

GRETA - värdeskapande värmeåtervinning - delrapport svalnande gjutgods

Oskar Räftegård

RISE Rapport 2023:96

GRETA - värdeskapande värmeåtervinning - delrapport svalnande gjutgods

Oskar Räftegård

Abstract

GRETA - value adding heat recovery - report cooling of castings

In the case study at a Swedish iron foundry, the opportunity of recovering waste heat from cooling goods has been studied. Probably, the most reasonable practical solution is to place the goods in a cooling hut/cooling oven after the break away of sand and mould. The cooling hut's air cools the goods under controlled conditions. The air, in turn, can be cooled with hot cooling water, which in turn would be cooled by district heating. Alternatively, the hot air can be used directly to heat up nearby facilities.

The foundry already has heat recovery from induction furnace cooling water and from compressed air units to a district heating network. The need for about 70°C heat is already saturated, while there is a demand for about 100°C heat. There is also plenty of 100°C waste heat, both in goods and sand. An alternative outlet could therefore be heat-driven electricity production. However, the electricity efficiency for this will be low, perhaps 5-10%. The remaining heat needs to be cooled, e.g. with surface water.

Key words: foundry, heat recovery, castings

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2023:96

ISBN: 978-91-89821-74-3

Karlstad, 2023

Innehåll

Abstract	1
Innehåll	2
Förord	3
Tack	3
Sammanfattning	4
1 Inledning	5
2 Värmeåtervinning ur svalnande gods	6
2.1 Värme från smältan	8
2.2 Värme från gjutgods	8
2.3 Värde på värme från gods – ett överslag	9
3 Beskrivning av Baettrs värmeåtervinningspotential	11
3.1 Beskrivning av befintligt tekniskt system för värmeåtervinning	11
3.2 Analys och beskrivning av befintlig återvinning av värme	12
3.3 Analys och beskrivning av värmebehovet.....	13
3.4 Resultat av överslagsberäkning av potential för restvärme (inkl. sand och gods) 14	
4 Värmeåtervinning från gods hos Baettr	16
4.1 Värmeåtervinning ur smälta i fylld form	16
4.1.1 Luftkylning	16
4.1.2 Vätgaskylning	18
4.1.3 Vattenkylning	18
4.1.4 Oljekylning	18
4.1.5 Saltkylning	18
4.2 Värmeåtervinning ur gods och kokill efter urslag på Baettr	19
5 Diskussion och slutsatser	21
Bilaga 1: Överslagsberäkning Smålands Stålgjuteri	22
Bilaga 2 Kort om fjärrvärme	23
Bilaga 3 Kort om värmedrivna elverk	26
5.1.1 Kort om värmelära och termodynamik.....	28
Bilaga 4: Överslagsberäkningar rimlighet luftkyla ett nav på Baettr	29

Förord

Projektet GRETA, Gjutna produkter med resurseffektiva tillverkningsprocesser och affärsmodeller, syftar till att ge Sveriges gjuteriindustri förutsättningar för en hållbar omställning med bibehållen konkurrenskraft, där högre resurseffektivitet kan erhållas för energianvändning, materialanvändning och produktdesign. Bakom projektet står ett stort antal gjuteriföretag och det statliga forskningsinstitutet RISE. Det pågår 2020-2023 och finansieras av Svenska Gjuteriföreningen och det strategiska innovationsprogrammet Metalliska material, en gemensam satsning av Vinnova, Energimyndigheten och Formas.

Värdeskapande värmeåtervinning är en serie delprojekt inom GRETA som omfattar värmeåtervinning ur sand, gods och värmebehandlingsugnar. Därutöver har även ett examensarbete genomförts gällande elproduktion från återvunnen restvärme, från induktionsugnarnas kylvattensystem.

I delprojekten har Baettrs gjuteri i Guldsmedshyttan och Smålands Stålgjuteri i Eksjö medverkat.



Baettrs gjuteri i Guldsmedshyttan är ett av världens äldsta gjuterier som fortfarande är i drift med anor från 1400-talet. I Guldsmedshyttan hanterar gjutjärnskomponenter upp till drygt 20 ton, främst vindkraftsnav och axlar. Årsproduktionen uppgår till ca 30 000 ton/år.



Smålands Stålgjuteri i Eksjö är ett familjeföretag i andra generationen med ca 35 anställda. Företaget ägs och drivs av bröderna Per, Leif och Sven Ytterell.

SSG designar och gjuter ståldetaljer upp till 800 kg. Framför allt gjuts mindre detaljer. I verksamheten ingår även värmebehandling

Tack

Författaren vill rikta ett särskilt tack till Baettr och Smålands stålgjuteri för deras deltagande i studien och till deras personal som bidragit med sin kompetens, engagemang, insikter och kreativitet. I synnerhet till:

Tommy Karlson vid Baettrs gjuteri i Guldsmedshyttan,

Rickard Celinder och Per Ytterell vid Smålands Stålgjuteri i Eksjö.

Sammanfattning

På ett svenskt järngjuteri har möjligheten att återvinna värme ur svalnande gods studerats. Rimligaste praktiska lösning är förmodligen att ställa in godset i en kylhydda/svalugn efter urslag. Kylhyddan luftkyler godset under kontrollerade former. Luften kan i sin tur kylas med ett hett kylvatten som i sin tur skulle kylas av mot fjärrvärme. Alternativ kan den varma luften användas direkt för att värma intilliggande lokaler.

Gjuteriet har redan värmeåtervinning från induktionsugnarnas kylvatten och från tryckluftsaggregat till ett fjärrvärmenät. Behovet av ca 70°C värme är redan mättat, medan det finns efterfrågan på ca 100°C värme. Det finns även mycket gott om 100°C värme, både i gods och sand. Väsentligt mer än det lilla fjärrvärmenätets behov. En alternativ avsättning skulle därför kunna vara värmedriven elproduktion. Elverkningsgraden för sådan blir dock låg, kanske 5-10%. Resterande värme behöver kylas bort, t.ex. med sjövattnet.

Flera alternativa lösningar diskuteras i rapporten.

1 Inledning

Möjligheten att återvinna värme ur svalnande sandgjutet gjutgods har studerats. Detta arbete ingår i projektet GRETA¹, som syftar till att ge Sveriges gjuteriindustri förutsättningar för en hållbar omställning med bibehållen konkurrenskraft. För en given gjuten produkt och en given framställningsprocess är målet att möjliggöra högre resurseffektivitet för energianvändningen.

Framställning av gjutna komponenter använder mycket energi. Att förnya och förbättra utnyttjandet av de metallurgiska processerna så att energianvändningen effektiviseras är ett ständigt och långsiktigt mål. Genom att utnyttja ny kunskap och utveckla allt bättre mät- och styrmetoder kan processteg optimeras för effektivare energianvändning. Det innebär inte bara att använda energi effektivt i ett specifikt processteg, utan framför allt att kunna identifiera rätt systemgränser, och för det krävs insikt om hur energi flödar mellan olika processteg.

Ur Agendan för Metalliska material, steg 6:

En av utmaningarna för framtiden blir att värma med avsevärt reducerade koldioxidutsläpp. Utvecklingen kan gå i två riktningar. Den ena är att övergå till bränslen som ger låga koldioxidutsläpp och den andra är att använda el som framställts med låga koldioxidutsläpp. [...] Miljöpåverkan över hela livscykeln måste också klargöras, till exempel risken för ökade utsläpp av partiklar och kväveoxider. ²

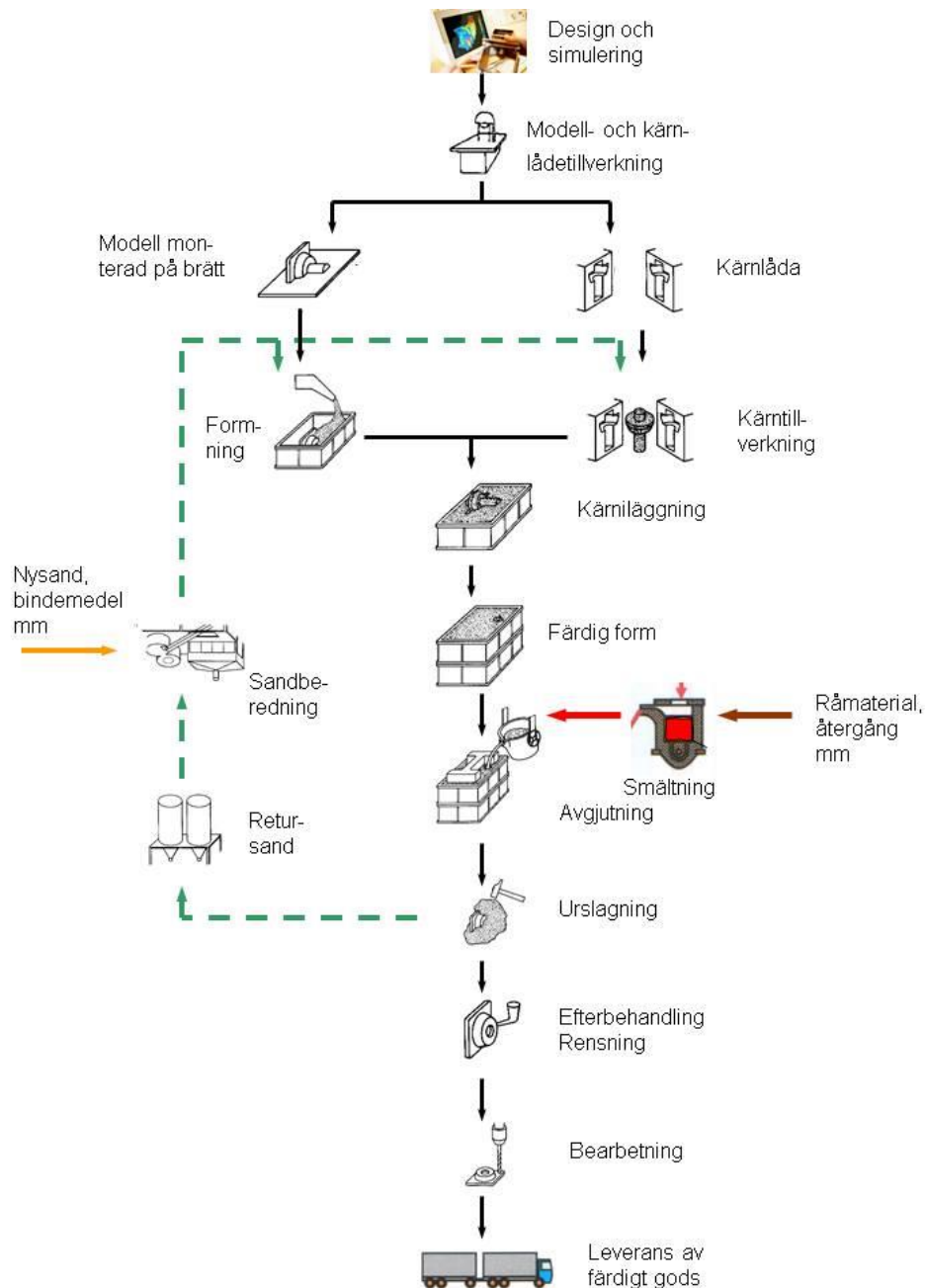
Gjuteriindustrin har en tydlig ambition att minska användningen av fossila bränslen. Här befaras dock att tillgången på el i allmänhet och fossilfri el i synnerhet i en snar framtid kommer att bli en begränsande faktor. Redan idag upplever gjuterier i södra Sverige tydliga tecken på kommande effektbrist. Det finns med andra ord mycket tungt vägande skäl att säkra produktionen inför framtida effektbrist.

