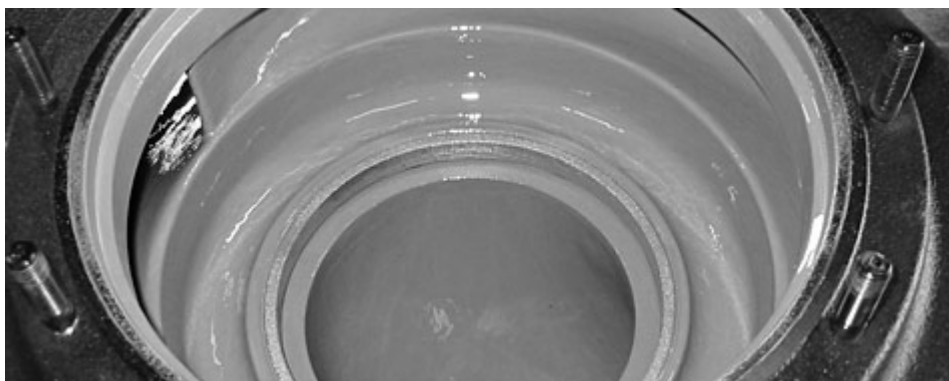


Bilagsrapport til Coating af pumper

Hans Andersen Teknologisk Institut,
John Moritzen Jakob Albertsen A/S og
Erik Gudbjerg Lokalenergi Handel A/S



Indhold

1	Coatingteori og teknologi	4
1.1	Nedbrydning af stål ved korrosion	4
1.1.1	Korrosionsprocessen	4
1.1.2	Spændingsrækken	5
1.1.3	Korrosionstyper	6
1.1.4	Korrosionshastigheder	7
1.1.5	Overfladenedbrydning ved slid	9
1.1.6	Udvikling i overfladenedbrydning over tid	12
1.2	Strømningstab ved overfladeruhed	13
1.2.1	Strømningstab gennem rørignende tværsnit	13
1.2.2	Strømningstab gennem enkeltmodstande	15
1.2.3	Sammenhæng med strømningstab og hydraulisk tab	15
1.3	Energiomsætning i pumper	16
1.3.1	Tab i pumper i afhængighed af pumpens specifikke hastighed ..	16
1.3.2	Mekaniske tab	20
1.3.3	Volumetriske tab (lækagetab)	20
1.3.4	Løbehjulsrotationstab	22
1.3.5	Hydrauliske tab	22
1.4	Viden om effektivitetsforbedring ved en coating af en pumpe	23
1.5	Beskrivelse af alternative teknologier til den traditionelle coating	25
1.5.1	Plasmanitrering	25
1.5.2	Ionimplantering	26
1.5.3	Chemical Vapour Deposition (CVD)	28
1.5.4	Physical Vapour Deposition (PVD)	29
1.5.5	Sol-gel-belægninger	32
2	Formidlingsoversigt	33
2.1	Offentliggjorte artikler	32
2.1.1	DDV oktober 2004	33
2.1.2	Vedligeholdelsesbladet maj 2005	35
2.1.3	Teknisk nyt nr. 7 2005	37
2.1.4	Teknisk nyt nr. 14 2005	39
2.2	Indlæg afholdt på Eemods 05	42
2.3	Indlæg afholdt på erfa-seminar 05	42

1 Coatingteori og teknologi

For at sikre overblikket og læsbarheden af hovedrapporten er det valgt at placere grundteori og meget detaljerede beskrivelser i nærværende bilagsrapport.

1.1 Nedbrydning af stål ved korrosion

Korrosion er en naturlig proces, hvor materialer kommer tilbage til den tilstand, som de oprindeligt kom fra, da materialet blev brudt op fra jordens indre i miner mm. Eksempelvis jernmalm.

Man skelner mellem følgende forhold mht. korrosion:

- korrosion i atmosfæren
- korrosion i jord
- korrosion i ferskvand og havvand

Korrosion i atmosfæren er meget afhængig af den relative luftfugtighed. Hvis den relative fugtighed holdes under 50 % stopper al korrosion. Over 50 % i relativ luftfugtighed afhænger korrosionen af mængden af salte og graden af surhed i atmosfæren.

Korrosion i jorden er meget afhængig af mængden af salte samt fugtigheden i jorden. Det korrosive miljø kan bestemmes ved at måle den specifikke modstand i jorden.

I relation til coating af pumper har specielt korrosion i ferskvand og havvand relevans. Korrosion i havvand er den kraftigst på grund af mængden af klorider i vandet. Der kan opstå væsentligt højere korrosionsrater, hvis stålet befinder sig i havoverfladen eller i havbunden, da der her vil være større iltindhold på den ene og anden side af overfladen/bunden og dermed vil der kunne opstå passivering på den iltrige side og galvanisk tæring på den iltfattige side.

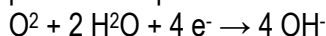
Korrosion i ferskvand er generelt lavere end i saltvand, da mængden af salte og mineraler er mindre.

