



Center for Energieffektivisering og Ventilation

Værktøj til systemoptimering

- PSO-projekt 348-011

Maj 2019

Forord

Der findes betragtelige energibesparelspotentialer ved at dimensionere elmotordrevne maskinsystemer rigtigt fra start. At dimensionere maskinsystemerne rigtigt fra start betyder, at der foretages rigtige valg og sammensætning af komponenter (applikationer, transmissioner, motorer og styrings- og reguleringsudstyr) fra start. I Den store Blå om systemoptimering er der foretaget en grundig kortlægning af elforbruget til motordrevne maskinsystemer samt en vurdering af det tekniske besparelspotentiale ved systemoptimeringen. I Den store Blå om systemoptimering ses, at det samlede besparelspotentiale er opgjort til 1.200 GWh svarende til 19 % af det nuværende elforbrug til motordrevne maskinsystemer i industrien eller 15 % af industriens nuværende elforbrug. Det er et ganske betragteligt besparelspotentiale.

For at kunne realisere dette store energibesparelspotentiale er det nødvendigt at have et velegnet værktøj. I ELFORSK projekterne nr. 341-014 "Værktøj til systemoptimering" (afsluttet primo 2011) og projekt nr. 344-008 "2. generationsværktøj til systemoptimering" (afsluttet ultimo 2013), blev der udviklet et avanceret men stadig meget brugervenligt værktøj til systemoptimering. Det vurderes dog, at der er behov for en videreudvikling og optimering af værktøjet, da der bl.a. på motorområdet er sket og sker en rivende udvikling, som bør adresseres i værktøjet.

Det vurderes endvidere at værktøjet ikke er komplet, da de ikke kan håndtere alle de væsentlige applikationer der findes i industrien. Det drejer sig om trykluftkompressorer, kølekompressorer og hydraulikpumper. Ifølge Den store Blå om systemoptimering anvendes en væsentlig del af industriens elforbrug (skønsmæssigt 30 %) til elmotordrevne maskinsystemer med disse applikationer. Der udvikles nye algoritmer for de tre applikationer som inkorporeres i værktøjet.

Den avancerede energiberegnerdel i det nuværende værktøj videreudvikles således at den kan håndtere de forskellige reguleringsformer der benyttes i før og efter situationen. Det drejer sig om de typisk anvendte reguleringsformer for de tre applikationer.

Værktøjet kan lige nu heller ikke håndtere motorer med synkron reluktans (typiske betegnelser: SRM eller SynRM), som er en relativt nye teknologier inden for elmotorer. Motorer med synkron reluktans er en teknologi der pt. er ret ukendt og projektet skal være med til at synliggøre at der findes et alternativ til den meget energieffektive PM-motor teknologi. Værktøjet udbygges derfor til at kunne håndtere denne motortyper.

I forbindelse med dette foretages der tests i både TI's motorlaboratorium og in situ. Tests i TI's motorlaboratorium vil bl.a. indbefatte målinger på motorer med synkron reluktans ligesom der vil eftervises tendenser på virkningsgrader som funktion af belastningen på både helt små asynkronmotorer samt frekvensomformere.

Små elmotorer fra 0,12 kW – 0,75 kW er en del af det nye "scope" i den kommende Ecodesign regulering, ligesom frekvensomformere forventes at indgå som selvstændig komponent med separate energikrav.

Projektgruppen er via andre internationale projekter i tæt kontakt med flere uafhængige universiteter og institutter i både Europa og resten af verden, og der udveksles således løbende viden og erfaring igennem hele projektperioden. Dette i kombination med egne erfaringer via TI's målinger på motorsystemer bliver alt sammen kanaliseret ned i beregningsalgoritmerne i værktøjet.

Indholdsfortegnelse

Forord	1
1 Værktøj til systemoptimering	3
2 Projektets relevans	5
3 Energiforbrug fordelt på brancher totalt og for udvalgte teknologier	7
3.1 Metodebeskrivelse	7
3.2 Nøgletal for dansk industris virksomheder – Det generelle overblik	8
3.3 Nøgletal for trykluft.....	11
3.4 Nøgletal for køling	12
3.5 Nøgletal for hydraulik	13
3.6 Besparelspotentialer ved systemoptimering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer	15
4 Udvikling af applikationsberegnerne	16
4.1 Trykluft	16
4.2 Køling	23
4.3 Hydraulik	29
5 Tilpasning af værktøjet til den kommende regulering af Ecodesign regulativet for elmotorer samt regulativerne for ventilatorer og vandpumper	35
5.1 Ecodesign for ventilatorer	35
5.2 Ecodesign for vandpumper	37
6 Videreudvikling af elmotorberegner	39
6.1 Asynkronmotorer	39
6.2 PM-motorer og SynRM.....	44
6.3 IEC 61800-9-2	45
6.4 Test af SynRM.....	46
6.4.1 Test af 4 kW 2-polet synkron reluktansmotor	46
6.4.2 Test af 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor	47
7 Optimering af funktionaliteter.....	49
8 Demonstration	55
8.1 Test af applikationsberegner for trykluft hos Pressalit	56
8.2 Test af applikationsberegner for kølekompressorer hos CITY 2	70
8.3 Test af applikationsberegner for hydraulik hos NLMK DanSteel	76
9 Kursus	82
10 Formidling	83
10.1 Artikler	83
11 Referencer	84

1 Værktøj til systemoptimering

Elmotorverden og verden for frekvensomformere er i rivende udvikling i disse år i takt med alle de introducerede krav til minimumsvirkningsgrader fra mange steder i verden og i særdeleshed fra Europakommissionen i form af Ecodesign krav på komponenterne. Inden for to år introduceres den første store revision af forordningen på elmotorer og i denne introduceres en række nye produkter der ikke tidligere har været underlagt MEPS (Minimum Efficiency Performance Standard).

Der vil med disse udvidelser således opstå nye krav til funktionalitet og produkter i det allerede udviklede "Værktøj til Systemoptimering" og det vil være helt oplagt at være på forkant med udviklingen og drage nytte af, at Teknologisk Institut er repræsenteret i arbejdsgrupper under den Internationale Elektrotekniske Komité – IEC til udviklingen af test- og klassificeringsstandarder, og via dette bindeled sikre at værktøjet indeholder det allernyeste inden for test algoritmer samt beregningsmodeller for drevsystemer.

I værktøjet til systemoptimering er der pt. mulighed for at indtaste relevante data for applikationerne ventilatorer, pumper og anden motordrift. En væsentlig del af industriens elforbrug til el-motordrevne maskinsystemer (skønsmæssigt 30 %) anvendes til trykluft, køling og hydraulik. Der kan erfaringsmæssigt opnås store elbesparelser inden for disse teknologier ved at designe systemerne rigtigt fra starten.

I værktøjet er der mulighed for at vælge induktionsmotorer og permanent magnet motor (PM-motorer). Motorer med synkron reluktans bliver pga. dens højere effektivitet mere og mere udbredt. Værktøjet skal derfor udbygges til at kunne håndtere denne motortype.

Resultatet af videreudviklingen og optimeringen er et mere avanceret men stadig meget brugervenligt værktøj til systemoptimering. Videreudviklingen vil gøre værktøjet mere komplet, da det vil indeholde alle de væsentlige energiforbrugende applikationer der findes i elmotordrevne maskinsystemer i industrien samt de to mest energieffektive elmotortyper på markedet PM-motorer og motorer med synkron reluktans.

Projektet omfatter følgende arbejdsopgaver (WP):

- WP 1. Applikationsberegner til trykluftkompressorer, kølekompressorer og hydraulikpumper
- WP 2. Tilpasning af værktøjet til den kommende regulering af Ecodesign regulativet for elmotorer og eksisterende regulering af ventilatorer og pumper
- WP 3. Videreudvikling af elmotorberegner
- WP 4. Optimering af funktionaliteter
- WP 5. Demonstration
- WP 6. Kursus
- WP 7. Formidling til maskinbygger/sælgere, brugere/virksomheder og energirådgivere/konsulenter samt afrapportering

Udviklingen af applikationsberegner, videreudvikling af elmotorberegner, optimering af funktionaliteter m.m. er sket i tæt samarbejde med tre leverandører af elmotorer og frekvensomformere, et elforsyningsselskab samt to industrivirksomheder repræsenteret ved:

AURA Rådgivning A/S – Michael Olsen og Ole Ernst Wandall-Frostholm

ABB A/S – Bjarne Tvede

Danfoss Power Electronics A/S - Norbert Hanigovszki

Nidec Industrial Automation Denmark A/S – John Mønsted

Pressalit A/S - Preben Jensen

LEGO System A/S - Torben Andersen

Arbejdet har været udført i perioden april 2015 – maj 2019. Ovennævnte personer har deltaget i flere projektgruppemøder.

Rapporten er udarbejdet af Teknologisk Institut ved Claus Martin Hvenegaard, Industri & Energi.

Arbejdet er hovedsageligt finansieret af ELFORSK. Den resterende finansiering er kommet ved hjælp af egenfinansiering fra projektparterne.

Arbejdet forventes at blive suppleret med en temadag efter projektets afslutning (andet halvår af 2019).

Projektresultatet forventes endvidere at blive præsenteret i forskellige fagblade, som f.eks. ELFORSK Nyt, HVAC-magasinet og Maskinmesteren.

Claus M. Hvenegaard

Maj 2019

2 Projektets relevans

Projektet relaterer sig til ELFORSK's indsatsområde: Industriens processer: 7.b Rådgivnings- og effektiviseringskoncepter, og understøtter målsætningen om at Danmarks udledning af drivhusgasser skal reduceres med mindst 40 % inden 2020 i forhold til 1990 niveauet.

Anvendelse af maskinsystemer med applikationerne trykluftkompressor, kølekompressor og hydraulikpumpe er nogle af de væsentligste energianvendelsesområder i industrien og til trods for at der allerede er sket en betydelig effektivisering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemerne er der stadig et stort uudnyttet potentiale. Derfor er der behov for en ny tilgang til effektivisering af denne type anlæg, således det fulde potentiale realiseres. Denne tilgang er systemoptimering.

Der har siden 1991 været fokus på at gennemføre energibesparelser på trykluft-, køle- og hydrauliksystemer i den danske industri i særdeleshed anført af elselskabernes energirådgivningsafdelinger. Rådgivningen har som udgangspunkt typisk fokuseret på enkeltkomponenterne i maskinsystemet i stedet for at anlægge en helhedsbetragtning, hvor der fokuseres på et energi-efektivt system, hvor enkeltkomponenterne hver især er energieffektive, og hvor de er tilpasset hinanden i forhold til behovet.

Erfaringer viser imidlertid, at der kan opnås yderligere energibesparelser i størrelsesordenen 10-20 % af elforbruget til drift af maskinsystemer ved at fokusere på hele maskinsystemet frem for enkeltkomponenterne hver for sig.

Med videreudviklingen af værktøjet til systemoptimering bliver det nu muligt at opnå disse yderligere elbesparelser idet der med værktøjet kan fokuseres på trykluft-, køle- og hydrauliksystemer som samlede systemer. Med værktøjet bliver der mulighed for at se de energimæssige konsekvenser ved at sammensætte den bedste teknologi på markedet for såvel enkeltkomponenten som systemet og på en måde hvor belastningsgraden er optimal for såvel enkeltkomponenten som systemet. Ydermere bliver der mulighed for at se de energimæssige konsekvenser ved anvendelse af elektrisk regulering frem for mekanisk.

Projektet vil styrke energiselskaberne betydeligt i forbindelse med forpligtigelsen om realisering af energibesparelser, idet projektet vil øge energiselskabernes muligheder betragteligt for at gennemføre øget effektivisering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer og dermed overholde energispareforpligtelserne.

Internationalt islæt:

Siden værktøjets oprindelige lancering har det, i parallel med det danske projekt, været oversat til engelsk og præsenteret på adskillige internationale konferencer om elmotorer og elmotorsystemer, ligesom der har været afholdt workshops i både Holland og Schweiz med værktøjet og tilhørende regneopgaver som omdrejningspunkt. Det har været, og er fortsat en kæmpe international succes og videreudviklingen af værktøjet via dette projekt vil sikre den fortsatte sejrsgang verden over og fastholde Danmark som en meget vigtig del af det internationale spil omkring elmotorer og elmotorsystemer der undergår stor forandring i disse år.

Herunder en præsentation af internationale milestones for værktøjet:

- 2011 09 – Washington D.C., EEMODS'11: paper + presentation
- 2012 12 – Zürich, Motor Summit '12: MST-Tool presentation + workshop
- 2013 10 – Rio de Janeiro, EEMODS '13: paper + presentation
- 2014 05 – Utrecht, MST-Tool workshop for 25 hollandske energirådgivere

Hvert år afholdes den internationale motorkonference "Motor Summit" i Zürich i Schweiz. På konferencen samles folk fra universiteter og industri samt lovgivere og NGO'er. På konferencen uddeles Motor Summit prisen og i 2018 tilfaldt prisen projektdeltager Sandie Brændgaard Nielsen, blandt andet for sit arbejde med værktøjet til systemoptimering – Motor System Tool.



Figur 2.1. Motor Summit Award 2018

Siden værktøjet blev præsenteret første gang, har det ligget til fri download på hjemmesiden for 4E EMSA som Teknologisk Institut er en del af. Der er pt. registreret mere end 1.500 unikke downloads af værktøjet fra flere end 20 forskellige lande.

I Den store Blå om systemoptimering er der foretaget en opgørelse af industriens elforbrug til bl.a. trykluft, køling og hydraulik, hvoraf det fremgår at det årlige elforbrug til disse teknologier udgør 1.863 GWh (892 GWh + 690 GWh + 281 GWh). Det samlede mulige besparelspotentiale forventes på dette grundlag at udgøre ca. 300 GWh, svarende til 16 % af forbruget.

Hvis der tages udgangspunkt i den nuværende værdi af rettigheder til realiserede energibesparelser, repræsenterer det ovennævnte potentiale en samlet værdi af ca. 75 mio. kr., som kan medfinansiere energirådgivning og komponenter, der anvendes i forbindelse med optimeringen af trykluft-, køle- og hydraulikinstallationer.

3 Energiforbrug fordelt på brancher totalt og for udvalgte teknologier

Kapitlet giver et detaljeret indblik over, i hvilke af trykluftanlæggets, køleanlæggets og hydraulikanlæggets systemkomponenter el-energien omsættes til reelt mekanisk arbejde og i hvilke den tabes.

Kapitlet er struktureret som følger:

- Metodebeskrivelse, hvorledes datatabeller er skabt
- Teknologirelaterede data
- Brancherelaterede data
- Samlet teoretisk potentiale

3.1 Metodebeskrivelse

Datagrundlaget er stykket sammen ud fra nedenstående kilder:

- Årlige elforbrug anno 2016 er opgjort af Danmarks statistik i 35 branchekategorier. Data er summeret til de 7 anvendte hovedbrancher, som er:
 - Nærings- og nydelsesmiddelindustrien
 - Jern og metalindustrien
 - Kemisk industri
 - Sten- ler- og glasindustrien
 - Træindustrien
 - Grafisk industri
 - Tekstilindustrien
- Branchespecifikke elforbrugsfordelinger udtaget fra rapporten "Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug" udarbejdet af Viegand & Maagøe ApS i 2015. For de 7 hovedbrancher er udtaget relativ elforbrugsandel for teknologierne ventilation, pumpning, trykluft, køling, hydraulik og anden motordrift.
- I brancherne Nærings- og nydelsesmiddel samt Jern og metal er tidligere udført detaljerede motorkortlægninger gående bl.a. på teknologianvendelse samt fordeling effektintervallerne imellem. Disse er benyttet som grundlag for en branchevis vurdering af energiandel i tre anvendte effektintervaller – lille (0-4 kW), mellem (4-30 kW) og stor (30-500 kW).

Med ovennævnte kilder er etableret et finmasket billede af, hvorledes elforbruget fordeles på teknologier og effektstørrelser i de enkelte brancher. Herefter er udformet et bedste skøn på, hvorledes dette forbrug fordeler sig i nødvendige systemkomponenter inden det effektueres i form af et egentligt arbejde. Situationen er beskrevet som den er i dag og som den burde være med kendskabet til den optimale sammensætning af systemkomponenter og muligheder for anvendelse af elektrisk styring/regulering med dagens teknologi.

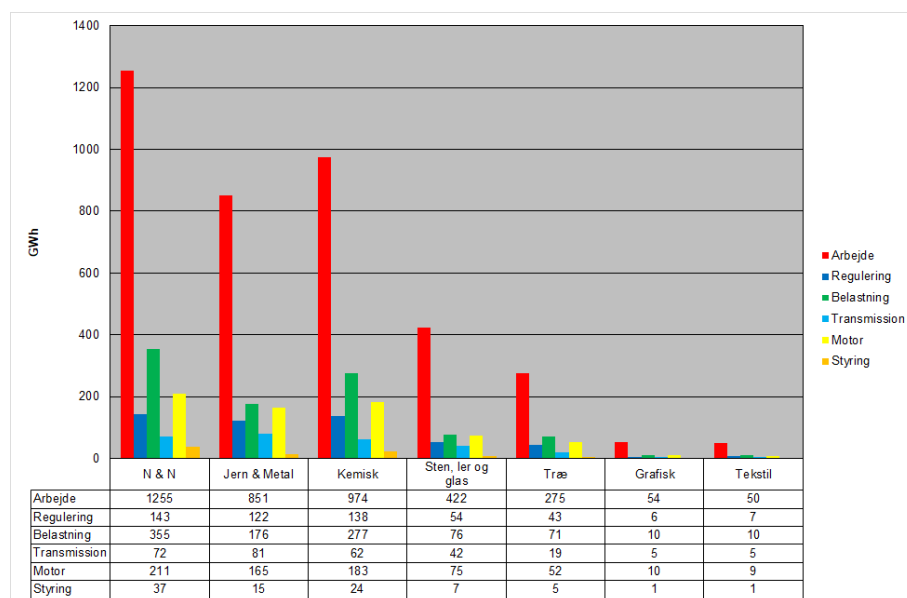
3.2 Nøgletal for dansk industris virksomheder – Det generelle overblik

Afsnittet viser dels det totale elforbrug for alle teknologier og dels forbruget for de enkelte teknologier fordelt på syv brancher og tre anlægstørrelser udtrykt i påstemplet mærkepladeeffekt på elmotoren.

Ydermere er i et diagram vist en estimeret tabsfordeling i maskinsystemet mellem:

- Elektrisk styring
- Elmotoren
- Transmissionen (remtrækket eller gearet)
- Belastningen (ventilatoren, pumpen, kompressoren m.v.)
- Mekanisk regulering (spjæld, drøvleventiler m.v.)

I samme diagram er vist et beregnet reelt arbejde - hydraulisk energi - således at tabselementerne kan sættes i relation.



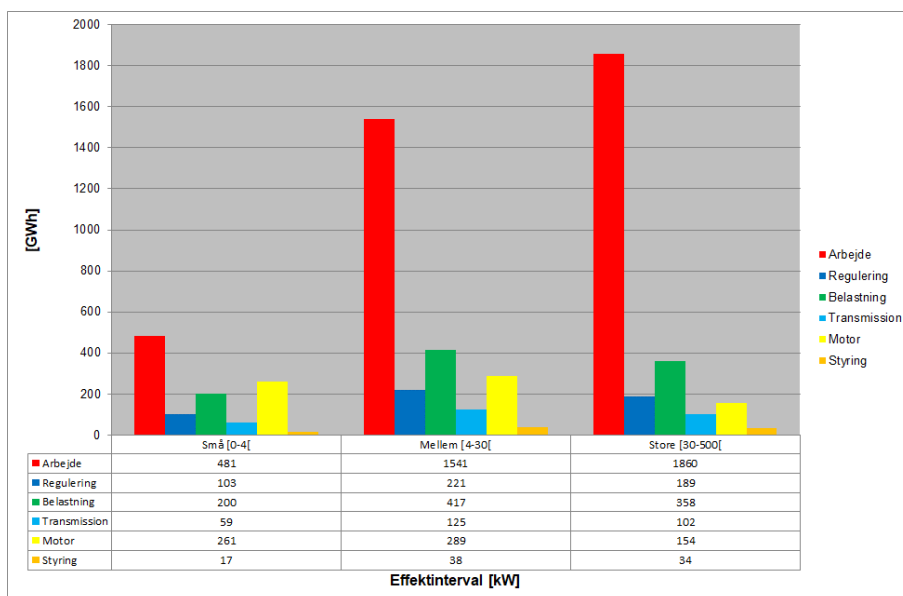
Figur 3.1 Årligt elforbrug for forskellige teknologier i dansk industri fordelt på nyttiggjort arbejde og tab i systemets komponenter – alle brancher.

Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Elforbrug [GWh]			
Nærings og nydelsesmiddel	312	726	1.034	2.072
Jern & Metal	216	867	327	1.410
Kemisk	332	580	746	1.659
Sten, ler og glas	135	236	304	676
Træ	93	163	209	464
Grafisk	17	30	39	86
Tekstil	16	28	37	81
I alt	1.121	2.631	2.696	6.448

Tabel 3.1 Fordeling af årlige energiforbrug for små, mellem og store systemer på forskellige brancher – alle teknologier.

I tabel 3.1 er vist, hvorledes det totale elforbrug vurderes fordelt mellem små, mellem og store motorsystemer i de forskellige brancher.

Det totale forbrug til elmotorer i de syv største brancher er opgjort til ca. 6.448 GWh, hvilket svarer til ca. 75 % af industriens totale elforbrug. I tabellen ses endvidere at de to store grupper bestående af elmotorer i størrelsen 4-500 kW er vurderet til at være de energimæssigt mest dominerende. Set ud fra en stykmæssig betragtning er der ingen tvivl om at gruppen bestående af småmotorer i intervallet 0-4 kW er den mest dominerende.



Figur 3.2 Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter for små, mellem og store systemer – alle teknologier.

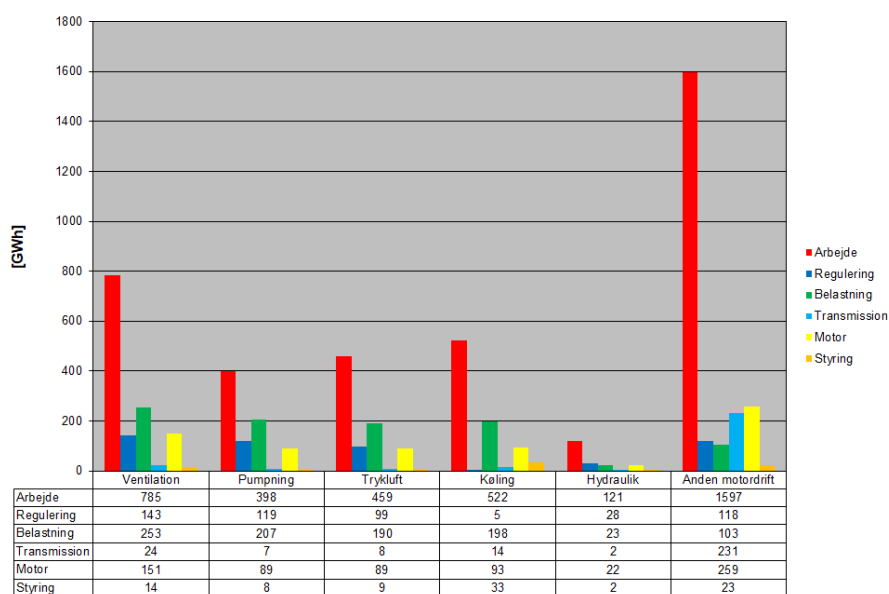
Den røde søjle "arbejde" i figur 3.2 er udnyttet arbejde - de øvrige søjler viser tab i den øvrige del af systemet.

I figuren ses at søjlen "arbejde" bliver mere dominerende jo højere op i effektinterval man bevæger sig. Med andre ord er den reelt udnyttede elandel stigende for stigende

systemstørrelser. Dette bevirker at småmotorerne også set ud fra et potentialesynspunkt er en interessant gruppe i og med at der reelt forefindes nogle relativt store besparelsesmuligheder på de enkelte systemer.

Specielt motor og belastning i systemet har betydelige tab for de mindre anlæg. Reelt skyldes dette den store brug af asynkronmotoren, der har kraftigt faldende virkningsgrad i de mindre størrelser. Det samme gælder for virkningsgrader for ventilatoren, pumpen, kompressoren osv.

I de følgende afsnit er forbruget samt tabsfordeling og arbejde for de enkelte teknologier vist separat.



Figur 3.3 Årligt forbrug for forskellige teknologier i dansk industri fordelt på nyttiggjort arbejde og tab i systemets komponenter – alle brancher.

I figur 3.3 er forskellige teknologiers nyttiggjorte arbejde vist for alle brancherne samlet.

Diagrammet illustrerer, hvorledes kategorien "Anden motordrift" er meget dominerende, men måske knapt så interessant set i et systemoptimerings øjemed, idet energieffektiviseringsindsatsen i høj grad kan begrænses til korrekt valg af motor og gear.

Specielt teknologierne ventilation, pumpning og trykluft har betydelige forbrug, der ikke udmøntes i et reelt arbejde. For disse to teknologier, der udgør en pæn andel af industriens elforbrug, ligger den totale gennemsnitsvirkningsgrad kun på ca. 50 %.

Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Elforbrug [GWh]			
Ventilation	236	568	568	1.371
Pumpning	146	290	393	829
Trykluft	152	341	361	854
Køling	143	392	330	865
Hydraulik	40	69	89	198
Anden motor- drift	405	971	955	2.332
I alt	1.121	2.631	2.696	6.448

Tabel 3.2 Fordeling af årlige energiforbrug for små, mellem og store systemer på forskellige brancher – alle teknologier.

3.3 Nøgletal for trykluft

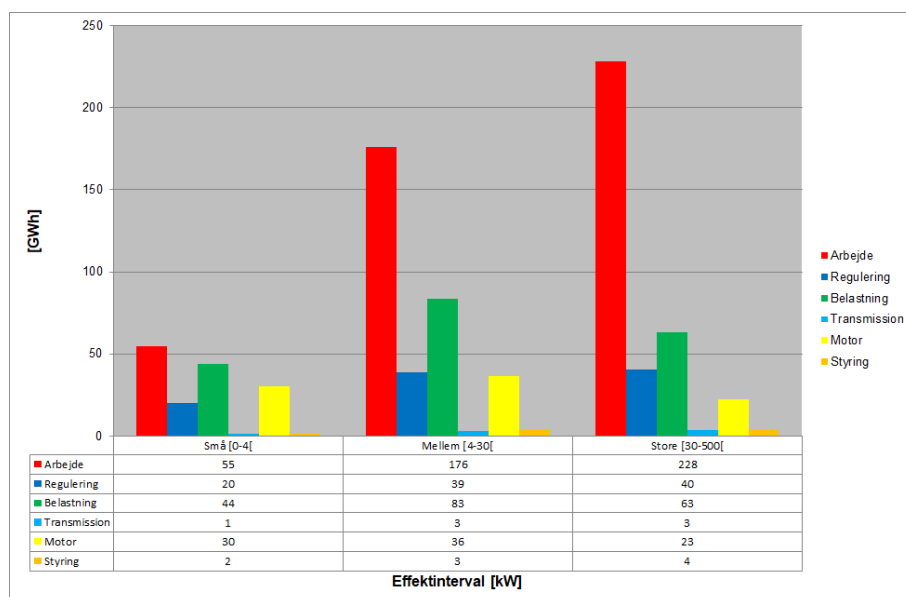
I dette afsnit er forbruget samt tabsfordeling og arbejde for teknologien trykluft vist.

Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Elforbrug [GWh]			
Nærings og nydelsesmid- del	26	53	96	175
Jern & Metal	31	122	51	204
Kemisk	61	107	138	306
Sten, ler og glas	17	30	38	85
Træ	13	23	29	65
Grafisk	1	2	3	7
Tekstil	2	4	5	11
I alt	152	341	361	854

Tabel 3.3 Fordeling af årlige energiforbrug for små, mellem og store trykluftanlæg på forskellige brancher.

Af tabel 3.3 fremgår, at der i alt anvendes ca. 854 GWh el til industrielle tryklufformål. Det svarer til ca. 13 % af elforbruget til elmotordrevne maskinsystemer i industrien. Størstedelen bruges af trykluftanlæg i størrelsen 4 - 30 kW og 30 - 500 kW vurderet ud fra tidligere detaljerede motorstudier foretaget i brancherne nærings- og nydelsesmiddel samt jern & metal.

Som det ses i tabel 3.3, tegner brancherne nærings- og nydelsesmiddel, jern & metal samt kemisk sig for 685 GWh svarende til ca. 80 % af elforbruget til trykluftsystemer.



Figur 3.4. Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter for små, mellem og store trykluft-anlæg

Figur 3.4 viser at de største tab findes omkring elmotoren og kompressoren, men at en relativ stor energiandel tilføres luften i form af øget tryk og temperaturstigning. Temperaturstigningen er som oftest ikke til nogen gavn, men i diagrammet er den medtaget som hydraulisk energi.

