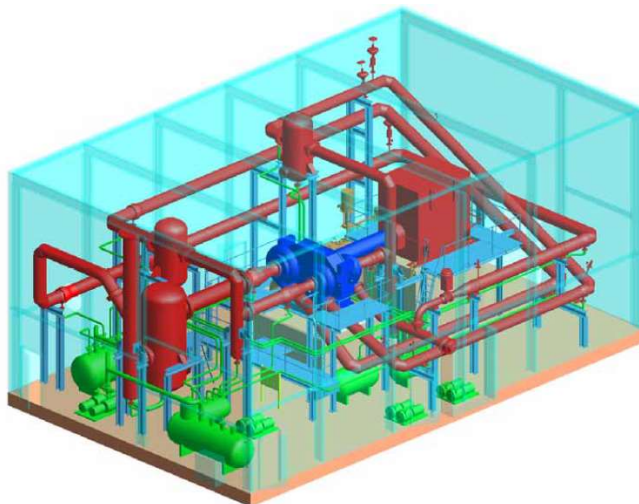


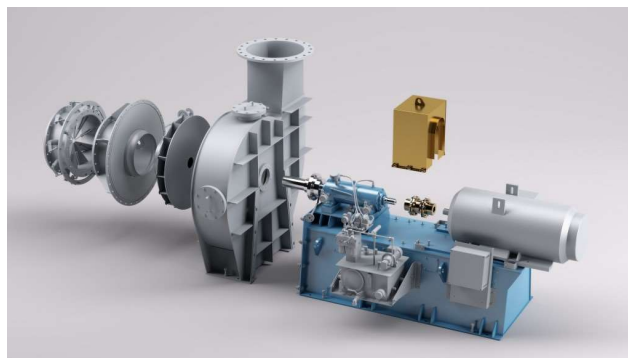
"PowerUp" EUDP

J.nr. 64018-0556

Delrapport: Elektrificering af Nykøbing Sukkerfabrik



Eksempel på multi-trins vanddamp kompressor med integralgear fra MAN Energy Solutions AG



Eksempel på enkelt-trins højtryksblæser til damp fra Piller Blowers & Compressors GmbH

Date: 2020-06-30
Project No.: 2019_1001 Power-Up
Project Manager:

Weel & Sandvig
ENERGI OG PROCESINNOVATION

Diplomvej bygning 377
2800 Kgs. Lyngby

Phone.: +45 2671 0046
email: mwh@weel-sandvig.dk
web: www.weel-sandvig.dk

*g:\shared drives\ws-projects\2019_1001 power-up\virksomheder partnere\nordic sugar nyk\rapporter\ws powerup ns
nykøbing rapport rev1.docx*

1	SAMMENFATNING	1
1.1	TEKNOLOGI	1
1.2	ØKONOMI FOR FIRE SCENARIER	2
1.3	KONKLUSION.....	2
2	INTRODUKTION OG FORMÅL MED PROJEKTET.....	2
3	PROCESBEHOV OG NUVÆRENDE FORSYNING.....	3
3.1	TILSLUTNING TIL ELNET.....	4
4	METODE	4
5	ANTAGELSER OG PROCESS-SPECIFIKATIONER.....	5
5.1	VARMETRANSMISSIONSKOEFFICIENTER I INDDAMPER	6
6	PROCES PARAMETER	7
6.1	EL-DREVET TURBOKOMPRESSORER TIL DAMPKOMPRESSION	7
6.2	INDDAMPERANLÆG.....	8
6.3	SUKKERKOGNING (KRYSTALLISERING).....	9
6.4	TØRRING AF ROEPULP (UDFØRES KUN DELVIST PÅ NYKØBING)	11
7	VAMEPUMPEINTEGRATION I SUKKERPROCESSEN.....	12
8	OPSTART AF ANLÆG MED VARMEPUMPE	13
8.1	OPSTART FRA "KOLDT" INDDAMPERANLÆG.	13
8.2	OPSTART ELLER GENSTART AF VARMT PROCESANLÆG	14
9	OPERABILITET.....	15
9.1.1	Tørring af roepulp i overhedet damp (damptørrer).....	17
9.1.2	Sukkerkrystallisation.....	17
10	SIKKERHEDSSYSTEMER	18
10.1	RISIKOFAKTORER.....	18
11	ØKONOMI	20
11.1	FØLSOMHEDSANALYSE.....	21
11.2	SAMFUNDSØKONOMISK OMKOSTNING TIL CO2 REDUKTION	22
11.2.1	Indpasning i det danske energisystem	23
12	APPENDIX	24
12.1	ENERGIBALANCER	24
12.1.1	Dampkompressor over inddamperen	24
12.1.2	Dampkompressor på sukkerkogerne	25
12.1.3	Ref. inddamper balance	26
12.1.4	Scenarie 2: Dampkompression fra trin 6 til trin 1	26
12.1.5	Scenarie 3: "Fuld varmepumpning" som scenarie 1 men med øget saftforvarmning	27
12.1.6	Scenarie 1: Varmepumpe som tager damp fra trin 6 og rekomprimerer til brug i sukkerkogere.....	27
12.1.7	Heat balance evaporator by Nordic Sugar	28
12.2	ENERGIBALANCE OG PINCH-ANALYSE.	29
12.2.1	Pinch-analyse	29
12.3	DRIFTSDATA	32
12.3.1	Sukkerhus	32
12.4	MULIG PLACERING AF KOMPRESSORSTATIONER	34
12.5	TURBOKOMPRESSORER PÅ SUKKERFABRIKKER.....	37

1 Sammenfatning

I dette studie er forskellige muligheder for anvendelse af varmepumpning på Nykøbing Sukkerfabrik gennemgået. Undersøgelsen dokumenterer at Nykøbing Sukkerfabrik med fordel kan omlægge fra fossil energi til varmepumpning for langt størstedelen af fabrikkens energiforbrug. Der er således påvist at 80% af det nuværende brændselbehov til dampproduktion kan erstattes med eldrevne varmepumper integreret i produktionen. Det svarer til en årlig CO₂ reduktion på 52.000 ton/år.

Med de nuværende priser på elektricitet, olie og CO₂ ser det ud til at det er en god forretning for sukkerfabrikkerne at indfase varmepumpning i processen og med udsigt til højere CO₂-afgifter vil varmepumpeløsningen blive endnu mere gunstig.

En markant udbygning med varmepumpning på Nykøbing Sukkerfabrik understøtter den bredt funderede politiske klimaplan om reduktion af de samlede CO₂ udledninger på 70% i 2030 og ønske om elektrificering af industrien.

Der er i beregning af anlægs- og driftsøkonomi ikke taget hensyn til eventuelt fremtidige politiske tiltag, men det vil ikke være usandsynligt at et projekt af denne natur vil kunne opnå betydelig støtte fra de nye puljer oprettet af myndighederne.

Der er gjort store anstrengelser for at få forudsætninger korrekt med i evalueringerne gennem hyppig kontakt med Nykøbing Sukkerfabrik og beregningerne anses for retvisende. Ikke desto mindre er der behov for mere detaljerede analyser for at sikre at alle detaljer bliver belyst inden en endelig beslutning om eventuel omlægning af fabrikkens energisystem tages. Heriblandt bør der laves analyser af drift under forstyrrelser, op- og nedlukning samt risikoanalyser og konsekvensanalyser ved hel eller delvis havari af udstyr.

Endelig skal det bemærkes at studiets konklusion bygger på et indledende studie. Et mere dybtgående detailstudie vil kunne afdække kapitalomkostninger m.m. mere præcist. Derudover findes der ikke sukkerfabrikker i verden med så omfattende varmepumpning, som undersøgt i dette projekt. Erfaringerne er derfor begrænset, hvilket indebærer en større risiko for at der kan ske designfejl og en forringelse af normal driftspunkt og operabilitet. Dermed kan driftsøkonomien blive ringere end anført i rapporten.

1.1 Teknologi

De foreslåede varmepumper på Nykøbing Sukkerfabrik er baseret på centrifugalkompressortechnologi til vanddampkompression. Teknologien er moden og har tidligere – om end i mindre omfang - været anvendt som et supplement på sukkerfabrikker og andre processer. I denne undersøgelse er der i et scenarium tale om fuld varmepumpning, hvilket vil sige at inddamper og sukkerkogning hver især kører som "stand alone" enheder med hver sin dampkompressor. Dette er ikke gjort andre steder endnu og vil derfor være epokegørende. Der findes dog inden for andre industrier store inddampere som alene drives

ved dampkompression og det vurderes ikke at være forbundet med speciel stor risiko. For at dække ca. 80 % af fabrikkens forsyning skal der installeres varmepumper med en eleffekt på 7,3 MW til inddamperen og 6,5 MW til kogerne.

1.2 Økonomi for fire scenarier

Der indgår fire scenarier med forskellige varmepumpeløsninger. For alle scenarier er der en meget god virksomhedsmæssig forrentning idet den simple tilbagebetalingstid ligger mellem 3 og 5 år. For den fulde varmepumpeløsning, som er mest attraktiv, er der en kapitalforrentning på 20 – 30 % på en investering i størrelsesorden 110 mio. kr.

Som nævnt tidligere skal det understreges at der er tale om en indledende undersøgelse. En mere detaljeret undersøgelse kan resultere i en hvis ændring i økonomien og specielt eventuelle problemer med indkøring kan forlænge tilbagebetalingstiden. Tabellen nedenfor viser beregnede nøgletal og økonomi for de fire undersøgte scenarier:

1.3 Konklusion

Undersøgelsen på Nykøbing Sukkerfabrik viser at man kan reducere CO₂ emissionen med 52.000 ton/år (ca. 80 % reduktion) ved etablering af fuld varmepumpning på fabrikken. De gennemførte analyser viser en samlet investering til varmepumper og de nødvendige procesomlægninger på i størrelsesorden 110 mio. Kr. Dette giver en tilbagebetalingstid på mellem 3 – 5 år. Tilskudsmulighederne til installation af varmepumper må anses for at kunne være gunstige set i lyset af de politiske tiltag omkring elektrificering af industrien med en foreløbig pulje på 900 mio. Kr. Implementering af fuld varmepumpning på Nykøbing Sukkerfabrik vil være et fyrtårnsprojekt, som viser vejen for et fremtidigt fossiltfrit Danmark.

2 Introduktion og formål med projektet

Nærværende undersøgelse og rapport er udarbejdet i EUDP-projektet "PowerUp" med J.nr. 64018-0556 og omhandler som case studium Nykøbing Sukkerfabrik. Kontaktperson hos Nordic Sugar har været J. Jeppesen, Fabrikschef og C. Nygaard, Projektleder.

I projektet indgår yderligere tre virksomheder (Arla Foods, Equinor Refining Denmark samt Akzo-Nobel Salt) som case studier. Case studierne er rapporteret særskilt til de involverede virksomheder. Endvidere findes en samlet rapportering over projektet, hvori bl.a. indgår en beskrivelse af teknologi og producenter af højtemperatur varmepumper.

Projektets formål er at afdække i hvilket omfang en elektrificering af procesindustriens varmebehov effektivt kan ske ved hjælp af mekanisk højtemperatur-varmepumpning og dermed fortrænge anvendelse af fossilt brændsel med henblik på at reducere CO₂ emissionen på en økonomisk forsvarlig måde både i forhold til samfundet og de konkrete virksomheder.

I projektet undersøges hvorledes større (efter danske forhold) procesindustrier kan anvende højtemperatur-varmepumpning med anvendelse af turbo-kompressortechnologien til at reducere eget forbruget af primær energi og deraf afledt CO₂ udledning.

Der er således ikke tale om at opgradere spildvarme ved ret lav temperatur så den kan eksporteres til eksempelvis fjernvarmesektoren (som retteligt bør betragtes som elektrificering af fjernvarmen frem for industrien). Ambitionen bag projektet er mere vidtgående, nemlig at opgradere varme fra interne processer til en så høj temperatur at andre interne procesvarmebehov kan dækkes, som ellers forsynes med primær energi genereret ved afbrænding af et brændsel. Først derved fortrænges forbrug af brændsel med effektiv anvendelse af el. Det bemærkes at det er temperaturløftet snarere end temperaturniveauet af varmen der er afgørende for økonomien i varmepumpning.

Temperaturniveauet og temperaturprofilen har især betydning for velegnet parring af kompressor-teknologi og kølemiddel.

3 Procesbehov og nuværende forsyning

Nykøbing Sukkerfabriks nuværende varmecentral består af 6 oliefyrede (HFO) kedler med en gennemsnitligt vægtet virkningsgrad på ca. 84 %. Desuden produceres og indfyres biogas svarende til ca. 7 % af indfyret fueloile. En del af dampen produceres i kedler med højt tryk og temperatur (57 bar, 405 C), som udnyttes til elproduktion i en dampturbine før denne udnyttes i processen ved et tryk på ca 4 bara. Dampturbinen producerer ved nominel drift ca. 8,3 MW el.

I PowerUp projektet er set på muligheden for helt eller delvis at erstatte den nuværende energiforsyning hos Nykøbing Sukkerfabrik med varmepumpning. Konkret er det anvendelsen af dampkompression som varmepumpeteknologi på hovedprocesser (inddampning, kogning og pulptørring), hvorved det er muligt at substituere brændsel med elektricitet med en ”virkningsgrad” (COP) på 300 – 400 %.

Omfattende varmepumpning vil reducere overskydende varme fra anlægget betydeligt og kan kræve forbedret effektivitet i brugen af lavtemperaturvarme (f.eks til vandrensning m.m.) for at have tilstrækkelig varme til rådighed. Hvis varmepumpning skal være selskabsøkonomisk lønsomt ift brændselsfyret varmeproduktion kræves at procesvarme kan produceres billigere med varmepumpe for at generere et dækningsbidrag til betaling af merinvestering i varmepumpe.

Elprisen er afgørende for varmepumpens driftsøkonomi. Vi forventer lavere priser i dansk industri på kort sigt, da PSO-taksten udfases inden 2022.

Store dampkompressorer er specialudstyr, der ligner kompressortechnologi anvendt i olie- og gasindustrien. Teknologi som er designet til netop olie-gasindustri er ofte temmelig dyr og er normalt skræddersyet til specifikke forhold og produceret i lavt antal. Høj pålidelighed og lang serviceinterval kræves ofte i sådanne installationer. Turbokompressortechnologi, som er designet til varmepumpning op til moderat høje tryk og temperaturer i form af dampkompression med henblik på energibesparelser er

dog noget billigere. Man kan måske sige at markedet har dikteret nødvendigheden af at kompressortechnologien sammen med el er tilstrækkelig billig for netop at kunne konkurrere med billige brændsler.

I Danmark har vi vedtaget at gennemføre en CO₂-reduktion på 70 % inden udgangen af 2030. For at det kan nås anbefaler klimarådet indførsel af høje afgifter på CO₂ (helt op til 1500 kr/ton CO₂) da det i deres optik vil sikre de laveste samfundsøkonomiske omstillingsomkostninger for at nå målet. Hvis der indføres så store afgifter på CO₂ vil varmepumpeløsninger blive meget attraktive selvom afgiften indføres progressivt over en 10 årig periode.

3.1 Tilslutning til elnet

Omfattende eldrevet varmepumpning vil kræve betydelig større elforbrug og tilslutningseffekt. Afstand mellem trafo-station og Nykøbing Sukkerfabrik er ca. 3 km (se Figure 1). Luftledninger forsætter dog fra trafostation mod og over broen til Nykøbing, så afstanden til luftledningen er langt mindre.