¹ Gjutna produkter med resurseffektiva tillverkningsprocesser och affärsmodeller. Bakom projektet står ett stort antal gjuteriföretag och det statliga forskningsinstitutet RISE. Det pågår 2020-2023 och finansieras av Svenska Gjuteriföreningen och det strategiska innovationsprogrammet Metalliska material, en gemensam satsning av Vinnova, Energimyndigheten och Formas.

² <https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/2-natverk/nationell-samling-kring-metalliska-material/pdf/nationell-samling-kring-metalliska-material-2020.pdf>

2 Värmeåtervinning ur svalnande gods

Nedanstående processbeskrivning avser främst gjutning med järn/stål i sandform. Gjuterihandboken³ är en bra källa till den som söker djupare kunskap. I figuren nedan återfinns ett översiktligt processschema.

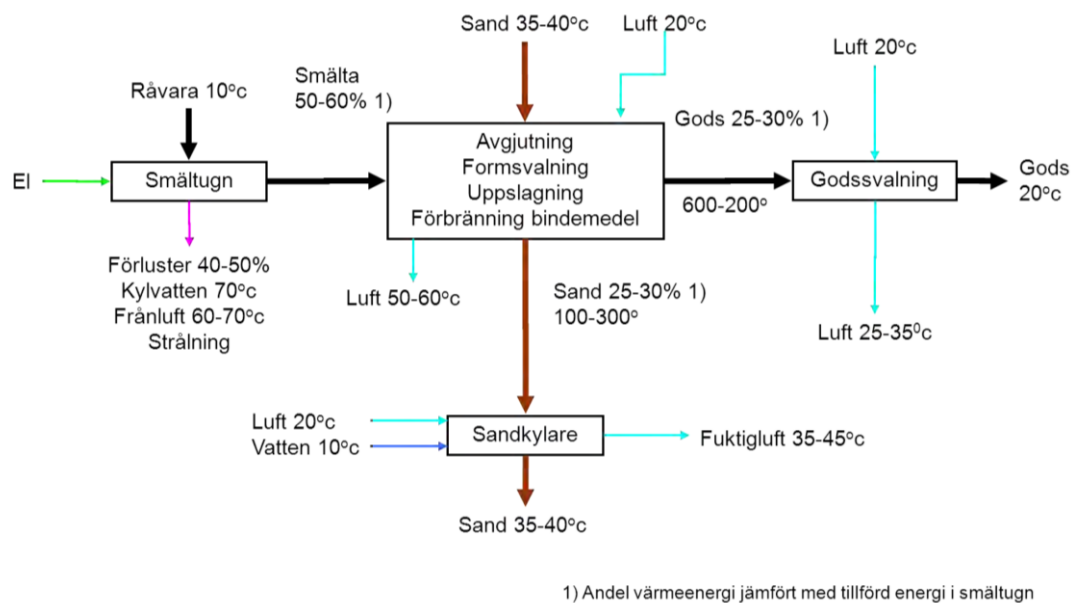


Figur 1: Processchema. Källa: Gjuterihandboken (metallkompetens.se), nedladdad 2022-04-22.

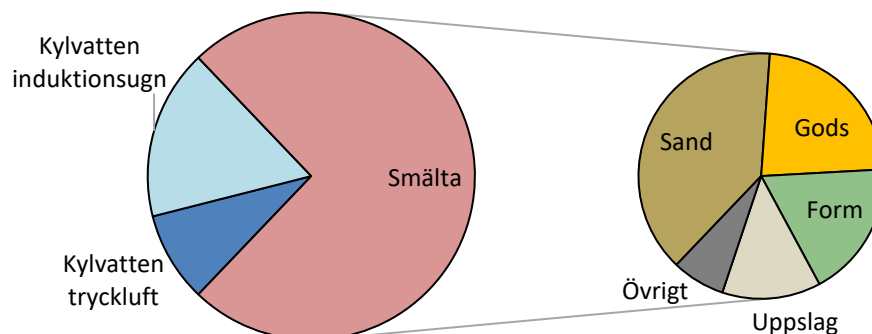
³ <https://metallkompetens.se/metallkunskap/gjuteriteknik/>

Energi används främst för smältning, men hjälpprocesser så som processventilation och komfortvärme är inte obetydliga. Notera att gjutning är en batchprocess där ugnen är i drift ett fåtal timmar åt gången. Antalet batcher per dag beror av gjuteriets produktion: antal ugnar, typ av produkt, skiftgång, etc. En generell energibalans för ugn, smälta, gods och sand visas i figur 2 nedan.

Restvärme uppstår främst som värmeförluster från induktionsugn och tryckluft, samt värme som härstammar från smältan. Inbördes storleksordning för dessa källor visas i figur 3, där värmen i smältan till stor del hamnar i sand, gods och form. Spridning mellan olika gjuterier är dock betydande.



Figur 2 Energiflöden i sand och gods, Källa: Swerea Swecast rapport 2011-006 "Värmelagring för energiintensiva SMF med fokus på svensk gjuteriindustri", Viktor Arvidsson, Per Sommarin.



Figur 3: Inbördes storleksordning mellan olika restvärmekällor. Värmen i smältan hamnar bl.a. i gods, sand och form. Källdata: Swerea Swecast rapport 2011-003, Emma Svensson. Egen bearbetning av data till figuren.

2.1 Värme från smältan

Att utvinna värme ur smältan medan den stelnar och svalnar i sandformen är idealt, då värmen ännu är samlad och inte spridits vidare till sand, form och gjuthall, samtidigt som den fortfarande har hög temperatur. **Tillgängligheten är mycket god**, medan **åtkomligheten** i princip är obefintlig med beprövad teknik.

Åtkomstproblematiken beror främst på att det inte finns någon bra fluid att kyla smältan med efter avgjutning i sandform. Annars finns t.ex. teknik med passiva kyljärn som leder ut värmen i sanden. I stället för dessa järn skulle ett kylrör med ett reglerbart flöde kunna användas. Kylsystemet behöver dock tåla hög temperatur, då svalningsförlopp behöver gå långsamt vid temperaturer över ca 700°C (beroende på legering). Detta innebär att kylrören behöver följa med upp i temperatur och utesluter t.ex. fluiden vatten som energibärare, då trycket blir för högt. Gas har för låg kapacitet (kräver för stor volym), även om t.ex. vätgas är 7-8 gånger bättre än kvävgas/luft. Det finns termiska salter som möjligen kan fungera, men dessa har ett arbetsområde från ca 150-500°C (dvs stelnar vid ca 150°C och tål inte mer än ca 500°C), alternativt mellan ca 300-600°C. Salter har inte undersökts vidare inom GRETA, men ses som en framtida möjlighet kombinerat med ”conformal cooling channels” i sandformen på liknande sätt som för pressgjutningsverktyg.

Till vinsterna med styrd avsvälning hör produktivitets- och kvalitetsvinster, förutom utomordentligt bra **temperatur** (värmeflöde) och hög **tillgänglighet** (all värme finns ju i smältan innan den sprids vidare till sand, form och omgivning). Att kyla smältan/godset direkt i form minskar även behov att i nästa skede kyla sand och gods. Sannolikt fås även bättre arbetsmiljö med svalare sand, form och lokal.

2.2 Värme från gjutgods

Hur mycket av värmen i godset efter urslag som går att nyttja beror på:

- Urslagstemperatur och hur uppslag sker
- Återvunnet värmevattens fram- och returledningstemperatur, i denna rapport antaget till 100/50°C, men beror så klart på lokala förutsättningar, behov och användningsområde.
- Temperaturförlust över kylhydda/svalugn, i vilken godset kyls, vilket delvis är en tekno-ekonomisk avvägning som ställs mot restvärmens värde vid olika temperaturer och förmodligen även på rent praktiska begränsningar.

Det mesta av värmen som fanns i smältan har överförts till sand, form och omgivning före urslaget. Enligt en studie med fem olika gjuterier återfinns drygt 20% av värmen som ursprungligen fanns i smältan i godset⁴. Det kan dock vara mer. Spridningen mellan de fem gjuterierna är att 13-30% av värmen i smältan återfinns i godset.

Även formarna innehåller en del värme efter urslag, i snitt enligt studien nästan lika mycket som i godset. Temperaturen är dock lägre än godsets, även om kokiller kan vara nog så varma. Precis som för allt annat är spridningen mellan gjuterier stor.

⁴ Swerea Swecast rapport 2011-003, ”Värmeåtervinning från svalnande gjutgods”, Emma Svensson.

Värmen i godset blir tillgänglig batchvis vid urslag och temperaturen är hög, vanligen över 400°C. Närmast till hands är att kyla med luft som har dålig kapacitet. Luft kan i sin tur värmväxlas till ett värmevatten/kylvatten. Värmevatten är transporterbart i rörledningar och lagringsbart i tankar, till skillnad från luft där all distribution är begränsad till korta avstånd.

Att däremot kyla gods direkt med vatten ger förmodligen kvalitetsproblem för de allra flesta produkter, annars är vatten en bra fluid att kyla med. Att spraya på flytande vatten (aerosol) på godset med fasövergång till ånga som följd bedöms som svårt utan att påverka kvalitet (ojämn/snabb avsvälning). Aerosolspray bör annars kunna gå att överföra till ett ca 80-90°C värmevatten, beroende på andel luft i ångan.

En alternativ möjlighet är att värma lokaler direkt med recirkulerande värmd kyl-luft, eller att förvärma ventilationsluften med godset. Möjligheten att använda värmen blir då begränsat till komfortvärmesäsongen, ett par månader per år. Luft är även kostsamt att transportera, det kan endast bli frågan om intilliggande lokaler eller att transportera ut det heta godset till de lokaler som behöver värmen. Luft går inte heller att lagra mellan batcher, över helg, etc med samma enkelt som värmvatten.

Sammanfattningsvis är **tillgängligheten** okey för gods, men **åtkomligheten** begränsad p.g.a. den mellanliggande luftkylningen av godset, innan värmen överförs till ett värmvatten. Används luften direkt (utan att överföras till värmvatten) blir åtkomlighet istället begränsad av avstånd till värmebehovet och tillgängligheten minskar till ett fåtal timmar per år som närliggande utrymmen behöver komfortvärme.

Att återvinna värme ur form eller kokill är snarlikt återvinning ur gods.

2.3 Värde på värme från gods – ett överslag

Generellt bedöms att 13-15% upp till 25-30% av värmen som tillförs smältugnen återfinns i godset efter urslag⁵. En del värme förloras även vid uppslag. Om värmen har ett värde kan sannolikt uppslagsprocessen förändras så att förlusten minskar.

Värmemängden i godset kan enkelt beräknas för att göra ett första överslag.

Ekvation 1: Intial överlagsberäkning på värdet att återvinna värme ur gods:

Återvunnet värde (kr/år) = Återvunnen värme (kWh/år) x värmepris (kr/kWh), där:

Återvunnen värme (kWh/år) = $[m_{\text{gods}} \text{ (ton/år)}] \times c_p \times [T_{\text{gods,in}} - T_{\text{gods,ut}} \text{ (}^\circ\text{C)}]$, där:

c_p (kWh/ton, °C) för aktuell metall används, t.ex. 0,16 kWh/ton, °C

$T_{\text{gods,ut}} = [T_{\text{värmvatten framledning}} + DT]$, där DT initialt kan antas till 50°C.

Som en första ansats kan antas att godset kyls ned till 150°C om värmvattnets framledning ska bli 100°C. (Verklig temperaturförlust mellan gods och värmvatten bestäms så småningom av teknoekonomiska avvägningar).