3.4 Nøgletal for køling

I dette afsnit er forbruget samt tabsfordeling og arbejde for teknologien køling vist.

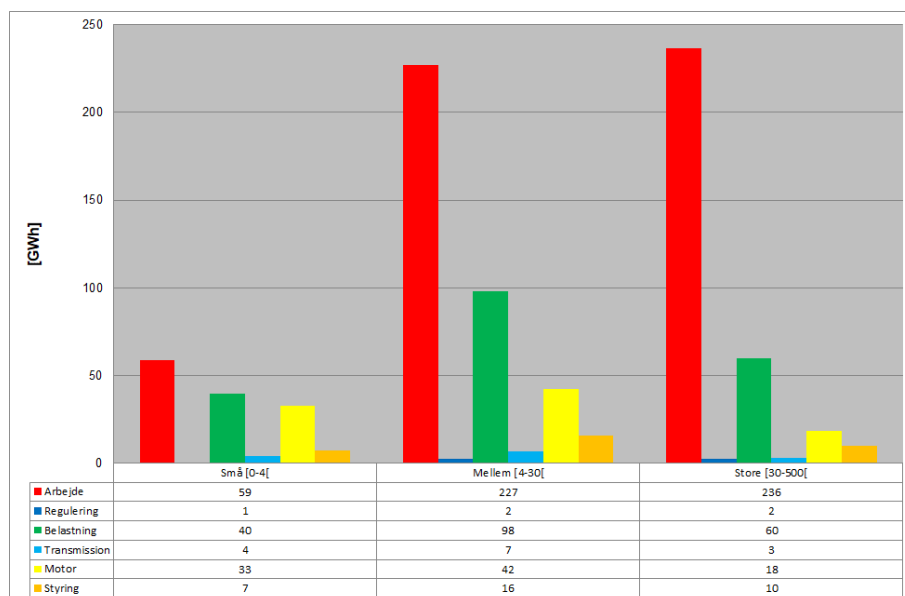
Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Elforbrug [GWh]			
Nærings og nydelsesmiddel	85	283	198	566
Jern & Metal	5	15	11	30
Kemisk	51	89	114	254
Sten, ler og glas	0	0	0	0
Træ	2	3	4	8
Grafisk	1	2	3	7
Tekstil	0	0	0	0
I alt	143	392	330	865

Tabel 3.4 Fordeling af årlige energiforbrug for små, mellem og store køleanlæg på forskellige brancher.

Af tabel 3.4 fremgår, at der i alt anvendes ca. 865 GWh el til industrielle køleformål. Det svarer til ca. 13 % af elforbruget til elmotordrevne maskinsystemer i industrien. Størstedelen bruges af

køleanlæg i størrelsen 4 - 30 kW og 30 - 500 kW vurderet ud fra tidligere detaljerede motorstudier foretaget i brancherne nærings- og nydelsesmiddel samt jern & metal.

Som det ses i tabel 3.3, tegner brancherne nærings- og nydelsesmiddel, samt kemisk sig for 820 GWh svarende til ca. 95 % af elforbruget til kølesystemer.



Figur 3.5. Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter for små, mellem og store køleanlæg

Figur 3.5 viser, at det er ved de mellem og store anlæg, at de største tab findes, og at det er for elmotoren og kølekompresoren, tabene er koncentreret.

3.5 Nøgletal for hydraulik

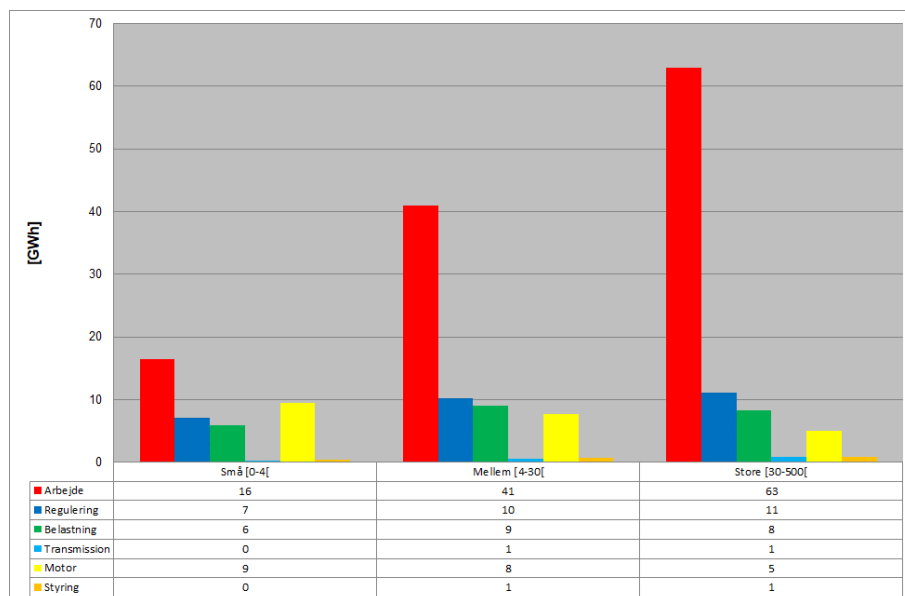
I dette afsnit er forbruget samt tabsfordeling og arbejde for teknologien hydraulik vist.

Størrelse [kW]	Små [0-4]	Mellem [4-30]	Store [30-500]	Total
Årligt forbrug	Elforbrug [GWh]			
Nærings og nydelsesmiddel	6	10	13	30
Jern & Metal	17	30	39	86
Kemisk	8	14	19	41
Sten, ler og glas	6	10	13	30
Træ	2	4	5	12
Grafisk	0	0	0	0
Tekstil	0	0	0	0
I alt	40	69	89	198

Tabel 3.5 Fordeling af årlige energiforbrug for små, mellem og store hydraulikanlæg på forskellige brancher.

Af tabel 3.5 fremgår, at der i alt anvendes ca. 198 GWh el til industrielle hydraulikformål. Det svarer til ca. 3 % af elforbruget til elmotordrevne maskinsystemer i industrien. Størstedelen bruges af trykluftanlæg i størrelsen 4 - 30 kW og 30 - 500 kW vurderet ud fra tidligere detaljerede motorstudier foretaget i brancherne nærings- og nydelsesmiddel samt jern & metal.

Som det ses i tabel 3.3, tegner brancherne nærings- og nydelsesmiddel, jern & metal samt kemisk sig for 157 GWh svarende til ca. 79 % af elforbruget til hydrauliksystemer.



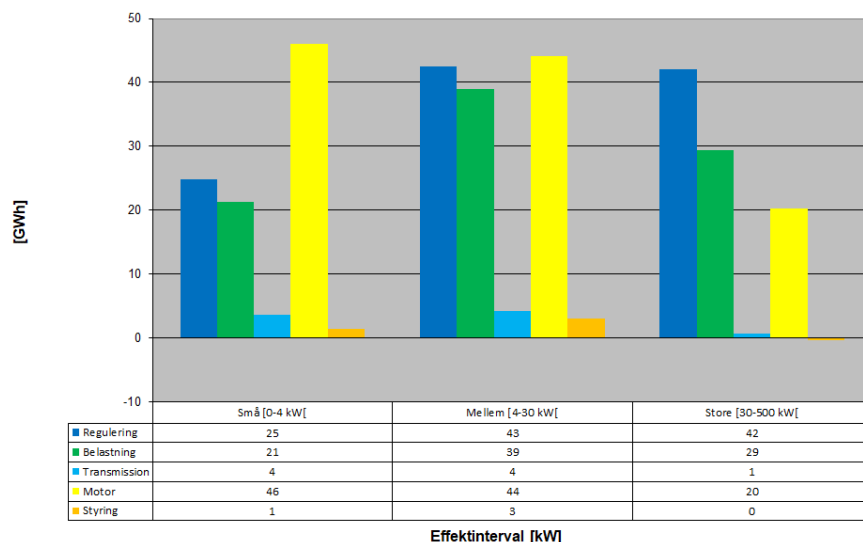
Figur 3.6. Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter for små, mellem og store hydraulikanlæg

Figur 3.6 viser endvidere, at for mellem og store anlæg findes de største tab for elmotoren, hydraulikken og den mekaniske regulering.

Den mekaniske regulering er særligt dominerende pga., at der anvendes konstante fortrængningspumper, hvilket betyder, at en stor flowmængde bortledes over aflastningsventiler til tank, når drøvlinger udføres for at kontrollere stempelbevægelser.

3.6 Besparelspotentialer ved systemoptimering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer

I figur 3.7 ses besparelspotentialerne ved systemoptimering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer.



Figur 3.7. Besparelspotentialer ved systemoptimering af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer

Som det ses, udgøres det største enkeltpotentialer i at erstatte mekanisk regulering med elektrisk regulering i form af frekvensomformere m.v. Der spares 110 GWh i form af fuldlast/aflast regulering til energieffektiv regulering af trykluftproduktionen via omdrejningstalregulering eller on-off drift, fjernede drøvlinger i hydrauliksystemer m.v., modsvarende selvfølgelig et uundgåeligt tab i de elektriske styringsenheder på 4 GWh. Dvs. en samlet besparelse på 106 GWh svarende til 33 % af potentialet alene ved brug af mere avanceret regulering.

De samlede tab i elmotorerne vil kunne reduceres med 110 GWh ved anvendelse af mere effektive motorer og elektriske styringer. Fluxoptimering m.m. vil kunne anvendes i stor udstrækning, hvilket ville forøge motorernes effektivitet i de mange driftstimer ved reduceret belastning. Ydermere vil større anvendelse af frekvensomformere bevirke, at der ikke skal tages så kraftige forbehold, hvad angår valget af motorstørrelse.

Den samlede besparelse på 90 GWh indenfor belastning skyldes anvendelse af mere energieffektive applikationer.

4 Udvikling af applikationsberegnerne

I værktøjet til systemoptimering er der pt. mulighed for at indtaste en hydraulisk ydelse eller få den beregnet manuelt for ventilatorer, pumper og anden motordrift. En væsentlig del af industriens elforbrug til elmotordrevne maskinsystemer (skønsmæssigt 30 %) anvendes til trykluft, køling og hydraulik. Der er her tale om applikationer som beregningsmæssigt er mere komplicerede end eksempelvis ventilatorer og pumper. Dette er ikke mindst tilfældet i forbindelse med regulering af applikationernes ydelser, hvor der findes mange forskellige reguleringsformer som kun anvendes for den pågældende applikation, f.eks. fuldlast/aflast regulering for trykluftkompressorer, gliderregulering for kølekompressorer og overstrømningsregulering for hydraulik-pumper. Ved at kunne indtaste data for applikationen, f.eks. fra en ydelseskurve for en trykluft-kompressor, skal man ved at indtaste luftmængde og tryk få beregnet den hydrauliske ydelse. Der udvikles således matematiske udtryk (algoritmer) for applikationen på baggrund af data fra datablad eller ydelseskurve.

4.1 Trykluft

Applikationsberegneren kan foretage beregninger for trykluftanlæg med følgende kompressorer:

- Stempelkompressor
- Skruekompressor

Baggrunden for dette er, at de er langt de mest udbredte kompressortyper.

Reguleringsformer

I applikationsberegneren vælges mellem følgende reguleringsformer i før og efter situationen:

- On/off (konstant hastighed)
- Fuldlast/aflast (konstant hastighed)
- Omdrejningstalregulering

For stempelkompressorer benyttes kun on/off regulering mens alle tre reguleringsformer benyttes for skruekompressorer.

Kompressoreffekt og -virkningsgrad

Uanset om der er tale om en stempelkompressor eller en skruekompressor så gælder der, at belastningen P_k (den effekt der skal tilføres for at komprimere luften samt tryktab i rør og komponenter) fra trykluftkompressoren kan skrives ved hjælp af nedenstående udtryk:

$$P_k = \frac{p_1 \cdot v_1 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]}{\eta_k}$$

hvor:

- p_1 er trykket i kompressoren før komprimering [Pa]
- p_2 er trykket i kompressoren efter komprimering [Pa]
- v_1 er kompressorens kapacitet ved p_1 [m^3/s]
- k er $\chi/(\chi-1)$ [dimensionsløs]
- χ er adiabatexponenten, som er 1,4 for luft

η_k er kompressorens virkningsgrad

p_1 er bestemt ved følgende udtryk:

$$p_1 = \frac{v_{1n}}{v_1} \cdot p_{1n}$$

hvor:

v_{1n} er den indsugete luftmængde (ved 1 bar atmosfærisk tryk) [m^3/s]

p_{1n} er atmosfæretryk [Pa]

Under normale omstændigheder, dvs. ved ind sugning af udeluft, er $p_1 = p_{1n}$

Virkningsgraden η_k for kompressoren er produktet af den isentropiske virkningsgrad η_{is} og den mekaniske virkningsgrad η_{mek} . For skruekompressorer afhænger η_{is} af det indbyggede trykforhold (p_2/p_1), mens η_{mek} afhænger af friktionstab i lejer og ventiler samt eventuelle reguleringsanordninger placeret før luftindtaget.

For trykluftkompressorer får man typisk oplyst følgende ved et bestemt afgangstryk (p_2):

- Kompressorens kapacitet eller flow (v_1)
- Effektoptag for kompressor, transmission, motor og eventuel styring (P_1)

For omdrejningstalsregulerbare trykluftkompressorer får man oplyst v_1 og P_1 ved forskellige omdrejningstal (n). Dette beskrives nærmere i afsnittet "Skruekompressorer".

Stempelkompressor

On/off

Stempelkompressorer kører kun on/off så der er kun et driftspunkt.

Beregning fra P_1 mod P_4

- Der vælges en motorstørrelse og et nominelt omdrejningstal.
- Der indtastes et effektoptag P_1 og et aktuelt omdrejningstal for motoren
- Der vælges eventuelt en transmission (i en del tilfælde findes der en remtransmission mellem kompressor og motor)

Duty point

Inddata er:

- Kompressorens kapacitet eller flow (v_1)
- Trykket i kompressoren efter komprimering (p_2)
- Herefter beregnes P_4 (se formel nedenfor)
- η_k beregnes nu som P_3 divideret med P_4 (se formel nedenfor)

Værktøjet beregner den hydrauliske effekt eller belastningen P_4 ved hjælp af nedenstående udtryk:

$$P_4 = \frac{p_1 \cdot v_1 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]}{\eta_k}$$

Motorens afgivne effekt P_2 beregnes på baggrund af nominel effekt og nominelt omdrejningstal samt effektoptag P_1 og aktuelt omdrejningstal n .

Transmissionens afgivne effekt P_3 beregnes på baggrund af den tilførte effekt P_2 og omdrejningstal samt data for transmissionen, herunder nominel effekt.

På baggrund af data vedr. transmissionen og motoren beregnes kompressorens, virkningsgrad η_k . Den tilførte effekt til kompressoren P_3 er således lig med udtrykket for P_k således at der gælder følgende for virkningsgraden:

$$\eta_k = \frac{p_1 \cdot v_1 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]}{P_3}$$

I figur 1 ses hvorledes data skal indtastes data for en kompressor, når der regnes fra P_1 mod P_4 .

Trykluft

$$P_{\text{ind}} = p_1 \cdot v_1 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] \text{ [kW]}$$

Tilgangstryk, p1 [Bar]

Afgangstryk, p2 [Bar]

Kapacitet/flow, v1 [m³/s]

P4 - Belastning Udgangseffekt [kW]	Ny beregnet virkningsgrad [%]	P3 hast [rpm]	P4 - Belastning Indgangseffekt [kW]
137,1	86,0	1.450	159,4

Figur 4.1. Duty point for kompressor fra P_1 mod P_4

Beregning fra P_4 mod P_1

Duty point

Inddata er:

- Kompressorens kapacitet eller flow (v_1)
- Trykket i kompressoren efter komprimering (p_2)
- Kompressorens virkningsgrad η_k
- Omdrejningstal for kompressor (n)

Værktøjet beregner den hydrauliske effekt eller belastningen P_4 ved hjælp af ovenstående udtryk.

Normalt kendes kompressorens virkningsgrad η_k ikke og det er normalt ikke muligt at få den oplyst af leverandøren. Kompressorens virkningsgrad kan dog være beregnet på baggrund af en

tidligere beregning fra P_1 mod P_4 . Der kan så foretages en beregning af P_3 , P_2 og P_1 på baggrund af denne information.

På traditionel vis baseres beregninger af P_2 og P_1 så på informationer om transmissionen og motoren.

Skruekompressorer

On/off

Beregninger fra P_1 mod P_4 og fra P_4 mod P_1 for skruekompressorer der kører on/off er magen til beregningerne for stempelkompressorer.

Igen gælder det ved beregning fra P_4 mod P_1 , at kompressorens virkningsgrad η_k normalt ikke kendes og det er normalt ikke muligt at få den oplyst af leverandøren. Kompressorens virkningsgrad kan dog være beregnet på baggrund af en tidligere beregning fra P_1 mod P_4 . Der kan så foretages en beregning af P_3 , P_2 og P_1 på baggrund af denne information.

Fuldlast/aflast

Beregninger fra P_1 mod P_4 og fra P_4 mod P_1 for skruekompressorer der kører fuldlast/aflast er i fuldlast situationen magen til beregningerne for stempelkompressorer.

I aflast situationen er effektoptaget ca. 20 % af effektoptaget ved fuldlast og kompressoren kører væsentligt anderledes end ved fuldlast. Virkningsgraden falder betydeligt, når kompressoren kører aflastet. Her producerer kompressoren ikke trykluft til trykluftnettet. Indsugningsspjældet er lukket, og tryklufften føres via en afblæsningsventil fra højtrykssiden til lavtrykssiden. Kompressoren komprimerer således den samme luft fra vakuum til atmosfæretryk. Det forudsættes at der komprimeres fra 0,2 til 1,0 bar.

I applikationsberegneren kan man enten vælge at indtaste disse data manuelt eller det kan gøre automatisk. Det kræver dog, at man i beregneren kan angive, at der er tale om aflast. Dette kunne ske ved at sætte et flueben i et afkrydsningsfelt.

Beregninger fra P_1 mod P_4 og fra P_4 mod P_1 for skruekompressoren, når den kører aflast er herefter magen til beregningerne ved fuldlast. Den eneste forskel er, at der er to driftspunkter.

Igen gælder det ved beregning fra P_4 mod P_1 , at kompressorens virkningsgrad η_k normalt ikke kendes og det er normalt ikke muligt at få den oplyst af leverandøren. Kompressorens virkningsgrad kan dog være beregnet på baggrund af en tidligere beregning fra P_1 mod P_4 . Der kan så foretages en beregning af P_3 , P_2 og P_1 på baggrund af denne information.

Omdrejningstalregulering

Beregninger fra P_1 mod P_4 og fra P_4 mod P_1 for skruekompressorer der kører omdrejningstalreguleret er i princippet magen til beregningerne ved on/off og fuldlast/aflast drift.

Lastprofil

Ved omdrejningstalregulering er det ved beregninger fra P_4 mod P_1 muligt at indtaste et lastprofil. I figur 2 ses et eksempel på et lastprofil.

Datatabel

Indfør 12 arbejdspunkter				
Tilgangstryk, p1 [Bar]	Afgangstryk, p2 [Bar]	Kapacitet/flow, v1 [m ³ /s]	Hast, n [rpm]	Effektøtag, P1 [kW]
1,0	7,5	0,503	1500	179,6
1,0	7,5	0,349	1050	121,2
1,0	7,5	0,243	750	86,6
1,0	7,5	0,143	450	54,9

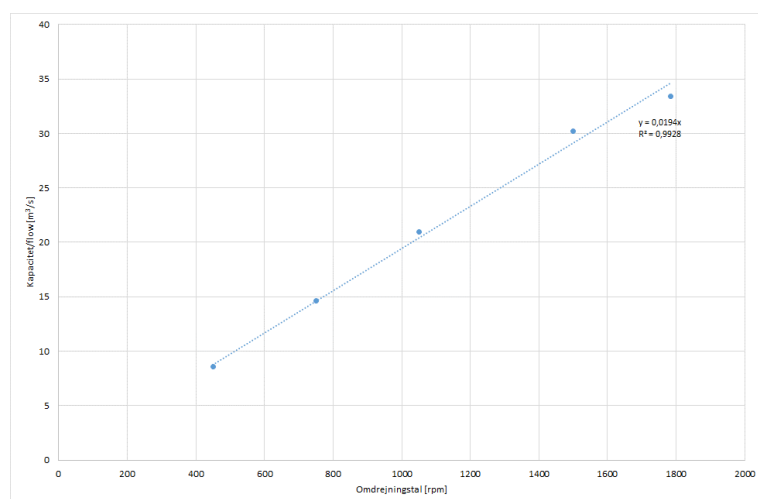
Figur 4.2. Samhørende værdier for tryk, kapacitet, omdrejningstal og effektøtag

Ved en omdrejningstalreguleret kompressor beregnes P_4 og P_1 ud fra indtastningerne i lastprofil. Det er i virkeligheden ikke en traditionel beregning fra P_4 mod P_1 , da P_1 i princippet kendes på forhånd.

I figur 4.3 ses sammenhængen mellem kompressorens omdrejningstal og kapaciteten/flowet. Der er, som det ses, en lineær sammenhæng.

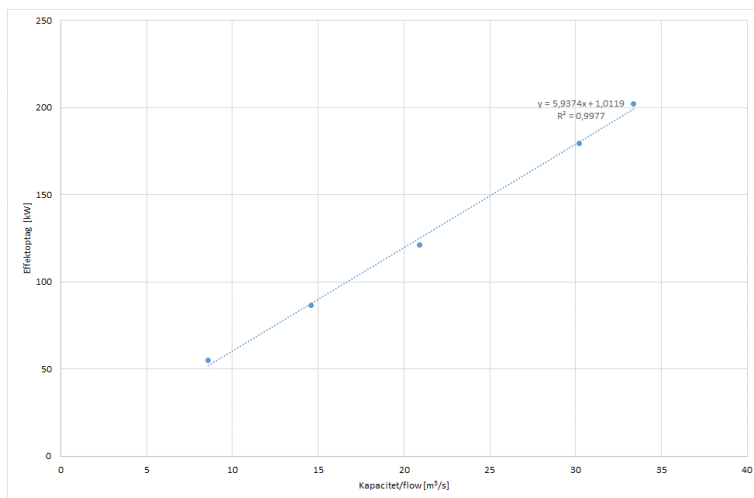
Når man angiver en kapacitet/flow, skal omdrejningstallet således hænge sammen med dette og vise versa, hvis man udfylder et lastprofil (en datatabel) vel at mærke.

Man skal derfor kun indtaste den ene af parametrene, hvis man vælger at benytte data fra et lastprofil.



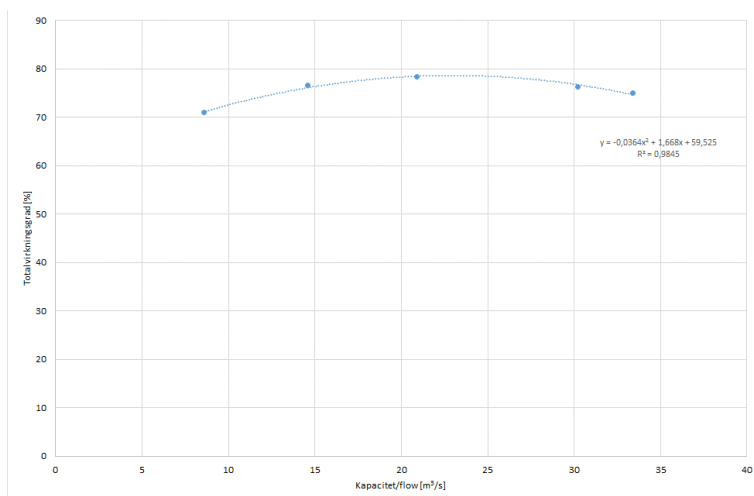
Figur 4.3. Sammenhængen mellem kompressorens omdrejningstal og kapaciteten/flowet. Effektøtaget beregnes også på baggrund af kapaciteten eller omdrejningstallet, da der er en lineær sammenhæng, som vist i figur 4.4

Når man angiver en kapacitet/flow eller et omdrejningstal får man således beregnet et effektop-
tag automatisk.



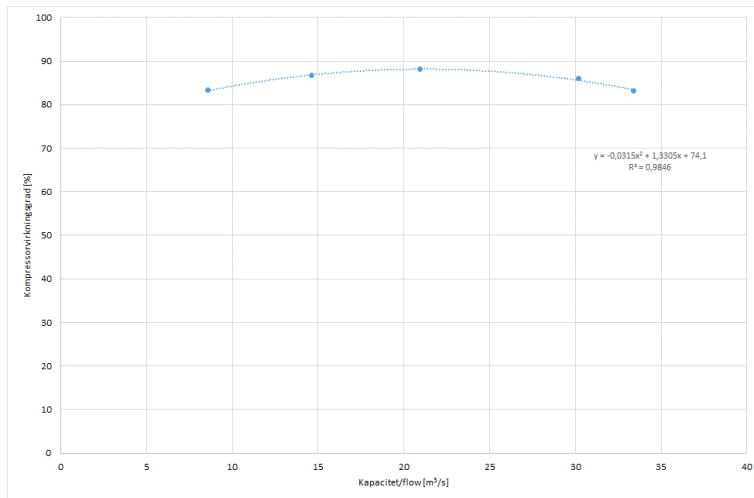
Figur 4.4. Sammenhængen mellem kapacitet/flow og effektop-
tag

I figur 4.5 ses sammenhængen mellem kapacitet/flow og totalvirkningsgraden. Virkningsgraden kan som det ses beskrives som et andengradspolynomium med kapaciteten/flowet som den uaf-
hængige variabel.



Figur 4.5. Sammenhængen mellem kapacitet/flow og totalvirkningsgraden

I figur 4.6 ses sammenhængen mellem kapacitet/flow og kompressorvirkningsgraden. Virkningsgraden kan som det ses beskrives som et andengradspolynomium med kapaciteten/flowet som den uafhængige variabel.



Figur 4.6. Sammenhængen mellem kapacitet/flow og kompressorvirkningsgraden

4.2 Køling

Applikationsberegneren kan foretage beregninger for køleanlæg med følgende kompressorer:

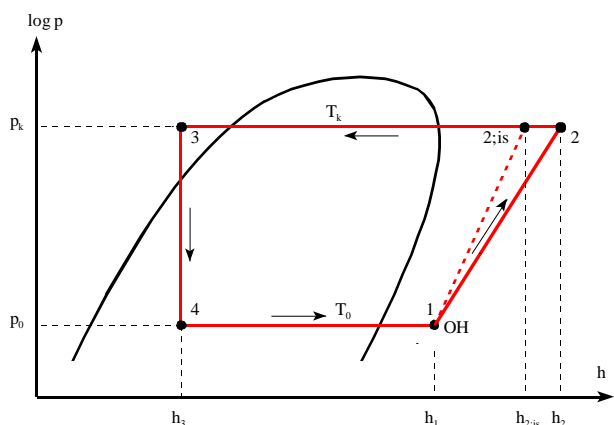
- Stempelkompressor
- Skruekompressor

Baggrunden for dette er, at de er langt de mest udbredte kompressortyper. Der foretages kun beregninger for åbne kompressorer, dvs. kompressorer hvor kompressor- og motordelen er adskilt.

Reguleringsformer

I applikationsberegneren vælges mellem følgende reguleringsformer i før og efter situationen:

- Cylinderudkobling (stempelkompressorer)
- Gliderregulering (skruekompressorer)
- Omdrejningstalregulering (skruekompressorer)



Figur 4.7. log p, h - diagram for køleanlæg

Akseleffekten P_k fra en kølekompressor kan udtrykkes som:

$$P_k = m \cdot (h_2 - h_1) = \frac{m \cdot (h_{2;is} - h_1)}{\eta_{is}}$$

hvor

m er kølemiddelstrømmen [kg/s]

h_1 er entalpien i kølemidlet før kompressoren [kJ/kg] (se figur 4.7)

h_2 er entalpien i kølemidlet efter kompressoren [kJ/kg] (se figur 4.7)

$h_{2;is}$ er entalpien i kølemidlet efter kompressoren ved en isentropisk (tabsfri) kompression [kJ/kg] (se figur 4.7)

η_{is} er den isentropiske virkningsgrad

Akseleffekten P_k fra kølekompressoren kan også skrives således:

$$P_k = P_{Carnot} + P_{tab, kølekreds} + P_{k, tab}$$

Carnot kompressionsarbejdet, P_{carnot}

P_{carnot} er Carnot kompressionsarbejdet der defineres således

$$P_{\text{carnot}} = \frac{Q_0}{\text{COP}_{\text{carnot}}}$$

hvor

Q_0 er kølekapaciteten [kW]

$\text{COP}_{\text{carnot}}$ er Carnotvirkningsgraden []

Carnotvirkningsgraden for en køleproces kan skrives således:

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_0 + 273,15}{T_k - T_0}$$

hvor

T_0 er fordampningstemperaturen [°C]

T_k er kondenseringstemperaturen [°C]

Tab i kølekreds, $P_{\text{tab,kølekreds}}$

$P_{\text{tab, kølekreds}}$ er tabet i kølekredsen der defineres således:

$$P_{\text{tab,kredsløb}} = Q_0 \frac{(h_{2;is} - h_1)}{(h_1 - h_4)} - P_{\text{carnot}}$$

hvor

h_3 er entalpien i kølemidlet før fordamperen [kJ/kg] (se figur 4.7)

Tab i kompressor, $P_{\text{k,tab}}$

$P_{\text{k,tab}}$ er tabet i kompressoren der defineres således:

$$P_{\text{k,tab}} = (P_{\text{carnot}} + P_{\text{tab,kredsløb}}) \cdot \left[\frac{1}{\eta_{is}} - 1 \right]$$

Som det ses, afhænger belastningen P_k fra en kølekompressor af den til kølekredsen tilførte varmeeffekt Q_0 . Endvidere afhænger den af den entalpidifferenserne over fordamperen ($h_3 - h_1$) og kompressoren ($h_2 - h_1$) samt fordampnings- og kondenseringstemperaturen (T_0 og T_k). Endelig afhænger den af den isentropiske virkningsgrad.

