baserade på tidigare förfrågningar och genomförda projekt. De investeringsbelopp som antagits framgår av Tabell 6. Skillnaden mellan alternativ 1 och 2 är att en dyrare turbin har valts.

Tabell 6: Grundinvestering för konvertering till kraftvärmeproduktion.

	Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	Ångpanna alt. 1	Ångpanna alt. 2
Investering (kSEK)	20 000	22 000	24 000	26 000
Specifik investering (kSEK/kW_{el})	25,3	21,9	25,8	21,8

Avdrag på koldioxid- och energiskatten är de främsta orsakerna till att det är intressant att konvertera till kraftvärme vid avfallsförbränning. De avdrag som utförs baseras på elverkningsgrad och framgår av tabell 7.

Tabell 7: Skattesatser

	Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	Ångpanna alt. 1	Ångpanna alt. 2	Värme- produktion
CO₂ skatt	63 %	57 %	57 %	45 %	100 %
Energiskatt	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %

9.4 Resultat

Resultatet tyder på att alla alternativ är lönsamma investeringar vid konvertering av avfallspanna från värme- till kraftvärmeproduktion. Det viktiga för sådana anläggningar är att producera el, hur mycket är inte helt avgörande men lägre specifik investering ger ökade intäkter och kortare återbetalningstid.

Orsaken till lönsamheten är i första hand att skatten minskas. Effekten av varierande elpris har inte lika stor betydelse även om det inverkar. Eftersom större elproduktion ger mer avdrag på skatten är det positivt, men det måste också vägas mot vilken ökad investering det innebär.

Mest lönsamt är de alternativ med kortast återbetalningstid, båda alternativen med den högre turbinverkningsgraden ger bäst resultat. Inget av alternativen sticker ut åt något håll och alla är lönsamma. Kalkylen visar att det dyraste alternativet också är mest lönsamt i detta fall.

Tabell 8: Jämförande kalkyl vid konvertering, alla värden är relativa referensalternativet.

Jämförande kalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	354,4	361,1	33,8	33,8
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Summa RK	kSEK	770,1	817,2	515,3	555,3
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	2673	3 385,1	3 142,1	4 016,3
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	7 335,2	8 859,5	8 620,7	11 088,3
TB	kSEK	6 565,1	8 042,3	8 105,5	10 533,0
Pay-back tid	år	3,1	2,8	3,1	2,6

Med pay-back metoden ger alla alternativ en relativt snabb återbetalning, runt 3 år. Fullständigt kalkylunderlag finns i Bilaga E.

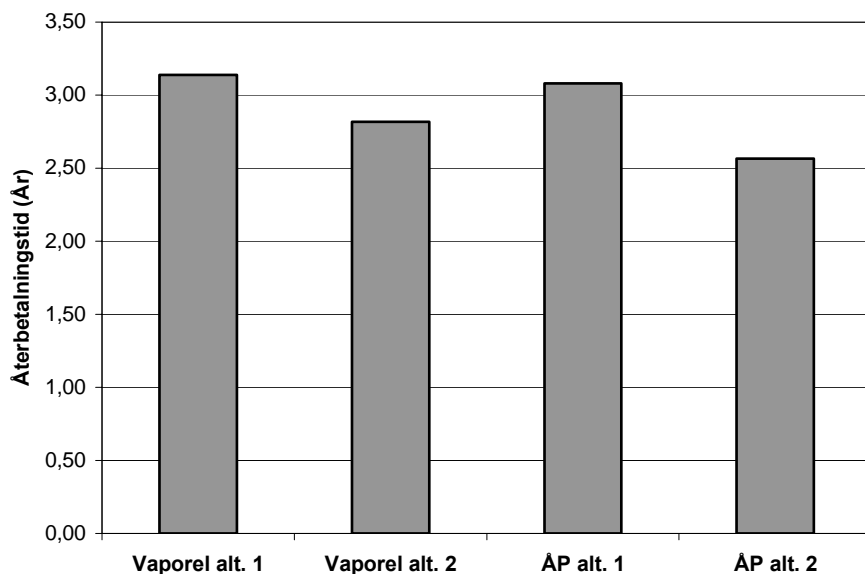


Diagram 22: Återbetalningstid för konvertering

Beräkningar enligt annuitetsmetoden visar också entydig lönsamhet. I Diagram 23 visas avkastningen med avskrivningstid på 10 respektive 20 år. Ur detta diagram går att utläsa att ångpanna med ångturbin ger ett bättre resultat än övriga, om alternativet med högre turbinverkningsgrad väljs.

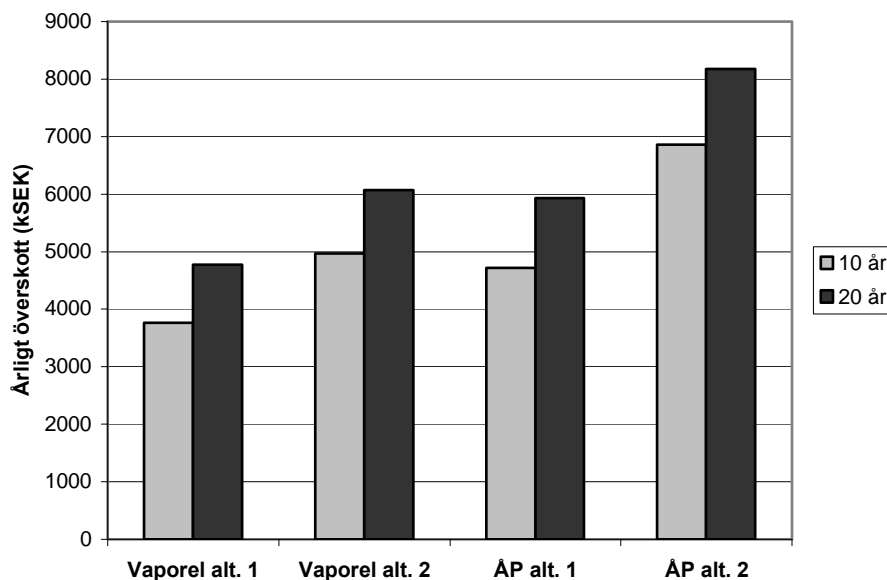


Diagram 23: Årligt överskott

9.4.1 Elprisets inverkan

Elpriset har inverkan på investeringens lönsamhet, högre elpris ökar det årliga överskottet som väntat. Det är dock inte av avgörande betydelse och alla alternativ är lönsamma trots ett lågt elpris. Båda kalkylmetoder visar på lönsamhet oberoende av elpriset.

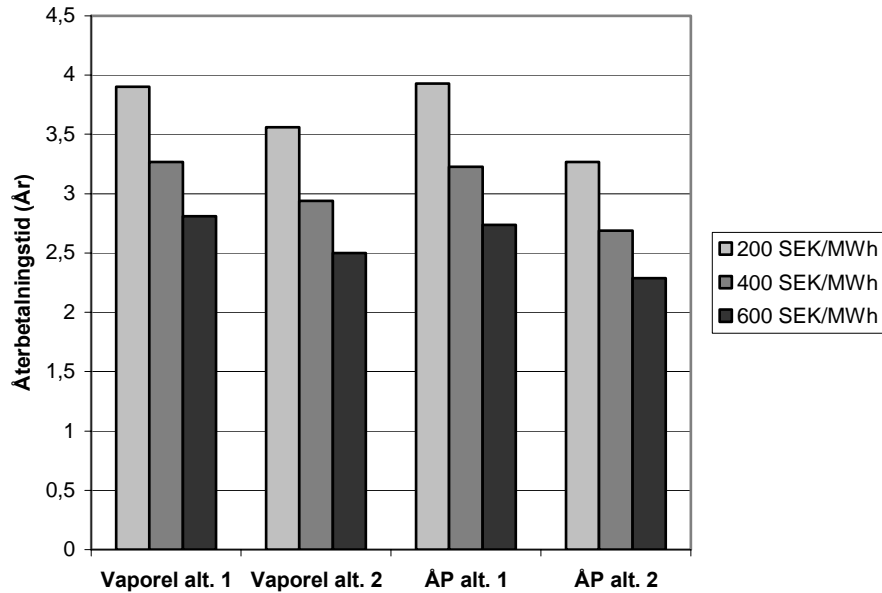


Diagram 24: Återbetalningstid med pay-back metoden.

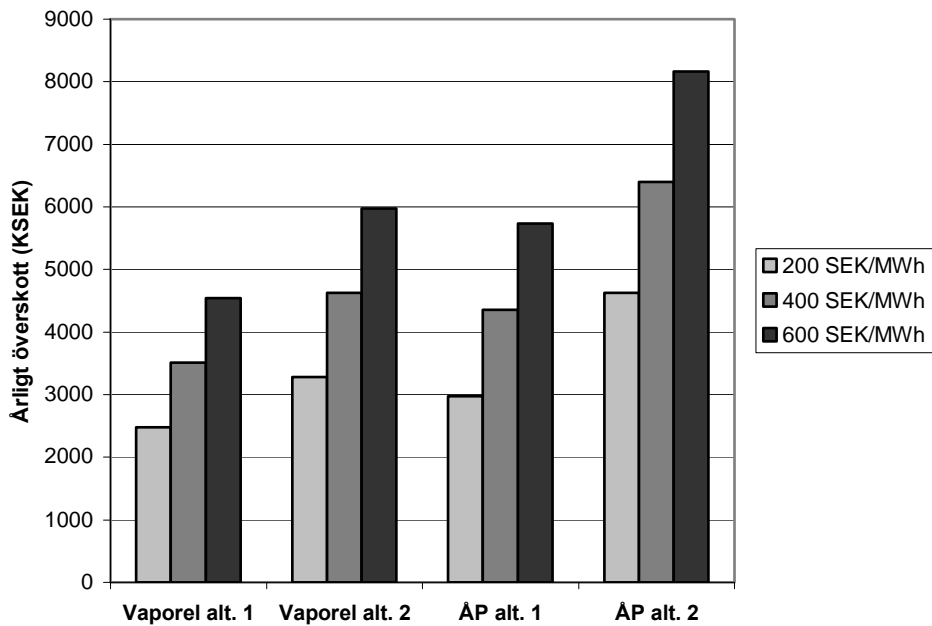


Diagram 25: Årligt överskott med annuitetsmetoden, avskrivningstid 10 år.

9.5 Kommentarer till kalkylen

Kalkylen är förenklad och ger inte en fullständig bild av vad som kan förväntas. Den är avsedd att illustrera vilka effekter som avfallsbeskattningen innebär samt att förtydliga vilka intäkter och kostnader som kraftvärmeproduktion innebär.

För att förenkla beräkningarna har lasten antagits ett medelvärde, det ger inte ett helt korrekt resultat eftersom lasten varierar och därmed parallellt elproduktion och elverkningsgrad. Skatten beror som nämnts av momentan mätning och inte medel- eller maxvärde. Vid låg last kommer skattesatsen att öka, återbetalningstiden kommer därför att vara längre. Den inbördes jämförelsen bör dock inte skilja så mycket. För en mer exakt beräkning bör varaktighetsdiagram ligga till grund för lasten som då varierar från dag till dag.

På grund av elproduktionen uppstår periodvis ett underskott av värme, vilket kompenseras med andra pannor. Det ger ökade bränsleutgifter och skatter eftersom oljepannor ofta används för spetslast, effekten av detta har inte medtagits i kalkylen.

För avfallsanläggningar baseras lasten också på tillgången av bränsle, det hade därför kunnats anta en konstant bränslemängd istället för konstant värme produktion. Antagandet om konstant värmeproduktion förutsätter att pannan är uppkopplad mot ett större värme nät med kapacitet att svälja värmeproduktionen.

Avfallsanläggningar eldas ofta med en blandning av industri- och hushållsavfall. I kalkylen har endast hushållsavfall använts som bränsle, det gör att vinsten vid konvertering överskattas då blandningen beaktats.

De investeringskostnader som anges är i rätt storleksordning, men på grund av varierande förutsättningar vid konvertering för olika anläggningar kan investeringsbeloppen och resultaten vara annorlunda.

10 Kraftvärme i framtiden

Det finns ett flertal rapporter som ger prognoser för kraftvärmens framtida potential, gemensamt för de flesta är att de ser en ljus framtid.

Sverige har ett väl utbyggt fjärrvärmenät som står för uppvärmning av ungefär hälften [6] av alla bostäder och lokaler. Det uppskattas ändå att det finns potential att öka den andelen till 75 % [6]. I detta sammanhang är dock kraftvärme relativt lågt representerat då endast ca 30 % [8] av fjärrvärmen i Sverige är genererad i kraftvärmeanläggningar. Det är en låg siffra internationellt sett och det finns inget annat EU-land där uppvärmningen med fjärrvärme är så utbredd samtidigt som så liten del av denna värme produceras i kraftvärmeanläggningar. Det är en av de faktorer som gör att potentialen för utbyggnad av kraftvärme i Sverige är stor. Den låga andelen kraftvärme innebär att endast en liten del av Sveriges producerade el kan härledas till kraftvärme, grundat på det befintliga värmenätet finns dock potential att fyrdubbla mängden el som genereras i kraftvärmeanläggningar.

En stor potential är dock ingen garanti för att det verkligen genomförs konverteringar och nyinstallationer, en orsak till detta är de styrmedel som styr de ekonomiska förutsättningarna för fjärrvärmen, och att det finns osäkerhet kring deras framtida utformning.

I Sverige har fjärrvärmen länge hämmats på grund av bl. a. ogynnsamma skatteregler. Från 2002 års energipolitiska beslut antogs dock riktlinjer som är mer gynnsamma för fjärrvärmen. Dessa politiska beslut tillsammans med elprisets ökning gör att fjärrvärmen också beräknas öka.

Regeringen har ett uttalat mål att styrka fjärrvärmens konkurrenskraft, på grund av dess effektiva användande av bränslet. Samtidigt ökar elanvändningen i Sverige successivt och möjligheten att ersätta kondenskraft motiverar ny fjärrvärme i Sverige.