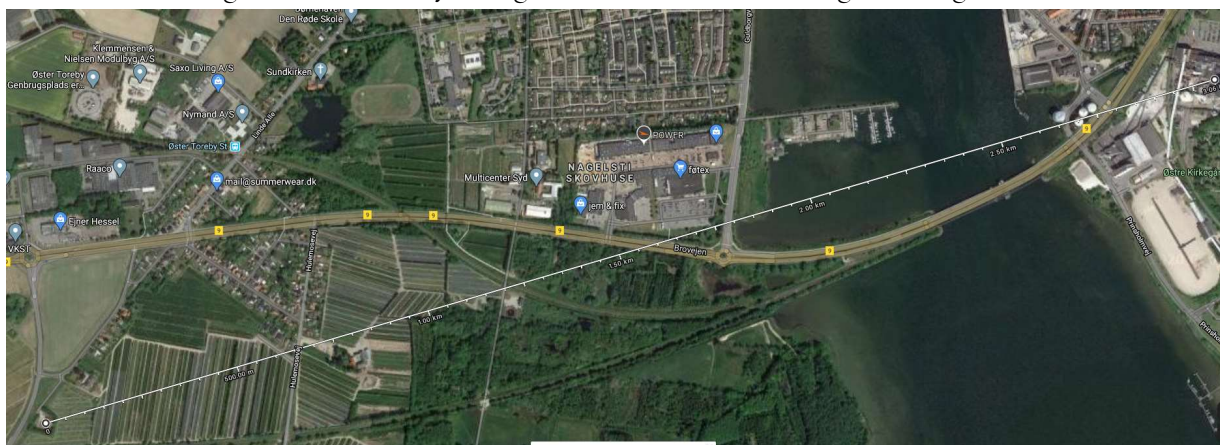


Figure 1. Afstand mellem trafo-station og Nykøbing Sukkerfabrik (ca. 3 km).

4 Metode

Weel & Sandvig har udarbejdet masse- og energibalance modeller samt off-design performance for hovedprocesserne på Nykøbing Sukkerfabrik.

Ved et fuldt varmepumpe-scenarie, vil hovedprocesserne inddampning og sukkerkogning arbejde næsten selvstændigt med hver sin dampkompressor-station. Detaljeret balancer for dampkompressorer (varmepumper) integreret med det individuelle processer er gennemført i model opstillet i Matlab. Ved sammenligning af dampbalancer med og uden varmepumpning anvendes de simulerede resultater. Desuden er gennemført pinch-analyser for at sikre at der er tilstrækkelig energi og temperaturdifferens til råsaft og tyndsaftforvarmning m.m.

5 Antagelser og process-specifikationer

I forbindelse med opstilling af simuleringsmodel er anvendt følgende stof data m.m.:

Varmekapacitet (C_p) af tyndsaften beregnes ud fra vandfraktionen (X_{Water}) som:

$$C_p = (X_{\text{water}} * 4.2 + (1 - X_{\text{water}}) * 2.35) \text{ [kJ/kgC]}$$

Kogepunktsforhøjelse for sukkersaft er udtrykt som funktion af tørstofindholdet og renheden ved følgende udtryk:

$$\Delta T_{\text{boiling}} = A_x * (W_{\text{ds}} / (100 - W_{\text{ds}}))^B * ((273 - t_{\text{bw}}) / 100)^C * (Q / 100)^{Dx}$$

Source: https://help.syscad.net/index.php/Sugar_Species_Model

hvor: W_{ds} er tørstof-fraktionen

t_{bw} er kogepunkttemperaturen for vand (ved det aktuelle tryk)

Q er renheden af sukkersaften (ren sukker indhold divideret med total tørstof i saften)

$A_x = 0.166$, $B_x = 1,1394$, $C_x = 1,9735$ og $D_x = 0,1237$

F.eks. vil kogepunktforhøjelsen blive 8,4 C ved et tørstofindhold på 80 % med en renhed på 90 % ved en temperatur på 80 C.

Det er antaget at Nykøbing Sukkerfabrik har en nominel kapacitet svarende til 12624 ton roer per dag: Med nøgletal etc som angivet i Table 1). I tabellen betyder "pr" "per roe" i forhold til masseflowet af roer.

Parameter		
Roer input (12624 ton/day)	ton/h	526
Sukker indhold i roer	Frac	0.185
Non-sugar solubles	Frac	0.02
Tørstof (fibers etc)	Frac	0.045
Temperatur af udskåret roer (cosetter)	C	8
Draft		1.21
Tyndsaft brix (sukker + opløselige ikke sukkerarter)	Frac	0.17
Råsaft preheat temperatur	C	83
Tyndsaft preheat temperature	C	133 (138)
Temperatur af cosetter fra diffusøren		67
Temperaturur råsaft fra difussør	C	23
Water evaporation in evaporator plant	% pr	93
Water evaporation in sugar boiling pan	% pr	11
Water evaporation in steam pulp dryer	% pr	11.1
Water fraction in pressed pulp	%	72
Recycle water in sugar house	% pr	10
Water fraction in dried pulp	%	10

Table 1. Antaget nøgletal for sukker produktionsprocessen.

5.1 Varmetransmissionskoefficienter i inddamper

I forbindelse med off-design beregninger på inddamperanlægget er det vigtigt at der er brugt rimeligt konsistente udtryk for varmeovergangstallet ved afvigelser i procesparameter. Hvis man har gode målinger kan varmeovergangstallet ofte bestemmes med rimelig nøjagtighed ud fra driftsparametrene på inddamperanlægget. Vi har derfor beregnet varmeovergangstal for hvert inddampertrin ud fra en varmebalance¹, som vi har lavet på baggrund af oplysninger fra driften af inddamperen på Nykøbing Sukkerfabrik. Det ”målte” varmeovergangstal er vist i Figure 2 sammen med fire andre korrelationer for varmeovergangstallet.

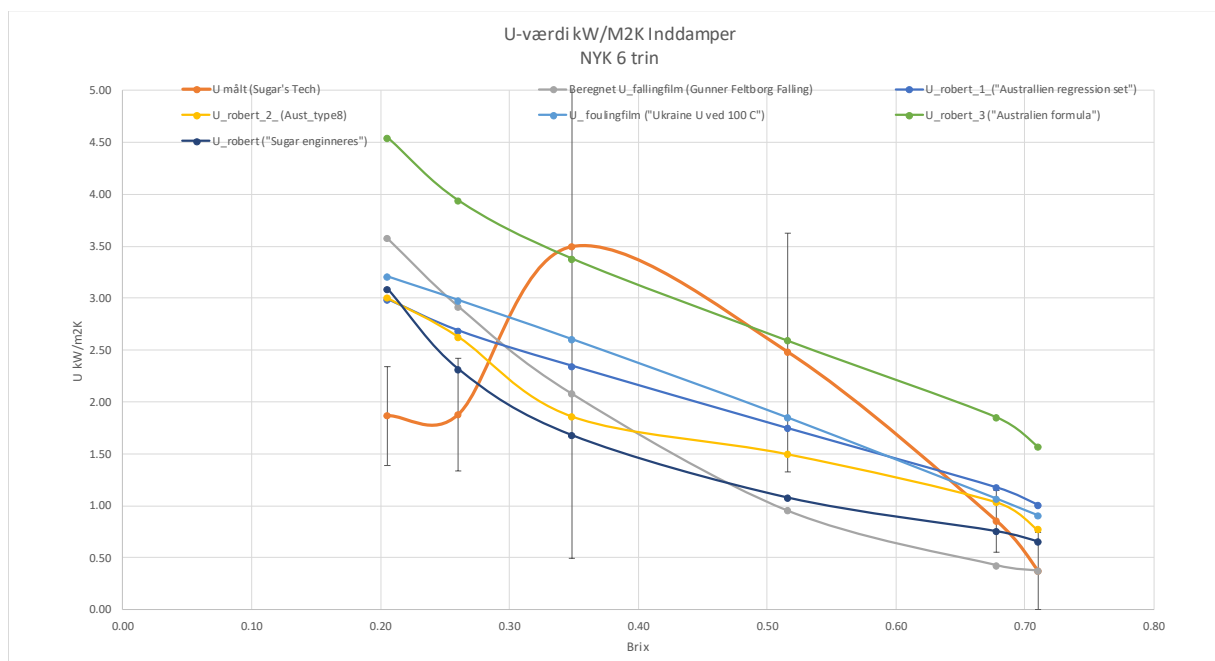


Figure 2. ”Målt varmeovergangstal” på Nykøbing sammenlignet med 6 korrelationer anvendt til sukkerinddampere.

Det fremgår af figuren at det målte varmeovergangstal ikke følger den forventede tendens som man normalt vil se for en sukkersaftinddamper. Årsagen til at de målte varmeovergangstal fraviger den forventede tendens kan forklares ved usikkerheden på de enkelte måleparameter. Hvis usikkerheden på trykmålingerne er $\Delta U_P = \pm 0,1$ bar og temperaturmåling på $\Delta U_T \pm 1$ K vil det målte varmeovergangstal kunne variere i henhold til de ”error bars” som er vist i Figure 2.

Vi har valgt at bruge en korrelation for varmeovergangstallet svarende ”Australien type 8” [\[https://pdfs.semanticscholar.org/bf6f/833f3630fa3bf2f361cc06d228ebe85c4aba.pdf\]](https://pdfs.semanticscholar.org/bf6f/833f3630fa3bf2f361cc06d228ebe85c4aba.pdf).

$$U = (0.000049 * (110 - C1 * 100)^{1.1616} * T_{saft1}^{1.0808} * (T_{s1} - T_{saft1})^{0.266}) * UA_faktor$$

Hvor C1 er brix

¹ Sugar Tech: C:\Sugars_data\DSSD\T&I\FH\Nyk\Factory\Thinjuice HX offers 6 step, Normal flowrate\Thinjuice.Alfalaval

T_{asft1} er safttemperaturen

T_{s1} er damp kondenseringstemperaturen

UA_faktor faktor for at tune inddampermodellen (Eller til brug for følsomhedsanalyser)

Ved simulering af inddamperen er der desuden antaget et varmetab på 40 kW/trin.

Der er set bort fra den energi som er tilført fra cirkuleringspumperne over inddamperen.

6 Proces parameter

6.1 El-drevet turbokompressor til dampkompression

Behovet for elektricitet er beregnet ud fra følgende forudsætninger:

Isentropisk virkningsgrad kompressor:	80 %
Elektro-mekanisk virkningsgrad af motor incl. gear:	95 %
Tryktabet mellem kompressortrin er antaget til:	2 % (3 bøjninger, indløb, udløb og dråbefang)

De anførte værdier er i overensstemmelse med hvad der kan opnås med tilgængelig teknologi i dag. For inddamperanlægget er det antaget at kompressorerne kan integreres direkte ved at suge damp fra trin 6 og rekomprimere til trin 1. For sukkerhuset er det ligeledes antaget at afdampen rekomprimeres direkte.

Oprindeligt var det antaget at alle dampkompressor var opbygget som "multi-stage integrally geared centrifugal compressors" arrangeret i en såkaldt "bull-gear" konfiguration, hvor de enkelte kompressortryktrin sidder som planeter omkring et fælles stort drivhjul (

Figure 3). På den måde er det muligt at hvert enkelt kompressortrin arbejder tæt på det optimale omdrejningstal.

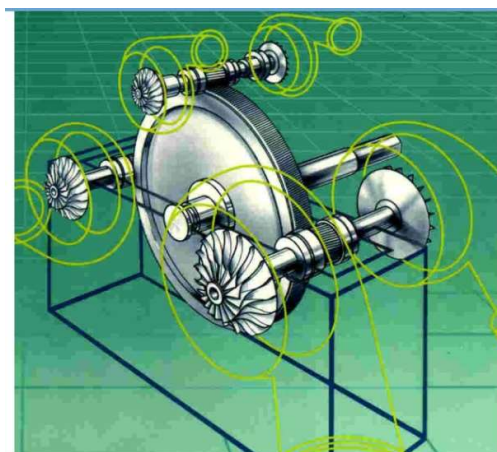


Figure 3. "Integrally geared" multi-stage kompressor. Source: MAN Energy Solutions.

Det har dog vist sig at denne teknologi, som benyttes i olie & gasindustrien er ganske kostbar. Vi har derfor i stedet valgt en løsning baseret på kompressortechnologi hvor blæser/kompressorhjulet (impeller) er udført som en svejst konstruktion. Dette begrænser den maksimale tip speed til ca. 300 m/s, hvilket indebærer at der i stedet for eksempelvis 3-trins kompression skal anvendes kompression i 5 trin. Hvert kompressionstrin er opbygget med egen elmotor. Løsningen med fem kompressions-trin har vist sig at

være langt billigere (ca. 60 mio. kr. billigere) i forhold til integral-kompressor-teknologien og ifølge leverandørspecificationer uden at gå på kompromis med virkningsgraden.

6.2 Inddamperanlæg

Det nuværende inddamperanlæg er opbygget som en medstrøms 6-trins faldfilmsinddamper med dampudtag til tyndsaftforvarmning, sukkerkogning samt diffusion m.m. Desuden udnyttes varmen i kondensatet ved delvis successiv dampflashing. Inddamperen er endvidere forsynet med dampudtag til sukkerkogning, diffusion, råsaftforvarmning m.m. Inddamperen er derfor hjertet i sukkerfabrikken da denne på mest effektiv måde forsyner de øvrige processer med energi. Ved ombygning til dampkompression antages det at 6-trins inddamper-konfigurationen bibeholdes idet man derved kan opretholde høj energieffektivitet med backup-damp fra dampkedlerne, hvis kompressoren skulle havare eller såfremt at energibalancen for inddamper ikke alene kan opretholdes ved dampkompression.

Et princip-diagram af inddamperanlægget med integreret dampkompressor (MVR) er vist i Figure 4. Der anvendes en off-design model af inddamperanlægget (se Appendix: Dampkompressor over inddamperen). Off-design modellen er delvis tunet efter, balance vha. SugarsTM ved L. Lyskov Jensen, Nordic Sugar, dog men den forskel at varmevegangstallene på de enkelte trin er beregnet i henhold til udtrykkene i kapitel 3 (se Appendix: Heat balance evaporator by Nordic Sugar).

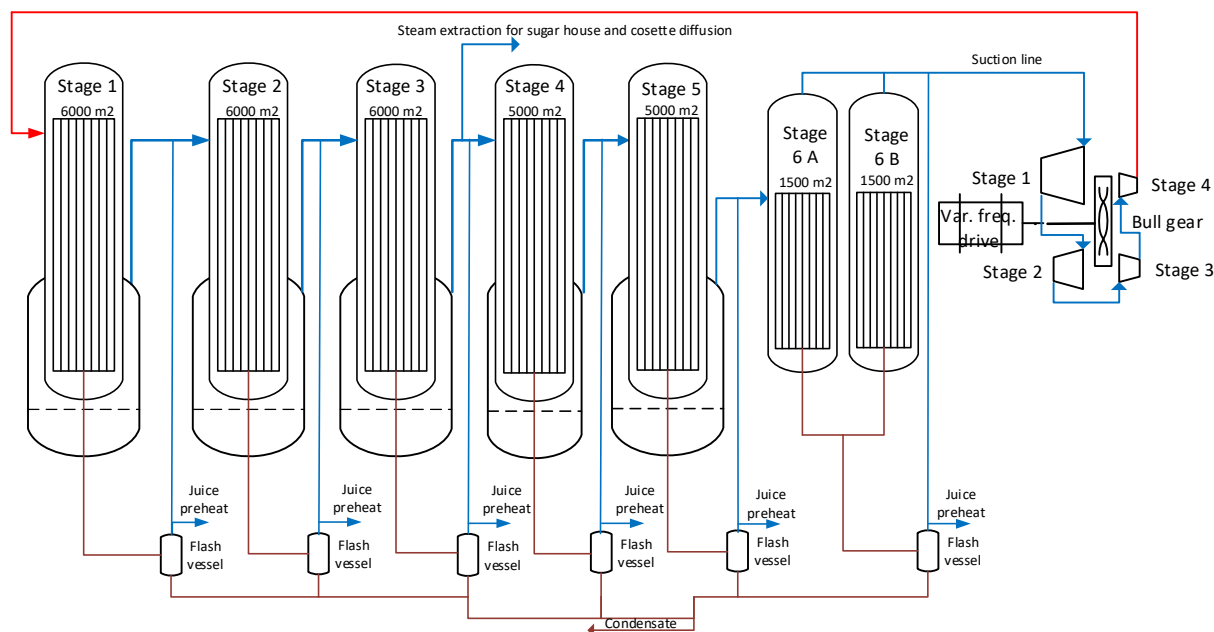


Figure 4. Principdiagram af inddamperstation med MVR varmepumpe. Dampudtag til sukkerhus er 4.8 ton/h og til diffusion 4.4 t/h.