Antag t.ex. årsproduktion motsvarande Baettr: ca 30 000 ton/år, $C_p = 0,16$ kWh/ton, $T_{\text{gods,in}} = 450^\circ\text{C}$, $T_{\text{gods,ut}} = 150^\circ\text{C}$ och att värmen är värd 0:50 SEK/kWh.

Ekvation 1 ger: $20\,000 \times 0,16 \times (450-150) \times 0:50 = 720\,000$ SEK/år.

⁵ Spridning är stor, se t.ex. Swerea Swecast rapport 2011-003 eller rapport 2011-06.

En investering får därmed kosta drygt 2 Mkr med tre års pay-back, eller cirka 4,5 Mkr med sex års pay-back, sett till värmens värde och om all värme går att använda.

Utöver ovanstående energivärde kan det finnas andra förtjänster än värme, så som snabbare processflöde (snabbare avkylning än på gården), ta bort flaskhals (fullt på gården), högre produktkvalitet (kontrollerad avsvälning), bättre arbetsmiljö (minskad värmestrålning, inte fullt så heta ytor), minskad miljöpåverkan (mindre köpt bränsle till komfortvärme), ökad robusthet (t.ex. vid energiprischocker eller haveri i panncentralen), o.s.v.

I bilaga 1 görs och kommenteras ett överslag avseende värmebehandling på Smålands Stålgjuteri enligt ovanstående princip.

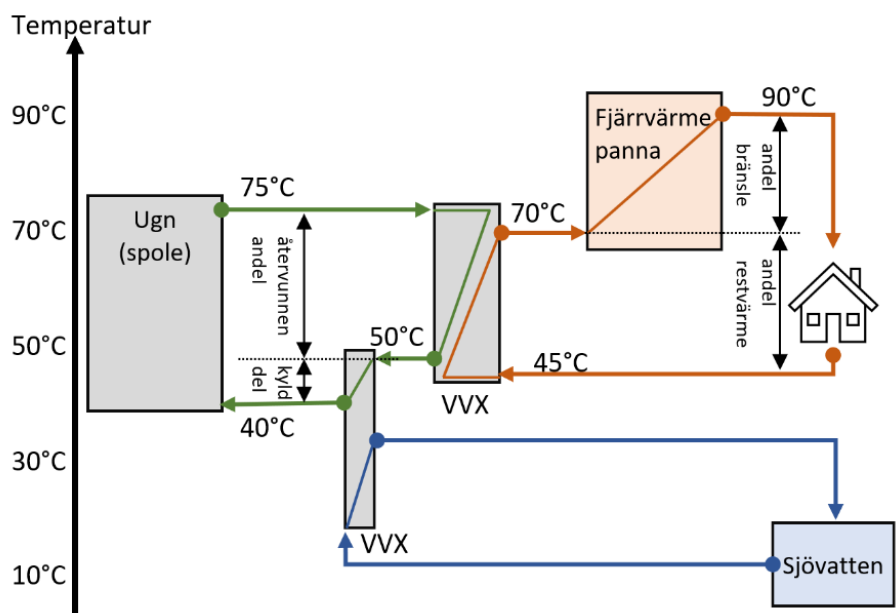
3 Beskrivning av Baettrs värmeåtervinningspotential

Nedanstående kapitel består av:

- Beskrivning av befintligt tekniskt system för värmeåtervinning
- Analys och beskrivning av befintlig återvinning av värme
- Analys och beskrivning av värmebehovet
- Överslagsberäkning av potential för restvärme
- Analys och beskrivning av möjligt framtida system med utökad värmeåtervinning

3.1 Beskrivning av befintligt tekniskt system för värmeåtervinning

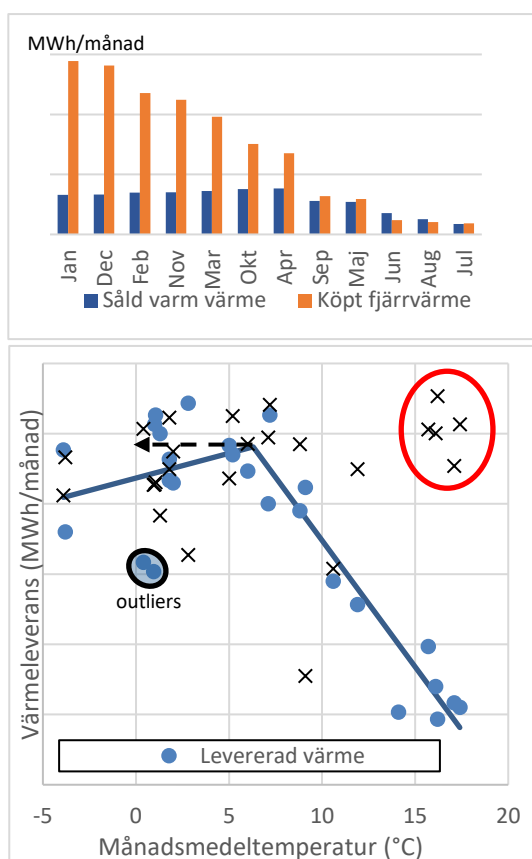
Det är omöjligt att återvinna värme med lönsamhet om det inte finns ett värdeskapande värmebehov att återvinna värme till. I fallet Baettr säljs restvärme i varmt (ca 40/70°C) kylvatten till fjärrvärmeändamål. Det varma kylvattnet härstammar från induktionsugnarnas spolkyllning och från tryckluftskompressorernas kylare. Dessa system är inte på något sätt unika för Baettr. Många induktionsugnar tolererar liknande temperaturer. Den återvunna värmen är dock för kall för att kunna användas rakt av som fjärrvärme under en stor del av året, därför höjs temperaturen med en pelletseldad panna som ägs av fjärrvärmeleverantören. I bilaga 2 återfinns en kortfattad allmän introduktion av hur fjärrvärmesystem brukar se ut i Sverige. Figur 4 visar förenklat hur systemen hänger samman i Guldsmedshytan.



Figur 4 Princip för värmeåtervinning till restvärme. Temperaturbegränsningar gör att endast 56% av restvärmen kan tillvaratas i detta exempel, medan 44% hamnar i sjön

3.2 Analys och beskrivning av befintlig återvinning av värme

Figuren nedan visar Baettrs köpta fjärrvärme och sålda restvärme omräknat till ett normalår, där månaderna sorterats i fallande ordning efter storleksordning köpt värme. Baettr är fjärrvärmenätets klart största och dominanta värmekund, övriga kunder är mycket mindre och få till antalet. Fjärrvärmeleveransen är i detta fall därför nästan det samma som Baettr behov, men inte riktigt. Ur figuren framgår att det finns utrymme i fjärrvärmenätet att ta emot mer restvärme, enkom för att täcka gjuteriets behov. (Fjärrvärmenätets hela kundbehov är inte känt och redovisas inte)



Figur 5 Normalår för köpt och såld värme (övre figur) samt effektkurva för såld värme och tillförd elektricitet (nedre figur)

ugnar var konstant, vilket den alltså inte är. Ett tydligt värmeöverskott kan noteras under sommarmånaderna, då skillnaden mellan kryss inrigade i röd ellips och levererad restvärme (blå prickar) är stor. Vintertid är matchningen bättre.

För de månader som är kallare än ca 6°C tycks såld värme avta något, trots att fjärrvärmebehovet ökar. Underlaget från BAETTR är dock långt ifrån statistiskt säkert.

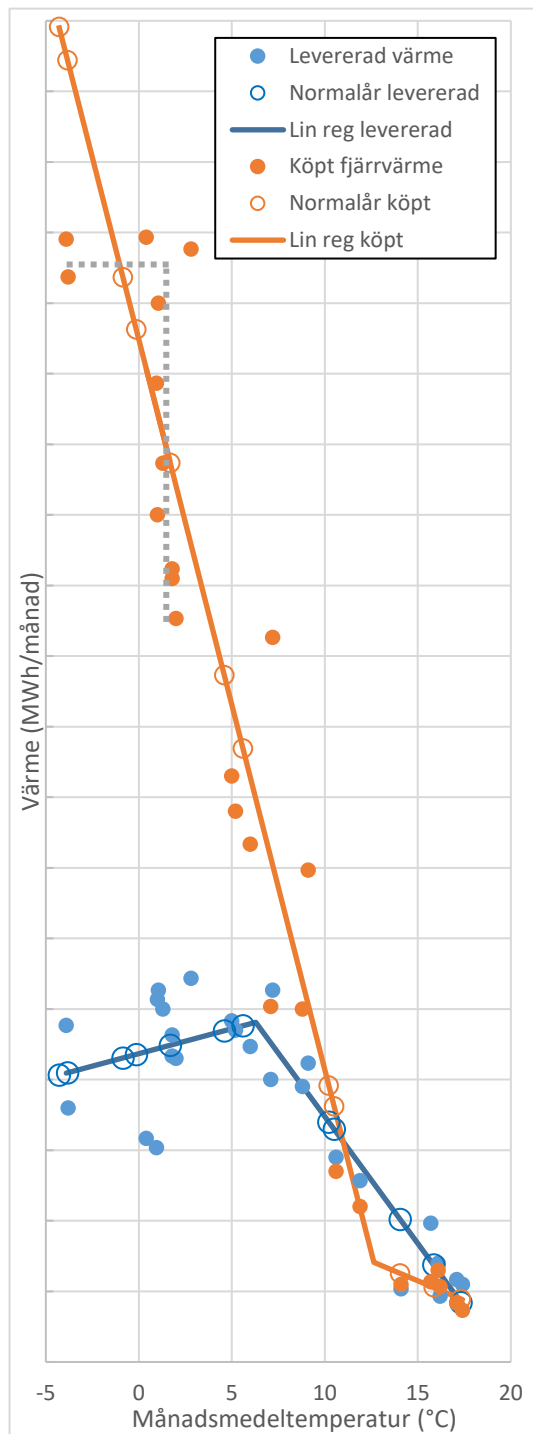
Normalåret som redovisas i övre figuren t.v. som ett stapeldiagram har beräknats med historisk månadsstatistik som åskådliggörs i den nedre figuren t.v. Januari och december är förmodligen något överuppskattade, då verklig maximal kapacitet verkar vara begränsad till motsvarande februaris nivå. (Normalåret som redovisas i figuren har ca 10% större mängd köpt fjärrvärme än medelvärdet för 2-års perioden med mätdata som normalåret är baserat på).

För att beräkna normalåret har effektkurvor upprättats så som i den nedre figuren t.v. I figuren visas verklig levererad värme per månad i relation till månadsmedeltemperatur (blåa cirklar). Den blå linjen är en linjär regressionslinje med brytpunkt⁶, som beräknats utan de två värden som markerats som outliers. Linjen ligger till grund för normalårsberäkningen (stapeldiagrammet) ovan. De svarta kryssen är ugnarnas elanvändning, procentuellt nedskalad så att kryss och cirklar skulle matcha varandra exakt om relationen mellan levererad restvärme och tillförd el till

⁶ Beräknad med PWLF 2.10, <https://pypi.org/project/pwlf/>

En alternativ tolkning är att leveransen är konstant eftersom el till ugnar är något lägre för de två kalla månaderna allra längst till vänster i figuren. Utan dessa blir leveransen i princip konstant när det är kallare än $+6^{\circ}\text{C}$ (indikerat med svart streckad pil).

3.3 Analys och beskrivning av värmebehovet



Figur 6 Effektkurva köpt och såld värme, samt regressionslinjer för beräkning av normalåret

Precis som för såld varm värme i föregående figur, har motsvarande effektkurvor gjorts för köpt värme. Figur 6 t.v. inkluderar den sålda värmen (blå) från föregående figur. Linjär regression med brytpunkt har gjorts med samma metod som för såld värme.