Kraftvärme är ekonomiskt betydligt mer gynnsamt med de höga elpriser som nu råder. Men även kring elpriset finns det osäkerhet hur prisnivåerna kommer att ligga framöver. En annan faktor som är begränsande är att det måste finnas tillräckligt värmeunderlag för att fjärrvärmen ska expandera. [6], [8]

11 Diskussion

I följande kapitel diskuteras förutsättningarna för småskalig kraftvärme i allmänhet. Senare i kapitlet behandlas även teknikerna Vaporel och ångpanna med ångturbin. Det har huvudsakligen jämförts Vaporel med mättad ånga mot ångpanna med mättad ånga.

11.1 Småskalig kraftvärme

Kraftvärme i allmänhet ser ut att ha stora möjligheter att öka sin andel i Sverige. Tack vare ett högt elpris kan intäkterna ökas då värmeproduktion ersätts med kraftvärme. Den gynnas också av politiska beslut, inte bara i Sverige utan inom hela EU på grund av dess effektiva utnyttjande av bränslet.

Småskalig kraftvärme tillämpas i lokala värmeverk som försörjer kommuner eller områden med värme och kan ökas om fjärrvärmenäten byggs ut. Värmeproducenter kan göra det lönsamt att kombinera värmeproduktionen med elproduktion om intäkterna från elförsäljning överstiger de från värme. En positiv effekt är att elproduktionen decentraliseras och blir mer flexibel då beroendet av de stora producenterna minskar, småskalig kraftvärme är ett bra komplement till annan elproduktion för att försörja det ökande elbehovet.

Storskalig kraftvärme har troligen större möjligheter att göras ekonomiskt vinstgivande eftersom ångdata ofta är högre och vilket möjliggör ett större elutbyte. Den specifika investeringen minskar också med ökande effekt. Det finns samtidigt potential för lokala värmeproducenter att satsa på kraftvärme i dagsläget, eftersom de i allmänhet bör ligga i närhet till användarna på grund av ökande förluster med avstånd, vilket gör att storskaliga verk inte alltid är lämpliga utanför de större städerna.

En nackdel med kraftvärme jämfört med andra metoder är dess beroende av värmeunderlaget. Under varma perioder kan inte el produceras eftersom värmeunderlag saknas. Under kalla perioder kan brist på värme uppstå då en del av panneffekten går till produktion av el. Vid nybyggnad kan det kompenseras genom att en större panna används för att öka värme- och elproduktionen. Det är då viktigt att anpassa pannstorlek efter värmeunderlag för att inte driften vid delast ska öka. Det är vanligt att oljepannor används för att försörja spetsbehov av värme. Speciellt vid konvertering kan det innebära ökat användande av fossilt bränsle, vilket är negativt sett till de oljepriser som råder samt den ökade miljöpåverkan som eldning av olja innebär.

Det finns vissa osäkerheter kring elmarknaden, elpriset har stigit den senaste tiden men den framtida nivån är svår att förutspå eftersom det är mycket beroende även på yttre faktorer. Det höga elpriset kan också innebära vissa nackdelar för nybyggnad av kraftvärme om det istället satsas på ren elproduktion. Fördelen för kraftvärme är att även värmen genererar en stor del av intäkten och den är inte lika känslig om elpriset sjunker.

11.2 Bränsle

Eldning av kol och olja bör minskas till förmån för de förnyelsebara alternativ som finns, för att göra kraftvärme till en del av åtgärderna mot nettoutsläpp av växthusgas och för att minska beroendet av fossila bränslen. Biobränsle som bränsle för kraftvärme gynnas idag men kan ges ännu bättre förutsättningar. Ur miljösynpunkt är det negativt att fossila bränslen för elproduktion inte är beskattade mer, det borde satsas mer på de miljömässigt bättre alternativen.

Avfall kommer att fortsätta förbrännas för värmeproduktion. Det är positivt om sorteringen av detta avfall ökar. Återvinning av det avfall som kan återvinnas skulle också förbättra för förbränningsanläggningarna som då får ett mer förutsägbart bränsle samtidigt som andelen obrännbart material som anländer minskar.

Förbränning med avfall för värmeproduktion är en specifik marknad där konvertering troligen kan ha stora ekonomiska fördelar och investeringar på kraftvärme är möjliga. Detta på grund av de nya skatteregler som belastar avfallets fossila innehåll. Tidigare har avfall för värmeproduktion inte erlagts någon kraftvärmebeskattning. Det finns dock faktorer som motverkar detta, till exempel är tillstånd för nya anläggningar svåra att få.

Drifttiden är en faktor som spelar stor roll för vinstmöjligheterna eftersom de då producerar mer värme och el för försäljning. Avfallspannor drivs ofta mer än andra pannor, eftersom de ska ta hand om avfall större delen av året för att undvika lagring.

11.3 Nybyggnad

Vid nybyggnad av kraftvärmeanläggning är troligen ångpanna med ångturbin det koncept som kommer att vara den bästa investeringen.

Det är ett faktum, vilket visats tidigare, att ångpanna med turbin normalt uppvisar bättre elproduktion och alfavärde än Vaporelkonceptet kan göra. Speciellt gäller detta då en ångpanna för produktion av överhettad ånga används, vilket är ganska vanligt.

Det finns inte heller mycket som tyder på att den rena investeringen som krävs vid en nyinstallation av kraftvärme är tillräckligt mycket lägre vid installation av flashbox och hetvattenpanna än ångpanna för att kompensera elbortfallet. Då investeringen som krävs för en ångpanna inte är mycket högre än för en hetvattenpanna saknas tillräckliga motiv för att göra Vaporel mer intressant. I alla fall inte då intäkten per kW el överstiger intäkten per kW värme, är situationen omvänd kan det vara annorlunda.

För att kunna konkurrera ur teknisk aspekt krävs det att Vaporelcykeln modifieras för ökat elutbyte enligt kapitel 8.1 – 8.4. De båda cyklerna kan ges jämförbara resultat men det är avgörande vilka merkostnader modifiering av Vaporelcykeln innebär. Det är därför i första hand vid konvertering från värme- till kraftvärmeproduktion som Vaporelkonceptet är intressant.

11.4 Konvertering

En värmeanläggning kan konverteras genom att hetvattenpannan byggs om till en hel- eller halvångpanna där ånga genereras direkt i pannan eller genom Vaporel-tekniken då pannan behålls intakt men istället görs ett större ingrepp utanför pannan. Anläggningar kan vara bättre anpassade för konvertering till endera tekniken eftersom det utgår från en existerande cykel. Till- eller ombyggnaden beror då på de förutsättningar som gäller.

Vid en konvertering finns det för och nackdelar med båda koncept. Ombyggnad av panna är ofta en relativt dyr lösning och Vaporel är normalt ett något billigare alternativ. Det innebär också ett stort ingrepp i pannan och vid ombyggnaden tas den ur drift en längre period. Vaporel ger på grund av det enklare ingreppet också kortare stilleståndstid. Fördelen med ångpanna är att ångtrycket blir högre och därmed ökas alfavärdet.

Valet av vilken metod som är bäst lämpad vid konvertering för kraftgenerering baseras på ett antal faktorer. Mest avgörande för lönsamheten är hur intäkterna från el överstiger de från värme. Hur stor ökning av intäkterna som konvertering för elgenerering kan medge beror på el- och värmepriset men också styrmedlens inverkan. Det kan också finnas andra faktorer som påverkar beslutet, till exempel om hetvattenpannan är nyinskaffad eller andra motiv till varför det ena alternativet föredras.

Vid ombyggnad av en befintlig hetvattencykel sker konvertering på bästa sätt, båda koncepten är fullt möjliga och ger i många fall också ekonomiskt försvarbara resultat. Vid konvertering är det därför mer tvetydigt vilket alternativ som är det bästa valet. De två tekniker som beskrivs i detta examensarbete kan båda göras lönsamma.

Totalt finns därför inte något solklart alternativ, utan det varierar med förutsättningarna. Tack vare att ett högre alfavärde är möjligt med ångpanna ger den en större intäkt vid ett högt elpris samtidigt som Vaporel med sin lägre investering är mindre känslig. Det kan också vara så att budgeten vid investering är begränsad, då ett billigare alternativ är mest lämpligt.

11.5 Turbin

En turbin med hög verkningsgrad ger större elproduktion, men är samtidigt dyrare. Det är i dagsläget troligt att en mer avancerad turbin är motiverad trots ökad investering. Valet måste naturligtvis vägas mot hur stor investering som det innebär och det är inte nödvändigt att gå till ytterligheter. Turbinens andel av en total investering är inte så stor och den procentuella investeringsökningen för en avancerad turbin kan troligen tjänas in genom de ökade intäkterna från elförsäljningen vid dagens elprisnivå. Vid eldning med hushållsavfall, ger dessutom större elproduktion mer lättnad från kraftvärmebeskattningen. Det är ytterligare ett motiv för att de ekonomiska förutsättningarna ökas med en effektivare turbin för avfallsanläggningar.

Eftersom konvertering till Vaporel är något billigare, finns utrymme för att en mer avancerad turbin kan inrymmas i budgeten utan att kostnaden överstiger ombyggnad till ångpanna med en enklare turbin. Ofta finns inte så mycket pengar att tillgå i till exempel mindre kommunala värmeverk. Ska elproduktionen maximeras utan större begränsningar i investeringsbudget är dock ångpanna med högt ångtryck och överhettning tillsammans med en avancerad turbin.

Krävs överhettning för ökad verkningsgrad på turbinen kan det vara intressant att undersöka möjligheterna att överhetta ångan i Vaporel måttligt. En liten överhettning som 25°C kan tillåta turbiner med runt 5 – 10 % högre verkningsgrad än mättad ånga vid låga tryck.

12 Slutsatser

Småskalig kraftvärme kan mycket väl vara lönsam i dagsläget. Elpriset är på en sådan nivå att det genereras större förtjänst vid försäljning av el än värme. Elanvändningen i Sverige ökar och de begränsningarna som finns för andra alternativ gynnar kraftvärme som komplement till elförsörjningen. Det är dock beroende av att fjärrvärmenätet utökas. Den småskaliga kraftvärmens beroende av elpriset innebär samtidigt risker.

För att maximera intäkterna bör elproduktionen vara så hög som möjligt. Flerstegsturbiner med hög verkningsgrad är därför att föredra trots den ökade kostnaden. Måttlig överhettning av ånga för Vaporel kan vara ett alternativ om en överhettare som ger ett litet tryckfall används. Den huvudsakliga orsaken till att det är intressant med överhettning är möjligheten att använda en mer effektiv turbin. Det samma gäller för ångpanna.

Det finns ett antal åtgärder för att öka elproduktionen som har väsentlig inverkan och dessa bör tas i åtanke. Vilka metoder som är tillämpbara varierar med förutsättningarna och utformningen av anläggningen.

Beskattningen av avfall vid värmeproduktion ger stor påverkan på avfallsanläggningarnas lönsamhet och det kommer troligen att utföras konverteringar av hetvattenpannor för att möjliggöra elproduktion. Den långa drifttiden hos avfallsanläggningar är ytterligare en faktor som ger dem möjlighet att tjäna in investeringen.

Nivån på elcertifikat tillsammans med elpriset ligger på en nivå som motiverar byggande av anläggningar som eldar biobränsle. I dagsläget tyder det på att småskalig kraftvärme vid eldning med biobränsle kan göras lönsam. Elcertifikaten har haft betydande inverkan på bränsleval hittills.

Slutsatser från den tekniska jämförelsen är att ångpanna med ångturbin oftast är ett bättre alternativ på grund av möjligheten att producera mer el. Både ångpanna med ångturbin och Vaporel kan dock troligtvis användas för kraftvärmeproduktion med goda ekonomiska resultat i dagsläget.

Vaporel kan vid rätt förutsättningar uppvisa alfavärde i närheten av ångpanna med mättad ånga till turbinen vid samma panntryck.

Vid nybyggnad är ångpanna med ångturbin ett bättre alternativ i de flesta fall, på grund av att investeringsökningen för ångpannan inte är stor nog att motivera den lägre elproduktion som Vaporel innebär.

Vid konvertering kan båda tekniker göras lönsamma, valet beror mycket på förutsättningarna som råder för den specifika anläggningen. Troligen är ångpanna med flerstegsturbin mest lönsam även vid konvertering, men det beror på hur stor investering de båda alternativen innebär. För att vara konkurrenskraftig krävs att vaporel innebär en tillräckligt mycket lägre investering för att kompensera den minskade elproduktionen. Alternativet är att åtgärder för höjd elproduktion kan åstadkommas till ett rimligt pris.