Det er også teknisk muligt at omkoble inddamperen således at trinene i stedet kan arbejde parallelt. Ved parallelkobling af trinene skal dampkompressoren levere et langt mindre temperaturløft (trykforhold) på bekostning af komprimering af en langt større dampmængde. De to forhold vil energieffektivitetsmæssigt udbalancere hinanden således at den samlede COP-værdi vil være nogenlunde ens. Fordelen ved en parallelkobling kan være at det er lidt simplere at køre med. Ulempen er den større massestrøm og i tilfælde af kompressorerne har udfald eller i værste fald havari skal man kunne omkoble til 6-trins drift for at køre på konventionel vis (dvs med dampforsyning fra kedler som nu). I forbindelse med den øgede effekt (dampflow) på inddampertrin 5 og 6 skal de hydrauliske forhold vurderes yderligere mht tryktab og carry-over m.m.

	Trin 1	Trin 6
Tryk bara	3.9	0.85
Juice temperatur C	137.9	97.4
Steam temperature (mantle side) C	143	101.4
Brix	0.17	0.71
Kogepunktsforhøjelse C	0.6	5.1
ΔT fordampertrin C	4.8	4.5
Evaporation (kg/s)	135.5 (93 % pr)	
Dampudtag fra Trin 1	1 ton/h	
Dampudtag fra Trin 2 (til diffusion/dysekompression)	4.4 ton/h	
Dampudtag fra Trin 4 (til sukker hus m.m)	42 ton/h + 5.15 ton/h	
Dampudtag fra Trin 4 (til sukker hus og råsaftforvarmning)	22 ton/h + 8.77 ton/h	
Tyndsafthetemperatur til inddamperanlæg	83 C	

Table 2. Procesparametre for inddamperanlægget i referencetilfældet (som den nuværende drift).

6.3 Sukkerkogning (krystallisering)

På Nykøbing er der ca. 21 kogeapparater (9: Melis A, 6: Melis B og 6: Melis C). Sukkerkogerne arbejder batchvis med en cyklus tid på ca. 3-10 timer (3-4 timer på melis A og B samt 6-10 timer på melis C). I appendix "Dampkompressor på sukkerkogerne" er vist en balance for dampkompressoren som arbejder over sukkerkogerne.

Alle kogeapparaterne er antaget forbundet til en fælles sugemanifold, hvorfra kompressoren kan suge dampen fra kogeapparaterne. For at minimere kompressorarbejdet skal det sikres at tryktabet over ventiler fra hver kogeapparat er lavt. Et principdiagram af en dampkompressor som arbejder over sukkerkogerne er vist i Figure 5.

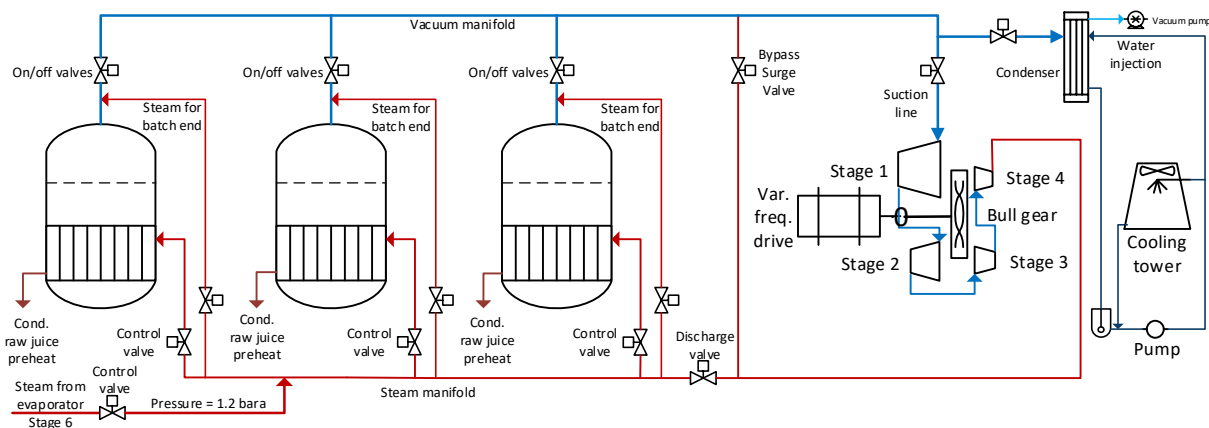


Figure 5. Principdiagram for sukkerkogere integreret med fælles dampkompressor station.

Driften af sukkerkogere kører i sekvenser for at reducere for store variationer i dampbehov. I Table 3 er angivet de hovedprocesparameter, som sukkerkogere arbejder med. Bemærk at trykket i kogere er øget en lille smule for at reducere størrelsen på kompressorstationen (mindre sugenvolumen flow).

	Sukkekogning (krystallisation)
Tryk bara (over væsketop)	0.28
Juice temperature (top)	75 - 81 C
Juice temperatur (bund)	77 – 83 98 C
Damp temperature (kappe side)	108 C
Brix	0.89
Kogepunkts øgning ved start af batch	9 C
Kogepunkts øgning ved slut af batch	18 C
Statisk højde af væske over hedeblade	2 m
ΔT	5 - 10 C
Fordampning (total fra alle sukkerkogere)	17.5 kg/s (12.0 % pr)
Tryk damptilførel	1.5 bara

Table 3. Parametre for sukkerkogning.

Den statiske væskesøjle i kogeren påvirker ligeledes kogepunktet. Juice-temperaturen i toppen af væskesøjlen vil være ca. 77 C og i bunden vil den kunne være op til 83 C pga. det højere hydrauliske tryk her. Under udkrystalliseringen af sukkeret vil kogepunktforhøjelsen stige pga. den aftagende renhed i modersiruppen. Ifølge vores beregninger vil denne kogepunktsforhøjelse øges til ca. 18 C i den sidste fase af udkrystalliseringen.

6.4 Tørring af roepulp (udføres kun delvist på Nykøbing)

På Nykøbing sukkerfabrik produceres primært HP-pulp og Piller (tørret pulp). Pulpen deles 50/50 mellem hvert af produkterne. Såfremt afsætningsforhold og økonomi skulle gøre det attraktivt at producere tørret roepulp er det muligt at udføre tørreprocessen i overhedet damp med integreret varmepumpning. Såfremt at Nykøbing skulle ønske at tørre roepulpen har vi antaget de i Table 4 angivne parametre for tørrerprocessen.

	Steam dryer
Steam drying pressure	3.7 bara
Pulp temperature inlet	70 C
Fraction of dry matter in pressed pulp	0.28
Fraction of dry matter in dried pulp	0.1
Supply pressure of steam to dryer	23 bara
Temperature of dried pulp out of dryer	100 C
Water evaporated from pulp in dryer	16.7 kg/s or 60 t/h (12 % Pr)
Electricity demand for recirculation of drying steam	1.9 MW

Table 4. Parametre for damp­tørrer.

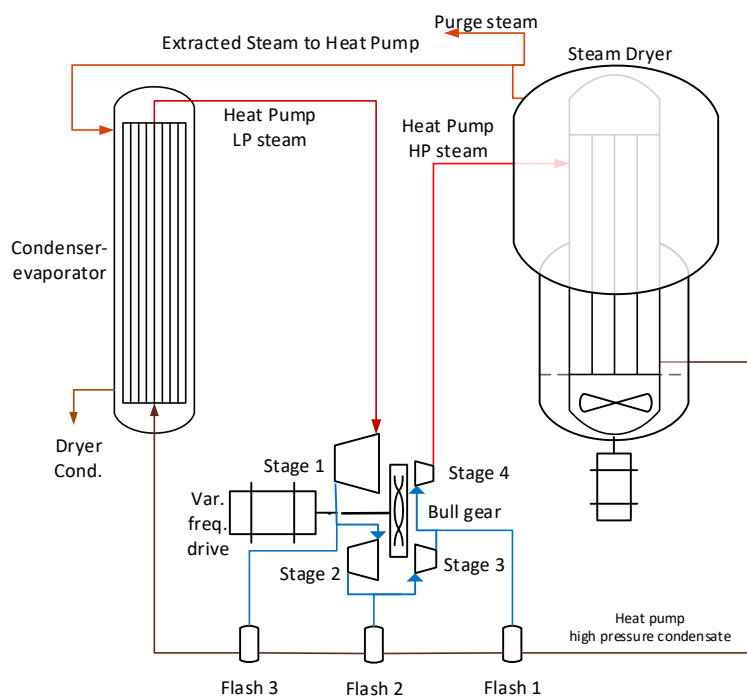


Figure 6. Principdiagram af en damp­tørrer med integreret indirekte varmepumpe. Ved en afdampning fra tørreren på 60 t/h vil der være et dampoverskud på ca. 9.7 t/h under antagelse af varmetabet er negligibelt. I varmepumpekredsen flashes højtrykskondensatet successivt til hvert kompressor-trin samtidig med vandindsprøjtning for at opnå tilstrækkelig mellemkøling mellem hvert trin og for at mindske kompressorarbejdet.

7 Varmepumpeintegration i sukkerprocessen

Der er undersøgt fire scenarier med varmepumpeintegration for sukkerfabrikken i Nykøbing som følger:

1. Varmepumpe som tager overskuds damp fra inddamper trin 6 og rekomprimere dampen til 1,5 bar til forsyning af sukkerkogere. Der tages i dette tilfælde kun en mindre mængde damp ud til sukkerkogningen. Desuden gøres råsaftforvarmningen mere effektiv så man skal bruge mindre trin 5 og trin 6 damp til råsaftforvarmning.
2. Varmepumpning over inddamper uden udtag til sukkerhus (dampkompression fra trin 6 til trin 1) samt varmepumpe i sukkerhus.
3. Som 2 men med øget saftopvarmning af tyndsaft fra 83 C til 95 C opnået ved øget spildvarmeintegration for inddamperen.
Desuden er saftforvarmningen øget fra 83 C til 93 C før inddamperen.
4. Som ovenfor men kun med 50 % varmepumpning i forhold til scenarie 3.

Baseret på procesparameterne, præsenteret i kapitel 6, er der integreret passende dampkompressorer for hver hovedproces (inddampning, og krystallisering), således at energi og produktionsforhold kan opretholdes. I Table 5 er vist hoved resultaterne for de fire scenarier i forhold til referencen.

I alle scenarier er det nødvendigt i større eller mindre grad at gøre råsaftforvarmning m.m. termodynamisk mere effektiv da varmepumpningen betyder at der er mindre energi og temperaturpotentiale til rådighed. Det betyder at der skal installeres flere nye effektive varmevekslere til råsaftforvarmning m.m. I den nuværende fabrik fremgår det af pinch-kurven (kompositkurver se Figure 7) for saftforvarmning at der er rigelig med energi og temperaturpotentiale til rådighed.

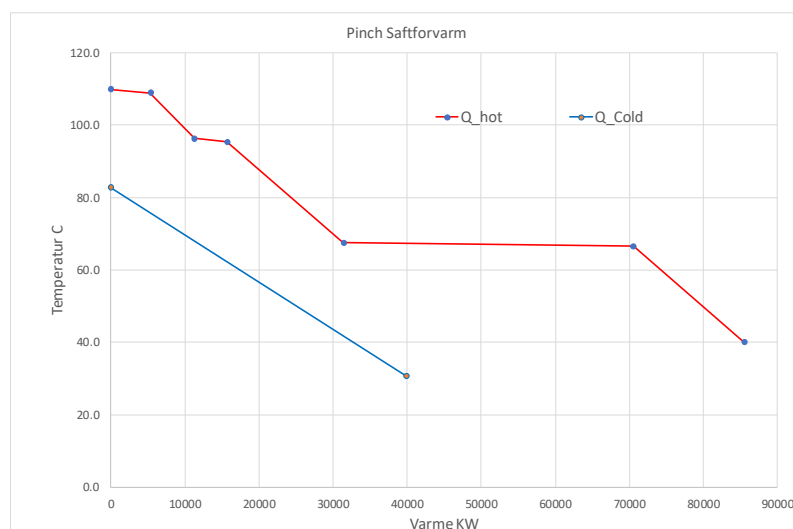


Figure 7. Pinchkurver for den nuværende råsaftforvarmning og varme til rådighed.

Kurverne viser også at såfremt at der var afsætningsmulighed kunne sukkerfabrikken levere masser af overskudsvarme til Nykøbing Falster i kampagnen. P.t. leverer Nykøbing Sukkerfabrik gennemsnitlig ca.

8 MWth fjernvarme til Nykøbing Falster (fra november til kampagne slutning). Ved fuld varmepumpeintegration på sukkerfabrikken vil der ikke være overskudsvarme til rådighed til levering af ekstern fjernvarme.

I forbindelse med scenarierne er der gennemført pinch-analyse og varmeveksler netværks design vha. WS-HEN-explorer for at sikre optimal varmeintegration af råsaftforvarmning m.m. (se Energibalance og pinch-analyse.). Analysen viser at varmebehovet til en råsaftforvarmning m.m. op til 95 C alene kan ske ved optimal udnyttelse af "spildvarmestrømme".

		Ref. Nykøbing	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 4
			VP fra TRin6 -> sukkerkog + ekstra Varmeintegration	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C	50 % VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C
Energiforbrug (brændsel til damp)	MW	88.9	78.4	27.3	16.4	52.4
Besparelse i brændsel forbrugt i forhold til ref	MW		10.5	61.6	72.5	36.5
Elforbrug Varmepumpe inddamper	MW	0	1.9	6.4	7.3	3.65
Elforbrug Varmepumpe koger	MW		0	6.5	6.5	3.25
Dampbehov 3,9 bara fra kedler/turbine	kg/s	33.33	28.89	11.5	6.92	20.13
Dampturbine effekt	MW	8.4	8.4	0	0	4
Fjernvarme effekt (overskudsvarme)	MW	6	6	1	0	3
Samlet merbehov for eleffekt	MW		1.9	21.3	22.2	11.3
COP Varmepumper			5.54	4.78	5.25	5.28
Årlig drifttid	timer	2500	2500	2500	2500	2500
Årlig brændselforbrug	MWh/år	222186	195879	68138	41001	131035
Årlig elforbrug	MWh/år	0	4750	53250	55500	28250
Årlig CO2 udledning (fueloile)	ton/år	63350	55849	19427	11690	37361
Årlig CO2 besparelse	ton/år	0	7501	43922	51660	25989
CO2 fra eksternt elkøb (0.17 ton/MWh)	ton/år	0	808	9053	9435	4803

Table 5. Main normal operating data of steam compressors and comparison with reference case.

8 Opstart af anlæg med varmepumpe

I sukkerfabrikken er det inddamperanlægget, der under normal drift afbalancerer varme til de forskellige dampforbrugere i sukkerfabrikken.

Opstart af inddamperanlægget udelukkende ved hjælp af varmepumpens egen varmeproduktion vil tage meget lang tid på grund af kompressorens arbejdsprincip og ligevægtsvanddamtryk. Under opstart skal der etableres vakuum (for at fjerne luft i inddamperanlægget), efter at vand eller juice er cirkuleret på inddamperanlægget. Når anlægget opstartes skelnes mellem en kold eller varm start som følger.

8.1 Opstart fra "koldt" inddamperanlæg.

1. Start påfyldning af inddamperanlægget med vand, og start cirkulationspumpe
2. Etabler vakuum
3. Start dampkompressoren (MVR-enheden)
 - a. Hvis kompressoren har IGV'er: start med lukket IGV
 - b. Hvis kompressoren har hastighedskontrol: start med lavt omdrejningstal
4. Forøg åbning af IGV og/eller hastighed til max uden at overtræde mekaniske eller strømningsinducerede grænser.

Opstartstid afhænger af den indledende temperatur, den samlede varmekapacitet på det indesluttede vand og varmekapaciteten af stålet i inddamperanlægget, den endelige måltemperatur, der er indstillet i fordamperen og varmetab til omgivelserne.

Start af en fordamper fra en starttemperatur på 45 °C og en endelig temperatur på 120 °C udelukkende med input fra MVR-kompressoren vil være ca. 4½ timer (forudsat at et vandindhold i fordamperen er på ca. 0,7 ton vand/(ton/t fordamper kapacitet). Den lange opstartstid kan forklares med det lave sugetryk i starten af opstarten. Hvis den indledende temperatur er 45 °C, vil sugetrykket kun være omkring 0,12 bara sammenlignet med det designede sugetryk på 1 bara. Dette betyder, at masseflow i starten af opstart ind til kompressoren kun vil være ca. 1/9 af den nominelle massestrømning, og følgelig vil det nominelle kompressorarbejde (nettotilførsel af energi til systemet) være tilsvarende lavt. Hvis den indledende temperatur i fordamningssystemet er endnu lavere vil opstartstiden med kompressoren stige og systemet vil ikke være i stand til at starte fra en bestemt lav temperatur (f.eks. 10 °C).