Den isentropiske virkningsgrad afhænger dels af kompressortype og -størrelse dels af anlæggets fordampnings- og kondenseringstemperatur samt belastningsgraden.

På større køleanlæg er der installeret kapacitetsregulering, der regulerer kapaciteten (kuldeydelsen) efter behovet. Hvilken kapacitetsregulering der benyttes, afhænger af kompressortypen. For stempelkompressorer er cylinderudkobling en hyppigt anvendt metode til kapacitetsregulering.

Beregning fra P1 mod P4

- Der vælges en motorstørrelse, et effektoptag samt et nominelt omdrejningstal
- Herefter beregnes P_k idet det forudsættes at der ikke er transmission

Duty point

- P_{Carnot} beregnes ud fra kølekapaciteten Q_0 og COP_{Carnot} .
Inddata er derfor:
 - Kølekapaciteten, Q_0
 - Fordampningstemperaturen, T_0
 - Kondenseringstemperaturen, T_k
- η_{Carnot} beregnes nu som P_{Carnot} divideret med P_k

Værktøjet beregner den hydrauliske effekt eller belastningen P_4 ($= P_{Carnot}$) ved hjælp af nedenstående udtryk:

$$P_4 = \frac{Q_0}{COP_{Carnot}}$$

Motorens afgivne effekt P_2 beregnes på baggrund af nominal effekt og nominelt omdrejningstal samt effektoptag P_1 og aktuelt omdrejningstal n .

På baggrund af data vedr. motoren beregnes kompressorens, virkningsgrad η_{Carnot} . Den tilførte effekt til kompressoren P_3 er således lig med udtrykket for P_k således at der gælder følgende for virkningsgraden:

$$\eta_{Carnot} = \frac{P_{Carnot}}{P_k}$$

I figur 4.8 ses hvorledes data skal indtastes data for en kompressor, når der regnes fra P₁ mod P₄.

Køling

$$P_{Carnot} = \frac{Q_0}{COP_{Carnot}}$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_0 + 273,15}{T_k - T_0}$$

Fordampningstemp., T₀ [C]

Kondenseringstemp., T_k [C]

Kølekapacitet, Q₀ [kW]

P4 - Belastning Udgangseffekt [kW]	Ny beregnet virkningsgrad [%]	P3 hast [rpm]	P4 - Belastning Indgangseffekt [kW]
<input type="text" value="33,0"/>	<input type="text" value="66,9"/>	<input type="text" value="1.450"/>	<input type="text" value="49,4"/>

Figur 4.8. Duty point for kompressor fra P₁ mod P₄

Beregning fra P₄ mod P₁

Duty point

Der skal indtastes en række data for kredsprocessen og kompressoren.

Inddata er:

- Kølekapaciteten, Q₀
- Fordampningstemperaturen, T₀
- Kondenseringstemperaturen, T_k
- Kompressoreffekten, P_k
- Kompressorens omdrejningstal

På baggrund af disse inddata beregnes P_{Carnot} og η_{Carnot}.

På den måde kommer beregningerne til at ligne dem der findes i Den store Blå om systemoptimering.

Lastprofil

Ved kapacitetsregulering er det ved beregninger fra P_4 mod P_1 muligt at indtaste et lastprofil. I figur 4.9 ses et eksempel på et lastprofil.

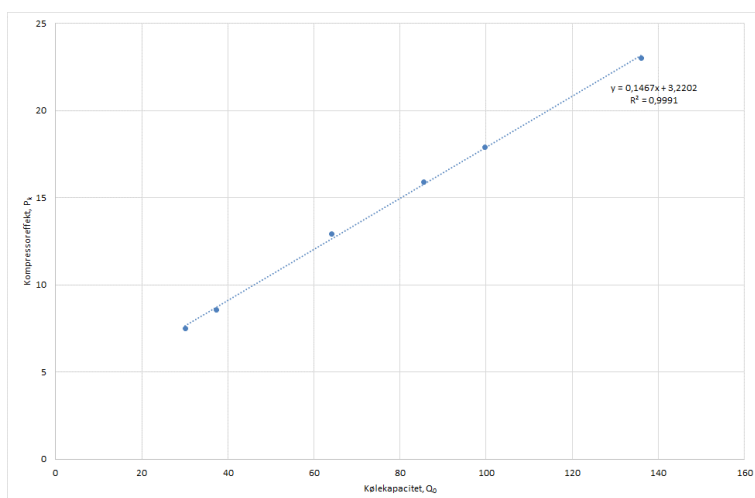
Datatabel

Indfør 12 arbejdspunkter				
Fordampningstemp., T0 [C]	Kondenseringstemp., TK [C]	Kølekapacitet, Q0 [kW]	Hast, n [rpm]	Kompressoreffekt, Pk [kW]
0,0	30,0	300,0	1500	48,6
0,0	30,0	225,0	1125	38,9
0,0	30,0	150,0	750	28,5

Figur 4.9. Samhørende værdier for fordampningstemperatur, kondenseringstemperatur, kølekapacitet, omdrejningstal og kompressoreffekt

Stempelkompressor

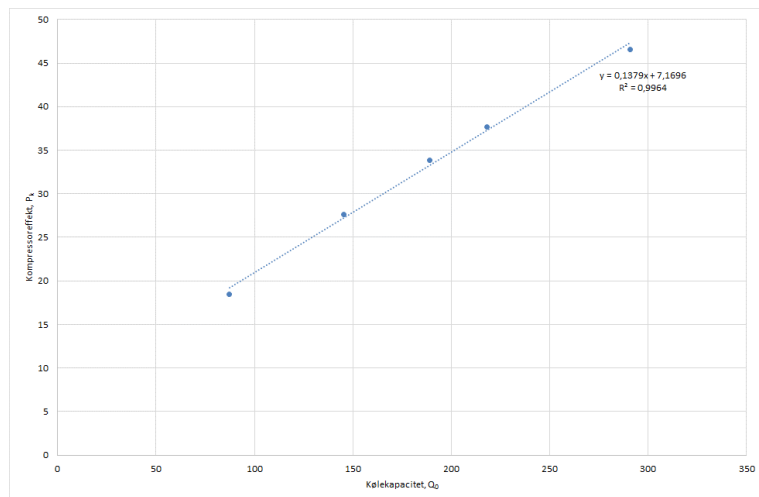
I figur 4.10 ses sammenhængen mellem kølekapaciteten og kompressoreffekten for en stempelkompressor (cylinderudkobling). Kompressoreffekten kan, som det ses, beskrives som et førstegradspolynomium med kapaciteten som den uafhængige variabel.



Figur 4.10. Sammenhængen mellem kølekapaciteten og kompressoreffekten for en stempelkompressor (cylinderudkobling)

Skruekompressor

I figur 4.11 ses sammenhængen mellem kølekapaciteten og kompressoreffekten for en skruekompressor (omdrejningstalsreguleret). Kompressoreffekten kan, som det ses, beskrives som et førstegradspolynomium med kapaciteten som den uafhængige variabel.



Figur 4.11. Sammenhængen mellem kapaciteten og kompressoreffekten for en skruekompressor (omdrejningstalreguleret)

4.3 Hydraulik

Belastningen P_p (den effekt der skal tilføres på pumpens akse) fra en hydraulik pumpe bestemmes ved hjælp af nedenstående udtryk:

$$P_k = \frac{Q \cdot \Delta p}{600 \cdot \eta_p}$$

hvor

Q er volumenstrømmen [l/min]

Δp er trykstigningen over pumpen [bar]

η_p er pumpens virkningsgrad

Pumpens flow Q bestemmes ved hjælp af:

$$Q = \frac{V \cdot n \cdot \eta_v}{1.000}$$

hvor

V er fortrængningen pr. omdrejning [cm^3/o]

n er omdrejningstallet [o/min]

η_v er den volumetriske virkningsgrad

Som det ses i udtrykket for belastningen fra en pumpe, afhænger den, foruden trykstigningen og volumenstrømmen, i høj grad af pumpevirkningsgraden. Pumpens virkningsgrad er produktet af den volumetriske virkningsgrad η_v og den hydraulisk/mekaniske virkningsgrad η_{hm} .

For hydraulikpumper får man typisk oplyst følgende (i datablade/pumpe kurver):

- Pumpens flow, Q eller pumpens fortrængning V
- Trykstigningen over pumpen, Δp
- Pumpens omdrejningstal, n
- Pumpens totalvirkningsgrad, η_p
- Pumpens volumetriske virkningsgrad, η_v

Reguleringsformer

- Konstant flow og konstant tryk (overstrømningsregulering)
- Konstant flow og konstant tryk (trykafastning)
- Trykregulering - konstant flow
- Flowregulering - konstant tryk
- Load sensing
- Omdrejningsregulering - konstant tryk
- Omdrejningsregulering - load sensing

Ved overstrømningsregulering opretholdes der samme flow og trykstigning over pumpen. Effekt-optaget er derfor konstant uanset om pumpen yder et stykke nyttigt arbejde eller den kører aflastet/standby. Ved denne reguleringsform er der derfor i princippet kun et driftspunkt og et effektoptag.

Husk: Konstant og variabel fortrængning (flowet ændres ved at ændre pumpens fortrængning, mekanisk).

Beregning fra P1 mod P4

- Der vælges en motorstørrelse, et effektoptag samt et nominelt omdrejningstal
- Herefter beregnes P_p idet det forudsættes at der ikke er transmission

Duty point

- Pumpens flow, Q
- Trykstigningen over pumpen, Δp
- Herefter beregnes P_4 (se formel ovenfor)
- η_p beregnes nu som P_3 divideret med P_4

Værktøjet beregner den hydrauliske effekt eller belastningen P_4 ved hjælp af nedenstående udtryk:

$$P_4 = \frac{Q \cdot \Delta p}{600}$$

Motorens afgivne effekt P_2 beregnes på baggrund af nominal effekt og nominelt omdrejningstal samt effektoptag P_1 og aktuelt omdrejningstal n .

Transmissionens afgivne effekt P_3 beregnes på baggrund af den tilførte effekt P_2 og omdrejningstal samt data for transmissionen, herunder nominal effekt.

På baggrund af data vedr. transmissionen og motoren beregnes kompressorens, virkningsgrad η_k . Den tilførte effekt til hydraulikpumpen P_3 er således lig med udtrykket for P_p således at der gælder følgende for virkningsgraden:

$$\eta_p = \frac{Q \cdot \Delta p}{600 \cdot P_3}$$

I figur 4.12 ses hvorledes data skal indtastes data for en hydraulikpumpe, når der regnes fra P_1 mod P_4 .

The screenshot shows a software interface for hydraulic calculations. At the top left, the title 'Hydraulik' is displayed. Below it, a white box contains the formula $P_{\text{afd}} = \frac{Q \cdot \Delta p}{600} \text{ [kW]}$. To the right of the formula are two input fields: 'Volumenstrøm, Q [l/min]' with the value '161,4' and 'Trykstigning, Δp [Bar]' with the value '420,0'. Below these are four output fields: 'P4 - Belastning Udgangseffekt [kW]' with the value '113,0', 'Ny beregnet virkningsgrad [%]' with the value '87,0', 'P3 hast [rpm]' with the value '4.200', and 'P4 - Belastning Indgangseffekt [kW]' with the value '129,9'.

Figur 4.12. Duty point for hydraulikpumpe fra P_1 mod P_4

Der er udviklet en pumpemodell baseret på Kawazaki's K3VL serie. Denne modelrække går fra 28 - 250 cm³/min og kan give tryk op til 350 bar.

Input til modellen er flow og tryk og output er virkningsgraden. Pumperne har variabel fortrængning, så grundlæggende er omdrejningstallet konstant og kapaciteten varieres ved at variere fortrængningen. Imidlertid er fysikken bag virkningsgraden den samme for pumpetyper med fast fortrængning, så som et kompromis anvendes den samme model også for fast fortrængning og variabelt omdrejningstal.

- Den grundlæggende antagelse er den volumetriske virkningsgrad kun afhænger af trykket og fortrængningen
- Det antages, at den ikke transporterede væskemængde, der udtrykkes ved den volumetriske virkningsgrad også er tryksat til pumpens udgangstryk
- Desuden antages at den mekaniske virkningsgrad kan udtrykkes ved et konstant friktionsmoment, der kun afhænger af pumpens størrelse og af trykket. Dette er en tilnærmelse, idet noget af momentet vil afhænge af omdrejningstallet

Sammenlagt konstateres der afvigelser mellem den udviklede pumpemodell og de kurver der ligger til grund for modellen på op til 4% ved lave tryk og lille fortrængning, og 1 - 2 % ved høj tryk og flow.

Når ønsket flow Q og trykstigning Δp og kendes beregnes den hydrauliske effekt af:

$$P_{\text{hyd}} = Q \cdot \Delta p \text{ [W]}, \text{ hvor } Q_v \text{ er flowet [m}^3\text{/s]} \text{ og } \Delta p \text{ er trykstigningen [Pa]}$$

Momentet, der svarer til det hydrauliske arbejde er da:

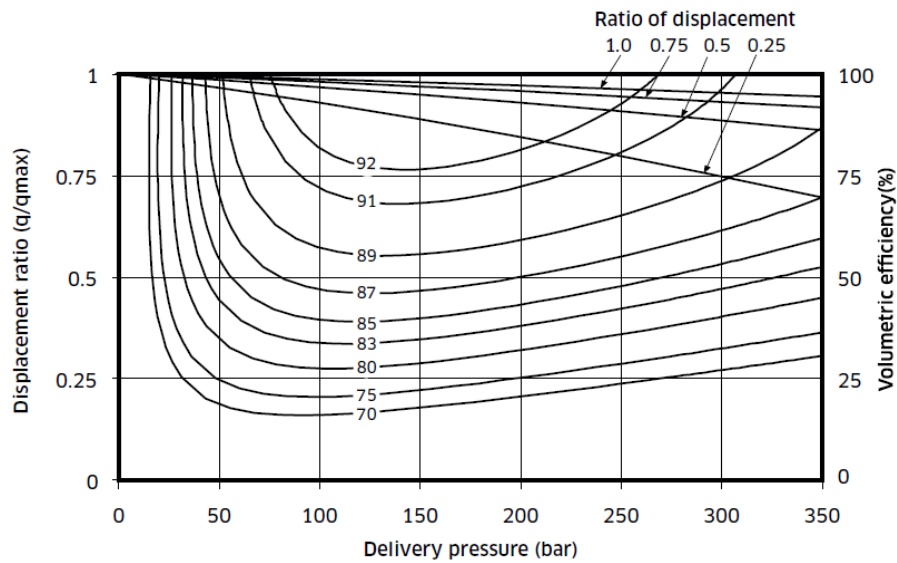
$$M_{\text{hyd}} = P_{\text{hyd}}/\omega, \text{ hvor } \omega \text{ er vinkelhastigheden [s}^{-1}\text{]}$$

Akseleffekten er nu:

$$P_{\text{aksel}} = (M_0 + M_{\text{hyd}}) \cdot \omega$$

Og virkningsgraden:

$$\eta = P_{\text{hyd}} / P_{\text{aksel}}$$



Figur 4.13. Virkningsgradsdiagram for den Kawasaki pumpe der er baggrund for pumpemodellen

Beregning fra P4 mod P1

Duty point

Inddata er:

- Pumpens flow, Q
- Trykstigningen over pumpen, Δp
- Pumpens omdrejningstal, n
- Pumpens totalvirkningsgrad, η_p

Beregningen foregår lige som vist i figur 4.12.

Hvis der skal foretages en mere detaljeret beregning, foregår det som vist i figur 4.14.

Indfør data

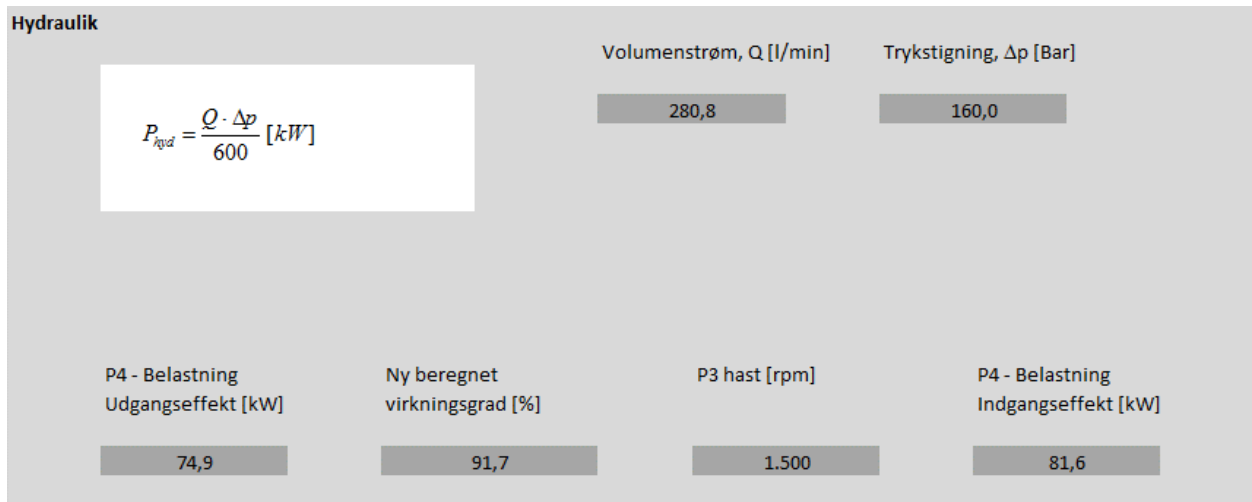
Flow, Q [l/min]	Trykstigning, Δp [Bar]	Pumpestørrelse	Flowmaks. [m^3/s]
270,0	110,0	250	0,00574
Flowmargin [%]	Trykmargin [Bar]	Reguleringsform	Flowmaks [l/s]
4,0	50,0	Flowregulering, konstant tryk	344,375
Maks. flow, Q_{maks} [l/min]	Maks. tryk, Δp_{maks} [Bar]		Pumpekontrol, OK
270,0	110,0		
Flowminimum ved omdrejningstalregulering [% af maks.]			Pumpe kommentar
30,0			Pumpens maxflow er større end det beregnede maxflow nødvendigt
Maks. flow, Q_{maks} inkl. margin [l/min]	Maks. tryk, Δp_{maks} inkl. margin [Bar]		Forholdet mellem de to flow er: 1,250
280,8	160,0		

Figur 4.14. Indfør data Hvis man trykker på indfør data, skal man komme ind i det nederste billede. Her skal man kunne vælge:

- Flow (aktuelt)
Her indtastes flowet til en proces
- Flowmargin
Her indtastes det flow pumpen skal kunne yde yderligere ud over det processen kræver. Flowmargin repræsenterer at flere typer af styre- og reguleringsventiler kræver et lille overløb.
- Maks. flow
Her indtastes det maksimale flow der kan forekomme og som pumpen skal kunne yde
- Flow minimum ved omdrejningstalregulering
Her indtastes det minimale flow pumpen kan yde ved omdrejningstalregulering
- Tryk (aktuelt)
Her indtastes trykbehovet for en proces
- Trykmargin
Her indtastes det tryk som pumpen skal kunne yde yderligere ud over det processen kræver. Trykmargin repræsenterer tryktab i retningsventiler og eventuelt tryktab i bypass/ventiler.
- Maks. tryk
Her indtastes det maksimale tryk der kan forekomme i en proces
- Pumpestørrelsen i et rullegardin
Her vælges en pumpe i størrelsen fra 28 til 250 cm^3 pr. omdrejning

- Reguleringsform i et rullegardin
Her vælges reguleringsformen for pumpen

Data overføres herefter automatisk til billedet vist i figur 4.15. Disse data kan ikke overskrives.



Figur 4.15. Dutupoint for hydraulikpumpe fra P₄ mod P₁

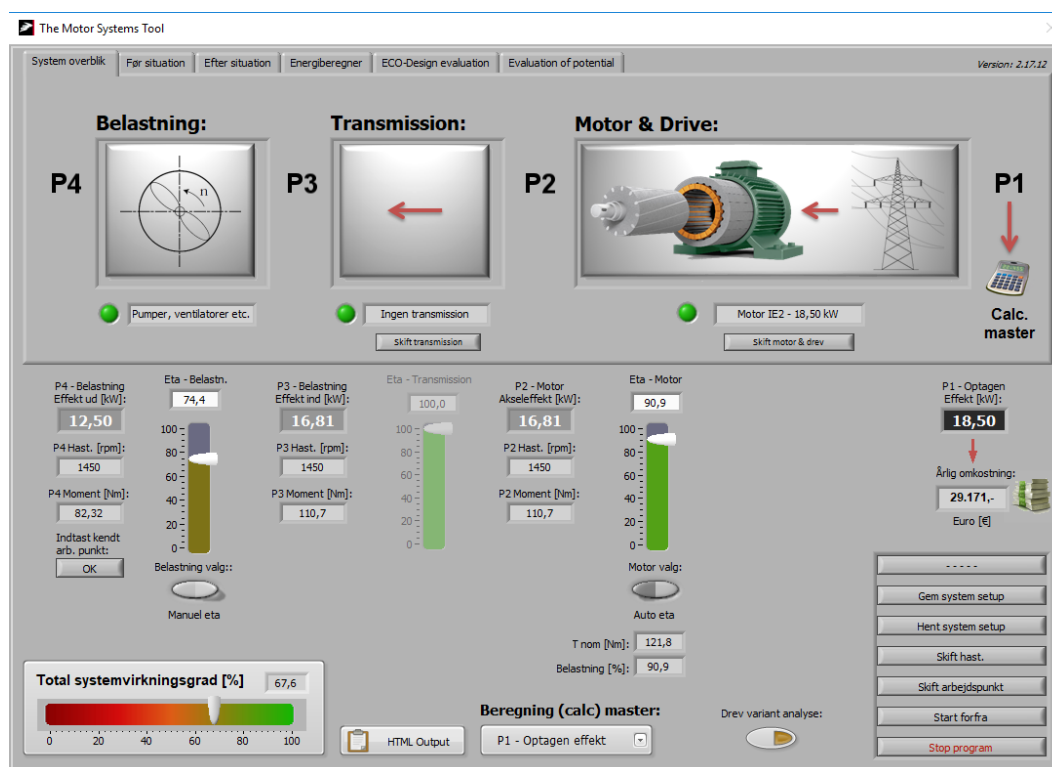
5 Tilpasning af værktøjet til den kommende regulering af Ecodesign regulativet for elmotorer samt regulativerne for ventilatorer og vandpumper

Det var forventet, at en regulering af Ecodesign regulativet for elmotorer (640/2009) ville træde i kraft januar 2018. Dette har ikke været tilfældet. Værktøjet er dog tilpasset til den regulering, som på et tidspunkt ventes at træde i kraft. Værktøjet kan nu håndtere:

- Små motorer (0,12 – 0,75 kW) én og tre fasede
- Store motorer op til 1 MW
- Mellemspændings motorer (indtastes manuelt i værktøjet)
- Frekvensomformere som enkeltstående komponent (indbygget i værktøjet. Se endvidere afsnit 6.1)
- Integrering af algoritmer for standardværdier i parallelt løb med udviklingen inden for International standardisering på området. Dermed sikres det at værktøjet altid følger og regner som den til enhver tid gældende standard:
 - IE-klassifikation for nettilsluttede motorer: IEC 60034-30-1
 - IE-klassifikation for omformertilsluttede motorer: IEC 60034-30-2
 - Standardværdier og testalgoritmer for komplette drevsystemer: IEC 61800-9

5.1 Ecodesign for ventilatorer

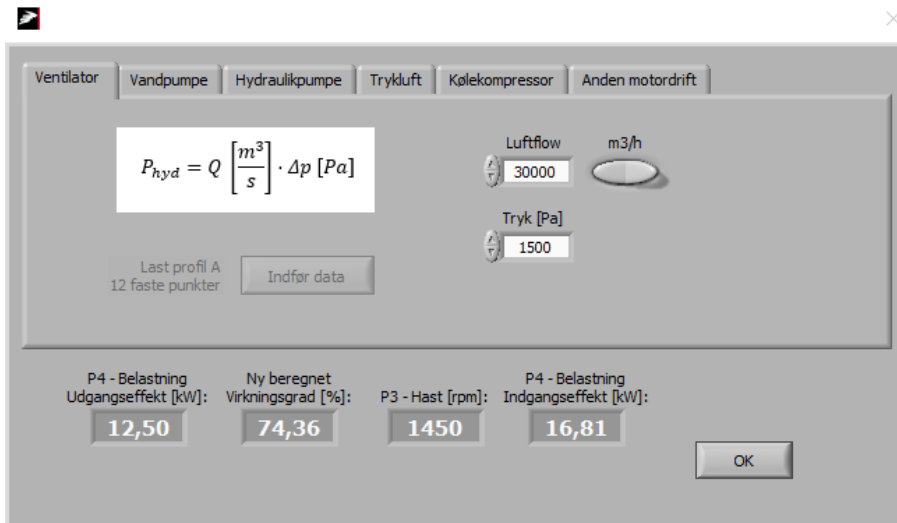
Værktøjet er tilpasset til den eksisterende regulering af Ecodesign for ventilatorer således at brugeren bliver notificeret om overholdelse af krav er opfyldt.



Figur 5.1. Systemoverblik

I figur 5.1 ses, at der er indtastet data for en ventilator og en motor. Der er som det ses valgt en 4-polet 18,5 kW IE2 motor.

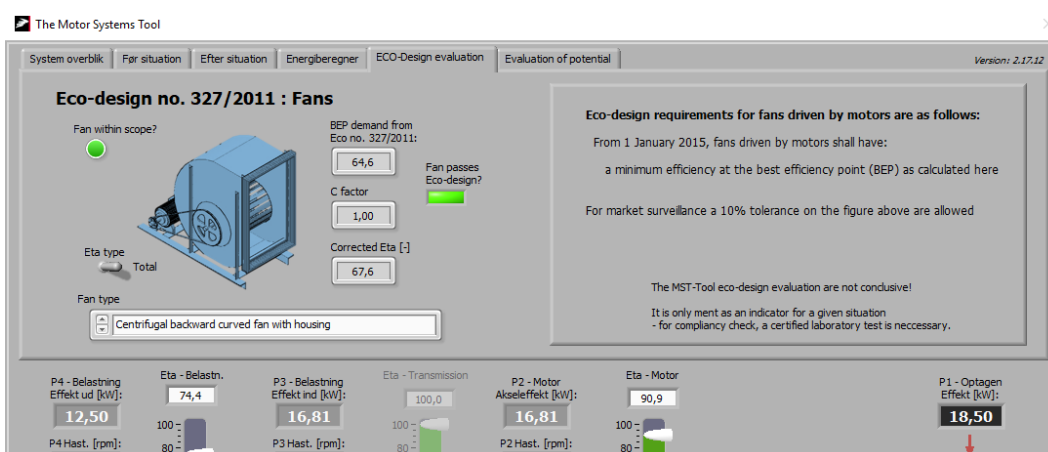
I figur 5.2 ses, at der er indtastet et driftspunkt for ventilatoren. Ventilatorens virkningsgrad er beregnet til 74,4 %, mens systemvirkningsgraden er beregnet 67,6 % (se figur 5.1).



Figur 5.2. Indtast kendt arbejds punkt for ventilator

I fanebladet "ECO-Design evaluation, er der valgt en centrifugalventilator med B-hjul og ventilatorhus og det er valgt, at trykket angivet i figur 5.2 er den totale trykstigning.