13 Referenser

- [1] Højeberg Mats, *El och kraftvärme från kol, naturgas och biobränsle*, STEM rapport, 2002
- [2] Alvarez Henrik, *Energiteknik*, Studentlitteratur, 1990
- [3] Cengel Yunus A, Boles Michael A, *Thermodynamics: An engineering approach, Third edition*, 1997
- [4] Jansson Lars-Erik, *Metoder för ökat elutbyte i befintliga hetvattenanläggningar*, Värmeforsk Rapport 619, 1997
- [5] The European Association for the Promotion of Cogeneration, *A Guide to cogeneration*, www.cogen.org, 2001
- [6] *Fjärrvärme och kraftvärme i framtiden*, Svensk Fjärrvärme, 2004
- [7] *Energiindikatorer 2005*, STEM ET2005:20, 2005
- [8] Beckius Anna, *Utvecklingen på kraftvärmeområdet*, STEM ER 2005:21, 2005
- [9] *Handel med utsläppsätter – för lägre utsläpp av koldioxid*, STEM ET 2005:30, 2005
- [10] IVA, *Ekonomiska styrmedel inom energiområdet*, 2003
- [11] Larsson Sara, *Småskalig kraftvärme från biobränsle*, examensarbete institutionen för energiteknik Chalmers, 2002
- [12] Hirschmark Jakob, Larsson Erik, *Kraftvärme, och dess koppling till elcertifikatsystemet*, SVEBIO och Svensk fjärrvärme, 2005
- [13] Regeringens proposition 2005/06:125, *Beskattning av visst avfall som förbränns*, 2006
- [14] Steinwall Pontus m.fl., *Teknik och ekonomi för att förbereda nya biobränsleeldade värmeverk för elproduktion*, Värmeforsk rapport 675, 1999
- [15] Gyllenhammar Marianne, Larsson Sara, *Rökgasrening vid samförbränning i biobränslepannor i storleken 10-25 MW*, Värmeforsk rapport 838, 2003
- [16] Axby Fredrik m.fl., *Studie av rökgaskondensering för biobränsleeldade kraftvärmeanläggningar*, Värmeforsk rapport 719, 2000
- [17] P. Shlyakhin, *Steam Turbines, Theory and Design*, 2005
- [18] Steinwall Pontus m.fl., *Optimala ångdata för biobränsleeldade kraftvärmeverk*, Värmeforsk rapport 770, 2002
- [19] *Prisblad för biobränslen, torv m.m. Nr 3 / 2006*, Energimyndigheten, 2006
- [20] www.opet-chp.net
- [21] www.nordpool.se
- [22] elcertifikat.svk.se
- [23] www.stem.se
- [24] www.vaporel.se
- [25] www.rvf.se
- [26] www.skatteverket.se

A.1 Matris 85°C

Jämförelse mellan Vaporel och Ångpannecykel mättad ånga. Framledningstemp. 85°C

Tryck [bar]	Vaporel		ÅP		Vaporel		ÅP		Effekt [MW]
	8	8	12	12	16	16	20	20	
16	72,1		108,2		144,2		180,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	962	1102	1443	1653	1923	2204	2404	2755	Eleffekt [kW]
	7103	6884	10654	10326	14205	13768	17756	17210	Värmeeffekt [kW]
	4,1	0,56	6,2	0,84	8,2	1,12	10,3	1,40	Kondensatpump [kW]
	60		89		119		149		Flashboxpump [kW]
	20,2	7,9	30,3	11,8	40,5	15,8	50,6	19,7	Matarpump [kW]
	13,54	16,01	13,54	16,01	13,54	16,01	13,54	16,01	Alfavärde [%]
	3,36	3,5	5,04	5,25	6,72	7	8,4	8,75	Ångflöde [kg/s]
	10,1		10,1		10,1		10,1		Flashbox tryck [bar]
	180,4	201,4	180,4	201,4	180,4	201,4	180,4	201,4	Ångtemperatur [°C]
24	70,5		105,7		141,0		176,2		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1118	1230	1677	1845	2236	2460	2795	3075	Eleffekt [kW]
	6966	6757	10449	10136	13933	13514	17416	16893	Värmeeffekt [kW]
	6,7	0,56	10,0	0,84	13,4	1,12	16,7	1,40	Kondensatpump [kW]
	80		120		160		200		Flashboxpump [kW]
	20,3	11,6	30,4	17,3	40,5	23,1	50,7	28,9	Matarpump [kW]
	16,05	18,20	16,05	18,20	16,05	18,20	16,05	18,20	Alfavärde [%]
	3,35	3,49	5,02	5,23	6,70	6,97	8,37	8,72	Ångflöde [kg/s]
	16,1		16,1		16,1		16,1		Flashbox tryck [bar]
	201,7	221,8	201,7	221,8	201,7	221,8	201,7	221,8	Ångtemperatur [°C]
30	69,3		104,0		138,7		173,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1202	1298	1802	1947	2403	2596	3004	3246	Eleffekt [kW]
	6896	6690	10345	10035	13793	13380	17241	16725	Värmeeffekt [kW]
	8,7	0,56	13,1	0,84	17,4	1,12	21,8	1,40	Kondensatpump [kW]
	93		140		187		234		Flashboxpump [kW]
	20,3	14,3	30,4	21,5	40,5	28,6	50,7	35,8	Matarpump [kW]
	17,42	19,41	17,42	19,41	17,42	19,41	17,42	19,41	Alfavärde [%]
	3,35	3,49	5,02	5,23	6,70	6,97	8,37	8,71	Ångflöde [kg/s]
	20,8		20,8		20,8		20,8		Flashbox tryck [bar]
	214,3	233,9	214,3	233,9	214,3	233,9	214,3	233,9	Ångtemperatur [°C]
40	67,5		101,2		135,0		168,7		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1307	1384	1960	2076	2614	2767	3267	3459	Eleffekt [kW]
	6812	6608	10218	9911	13624	13215	17030	16519	Värmeeffekt [kW]
	12,2	0,56	18,3	0,84	24,4	1,12	30,5	1,40	Kondensatpump [kW]
	113		170		226		283		Flashboxpump [kW]
	20,2	19,0	30,3	28,4	40,4	37,9	50,5	47,4	Matarpump [kW]
	19,19	20,94	19,19	20,94	19,19	20,94	19,19	20,94	Alfavärde [%]
	3,35	3,49	5,03	5,24	6,70	6,98	8,38	8,73	Ångflöde [kg/s]
	28,8		28,8		28,8		28,8		Flashbox tryck [bar]
	231,6	250,4	231,6	250,4	231,6	250,4	231,6	250,4	Ångtemperatur [°C]

Förutsättningar som gäller för alla beräknade fall:

Isentropverkningsgrad för alla pumpar 80%
 Isentropverkningsgrad för turbin 65%
 Temperatur i matarvattentanken 120°C
 Tryckfall i hetvattenpanna 2 bar
 Tryckfall i ångpanna 3 bar
 Temperaturökning i hetvattenpannan 25°C
 Grätighet för kondensorn 4°C

A.2 Matris 105°C

Jämförelse mellan Vaporel och Ångpannecykel mättad ånga. Framledningstemp. 105°C

Tryck [bar]	Vaporel 8	ÅP 8	Vaporel 12	ÅP 12	Vaporel 16	ÅP 16	Vaporel 20	ÅP 20	Effekt [MW]
16	72,1		108,2		144,2		180,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	755	918	1133	1377	1510	1836	1888	2295	Eleffekt [kW]
	7315	7072	10973	10607	14630	14143	18288	17679	Värmeeffekt [kW]
	3,9	0,27	5,9	0,41	7,8	0,54	9,8	0,68	Kondensatpump [kW]
	61		92		123		154		Flashboxpump [kW]
	20,2	7,9	30,3	11,8	40,5	15,8	50,6	19,7	Matarpump [kW]
	10,32	12,98	10,32	12,98	10,32	12,98	10,32	12,98	Alfavärde [%]
	3,49	3,50	5,23	5,25	6,97	7,00	8,71	8,75	Ångflöde [kg/s]
	9,9		9,9		9,9		9,9		Flashbox tryck [bar]
	179,5	201,4	179,5	201,4	179,5	201,4	179,5	201,4	Ångtemperatur [°C]
24	70,5		105,7		141,0		176,2		Cirkulationsflöde [kg/s]
	926	1057	1389	1586	1852	2115	2315	2643	Eleffekt [kW]
	7164	6933	10747	10399	14329	13866	17911	17332	Värmeeffekt [kW]
	6,6	0,27	9,9	0,40	13,2	0,54	16,5	0,67	Kondensatpump [kW]
	83		124		165		207		Flashboxpump [kW]
	20,3	11,6	30,4	17,3	40,5	23,1	50,7	28,9	Matarpump [kW]
	12,93	15,25	12,93	15,25	12,93	15,25	12,93	15,25	Alfavärde [%]
	3,47	3,49	5,21	5,23	6,94	6,97	8,68	8,72	Ångflöde [kg/s]
	15,9		15,9		15,9		15,9		Flashbox tryck [bar]
	200,9	221,8	200,9	221,8	200,9	221,8	200,9	221,8	Ångtemperatur [°C]
30	69,3		104,0		138,7		173,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1018	1132	1527	1698	2035	2264	2544	2830	Eleffekt [kW]
	7087	6860	10631	10289	14174	13719	17718	17149	Värmeeffekt [kW]
	8,7	0,27	13,0	0,40	17,4	0,54	21,7	0,67	Kondensatpump [kW]
	97		145		193		241		Flashboxpump [kW]
	20,3	14,3	30,4	21,5	40,5	28,6	50,7	35,8	Matarpump [kW]
	14,36	16,50	14,36	16,50	14,36	16,50	14,36	16,50	Alfavärde [%]
	3,47	3,49	5,20	5,23	6,94	6,97	8,67	8,71	Ångflöde [kg/s]
	20,5		20,5		20,5		20,5		Flashbox tryck [bar]
	213,6	233,9	213,6	233,9	213,6	233,9	213,6	233,9	Ångtemperatur [°C]
40	67,5		101,2		135,0		168,7		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1133	1225	1699	1838	2266	2450	2832	3063	Eleffekt [kW]
	6994	6769	10491	10154	13987	13538	17484	16923	Värmeeffekt [kW]
	12,3	0,27	18,5	0,40	24,7	0,54	30,8	0,67	Kondensatpump [kW]
	117		176		234		293		Flashboxpump [kW]
	20,2	19,0	30,3	28,4	40,4	37,9	50,5	47,4	Matarpump [kW]
	16,20	18,10	16,20	18,10	16,20	18,10	16,20	18,10	Alfavärde [%]
	3,47	3,49	5,21	5,24	6,95	6,98	8,68	8,73	Ångflöde [kg/s]
	28,4		28,4		28,4		28,4		Flashbox tryck [bar]
	230,9	250,4	230,9	250,4	230,9	250,4	230,9	250,4	Ångtemperatur [°C]

Förutsättningar som gäller för alla beräknade fall:

Isentropverkningsgrad för alla pumpar 80%
 Isentropverkningsgrad för turbin 65%
 Temperatur i matarvattentanken 120°C
 Tryckfall i ångpanna 3 bar
 Temperaturökning i hetvattenpannan 25°C
 Grätighet för kondensorn 4°C

A.3 Matris 115°C

Jämförelse mellan Vaporel och Ångpannecykel mättad ånga. Framledningstemp. 115°C

Tryck [bar]	Vaporel 8	ÅP 8	Vaporel 12	ÅP 12	Vaporel 16	ÅP 16	Vaporel 20	ÅP 20	Effekt [MW]
16	72,1		108,2		144,2		180,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	649	824	974	1237	1299	1649	1624	2061	Eleffekt [kW]
	7424	7167	11136	10750	14847	14333	18559	17917	Värmeeffekt [kW]
	3,7	0,029	5,6	0,043	7,4	0,057	9,3	0,072	Kondensatpump [kW]
	62		94		125		156		Flashboxpump [kW]
	20,2	7,9	30,3	11,8	40,5	15,8	50,6	19,7	Matarpump [kW]
	8,75	11,50	8,75	11,50	8,75	11,50	8,75	11,50	Alfavärde [%]
	3,55	3,50	5,33	5,25	7,10	7,00	8,88	8,75	Ångflöde [kg/s]
	9,8		9,8		9,8		9,8		Flashbox tryck [bar]
	179,1	201,4	179,1	201,4	179,1	201,4	179,1	201,4	Ångtemperatur [°C]
24	70,5		105,7		141,0		176,2		Cirkulationsflöde [kg/s]
	828	970	1242	1455	1657	1940	2071	2425	Eleffekt [kW]
	7266	7022	10898	10533	14531	14043	18164	17554	Värmeeffekt [kW]
	6,5	0,029	9,7	0,043	12,9	0,057	16,1	0,072	Kondensatpump [kW]
	84		126		168		210		Flashboxpump [kW]
	20,3	11,6	30,4	17,3	40,5	23,1	50,7	28,9	Matarpump [kW]
	11,40	13,81	11,40	13,81	11,40	13,81	11,40	13,81	Alfavärde [%]
	3,54	3,49	5,31	5,23	7,07	6,97	8,84	8,72	Ångflöde [kg/s]
	15,7		15,7		15,7		15,7		Flashbox tryck [bar]
	200,5	221,8	200,5	221,8	200,5	221,8	200,5	221,8	Ångtemperatur [°C]
30	69,3		104,0		138,7		173,3		Cirkulationsflöde [kg/s]
	924	1048	1386	1572	1848	2096	2310	2620	Eleffekt [kW]
	7184	6945	10776	10418	14368	13890	17961	17363	Värmeeffekt [kW]
	8,6	0,029	12,9	0,043	17,2	0,057	21,5	0,072	Kondensatpump [kW]
	98		147		196		246		Flashboxpump [kW]
	20,3	14,3	30,4	21,5	40,5	28,6	50,7	35,8	Matarpump [kW]
	12,86	15,09	12,86	15,09	12,86	15,09	12,86	15,09	Alfavärde [%]
	3,53	3,49	5,30	5,23	7,07	6,97	8,84	8,71	Ångflöde [kg/s]
	20,3		20,3		20,3		20,3		Flashbox tryck [bar]
	213,2	233,9	213,2	233,9	213,2	233,9	213,2	233,9	Ångtemperatur [°C]
40	67,5		101,2		135,0		168,7		Cirkulationsflöde [kg/s]
	1044	1145	1567	1718	2089	2291	2611	2863	Eleffekt [kW]
	7086	6850	10629	10275	14172	13701	17715	17126	Värmeeffekt [kW]
	12,3	0,029	18,5	0,043	24,6	0,057	30,8	0,072	Kondensatpump [kW]
	119		179		238		298		Flashboxpump [kW]
	20,2	19,0	30,3	28,4	40,4	37,9	50,5	47,4	Matarpump [kW]
	14,74	16,72	14,74	16,72	14,74	16,72	14,74	16,72	Alfavärde [%]
	3,54	3,49	5,31	5,24	7,08	6,98	8,85	8,73	Ångflöde [kg/s]
	28,2		28,2		28,2		28,2		Flashbox tryck [bar]
	230,5	250,4	230,5	250,4	230,5	250,4	230,5	250,4	Ångtemperatur [°C]

Förutsättningar som gäller för alla beräknade fall:

Isentropverkningsgrad för alla pumpar 80%
 Isentropverkningsgrad för turbin 65%
 Temperatur i matarvattentanken 120°C
 Tryckfall i hetvattenpanna 2 bar
 Tryckfall i ångpanna 3 bar
 Temperaturökning i hetvattenpannan 25°C
 Grätighet för kondensorn 4°C

B Beräkningsmodellen

Som en del av examensarbetet har uppgiften varit att utföra en processteknisk jämförelse mellan de två koncepten. För att göra denna jämförelse har två beräkningsmodeller tagits fram, där cyklerna simuleras termodynamiskt. Med hjälp av dessa kan ungefärliga beräkningar vid olika driftförutsättningar utföras.