Opstartstiden kan være meget kortere, hvis ekstern damp leveres til trin 1. Vi anbefaler, at opstart understøttes af ekstern damp i området mellem 5 - 15 ton/t for at forkorte opstartstid for anlægget og for at sikre, at det er muligt fra kold tilstand.

8.2 Opstart eller genstart af varmt procesanlæg

Hvis anlægget eller kompressorstationen skal genstartes efter en planlagt eller uforudset nedlukning, og såfremt at trykket i processen, der er forbundet til kompressorens udløbsledning, er højere end kompressorens sugetryk, skal opstart af kompressorstationen udføres isoleret fra processen vha. en recirkuleringsventil (ofte også kaldet en surgeventil). En isoleret opstart sker med en åben recirkuleringsventil og en lukket afgangsventil (se Figure 8). Kompressorhastigheden øges, mens recirkuleringsventilen gradvist lukkes, indtil udløbstrykket (før recirkuleringsventilen) er højere end i den proces, der kræver damp fra kompressoren. Der foreslås en vis mindste trykforskel (dP -afgangsventil). Hastighedsforøgelsen og den gradvise lukning af recirkuleringsventilen styres på en sådan måde, at kompressoren konstant fungerer på den sikre side af dennes såkaldte surge-margen. Når kompressorens udløbstryk er højt nok, kan procesvarmepumpningen gradvis genaktiveres. Kompressor-afgangsventilen (tilslutning til processen, der kræver damp) åbnes nu gradvist (langsomt eller trinvis), mens recirkuleringsventilen fortsætter med at lukke for at opretholde en bestemt dP over afgangsventilen og for at sikre at surge-margin ikke overskrides.

Hvis trykforholdet over kompressoren stiger under denne lukning af recirkuleringsventil og åbning af afgangsventilen, skal kompressorens hastighed stige tilsvarende. Mere viden (systembegrænsninger og dynamik osv.) om processen, der er forbundet til dampkompressorstationerne, kan integreres i kompressorstyresystemet for bedre at kunne regulere normaldrift, belastningsændring og automatisk opstart- og nedlukningsprocedurer.

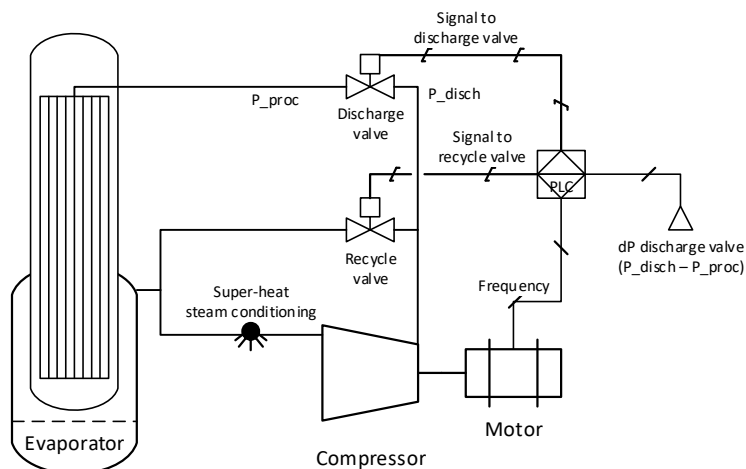


Figure 8. Illustration af kontrolventiler under opstart af kompressor.

9 Operabilitet

Operabiliteten defineres som MVR-kompressorens kontroleve til at imødekomme belastningsvariationer og unormale driftsbetingelser i anlægget. Kompressorens kontrolområde afhænger af anlægsegenskaber og den egentlige kompressorkarakteristik. Karakteristikken for en inddamper med flere trin (6 trin) med og uden kogepunktforhøjning (endelig stigning i kogepunktet i trin 6 antages at være 8 K) er vist i Figure 9.

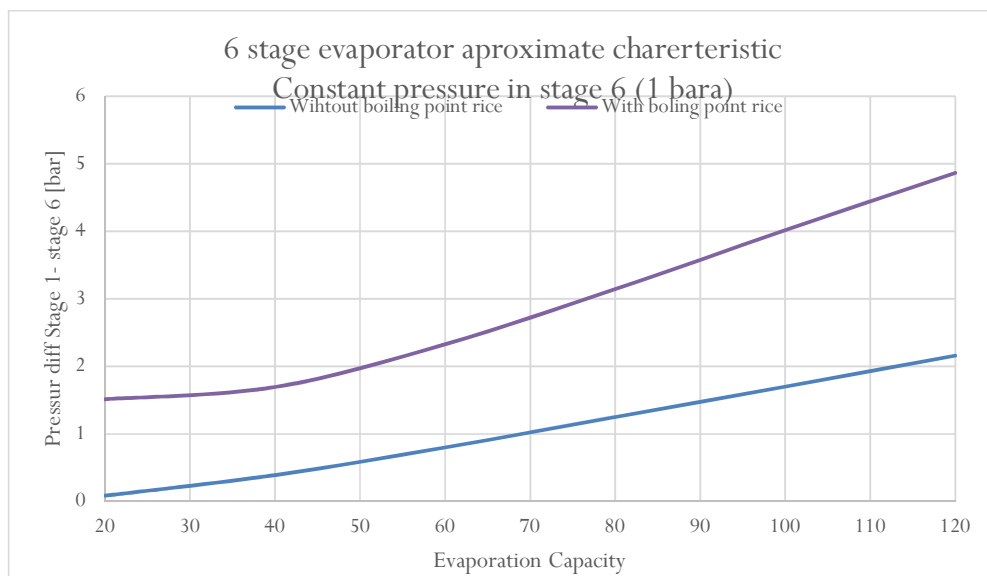


Figure 9 Karakteristik for et 6-trins inddamperanlæg (relativ kapacitet i %) ved fastholdt tryk i trin 6 (1 bara).

Kompressorkarakteristikken afhænger meget af kompressortrinnets belastning (trin Mach-nummer). En kompressor med et højt Mach-nummer har behov for færre komprimeringstrin, på bekostning af et mindre kapacitetsområde end hvad der kan opnås med et kompressorsæt designet med et lavere Mach-nummer. Den samlede karakteristik for kompressor og fordamper viser, at der er et godt forhold mellem kompressorkarakteristikken og fordampningskarakteristik, selv når der indføres en betydelig stigning i kogepunktet. Reguleringsforholdet vil være ca. 2,5 (fra 110% belastning til 44% belastning) med høj effektivitet, når hastighedskontrollen anvendes. Reguleringsområdet kan udvides yderligere, hvis kompressorens sugetryk (tryk i fordamperfase 6) nedsættes.

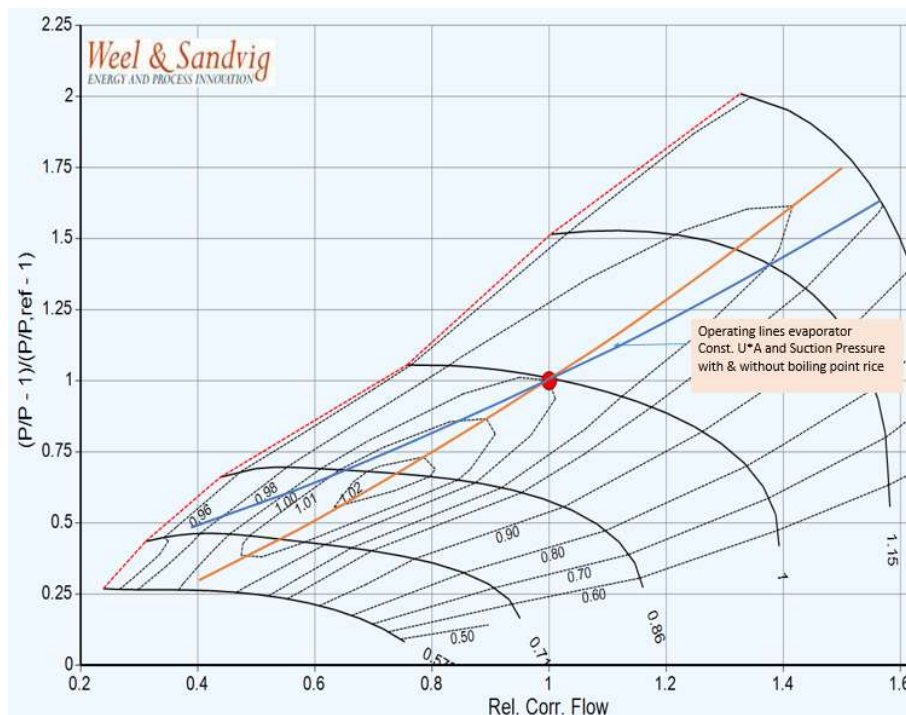


Figure 10. Kompressor map med inddamperanlæggets karakteristik vist. Orange kurve uden og blå kurve med statisk løft og kogepunktsforhøjelse.

En inddamper eller et kogeapparat med dampkomprimering er et såkaldt loopet system. Kapaciteten af et kompressordrevet inddamperanlæg er derfor lidt kompliceret. Kompressorens omløbstal påvirker flow, trykforhold og derved temperaturløft som er drivkraften til varmeudveksling i de tilsluttede fordampningstrin. Derved øges fordamperens kapacitet med øget kompressorhastighed.

Dampkompressorens sugetryk påvirker densiteten og dermed også massestrøm gennem kompressoren. Kompressorens sugetryk påvirker også trykniveauerne i alle de tilsluttede fordampningstrin og dermed varmeoverførselshastigheden (varmeoverførselskoefficient). Forhøjet kompressor-sugetryk indebærer øget kapacitet i det kompressordrevne inddamperanlæg og vice versa. Trykket i det laveste trin (kompressor-sugetryk) kan styres ved at tilføje eller trække varme (fx som damp) til eller fra systemet. Det er vigtigt at kontrollere denne import/eksport af varme tæt, da driftspunktet (f.eks. trykniveau) kan

være følsomt over for hvor meget varme eller damp der tilsættes/eksporteres. En generel varmebalance over fordamperen og kompressoren (entalpistrøm af ind- og udgangsstrømme, varmetab og input af kompressorarbejde (akseffekt) viser mængden af varmeoverskud eller underskud i systemet).

9.1.1 Tørring af roepulp i overhedet damp (damptørre)

Nykøbing Sukkerfabrik anvender ikke tørring af roepulp med damptørring, som det sker på sukkerfabrikken i Nakskov. Med en damptørre er der dog også god mulighed for at elektrificere denne proces med en varmepumpe i form af en dampkompressor. Karakteristikken af kompressoren kombineret med damptørre er vist i Figure 11. Figuren viser et meget godt forhold mellem damptørre og kompressorkarakteristik, når hastighedskontrollen anvendes. Det er muligt at arbejde meget tæt på kompressorens bedste effektivitetslinje, når hastighedskontrol anvendes.

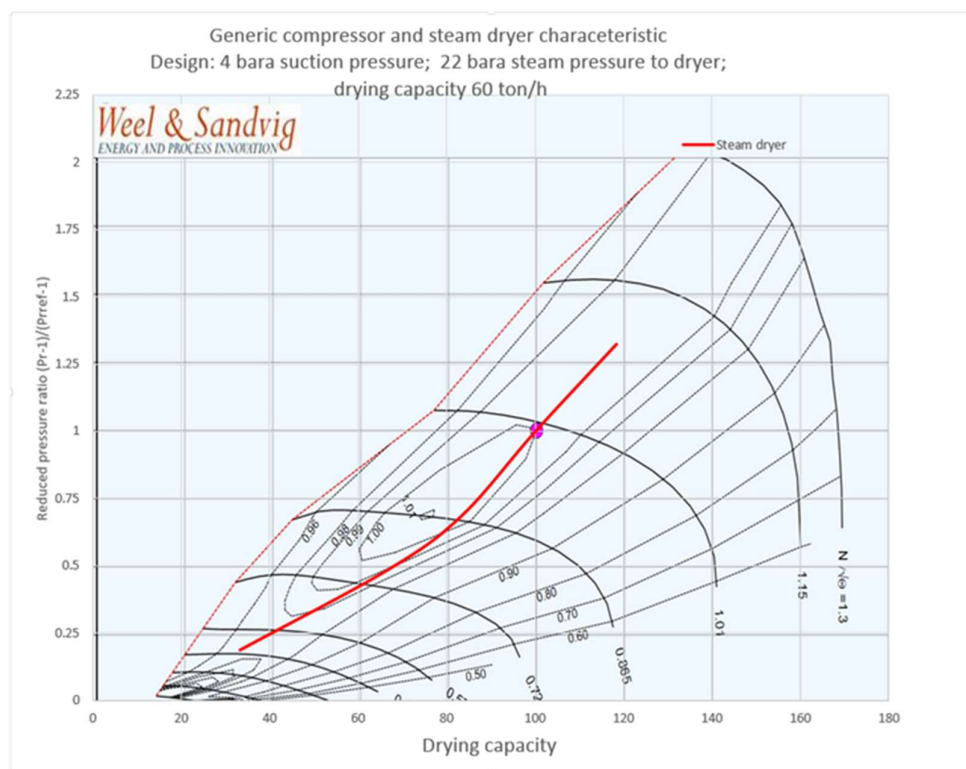


Figure 11. Kompressor map med damptørre-karakteristikken indlagt.

9.1.2 Sukkerkrystallisation.

Da sukkerkrystalliseringsprocessen kører med mange enheder batchvis vil systemkarakteristikken være en næsten flad kurve på grund af det faktum, at kapaciteten vil afhænge af hvor mange sukkerapparater som er i drift. Karakteristikken af kogeapparaterne med en generisk kompressormap er vist i Figure 12. I dette tilfælde passer kogeapparaterne karakteristikk ikke særlig godt med en kompressor med hastighedskontrol. Der kan opnås en bedre matchning, hvis der vælges en kompressor designet med

lavere Mach-tal og/eller variabel indgangsstyreskovle (flere komprimeringstrin) eller ved hjælp af to eller flere kompressorer parallelt.

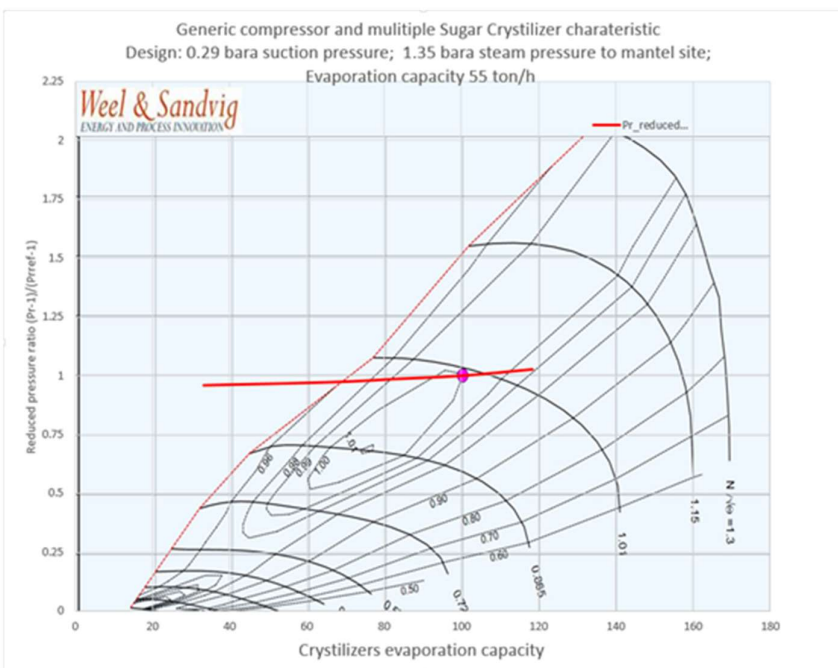


Figure 12. Generisk kompressor map med karakteristik for kogeapparater integreret.