Komfortvärmebehov (orange) har ett starkt linjärt samband mellan utetemperatur och rumstemperatur vilket gör linjär regression mot utomhustemperatur till en vanlig analysmetod, även om t.ex. solinstrålning och vindhastighet också påverkar. På ett gjuderi kan även verksamheten antas påverka värmebehovet, här är antaget att gjuderiets verksamhet är snarlik från månad till månad. Brytpunkt för värmeleverans återfinns när utomhustemperaturen är så hög att komfortvärmebehovet nästan upphör, $12-13^{\circ}\text{C}$.

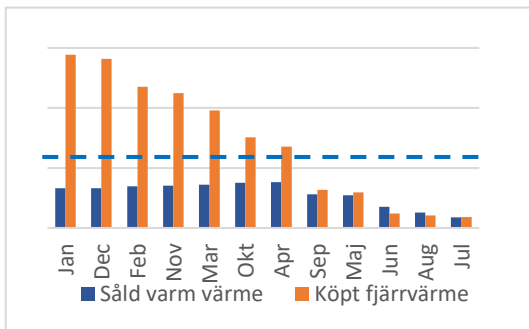
I figuren visas även de normalårskorrigerade månadsmedelvärden som använts till stapeldiagrammets orangea staplar.

Notera den streckade grå linjen, som dels indikerar ett tak för värmebehovet, dels att behovet varierar stort vid snarlik månadsmedeltemperatur. Här kan det finnas två olika former av brytpunkter som inte syns med månadsupplösning, utan kräver mätdata på dygnsnivå.

Månadsmedeltemperatur har med andra ord för låg tidsupplösning för att på ett bra sätt beskriva värmebehov i relation till utetemperatur, däremot stämmer normalåret statistiskt väl med den 2-årsperiod som det är baserat på. Normalårets köpta värme är ca 10% högre än för 2-årsperioden som ligger till grund. Dessa 10% motsvarar ungefärligen användningen ovanför det grå streckade taket (december och januari).

Slutsats gällande normalåret: Januari och december är något överuppskattade för köpt värme, då verklig maximal leverans verkar vara begränsad till drygt februaris nivå. Detta stämmer även med upplevelsen på Baettr, att värmesystemet inte räcker till kalla vinterdagar. Dessutom använder Baettr gasol som spetsvärme vid verkliga köldknäppar i några lokaler. Såld värme kan vara något underskattad för kalla månader.

3.4 Resultat av överslagsberäkning av potential för restvärme (inkl. sand och gods)



Figur 7 Normalår för köpt och såld värme, samt potential för återvunnen varm värme

Tillgänglighet, eller kapacitetsfaktor om man så vill, för den befintliga värmeåtervinningen kan skattas med hjälp av figuren till vänster.

Mängd såld värme från det varma kylvattnet begränsas av flera faktorer. Dels är kylvattnets temperatur ca 70°C, vilket gör att temperaturen inte räcker till under framför allt vår/höst/vinter.

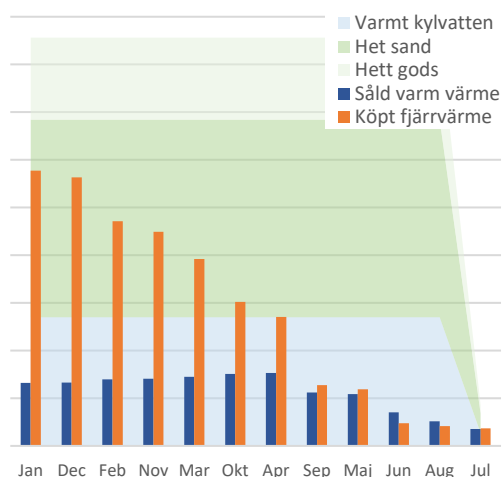
Den streckade blåa linjen visar indikativt hur mycket varmt kylvatten som finns tillgängligt. Det är alltså indikativt drygt hälften som säljs som varm värme medan resten av olika anledningar inte går att sälja. Tillgängligt kylvatten har beräknats med ett nyckeltal, att X% av tillförd elektricitet⁷ till ugnarna hamnar i kylvattnet. Verkligt mätvärde för el har använts, medan nyckeltalets tagits från en utrustningstillverkare och inte gäller specifikt Baettrs ugnar inkl. hur dessa körs. Kylvatten från tryckluft som också ingår, har antagits motsvara 90% av den el som används till tryckluft enligt Baettrs energikartläggning. Den blå streckade linjen ger därmed en indikation på hur mycket värme som skulle kunna vara tillgängligt om det inte finns någon temperaturkonflikt mellan kylvatten och fjärrvärme. (Se figur 4 ovan)

Det finns alltså goda förutsättningar att återvinna värme och sälja den till fjärrvärmeändamål, bara värmen är tillräckligt varm. Det är däremot mindre meningsfullt att återvinna ytterligare värme kring 70°C då detta behov redan är mättat.

Not: Baettr saknar aktiv temperaturreglering av kylslingorna, slinga för slinga, vilket ger lägre temperatur ut från ugnarna än med en aktiv reglering. En prisvärd lösning för efterinstallation av individuella reglerventiler har eftersökts inom ramen för GRETA, dock utan lyckat resultat. Högre temperatur skulle öka mängd såld värme under vintern.

⁷ Nyckeltal liksom verkliga energimängder redogörs ej på grund av affärssekretess.

Uppskattad potentiell värmemängd i gods och sand om den tas ut som ca 100°C hett värmevatten har ritats in i stapeldiagrammet nedan. För gods har uppskattningen gjorts enligt den metod som redovisas ovan (enligt ekvation 1). För sand har liknande metod använts, se Greta rapport värmeåtervinning från sand för detaljer. Värme i formar och kokiller har inte inkluderats i figuren och inte heller kvarvarande värme i gods och sand med lägre temperatur.



Figur 8 Potential för återvinning av het och varm värme, samt nuvarande såld och köpt värme

All restvärme (blå + grön i figuren t.v.) kan användas direkt som fjärrvärme utan behov av någon panna som uppfodrar temperaturen, om minst hälften av värmeåtervinningen kommer från en (grön) het 100°C värmekälla. Då antas att varmt kylvatten (blå) förvärmer fjärrvärmevattnet från ca 40°C till 70°C och att het återvinning (grön) slutvärmer från 70°C till ca 100°C. I figuren behöver alltså minst hälften komma från av en het källa (grön) under vintern. Detta är möjligt att åstadkomma ned till ca -4°C. (I stapeldiagrammet motsvarar januari -4,3°C). Varm värme kommer till stor del batchvis från ugnarna, vilket alltså behöver mötas med motsvarande mängd het

100°C värme, antingen genom att mellanlagra värmevatten eller mellanlagra het sand. Gods är svårare att mellanlagra, även om det kan ställas på vänt i en svalhydda. Fjärrvärmens ackumulatortank lagrar därefter den heta fjärrvärmens över dygnet.

De kallaste veckorna på året räcker inte värmen till, utan pellets pannan behövs. Figuren ovan visar månadsmedel och inte hur det ser ut för enskilda dygn. Januari motsvarar värmebehov vid ca -4,3°C. Här krävs en mer detaljerad analys baserad på tim- eller dygnsmätvärden, men en bedömning är att på årsbasis skulle kanske ca 90% av värmen som Baetter köper tillbaka (orange stapel) kunna komma från Baetter (blå och grön) och ca 10% utgöra värme från fjärrvärmepannan.

Tillgängligheten (eller kapacitetsfaktorn) för hela systemet blir dock låg, mindre än 50% eftersom behovet av fjärrvärme är låg under en stor del av året.

Värmedriven elproduktion är en relevant alternativ avsättning för restvärmen. Elverkningsgraden kan förväntas bli 5-10% av tillförd värme. Resten av värmen kyls bort på elverkets kalla sida (i dess kylare) i fallet Baetter via sjövattnenkylsystemet. Ett elverk under utveckling håller på att valideras hos Baetter med start våren 2023 och pågår fortfarande då denna rapport färdigställs. I bilaga 3 finns en kort introduktion till värmedrivna elverk.

4 Värmeåtervinning från gods hos Baettr

Nedan presenteras själva fallstudien kring värmeåtervinning ur gods, nu när de allmänna förutsättningarna för värdeskapande värmeåtervinning undersökts enligt ovan. Föregående kapitel kan i korthet sammanfattas som att:

- 1) Det är främst intressant att återvinna värme som 100°C värmevatten till fjärrvärmeändamål, möjligen även till elproduktion som även den behöver värme på närmare 100°C.
- 2) Det kan även vara intressant att återvinna värme direkt till luft (komfortvärme), men främst när det är riktigt kallt ute och värmesystemet på Baettr har svårt att orka med (främst januari och februari).

4.1 Värmeåtervinning ur smälta i fylld form

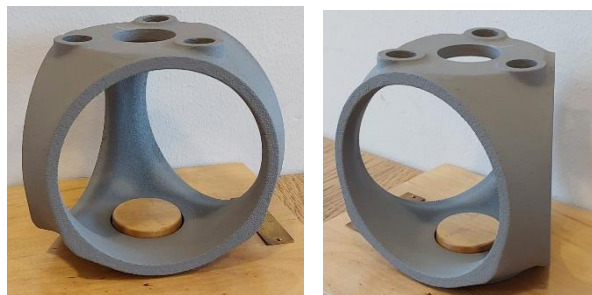
Återvinning av värme direkt i formen efter avgjutningen skulle ha flera fördelar, bl.a. att korta tid till urslag och att värmen omhändertas vid hög temperatur innan den späds ut och orsakar bekymmer på fler håll, i form av het sand, het form och het lokal.

Idag kan t.ex. kyljärn sättas in i formen som hjälper till att leda ut värmen i framförallt sanden, men även till omgivning. Järn har högre värmeledningsförmåga än sand. Istället för kyljärn skulle rör eller kanaler kunna ge en reglerbar kylning som återvinner värme vid hög temperatur. Nedan presenteras några alternativ, inget anses dock vara realiserbart i praktiken på Baettr.

4.1.1 Luftkylning

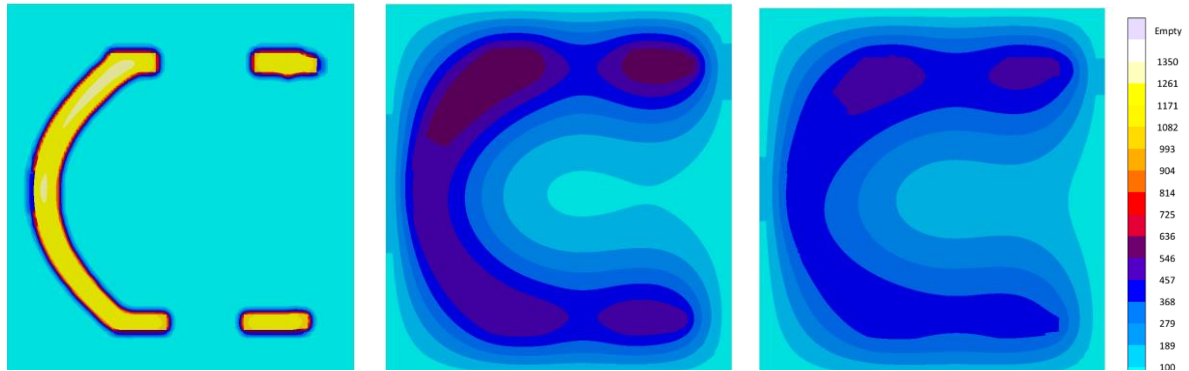
Inledningsvis gjordes simulering där mycket stora luftgenomblåsta rör genomkorsade form och gods (vindkraftnav) genom hålen i navet för de tre rotorbladen. Detta gav bra effekt, indikativt 15-20% kortare avsvälning men inte någon radikal förbättring, samtidigt som de flesta produkter inte har helt ihåliga nav. Sanden isolerar och absorberar för mycket värme. Lösningen bedöms även svår att implementera praktiskt.