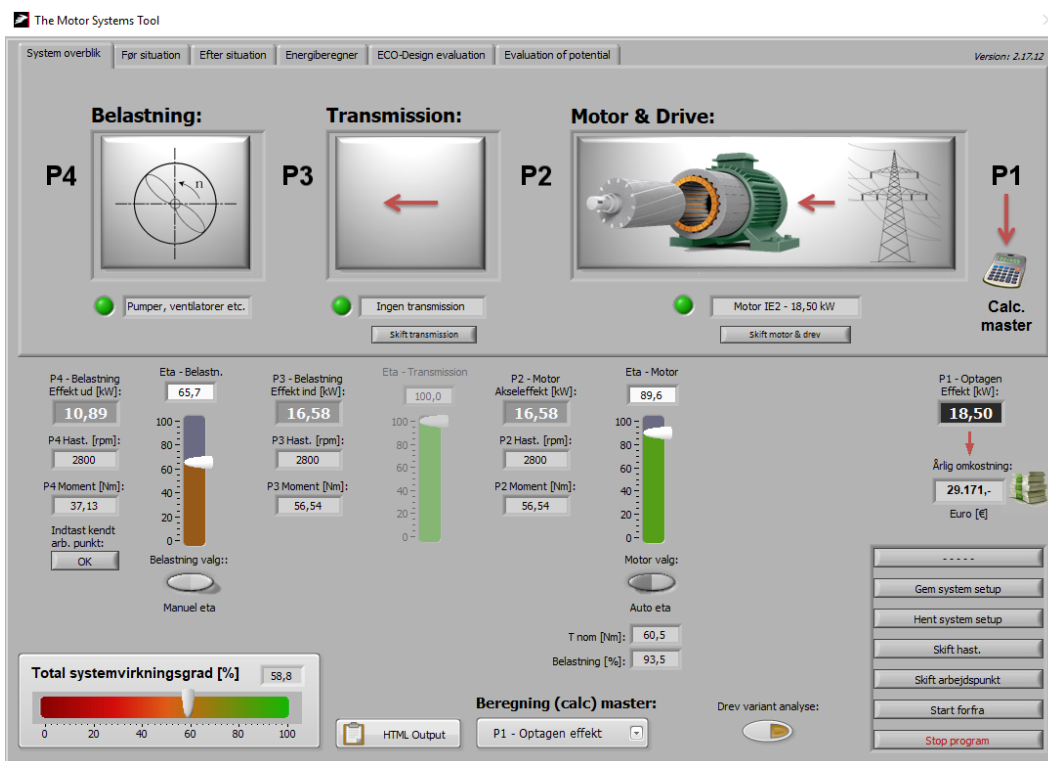
Ecodesign kravet til ventilatoren er, som det ses i figur 5.3, beregnet til 64,6 %, så den lever op til kravet.



Figur 5.3. Ecodesign krav til ventilatorer

5.2 Ecodesign for vandpumper

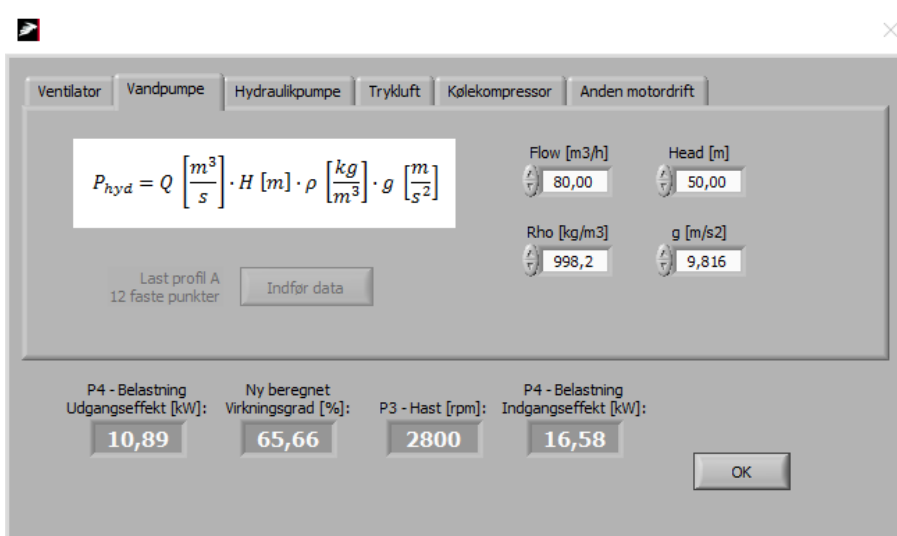
Værktøjet tilpasses til den eksisterende regulering af Ecodesign for vandpumper således at brugeren bliver notificeret om overholdelse af krav er opfyldt.



Figur 5.4. Systemoverblik

I figur 5.4 ses, at der er indtastet data for en vandpumpe og en motor. Der er som det ses valgt en 4-polet 18,5 kW IE2 motor.

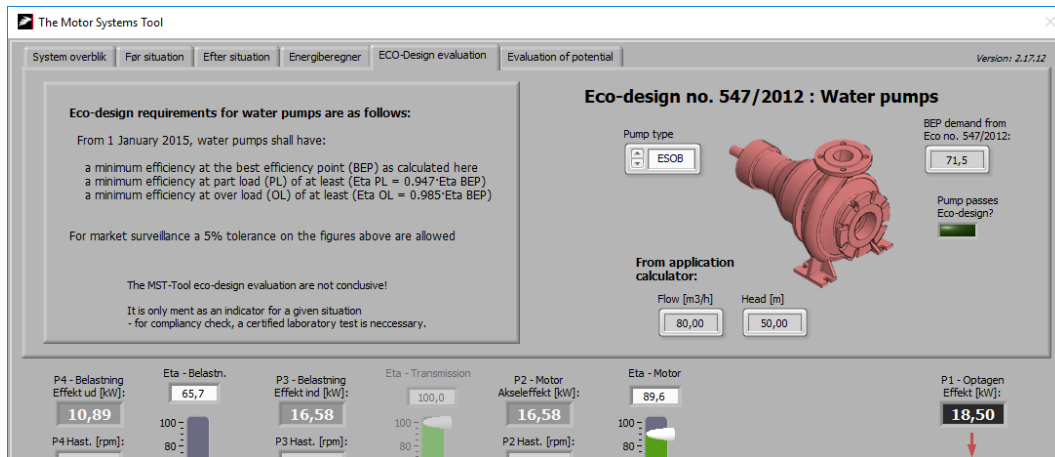
I figur 5.5 ses, at der er indtastet et driftspunkt for vandpumpen. Vandpumpens virkningsgrad er beregnet til 65,7 %, mens systemvirkningsgraden er beregnet 58,8 % (se figur 5.4).



Figur 5.5. Indtast kendt arbejds punkt for vandpumpe

I fanebladet "ECO-Design evaluation, er der valgt en ESOB-vandpumpe.

Ecodesign kravet til vandpumpen er, som det ses i figur 5.6, beregnet til 71,5 %, så den lever ikke op til kravet.



Figur 5.6. Ecodesign krav til vandpumper

6 Videreudvikling af elmotorberegner

I værktøjet er der mulighed for at vælge induktionsmotorer og permanent magnet motor (PM-motorer). Motorer med synkron reluktans bliver pga. deres højere effektiviteter mere og mere udbredte. Denne motortype er meget interessant, da den "konkurrerer" med permanent magnet-motoren om at være den mest effektive. Motorer med synkron reluktans er en teknologi der pt. er ret ukendt og projektet skal være med til at synliggøre at der findes et alternativ til den meget energieffektive PM-motor teknologi.

Værktøjet er derfor udbygget til at kunne håndtere denne motortype. Der er således udviklet matematiske udtryk (algoritmer) for denne motortyper på baggrund af målinger på motorene og andre erfaringer (vidensudveksling med relevante universiteter og institutter både inden- og udenlands).

6.1 Asynkronmotorer

Værktøjets oprindelige model vedr. asynkronmotorer forsynet af frekvensomformere, var baseret på Flemming Abrahamsen's PhD afhandling "Energy Optimal Control of Induction Motor Drives" fra februar 2000 (Aalborg Universitet).

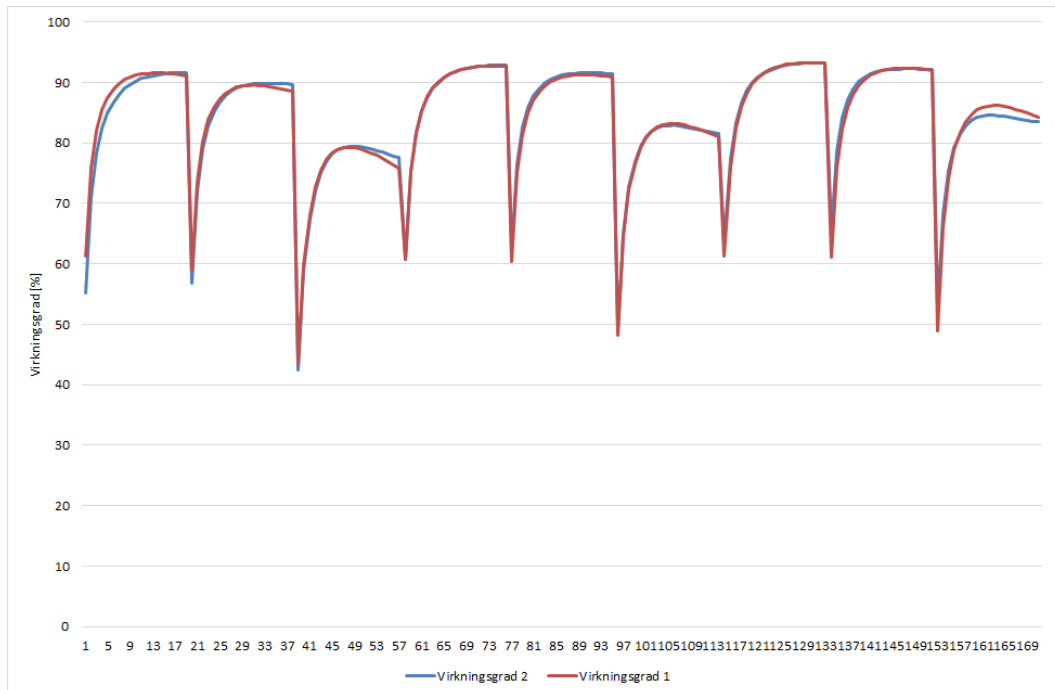
I IEC-standard 61800-9-2 ses måledata for systemer bestående af IE2 motorer og frekvensomformere. Teknologisk Institut har undersøgt om disse data kan benyttes i en opdatering af værktøjets model vedr. asynkronmotorer med frekvensomformere. Det har vist sig at være muligt og modellen er nu opdateret. Modellen kan nu håndtere motorer i effektivitetsklasserne IE1 til IE4 og i størrelsen 0,12 kW til 1.000 kW. Før kunne den kun håndtere motorer i størrelsen 2,2 kW til 90 kW. Modellen kan nu håndtere alle de motorstørrelser, der også er omfattet af Ecodesign regulativet for elmotorer (0,75 kW - 375 kW) og er ligeledes forberedt på den forventede udvidelse af "scope" for næste generation af ecodesign for elmotorer.

Motormodel

Modellen baserer sig på blandt andet på tabellen vist i figur 6.1. I tabellen ses en række interpolationskoefficienter som sammen med et relativt moment T og et relativt omdrejningstal n benyttes til at beregne et relativt tab.

Interpolation coefficients of typical 50 Hz IEC standard motors										
Annex F of IEC 61800-2										
Power [kW]	Poles	A	B	C	D	E	F	T		
								0,5	0,8	
								G Relative loss	Eta	
0,12	4	0,324316	0,116588	0,076506	0,002987	0,003914	-0,292825	0,551857	0,459	0,465
0,18	4	0,250225	0,094236	0,061948	0,002082	0,002949	-0,119516	0,316624	0,386	0,509
0,25	4	0,195658	0,083798	0,060563	0,005959	0,006785	-0,100213	0,249350	0,316	0,559
0,37	4	0,137100	0,062496	0,042114	0,004064	0,004561	-0,042812	0,204367	0,245	0,620
0,55	4	0,111483	0,047330	0,031814	0,000010	0,000416	-0,026457	0,161360	0,197	0,670
0,75	4	0,085781	0,041660	0,026726	0,001532	0,001856	-0,020927	0,152402	0,164	0,709
1,1	4	0,069172	0,038244	0,027240	0,000872	0,001317	-0,016191	0,140765	0,145	0,734
1,5	4	0,059580	0,034760	0,022242	0,001155	0,001639	-0,018775	0,138279	0,127	0,759
2,2	4	0,036978	0,031347	0,021183	0,009877	0,008447	0,016190	0,091365	0,110	0,785
3	4	0,038845	0,026351	0,015957	0,004417	0,004606	-0,008363	0,110668	0,095	0,808
4	4	0,034853	0,027515	0,019177	0,004163	0,004691	-0,012966	0,098248	0,089	0,818
5,5	4	0,029206	0,024540	0,018285	0,007272	0,007664	-0,009436	0,084946	0,080	0,834
7,5	4	0,023744	0,022127	0,015244	0,006753	0,007196	-0,016095	0,091724	0,069	0,854
11	4	0,019974	0,020315	0,014864	0,005763	0,005965	-0,009032	0,072826	0,062	0,867
15	4	0,016536	0,018496	0,013898	0,006173	0,006388	-0,007766	0,064775	0,055	0,880
18,5	4	0,014915	0,017047	0,012419	0,005559	0,005729	-0,005309	0,063114	0,052	0,886
22	4	0,014521	0,016611	0,012614	0,002568	0,002826	-0,005610	0,060415	0,049	0,891
30	4	0,010356	0,013976	0,008611	0,006561	0,009284	0,000337	0,048029	0,042	0,905

Figur 6.1. Interpolationskoefficienter, relative tab og virkningsgrader for 4-polede asynkronmotorer



Figur 6.5. Virkningsgrader for en 30 kW, 55 kW og 75 kW motor

Udtryk for tab fra motorer i størrelsen 30 kW til 75 kW:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{tab}} = & 0,1850 \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}}) - 0,010 \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}})^2 + \\
 & 0,3846 \cdot ((n/n_{\text{nom}})^2) \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}}) - \\
 & 0,0065 \cdot (((n/n_{\text{nom}})^2) \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}}))^2 + \\
 & 0,6054 \cdot ((M/M_{\text{nom}})^2) \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}}) - \\
 & 0,0260 \cdot (((M/M_{\text{nom}})^2) \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}}))^2 + \\
 & 0,0086 \cdot (P_{\text{ind, nom}} - P_{\text{mek, nom}})^3 \cdot ((n/n_{\text{nom}})^2 \cdot (M/M_{\text{nom}})^2)
 \end{aligned}$$

Der er endvidere udarbejdet udtryk for motorer i størrelserne:

- 0,12 kW til 2 kW
- 3 kW til 22 kW
- 90 kW til 1.000 kW

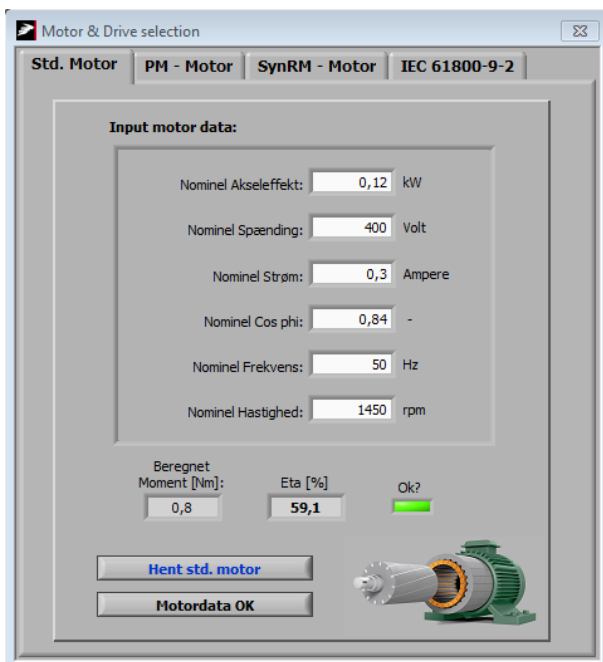
Udtrykkene er magen til ovenstående udtryk, men med andre konstanter.

Frekvensomformermodel

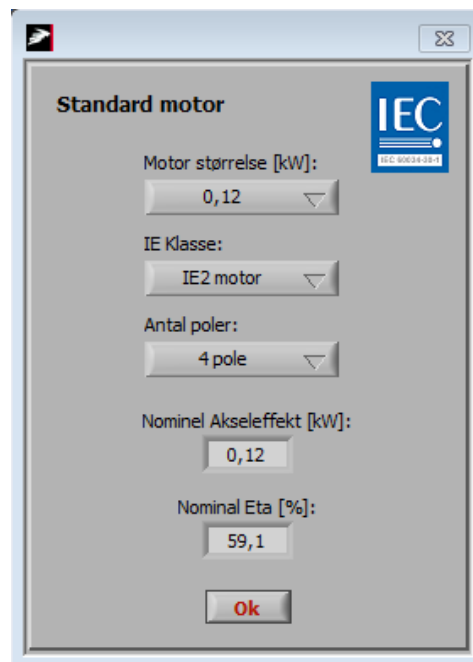
Modellen baserer sig på blandt andet på tabellen vist i figur 6.6. I tabellen ses virkningsgrader som funktion af et relativt moment T og et relativt omdrejningstal n. Disse tab benyttes til at beregne en række interpolationskoefficienter.

n	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	1	1
T	0,25	0,5	1	0,25	0,5	1	0,5	1
Effekt [kW]	Virkningsgrad							
0,12	77,0772	83,49044	87,34715	87,73653	90,65192	92,63687	93,15452	94,53947
0,18	77,51586	83,82629	87,57671	88,03957	90,93342	92,87249	93,3893	94,70704
0,25	77,87126	84,09839	87,7627	88,28508	91,16149	93,06339	93,57951	94,8428
0,37	78,2954	84,42312	87,98467	88,57808	91,43368	93,29121	93,80652	95,00482
0,55	78,72428	84,75148	88,20911	88,87435	91,7089	93,52158	94,03605	95,16864
0,75	79,05982	85,00838	88,38471	89,10615	91,92424	93,70181	94,21564	95,29682
1,1	79,47417	85,32561	88,60155	89,39238	92,19014	93,92437	94,4374	95,4551
1,5	79,80972	85,58251	88,77715	89,62418	92,40547	94,10461	94,61699	95,58328
2,2	80,22407	85,89975	88,99399	89,91042	92,67137	94,32717	94,83875	95,74156
3	80,55962	86,15665	89,16959	90,14222	92,88671	94,5074	95,01834	95,86974
4	80,87085	86,39494	89,33247	90,35723	93,08644	94,67458	95,18492	95,98863
5,5	81,21538	86,65871	89,51277	90,59523	93,30753	94,85964	95,36931	96,12023
7,5	81,55093	86,91562	89,68837	90,82703	93,52287	95,03987	95,5489	96,24841
11	81,96528	87,23285	89,90521	91,11327	93,78877	95,26244	95,77066	96,40669
15	82,30083	87,48975	90,08082	91,34507	94,0041	95,44267	95,95025	96,53487
18,5	82,52772	87,66346	90,19955	91,5018	94,14971	95,56454	96,07168	96,62154
22	82,71517	87,80699	90,29766	91,6313	94,27	95,66523	96,17201	96,69315
30	83,05072	88,06389	90,47326	91,8631	94,48534	95,84547	96,3516	96,82132
37	83,27761	88,2376	90,592	92,01984	94,63094	95,96734	96,47303	96,90799
45	83,48938	88,39974	90,70282	92,16613	94,76684	96,08109	96,58637	96,98889
55	83,70648	88,56595	90,81644	92,31611	94,90616	96,1977	96,70257	97,07182
75	84,04203	88,82286	90,99204	92,54791	95,1215	96,37794	96,88216	97,2
90	84,23928	88,97387	91,09526	92,68417	95,24808	96,48389	96,98773	97,27535
110	84,45638	89,14009	91,20888	92,83415	95,3874	96,6005	97,10392	97,35828
132	84,65363	89,29111	91,3121	92,97041	95,51398	96,70645	97,20949	97,43363
160	84,86175	89,45045	91,42102	93,11418	95,64754	96,81824	97,32088	97,51313
200	85,10317	89,63528	91,54736	93,28095	95,80246	96,94791	97,45008	97,60535
250	85,34458	89,82011	91,6737	93,44772	95,95739	97,07758	97,57929	97,69756
315	85,59461	90,01154	91,80454	93,62045	96,11784	97,21188	97,71311	97,79308
355	85,72395	90,11056	91,87223	93,70979	96,20084	97,28135	97,78233	97,84248
400	85,85306	90,20942	91,9398	93,79899	96,2837	97,35071	97,85143	97,8918
500	86,09448	90,39425	92,06614	93,96576	96,43862	97,48038	97,98064	97,98402
560	86,21708	90,48812	92,1303	94,05046	96,5173	97,54624	98,04626	98,03086
630	86,34451	90,58568	92,19699	94,13848	96,59908	97,61468	98,11446	98,07953
710	86,47384	90,6847	92,26467	94,22783	96,68207	97,68415	98,18368	98,12894
800	86,60296	90,78355	92,33224	94,31702	96,76493	97,7535	98,25278	98,17826
900	86,73039	90,88111	92,39893	94,40505	96,84671	97,82195	98,32098	98,22694
1000	86,84437	90,96838	92,45858	94,48379	96,91986	97,88318	98,38199	98,27048

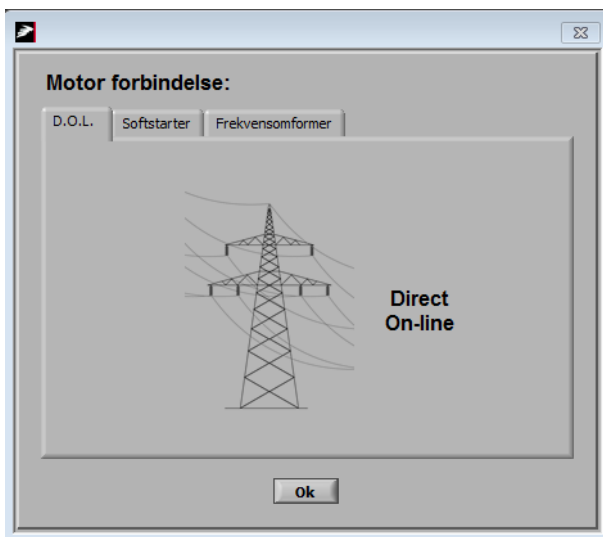
Figur 6.6. Virkningsgrader for asynkronmotorer i størrelsen 0,12 kW til 1.000 kW



Figur 6.7. Valg af standardmotor



Figur 6.8. Hent standardmotor



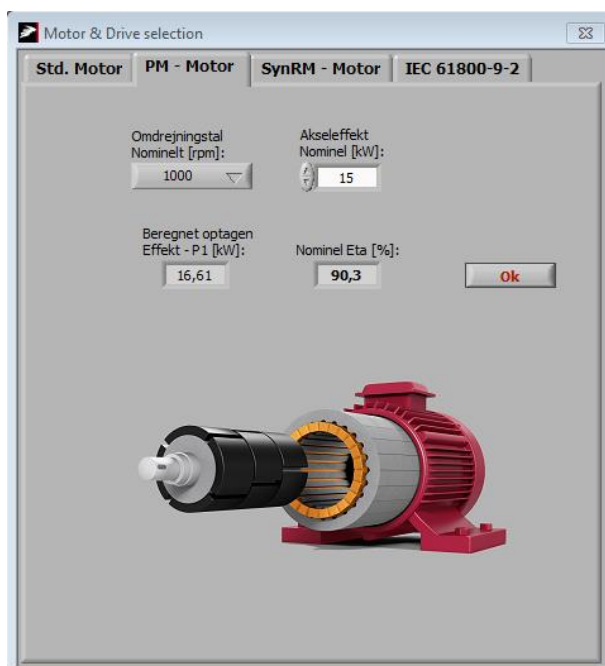
Figur 6.9. Valg af motorforbindelse

6.2 PM-motorer og SynRM

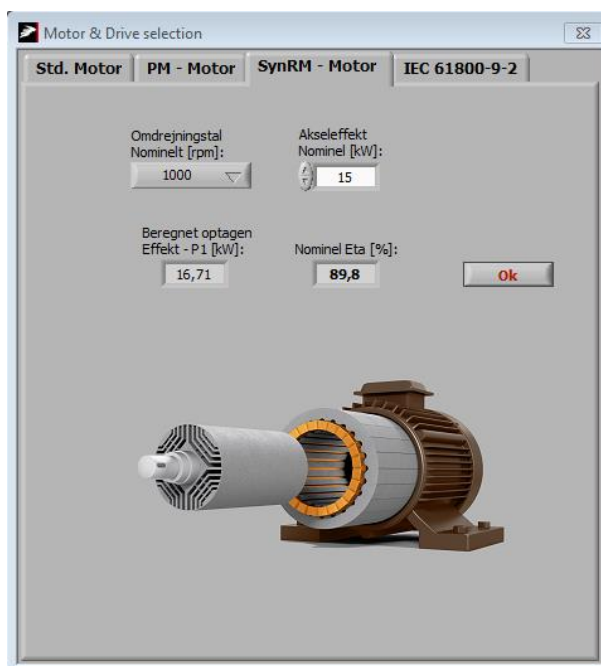
Værktøjets oprindelige model vedr. PM-motorer er blevet opdateret. Opdateringen er et resultat af Teknologisk Instituts samarbejde med universitetet i Gent (Belgien): "Howest".

Dette universitet har over en årrække opbygget en test facilitet for elmotorer og frekvensomformere i stil med den på Teknologisk Institut, og denne har i Belgien været anvendt til et større udviklingsprojekt til kortlægning af virkningsgrader på både PM-motor systemer (permanente magneter) samt motorer med synkron reluktans (SynRM Motorer).

I efteråret 2017 er disse PM måleresultater blevet "flettet" med den eksisterende PM model samt udvidet værktøjet til nu også at understøtte motorer med synkron reluktans (SynRM).



Figur 6.10. Valg af permanentmagnetmotor



Figur 6.11. Valg af synkronreluktans motor

6.3 IEC 61800-9-2

I værktøjet er det muligt at få beregnet virkningsgrader for 2- og 4-polede IE2 motorer i området 0,12 kW til 1.000 kW i henhold til IEC-standard nr. 61800-9-2, Annex D og A.

Dette er udarbejdet som en service for dem der deltager i arbejdet med den pågældende standard. En bruger af værktøjet skal ikke benytte disse beregningsmuligheder.

Motor & Drive selection

Std. Motor | PM - Motor | SynRM - Motor | **IEC 61800-9-2**

IEC 61800-9-2
Annex D - Informative
Typical IE2 machine

Vælg IEC model:

Nominal hast. [rpm]: 1500 | Motor str. [kW]: 0,12

Beregnet indgangs Effekt - P1 [kW]: 0,2264 | Nominal Eta [%]: 53,0 | Nominelt Moment [Nm]: 0,764

Ok

Dette er en fuldautomatiseret version af interpolationsmodellen defineret i IEC standarden IEC 61800-9-2:2017 tabel D4 & D5.

Modellen gælder standardiserede tabsmodeller af typiske 2 & 4 polede maskiner klasse IE2 i området 0,12 - 1.000 kW.

Det gyldige område for modellen er:
Moment (belastning) fra 10 til 110% - Hastighed fra 10 to 110%

Yderligere information kan findes i standarden.

Figur 6.12. Beregninger i henhold til IEC 61800-9-2 Annex D

Motor & Drive selection

Std. Motor | PM - Motor | SynRM - Motor | **IEC 61800-9-2**

IEC 61800-9-2
Annex A - Normative
Reference losses

Vælg IEC model:

Nominal hast. [rpm]: 1500 | Motor str. [kW]: 0,12

Beregnet indgangs Effekt - P1 [kW]: 0,3257 | Nominal Eta [%]: 36,8 | Nominelt Moment [Nm]: 0,764

Ok

Dette er en fuldautomatiseret version af referencemodellen RPDS defineret i IEC standarden IEC 61800-9-2:2017 tabel A3.

Modellen gælder teoretiske tabsmodeller af typiske 2 & 4 polede maskiner klasse IE2 i området 0,12 - 1.000 kW.

Det gyldige område for modellen er:
Moment (belastning) fra 10 til 110% - Hastighed fra 10 to 110%

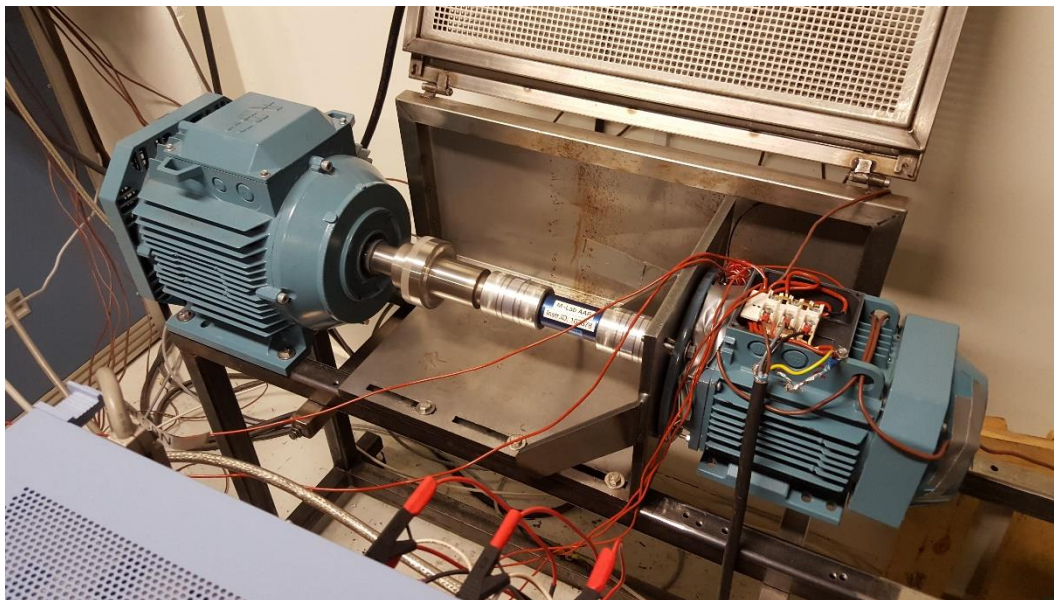
Yderligere information kan findes i standarden.