10 Sikkerhedssystemer

Kompressorsættet er udstyret med følgende større sikkerhedssystemer:

- Anti-Surge-kontrol (sikrer, at kompressoren fungerer inden for den acceptable kompressor-kortkonvolut). Hvis arbejds punktet overstiger en minimumsafspændingsmargen, der er angivet, begynder en recirkuleringsventil at åbne for at opretholde overspændingsmargenen.
- Vibrationsmonitører. Kompressoren slukkes, hvis et bestemt vibrationsniveau overskrides.
- Aksiale rotorpositioneringer. Kompressoren lukkes, hvis off-positionen overstiger et vist niveau.
- Temperaturalarm: Temperaturgrænser eller maksimale temperaturforskelle på lejer, olie, gear, motor osv.

10.1 Risikofaktorer

1. Carryover: Carryover betyder stor mængde skum eller medfølgende dråber af saftvæske i sugedampstrømmen til kompressoren. Dråber, uanset om de er dannet af ren kondenseret damp eller juice, kan forårsage erosion på grund af høj slaghastighed. Der findes dog nogle centrifugalkompressorer i brug med våd komprimering (2-3% væske i sugestrøm) uden at dette giver anledning til

driftsproblemer, det kræver dog at dråberne er mindre end 5 my. Tørstof i juice eller skum kan desuden forårsage aflejring på løbehjulet som kan medføre vibrationer.

2. Ujævne aflejring på kompressorhjulet kan forårsage store vibrationer, ligesom fouling generelt indebærer reduktion af kapacitet og virkningsgrad. Fouling kan reduceres ved at have en effektiv dråbe og skumfang før kompressoren og eventuel suppleres med et kompressorvaskearrangement.

3. "Vandslug" fra flokkuleret vandfilm på overfladen i sugeledningen til kompressoren, skal omhyggeligt undgås eller fanges for ikke at skade kompressoren. Det anbefales at man sikrer en minimum superheat (f.eks. 10 K) og en godt varmeisoleret sugeledning til kompressoren for at eliminere vandfilm og risiko for dannelse af dråber i dette område.

4. I den endelige konstruktion af kompressoren skal anlæggets karakteristik analyseres omhyggeligt for at sikre, at anlæggets operationsområder er tilfredsstillende. Designfejl kan påvirke kompressor-kapaciteten og effektiviteten af denne og dermed økonomien.

5. Utætheder i vakuum system til kogerne. Det er vigtigt at vakuum-systemet er "helt tæt" da der ellers vil blive suget store mængder falsk luft igennem kompressoren. Hvis falskluft mængden er for stor vil dette påvirke varmeovergangstallet og dermed øge trykforholdet over kompressoren til et uacceptabelt højt niveau. I det nuværende vakuum-system er damptrykket i kogerne ca. 0,28 bara og trykket i kondensatorerne ca. 0,15 bara grundet store mængder falsk luft. Det anses for praksis muligt at reducere lækagen til et minimum. Det anbefales at der arbejdes på at tætnes systemet hurtigst muligt da dette også vil medvirke til en besparelse i el forbrug på de eksisterende vandringspumper.

Kompressortechnologien, der er foreslået i denne undersøgelse, ligner de kompressorer, der hovedsageligt anvendes i olie- og gasindustrien. Kompressorerne, der anvendes i olie- og gasindustrien, fungerer ofte ved meget højere tryk, volumenstrøm og effekt end de kompressorstationer, der blev foreslået i denne undersøgelse. Kompressorerne i olie- og gasindustrien har meget høj pålidelighed, da svigt indebærer meget høje omkostninger forbundet med produktionstab.

Compressor Type	Availability %	Reliability %	IMR&O hr/year	Forced DT hr/year	MTBF year
Axial	99,1	99,8	76,4	16,4	9,1
Centrifugal, clean service	99,7	99,8	24,8	18,8	8,0
Centrifugal, fouling service	99,0	99,5	90,6	40,6	3,7
Recip., lubricated	97,3	97,8	237,2	189,2	0,5
Recip., conv. non lube	91,3	92,3	766,1	670,1	0,3
Recip., labyrinth piston	97,6	98,3	207,2	147,2	2,0
Screw, oil free	99,0	99,7	90,0	30	5,0
Screw, oil injected	97,7	98,8	199,9	99,9	1,5

Notes

IMR&O Inspection, Maintenance, Repair & Overhaul
MTBF Mean Time Between Failure
DT Down Time

Table 6. Eksempel på den forventede rådighed og pålidelighed for de i denne undersøgelse foreslåede kompressor typer. Kilde: MAN Energy Solutions.

11 Økonomi

En vigtig faktor for anvendelse af varmepumping i stedet for at fortsætte med at bruge fossilt brændstof er økonomi med hensyn til investering (Capex) og driftsomkostninger (Opex) sammenlignet med alternativer (f.eks. fortsættelse med fossilt brændsel eller andre alternativer som eksempelvis biogas).

Som reference bruger vi data fra eksisterende kedel- og dampturbinanlæg uden at tage hensyn til eventuelt begrænset restlevetid eller andre udefra kommende krav til øget røgrens eller lign. som kræver investeringer. Priser på varmepumpeinstallationen til Nykøbing er estimeret ud fra budgetpriser som vi har fået fra potentielle leverandører af kompressorstationer (Piller, Lekend, Man Turbo, Atlas Copco etc.). I Table 7 er vist estimering af investeringsbehovet (Capex) for de 4 undersøgte varmepumpe scenarier.

Capex		Ref. Nykøbing	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 4
		Nuværende drift	VP fra TRin6 -> sukkerkog + ekstra Varmeintegration	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C	50 % VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C
Kompressor stationer installeret (2 x Piller 5-trin)	Mio. Kr	0	9.5	51.6	55.2	34.5
Kompressor bygning L x B x h = 25 x 10 x 10 m	Mio. Kr	0	0.0	4.0	4.0	3.0
dampledninger, fundament, strukturer etc	Mio. Kr	0	1.9	10.3	11.0	6.9
Varmevekslere råsaftforvarmning	Mio. Kr	0	1.0	0.0	3.5	1.5
Elttilslutning (3 KM kabel, 3- 20 MW)	Mio. Kr	0	1.0	11.0	13.0	7.0
Projektering	Mio. Kr	0	1.2	7.0	8.0	5.0
Diverse ekstra omkostninger	Mio. Kr	0	2.2	12.6	14.2	8.7
Capex ialt	Mio. Kr	0.0	16.8	96.5	109.0	66.6

Table 7. Capex estimering.

Fuld dampkompression vil kræve en væsentlig forstærkning af elforbindelsen til Nykøbing Sukkerfabrik. Umiddelbart nær ved fabrikken går en 132 kV luftledning og der er en transformator station ca. 3 km fra fabrikken. Usikkerheden på de totale omkostninger vurderes til at være +/- 20 %.

Beregning af simpel tilbagebetalingstid er baseret på Capex fra Table 7 og vist i Table 8 sammen med de antagne udgifter til brændsel og elektricitet m.m. Det bemærkes at der er indregnet et tilskud til energibesparelse efter lov om tilskud til energibesparelser.

Som det fremgår af Table 8, vil tilbagebetalingstiden ligge på 4 til 8 år med de gældende forudsætninger.

Det skal bemærkes at den beregnede tilbagebetalingstid ikke indeholder udgifter eller manglende indtjening ved indkøring af sukkerfabrikken med fuld varmepumpning. Vi vurderer derfor at der kan lægges op til ca. 1 år til den beregnede tilbagebetalingstid.

		Ref. Nykøbing	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 4
			VP fra TRin6 -> sukkerkog + ekstra Varmeintegration	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C	50 % VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C
Energiforbrug (brændsel til damp)	MW	88.9	78.4	27.3	16.4	52.4
Besparelse i brændsel forbrug i forhold til ref	MW		10.5	61.6	72.5	36.5
Elforbrug Varmepumpe inddamper	MW	0	1.9	6.4	7.3	3.65
Elforbrug Varmepumpe koger	MW		0	6.5	6.5	3.25
Dampbehov 3,9 bara fra kedler/turbine	kg/s	33.33	28.89	11.5	6.92	20.13
Damp turbine effekt	MW	8.4	8.4	0	0	4
Fjernvarme effekt (overskudsvarme)	MW	6	6	1	0	3
Samlet merbehov for eleffekt	MW		1.9	21.3	22.2	11.3
COP Varmepumper			5.54	4.78	5.25	5.28
Årlig drifttid	timer	2500	2500	2500	2500	2500
Årlig brændselforbrug	MWh/år	222186	195879	68138	41001	131035
Årlig elforbrug	MWh/år	0	4750	53250	55500	28250
Årlig CO2 udledning (fuelolie)	ton/år	63350	55849	19427	11690	37361
Årlig CO2 besparelse	ton/år	0	7501	43922	51660	25989
CO2 fra externt elköb (0.17 ton/MWh)	ton/år	0	808	9053	9435	4803
Capex	mio. Kr		16.8	96.5	109.0	66.6
Tilskud (salg af energibesparelse 350 kr/MWh), Energibesparelse = (sparet kedel effekt minus VPeffekt*2,5)	mio. Kr		5	26	33	17
Fuel olie pris	kr/MWh	250	250	250	250	250
CO2 Pris	kr/ton	250	250	250	250	250
ElPris	kr/MWh	550	550	550	550	550
Fjernvarmepris (overskudsvarme)	kr/MWh	200	200	200	200	200
Årlig brændseludgift	mio. Kr/år	55.55	48.97	17.03	10.25	32.76
Årlig CO2 udgift	mio. Kr/år	15.84	13.96	4.86	2.92	9.34
Årlig el merudgift	mio. Kr/år	0	2.61	29.29	30.53	15.54
Årlige vedligeholdelsesomkostninger	mio. Kr/år	1	1.05	0.97	1.09	0.67
Årlig indtægt fjernvarme	mio. Kr/år	3	3	0.5	0	1.5
Sum OPEX	mio. Kr/år	69.38	63.59	51.64	44.79	56.80
OPEX Besparelse i forhold til REF	mio. Kr/år	0.00	5.79	17.74	24.60	12.58
TBT i forhold til REF	År		2.04	3.99	3.08	3.96
Mistede indtægt på roepulp salg	mio. Kr år					
NPV 10 år (5 % rente af kapital)	mio. Kr	0	43	86	148	61
TBT uden tilskud	År	0	2.91	5.44	4.43	5.29

Table 8. Beregning af Opex og simpel tilbagebetalingstid.

11.1 Følsomhedsanalyse

Der er lavet følsomhedsanalyse (se Figure 13) på tilbagebetalingstid ved variationer i priser på el, olie og CO2 kvoter, som angiver herunder.

Elpris: 400 – 700 Kr/MWh (basis 550)

Oliepris: 150 – 350 Kr/MWh (basis 250)

CO2pris: 150 – 350 Kr/tons (basis 250)

Investering: +/- 20 %

Uden Tilskud:

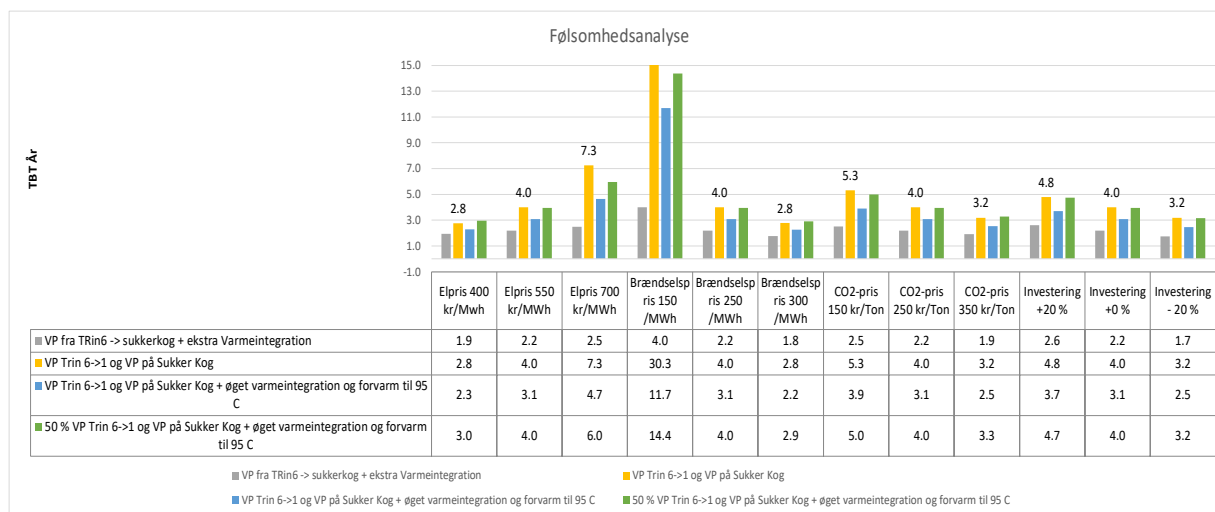


Figure 13. Resultater af følsomhedsanalyse på priser af el, olie og CO2 kvoter.

11.2 Samfundsøkonomisk omkostning til CO2 reduktion

Man kan alternativt til virksomhedsøkonomi lave en simpel samfundsøkonomisk beregning, hvor man i stedet beregner en slags ”skyggepris” for CO2, forstået som den pris som CO2 skal have for at sammenligningen med alternativet går i balance over en fastsat tidshorisont.

Hvis vi vælger en tidshorisont på 10 år og en diskonteringsrente på 5 % får man en CO2 skyggepris på mellem -259 kr og 84 kr/ton CO2. Denne pris er langt lavere end hvad der f.eks. kan opnås ved omstilling til biogas eller biobrændsler.

		Ref. Nykøbing	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 4
			VP fra TRin6 -> sukkerkog + ekstra Varmeintegration	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog	VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C	50 % VP Trin 6->1 og VP på Sukker Kog + øget varmeintegration og forvarm til 95 C
CAPEX	mio. Kr					
horizont (ved bregning af skyggepris)	år	10	10	10	10	10
WACC (vægtede årlige omkostninger af kapital)	%	5%	5%	5%	5%	5%
Årlig Capital cost (uden tilskud)	mio. Kr	0.00	2.18	9.70	10.95	6.69
Årlig Opex (excl. CO2 udgift)	mio. Kr	53.55	49.63	46.79	41.86	47.46
Skyggepris CO2 (10 år)	kr/Ton		-259	84	-17	29

Table 9. Beregning af ”skyggepris” for CO2 udledning ift nuværende varmeproduktion baseret på fyring med HFO.

Nedenfor er til sammenligning udført en tilsvarende meget simplificeret beregning af ”skyggeprisen for CO2” hvis man laver biogas af roepulpen. Vi har her regnet med at biogaspotentialet i roepulpen er 54 MW (ud fra roepulpen) som opgraderes til naturgas kvalitet og bruges på eksisterende kedler hos Nykøbing Sukkerfabrik. Af tabellen fremgår at skyggeprisen for CO2 ved omstilling til biogas er langt større end ved brug af varmepumpning. Den primære årsag til den høje skyggepris for biogasanlægget er den forholdsvis høje investeringspris (ca. 540 mio. kr) for et anlæg som producerer gas svarende til en effekt på 54 MW. Ved biogas er der ikke indregnet investeringsomkostninger i naturgasledning til Sjælland.

Bemærks at hvis roepulpen har en værdi på 800 kr/ton tørstof (nogenlunde svarende til prisen for flis) vil skyggeprisen stige meget (som foderpiller er den formodentlig meget mere værd).

		Biogas	Biogas v. værdi pulp på 800 kr/ton TS	Biogas GT + VP	Flis kedel
		Biogas Roepulp uden værdi af Pulp (vil være forskudt ca. 30 dage)	Biogas Roepulp med værdi af Pulp (vil være forskudt ca. 30 dage)	Biogas Roepulp uden værdi af Pulp (vil være forskudt ca. 30 dage)	
CAPEX	mio. Kr	501	501	842	400
horizont (ved beregning af skyggepris)	år	10	10	10	10
WACC (vægtede årlige omkostninger af kapital)	%	5%	5%	5%	5%
Årlig Capital cost (uden tilskud)	mio. Kr	50.40	50.40	84.61	40.21
Årlig Opex (excl. CO2 udgift)	mio. Kr	23.81	36.04	8.03	52.54
Skyggepris CO2 (10 år)	kr/Ton	537	855	621	656

Table 10. Beregning af "skyggepris" for CO2 udledning ift fyring med biogas produceret med roepulp.