Som bas för de tekniska beräkningarna har Visual Basics for Applications använts, och genom att tillämpa energi- och massbalanser har en beräkningsmodell skapats för varje cykel.

Beräkningsmodellerna utgår från ett antal kända faktorer som ges som inparametrar. Beräkningar av termodynamiska samband utförs baserade på dessa indata. Modellerna är grundade på iterativa lösningar.

Beräkningsmodellerna utgår från förenklade processschema. De är sammanställda av de huvudkomponenter som normalt ingår i en cykel av varje koncept, i verkligheten tillkommer dock annan utrustning och varje anläggning är specifik med olika uppbyggnad.

För att kunna beräkna cyklernas utförande behövs ett antal kända inparametrar som beräkningarna utgår ifrån. Processcheman har sedan fyllts med punkter där nya tillstånd uppstår och som därmed behöver beräknas för att ge en fullständig cyklisk beräkning.

I varje punkt i schemat beräknas baserat på indata samt genom energibalanser och specifika komponentberäkningar:

Tabell 9: Termodynamiska storheter

Storhet	Benämning	Enhet
Tryck	p	Bar
Temperatur	T	°C
Entalpi	h	kJ/kg
Entropi	s	kJ/(kgK)
Kvalitet	q	--
Volymitet	v	m ³ /kg
Massflöde	m	kg/s

Dessa tillståndsp parametrar beräknas med hjälp av datoriserade ångtabeller som med en eller två kända parametrar bestämmer den storhet som söks. Liknande tabeller kan ses i någon av referenserna [2] eller [3], med den skillnad att de använda tabellerna är inlagda i ett datorbibliotek och hämtas automatiskt.

Som en inledning till beräkningsmodellerna redogörs för den termodynamik som de är baserade på.

B.1 Tillståndstorheter

Termodynamiska tillståndstorheter är storheter med vars hjälp ett systems karakteristiska egenskaper kan definieras. Storheterna har ett samband till varandra och genom att två av dessa är kända, kan övriga bestämmas och ändringen av storheterna mellan två tillstånd är oberoende av vilken process som används för att utföra förändringen.

I modellerna har förutom tryck, som anges med enheten bar(a) det vill säga absoluttrycket och temperatur, enhet °C används följande storheter.

Entalpi

Entalpin är en storhet sammansatt av den inre energin (u), samt tryck (p) och volymitet (v)
 $h = u + p \cdot v$, enheten för entalpi är kJ/kg.

Rent praktiskt är det ett mått på energiinnehållet i substansen per massenhet och används som hjälpmedel för att beräkna hur stort arbete som utförs vid en process. [2]

Entropi

Entropi definieras med sambandet $dS = \left(\frac{dQ}{T}\right)_{rev}$, det vill säga att entropiändringen under en reversibel process är lika med ändringen av värmemängden i en process genom absoluta temperaturen. Entropin har på samma sätt som de andra tillståndstorheterna ett bestämt värde vid varje givet tillstånd. [2]

Volymitet

Volymitet, eller specifik volym, benämns v och anger volym per massenhet, enheten m^3/kg .

Kvalitet

Kvaliteten som benämns q är ett mått på hur stor andel ånga som en mättad blandning innehåller, $q = \frac{m_{\text{ånga}}}{m_{\text{total}}}$

Detta värde varierar alltså mellan 0 för vätska och 1 för ånga vilket motsvarar 0 % och 100 % ånga. Kvaliteten är dock ingen hjälp vid bestämning av överhettad ånga eller underkyllt vatten men används vid beräkning vid mättnadstillstånd på vätska, ånga och blandning.

Med hjälp av dessa tillståndstorheter kan man sätta samman en serie beräkningar, som utgår från de samband och definitioner av processer som sker i olika komponenter.

Beräkningarna utgår också från termodynamikens första huvudsats, som fastställer att energi varken kan skapas eller förstöras endast omvandlas till olika former. [2]

B.2 Energibalans

I enlighet med termodynamikens första huvudsats är ändringen av energiinnehållet i en massa som genomgår en process lika stor som skillnaden mellan den energi som förs in och ur en process eller kontrolllyta.

Energi kan till- eller bortföras i tre former, värme, arbete eller massflöde. En energibalans kan ställas upp om man har dessa olika former av energi och ger:

$$E_{in} - E_{ut} = 0$$

E_{in} och E_{ut} till- eller bortförs genom någon eller flera av dessa energiformer.

Med hjälp av denna uppställning kan energiinnehållet i en fluid som utsätts för en process beräknas. [3]

Andra termodynamiska antaganden som används vid de termodynamiska beräkningarna för att bestämma tillståndet hos fluidet efter genomgången process är steady-flow, adiabatiska och isentropa processer.

B.3 Steady-flow

En process där massflödet är konstant in och ut kallas steady-flow process. Karakteristiskt för dessa är att det inte sker någon ändring av den totala energin inom en tänkt kontrollvolym runt processen. Eftersom ingen ändring av energiinnehållet sker är den tillförda energin lika stor som den energi som förs ur. [3]

B.4 Adiabatisk process

Vid antagande om en adiabatisk process antas att det sker under väl isolerade former. Det antas därmed att inget värmeutbyte sker med omgivningen och därmed ingen förlust av värme under processen. Det betyder dock inte att temperaturen nödvändigtvis är samma före och efter processen eftersom energi kan tillföras eller tas ur genom arbete vilket påverkar temperaturen.

Tillsammans med termodynamikens första huvudsats innebär det att det tekniska arbete som utvinns i en adiabatisk process är lika stort som ändringen av entalpi hos mediet som genomgår processen, vilket uttrycks som:

$$w_{12} = h_1 - h_2$$

Detta medför att beräkningar av utfört eller konsumerat arbete hos en komponent enkelt kan göras om man känner entalpin in och ur processen, det är också denna metod som använts i de beräkningar av processer som sker i kretsen. [2], [3]

B.5 Isentropisk process

En isentropisk process är en process där entropin är konstant genom processen. Det är ett idealt förlopp som inte existerar i verkligheten. Eftersom de processer som sker i pumpar och turbiner kan antas vara adiabatiska och därmed med minimala förluster, kan de modelleras som isentropiska. Med hjälp av isentropverkningsgraden kan man sedan ur en isentropisk modell bestämma det verkliga tillståndet efter komponenten.

Isentropverkningsgraden beskriver turbinen eller pumpens förmåga att överföra en fluids energiinnehåll till mekaniskt arbete eller tvärt om genom att med mekaniskt arbete tillföra fluidet energi. [2]

B.6 Vaporelkonceptet

Beräkningsmodellen är baserad på det schema som visas i figur 21. De indata som bestämmer cykelberäkningarna är fastställda enligt följande lista.

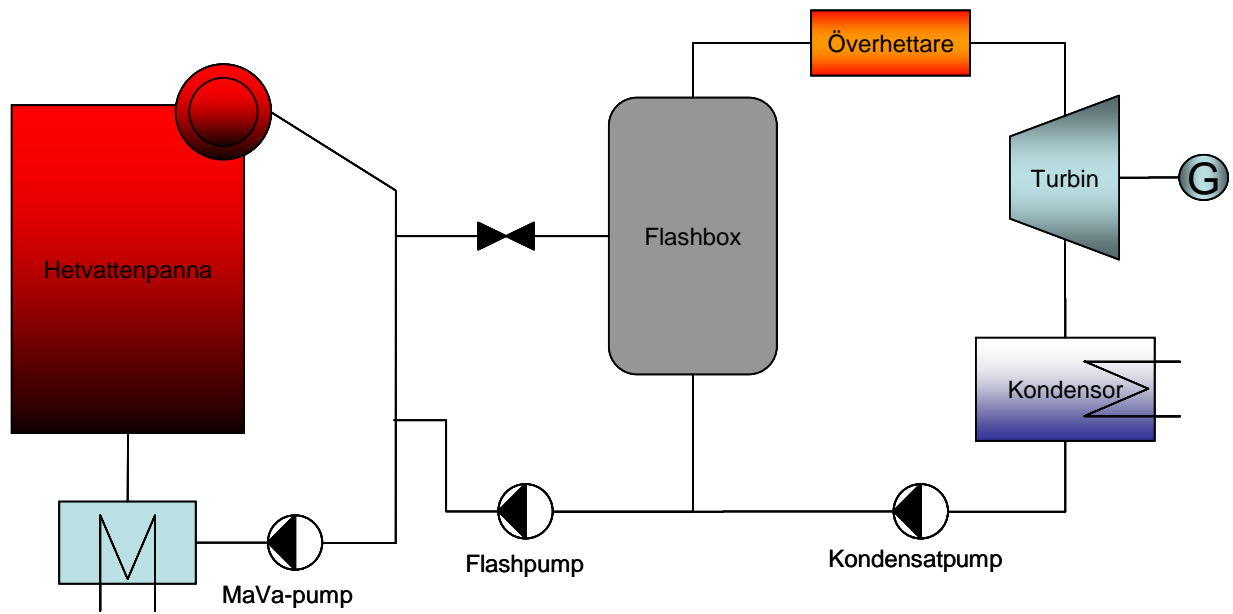
Hela beräkningsmodellen ligger i Bilaga C.

Indata:

Tryck i pannan	p_{panna}	bar (a)
Effekt till pannan	P_{panna}	kW
Cirkulationsflöde	m_{panna}	kg/s
Tryckfall i pannan	Δp_{panna}	bar
Framledningstemperatur	T_{fram}	°C
Grädighet*	T_{g}	°C
Underkylning i kondensor	T_{sub}	°C
Effekt i Värmeväxlare	P_{vvx}	kW
Isentropverkningsgrad turbin	η_{turbin}	%
Isentropverkningsgrad kondensatpump	η_{kpump}	%
Isentropverkningsgrad flashpump	η_{fpump}	%
Isentropverkningsgrad MaVapump	η_{vvxpump}	%
Pannverkningsgrad	η_{panna}	%
Verkningsgrad pumphotorer	$\eta_{\text{pumpm.}}$	%
Verkningsgrad turbingenerator + växel	η_{gen}	%
Förbrukning av kringutrustning	$P_{\text{utrustning}}$	kW
Vid överhettning även:		
Överhettningstemperatur	$T_{\text{öh}}$	°C
Tryckfall i överhettaren	$\Delta p_{\text{öh}}$	bar

Kondensortrycket beräknas genom att temperaturen in i kondensorn är lika med $T_{\text{fram}} + T_{\text{g}}$ och att trycket i kondensorn är motsvarande mättnadstryck, $p_{\text{sat}@T}$.

* Grädighet innebär skillnaden i temperatur mellan den varma och kalla sidan i kondensorn.



Figur 21: Schema för Vaporel

Iterationsvillkor

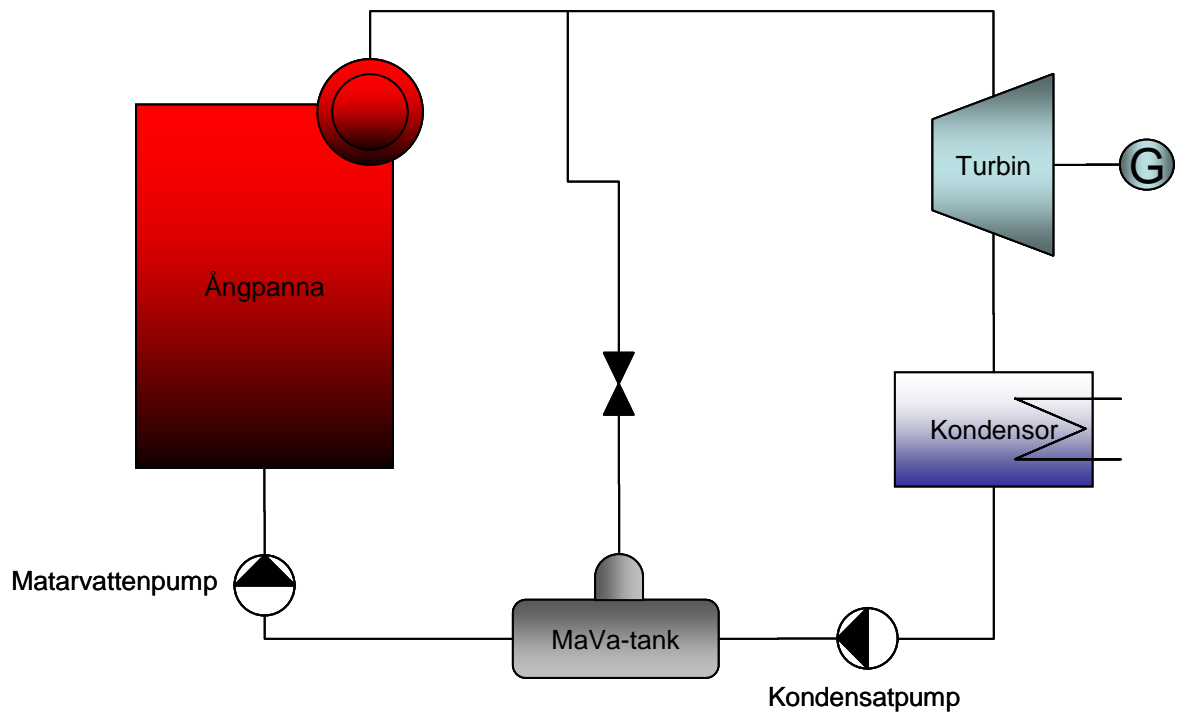
För att avgöra när iterationen är utförd med tillfredsställande resultat införs en funktion som utför en energibalans. Energibalansen räknas vid korsningen mellan flash- och matarvattenpumpen. När denna energibalans är tillfredsställd avbryts iterationen och resultatet skrivs ut.