Fotot till höger visar en miniatyr av typnavet som simulerats. Simulering gjordes med mjukvaran MAGMA. Figur 8 nedan visar resultatet från referenssimuleringen vid tre olika tidpunkter som temperatur på gods och sand i ett tvärsnitt. Jämför figur 9, högra miniatyren, med tvärsnittet i figur 10 nedan.



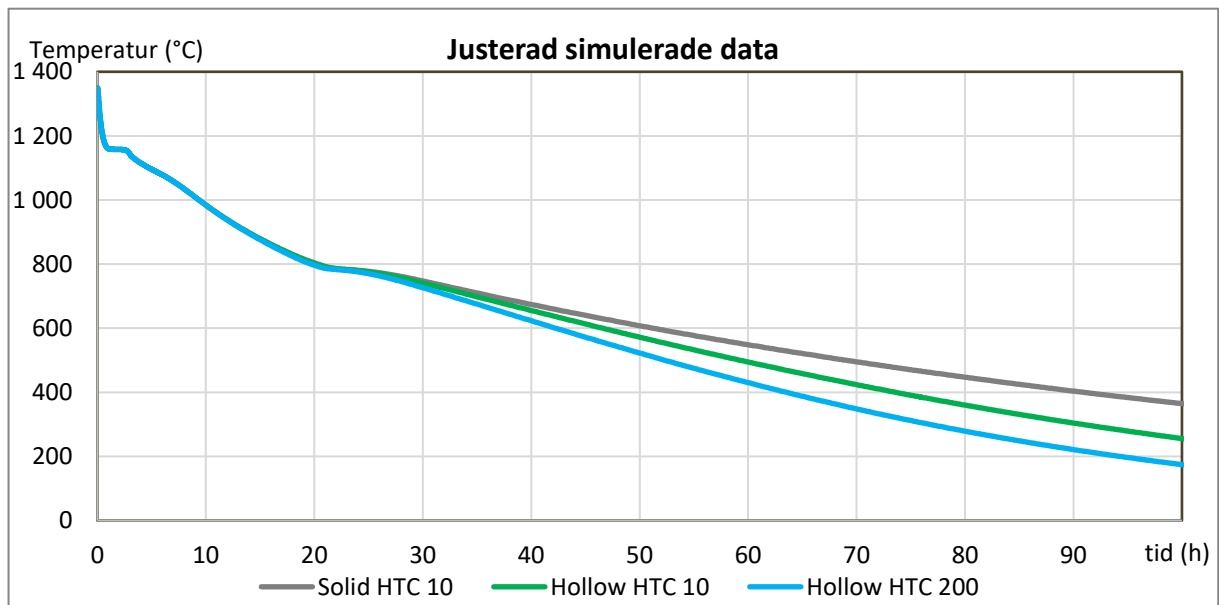
Figur 9: Miniatyr av simulerat typnav.

Simuleringen gjordes med en överslagsmässig noggrannhet och jämfördes med experimentellt framtagna svalningskurvor. Referenssimuleringen gav knappt 10% fel i tid till urslag (ca 450°C), men den hade betydande fel i intervallet 700-800°C, eventuellt på grund av materialval.



Figur 10: Temperatur på sand och gods vid tre tidpunkter: T.v ca 20 minuter efter gjutning. Godset syns tydligt. Mittenbild visar temperatur efter 42 h och t.h. vid urslag efter 60 h. I simuleringen är sanden något varmare än i verkligheten.

Resultat från simuleringarna presenteras i diagrammet nedan. "Solid" avser referenssimulering och "Hollow" med stora genomkorsande kylrör. HTC (Heat Transfer Coefficient) avser värmeledning från form ink. rör till omgivning, uttryckt som $W/m^2, ^\circ C$.



Figur 11 Justerat resultat från simulering

Ur figuren kan utläsas att avsvälningstiden minskar, men inte radikalt. Sanden isolerar och bromsar kylningen, luftkanaler skulle behöva komma närmare in på godset för att få bättre effekt och även behövas utvändigt i skalet. Detta bedöms svårt, i synnerhet med tanke på de mycket stora luftflöden och därmed mycket stora kanaler som skulle behövas. Det blir inte mycket sand kvar mellan kanalerna.

4.1.2 Vätgaskylning

Vätgasen har fördelen att den kan transportera storleksordning åtta gånger så mycket värme som motsvarande luftkylda kanal. Vätgas används bl.a. för att kyla elgeneratorer och är inget nytt i sig. Det är kanalens hållfasthet som begränsar maximal temperatur, vilket ger möjlighet att lägga kanalen ganska nära godset och låta vätgasen följa med upp i temperatur precis som för en luftkyld kanal. Kylningen bedöms dock ändå få en begränsad maximal kylkapacitet. Vätgas är visserligen bättre än luft, men har avsevärt sämre kapacitet än motsvarande vätskekylda rör.

4.1.3 Vattenkylning

Vattenkylda rör är ett teoretiskt relevant alternativ, men dessa måste hållas så pass kalla att vattnet inte börjar koka vilket i praktiken innebär kanske 120-130°C som praktisk maxtemperatur med tanke tryck och rördiameter. På t.ex. pressgjuterier används vatten vid väsentligt högre temperatur, 200-250°C, men det blir väldigt höga tryck vilket antingen kräver rör med små diametrar eller mycket tjockt rörgods. Oavsett blir det ett svårt reglera ned kylhastigheten kring kritiska godstemperaturer (över 700°C) och att garantera en jämn avsvlningshastighet hos hela godset när temperaturen är begränsad.

4.1.4 Oljekylning

Termisk olja, eller hetolja som tål upp mot 300°C används t.ex. på pressgjuterier. Det blir inga höga tryck, men det är fortfarande svårt att reglera kylningen om oljan inte tillåts bli varmare.

4.1.5 Saltkylning

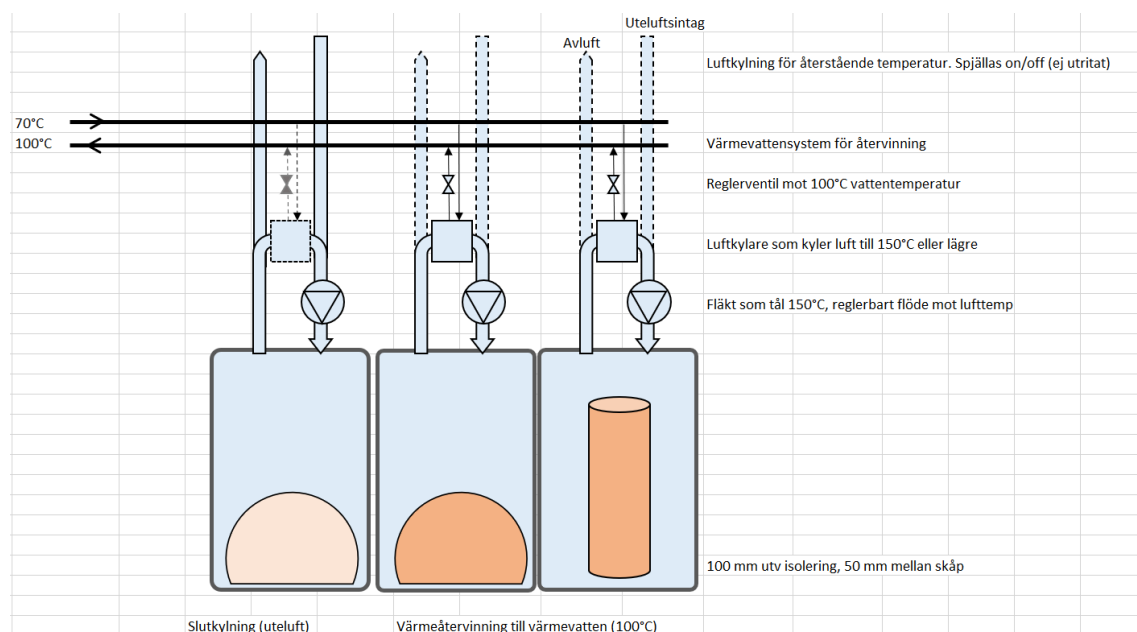
Saltkylda rör med en saltblandning som tål relativt höga temperaturer skulle kunna vara ett fungerande alternativ. Det finns saltblandningar som t.ex. används i solkraftverk. Ett exempel på sådan som tillverkas av Yara som är användbar i intervallet 130-500°C, vilket ger ett ganska bra reglerintervall så att godset får en jämn avsvlning samtidigt som kylrören kan placeras någorlunda nära godset. Det är dock fortfarande fråga om ca 300°C temperaturdifferens mellan saltets praktiska maxtemperatur på kanske 450°C och godsets kritiska temperatur kring 750°C där svalningen bör gå långsamt. En nackdel med saltet är att det stelnar om det inte varmhålls. Yaras salt börjar stelna vid 130°C (som sirap) och är helt fast vid 80°C (som honung). Det finns även salt för 300-600°C men då börjar det istället bli problem åt andra hållet, att 300°C är för varmt för att kyla effektivt när kritiska temperaturer väl passerats och godset någorlunda snabbt ska kylas till minst 450°C men gärna lägre.

Inget alternativ ovan är realistiskt i dagsläget. I stället har återvinning efter urslag studerats.

4.2 Värmeåtervinning ur gods och kokill efter urslag på Baettr

Att aktivt kyla godset efter urslag ger mervärde i form av att godset kyls på en förutsägbar tid för att kunna hanteras i efterbehandlingen (renseriet).

Ett första överslag redovisas i början av rapporten vilket här följes upp med förslag på lösning. En sådan lösning är att lyfta på en isolerad svalhydda som en huv över godset. På så sätt kan godset lyftas till svalningsplatsen med travers. Alternativt att godset sätts in med truck i en svalugn med port. Oavsett lösning så finns en fast utrustning för luftkylning vid varje hydda/ugn, då recirkulerande luft används som media för kylning av godset. Luften kyls in sin tur mot en vattenkrets. Figur 12 nedan visar en principskiss med återvinning till en het värmeåtervinningskrets (70/100°C) av hett gods. I ett andra steg kan godset kylas direkt med uteluft som sedan tillförs gjuterihallen vid kallt väder. Figuren nedan är ett principiellt exempel. Luften kan tillföras via dysor monterade på flexibel korrugerad metallslang så att de blir enkelt riktbara och delvis flyttbara och går att anpassa efter produkt. Dysorna fungerar som cirkulationsfläktar inne i hyddan samtidigt som de tillför kylsluft. På så sätt erhålles hög lufthastighet mot godset på ett flexibelt sätt. Kokiller kan kylas på samma sätt, eller så skippar man hyddan/huven och nyttjar kokillernas skorstensliknande form för att enbart generera hetluft.