11.2.1 Indpasning i det danske energisystem

Vi forventer en stigende andel af vindkraft i nettet. Det primære varmebehov i sukkerkampagnen ligger i perioden fra sidste halvdel af september til medium januar. Kampagnen ligger således inden for den periode, hvor der typisk er stor vindproduktion i Nordeuropa. Af Figure 14 fremgår at den største vindkraft typisk produceres i vinterhalvåret (oktober til marts). Der forventes endvidere udbygning med varmepumpning til fjernvarme og boligopvarmning, hvor det store varmebehov typisk først starter i slutningen af kampagnen. I den forstand er elektricitetsefterspørgslen ifm varmepumpning i sukkerproduktion ret godt tilpasset det forventede fremtidige energisystem.

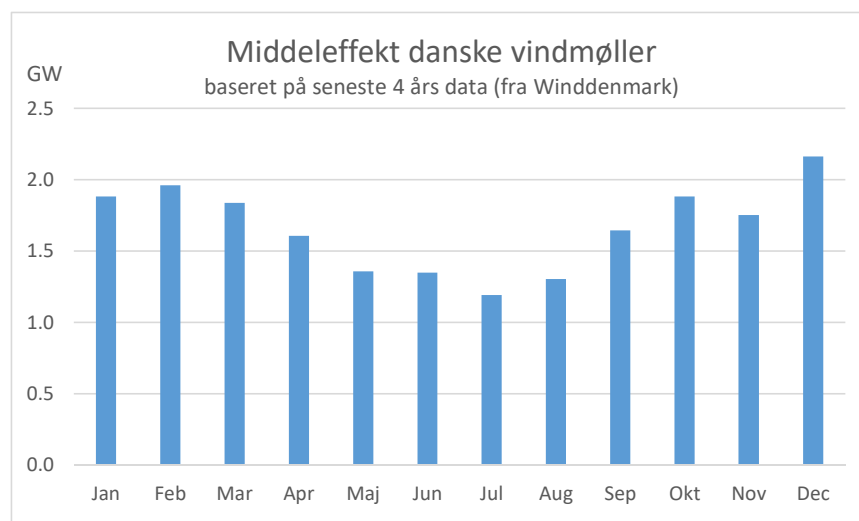


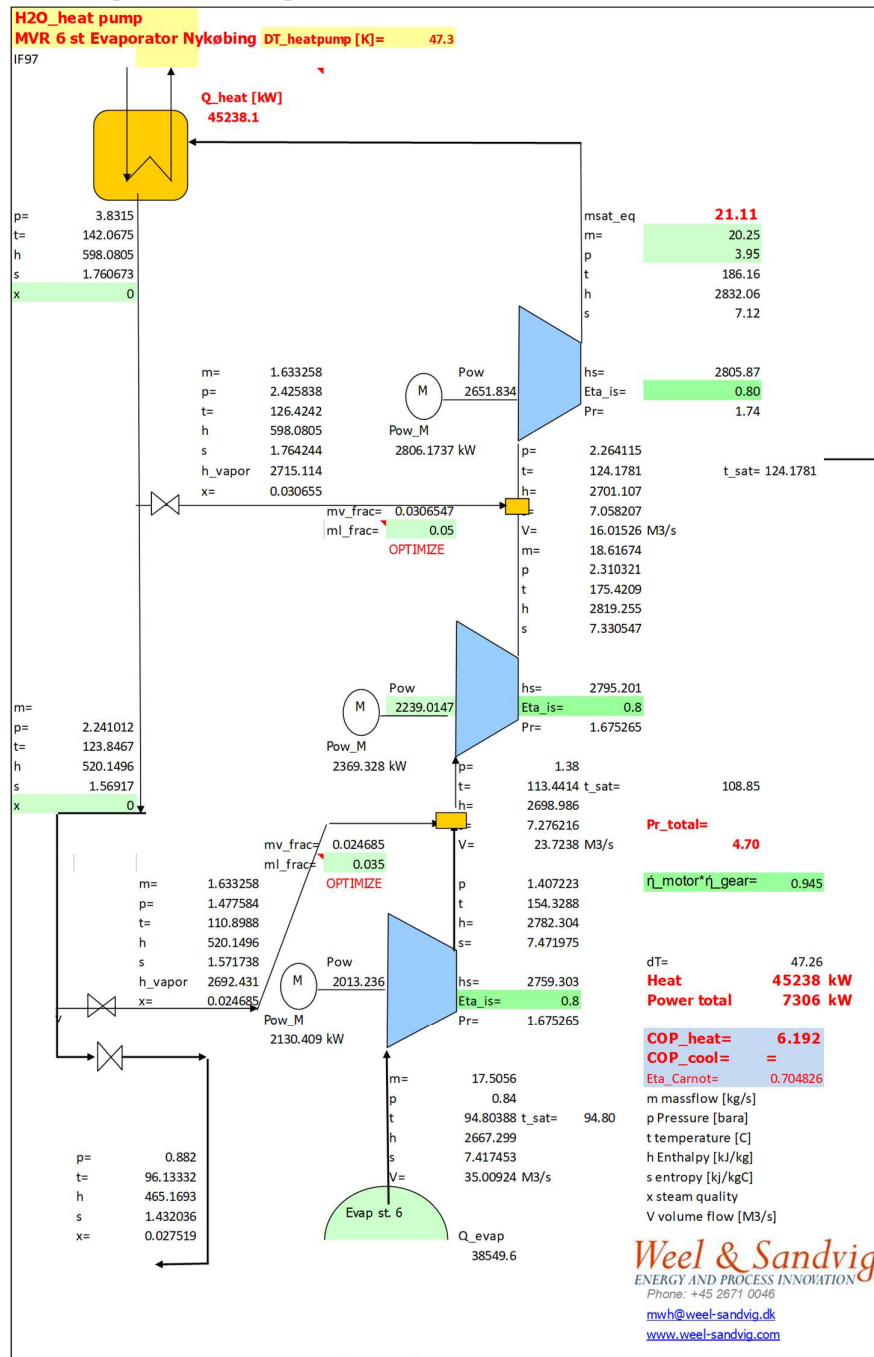
Figure 14. Vindkraft fra danske vindmøller (månedsvise produktion seneste fire år).

12 Appendix

12.1 Energibalancer

12.1.1 Dampkompressor over inddamperen

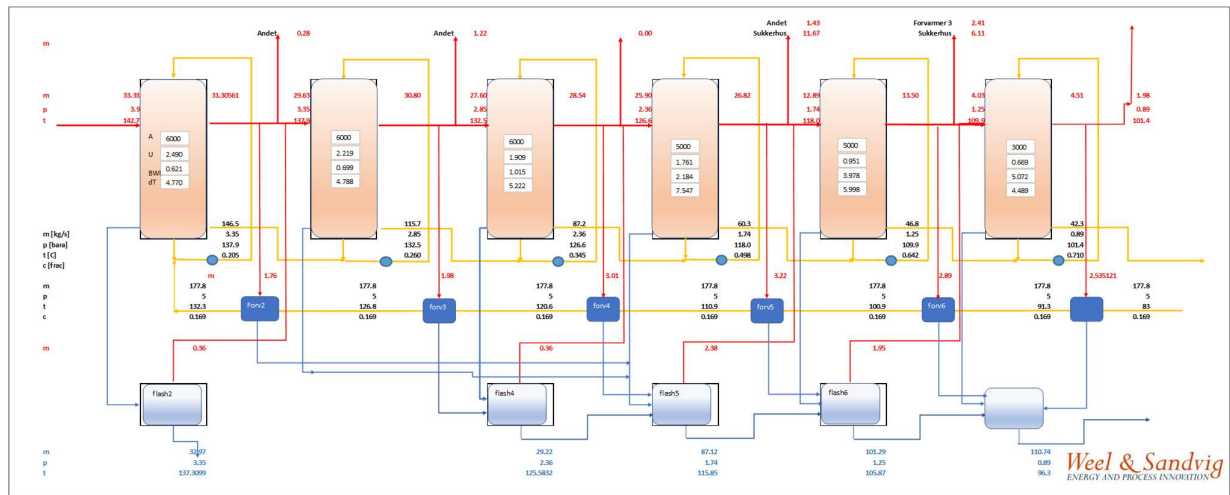
Simplificeret energibalancer for en 3-trins kompressor med de-superheating vha. vandinjektion og flashdamp mellem kompressortrinene svarende til scenarie 3.



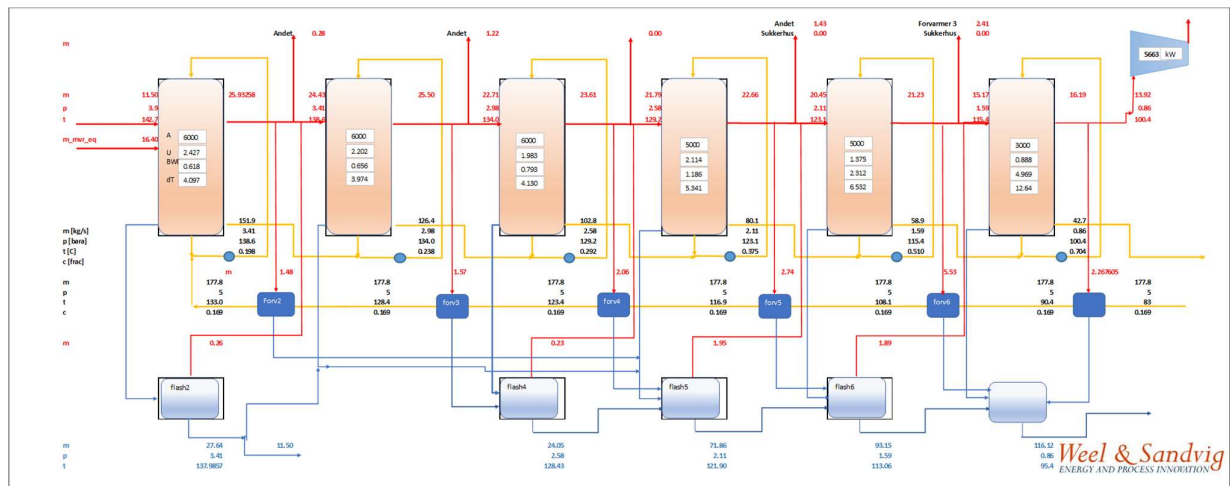
Simplificeret energibalance for en 3-trins kompressor med de-superheating vha. vandinjektion og flashdamp mellem trinene på sukkerkogerne (scenarie 3).



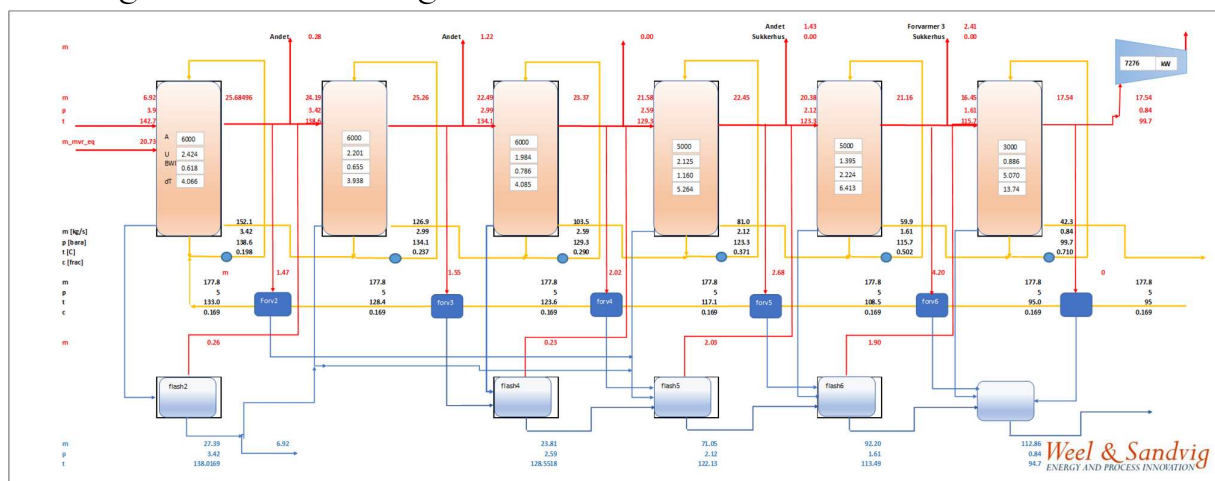
12.1.3 Ref. inddamper balance



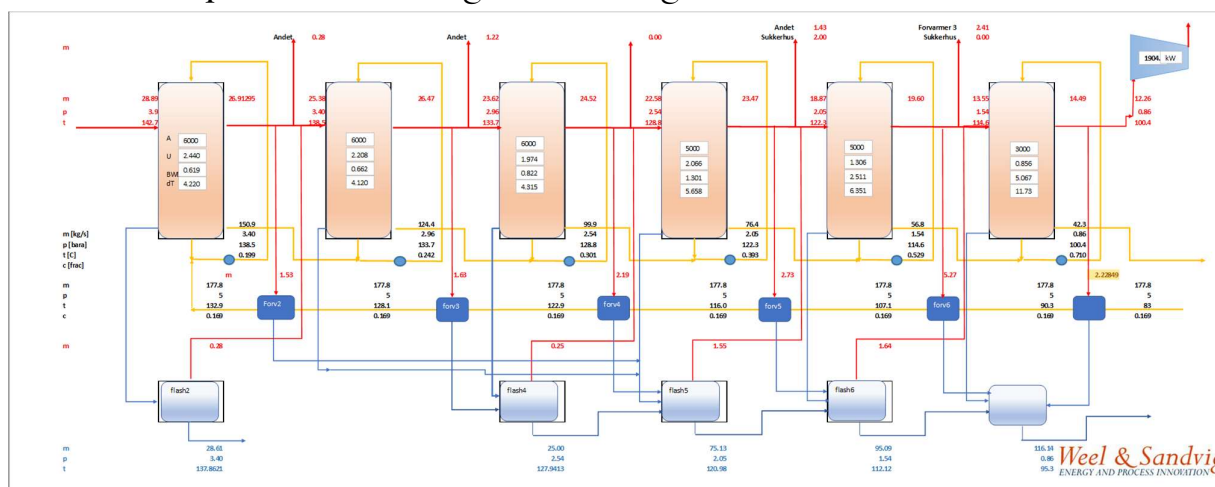
12.1.4 Scenarie 2: Dampkompression fra trin 6 til trin 1



12.1.5 Scenarie 3: "Fuld varmepumpning" som scenarie 1 men med øget saftforvarmning

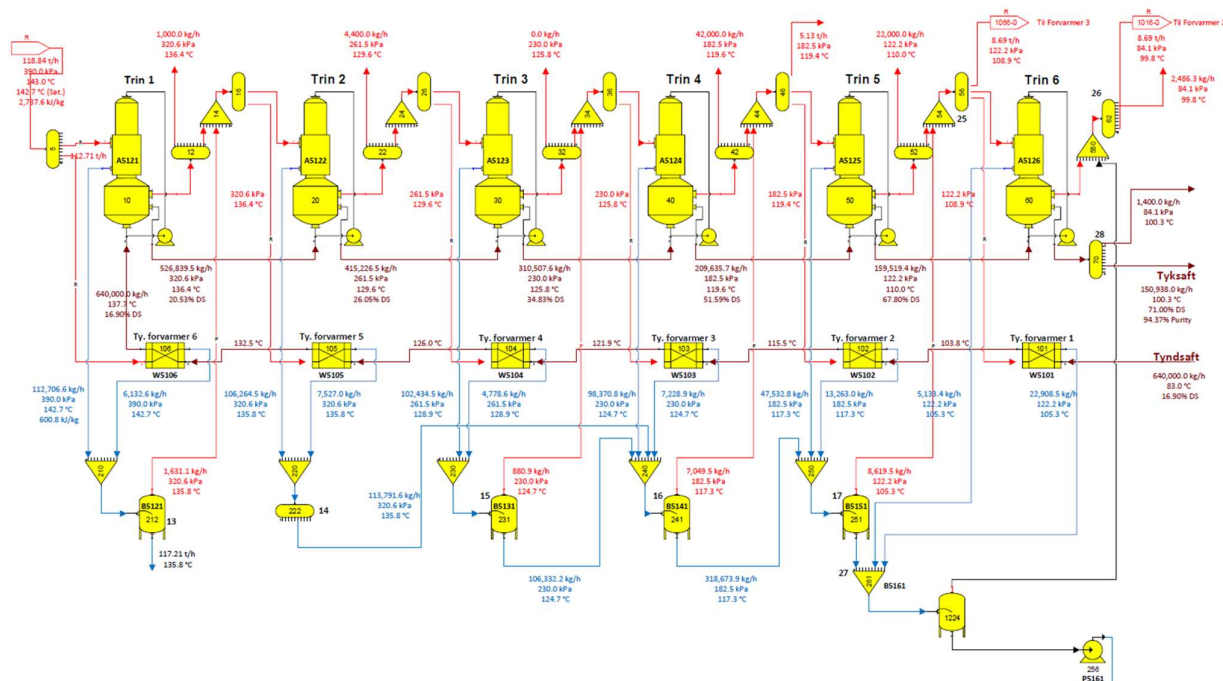


12.1.6 Scenarie 1: Varmepumpe som tager damp fra trin 6 og rekomprimerer til brug i sukkerkogere.



12.1.7 Heat balance evaporator by Nordic Sugar

Heat balance by Lars Lyskov Jensen, Nordic Sugar udført i flowsheeting simulator Sugars™.