B.7 Ångpanna med ångturbin

Beräkningsmodellen för ångpanna med ångturbin är baserad på figur 22. De indata som gäller för denna modell listas nedan. Hela beräkningsmodellen ligger som Bilaga C.

Indata:

Tryck ur pannan	p_{panna}	bar
Effekt till pannan	P_{panna}	kW
Tryckfall i pannan	Δp_{panna}	bar
Överhettningstemperatur	$T_{\text{öh}}$	°C
Framledningstemperatur	T_{fram}	°C
Grädighet*	T_g	°C
Kondensortryck	$p_{\text{kondensor}}$	bar
Underkylning i kondensor	T_{sub}	°C
Temperatur i MaVa-tank	T_{MaVa}	°C
Isentropverkningsgrad turbin	η_{turbin}	%
Isentropverkningsgrad kondensatpump	η_{kpump}	%
Isentropverkningsgrad MaVapump	η_{MaVapump}	%
Pannverkningsgrad	η_{panna}	%
Verkningsgrad pumpmotorer	$\eta_{\text{pumpm.}}$	%
Verkningsgrad turbingenerator + växel	η_{gen}	%
Förbrukning av kringutrustning	$P_{\text{utrustning}}$	kW



Figur 22: Schema för ångpanna med ångturbin

Iterationsvillkor

För att avgöra när iterationen av ångcykeln är utförd med tillfredsställande resultat införs en funktion som utför en energibalans över matarvattentanken. När balans uppstår över matarvattentanken avbryts iterationen och resultatet skrivs ut.

B.8 Tillämpning av termodynamiska antaganden

Med de termodynamiska lagarna fastställda enligt föregående avsnitt kan man genom att tillämpa dem på de ingående komponenterna räkna runt i cykeln.

För att utföra processtekniska beräkningar har det använts förenklade cykler, med de ingående huvudkomponenterna.

De komponenter som ingår i cyklerna ses i figurscheman:

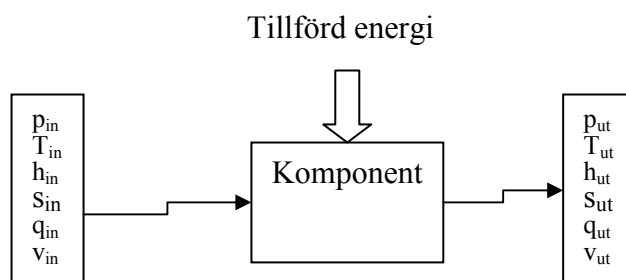
- Panna
- Turbin
- Pumpar
- Kondensator
- Värmeväxlare
- Flashbox
- Matarvattentank
- Flash/strypventiler
- Överhettare

B.9 Beräkning av komponenter

De processer som energi- och massbalans tillämpas på i beräkningarna lyder under de förutsättningar som fastslagit för steady-flow- och adiabatiska processer.

Detta är en stegvis presentation av hur varje komponent beräknats och tillståndsvariablerna innan respektive efter en komponent bestäms.

För varje komponent visas den symbol som används i scheman. Allmänt är tillståndstorheterna före komponenten bestämd från föregående steg och fastställandet av efterföljande tillstånd visas här.



Figur 23: Beräkning av godtycklig komponent

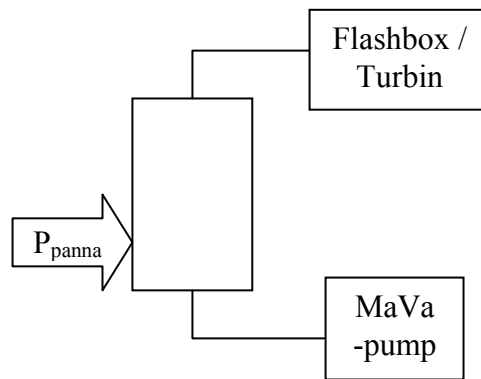
Panna

I en panna tillförs energi utifrån från förbränning där rökgaser utvecklas. Dessa innehåller en viss värmemängd som överförs till vattnet i pannan.

Energibalansen som kan ställas upp över pannan blir:

$$\dot{h}_{in} \cdot \dot{m}_{in} + P_{panna} = \dot{h}_{ut} \cdot \dot{m}_{ut}$$

Där P_{panna} innebär den termiska effekt som överförs till det cirkulerande vattnet och med detta uttryck beräknas flödet $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{ut}$.



Figur 24: Panna

Temperaturen T_{ut} är baserat på panntryckets mättnadstemperatur och eventuell överhettning. Kvaliteten q_{ut} är känt som 1 då ånga produceras och kan användas vid mättnadsfallet men inte vid överhettning. För hetvattenpannan produceras istället mättat vatten med q_{ut} som 0. De övriga storheterna h_{ut} , s_{ut} , v_{ut} kan bestämmas med T_{ut} och p_{ut} vid överhettning alternativt p_{ut} och q_{ut} vid mättat ånga/vatten.

Turbin

För turbinen, där en del av ångans energi omvandlas till arbete blir energibalansen:

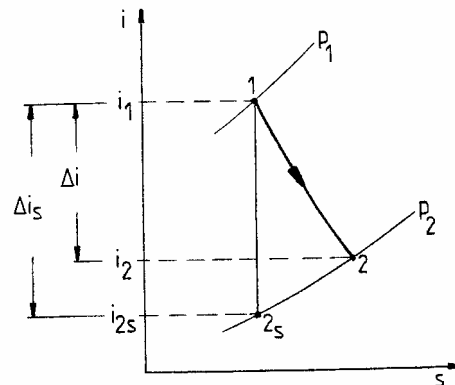
$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \dot{m}_{ut} \cdot h_{ut} + W_{turbin}$$

Turbinarbetet kan bestämmas eftersom isentropverkningsgraden är given.

$$\eta_{i,turbin} = \frac{h_{in} - h_{ut}}{h_{in} - h_{ut,i}}$$

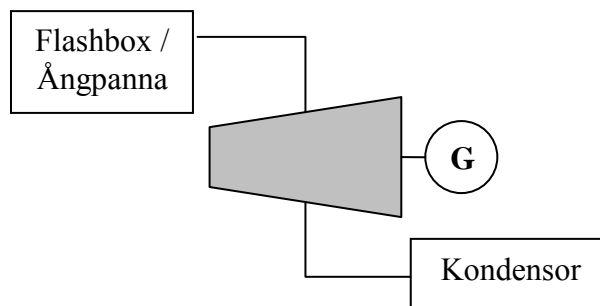
I denna formel innebär $h_{ut,i}$ det isentropiska entalpifallet, alltså det entalpifall som skett om entropin efter pumpen hade varit lika stor som innan, vilket ger ett större entalpifall till mottrycket. Detta kan ses grafiskt i figur 25 där 2s anger ett isentropiskt entalpifall och 2 ett

verkligt. Isentropverkningsgraden används för att erhålla entalpin vid tillstånd 2. Turbinens utloppstryck bestäms av den önskade framledningstemperaturen tillsammans med kondensorns grädigheit.



Figur 25: Entalpifall över ett turbinsteg [2]

Enligt denna definition kan alltså entalpin efter turbinen, h_{ut} bestämmas och därmed turbinarbetet.



Figur 26: Turbin

Mottryck efter turbinen p_{ut} är mättnadstrycket vid summan av $T_{fram} + T_g$.

Temperaturen efter turbinen T_{ut} är normalt också bestämd som summan av $T_{fram} + T_g$, men då kvaliteten är 100 % kan även överhettad ånga komma ur turbinen, i ett sådant fall bestäms T_{ut} istället av h_{ut} och p_{ut} . På detta vis bestäms även övriga storheter.

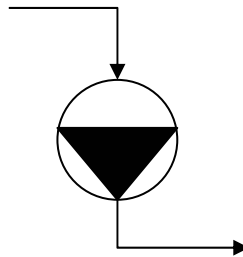
Pumpar

För pumparna utförs beräkningarna på liknande sätt som för turbinen men med den skillnad att arbete istället tillförs utifrån:

$$\dot{m}_{ut} \cdot h_{ut} = \dot{m}_{in} \cdot h_{in} + W_{pump}$$

Entalpifallet och därmed arbetet kan bestämmas med isentropverkningsgraden som är definierad enligt:

$$\eta_{i,pump} = \frac{h_{ut,i} - h_{in}}{h_{ut} - h_{in}}$$



Figur 27: Pump

Pumparnas uppgift är att tillföra energi så att ett önskat tryck uppnås. Normalt är därför trycket p_{ut} efter pumpen känt. Med tryck och entalpi känt kan övriga storheter också fastställas.

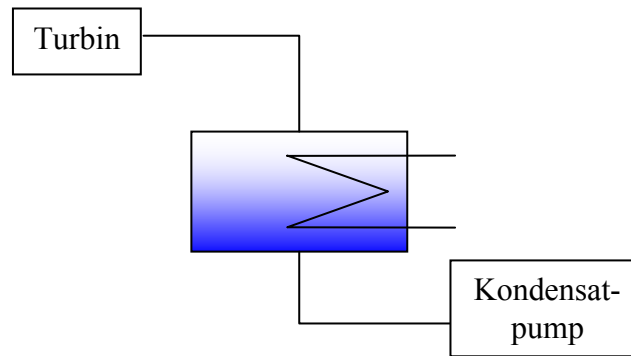
Ett alternativ till denna metod för beräkning av pumpar är att använda sambandet för pumpens effektbehov:

$$P_{pump} = \frac{\rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H}{\eta_{pump}}, \text{ vilket också kan uttryckas som } P_{pump} = \Delta p_{pump} \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_{pump}}.$$

Kondensor och värmeväxlare

I kondensor och värmeväxlare sker all energitransport genom värmeöverföring mellan det varma och kalla mediet men inget utbyte med omgivningen, skillnaden mellan kondensor och värmeväxlare är att i kondensorn sker en kondensering av ånga och kondenseringsenergin tas tillvara. Energibalans ger för att bestämma P , det vill säga den effekt som överförs till värmenätet:

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \dot{m}_{ut} \cdot h_{ut} + P$$



Figur 28: Kondensator

Kondensortrycket är bestämt på samma sätt som turbinens mottryck till mättnadstrycket vid $T_{\text{fram}} + T_g$. Tryck och temperatur hålls konstant över kondensorn om ingen underkyllning sker, då endast kondensationsenergin används. I detta fall är vätskan mättad och det används för att bestämma entalpin h_{ut} vid p_{ut} . I annat fall minskar temperaturen x antal grader och h_{ut} bestäms med hjälp av T_{ut} och p_{ut} . I värmeväxlare är trycket konstant medan temperaturen ändras beroende på effekt valet.

Flash/strypventil

Tillståndet efter expansionsventiler bestäms genom antagandet att entalpin hålls konstant under tryckändringen i ventilen. Med önskat Δp kan då övriga storheter bestämmas.

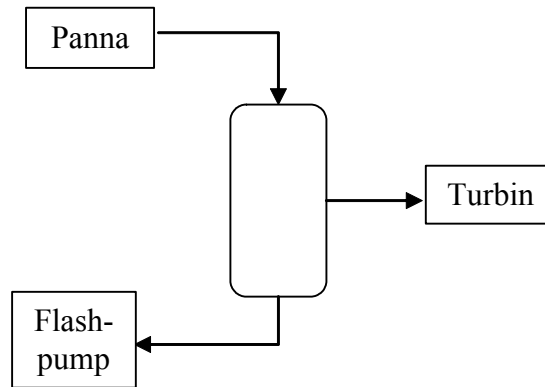


Figur 29: Ventil

Flashtryck

I flashboxen separeras mättad vätska från mättad ånga.

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \dot{m}_{\text{ånga}} \cdot h_{\text{ånga}} + \dot{m}_{\text{vatten}} \cdot h_{\text{vatten}}$$



Figur 30: Flashbox

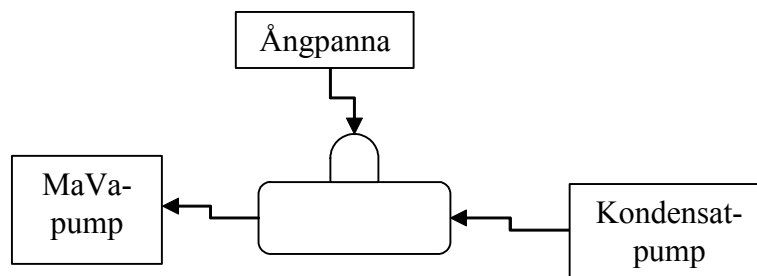
Flashtrycket är en av de faktorer som kräver iteration för att bestämmas. Ångans och vattnets entalpi bestäms av flashtrycket tillsammans med kvaliteten som är 1 respektive 0 eftersom det är mättade. Från dessa kan övriga storheter tas fram.

Ångtrycket är ett av problemen som behöver lösas för att nå jämvikt i Vaporel eftersom det är beroende av flera faktorer.