Figur 6.13. Beregninger i henhold til IEC 61800-9-2 Annex A

6.4 Test af SynRM

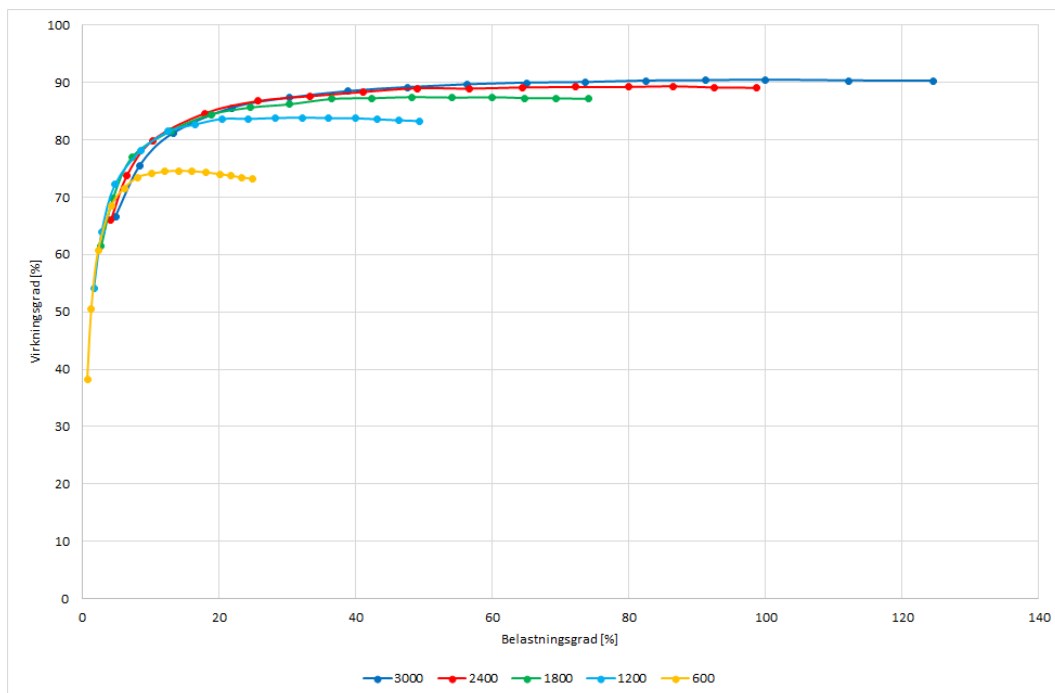
6.4.1 Test af 4 kW 2-polet synkron reluktansmotor

I forbindelse med videreudviklingen af elmotorberegnerne, blev der foretaget en test af virkningsgraden for en 4 kW synkron reluktansmotor.



Figur 6.14. Synkron reluktansmotor

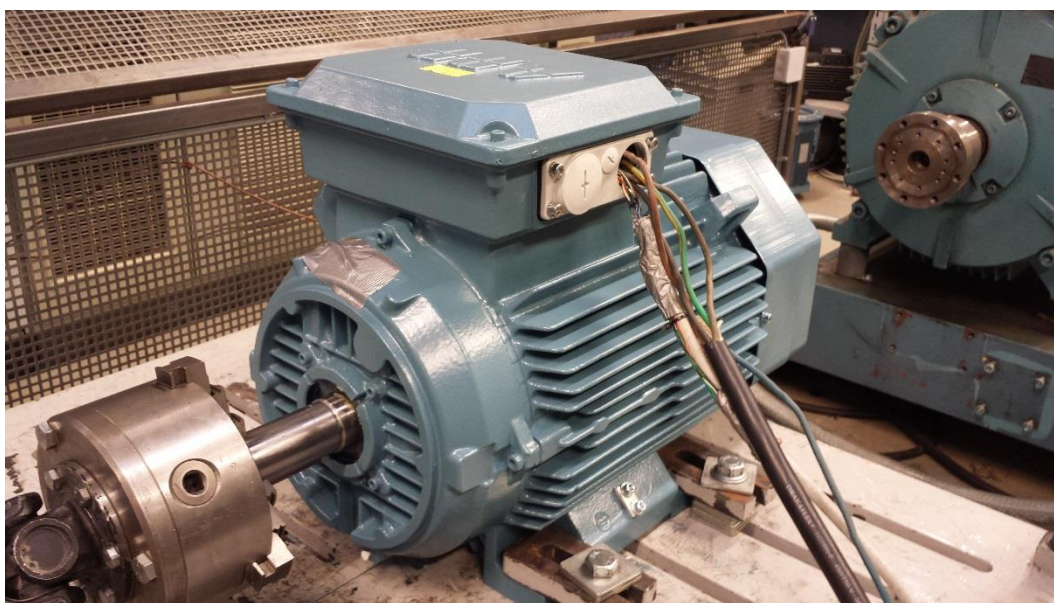
I figur 6.15 ses virkningsgrader for en 4 kW 2-polet synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformer ved fem forskellige omdrejningstal som funktion af belastningsgraden. Ved alle fem hastigheder er virkningsgraden nogenlunde konstant i store dele af belastningsgradsområderne, hvilket viser at denne motortype er særdeles effektiv.



Figur 6.15. Virkningsgrad for en 4 kW synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformere ved tre forskellige hastigheder som funktion af belastningsgraden (P/PN)

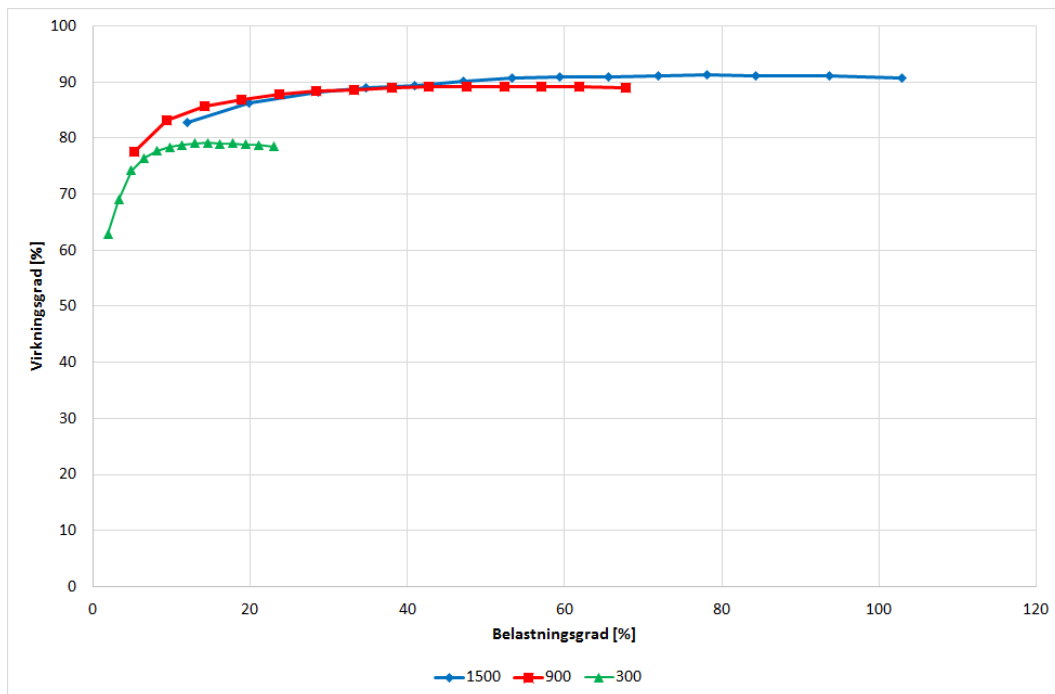
6.4.2 Test af 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor

I forbindelse med videreudviklingen af elmotorberegnerne, blev der foretaget en test af virkningsgraden for en 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor.



Figur 6.16. Synkron reluktansmotor

I figur 6.17 ses virkningsgrader for en 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformer ved tre forskellige omdrejningstal som funktion af belastningsgraden. Ved alle tre hastigheder er virkningsgraden nogenlunde konstant i store dele af belastningsgradsområderne, hvilket viser at denne motortype er særdeles effektiv.



Figur 6.17. Virkningsgrad for en 15 kW synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformere ved tre forskellige hastigheder som funktion af belastningsgraden (P/PN)

7 Optimering af funktionaliteter

Der er udviklet en mere detaljeret variant af energiberegningsdelen som i dag er repræsenteret ved en simpel før/efter graf. Aktive brugere af værktøjet har bl.a. andet udtrykt ønske om følgende punkter i forhold til energiberegneren:

- Mulighed for selektive arbejds punkter til beregneren
- Mulighed for flere synlige løsningsforslag samtidigt
- Mulighed for opskalering til hele produktionslinjer
 - Herunder mulighed for at inkludere forskellige løsningsforslag
- Inkludering af økonomiske konsekvenser på energiberegneren
- Forberede energiberegneren til at være inkluderet i output fra MST-Tool

Det er gjort muligt at udarbejde en baseline i form af en lille database, hvor det allerede udviklede tabelopslag om elforbrug og besparelser i maskinsystemer opgjort for udvalgte teknologier og brancher bliver overført til. Rådgiveren kan anvende det til en indledende kortlægning af en virksomhed og ved hjælp af systemoptimeringsværktøjet indlednings foretage et estimat over besparelspotentialet i virksomheden. Herefter kan en grundigere måling af forbrug foregå på de steder det var vurderet at der var noget at komme efter. Værktøjet kan herefter igen anvendes for en mere nøjagtig beregning af potentialet på den enkelte applikation.

Tabelopslaget blev udarbejdet i 2015, det har været nødvendigt at opdatere det med de seneste tal fra Danmarks Statistik og "Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug" udarbejdet af Viemand & Maagøe ApS i 2015.

På baggrund af dette er dataene i figur 7.1 og 7.2 fremkommet.

	Ventilation	Pumper	Trykluft	Køl	Hydraulik	Anden motordrift
Nærings og nydelsesmidler	18,7	13,0	7,2	23,3	1,2	21,9
Jern og metal	14,6	3,8	9,4	1,4	4,0	32,1
Mineralolie, kemisk og plast	11,5	12,5	12,8	10,6	1,7	20,3
Sten, ler og glas	14,1	7,8	10,6	0,0	3,7	47,7
Træ, papir og møbel	30,7	11,1	11,9	1,4	2,1	27,2
Grafisk	19,0	1,0	5,0	5,0	0,0	33,0
Tekstil, beklædning og læder	16,6	6,9	10,0	0,3	0,0	38,8

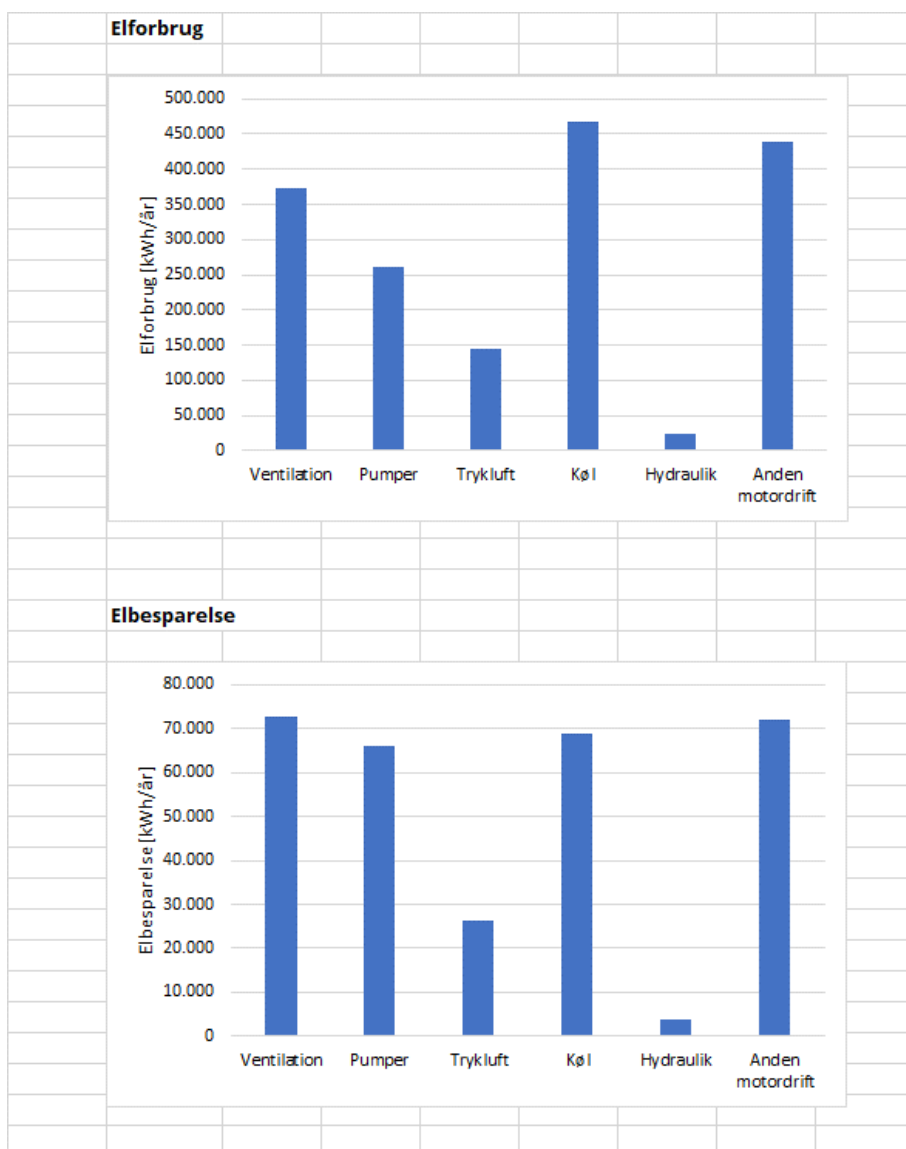
Figur 7.1. Elforbrugsfordelinger for brancherne

	Ventilation	Pumper	Trykluft	Køl	Hydraulik	Anden motordrift
Nærings og nydelsesmidler	19,5	25,3	18,2	14,8	16,0	16,4
Jern og metal	23,4	25,3	19,4	14,8	16,0	18,3
Mineralolie, kemisk og plast	21,0	26,3	19,2	14,8	16,0	17,6
Sten, ler og glas	21,0	26,3	19,2		16,0	17,6
Træ, papir og møbel	21,0	26,3	19,2	14,8	16,0	17,6
Grafisk	21,0	26,3	19,2	14,8		17,6
Tekstil, beklædning og læder	21,0	26,3	19,2	14,8		17,6

Figur 7.2. Procentvise besparelspotentialer for brancherne

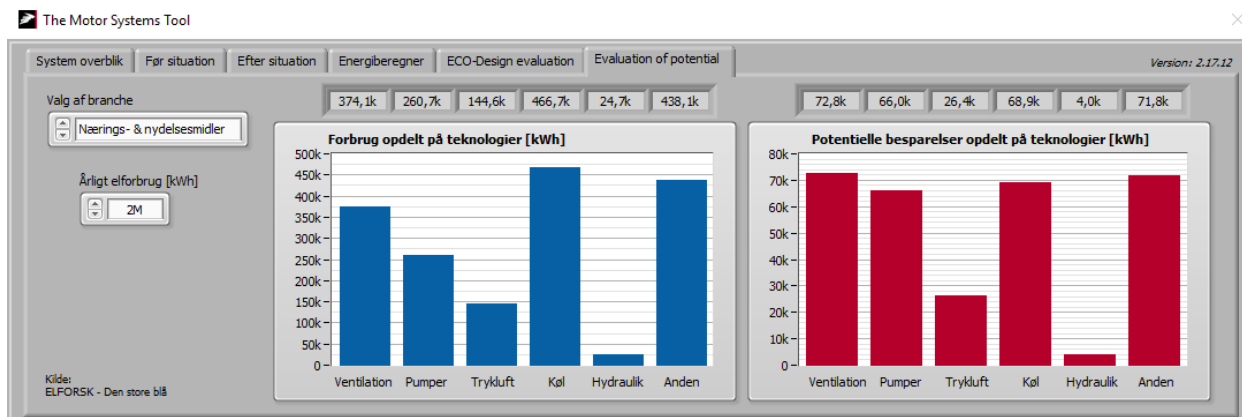
Branche:	Nærings og nydelsesmidler ▼				
Elforbrug:	2.000.000 kWh				
Opdeling af elforbrug på teknologier [kWh]					
Ventilation	Pumper	Trykluft	Køl	Hydraulik	Anden motordrift
374.079	260.715	144.639	466.658	24.719	438.083
Elbesparelser opdelt på teknologier [kWh]					
Ventilation	Pumper	Trykluft	Køl	Hydraulik	Anden motordrift
72.761	66.037	26.351	68.927	3.961	71.805

Figur 7.3. Opdeling af elforbrug på teknologier og besparelspotentialer



Figur 7.4. Opdeling af elforbrug på teknologier og besparelspotentialer

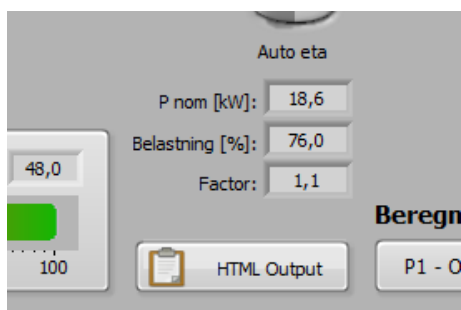
I værktøjet ser det således ud:



Figur 7.5. Opdeling af elforbrug på teknologier og besparelspotentialer

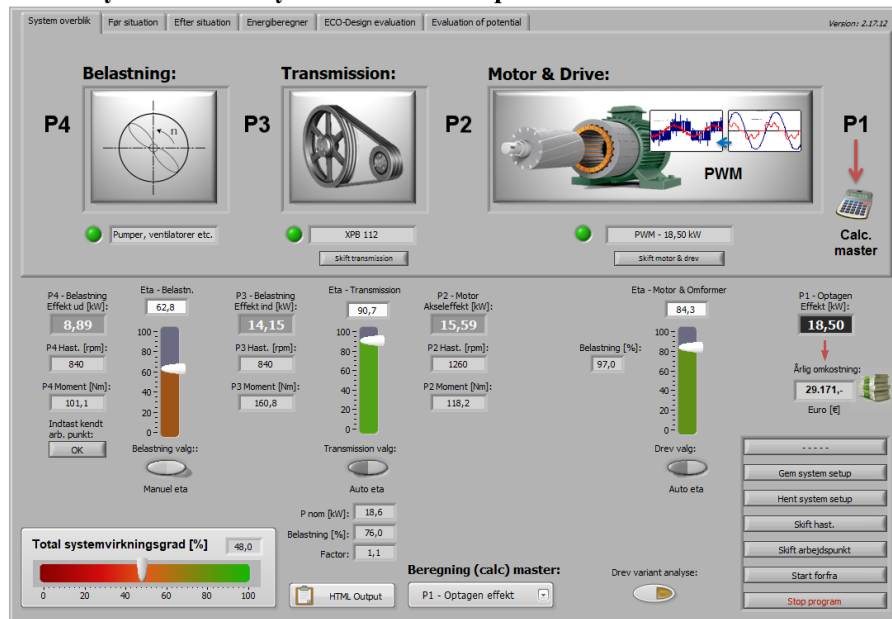
Der er endvidere foretaget en generel forbedring af værktøjets nuværende funktionaliteter, herunder:

- Mulighed for udskrift til printer
- Mulighed for at man kan gemme og indlæse tidligere beregninger
- Definition af en standardiseret slutrapport – inkl. data fra energiberegneren
- Mulighed for "gem som" pdf, standardiseret slutrapport



Figur 7.6. HTML output

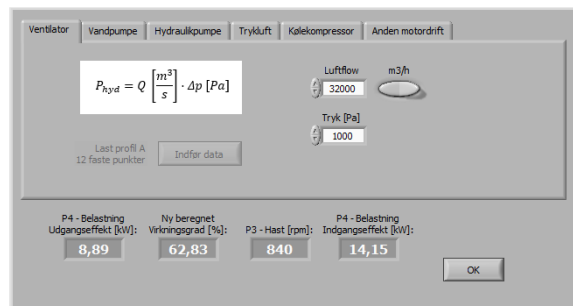
Motor Systems Tool - System Overview Report



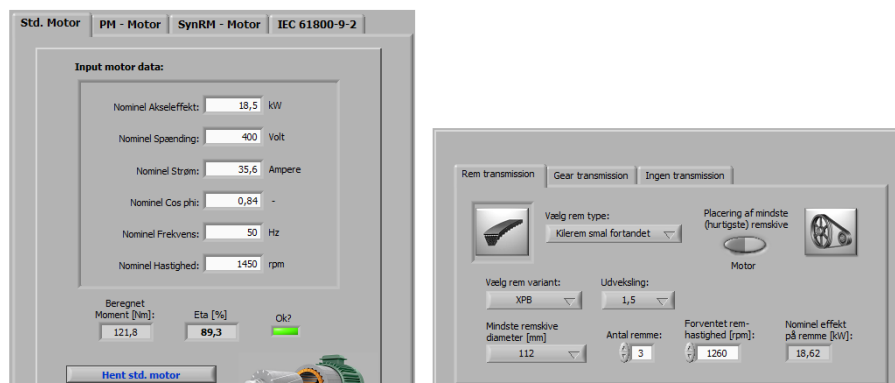
MST-Tool main window

Figur 7.7. Systemoverblik

Application data:



Motor & Transmission:



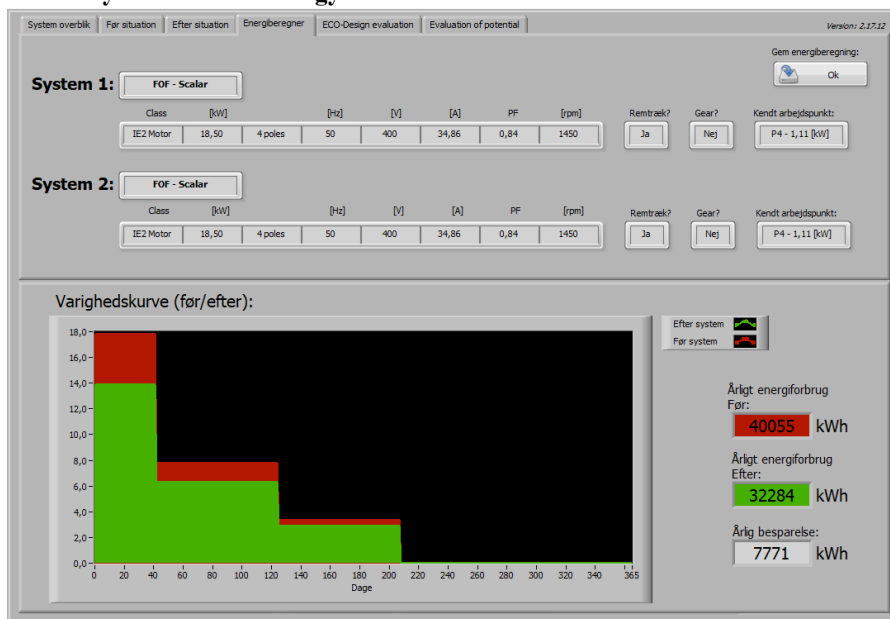
Figur 7.8. Data for applikation samt motor og transmission

Duty point data:

System setup		MST Version:	2.17.12	Date of data:	08-04-2019		
Kendt punkt plads	Aktuelt arbejds punkt Effekt [kW]	Hastighed P3 [rpm]	Udveksling	Hastighed P2 [rpm]	Momentkurve	Load txt info	Effekt P3 [kW]
P1	18,50	840	1,500	1260	4	Pumper, ventilatorer etc.	14,15

Figur 7.9. Driftspunkt

Motor Systems Tool - Energy calculation



MST-Tool Energy calculation

Figur 7.10. Energiberegning

Before situation:

Version & date:

MST Version:	2.17.12	Date of data:	04-04-2019														
--------------	---------	---------------	------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Motor setup info:

Connection	Class	Nom. power [kW]	Poles [-]	Frequency [Hz]	[V]	[A]	PF	[rpm]									
FOF - Scalar	IE2 Motor	18,50	4 poles	50	400	34,86	0,84	1450									
Calc master	P4	1,11															

Transmission info:

Er der transmission?	Rem ID	Mindste remskivediameter [mm]	Udvekslingsforhold	Vælg rem type	Antal remme	Placering af mindste remskive	Indtast mindste remskivediameter [mm]	Transmission info:	Gear present?	Select type of gear	Gear nominal shaft speed [rpm]	Gear nominal shaft power [kW]	Gear udveksling	Gear f faktor	Gear Eta nominal
Ja	XPB	100,000	1,2	Kilerem smal fortandet	3,000	P3	63	XPB 100	Nej						

Duty points:

Before situation:		FOF - Scalar	IE2 Motor	18,50	4 poles	50	400	34,86	0,84	1450							
Par. A	Par. B	P4 [kW]	Eta load	P3 [kW]	P3 [rpm]	Eta transmission	P2 [kW]	P2 [rpm]	Eta motor	Eta VSD	P1 [kW]	Eta total	Hours/year	Days/year	kWh/year		
31700,000	1000,000	8,806	65,000	13,547	1740,000	87,410	15,498	1450,000	100,000	87,131	17,787	49,504	1000,000	42,000	17787,425		
24000,000	540,000	3,600	65,000	5,538	1740,000	85,986	6,441	1450,000	100,000	82,629	7,795	46,182	2000,000	83,000	15590,427		
16000,000	250,000	1,111	65,000	1,709	1740,000	79,329	2,155	1450,000	100,000	64,541	3,339	33,280	2000,000	83,000	6677,383		

Figur 7.11. Før situation

After situation:

Version & date:

MST Version:	2.17.12	Date of data:	04-04-2019																	
--------------	---------	---------------	------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Motor setup info:

Connection	Class	Nom. power [kW]	Poles [-]	Frequency [Hz]	[V]	[A]	PF	[rpm]												
FOF - Scalar	IE2 Motor	18,50	4 poles	50	400	34,86	0,84	1450												
Calc master	P4	1,11																		

Transmission info:

Er der transmission?	Rem ID	Mindste remskivediameter [mm]	Udvekslingsforhold	Vælg rem type	Antal remme	Placering af mindste remskive	Indtast mindste remskivediameter [mm]	Transmission info.	Gear present?	Select type of gear	Gear nominal shaft speed [rpm]	Gear nominal shaft power [kW]	Gear udveksling	Gear f faktor	Gear Eta nominal
Ja	XPB	100,000	1,2	Kilerem smal fortundet	3,000	P3	63	XPB 100	Nej						

Duty points:

After situation:	FOF - Scalar	IE2 Motor	18,50	4 poles	50	400	34,86	0,84	1450											
Par. A	Par. B	P4 [kW]	Eta load	P3 [kW]	P3 [rpm]	Eta transmission	P2 [kW]	P2 [rpm]	Eta motor	Eta VSD	P1 [kW]	Eta total	Hours/year	Days/year	kWh/year					
31700,000	1000,000	8,806	84,000	10,483	1740,000	87,309	12,007	1450,000	100,000	86,663	13,854	63,558	1000,000	42,000	13854,288					
24000,000	540,000	3,600	84,000	4,286	1740,000	84,760	5,056	1450,000	100,000	79,877	6,330	56,871	2000,000	83,000	12660,202					
16000,000	250,000	1,111	84,000	1,323	1740,000	78,015	1,696	1450,000	100,000	58,775	2,885	38,517	2000,000	83,000	5769,496					

Figur 7.12. Efter situation

8 Demonstration

Der er foretaget en grundig test af systemoptimeringsværktøjet in situ.

På Pressalit blev værktøjet testet på et hydrauliksystem og et trykluftsystem. Hydrauliksystemet var dog meget lille, så en anden virksomhed blev også inddraget. Se senere.

På LEGO var det meningen at værktøjet skulle testes på et kølesystem. Det viste sig dog ikke at være muligt, da det ikke var muligt at få de nødvendige data.