Figur 12 Principskiss på system med tre stycken svalhyddor

Ett räkneexempel för att fastställa storleksordningar och rimlighet återfinns i bilaga 4. Exemplet visar att det är rimligt att kyla ett nav på ca 4-5 timmar, från 400°C till 200°C och samtidigt återvinna ca 600 kWh 100°C vattenburen värme (125-150 kW medeleffekt). Det blir fråga om stora luftflöden och därmed stora kanaler. Elkonsumtionen för fläktar kan bli ca 5-10% av producerad värme beroende på hur anläggningen dimensioneras. Detta skulle ge en rörlig restvärmekostnad på 5-10% av elpriset. Bra konstruktion kan sannolikt minska fläktenergin.

Kommentarer till överslagsberäkning och empirisk teori luftkylning av gods

Värmeöverföring mellan gods och luft är mycket svårt att beräkna/simulera. Överslagsmässigt kan en värmeöverföringskoefficient, ofta kallad h eller HTC, användas. Värmeöverföringen blir då

$Q (W) = h \cdot A \cdot (T_{\text{hög}} - T_{\text{låg}})$, där h är värmeöverföringskoefficient ($W/m^2, ^\circ C$), A är godsets omslutningsarea (m^2) och T är temperaturen ($^\circ C$).

Värmeöverföringskoefficienten beror i sin tur bl.a. lufthastigheten och en lång rad andra parametrar. I litteraturen återfinns ofta värden mellan $5-500 W/m^2, ^\circ C$ på påblåsta heta ytor så som svalnande gods.

Generellt måste hastigheten vara så hög att luftflödet blir turbulent för att det ska bli någon värmeöverföring alls, låt oss säga $2-3 m/s$ för att sätta en storleksordning. I verkligheten beror detta på mängder av faktorer. Därefter är värmeöverföringen något generaliserad linjär mot ökad lufthastighet. Dubbla lufthastigheten, dubblad avkylning. I Swerea Swecast rapport 2012-005 "Forcerad kylning av svalnande gjutgods" används $h = 4 + v \cdot 5$ för hastigheter upp till $5 m/s$ och $h = 7,15 \cdot v^{0,78}$ vid högre hastigheter, där v är lufthastighet (m/s) och h är värmeöverföringskoefficient ($W/m^2, ^\circ C$). I detta fall var det tvärströms påblåsning av axlar.

I överslagsberäkningarna har godtyckligt antagits att $h = 50 (W/m^2, ^\circ C)$ mellan luft och gjutgods, vilket sannolikt kräver storleksordning $10-15 m/s$ längs med godsets yta.

För övriga osäkerheter och antaganden i överslagsberäkningen hänvisas till bilaga 4.

Alternativ lösning med tidigt avlyft av form

En alternativ lösning skulle kunna vara att ställa ned svalhyddan över godset i samband med ett tidigarelagt avlyft av formens topp och väggar, så att godset vilar på en sandbädd och formens bottenstycke. I detta fall skulle kärnsanden till stor del bli kvar inne i godset. Hyddan skulle fungera som strålningsköld och säkerställa en kontrollerad jämn svalning till sådan temperatur godset blir tillräckligt formstabil för att kunna lyftas till urslag. Detta skulle generellt öka potentialen att återvinna värme med hög temperatur samtidigt som det har potential att öka produktiviteten och förbättra arbetsmiljö. Det kringgår delar av problematiken att återvinna värme direkt medan godset stelnar i formen, innan värmen spridits ut i sanden, formen och lokalen.

5 Diskussion och slutsatser

I fallstudien på Baettrs gjuteri i Guldsmedshyttan har möjligheten att återvinna värme ur svalnande gods studerats. Rimligaste praktiska lösning är förmodligen att ställa in godset i en kylhydda/svalugn efter urslag. Kylhyddan luftkyler godset under kontrollerade former. Luften kan i sin tur kylas med ett hett kylvatten som i sin tur skulle kylas av mot fjärrvärme. Alternativ kan den varma luften användas direkt för att värma intilliggande lokaler.

Baettr har redan värmeåtervinning från induktionsugnarnas kylvatten och från tryckluftsaggregat till ett fjärrvärmenät. Behovet av ca 70°C värme är redan mättat, medan det finns efterfrågan på ca 100°C värme. Det finns även mycket gott om 100°C värme, både i gods och sand. Väsentligt mer än det lilla fjärrvärmenätets behov. En alternativ avsättning skulle därför kunna vara värmedriven elproduktion. Elverkningsgraden för sådan blir dock låg, kanske 5-10%. Resterande värme behöver kylas bort, t.ex. med sjövattnet.

På Baettr skulle återvinning av värme i godset kunna vara värd storleksordning 750 000 SEK, antaget att värmen är värd 0:50 SEK/kWh och att godset kyles ned till 150°C för att 100°C vatten ska kunna utvinnas. Värmen är dock inte helt enkelt åtkomlig. Det blir fråga om stora luftflöden och därmed stora apparater. Elbehovet för att blåsa kylluft mot godset skulle kunna bli så pass högt som 5-10% av den återvunna värmen, vilket skulle göra ev. elproduktion mer eller mindre till ett nollsummespel. (Det krävs dock väsentlig noggrannare beräkningar för att fastställa verkligt elbehov).

Att använda värmen direkt som varm luft i gjuterihall skulle undvika en hel del apparater och öka kapaciteten, men gör nytta under en kort säsong, främst i december och januari. Kapacitetsfaktorn blir låg.

Den allra elegantaste lösningen vore att kyla godset direkt i formen via kylrör medan temperaturen är hög och värmen är koncentrerad till gods och en mycket begränsad mängd sand. Då skulle avsvälningen kunna styras aktivt, samtidigt som mycket värme återvinns och problem nedströms skulle minska, så som het sand, het form och övertemperatur i gjuthallen. Problemet är främst att det saknas en fluid som tål tillräckligt höga temperaturer för att låta godset svalna långsamt vid kritiska temperaturer (som beror av aktuell legering, men som är över 700°C). Möjligen skulle termiska salter som t.ex. används i CSP-solkraftverk kunna användas.

Bilaga 1: Överslagsberäkning Smålands Stålgjuteri

Syftet vid Smålands stålgjuteri är att värma lokalerna med restvärmen i godset efter värmebehandling, helst via vattenburen värme för att kunna använda värmen i alla lokaler och då ersätta köpt värme (fjärrvärme).

Ugnen rymmer ca 1000 kg gods. Antag att godset värmeåtervinns från 500°C ned till 150°C och legering har en specifik värmekapacitet $c_p=0,46$ kJ/kg,°C.

Mängd värme blir då: $0,46/3600 \times 1000 \times (500-150)= 44,7$ kWh/batch värme.

150°C har valts då värmesystemet (vattenburen värme) på SSG antas hålla ca 75/50°C. Ett första lämpligt antagande kan då vara att luften kyls ned till 100°C att godset är 50°C varmare än luften när det tas ut. Vad som är lämplig temperaturskillnad är en fråga om tid för avsvälning, storlek på värmeväxlare och hur lättkyllt godset är (formfaktor).

- Är 45kWh lite eller mycket för SSG?

SSG använder något avrundat ca 45 kW vid +5°C ute och ca 90 kW vid -10°C ute. Det innebär att värmen från en batch motsvarar 1/2-1 timmes komfortvärmebehov under vinterhalvåret.

Är luftburen värme ett rimligt alternativ till vattenburen värme?
-Ja, med tanke på att en batch inte rymmer så mycket värme. Efterbehandlingen där värmebehandlingsugnen finns använder visserligen bara en bråkdel av hela SSGs komfortvärmebehov, så värmen räcker i flera timmar i den lokalen. Därför är snabbare avkylning än ett par timmar inte heller nödvändig. Lösning på SSG kan därmed vara enkel och rudimentär.

Är kravet ca 40°C luft ut, istället för att luften ska vara het nog att värma vatten till 70-80°C så kan godset kylas till lägre temperatur, säg 75°C gods ut. Det blir då $0,46/3600 \times 1000 \times (500-75)= 54,4$ kWh/batch värme

Räknat på årsbasis:

SSG behöver värmen ca 8 månader per år. Antag 5 batcher per vecka (exklusive släckglödning då godset kyls i vattenbad) så blir det 40 veckor x 5 batcher x 50 kWh/batch = 10 000 kWh/år värme. Kostar värmen 50 öre/kWh blir det 10 000 kWh/år x 50 öre/kWh = 5 000 kr/år. En svalhydda eller annan lösning får då kosta ca 15 000 kr antaget en pay-back på 3 år (5000 kr/år x 3 = 15 000).

Det blir med andra ord olönsamt om inte lösningen är mycket rudimentär, kanske en nätbur runt godset som minskar den direkt (otrevliga) värmestrålningen och en enkel termostatstyrd fläkt som varvar upp i takt med att godset svalnar.

Bilaga 2 Kort om fjärrvärme

Nedanstående kortfattade text syftar till att ge viss förståelse för värmeåtervinning till fjärrvärme.

Restvärmens värde i fjärrvärmenätet

Värdet på restvärmerna beror dels på vilken produktion värmen ersätter, dels på kvalitetsparametrar, så som temperatur.

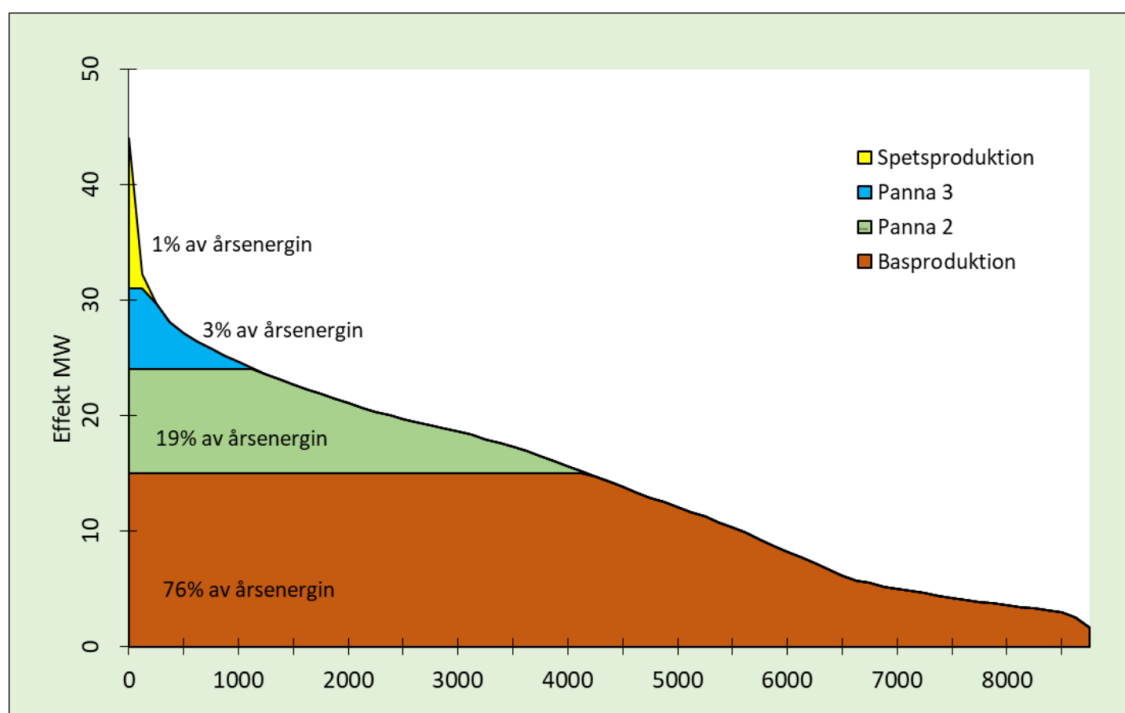
Värme med låg temperatur kan liksom batchvisa leveranser ge upphov till merkostnader eller att all restvärme inte kan tillvaratas för fjärrvärmeändamål.