Matarvattentank

I matarvattentanken samlas det vatten som ingår i processcykeln för att återföras till pannan som matarvatten. Energibalansen för denna är:

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \dot{m}_{ut} \cdot h_{ut}$$



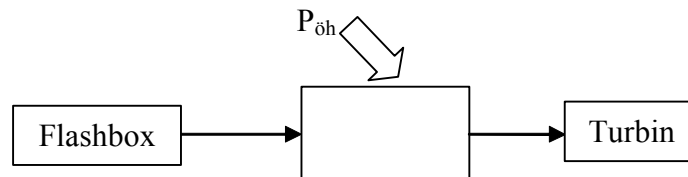
Figur 31: Matarvattentank

I tanken råder mättnadstillstånd vid ett tryck som är en inparameter i modellen. Därmed är också mättnadstemperaturen bestämd och således finns tillräcklig information för att övriga storheter ska fastställas

Överhettare

Eftersom en extern överhettning har tillämpats på Vaporel cykeln, krävs att energi tillförs utifrån för att ge överhettning. Denna energi har antagits komma från en godtycklig yttre källa och påverkar därför inte cirkulationsflödet. Energibalansen över överhettaren blir då:

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} + P_{öh} = \dot{m}_{ut} \cdot h_{ut}$$



Figur 32: Överhettare

h_{ut} bestäms i detta fall av den önskade överhettning i °C som ska utföras, och trycket bestäms av det tryckfall som angetts som indata i modellen. Övriga storheter kan också bestämmas ur tryck och temperatur.

B.10 Effektberäkning

Efter att beräkningarna är utförda bestäms den effekt som varje komponent genererar eller förbrukar. Detta sker som tidigare visats med hjälp av entalpiändringen över komponenten. Den effekt som beräknas ges i kW (1 W = 1 J/s) eftersom entalpin är angiven i kJ/kg och flödet i kg/s.

$$P_{komponent} = \dot{m}_{in} \cdot h_{in} - \dot{m}_{ut} \cdot h_{ut}$$

Effekten får sedan korrigeras med hjälp av varje enskild komponents mekaniska verkningsgrad.

$$P_{Verklig} = \frac{P_{Komponent}}{\eta_{Komponent}} \text{ för arbetsförbrukande och } P_{Verklig} = P_{Komponent} \cdot \eta_{Komponent} \text{ för arbetsgivande.}$$

B.11 Elproduktion

Det finns olika sätt att se på hur stor mängd el som produceras. Den effekt som går att mäta vid generatorklämman är ett värde som kan användas och det är ett värde som korrigeras med verkningsgraden för generator + växel.

$$P_{gen} = P_{turbin} \cdot \eta_{gen}$$

En del av den producerade elektriciteten kommer att användas internt av till exempel pumpar. Den el som återstår då cykelns interna förbrukning är avdragen kan kallas nyttig el.

$$P_{el,nyttig} = P_{gen} - P_{intern}$$

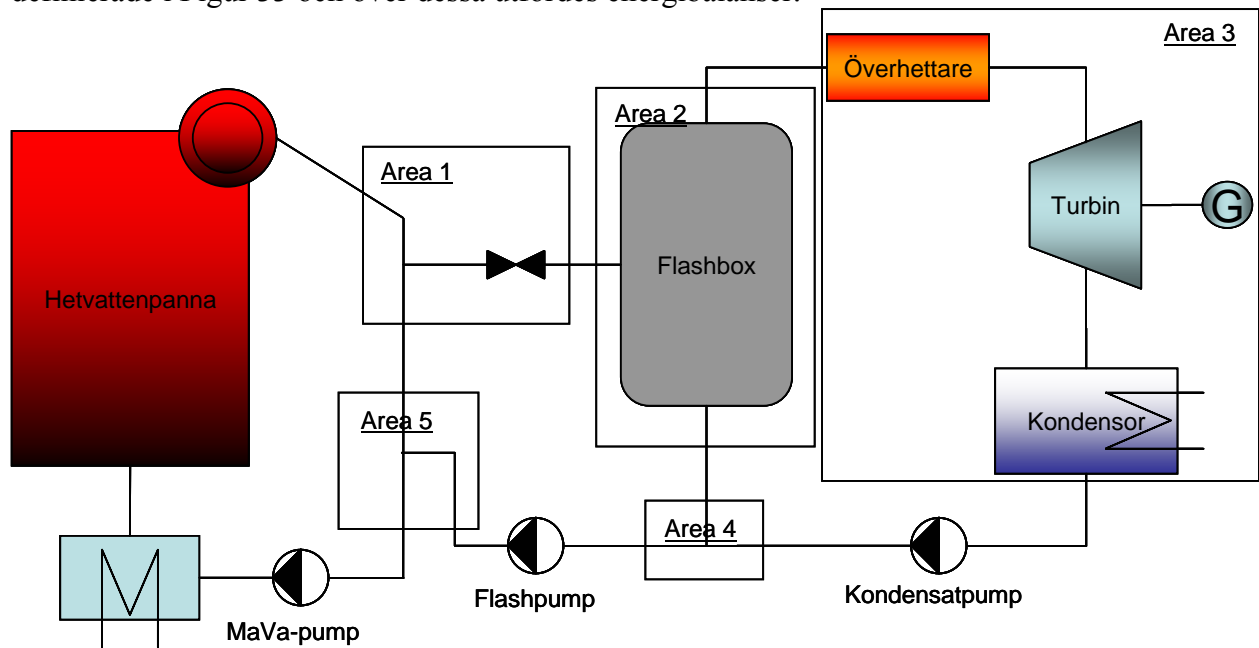
B.12 Verifikation

För att verifiera att den iterativa beräkningen av modellerna är korrekt, utfördes manuellt en kontroll av systemet. Den utfördes genom att ett antal lämpliga kontrolllytor valdes för verifiering.

De kontrolllytor som valts för kontrollen kan ses i Figur 33 och Figur 34.

Vaporel

För verifi­ering av beräkningarna som utförts för Vaporel cykeln valdes 5 areor som är definierade i Figur 33 och över dessa utfördes energibalanser.



Figur 33: Kontroll­tytor för kontroll av Vaporel

Total tillförd effekt jämförs dessutom med den totala uttagna effekten:

$$P_{Panna} + P_{öh} + P_{Flashpump} + P_{MaVapump} + P_{Kondensatpump} - (P_{Turbin} + P_{Kondensator}) = 0$$

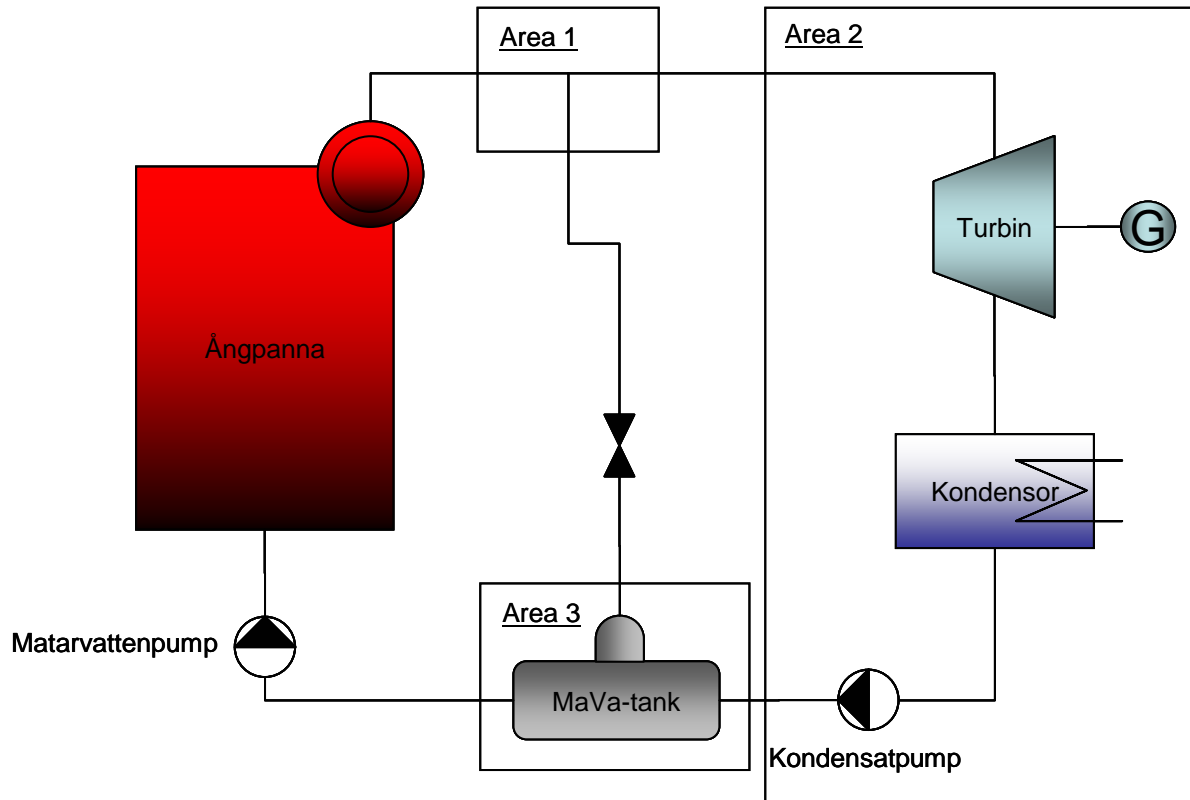
Den tillförda effekten till pumparna beräknas också med sambandet:

$$P_{pump} = \Delta p_{pump} \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_{pump}},$$

\dot{V} är här volymflödet per tidsenhet (m^3/s), och pumpens isentropverkningsgrad antas gälla som verkningsgrad.

Ångpanna med ångturbin

På samma sätt kontrolleras ångpannecykeln, med kontrolltytor enligt Figur 34. Även här kontrolleras ett antal olika fall, med mättad eller överhettad ånga för att säkerställa korrekta beräkningar.



Figur 34: Kontrolltytor för kontroll av ångpanna med ångturbin

Verifieringen av båda systemen vid alla förutsättningar föll ut tillfredsställande, med små skillnader i storleksordningen 10^{-6} kW, vilka kan härledas till iterationsvillkoren och är försumbara.

C.1 Beräkningsmodellens inmatningsfönster

Indata för beräkning och jämförelse mellan Vaporelcykel och Ångpannecykel								
INDATA:			INDATA:			INDATA:		
GEMENSAMT			VAPOREL			ÅNGPANNECYKEL		
Panneffekt	10000	[kW]	Tryckfall i pannan	2	[bar]	Tryckfall i pannan	3	[bar]
Panneffekt inkl. överhettning	10517	[kW]	Cirkulationsflöde	100	[kg/s]	Temperatur i MaVa tank	120	[°C]
Tryck i pannutlopp	16	[bar]	Ångtryck	0	[bar]	Överhettad ånga?	<input type="text" value="Nej"/>	
Underkyllning i kondensorn	0	[°C]	η Flashpump	80	[%]	Överhettning av ånga	0	[°C]
Grädighet	4	[°C]	Effekt från VVX	0	[kW]			
Framledningstemperatur	85	[°C]	Sök Ångtryck?	<input type="text" value="Ja"/>				
η turbin	53	[%]	Jämför överhettad?	<input type="text" value="Ja"/>				
η generator + växel	96	[%]	Överhettning	50	[°C]			
Pannverkningsgrad	90	[%]	Tryckfall i Överhettare	0,2	[bar]			
η Matarpump	80	[%]						
η kondensatpump	80	[%]						
η Pumpmotorer	93	[%]						
Förbrukning kringutrustning	0	[kW]						
RESULTAT:			RESULTAT:			RESULTAT:		
VAPOREL - ÖVERHETTAD			VAPOREL			ÅNGPANNECYKEL		
Effekt till överhettning	516,5	[kW]	Temperaturskillnad i pannan	22,51	[°C]	Ångflöde	4,37	[kg/s]
Turbineffekt	1078,1	[kW]	Ångtryck	10,6	[bar]	Ångtemperatur	201,4	[°C]
Klämeffekt generator	1035,0	[kW]	Ångtemperatur	182,5	[°C]	Turbineffekt	1146,2	[kW]
Nyttig el	908,8	[kW]	Turbineffekt	1017,8	[kW]	Klämeffekt generator	1100,3	[kW]
Effekt från kondensorn	9548	[kW]	Klämeffekt generator	977,1	[kW]	Nyttig el	1088,1	[kW]
Alfavärde (Netto)	9,52	[-]	Nyttig el	850,9	[kW]	Effekt från kondensorn	8864	[kW]
Alfavärde (Brutto)	10,84	[-]	Effekt från kondensorn	9091	[kW]	Alfavärde (Netto)	12,28	[%]
Elverkningsgrad	8,86	[-]	Alfavärde (Netto)	9,36	[%]	Alfavärde (Brutto)	12,41	[%]
			Alfavärde (Brutto)	10,75	[%]	Elverkningsgrad	9,90	[%]
			Elverkningsgrad	8,79	[%]			