Endvidere blev virksomheden NLMK DanSteel også involveret i testen, da de råder over flere store hydraulikanlæg. Virksomheden deltog dog ikke som egentlige partner i projektet.

Endelig blev virksomheden CITY 2 også involveret i testen, da de råder over flere store køleanlæg. Virksomheden deltog dog heller ikke som egentlige partner i projektet.

Undervejs i projektet blev der inddraget flere potentielle og relevante brugere for at teste og sikre brugervenligheden af systemoptimeringsværktøjet. Det drejede sig eksempelvis om leverandører af trykluft-, køle- og hydrauliksystemer som i nødvendigt omfang er blevet inddraget i projektet.

De tre leverandører af elmotorer og frekvensomformere, som var partnere i projektet, deltog også i testen af værktøjet.

Center for køle- og varmepumpeteknik på Teknologisk Institut har stor og mangeårig erfaring med systemoptimering og energieffektivisering af kølesystemer og har en stor kontaktflade i køleindustrien. Dette center blev derfor også i nødvendigt omfang blevet inddraget, dog ikke som egentlige partner.

Der blev i projektforsløbet afholdt en workshop, hvor potentielle og relevante brugere fik mulighed for at komme med forslag til ændringer og tilføjelser i beregningsværktøjet, så det lever op til deres forventninger og behov. På workshoppen deltog flere større rådgivningsvirksomheder der beskæftiger sig systemoptimering.

8.1 Test af applikationsberegner for trykluft hos Pressalit

Der er foretaget målinger på en vakuumpumpe, en hydraulikstation og en trykluftkompressor hos Pressalit A/S. Data skal benyttes til en grundig test af systemoptimeringsværktøjet in situ (WP 5 Demonstration).

Hydraulikstationer for kerneudtræk

Hydraulikstation nr. 2 er tilknyttet presser 1 – 10. Det er oplyst af personalet at hydraulikstation har et flow på 3,5 l/min ved 150 bar.

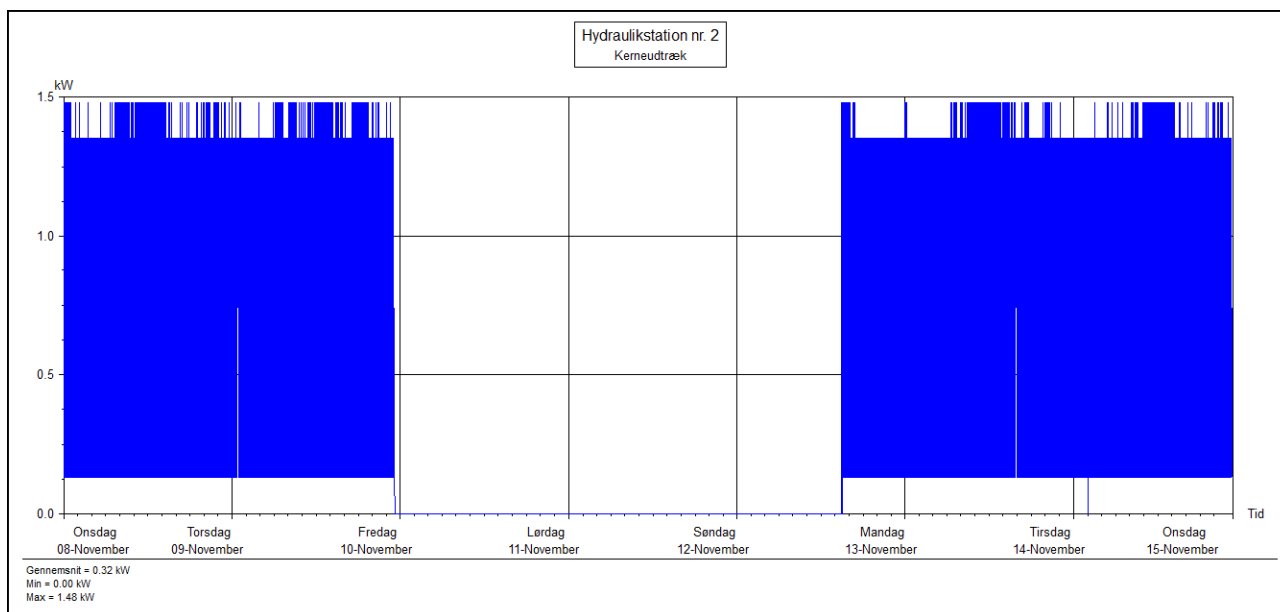


Figur 8.1. Hydraulikstation nr. 2

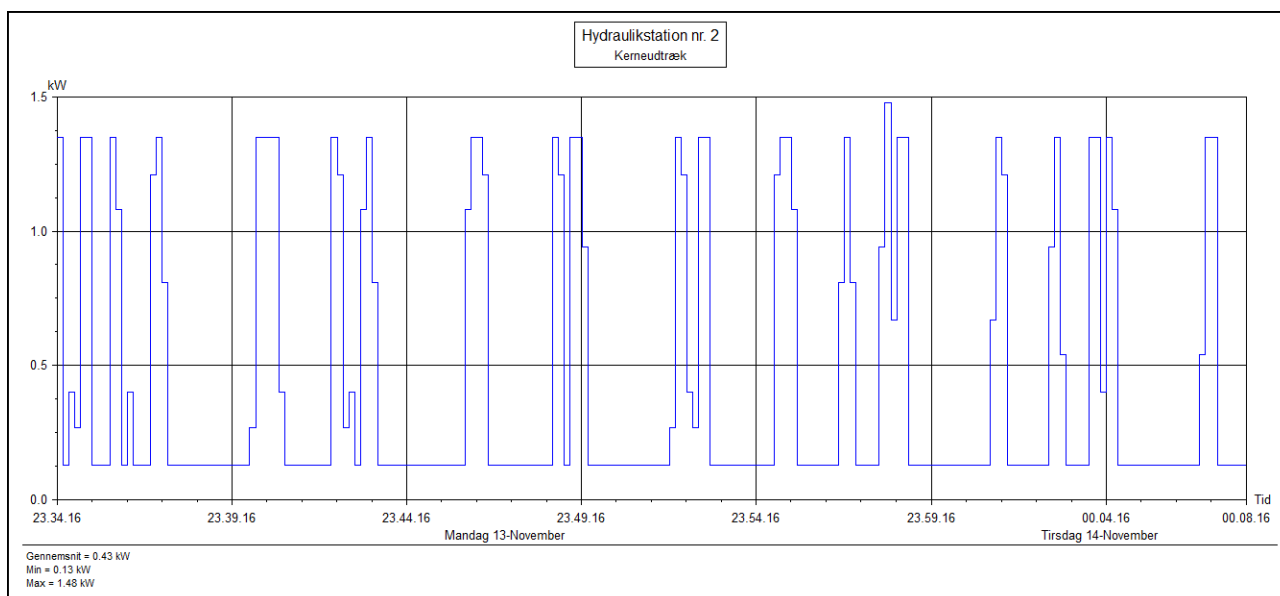


Figur 8.2. Mærkeplade på motor på hydraulikstation nr. 2

Der er lavet målinger på anlægget med henholdsvis 1 s - og 10 s - opløsning
Efterfølgende ses måling med 10 s - opløsning

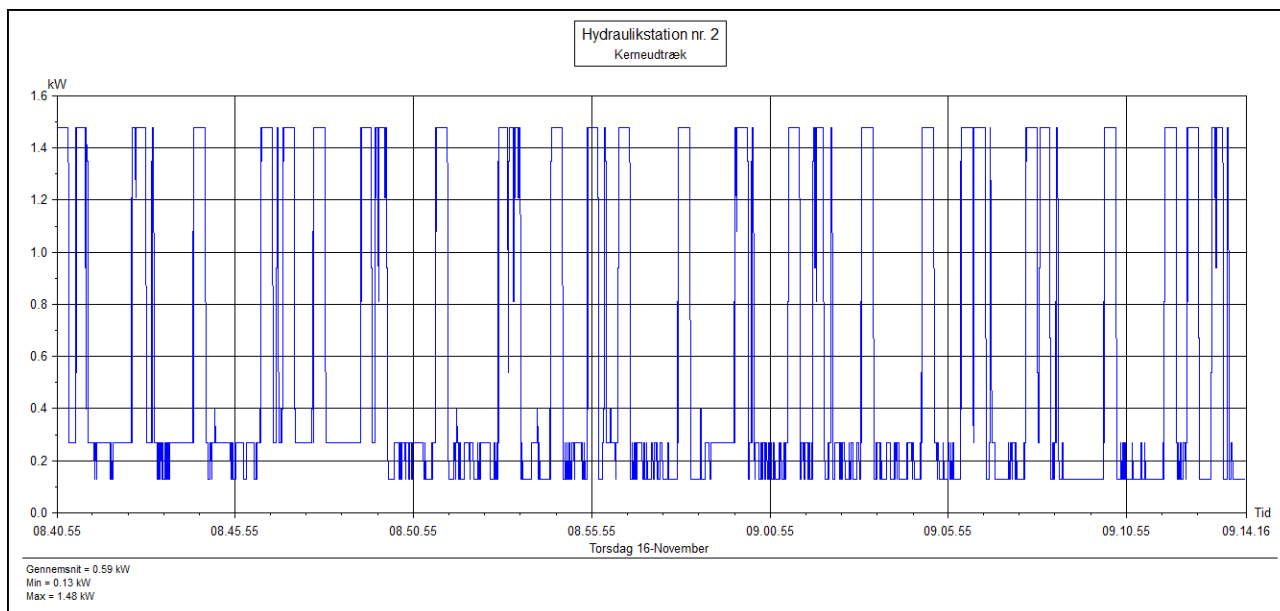


Figur 8.3. Måling på hydraulikstation 2 med 10 s - opløsning



Figur 8.4. Måling på hydraulikstation 2 med 10 s - opløsning

Efterfølgende er vist målinger med 1 s- opløsning



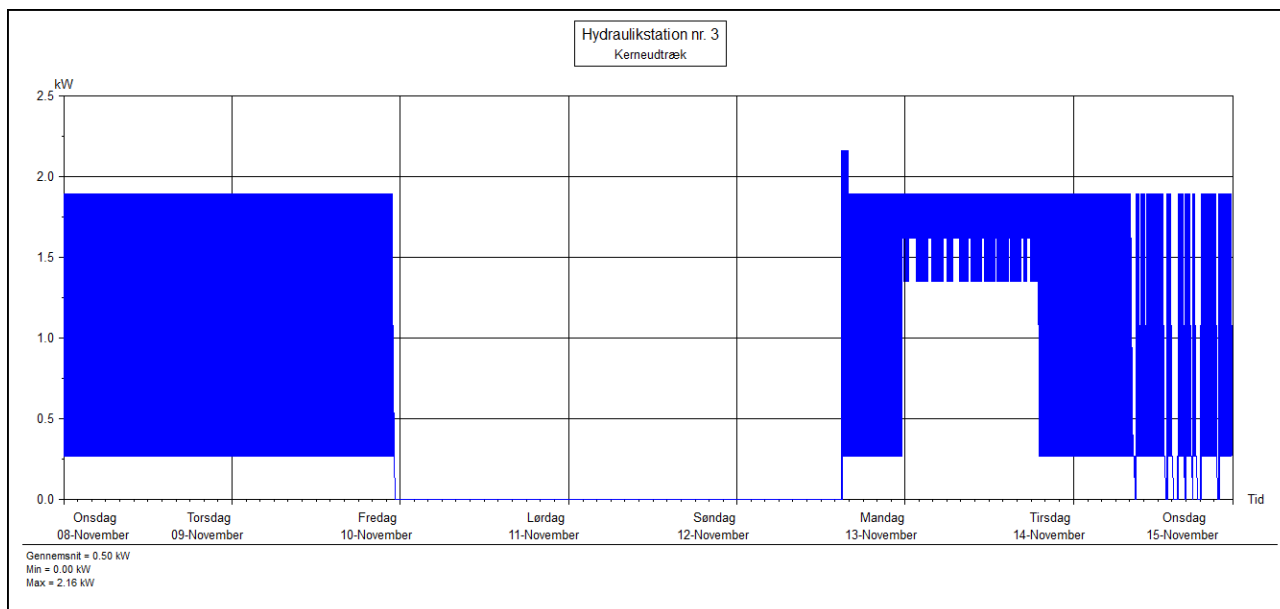
Figur 8.5. Måling på hydraulikstation 2 med 1 s - opløsning

Hvis målingerne er repræsentative for anlæggets årlige driftsmønster, vil det samlede elforbrug udgøre ca. 2.800 kWh pr. år.

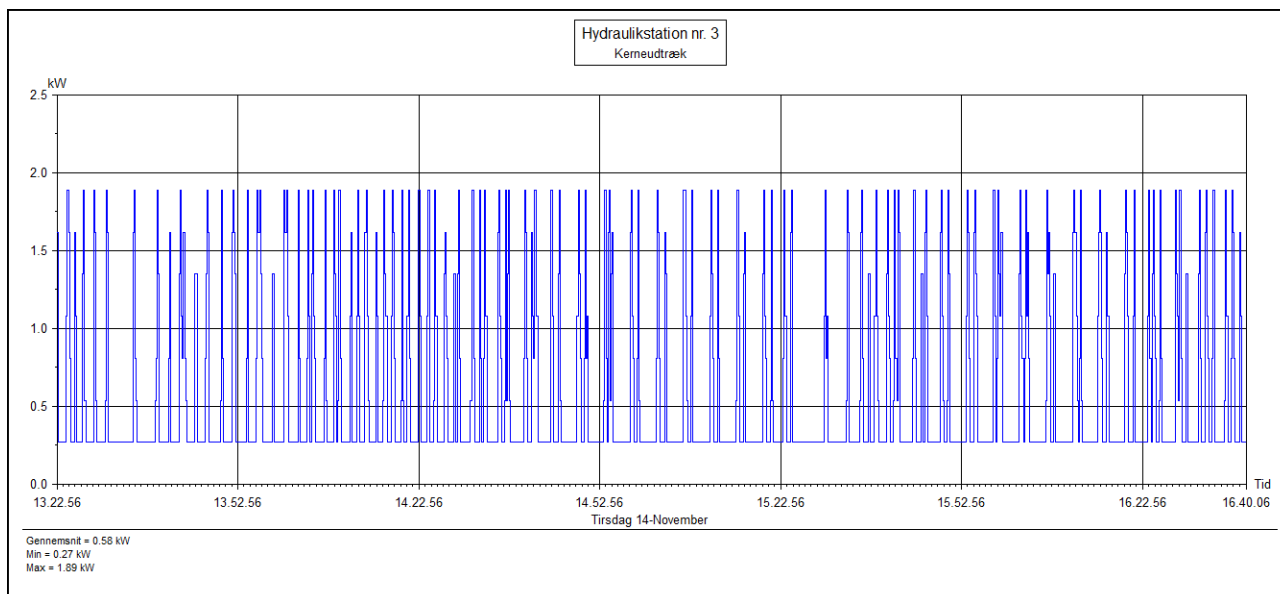
Hydraulik station nr. 3 er af samme type (pumpe og motor) som nr. 2.

Der er lavet målinger på anlægget med henholdsvis 1 s - og 10 s - opløsning

Efterfølgende ses måling med 10 s - opløsning:

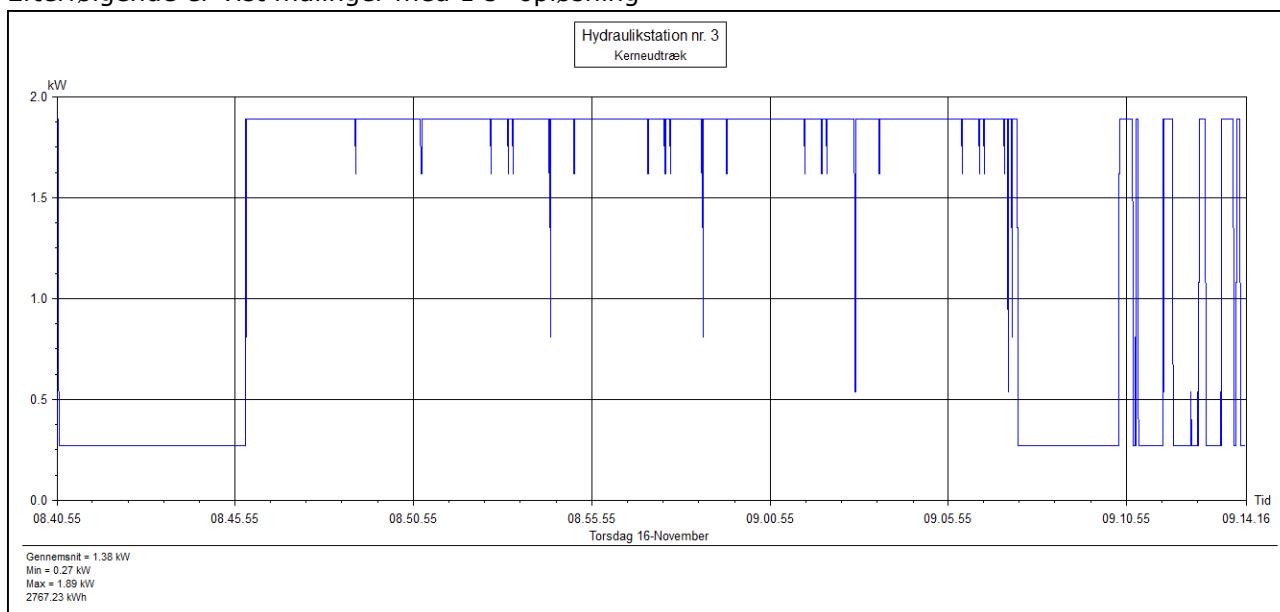


Figur 8.6. Måling på hydraulikstation 3 med 10 s - opløsning



Figur 8.7. Måling på hydraulikstation 3 med 10 s - opløsning

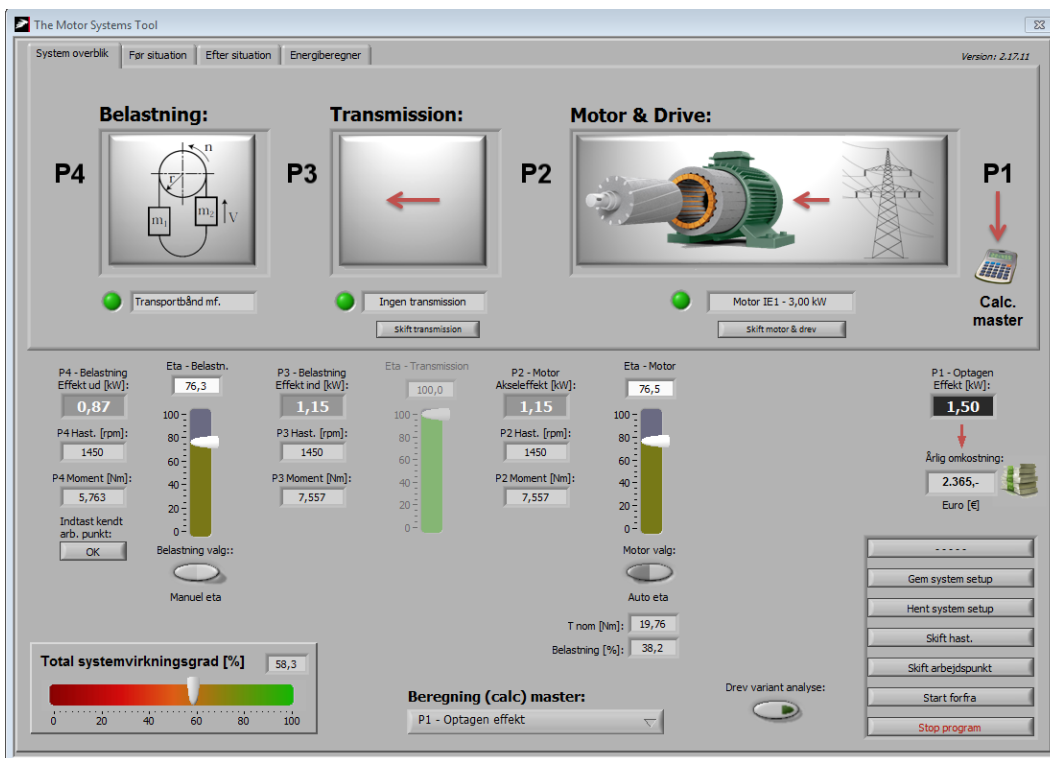
Efterfølgende er vist målinger med 1 s- opløsning



Figur 8.8. Måling på hydraulikstation 3 med 1 s - opløsning

Hvis målingerne er repræsentative for anlæggets årlige driftsmønster, vil det samlede elforbrug udgøre ca. 4.400 kWh pr. år.

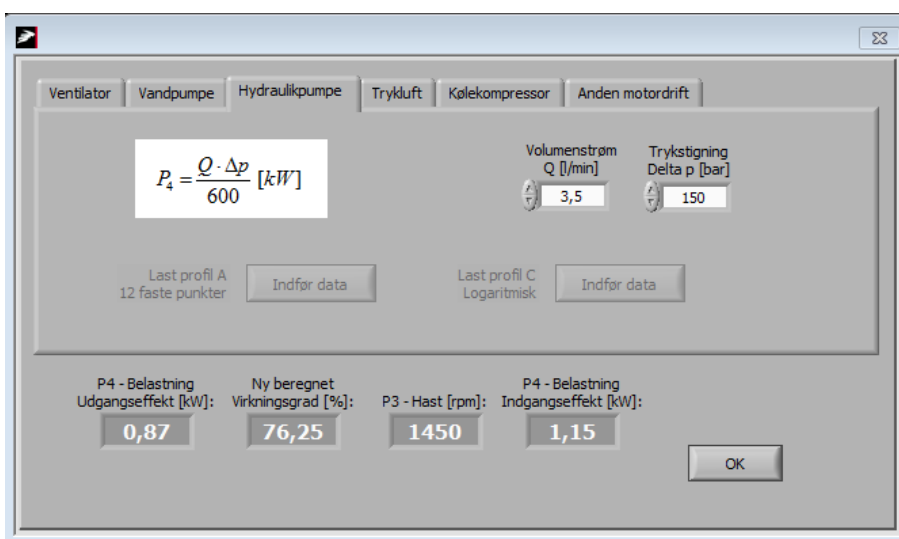
Data fra hydraulikstation 2 er indtastet i MotorSystemTool. Der er valgt en 3 kW IE1 motor som er nettilsluttet.



Figur 8.9. Indtastning i MotorSystemTool

Der er, som det ses i figur 8.10, indtastet et arbejds punkt for pumpen i applikationsberegneren vedr. hydraulik. Ved de angivne flow på 3,5 l/min) og tryk på 150 bar er virkningsgraden for pumpen beregnet til ca. 76,3 %.

Systemets totalvirkningsgrad er, som det ses i figur 8.9, beregnet til 58,3 %.



Figur 8.10. Indtastning af arbejds punkt i applikationsberegner



Figur 8.11. Indtastning i MotorSystemTool

Trykluftanlæg

Kompressor 1 er Ingersoll Rand Nirvana N55 – 55 kW frekvensreguleret kompressorer. Kompressoren er den primære kompressor og er stort set i drift hele året rundt.



Figur 8.12. Kompressor 1



Figur 8.13. Mærkeplade på kompressor 1

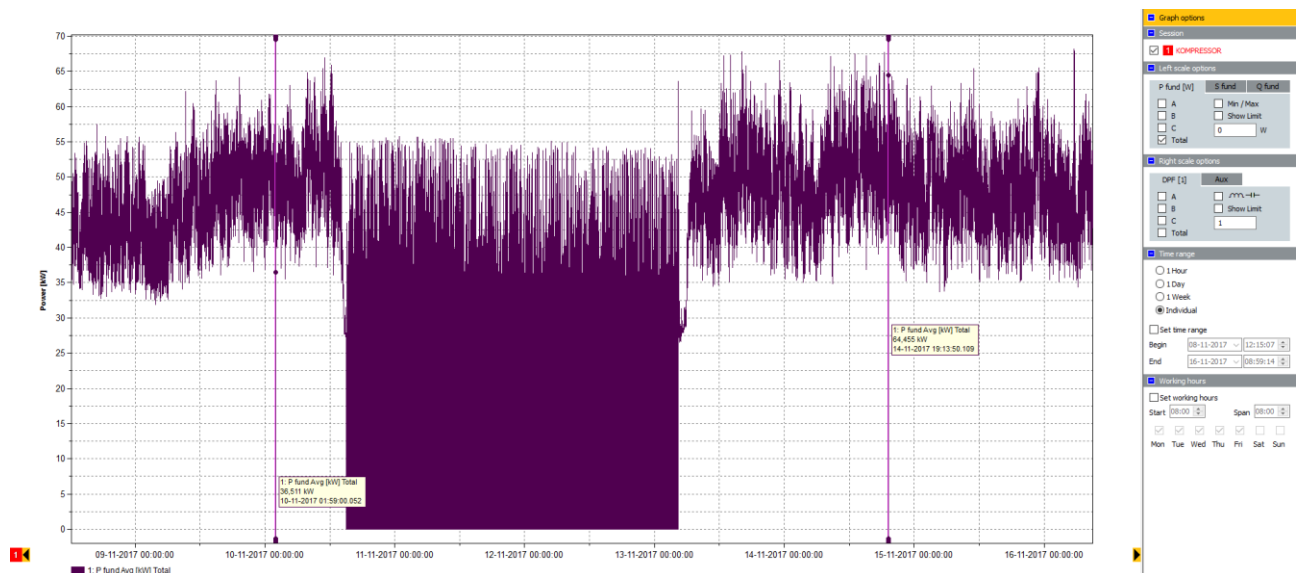
I figur 8.21 ses mærkepladen fra motoren til kompressoren.



Figur 8.14. Mærkeplade på hovedmotor trykluftkompressor nr. 1

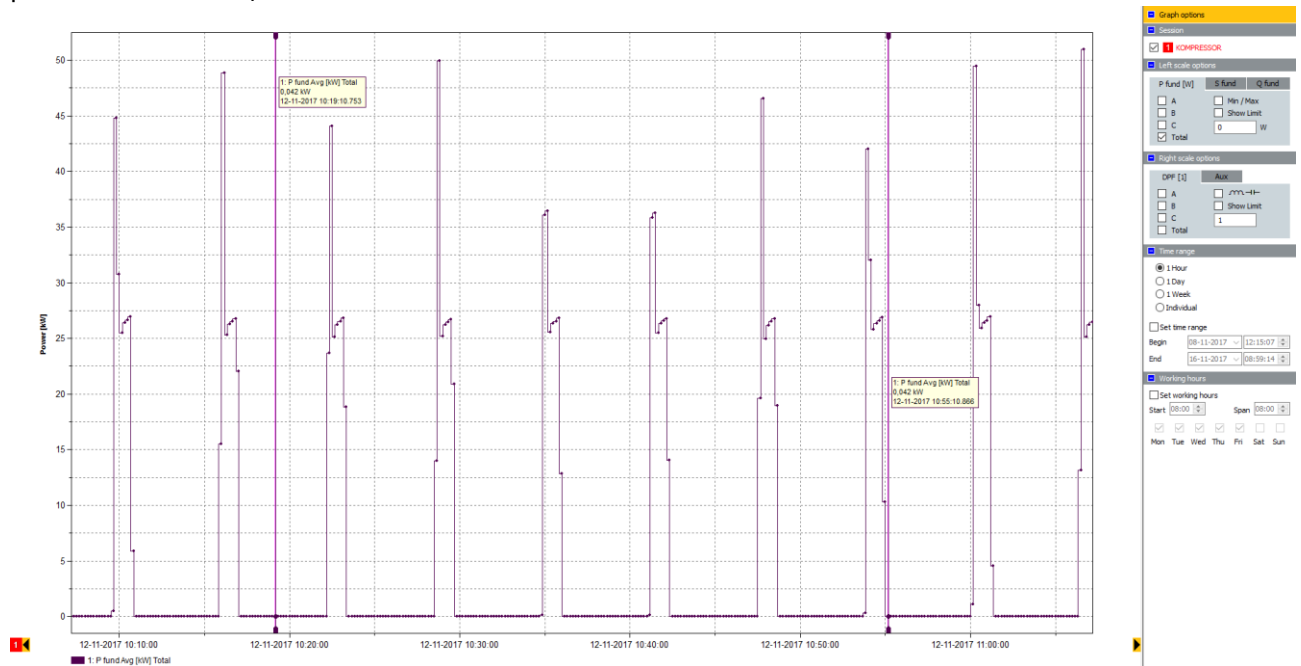
Som det fremgår af figur 8.21, er motorvirkningsgraden 95 % ved fuldlast

Der er foretaget målinger på motoren til kompressor 1 med en tidsopløsning på 10 sekunder. I figur 8.22 ses målingen som blev foretaget i perioden 9. november til 16. november 2017.