Forklaring til udtag:

Dampudtag fordampnerstation – forklaring

Fra trin 1: 1.000 kg. Udtaget eksisterer ikke længere. Var til grønttørrieri.

Fra trin 2: 4.400 kg. Til dysekompression

Fra trin 4: 42.000 kg. Damp til kogesale. A og B kogearrater.

Fra trin 4: 5.130 kg til opvarmning af diffusionstrug

Fra trin 5: 22.000 kg. Damp til kogesale, primært B og C.

Fra trin 5: 8.690 kg. Til kalksaftopvarmning.

Fra trin 6: 8.690 kg til kalksaftopvarmning.

Fra trin 6: 2.486 kg. Kondensatortab.

12.2 Energibalance og pinch-analyse.

For at sikre en robust sammenligning mellem basisenergiforbruget og scenarier med varmepumpning er der på forbrugssiden lavet antagelser som anført i Table 11. I tabellen udtrykker “% pr” det relative forbrug i forhold til roe-indtaget. Hvis der er damp vil “% pr” referere til den relative mængde af standard damp med et latent varmeindhold på (2218 kJ/kg).

Parameter		
Beet intake (12600 ton/day)	ton/h	526
Sugar content	frac	0.15
Dissolved non sugar	frac	0.02
Dry matter non soluble (fibers etc)	frac	0.045
Beet temperature	C	8
Draft diffusion		1.21
Raw (thin) Juice preheating temperature	C	83 ->95 C
Thin juice preheating temperature	C	130
Raw pulp temperature after diffusion	C	65
Evaporation in the evaporator	% pr	96.26
Evaporation in sugar pans (A + B + C)	% pr	11
Water content pulp after press station	%	72
Recycle water A & B og C sugar in sugar house	% pr	10

Other steam users

Parameter		
Steam to diffusion (Evap. stage 2)	% pr	0.84
Steam to miscellaneous use in sugar hours (Evap. Stage 4)	% pr	1.00
Steam for raw juice preheating (from Stage 5)	% pr	1.65
Steam for raw juice preheating (from Stage 6) (<u>existing design</u>)	% pr	2.75
Steam for raw juice preheating (from sugar pans) (<u>existing</u>)	% pr	3.00

Table 11. Major assumptions for the energy balance.

12.2.1 Pinch-analyse

Der er udført en simpel pinch-analyse for at sikre at der er tilstrækkelig varme til råsaftforvarming m.m. De kolde og varme strømme som indgår i analysen er vist i Table 12. Bemærk at der er indregnet en saftforvarmning på 95 C inden denne tilføres til inddamperen. Kompositkurverne (se Figure 15) viser at der mangler ca. 3 MW hvis man bruger en mindste temperaturdifferens på 5 C. Man kan dog nå en forvarmningstemperatur på 90 C uden brug af ekstra varme.

Et varmevekslernetværk som kan opfylde dette mål er vist i Figure 16). Det totale varmevekslerareal er beregnet til ca. 9000 m² fordelt på 7 pladevarmevekslere.

	Mkg/s	CP [kJ/kgK]	Tind	Tud	Q [MW]	
Råsaft	195.9	3.91	30.8	83	39.98	cold
Tyndsaff	177.6	3.94	83	95	8.40	cold
Splidevand	125	4.1864	12	38	13.61	cold
kondensat	131	4.1864	110	70	22.43	hot
Splidvand fra biogas	125	4.1864	38	20	9.42	hot
Dampudtag trin 5	2.54	2100	112	111	5.33	hot
Overskudsdamp koger	2.85	2100	70	69	5.99	hot
Kondensat 2	96	4.1864	70	20	20.09	hot

Table 12. Varme og koldestrømme som indgår i the pinch analysen

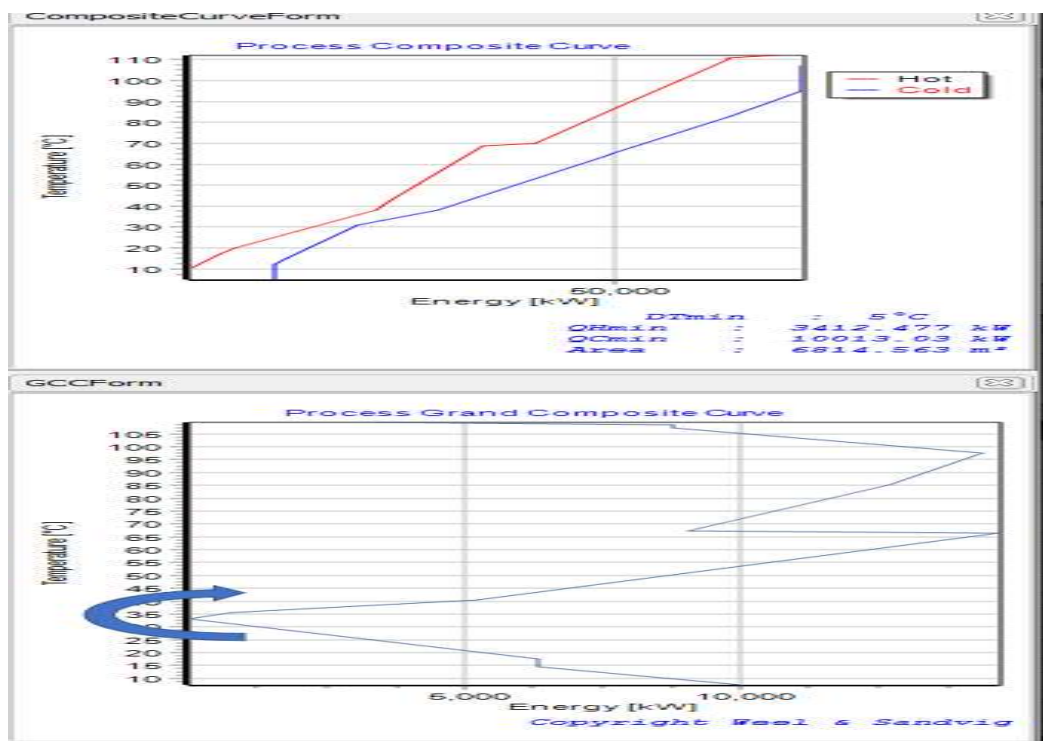


Figure 15. Pinch kompositkurver med en minimum temperaturdifferens på 5 K er nødvendigt for at sikre råsaftforvarmning alene kan ske ud fra spildvarme.

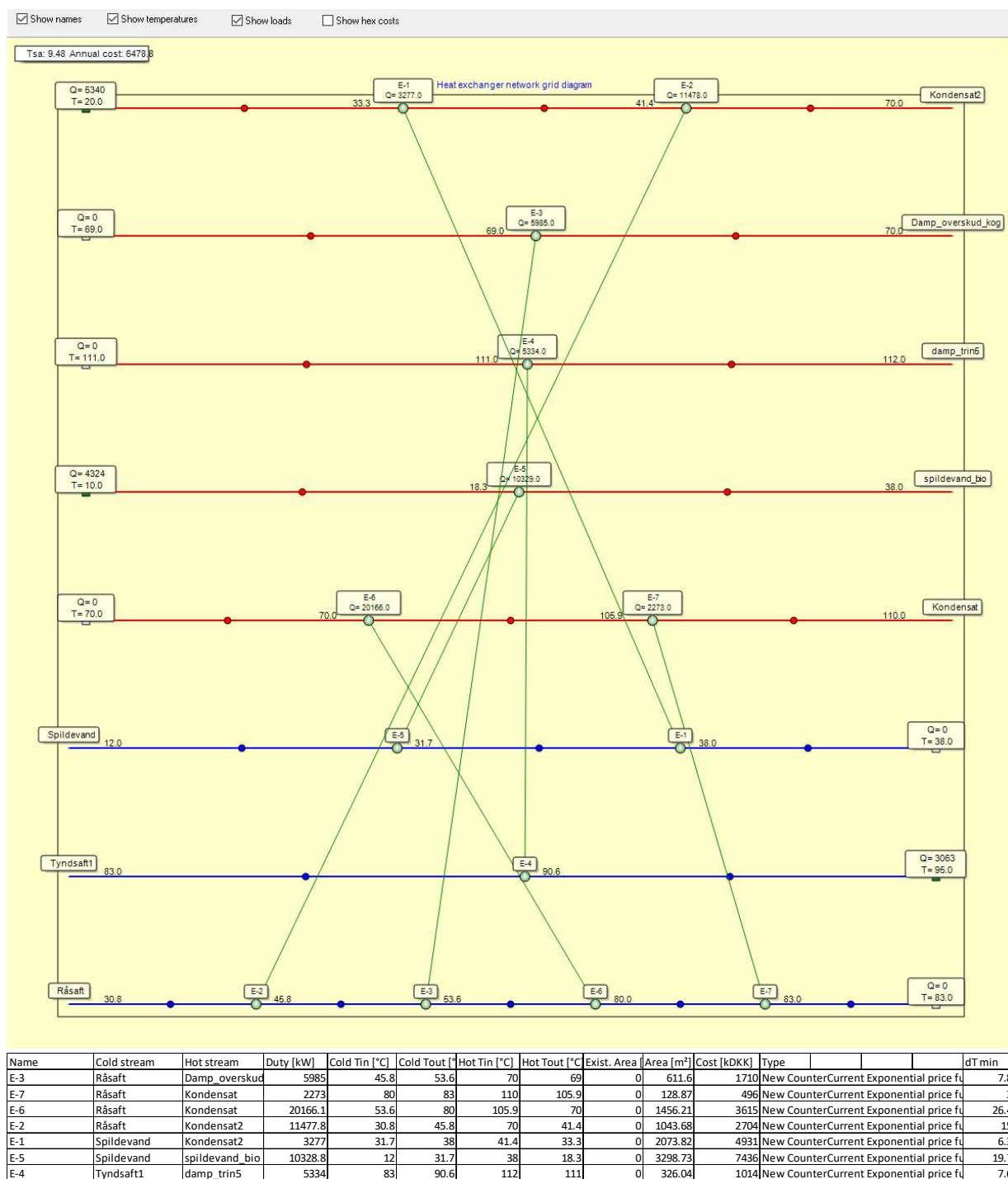
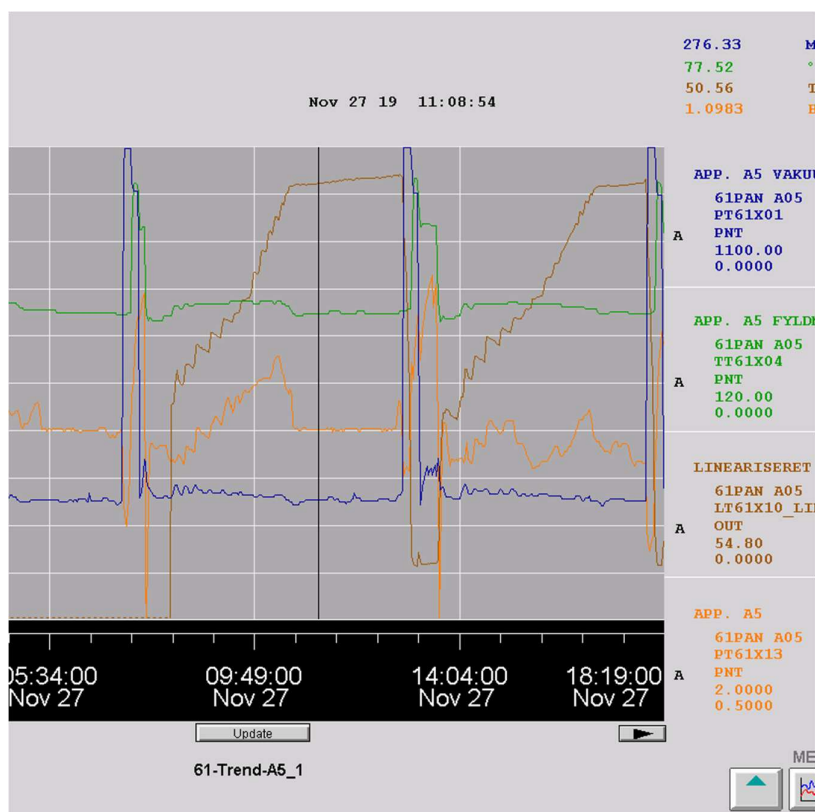


Figure 16. Varmevexlernetværk til råsaftforvarmning m.m ved fuld varmepumpeintegration.

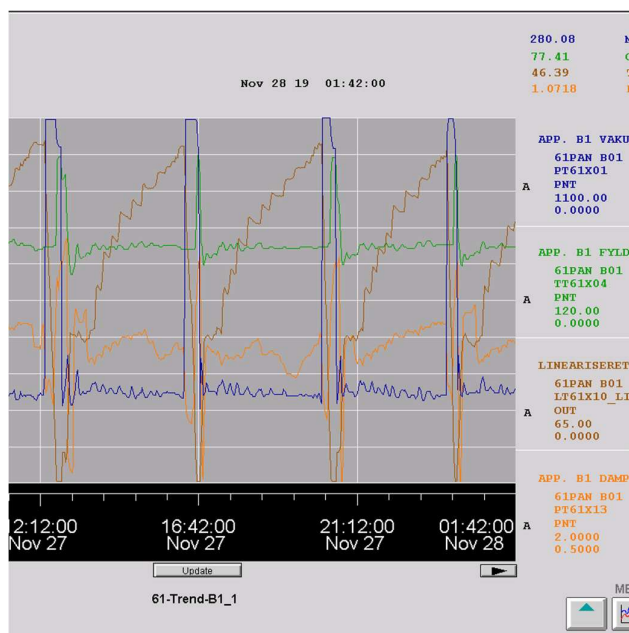
12.3 Driftsdata

12.3.1 Sukkerhus

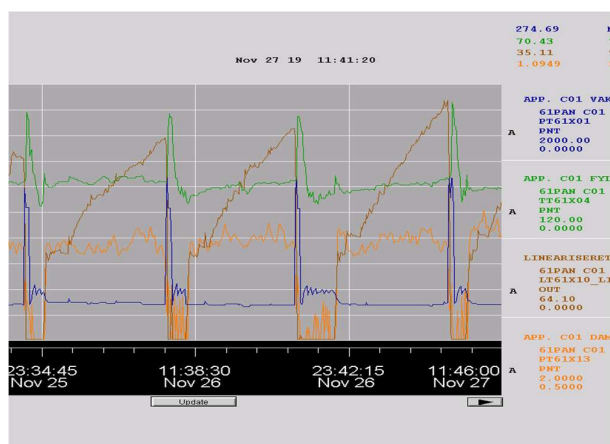
Nedenfor er vist nogle typiske trends af tryk, temperatur og fyldning for sukkerudkrystallisering i sukkerkogerne fra november 2019 (A, B og C apparater). Det bemærkes at trykket på dampside er ca. 1,1 bara og på sukkersiden 0,275 bara den pågældende dag for de viste apparater. Når sukkerkogningen er færdig øges trykket over væsken ved tilsætning af damp for at trykke sukkermassen ud af kogeren til centrifugerne.