På kundsidan är fjärrvärmen konkurrensutsatt och tävlar mot bl.a. värmepumpar. Fjärrvärme är därför helt och hållet beroende av prisvärda värmekällor/-bränslen, så som restvärme från gjuterier. Det räcker alltså generellt sett inte att restvärmerna blir lika dyr som den produktion som den ersätter, utan den behöver många gånger bli billigare.

Alternativkostnad (bränslepris) kan dock vara en lämplig utgångspunkt för att bedöma storleksordningen på det värde som skall fördelas mellan gjuteri och fjärrvärmebolag vid en restvärmeleverans. För att bedöma om det alls kan gå att genomföra.

Fjärrvärmens värmeproduktion

Större nät har ofta baslast-, mellanlast- och topplastpannor, där prisvärd baslastvärme är det som gör fjärrvärmen konkurrenskraftigt mot t.ex. värmepumpar. I figur X visas ett förenklat varaktighetsdiagram som åskådliggör hur olika pannor nyttjas under ett år, där värmebehovet är rangordnat från timme med störst behov till timme med lägst behov. (I princip från årets kallaste till varmaste dag).



Figur 1: Förenklat varaktighetsdiagram, Källa: Energiforsk rapport 2019:591 Jämförelse av effektreduceringsåtgärder i fjärrvärmenät.

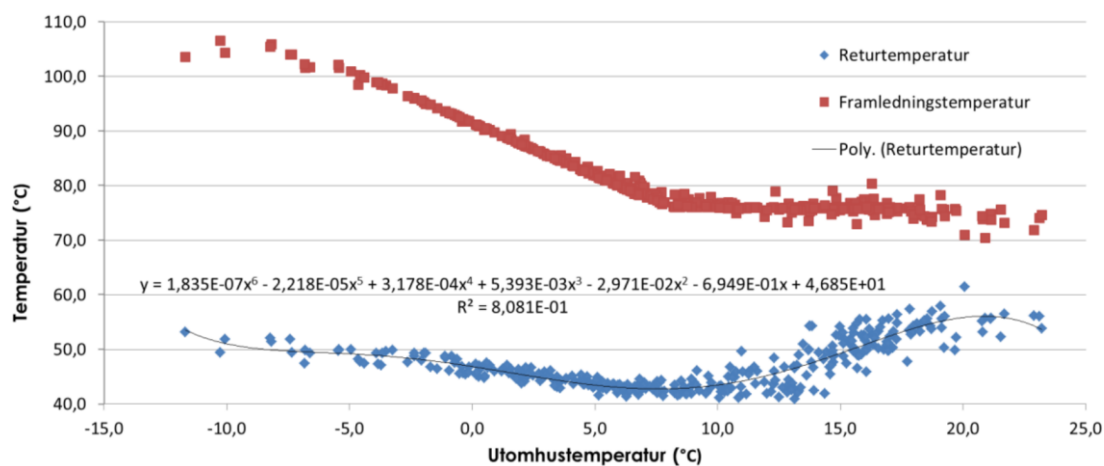
Baslast kan bestå av fastbränslepannor avsedda för att elda billiga våta bränslen eller avfall, alternativt utgöras av industriell restvärme. Det är vanligt att detta återspeglas mot kund i tariffstrukturen, med riktigt billig fjärrvärme på sommaren.

Mindre fjärrvärmenät har färre pannor. Ofta eldas dessa med något lokalt mellandyrt restbränsle så som skogsflis. För riktigt små nät vill man dessutom undvika bemanning av pannorna, vilket innebär att träpellets eller något annat torrt briketterat fastbränsle är vanligt.

Fjärrvärmedistribution

Fjärrvärmedistribution består av två rör i marken med ett cirkulerande vattenflöde. Det är vattenflödet och vattentemperaturen i som avgör om och hur ett gjuteri kan leverera restvärme.

Vattenflödet i nätet styrs av kundernas värmebehov (ventil öppnar hos kund). Sommartid är ca 75° en vanlig framledningstemperatur i de flesta nät. När behovet ökar till följd av kallare väderlek och ökat behov av komfortvärme hos kund, ökar flödet i nätet (ventil öppnar). När flödet närmar sig maximal kapacitet i rörledningarna ställs framledningstemperaturen upp av fjärrvärmebolaget. De flesta svenska nät är dimensionerade för en maximal temperatur mellan 90-110°C. Returtemperaturen i nätet blir vad den blir, beroende på hur väl kundernas anläggning fungerar, kortslutningar i nätet, med mera. 40-45°C brukar vara dimensionerande temperatur, verklig temperatur mellan 45-55°C. Högre vid kallt väder och vid låglast. Nedanstående figur ger exempel på hur det kan se ut i ett svenskt fjärrvärmenät. Notera att det är väldigt få dagar som är riktigt kalla respektive varma och att många av punkterna är överlappande.



Figur 2: Dagnsmedeltemperatur för fram- och returledning vid Gunneboverket i Lund vid olika utomhustemperaturer, som dagnsmedelvärden. Källa: Optimerad framledningstemperatur i Lunds fjärrvärmenät, Falkvall & Nilsson (2013)

Om gjuteriet finns långt ut i fjärrvärmenätet, kan det verkliga temperaturkravet på framledningen vintertid i den lokala grenen av fjärrvärmenätet vara lägre än i den centrala fjärrvärmestammen, beroende på var i nätet flödes-flaskhalsarna finns. Det kan alltså räcka med 75-80°C även en kall vinterdag. Det finns tekniska lösningar för att "shunta ned" en hel fjärrvärme-gren. Därefter går det att förse denna del av nätet med svalare värme. Det går då även att blanda ett "övertempererat" vatten från centrala

fjärrvärmenätet (t.ex. 100°C) med ett "undertempererat" vatten från gjuteriet (t.ex. 70°C). Restvärmeleveransen begränsas i dessa fall till vattenflödet i den del av nätet där gjuteriet finns, till det tillgängliga delflödet och till den delmängd av flödet som kommer från gjuteriet.

Andra möjligheter om gjuteriet inte kan leverera färdig värme med tillräckligt hög temperatur, är antingen merinvesteringar så som en panna eller eldriven värmepump i direkt anslutning till gjuteriet eller att gjuteriet ligger nära en central stam i nätet, så att gjuteriet kan värma på vattnet i returledningen till fjärrvärmepannan. Sådana lösningar finns bl.a. i Charlottenberg och Guldsmedshyttan (i denna fallstudie) där gjuteri och fjärrvärmens panncentral ligger tillräckligt nära varandra.

Om gjuteriets restvärme kommer batchvis kan det finnas behov av en ackumulatortank om nätets kapacitet är begränsad. En ackumulatortank rymmer en volym vatten, inte en volym energi. Stor temperaturskillnad mellan varm och kall sida ger en mindre tank och vice versa. Stor temperaturskillnad underlättar dessutom temperatursiktning i tanken, så att inte varmt och kallt vatten blandas, vilket skulle ge en stor temperaturförlust och därmed påverka lagringsförmåga negativt.

Bilaga 3 Kort om värmedrivna elverk

Nedanstående text är en översiktlig introduktion till småskalig värmedriven kraftproduktion, det vill säga att göra el av restvärmen.

Restvärmens värde för gjuteriet

För gjuterier är värdet av elproduktion främst att ställa mot alternativkostnaden att köpa elenergi (SEK/kWh). Utöver energikostnad har nätet även en effektkostnad (kr/kW för högsta uttag) vilken kan minskas med den egna produktionen.

Småskaliga värmedrivna elverk

Elverkningsgraden för en liten värmekraftanläggning som drivs med lågtempererad värme (70-100°C) kan antas till storleksordning 5-10%, men beror bl.a. på temperaturskillnad mellan varm restvärme och kallt kylvatten. (Mer i detalj om detta nedan). 10% elverkningsgrad innebär att 9 delar av 10 av restvärmen hamnar i kylvattnet och endast en (1) del blir till elektricitet.

Har man restvärme med högre temperatur är det möjligt att använda fjärrvärmen som kylvatten, resulterande i 1 del el och resten (9 delar av 10) som fjärrvärme. Tyvärr är det inte praktiskt möjligt att få ut dessa temperaturer från gjuterier generellt sett med dagens teknik.

Leverantörer

Det finns ett stort utbud av tillverkare som använder Organic Rankine Cycle, ORC, för "småskalig" elproduktion. Ofta är det fråga om ca 10 MW drivvärme, men det finns mindre apparater, ned till någon megawatt värme. ORC-system finns t.ex. framtagna för hetvattenpannor som konverterats till termisk olja, s k hetolja (kiselolja). Drivvärmets i hetoljan är då ofta drygt 200°C, men ORC-tekniken återfinns för många temperaturer, med olika arbetsmedia. Turboden och Againty är exempel på tillverkare respektive leverantör av sådana lösningar.

Climeon har en ORC liknande teknik som är optimerad för 90°C, men klarar tillloppstemperatur på drivvärmets mellan 80-120°C. Climeon finns installerad ombord på framförallt kryssningsfartyg, men finns t.ex. även på stålverk. Maskinen ger 150 kW el, vilket innebär att maskinen borde behöva storleksordning 1 MW restvärme eller mer.

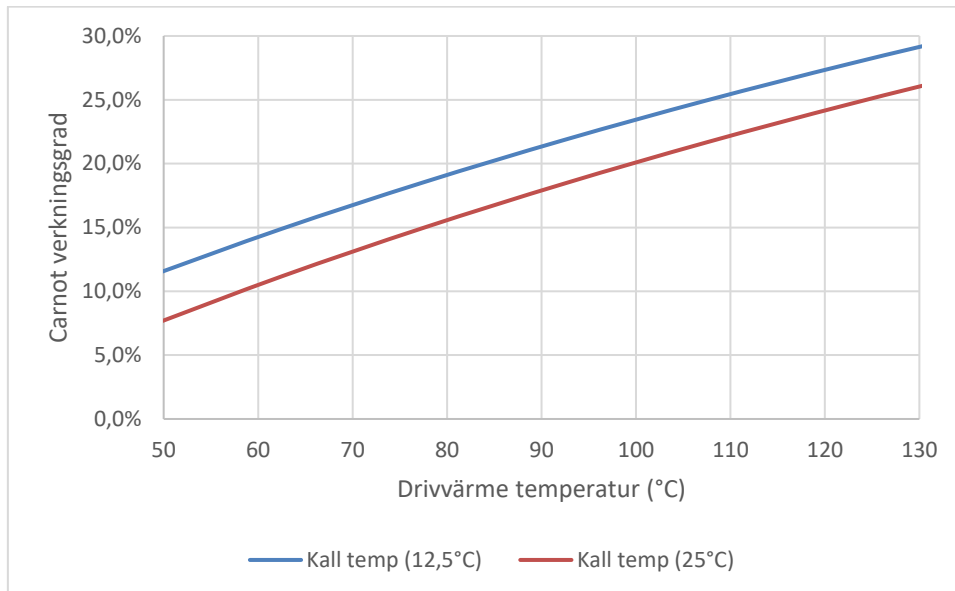
Zigrid har en teknik som är under validering lämplig för 50-70°C drivvärme, men fungerar enligt uppgift ända ned till ca 35°C. Deras maskin är i sammanhanget liten och deras tanke är att den ska installeras i rack från tre till tiotals maskiner. Förutsättningar för denna teknik har undersökts på Baettr. Tekniken är som skrivet ännu under validering.