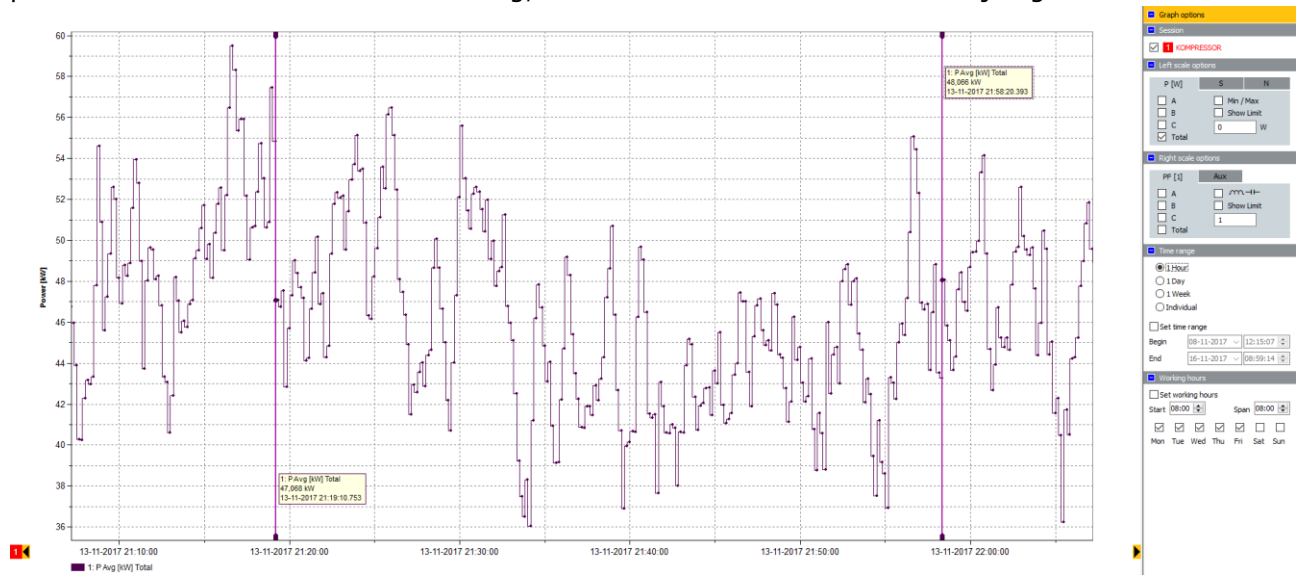
Figur 8.15. Måling på kompressor 1 med 10 s – opløsning

I figur 8.23 ses målingen som blev foretaget i perioden 12. november 2017. Det ses, at kompressoren kører on/off.



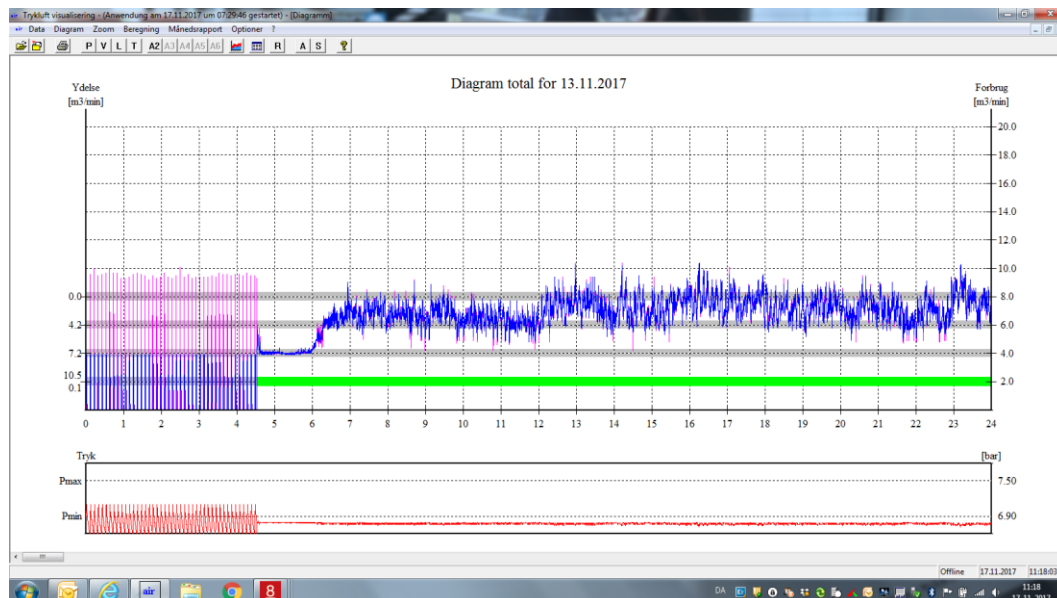
Figur 8.16. Måling på kompressor 1 med 10 s – opløsning den 12. november 2017

I figur 8.24 ses målingen som blev foretaget i perioden 13. november 2017. Det ses, at kompressoren kører med variabel belastning, da den kører med variabelt omdrejningstal.



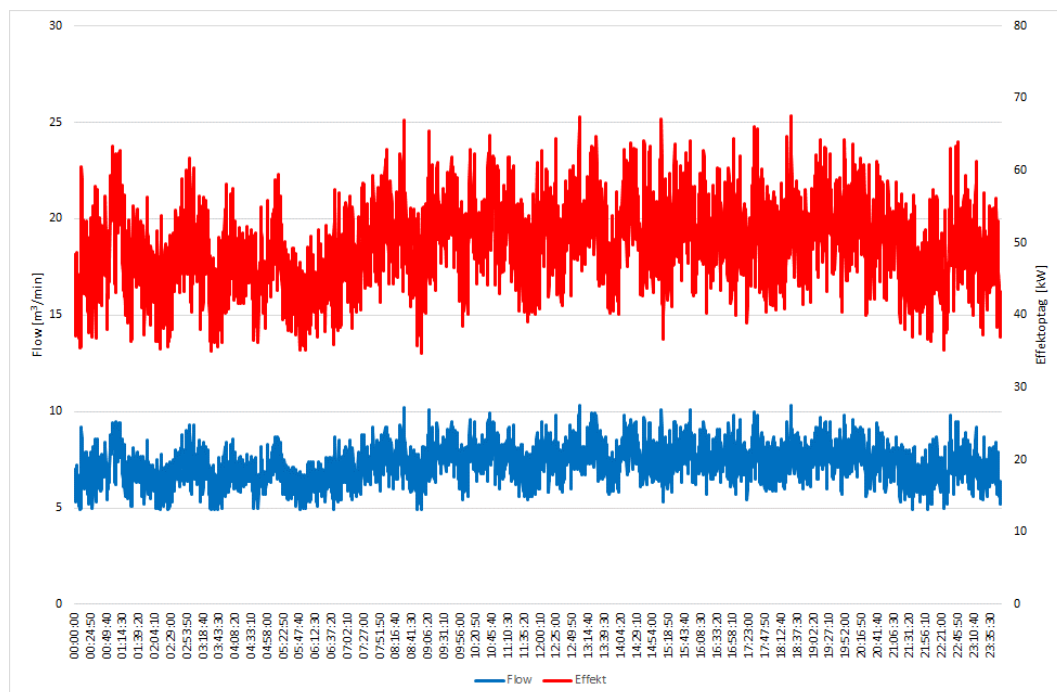
Figur 8.17. Måling på kompressor 1 med 10 s – opløsning den 13. november 2017

Kompressorer 1 er tilkoblet en styring, hvor der opsamles data for trykluftforbrug/produktion og tryk. I figur 8.25 ses skærmvisninger fra styringen fra den 13. november 2017. Som det ses varierer flowet mellem ca. 4 og 10,2 m³/min mens trykket stort set ligger konstant på 6,8 bar.



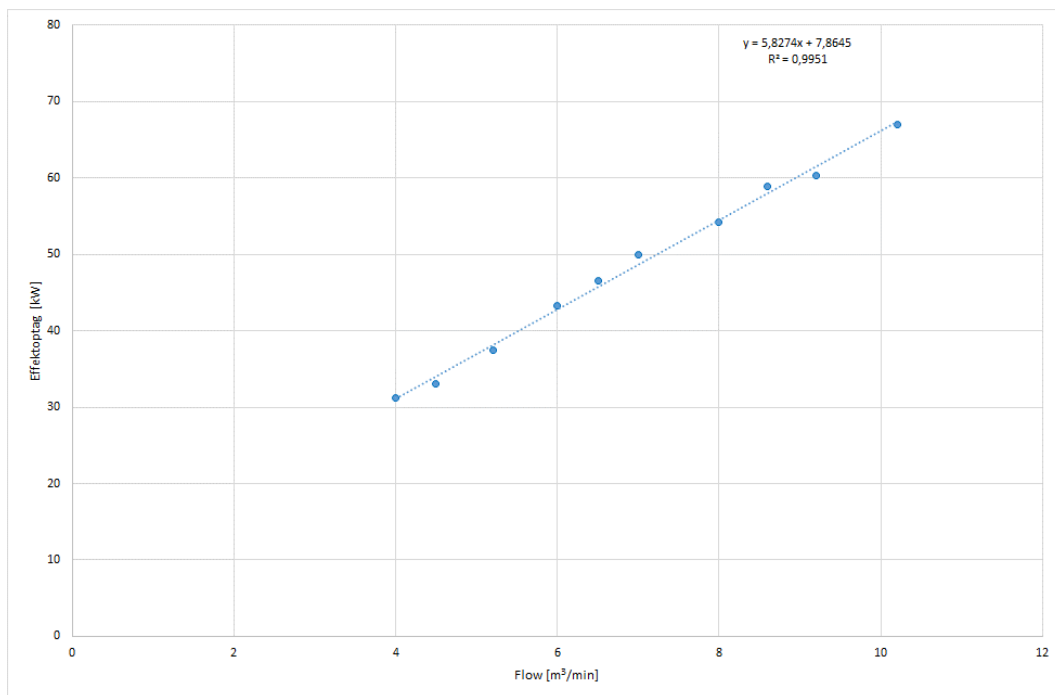
Figur 8.18. Skærmvisning fra styrings-pc

Data for flow og tryk er hentet ud styringssystemet. I figur 8.26 ses sammenhængen mellem flow og effektoptaget for kompressor 1.



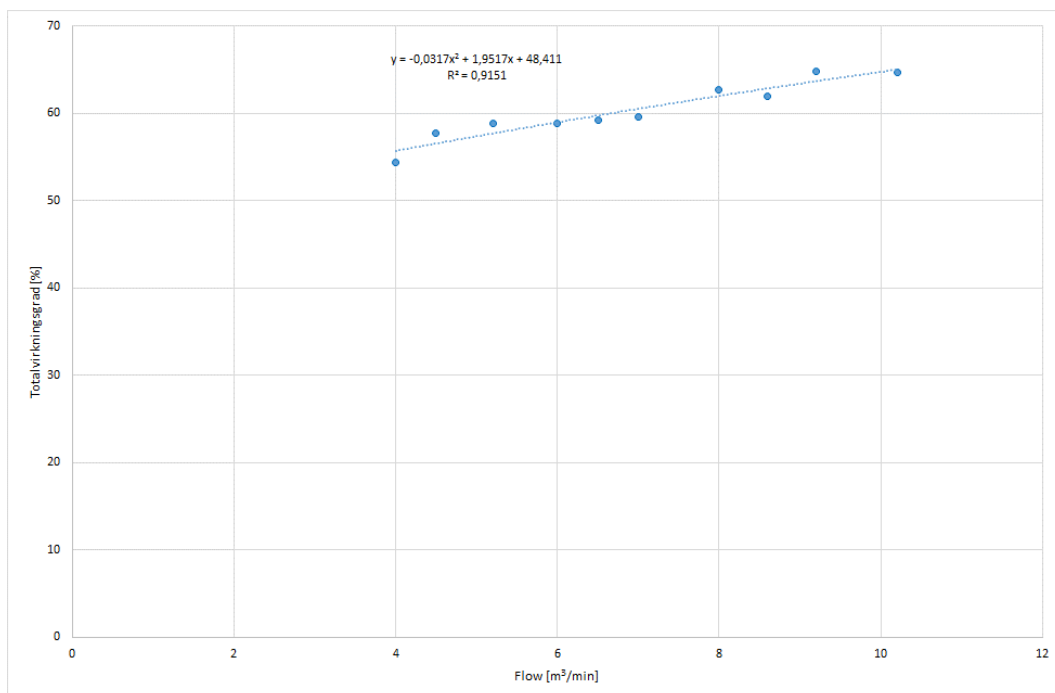
Figur 8.19. Flow og effektoptag for kompressor 1

Der er fra datasættet uddraget nogle samhörrende værdier for flow og effektoptag. Denne sammenhæng ses i figur 8.27.



Figur 8.20. Sammenhæng mellem flow og effektoptag

På baggrund af sammenhængen mellem flow er effektoptag er sammenhængen mellem flow og totalvirkningsgrad. Denne sammenhæng ses i figur 8.28.



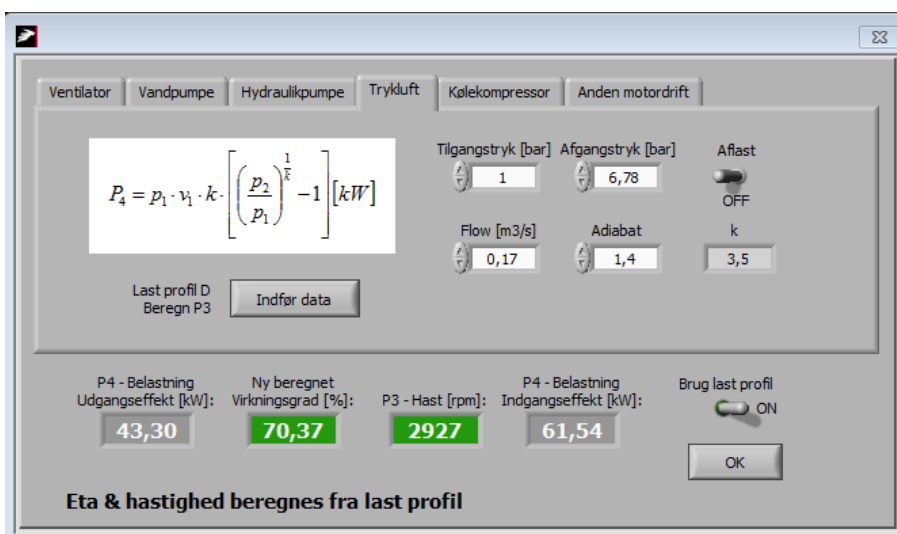
Figur 8.21. Sammenhæng mellem flow og totalvirkningsgrad

Data fra kompressor 1 er indtastet i MotorSystemTool. Der er valgt en 55 kW IE3 motor med frekvensomformer.



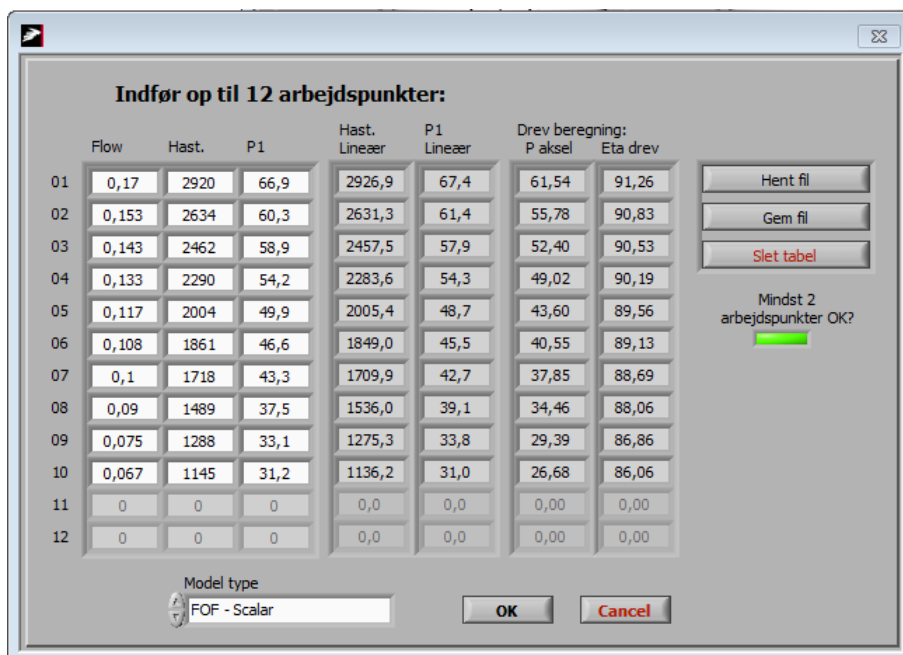
Figur 8.22. Indtastning i MotorSystemTool

Der er, som det ses i figur 8.20, indtastet et arbejds punkt for kompressoren i applikationsberegneren vedr. trykluft. Ved de angivne tryk (1 og 6,78 bar) og flowet (0,17 m³/s = 10,2 m³/min) er virkningsgraden for kompressoren beregnet til ca. 70,4 %. Systemets totalvirkningsgrad er, som det ses i figur 8.29, beregnet til 64 %.



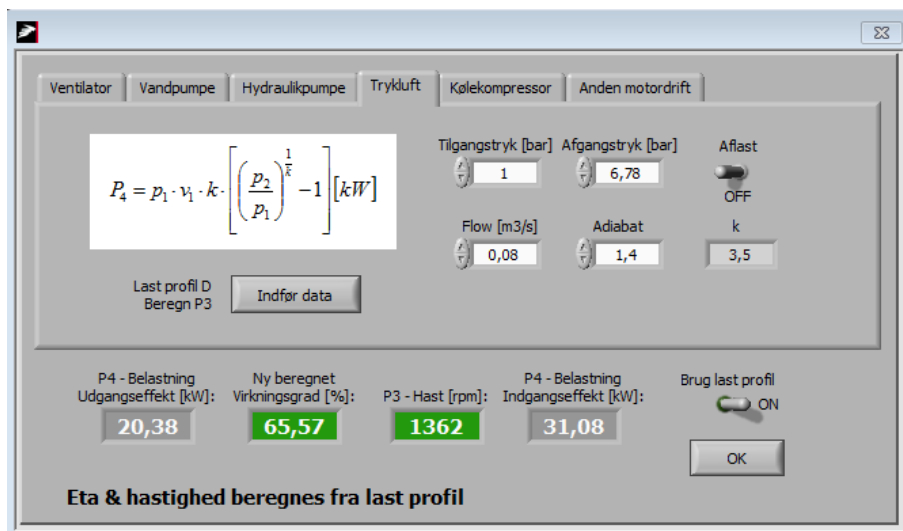
Figur 8.23. Indtastning af arbejds punkt i applikationsberegner

Der er, som det ses i figur 8.31, indtastet et lastprofil for kompressoren.



Figur 8.24. Lastprofil for kompressor

Hvis flowet herefter ændres fra 0,17 m³/s til 0,08 m³/s falder kompressorens virkningsgrad, som det ses i figur 8.32, til ca. 65,6 %



Figur 8.25. Ændring af flow for kompressoren

Systemets totalvirkningsgrad er, som det ses i figur 8.33 faldet til 57,2 %.



Figur 8.26. Systemets totalvirkningsgrad efter reduktion af flowet

Med applikationsberegneren er det muligt at få beregnet kompressorens virkningsgrad ved forskellige belastningsgrader.

Ved fuldlast er kompressorens virkningsgrad ca. 70,4 %. Dette vurderes at være noget lavere end hvad der kunne forventes. En kompressor i den størrelse burde havde en virkningsgrad på 77 – 78 %.

Besparelsespotentialiet ved at udskifte kompressoren står dog ikke mål med den nødvendige investering.

8.2 Test af applikationsberegner for kølekompressorer hos CITY 2

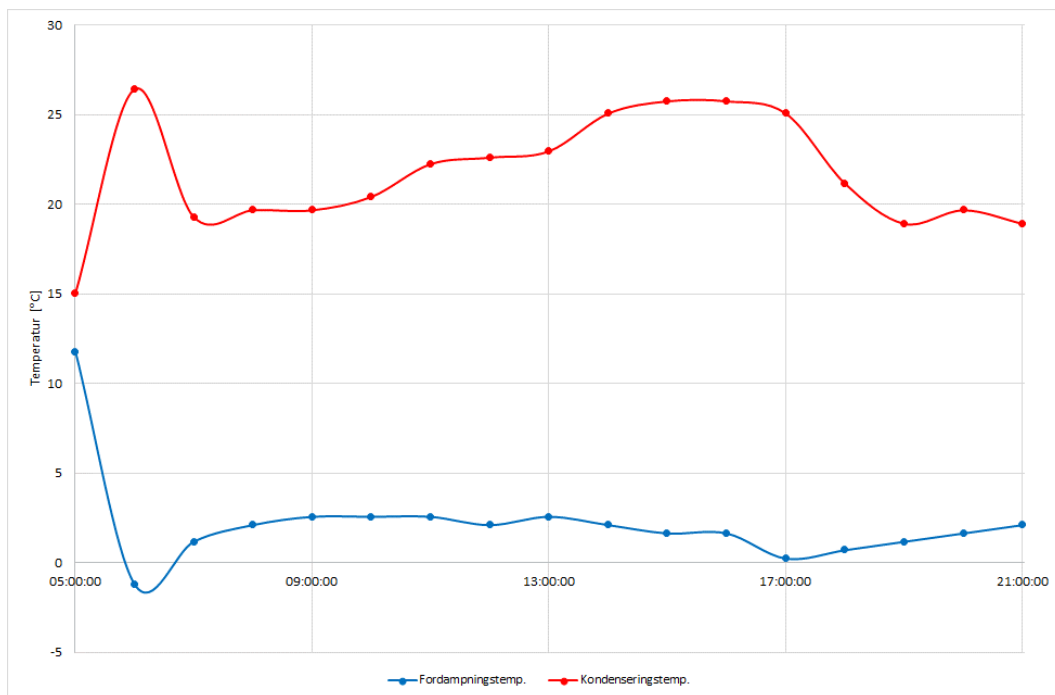
Der vil blive udpeget og foretaget målinger på et køleanlæg hos CITY 2. Data skal benyttes til en grundig test af systemoptimeringsværktøjet in situ (WP 5 Demonstration).

Køleanlægget er opstillet i et kølekompressorrum i kælderen. Køleanlægget KK01 er en SABROE ChillPac112L, der er udrustet med en SMC112L stempelkompressor, en 200 kW IE2 motor samt en vandkølet fordampere og kondensator. Unitten har en nominel kølekapacitet på 878 kW ved $T_{o,i}/T_{o,u}$: 12/7°C og $T_{k,i}/T_{k,u}$: 30/35°C.

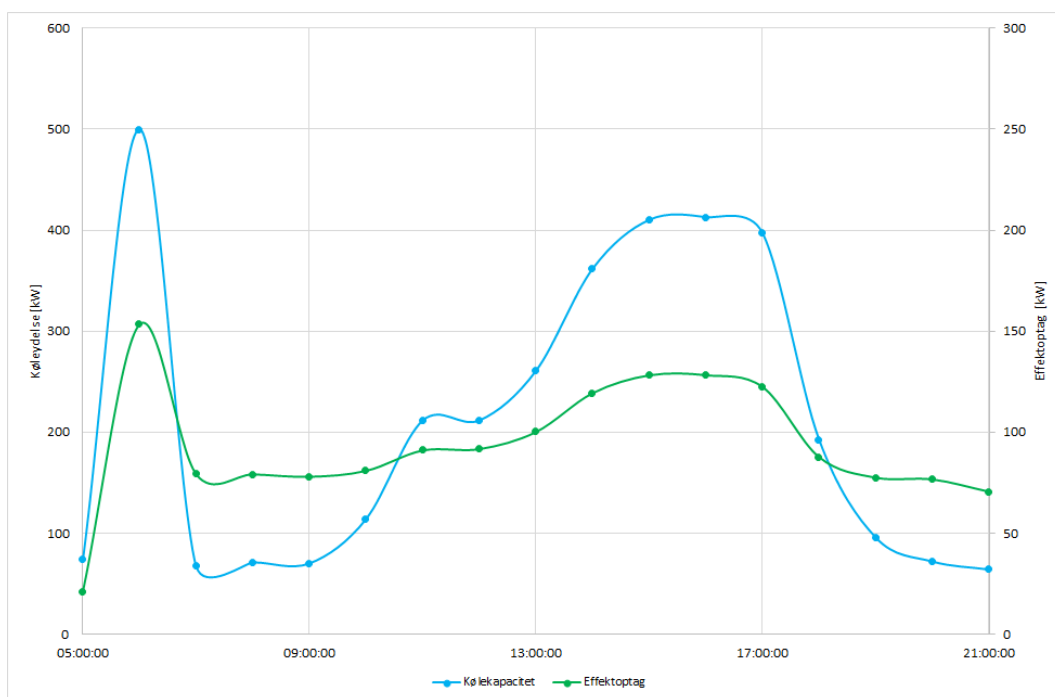
Kølingen distribueres fra kølecentralen i et fælles kølevandssystem, idet systemet er opdelt i en kreds der forsyner den østlige del af bygningen og en kreds der forsyner den vestlige del af bygningen.



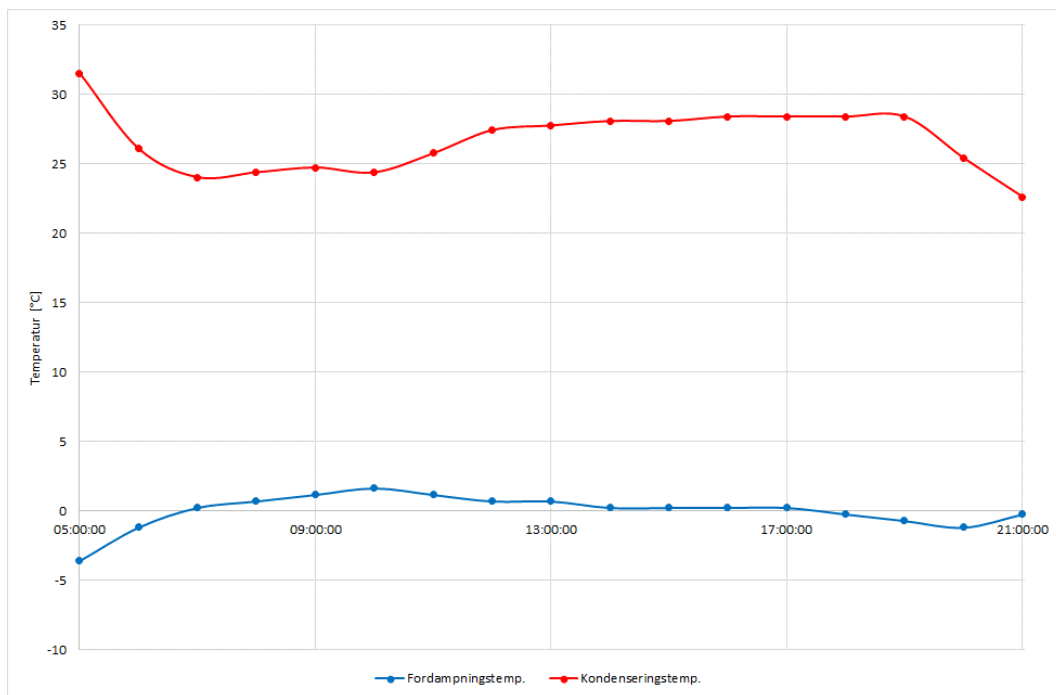
Figur 8.27. SABROE ChillPac112L der er udrustet med en SMC112L stempelkompressor



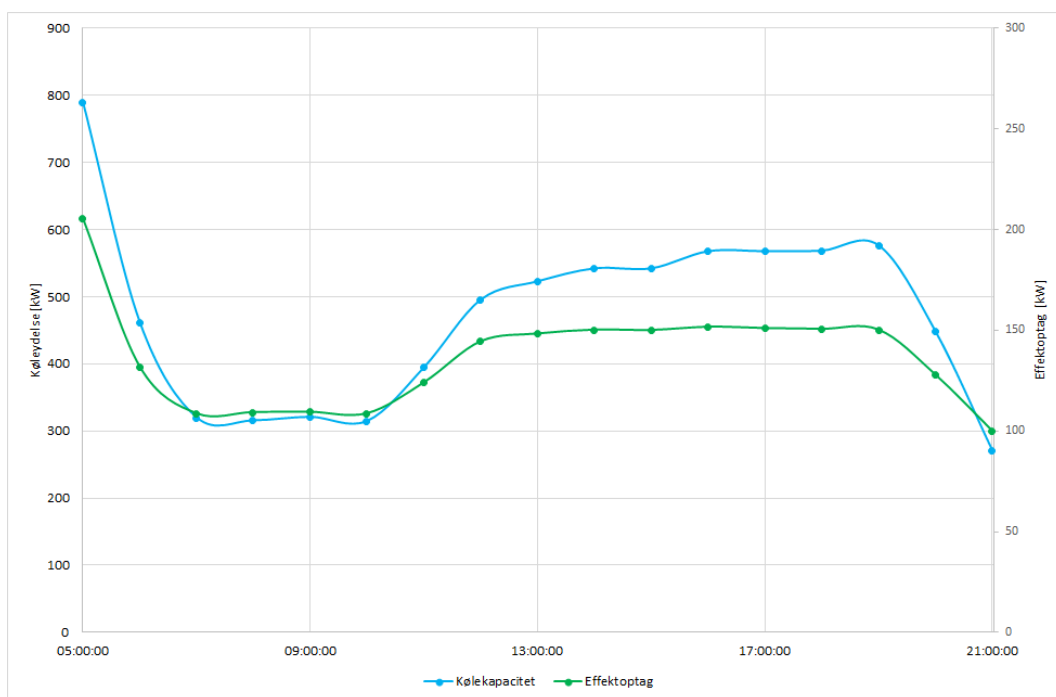
Figur 8.28. Fordampnings- og kondenseringstemperatur den 5. september 2017



Figur 8.29. Køleydelse og effektoptag for kompressor den 5. september 2017

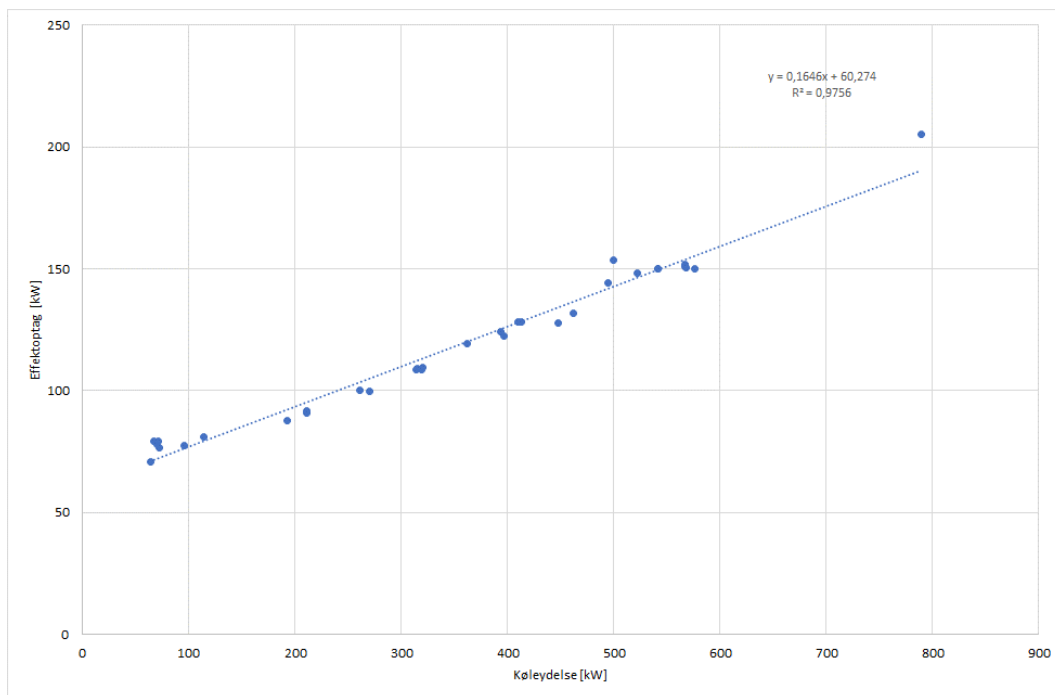


Figur 8.30. Fordampnings- og kondenseringstemperatur den 9. september 2017



Figur 8.31. Køleydelse og effektoptag for kompressor den 9. september 2017

I figur 8.32 er samhörande värder för kompressorens köleydelse og effektoptag indtegned. Der er som det ses en lineær sammenhæng mellem disse.