C.2 Vaporelcykelns resultatfönster

Vaporelcykel med mättad ånga - Resultat av beräkningar

Förutsättningar

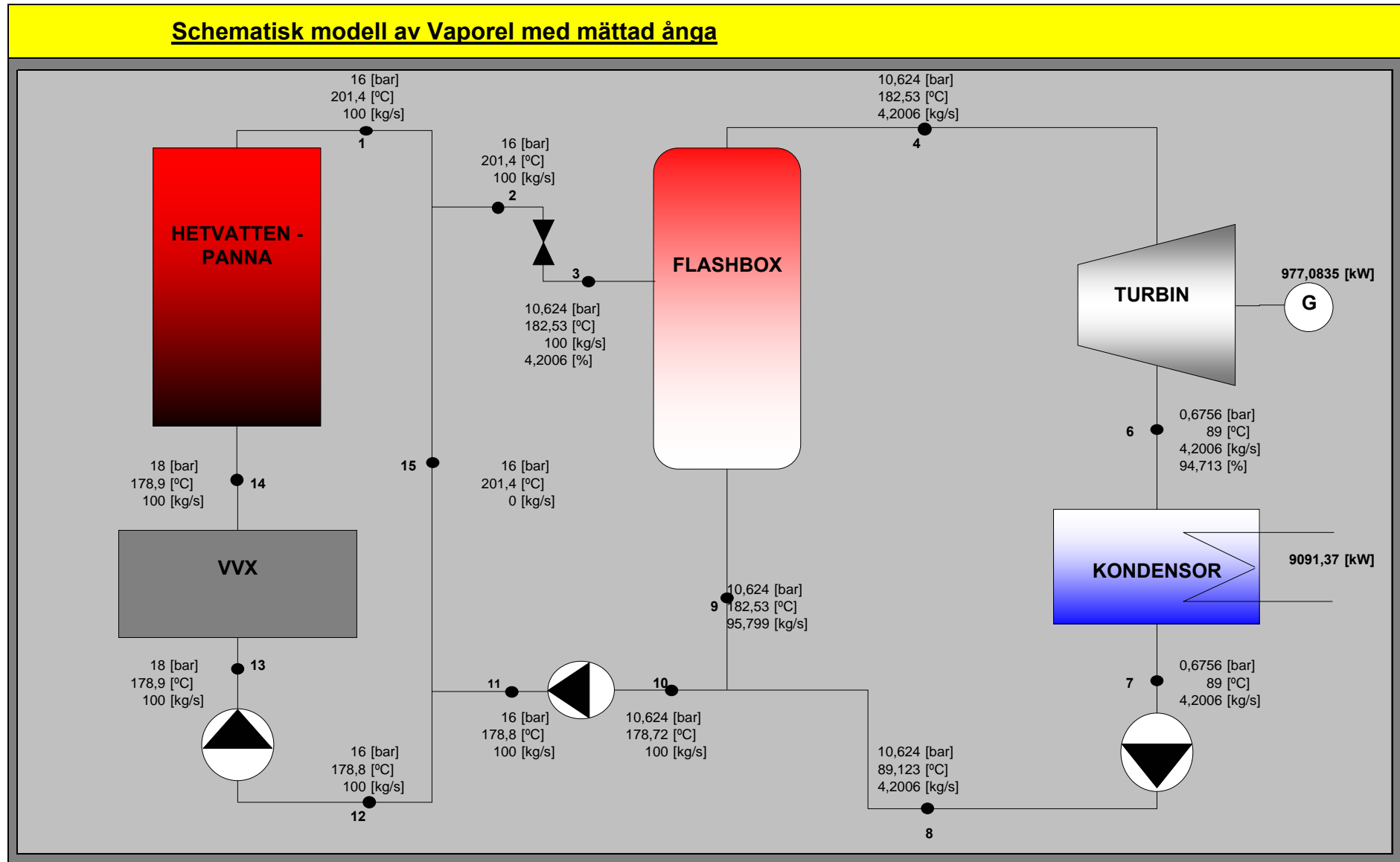
Panneffekt	10000	[kW]
Panntryck	16	[bar]
Tryckfall i pannan	2	[bar]
Cirkulationsflöde	100	[kg/s]
Tryck i kondensorn	0,676	[bar]
η Pumpmotorer	93	[-]
η generator + växel	96	[%]
Förbrukning av kringutrustning	0	[kW]

Beräknade data:

Ångtryck	10,62	[bar]
Temperaturskillnad i pannan	22,51	[°C]
Ångflöde	4,20	[kg/s]
Fukthalt efter turbin	5,29	[%]
Kondensortryck	0,676	[bar]
Eleffekt till kondensatpump	5,81	[kW]
Eleffekt till flashpump	81,3	[kW]
Eleffekt till VVX pump	30,2	[kW]
Turbineffekt	1017,8	[kW]
Klämeffekt generator	977,1	[kW]
Nyttig el	850,9	[kW]
Värmeeffekt från kondensorn	9091	[kW]
Alfavärde (Netto)	9,36	[%]
Alfavärde (Brutto)	10,75	[%]
Elverkningsgrad	8,79	[%]

Punkt	Tryck [bar]	Temperatur [°C]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/kgK]	Volymitet [m ³ /kg]	Kvalitet [-]	Massflöde [kg/s]
1	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	100,00
2	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	100,00
3	10,62	182,53	858,61	2,35	0,008789	4,20%	100,00
4	10,62	182,53	2779,39	6,56	0,183435	100%	4,20
5	10,62	182,53	2779,39	6,56	0,183435	100%	4,20
6	0,68	89,00	2537,09	7,16	2,315568	94,71%	4,20
7	0,68	89,00	372,76	1,18	0,001035	0%	4,20
8	10,62	89,12	374,05	1,18	0,001035	0%	4,20
9	10,62	182,53	774,39	2,16	0,001131	0%	95,80
10	10,62	178,72	757,57	2,13	0,001126	0%	100,00
11	16,00	178,83	758,33	2,13	0,001125	0%	100,00
12	16,00	178,83	758,33	2,13	0,001125	0%	100,00
13	18,00	178,87	758,61	2,13	0,001125	0%	100,00
14	18,00	178,87	758,61	2,13	0,001125	0%	100,00
15	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	0

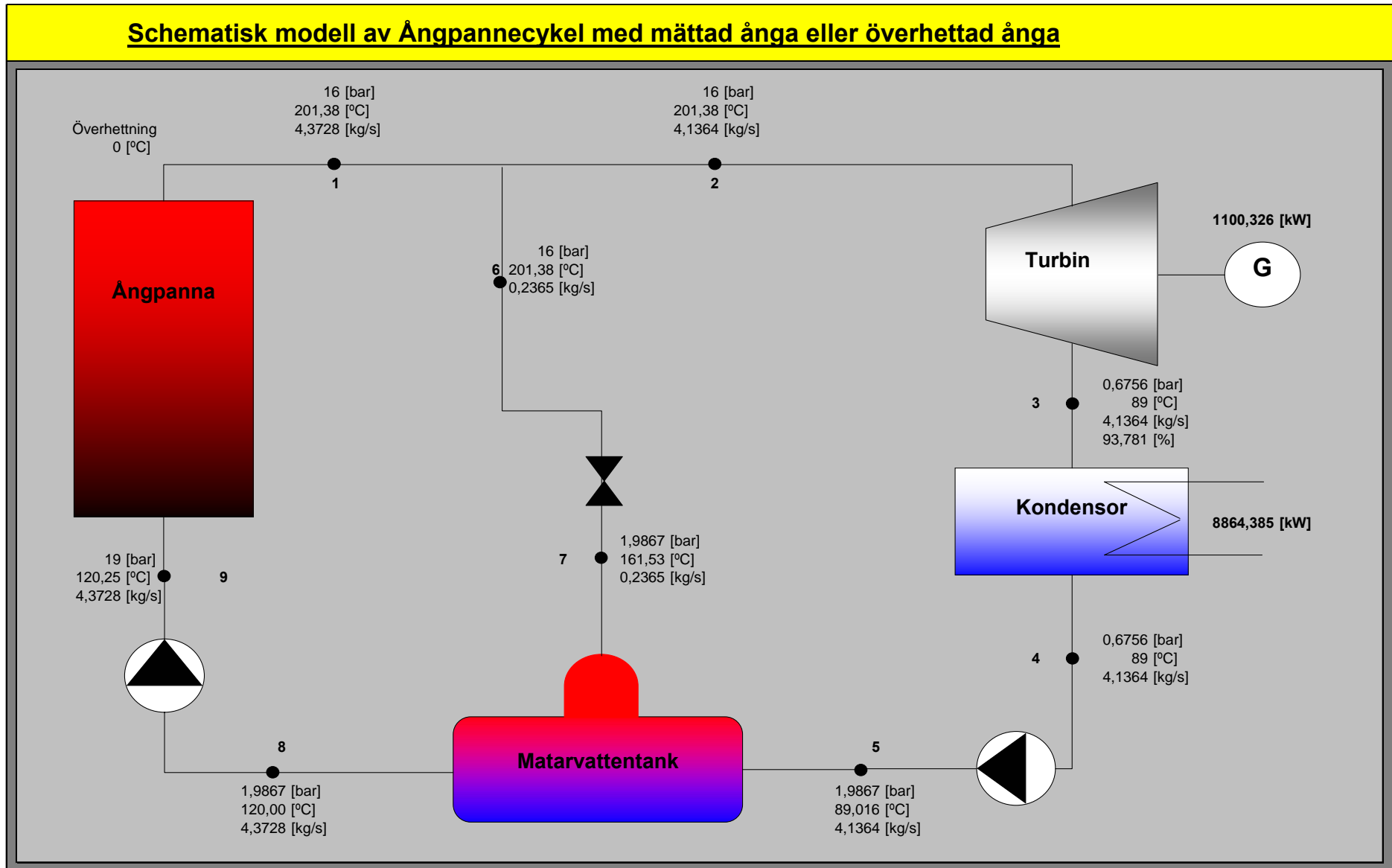
C.3 Vaporelcykelns schemafönster



C.4 Ångpannecykeln resultatfönster

Ångpannecykel - Resultat av beräkningar							
Förutsättningar							
Panntryck	16	[bar]					
Panneffekt	10000	[kW]					
Överhettning av ånga	0	[°C]					
Framledningstemperatur	85	[°C]					
η Pumpmotorer	93	[--]					
η generator + växel	96	[%]					
Förbrukning av kringutrustning	0						
Beräknade data:							
Ångflöde	4,37	[kg/s]					
Avledningsflöde till MaVatank	0,24	[kg/s]					
Fukthalt efter turbin	6,22	[%]					
Kondensortryck	0,676	[bar]					
Tryck i matarvattentank	1,99	[bar]					
Effekt till kondensatpump	0,75	[kW]					
Effekt till matarvattenpump	10,60	[kW]					
Turbineffekt	1146,2	[kW]					
Klämeffekt generator	1100,3	[kW]					
Nyttig el	1088,1	[kW]					
Värmeeffekt från kondensorn	8864	[kW]					
Alfavärde (Netto)	12,28	[%]					
Alfavärde (Brutto)	12,41	[%]					
Elverkningsgrad	9,90	[%]					
Punkt	Tryck [bar]	Temperatur [°C]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/kgK]	Volymitet [m ³ /kg]	Kvalitet [--]	Massflöde [kg/s]
1	16,00	201,38	2792,88	6,42	0,1237321	100%	4,373
2	16,00	201,38	2792,88	6,42	0,1237321	100%	4,136
3	0,68	89,00	2515,79	7,10	2,2927852	93,78%	4,136
4	0,68	89,00	372,76	1,18	0,0010352	0%	4,136
5	1,99	89,02	372,93	1,18	0,0010352	0%	4,136
6	16,00	201,38	2792,88	6,42	0,1237321	100%	0,236
7	1,99	161,53	2792,88	7,34	0,9947542	100%	0,236
8	1,99	120,00	503,78	1,53	0,0010603	0%	4,373
9	19,00	120,25	506,04	1,53	0,0010596	0%	4,373