1.1.1 Korrosionsprocessen

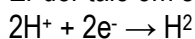
Korrosionsprocessen, hvor eksempelvis jern omdannes til rust, og som benævnes en anodisk reaktion, har følgende forløb:



Denne anodiske proces er altid ledsaget af en katodisk reaktion, en elektronforbrugende proces. Ved pH: 4-10 er der tale om en oxygen reduktion:



Er der tale om sure omgivelser $\text{pH} < 4$ er den tilsvarende proces hydrogenudvikling:



Kilde: Metallurgi for Ingeniører, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001

1.1.2 Spændingsrækken

Ikke alle metaller er lige tilbøjelige til at korrodere. Nogle vil nedsænket i eksempelvis havvand korrodere langt kraftigere end andre. Nogle metaller har således lettere ved at sende ioner i opløsning i havvandet end andre.

Nedsænkes to metaller, eksempelvis jern og kobber i saltvand, vil jernet korrodere kraftigere end kobberet og dermed få en stærkere elektrisk ladning. Forbindes de to metaller elektrisk, vil der løbe en strøm fra kobberet til jernet (elektronerne vil løbe fra jernet til kobberet). Det potentiale, der driver elektronerne, er spændingsforskellen mellem de to metaller i elektrolytten.

På den baggrund kan der opstilles en spændingsrække, som fortæller om den indbyrdes spændingsforskel mellem to metaller, der forbindes elektrisk og nedsænkes i en elektrolyt og dermed deres indbyrdes tilbøjelighed til at korrodere. De mindst ædle metaller ses i toppen af tabellen og de mest ædle i bunden af tabellen.

Elektrolytisk spændingsrække	
<i>Hav-vand 20°C</i>	<i>Volt</i>
Magnesium	-1,36
Zink	-0,86
Aluminium	-0,51
Jern	-0,46
Bly	-0,31
18/8 stål (aktivt)	-0,29
Tin	-0,26
Kobber	+0,02
18/8 stål (passivt)	+0,09
Guld	+0,42

Tabel 1: Elektrolytisk spændingsrække.

Kilde: *Metallurgi for Ingeniører*, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001

1.1.3 Korrosionstyper

Af tabellen herunder ses de typiske korrosionstyper samt deres karakteristika for korrosionsformen.

Korrosionstyper	Karakteristika
Fladetæring	Er jævnt fordelt over hele fladen. Opstår ved en stadig fordeling af anode- og katodeområder over hele overfladen
Galvanisk korrosion	Angreb på grund af kobling af ædelt metal til mindre ædelt metal, f. eks en stål møtrik på en bolt af rustfrit stål. Det mindre ælde metal vil korrodere hurtigt.
Grubetæring	Lokale dybdegående angreb. Opstår ofte i passiverbare metaller, hvor den passive overflade optræder ædel i forhold til den nedbrudte grube.
Interkrystallinsk korrosion	Angriber randområderne til de enkelte krystaller. Ses typisk i forbindelse med svejsninger
Selektiv korrosion	Betegner korrosion af et af metallerne i en legering, Eksempelvis zink i messing, tin i bronze, grafit i støbejern
Spændingskorrosion	Skyldes samtidige påvirkninger af mekaniske trækspændinger og korrosion
Korrosionsudmattelse	Skyldes samtidige påvirkninger af dynamiske belastninger og korrosion, eksempelvis stålør med afskalning af rustflager
Turbulenskorrosion (erosions korrosion)	Sker når turbolens hele tiden fjerner korrosionsprodukter fra bestemte områder for dermed laver skarpkantede gruber, eksempelvis rør med høj væskehastighed
Spaltekorrosion	Opstår i snævre væskefyldte revner og spalter, hvorved ilten hurtigt opbruges og passivitet derfor ikke kan opretholdes, typisk passiverbare metaller

Tabel 2: Typiske korrosionstyper

Kilde: *Metallurgi for Ingeniører*, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001



Billede 1: Eksempel på selektiv korrosion i støbejern. Her korroderer kun den ene bestandel i en legering, her stålet, og den anden bestandel, grafitten bliver tilbage.

Kilde: *Korrosion Atlas, steel metals*

1.1.4 Korrosionshastigheder

Korrosionshastigheden for et givent metal afhænger af den i metallet resulterende korrosionsstrøm, idet der skal frigives elektroner fra metallet, der korroderes, og disse elektroner skal ledsages af en katodisk proces, enten oxygen-reduktion eller hydrogenudvikling.