		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Damp min.	bara	0.90	1.20	1.15	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20
Damp forkoncentr.	bara	1.15	1.42	1.40	1.30	1.40	1.40	1.46	1.52	1.50
Damp koncentration	bara	1.00	1.38	1.30	1.20	1.20	1.30	1.35	1.30	1.30
Damp slut	bara	1.18	1.50	1.45	1.28	1.32	1.50	1.37	1.38	1.38
Dampkurve		7	7	7	7	7	7	7	7	7
Kurve startpunkt	T	28.0	30.0	30.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Kurve slutpunkt	T	48.0	60.0	57.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
Podemasse	KG	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Anbefalet podemasse	KG	2530 #	2860 #	2860 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #
Fyldeniveau	T	18.0	24.5	24.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
Max niveau uddynding	T	24.0	32.0	32.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Fuld niveau	T	50.0	62.0	69.5	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0



		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Damp min.	bara	0.90	1.20	1.15	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20
Damp forkoncentr.	bara	1.15	1.42	1.40	1.30	1.40	1.40	1.45	1.52	1.50
Damp koncentreret	bara	1.00	1.38	1.30	1.20	1.20	1.30	1.35	1.30	1.30
Damp slut	bara	1.18	1.50	1.45	1.28	1.32	1.50	1.37	1.38	1.38
Dampkurve		7	7	7	7	7	7	7	7	7
Kurve startpunkt	T	28.0	30.0	30.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Kurve slutpunkt	T	48.0	60.0	57.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
Podemasse	KG	600	500	500	500	500	500	500	500	500
Anbefalet podemasse	KG	2530 #	2860 #	2860 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #	2530 #
Fyldeniveau	T	18.0	24.5	24.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
Max niveau udynding	T	24.0	32.0	32.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Fuld niveau	T	50.0	62.0	59.5	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0



		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Damp min.	bara	1.10	1.10	1.10	0.90	0.90	0.90
Damp forkoncentr.	bara	1.35	1.35	1.35	1.15	1.00	1.00
Damp koncentreret	bara	1.25	1.10	1.27	1.05	0.90	0.90
Damp slut	bara	1.35	1.20	1.35	1.35	1.15	0.90
Dampkurve		7	7	7	7	7	7
Kurve startpunkt	T	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Kurve slutpunkt	T	55.0	55.0	53.0	54.0	55.0	55.0
Anbefalet flormængde	G	110 #	110 #	110 #	110 #	110 #	110 #
Flormængde	G	100	100	100	110	100	100
Fyldeniveau	T	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	24.0
Max niveau udynding	T	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	30.0
Fuld niveau	T	60.0	59.0	55.0	56.0	58.0	59.0
Std. B mængde	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C2 mængde	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

C2 mængde beregner

BEREGN BEREGN BEREGN BEREGN BEREGN BEREGN

Tabellerne er et skærmsprint af styresystemet for kogeprogrammet i Foxboro (SRO/Scada system)

De relevante tryk er damp koncentreret og damp tryk. For apparat A1 starter kogningen på 1 bara og ender på 1,18 bara efter 2 timer. Damp forkoncentreret er trykket under indtrængning i starten inden podning, og varigheden af dette step er ca. 15 minutter. (beskrivelse modtaget af Cristian Nygaard, Nykøbing Sukkerfabrik)

12.4 Mulig placering af kompressorstationer

Under et anlægsbesøg den 19. juni 2019 viste C. Nygaard mulige placeringer for installation af dampkompressorstationer. Generelt har områderne meget begrænset plads til nyt anlægsudstyr. For at reducere tryktab i damp rør skal kompressorstationerne placeres så tæt som muligt på den tilgængelige damp på sugesiden samtidigt med at der skal være ret store dimensioner af sugedamplødnings (lavt tryk). Vi har fra OEM modtaget nogle vejledende tegninger af kompressorstationer, der har samme størrelse, som angiver, at de fleste af de placeringer, der påpeges som mulige placeringer internt i sukkeranlægget, er utilstrækkelige i det mindste hvis rørsystemet mellem kompressionstrinnene ikke er skræddersyet til den specifikke installation. Vi forventer en længde på mindst 10 meter til en dampkomprimeringsstation. Bygningen der rummer /grænser op til inddamperanlægget har et område i den anden side (se Figure 17) som muligvis er tilstrækkelig. En del af rørføringer og mellemkøling kan muligvis arrangeres i kælderen.



Figure 17. Mulig placering af dampkompressor stationer i "inddamperhallen" ud mod parkeringsområdet.

Et andet alternativ er opførelse af en ny kompressorbygning på området foran sukkerhusbygningerne som vist i figur 18. I dette alternativt regens med en bygning på 26 x 10 x 10 m, hvor kompressoren står på to etages.

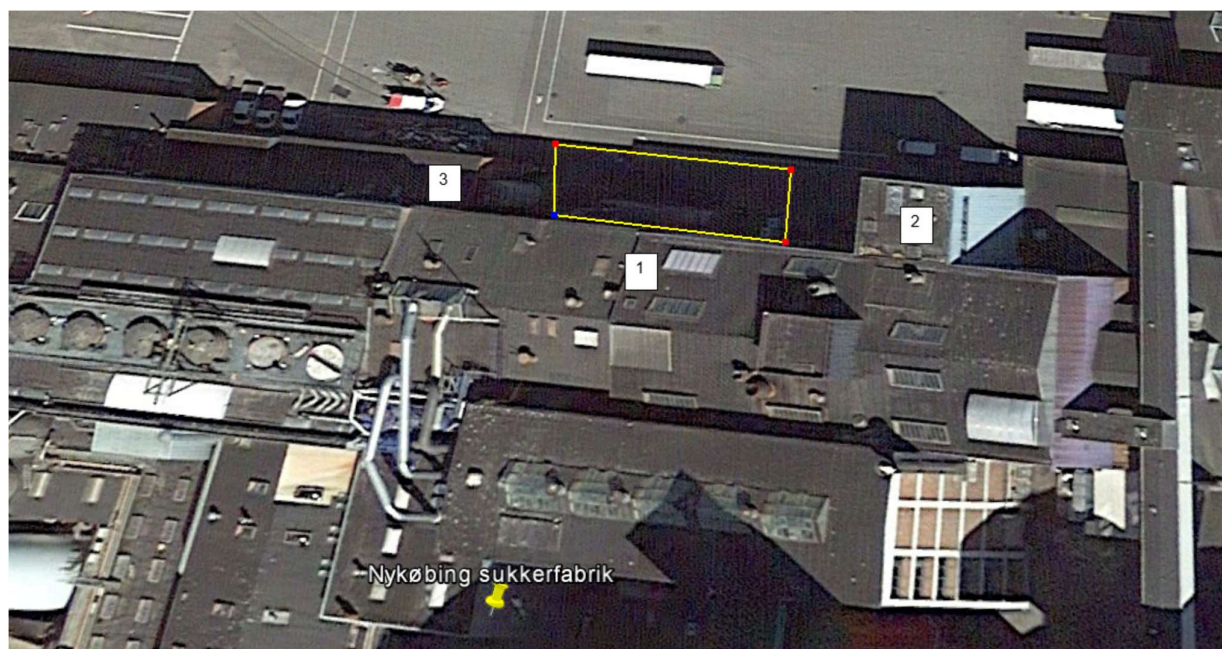


Figure 18. Ny kompressorbygning på 26 x 10 x 10 m. Både kompressorer til sukkerhus og inddamper står i bygningen.

I Figure 19 er vist skitse af en 5-trins kompressor station, hvor hvert trin har individuel motordrev. Der skal i dette tilfælde bruges to styk 5-trins kompressor-stationer, den ene til sukkerhus og den anden til inddamperen. Fordelen ved denne placering er at kompressorstationen kommer så tæt som muligt på sukkerkogeriet (1), som kræver de største rørdimensioner til damp. Den gule firkant er nogenlunde 26 x 10 m.

Ifølge C. Nygaard, Danisco Sugar skal dækket, som kompressorerne skal stå på, op i en højde af 6 meter da den blå tårnbygning (2) til højre for den tænkte placering er en udlastebygning for bulk med høj lastbilsaktivitet. Endvidere begrundes placeringen med at en ny stålbygning med præisolerede elementer er overskuelig at bygge og den vil være rimelig at støjdampe med længere afstand til naboer og gode tilgangsforhold, hvis der skal kranes maskineri ud/ind. Endelig er rørføringsmuligheder (pladsforhold) gode og elværk med 10 kV tavleanlæg er placeret i nabobygningen (3).

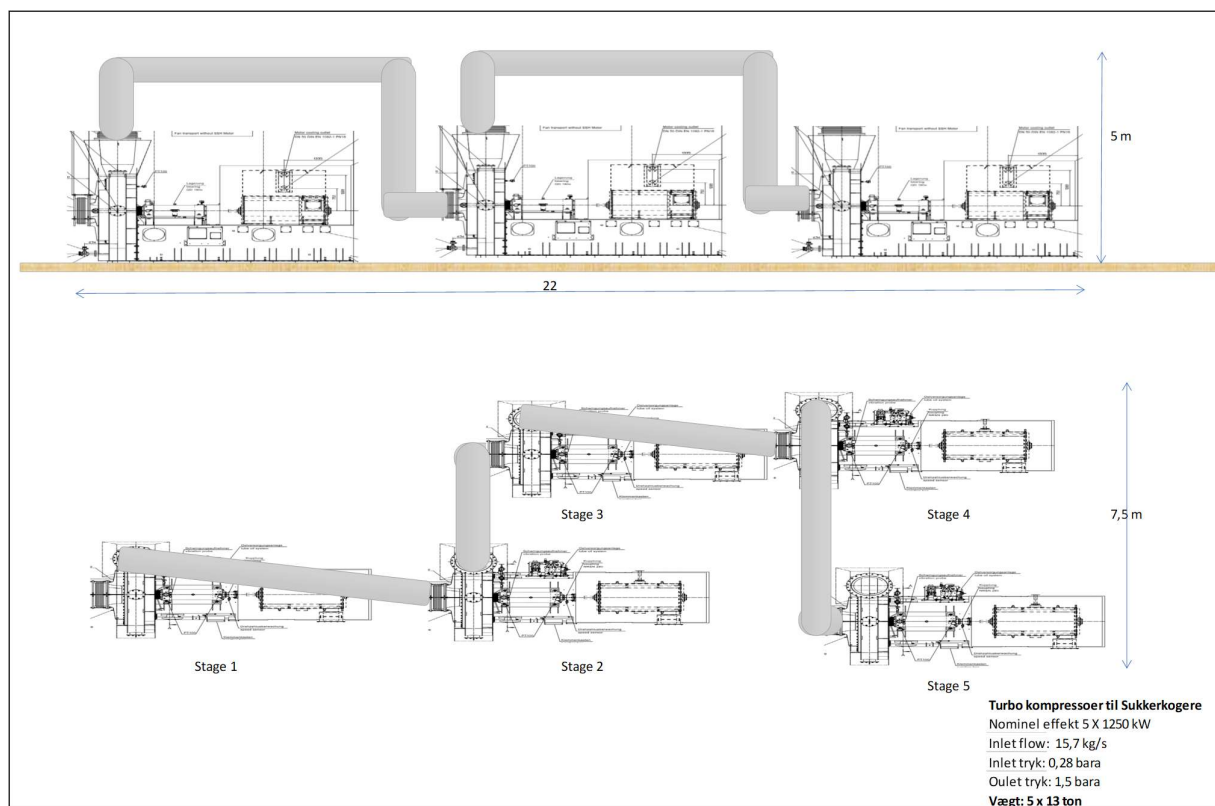


Figure 19. Skitse af Turbokompressor setup til sukkerhus. Til inddamperen vil det være nogenlunde tilsvarende.

12.5 Turbokompressorer på sukkerfabrikker

Turbokompressorer, der delvist fungerer på fordampningen i sukkerfabrikker, har været brugt i årtier. Især i 1980'erne kom intern varmepumpning baseret på dampkomprimering frem, ikke kun sukkerindustrien men også andre typer procesindustri, efter markant stigning i omkostningerne til brændstoffer i 1970'erne. I løbet af de sidste to eller tre årtier har etablering af nye dampkompressions-varmepumpeanlæg i industrien befundet sig på et lavere niveau. En årsag er sandsynligvis, at omkostningerne ved brændstof er vendt tilbage til et ret billigt niveau i det meste af denne periode sammenlignet med omkostningerne ved elektricitet.

I Danmark har sukkerfabrikker i både Nakskov og Gørlev brugt mindre dampturbinedrevne turbokompressorer som en højeffektiv erstatning for tidligere mindre effektive eller mindre fleksible termokompressorer. Den typiske integration af en turbokompressor i et inddamperanlæg er genkomprimering af en del af dampen fra trin 2 eller trin 3 tilbage til trin 1. I Nakskov blev turbokompressoren taget ud af drift i forbindelse med ombygning af inddamperanlægget.

Omfattende dampkomprimering eller varmepumpning er blevet anvendt i den største sukkerfabrik i Aarberg, Schweiz. På sukkerfabrikken er eldrevne dampkompressorer blevet brugt på fordampnings- og krystallisationsanlægget (sukkerkogerne) siden 1946 og frem til 90'erne, hovedsageligt på grund af billig hydrobaseret elektricitet.

En liste over referencer (nogle er muligvis ikke i drift længere) af dampkompressorer på sukkerfabrikker er vist i Table 14 (Kilde ref. Tabel 1 og Tabel 2). Som vist er det anvendte temperaturløft mellem 5 og 46° C og den komprimerede dampstrøm fra 5-125 ton/t. Til sammenligning har de foreslåede varmepumpeløsninger i Nykøbing et temperaturløft, flow, trykforhold og effekt som vist i

Table 13. Den foreslåede varmepumpning i Nykøbing er mere omfattende end nogen tidligere sammenlignelig sukkerfabrik. De fleste referencer til inddampere arbejder med et temperaturløft på 5 - 20 C, hvilket indikerer, at kompressoren fungerer mellem fordampningstrin 1 - 3, mens det foreslåede system i Nykøbing skal køre over alle 6 inddampertrin.

Scenarie 3	Unit		Inddamper kompressor	Sukkerhus kompressor
Temperatur løft	K		47,3	43
Dampflow (discharge saturated)	Ton/h		76	64
Trykforhold PR			4,7	4.7
Elektrisk effekt	MW		7,3	5

Table 13. Temperaturløft, dampstrøm, trykforhold (PR) og eleffekt for varmepumper på Nykøbing Sukkerfabrik.

Table 1: Vapor compressors for sugar crystallization						
Factory	Year of installation	Type of evaporating crystallizer	Vapor compressions			Reference
			Mass flow in t/h	Temperature rise in K	Power in kW	
Aarberg, Switzerland	1946	batch, no stirrer / all products	27	46	2900	2, 3
Erstein, France	1982	FCB* / white sugar	5	39	680	4
Bucy-le-Long, France	1982	FCB / White sugar	14	38	1250	4
Aarberg, Switzerland	1991	VKT* / all products	25	28	2000	5
Al Khaleej Sugar, UAE	2005	VKT / refinery white sugar	27	30	7090	6

* FCB Fives Cail Babcock; VKT continuous evaporating crystallization tower

Table 2: Vapor compressors for evaporation (beet processing)						
Factory	Year of installation	Type of evaporator	Vapor compressions			Reference
			Mass flow in t/h	Temperature rise in K	Power in kW	
Aarberg, Switzerland	1946–1985	<i>Robert</i>	125	10.4	2500	2, 3
Bury St. Edmunds, UK	1979	<i>Robert</i>	82	8.8	1460	7
Appeldorn, Germany	1981	<i>Robert</i>	60	7	1500	8
Guignicourt, France	1983	Falling film	60	5.6	1100	9
Nakskov, Denmark	1986	<i>Robert</i> , 2 effects	50–60	20	2800	10
Aarberg 2	1984	<i>Robert</i> , 2 effects	57	11	1840	11

Sugar Industry / Zuckerindustrie 135 (2010) No. 6, 354–359

Table 14. Referencer med varmepumpning i sukkerindustri. (Kilde: Zuckerindustrie 135 (2010) No. 6).

I dag (og også forventet fremover) er den globale tendens et krav om væsentlig reduktion i emissioner af drivhusgasser (CO₂ m.fl.). Mange steder falder drivhusgasemissionerne allokeret til elektricitet i nettet, da fossilt brændstof til elproduktion erstattes med kilder som vind, sol eller biomasse, der alle indtil videre betragtes som nul-emission af CO₂.