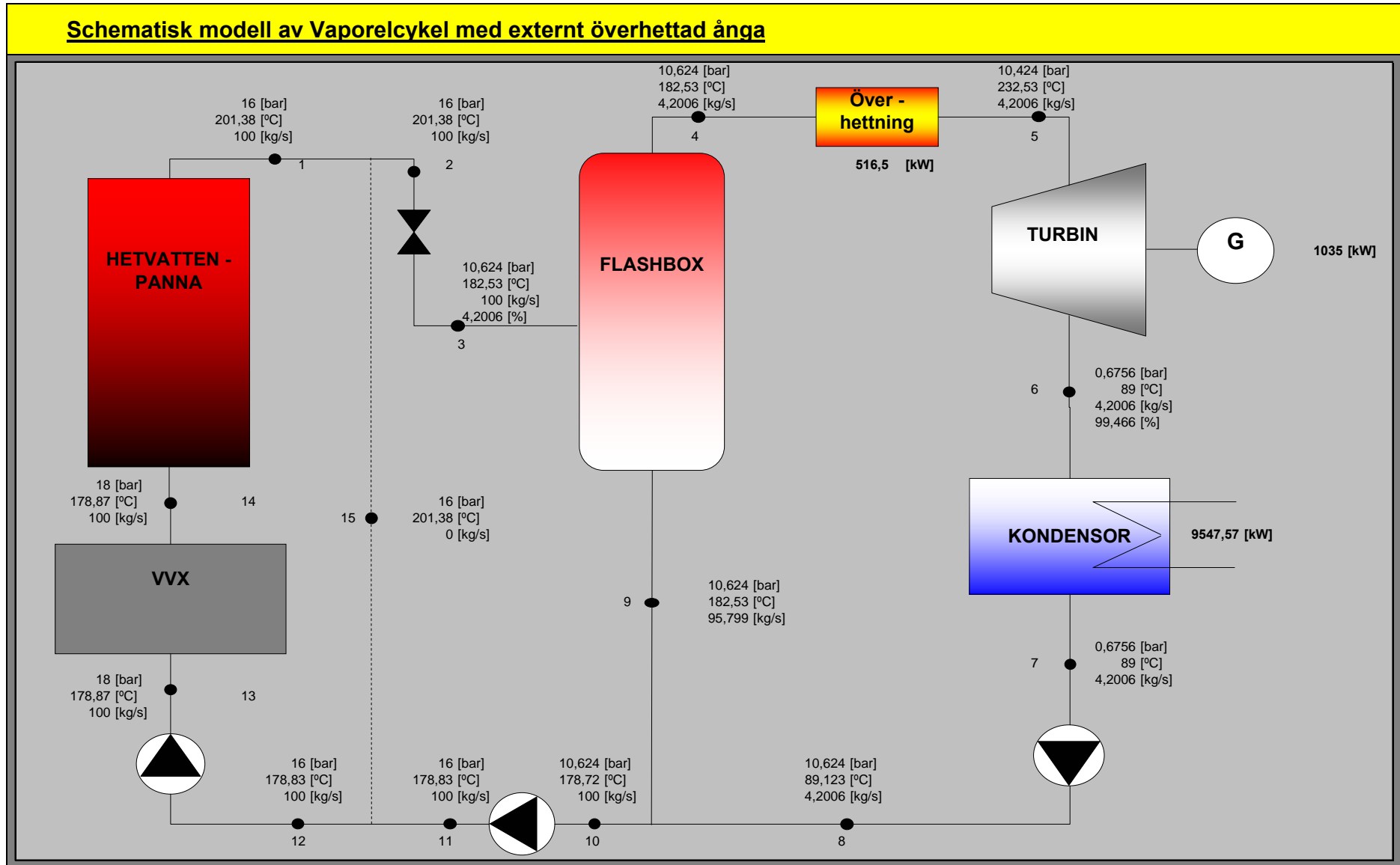
C.5 Ångpannecykels schemafönster



C.6 Vaporelcykel med överhettning resultatfönster

Vaporelcykel med överhettad ånga - Resultat av beräkningar										
Förutsättningar										
Panneffekt	10000	[kW]								
Panntryck	16	[bar]								
Tryckfall i pannan	2	[bar]								
Cirkulationsflöde	100	[kg/s]								
Tryck i kondensorn	0,676	[bar]								
η Pumpmotorer	93	[-]								
η generator + växel	96	[%]								
Förbrukning av kringutrustning	0	[kW]								
Överhettning	50	[°C]								
Tryckfall i överhettare	0,2	[bar]								
Beräknade data:										
Ångtryck	10,62	[bar]	Punkt	Tryck [bar]	Temperatur [°C]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/kgK]	Volymitet [m ³ /kg]	Kvalitet [-]	Massflöde [kg/s]
Temperaturskillnad i pannan	22,51	[°C]	1	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	100,00
Ångflöde	4,20	[kg/s]	2	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	100,00
Fukthalt efter turbin	0,53	[%]	3	10,62	182,53	858,61	2,35	0,008789	4,20%	100,00
Kondensortryck	0,676	[bar]	4	10,62	182,53	2779,39	6,56	0,183435	100%	4,20
Turbineffekt	1078,1	[kW]	5	10,42	232,53	2902,36	6,83	0,214113	100%	4,20
Effekt till kondensatpump	5,81	[kW]	6	0,68	89,00	2645,69	7,46	2,43171	99,47%	4,20
Effekt till flashpump	81,32	[kW]	7	0,68	89,00	372,76	1,18	0,001035	0%	4,20
Effekt till VVX pump	30,25	[kW]	8	10,62	89,12	374,05	1,18	0,001035	0%	4,20
Effekt till överhettare	516,54	[kW]	9	10,62	182,53	774,39	2,16	0,001131	0%	95,80
Klämeffekt generator	1035,0	[kW]	10	10,62	178,72	757,57	2,13	0,001126	0%	100,00
Nyttig el	908,8	[kW]	11	16,00	178,83	758,33	2,13	0,001125	0%	100,00
Värmeeffekt från kondensorn	9548	[kW]	12	16,00	178,83	758,33	2,13	0,001125	0%	100,00
Alfavärde (Netto)	9,52	[-]	13	18,00	178,87	758,61	2,13	0,001125	0%	100,00
Alfavärde (Brutto)	10,84	[-]	14	18,00	178,87	758,61	2,13	0,001125	0%	100,00
Elverkningsgrad	8,86	[%]	15	16,00	201,38	858,61	2,34	0,001159	0%	0

C.7 Vaporelcykel med överhettning schemafönster



D Turbinmodell

Varje turbin har en egen specifik kurva som visar dess utförande vid förändrade förhållanden och man måste därför korrigera sin förväntade produktion med hjälp av denna. I avsaknad av sådan kurva och med önskemål att ge en ungefärlig bild av utförandet vid minskad last behöver produktionen istället räknas om.

Med detta syfte har en modell tagits fram som kan användas för att uppskatta elproduktionen även då lasten minskas. I denna modell har strypreglering använts som reglermetod, vilket innebär att beräkningarna troligen ger något låg elproduktion vid beräkning av partial- eller glidtrycksreglerad turbin.

Strypreglering utförs genom att trycket vid turbininloppet minskas av en ventil. För att erhålla det tryck som uppstår efter strypventilen vid en viss laständring används sambandet:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}}$$

där

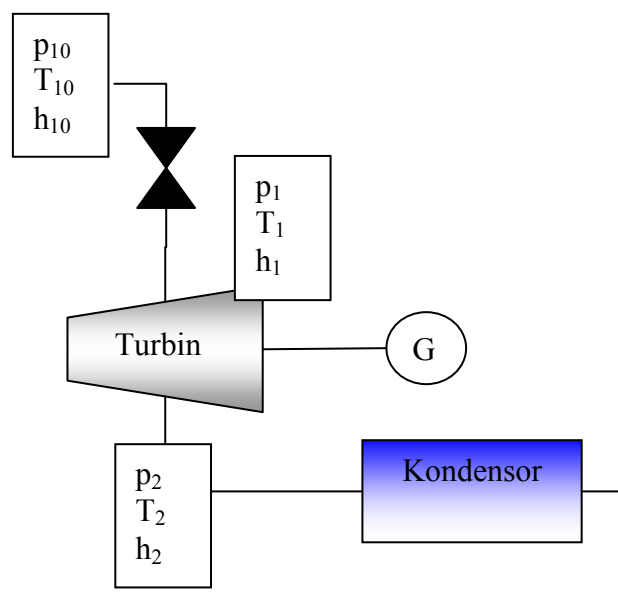
\dot{m} = Massflöde genom turbinen

T = Temperatur före turbinen

p_1 = tryck före munstycke/ledskenor

p_2 = tryck efter steg

Index 0 innebär designförhållande.



Figur 35: Turbin

Temperaturens inverkan är liten i uttrycket och försummas ofta i denna ekvation vilket istället förenklat ger:

$$\frac{\dot{m}}{m_0} = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}}$$

Om man antar att hela flödet från pannan/flashboxen passerar turbinen kan man därmed lösa ut trycket för att bestämma det vid dellast:

$$p_1 = \sqrt{\left(\frac{\dot{m}}{m_0}\right)^2 (p_{10}^2 - p_{20}^2) + p_2^2}$$

Genom att använda dessa samband över hela turbinen tillsammans med antagandet att ventilen ger isentalpisk strypning går det att uppskatta det arbete som produceras av turbinen vid dellast på samma sätt som beskrivits i komponentberäkning av turbin i beräkningsmodellerna.

Det gäller under förutsättning att isentropverkningsgraden antas vara konstant vid effektberäkningen med det nya trycket. Detta antagande stämmer någorlunda så länge volymflödet är konstant, men då detta minskas sjunker också isentropverkningsgraden drastiskt. Det gör att modellen inte är tillförlitlig för laster under ca 50 - 60 %. [17]

E Ekonomisk kalkyl

E.1 Grundkalkyl

Ekonomisk kalkyl vid konvertering av hetvattenpanna till kraftvärme						
		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2	Värme
INVESTERING						
Investeringsbelopp	kSEK	20 000	22 000	24 000	26 000	0
Specifik investering	SEK/W	25,3	21,9	25,8	21,8	0
Kalkylränta	%	6,00 %	6,00 %	6,00 %	6,00 %	0
Byggnadstid	mån	6	6	8	8	0
Ränta under byggtid	kSEK	600	660	960	1040	0
Total investering	kSEK	20 600	22 660	24 960	27 040	0
Avskrivningstid	år	10	10	10	10	0
ENERGI						
Enhetspriser						
Avfall	kSEK/ton	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
El-energi	kSEK/MWh	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
El-certifikat	kSEK/MWh	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Fjärrvärme	kSEK/MWh	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Förbrukning						
Bränsle	MW	10	10,29	10,3	10,61	9,2
Ökad elkonsumtion	MWh/år	787,5	802,5	75	75	0
Avfall	ton/år	27000	27783	27810	28647	24840
Avfall	MWh/år	75000	77175	77250	79575	69000
Fossilt innehåll (12,6 %)	ton/år	3 402,0	3 500,7	3 504,1	3 609,5	3 129,8
Energiproduktion						
Fjärrvärme	MWh/år	60000	60000	60000	60000	60000
El	MWh/år	5 940,0	7 522,5	6 982,5	8 925,0	0
DRIFT & UNDERHÅLL						
Av nyinvestering	%	2 %	2 %	2 %	2 %	0
Drifttid	h/år	7500	7500	7500	7500	7500
SKATT						
Energiskatt	kSEK/ton	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Koldioxidskatt	kSEK/ton	3,374	3,374	3,374	3,374	3,374
Skattesats (CO2)	%	63 %	57 %	57 %	45 %	100 %
Skattesats (Energi)	%	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
INTÄKTER						
Fjärrvärme ⁽²⁾	kSEK/år	30000	30000	30000	30000	30000
El-energi	kSEK/år	2 673,0	3 385,1	3 142,1	4 016,3	0
Avfall	kSEK/år	10 800	11 113	11 124	11 459	9 936
Summa intäkter	kSEK/år	43 473	44 498	44 266	45 475	39 936

KOSTNADER						
Kapitalkostnad (annuitet)	kSEK/år	2 798,9	3 078,8	3 391,3	3 673,9	0,0
Energiskatt	kSEK/år	0	0	0	0	469,5
Koldioxidskatt	kSEK/år	7 231,4	6 732,4	6 738,9	5 480,3	10 560,1
El-energi ⁽³⁾	kSEK/år	354,4	361,1	33,8	33,8	0
El-certifikat ⁽⁴⁾	kSEK/år	15,75	16,05	1,5	1,5	0
Drift & underhåll	kSEK/år	400	440	480	520	0
Summa kostnader	kSEK/år	10 800,4	10 628,3	10 645,5	9 709,5	11 029,6
DRIFTSRESULTAT						
"Överskott/underskott"	kSEK/år	32 672,6	33 870,0	33 620,7	35 765,6	28 906,4
INTÄKTSANALYS						
Resultat (5)	kSEK/år	3 766,19	4 963,54	4 714,23	6 859,15	xxxxxx

E.2 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 450 SEK/MWh

Jämförande kalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	354,4	361,1	33,8	33,8
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Summa RK	kSEK	770,1	817,2	515,3	555,3
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	2 673,0	3 385,1	3 142,1	4 016,3
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	7 335,2	8 859,5	8 620,7	11 088,3
TB	kSEK	6 565,1	8 042,3	8 105,5	10 533,0
Pay-back tid	år	3,14	2,82	3,08	2,57

Annuitetskalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	354,4	361,1	33,8	33,8
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Kapitalkostnad (annuitet)	kSEK	2 798,9	3 078,8	3 391,3	3 673,9
Summa RK	kSEK	3 569,0	3 895,9	3 906,5	4 229,1
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	2 673,0	3 385,1	3 142,1	4 016,3
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	7 335,2	8 859,5	8 620,7	11 088,3
Kostnads/Intäktsanalys					
Resultat	kSEK	3 766,2	4 963,5	4 714,2	6 859,1

E.3 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 200 SEK/MWh

Jämförande kalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	157,5	160,5	15,0	15,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Summa RK	kSEK	573,3	616,6	496,5	536,5
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	1 188,0	1 504,5	1 396,5	1 785,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	5 850,2	6 978,9	6 875,1	8 857,0
TB	kSEK	5 276,9	6 362,3	6 378,6	8 320,5
Pay-back tid	år	3,90	3,56	3,91	3,25

Annuitetskalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	157,5	160,5	15,0	15,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Kapitalkostnad (annuitet)	kSEK	2 798,9	3 078,8	3 391,3	3 673,9
Summa RK	kSEK	3 372,1	3 695,3	3 887,8	4 210,4
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	1 188,0	1 504,5	1 396,5	1 785,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	5 850,2	6 978,9	6 875,1	8 857,0
Kostnads/Intäktsanalys					
Resultat	kSEK	2 478,1	3 283,5	2 987,4	4 646,6

E.4 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 400 SEK/MWh

Jämförande kalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	315,0	321,0	30,0	30,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Summa RK	kSEK	730,8	777,1	511,5	551,5
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	2 376,0	3 009,0	2 793,0	3 570,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	7 038,2	8 483,4	8 271,6	10 642,0
TB	kSEK	6 307,4	7 706,3	7 760,1	10 090,5
Pay-back tid	år	3,27	2,94	3,22	2,68

Annuitetskalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	315,0	321,0	30,0	30,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Kapitalkostnad (annuitet)	kSEK	2 798,9	3 078,8	3 391,3	3 673,9
Summa RK	kSEK	3 529,6	3 855,8	3 902,8	4 225,4
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	2 376,0	3 009,0	2 793,0	3 570,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	7 038,2	8 483,4	8 271,6	10 642,0
Kostnads/Intäktsanalys					
Resultat	kSEK	3 508,6	4 627,5	4 368,9	6 416,6

E.5 Resultat vid 10 år avskrivningstid, elpris 600 SEK/MWh

Jämförande kalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	472,5	481,5	45,0	45,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Summa RK	kSEK	888,3	937,6	526,5	566,5
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	3 564,0	4 513,5	4 189,5	5 355,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	8 226,2	9 987,9	9 668,1	12 427,0
TB	kSEK	7 337,9	9 050,3	9 141,6	11 860,5
Pay-back tid	år	2,81	2,50	2,73	2,28

Annuitetskalkyl		Vaporel alt. 1	Vaporel alt. 2	ÅP alt. 1	ÅP alt. 2
RÖRLIGA KOSTNADER					
Ökad elkonsumtion	kSEK	472,5	481,5	45,0	45,0
Elcertifikat	kSEK	15,8	16,1	1,5	1,5
Drift & underhåll	kSEK	400,0	440,0	480,0	520,0
Kapitalkostnad (annuitet)	kSEK	2 798,9	3 078,8	3 391,3	3 673,9
Summa RK	kSEK	3 687,1	4 016,3	3 917,8	4 240,4
RÖRLIGA INTÄKTER					
El	kSEK	3 564,0	4 513,5	4 189,5	5 355,0
Värme	kSEK	0,0	0,0	0,0	0,0
Ökad avfallsförbränning	kSEK	864,0	1 177,2	1 188,0	1 522,8
Minskad koldioxidskatt	kSEK	3 328,7	3 827,7	3 821,1	5 079,7
Minskad energiskatt	kSEK	469,5	469,5	469,5	469,5
Summa RI	kSEK	8 226,2	9 987,9	9 668,1	12 427,0
Kostnads/Intäktsanalys					
Resultat	kSEK	4 539,1	5 971,5	5 750,4	8 186,6