Utvikning om elverkningsgrad och temperaturberoende

Värmedriven el-produktion får högre maximal teoretisk elverkningsgrad med ökad temperaturskillnad mellan varm drivvärme och kall kylning. I stora värmekraftverk används hetånga (400-600°C) och dessa når ca 75% av maximal teoretisk

elverkningsgrad, s k Carnotverkningsgrad. För mindre anläggningar som drivs med restvärme är förmodligen verkningsgraden (inkl. parasiteffekter från kraftelektronik, pumpar, etc) i härad 50% av teoretisk maximal verkningsgrad.

Figuren nedan visar maximal teoretisk verkningsgrad (Carnotverkningsgrad), ekvationen återfinns nedan. I figuren nedan används drivvärmets, respektive kylvattnets medeltemperatur (in/ut).



Figur 1: Teoretisk Carnotverkningsgrad för elproduktion med restvärme. I figuren används medeltemperatur för respektive drivvärme och kylvatten. Varmt kylvatten (40/70°C) har medeltemperaturen 55°C och hett kylvatten (70/100°C) har medeltemperaturen 85°C. Två olika kylvattentemperaturer finns inlagda, 12,5°C respektive 25°C medeltemperatur.

Verklig elektrisk verkningsgrad för hela systemet kan antas till storleksordning halva Carnotverkningsgraden.

Ur figuren framgår att högre restvärmemetemperatur ger ett betydligt högre värdeskapande. Att höja drivvärmets temperatur med 15°C från 70/55°C till 85/70°C (med 10/15°C kylvatten) ger 36%(!) högre elproduktion, allt annat lika.

Att kunna använda en existerande tillgång till kallt kylvatten (sjövattnet) underlättar att få ekonomi i investeringen, gentemot om ett nytt kylvattensystem behöver byggas. Givetvis kan även luft användas för kylning av kylvattnet.

5.1.1 Kort om värmelära och termodynamik

Carnots sats är en princip som bestämmer gränserna för den maximala verkningsgrad (Carnotverkningsgrad) som en värmemaskin kan uppnå⁸, t.ex. för en värmepump eller för ett värmedrivet elverk

Carnotverkningsgraden kan liknas vid fallhöjden för ett vattenkraftverk, ju högre fallhöjd, desto mer el går teoretiskt att utvinna från samma mängd vatten. Ju högre temperaturskillnad mellan varm och kall sida, desto mer el går teoretiskt att utvinna från samma mängd värme. För värmepumpar blir motsvarande liknelse att ju högre temperaturen skall lyftas, desto mer elektricitet åtgår, precis som för en vattenpump som uppfodrar vatten till en högre höjd.

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_C}{T_H},$$

Temperaturen T anges i Kelvin för het respektive kall sida.

En alternativ formel för värmedrivna elverk är att använda en empirisk formel för endo-reversibla värmemaskiner, vilken ger en bättre approximation av verklig verkningsgrad. Denna är även känd som Chambadal-Novikov-verkningsgrad, och där T_c respektive T_h anges i Kelvin.

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_c}{T_h}}$$

⁸ Wikipedia.se, [https://sv.wikipedia.org/wiki/Carnots_sats_\(termodynamik\)](https://sv.wikipedia.org/wiki/Carnots_sats_(termodynamik)), 2022-04-13

Bilaga 4: Överslagsberäkningar rimlighet luftkyla ett nav på Baettr

Bakgrund: Ett nav av segjärn med massan 18 ton och total omslutningsarea 27 m² skall kylas från 400°C till 200°C med luft. Luften recirkulerar och kyls med ett 70/100°C kylvatten. Kylhyddan i vilket navet inryms kan antas vara ett rätblock med 4 meter i sida och 6 meter högt.

Frågeställning: Vad blir storleksordning och proportioner för luftflöden och apparater, samt avsvälningstiden?

Notera att nedanstående överslagsberäkningar inte utgör en komplett termodynamisk beräkning och är förenklade.

Energi som skall kylas bort: Gjutjärnet antas ha C_p 574 J/kg,°C, och kyls från 400°C till 200°C.

$$(1) Q = m \cdot c_p \cdot (T_a - T_b)$$

$$\text{Resultat: } 18000 \cdot 574 \cdot (400 - 200) \approx 2\,066 \text{ MJ} \approx 620 \text{ kWh}$$

Svar: Drygt 620 kWh ska kylas bort

Värmeöverföring luft/gods: Det svåraste att anta (gissa) är hur effektiv kontakten mellan godsets yta och kylande luft blir i verkligheten. Här antas detta till $h = 50 \text{ W/m}^2, \text{°C}$. Verkligt värde beror av många parametrar, bl.a. lufthastighet längs godsets yta. Det kan vara svårt att i praktiken erhålla en hög lufthastighet längs hela navets in- och utvändiga yta. $50 \text{ W/m}^2, \text{°C}$ är lågt antaget, då risk att anta fel är stor och vi vill inte överskatta kylhastighet.

Vi antar vidare att luften i kylhyddan är 100°C kallare än godstemperaturen

$$(2) P = h \cdot A \cdot (T_a - T_b)$$

$$\text{Resultat: } 50 \cdot 27 \cdot (100) = 135\,000 \text{ J/s} = 135 \text{ kW}$$

Preliminärt svar kyltid: Preliminär kyltiden blir 4 h och 15 minuter
Ekv (1) / (2) = $Q/P = 2066 \text{ MJ} / 135 \text{ kW} = 15307 \text{ s} = 4 \text{ h } 15 \text{ min}$

Detta känns som en rimlig tid att kyla ned godset på.

Vad som inte inkluderats ovan är bl.a.:

- Temperaturfördelning inom godset
- Värmeförlust och läckage genom hyddans väggar,
- strålningsvärmerna från godset.

Är dessa faktorer relevanta att ta med i denna tidiga och osäkra överslagsberäkning, eller är de för små?

Strålningsvärmen värmer hyddans innerväggar till dess värmebalans uppstår, d.v.s. när kylluftens förmåga att kyla hyddans väggar och tak är i balans med strålningsvärmets. Vi bortser från golvet i kylhyddan i dessa beräkningar. Återigen är det svårt att anta (gissa) värmeöverföring mellan kylluft och ytor. Antar $h = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, mellan luft och hyddans innerväggar, då vi primärt inte blåser luft mot hyddans väggar utan mot godset.

Strålningsvärmets för en perfekt svartkropp kan beräknas med Stefan Boltsmans lag enligt

(3) $P = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_0^4)$, där $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ och T är temperaturen i Kelvin och A är ytvärdets utåt strålade area.

Antar att godset har 20 m^2 utåt strålade yta mot väggar och tak.

Balans uppstår när ekv (2) = (3), med insatta antagna värden:

$$20 \cdot 116 \cdot (T_{hydda} - 100) = \sigma \cdot 20 \cdot (T_{Gods}^4 - T_{hydda}^4)$$

För gods med yt-temperatur på 400°C blir strålning och värmeöverföring 78 kW och hyddans väggtemperatur 335°C , medan ett gods som är 200°C ger ca 30 kW .

78 kW respektive 30 kW är inte försumbart i relation till 135 kW mellan gods/luft. Observera att luften antagits vara 100°C kallare än navet i enlighet med initial beräkning av kylhastighet.

Svar inklusive strålningsvärme: Inledande kyleffekt vid 400°C gods blir 213 kW för att avta till 166 kW . Strålningsvärmets är inte linjärt, men överslagsmässigt antas att effekten avtar linjärt och att medel effekten därmed blir 190 kW . Detta ger en svalningstid på ca 3 timmar.

Värmeläckage: Värmeläckage genom golv, väggar och tak, antaget att isoleringen motsvarar 100 mm mineralull (U-värde $0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$) och att luftläckaget är obefintligt. Area hyddans klimatskal: 128 m^2 .

Insidans ytor antas till medeltemperatur av ovan strålningsbalanser vilket i sak inte är helt korrekt, men gott nog: $274,5 \text{°C}$. Omgivning (gjuterihallen) antas till 20°C .

Svar värmeläckage: Temperaturförlust blir 13 kW , vilket ska ställas i relation till ovan beräknade återvunnen värmeeffekt på 166 kW resp 213 kW . Värmeförlust mindre än 10% , men värmeförlust i luftkanaler till och från luftkylaren med mera tillkommer.
Resultat: Värmeläckaget minskar återvunnen värme med ca 10% .

Värmeöverföring luft/värmevatten: En kvarstående fråga är luftkylarens kapacitet. Luften kan inte kylas till lägre temperatur än kylvattnets. En mycket djup luftkylare med många rader skulle kunna kyla luften ut ur kylaren till ca 75°C om inkommande vatten är ca 70°C . Ett rimligare (ekonomiskt) antagande är att kylaren t.ex. ger 120°C kyld luft ut om luften från hyddan in i kylaren är 160°C . Då blir den inte så djup, får lägre pris och blir enklare att rengöra. Detta innebär samtidigt att ovanstående kylhastigheter bara gäller ned till 260°C godstemperatur och att det därefter går långsammare därför att godsets temperatur närmar sig kylluftens.

Att kyla ned till 260°C tar ca 2 h 15 min med en medeleffekt på 187 kW . Medeleffekten har beräknats på samma sätt som ovan.

Därefter kan antas att kylningen avtar enligt Newtons kylningslag. Att kyla hela vägen ned till 200°C tar ytterligare 2 h, om strålningen bortses från (vilket förenklar kalkylen). Vi landar då på 4 timmar och 15 minuter, med ovan antagna begräsningar i värmeväxling från luft till värmevatten som begränsar kylluftens temperatur, vilket var den initiala överslagsberäkningen i början på detta exempel.

Det är med andra ord skillnad mellan att kyla utan att ta tillvara på användbar värme och att kyla för att ta tillvara på användbar värme.

Luftmängd och kylbatteri:

För att luften skall överföra 213 kW värme genom att kylas från 300°C till 260°C krävs ca 5,1 kg/s luft. Tyvärr har 300°C nästan halva densiteten mot 20°C luft. Volymflöde ut från kylaren blir 7,8 m³/s vid 260°C. Kylarens frontarea beror av maximal lufthastighet. Om vi antar 3 m/s, blir frontarean ca 2,6 m², vilket motsvarar en 130 cm bred säng (130x200 cm), vilket i sin tur kräver en lika bred luftkanal före och efter batteriet.

Överslagsberäkning av fläktel:

Antag 8 m³/s luft, ett tryckfall på 400 Pa i batteriet, att det krävs ett filter (100 Pa), kanalförlust med krökar (200 Pa) och att tilluftsdysorna som ska säkerställa att luften inne i hyddan cirkulerar drivs med 500 Pa tryckfall, så kommer fläkt-el, vars fläkthjul har 75% effektivitet, elmotor på 95% och frekvensomriktare på 95% att bli:

$$8 \cdot (400+100+200+500) / (75\% \cdot 95\% \cdot 95\%) = 14 \text{ kW}$$

Resultat: 14 kW fläktel, vilket motsvarar ca 10% av återvunnen värmeeffekt, vilket i sin tur ger en rörlig restvärmekostnad på 10% av elpriset.

Kommentar 1: Tryckfallen som antagits ovan kan säkert gå att halvera eller mer med ”rätt” konstruktion, mycket beror på utrymme för luftkylare (frontarea) och hur ”hårt” dysorna behöver blåsa på godset för att det ska svalna med antagen hastighet. En halvering till 7 kW är inte alls otänkbart om projektören får detta som krav.

Kommentar 2: Notera att om denna värme ska användas till elproduktion med 10% elverkningsgrad, så kommer all el från elverket att gå åt till att driva fläkten om denna använder 14 kW och det blir ett nollsummespel.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Industriell omställning
RISE Rapport 2023:96
ISBN: 978-91-89821-74-3