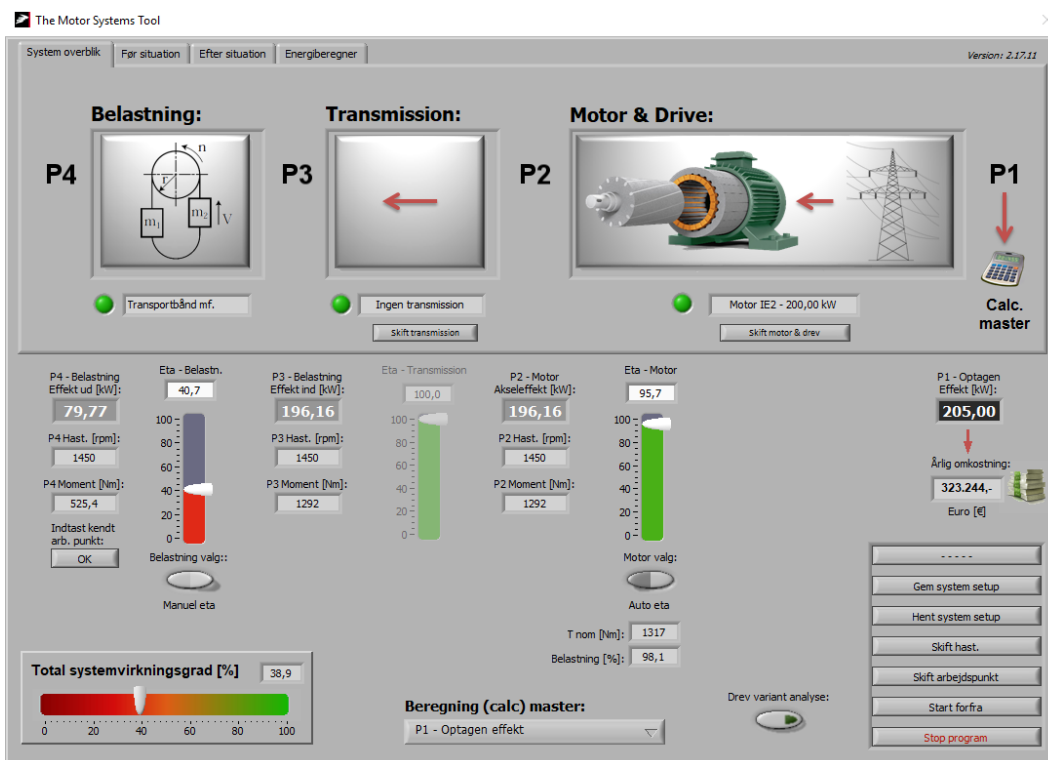
Figur 8.32. Effektoptag som funktion af køleydelse for kompressor

Der findes ikke målinger ved den nominelle køleydelse, men ved hjælp af figur 8.32 kan effektoptaget ved en køleydelse på 878 kW beregnes til ca. 205 kW.

Fordampningstemperaturen ligger et sted mellem 0 og 2 °C mens kondenseringstemperaturen ligger et sted mellem 25 og 27 °C.

Data for kølekompressoren er indtastet i applikationsberegneren for kølekompressor.

Figur 8.33. Indtastning af data for kølekompressor i applikationsberegner



Figur 8.34. Systemvirkningsgrad for kølekompressor ved nominal køleydelse

Som det ses i figur 8.34, er totalvirkningsgraden for systemet kun 38,9 %.



Figur 8.35. Systemvirkningsgrad for kølekompresor ved 50 % af nominel køleydelse

8.3 Test af applikationsberegner for hydraulik hos NLMK DanSteel

Der er foretaget målinger hydraulikpumpe og hos NLMK DanSteel A/S. Data skal benyttes til en grundig test af systemoptimeringsværktøjet in situ (WP 5 Demonstration).

Hydraulikpumpe

Babyslabs transporteres efter skæring og opmærkning til den naturgasfyrede slabsovn 2, hvor de opvarmes i ca. 4 timer til omkring 1.200° C, som er valsetemperaturen. Temperaturen er computerkontrolleret og kan højst blive 1.325° C.



Figur 8.36. Slabsovn 2

Hydrauliksystemet for slabsovn 2 er bestykket med fire identiske Bosch Rexroth A4VS0-250 DR hydraulikpumper med 110 kW motorer med 1.485 omdr./min.

Pumperne er aksialstempelpumper med variabelt displacement. De tre af pumperne forsyner systemet på hvert sit forsyningsrør (øst, midte og vest), og én pumpe står i reserve. Reservepumpen kan forsyne ud på hvert af de tre forsyningsrør (omkobling med manuelt betjente ventiler). Pumpen for "midte" er normalt den mest belastede hydraulikpumpe. Slabsovn 2 har en hydraulikpumpe for hvert af de tre spor/bjælke, benævnt øst, midte og vest.

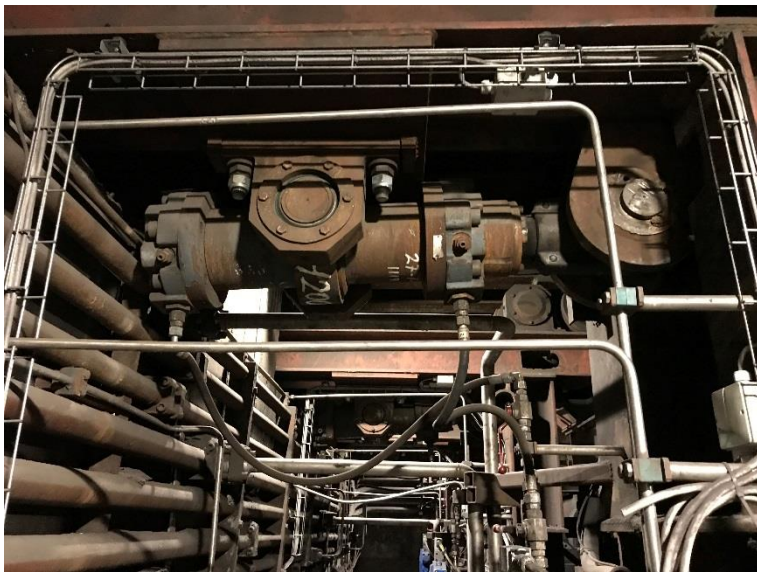
Hydrauliksystemet benyttes udelukkende til at løfte, køre frem og sænke den enkelte bjælke.

Bjælkerne kan køre enkeltvis, eller synkront. Synkron drift benyttes hvis slaben er så stor at den ligger ind over flere bjælker eller der er kollisionsfare mellem sporene.

Bevægelserne sker med to løftecylindre (hoved- og hjælpecylinder) og en cylinder til den vandrette bevægelse.



Figur 8.37. Hydraulikpumper og motorer



Figur 8.38. Løftecylinder

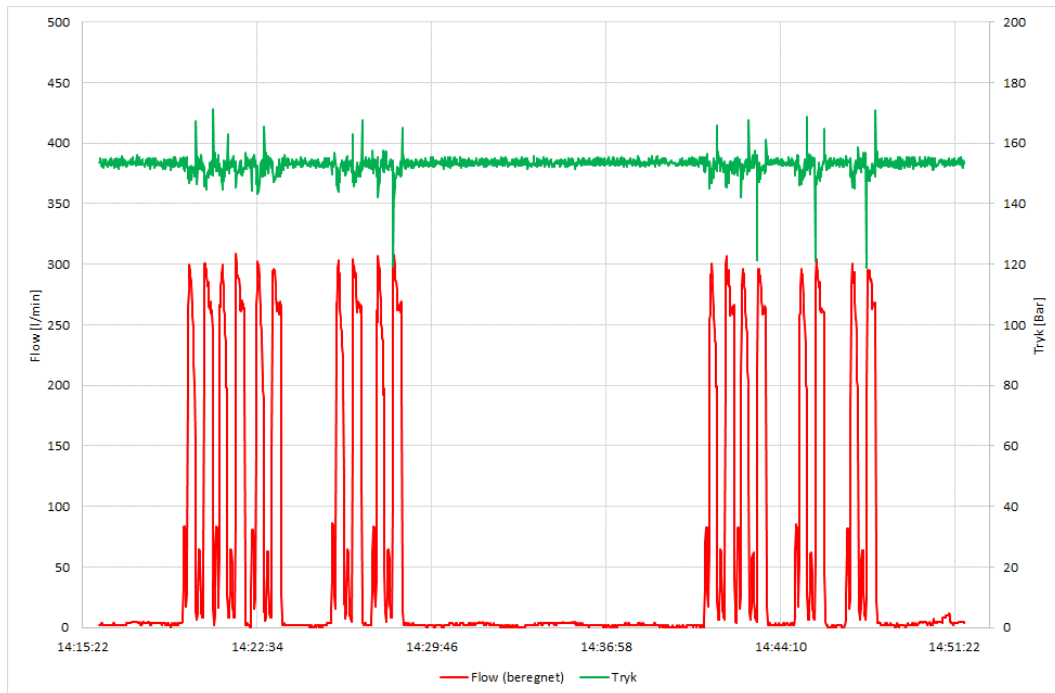


Figur 8.39. Løftecylinder

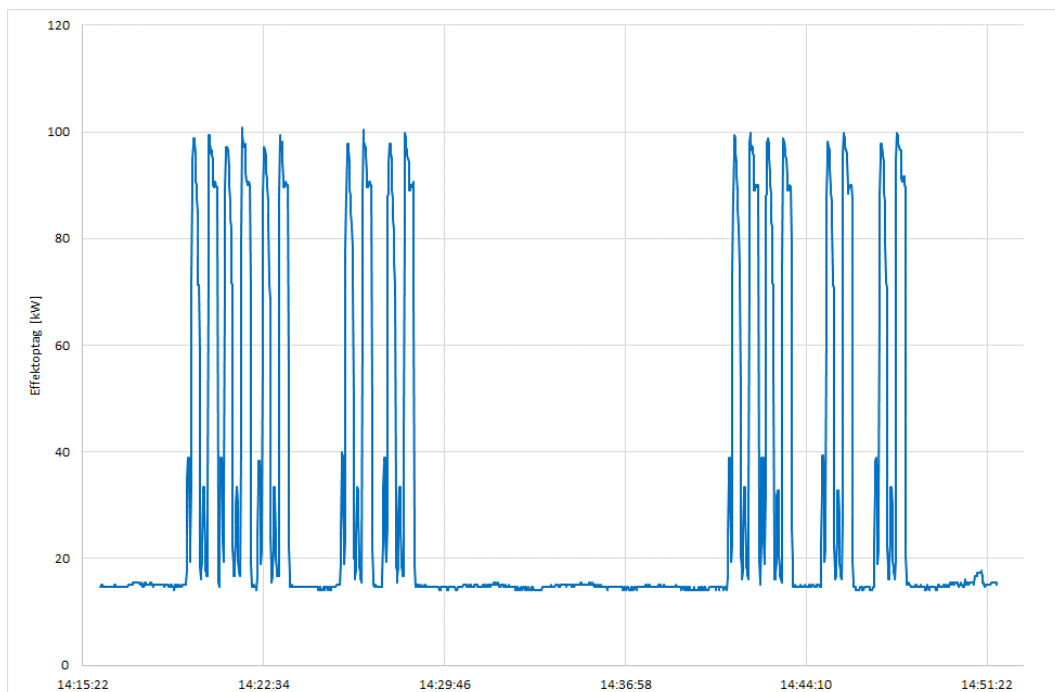


Figur 8.40. Cylinder til fremføring af bjælke.

I figur 8.39 og 8.40 ses beregnet flow samt målinger af tryk og effektoptag på pumpen.



Figur 8.41. Beregnet flow og målt tryk



Figur 8.42. Målt effektoptag

På figur 8.39 ses, at flowet varierer mellem 0 og 300 l/min. (maks.), mens trykket stor set er konstant på 155 bar.

På figur 8.40 ses, at effektoptaget varierer mellem 14 og 100 kW. De 14 kW er en grundbelastning, som er til stede selv ved et flow på 0 l/min.

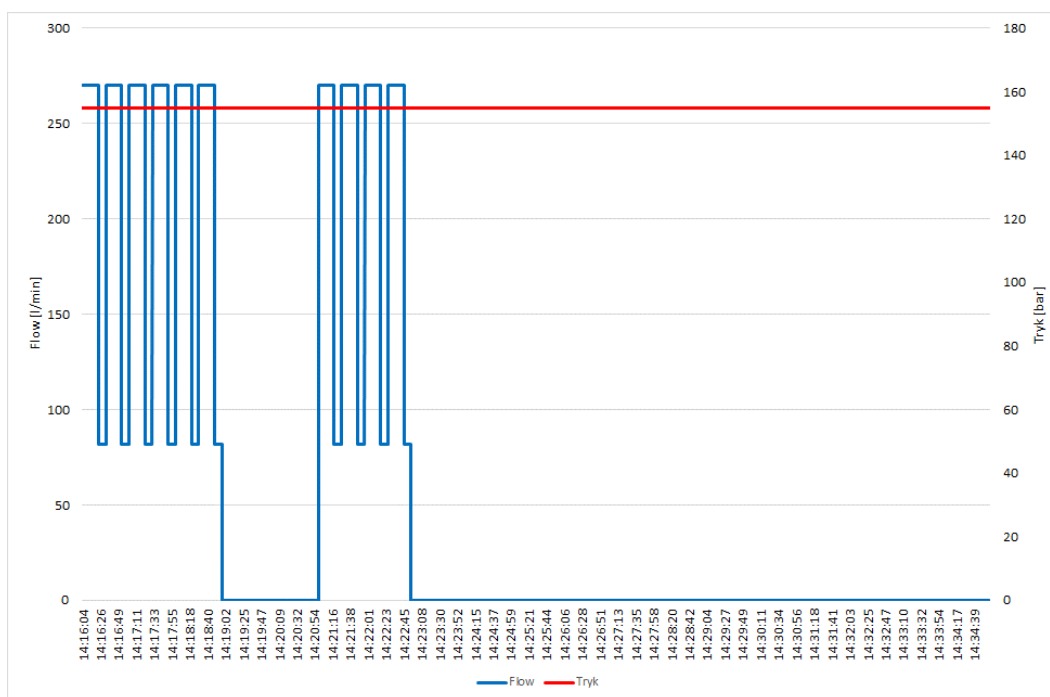
I figur 8.41 ses driftsprofilen for hydraulikpumpen til Slabsovn 2.

Pumpen har 6 cykler á 20 sekunder hvor den leverer ca. 276 l/min ved et tryk på 155 bar og 6 cykler á 9 sekunder hvor den leverer ca. 82 l/min ved et tryk på 155 bar.

Herefter kører den i 120 sekunder med et flow på 0 l/min ved et tryk på 155 bar.

Pumpen har derefter 4 cykler á 20 sekunder hvor den leverer ca. 276 l/min ved et tryk på 155 bar og 4 cykler á 9 sekunder hvor den leverer ca. 82 l/min ved et tryk på 155 bar.

Herefter kører den i 720 sekunder med et flow på 0 l/min ved et tryk på 155 bar.



Figur 8.43. Driftsprofil for Slabsovn 2

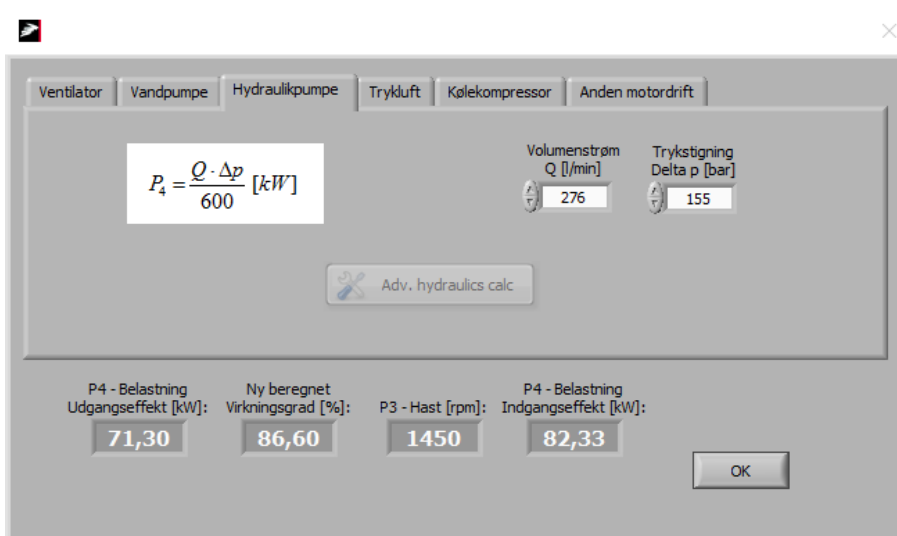
Data fra pumpen er indtastet i MotorSystemTool. Der er valgt en 110 kW IE3 motor som er net-tilsluttet.



Figur 8.44. Indtastning i MotorSystemTool

Der er, som det ses i figur 8.33, indtastet et arbejds punkt for pumpen i applikationsberegneren vedr. hydraulik. Ved det angivne flow (276 l/min) og tryk (155) er virkningsgraden for pumpen beregnet til ca. 87 %.

Systemets totalvirkningsgrad er, som det ses i figur 8.32, beregnet til 82 %.



Figur 8.45. Indtastning af arbejds punkt i applikationsberegner

9 Kursus

Der er udviklet et kursusforløb der skal give branchens aktører en meget grundig indføring i det udviklede værktøj for både optimering af eksisterende maskinsystemer og design af nye systemer eller væsentlige ombygninger af eksisterende maskinsystemer.

Som en del af kurset undervises der i, hvilke målinger og registreringer der er nødvendige i forbindelse med systemoptimering, hvordan de udføres og hvorledes de skal tolkes.

Kurset vil indeholde en praktisk del, hvor deltagerne præsenteres for en konkret rådgivnings- eller udskiftningssag, som de efterfølgende kan arbejde med ved brug af værktøjet. Denne konkrete rådgivnings- eller udskiftningssag stammer fra en af de deltagende virksomheder.

Det er besluttet at markedsføre kurset på følgende tre måder:

- Kurset vil blive annonceret af Teknologisk Institut Energi & Klima's kursusafdeling ved udsendelse af en kort reklame (teaser) direkte til ca. 7.500 modtagere (en bredere målgruppe). Endvidere skete udmeldingen i et nyhedsbrev om Teknologisk Instituts kurser.
- Energisynssekretariatet udsender en mail direkte til energisynskonsulenter og tekniske eksperter, hvor der kort er informeret om ELFORSK projektet og at der i tilknytning til dette er udviklet et kursus, som var relevant for dem
- Der foretages en segmenteret mailudsendelse målrettet driftschefer, tekniske chefer og vedligeholdelseschefer i fremstillingsvirksomheder. I mailen vil der være et link til kursusprogrammet på Teknologisk Instituts hjemmeside, hvor der er mulighed for at tilmelde sig

Ovenstående markedsføring vil blive iværksat primo juni 2019.

Kurset vil blive afholdt på Teknologisk Institut i Taastrup ultimo februar 2020 og på Teknologisk Institut i Aarhus medio marts 2020, hvor vi vil supplere kursistholdet op med specielt inviterede nøglepersoner.

Teknologisk Institut vil fremadrettet udbyde kurset til branchen med regelmæssige mellemrum.

Kursusmaterialet vil desuden blive tilgængeligt på Teknologisk Instituts hjemmeside.

10 Formidling

Et paper vedr. værktøjet blev præsenteret på konferencen EEMODS '17. Energy Efficiency in Motor Driven Systems, 6. – 8. september 2017 i Rom (<http://eemods17.org/>).

Værktøjet blev endvidere præsenteret på en temadag for registrerede energisynskonsulenter den 29. november 2017 i Middelfart. Der deltog 45 energisynskonsulenter på temadagen.

De udviklede systemoptimeringsværktøj gøres tilgængeligt via Teknologisk Instituts hjemmeside www.teknologisk.dk/systemoptimering. Herved kan samtlige interessenter i branchen, dvs. energiselskabernes energirådgivere, rådgivende ingeniører samt leverandører og entreprenører i branchen frit hente det.

Som en helt nødvendig del af projektet er der udviklet et kursusforløb i systemoptimeringsværktøjet, hvor kursisterne gøres bekendt med de eksisterende og de nye beregningsmetoder (applikationsberegner).

Desuden gøres kursisterne bekendt med de forskellige motortyper der kan vælges i værktøjet. Teknologisk Institut vil fremadrettet udbyde kurset til branchen med regelmæssige mellemrum. Kursusmaterialet (værktøj, vejledning og regneopgaver) vil desuden være tilgængeligt på Teknologisk Instituts hjemmeside.

Projektets resultater med cases vil blive formidlet gennem artikler i fagtidsskrifter som HVAC Magasinet.

Projektet vil blive præsenteret på en conference/temadag, der afholdes på Teknologisk Institut.

For brugere af værktøjet er det helt essentielt at det er up-to-date og indeholder de nyeste teknologier (applikationer, motorer og styringsenheder) på markedet. Det er derfor nødvendigt, at der findes økonomiske midler til at vedligeholde værktøjet. En oplagt model er en form for abonnement med en licensbetaling. Mod en vis årlig licensbetaling, sikres brugerne et systemoptimeringsværktøj, der løbende opdateres og videreudvikles.

En anden oplagt model er at få leverandører af komponenter til motordrevne maskinsystemer til at finansiere/sponsere vedligeholdelsen af værktøjet. Disse firmaer kan til gengæld få lov at reklamere på systemoptimeringshjemmesiden.

Efter afslutningen af projektet vil der blive fokuseret på at finde ud af en hvorledes en gangbar løsning bør skrues sammen.

Det vurderes, at den årlige udgift til vedligeholdelse af værktøjet vil udgøre ca. 100.000 kr.

10.1 Artikler

Projektets resultater vil blive formidlet gennem artikler i f.eks. ELFORSK Nyt, HVAC Magasinet og Maskinmesteren samt eventuelt på projektdeltagernes hjemmesider efter projektet afslutning (31. maj 2019).

11 Referencer

Andre hjælpeværktøjer – links – kilder

Håndbøger

- /1/ Den store blå om Systemoptimering, 1. udgave, Dansk Energi, 2015, Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut) og Jørn Borup Jensen (Dansk Energi). ISBN 978-87-91326-11-0
- /2/ Håndbog i Energirådgivning - Trykluft, DEFU, 1999, Kim Falck Grony (Energirådgivning Fyn) og Jan Christiansen (DEFU)
- /3/ Håndbog i Energirådgivning - Køling, DEFU, 1999, Alaa Barky (Københavns Belysningsvæsen) og Martin L. Jensen (DEFU)
- /4/ Håndbog i Energirådgivning - Hydraulik, DEFU, 1999, Johannes Thuesen (Energirådgivning Fyn), Thomas Brændgaard Nielsen (DEFU) og Lise Boye Hansen (DEFU)

Rapporter, kataloger, vejledninger, pjecer og standarder

- /5/ Kortlægning af motorbestanden i jern- og metalindustrien, Teknisk rapport 397, DEFU, 1998, Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /6/ Kortlægning af motorbestanden i nærings- og nydelsesmiddelindustrien, Teknisk rapport 411, DEFU, 1998, Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /7/ Energoptimering ved elmotordrift, Teknisk rapport 322, DEFU, 1991, Anders Rebsdorf (DEFU), Hans Andersen (DEFU), Jørn Borup Jensen (DEFU), Mogens Johansson (Dansk Energi Analyse a/s), Torben Laubst (DIA-E) og Henrik Ørskov Pedersen (DIA-E).
- /8/ Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Aalborg Universitet – Institute of Energy Technology, 2000, Flemming Abrahamsen, ISBN: 87-89179-26-9
- /9/ Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer, PSO-projekt nr. 338-009, Teknologisk Institut 2008. Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Hans Andersen (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut) og Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut)
- /10/ Reduktion af elforbrug til motordrift ved anvendelse af PM motorer, PSO-projekt nr. 340-028, Teknologisk Institut 2009. Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Sandie B. Nielsen (Teknologisk Institut), Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut), Christian Grønborg Nikolaisen (Teknologisk Institut), Ewen Ritchie (Aalborg Universitet) og Krisztina Leban (Aalborg Universitet)

- /11/ Værktøj til brug ved systemoptimering, PSO-projekt nr. 341-014, Teknologisk Institut 2010. Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut), Per Tage Jespersen (Teknologisk Institut) og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)

- /12/ 2. generationsværktøj til systemoptimering, PSO-projekt nr. 342-008, Teknologisk Institut 2013. Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut), Per Tage Jespersen (Teknologisk Institut) og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)

- /13/ Optimering af hydrauliksystemer PSO-projekt. 349-016, Teknologisk Institut 2019. Søren Draborg (Teknologisk Institut), Otto Paulsen (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut), og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)

- /14/ Kortlægning af energiforbruget i virksomheder, januar 2015. Peter M. Petersen, Viegand & Maagøe ApS, Søren Draborg, Teknologisk Institut m.fl.

- /15/ Kortlægning af energisparepotentialer i erhvervslivet, slutrapport, juni 2015. Rapporten er udarbejdet af COWI på vegne af Energistyrelsen

- /16/ Statistisk Årbog 2016, Danmarks Statistik, juni 2016. Redaktion: Ulla Agerskov, Margrethe Pihl Bisgaard og Pia Dyrby Poulin. ISBN 978-87-501-2222-7 (internet-udgave)

Hjemmesider

Dansk Energi
www.danskenergi.dk

ELFORSK
www.elforsk.dk

Energistyrelsen
www.ens.dk

Teknologisk Institut
www.teknologisk.dk

Danmarks Statistik
www.dst.dk