Korrosionshastigheden er givet ved følgende udtryk:
$$V = \frac{I \cdot M}{n \cdot F}$$

hvor:

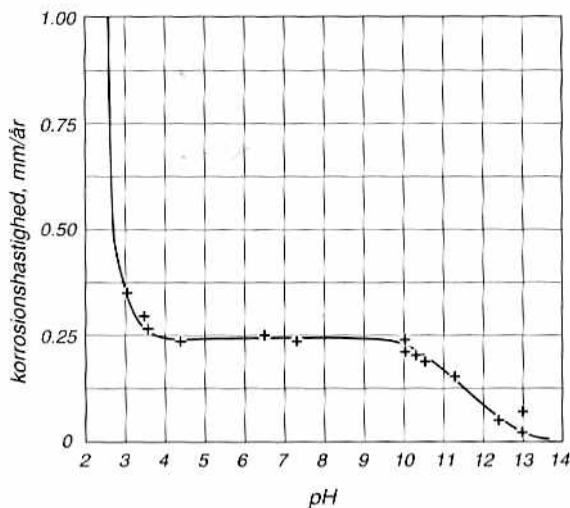
- V = korrosionshastigheden, g/s
- I = korrosionsstrømmen, Ampere
- M = metallets molekylvægt, g/mol
- n = antal elektroner pr. metalatom
- F = Faradays tal, 96.500 coulomb pr. mol

Kilde: Metallurgi for Ingeniører, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001

Korrosionshastigheden afhænger af følgende forhold:

- pH-værdi
- Temperatur
- Fugtighed
- Graden af turbulens og erosion
- Graden af spændinger og vibrationer
- Anode/katodeforhold ved galvanisk korrosion

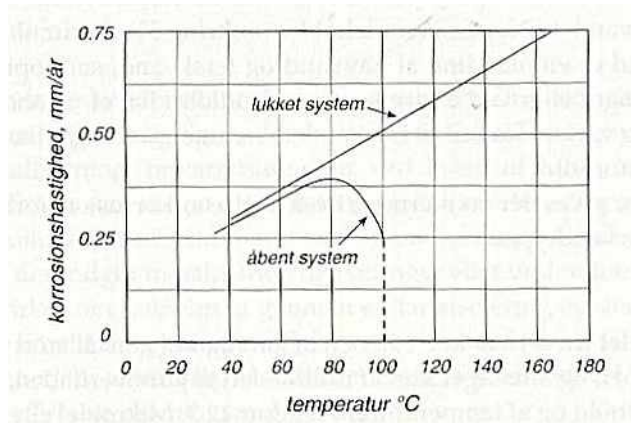
pH-værdiens indflydelse på korrosionshastigheden ses af figuren herunder:



Figur 1: Korrosionshastighed af jern i forbindelse med alm. ferskvand ved stuetemperatur ved forskellige pH-værdier. Det ses, at i pH-området 4–10 er korrosionshastigheden konstant og kun afhængig af iltindholdet i vandet. Over 10 i pH falder hastigheden, der opstår passivitet. Under 4 i pH stiger hastigheden dramatisk på grund af brintudvikling.

Kilde: Metallurgi for Ingeniører, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001

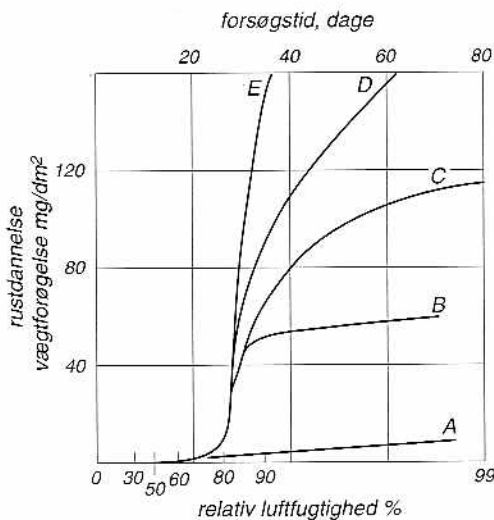
Temperaturens indflydelse på korrosionshastigheden ses af figuren herunder:



Figur 2: Korrosionshastighed af jern i pH-området 4-10 (oxygen-diffusion) i afhængighed af temperaturen. Generelt fordobles korrosionshastigheden ved en temperaturstigning på 30°C. Er systemet åbent, vil den dog falde igen ved ca. 80°C på grund af oxygens faldende opløselighed. Er det derimod lukket, vil stigningen fortsætte.

Kilde: *Metallurgi for Ingeniører, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001*

Den relative fugtigheds indflydelse på korrosionshastigheden ses af figuren herunder:



Figur 3: Rustdannelse på polerede ståloverflader, som funktion af relativ fugtighed i givne miljøer.

- A: Ren luft
- B: Partikler af ammoniumsulfat
- C: 0,01% SO₂ i luften
- D: Partikler af ammoniumsulfat + 0,01% SO₂
- E: Sodpartikler + 0,01% SO₂

Kilde: *Metallurgi for Ingeniører, 9. udgave Polyteknisk Forlag, 2001*

Bemærk, at korrosionen stopper, når den relative fugtighed kommer under 50 %, uanset miljøet.

Graden af turbolens og erosion forstærker en korrosionsproces. Det skyldes, at korrosionsprocessen og korrosionsprodukterne normalt danner en beskyttende hinde, et oxidlag, der efter den første korrosion passiverer og dermed reducerer korrosionshastigheden kraftigt. Hvis denne beskyttende hinde fjernes ved kraftig turbulens og erosion, vil den høje korrosionshastighed fortsætte. Eksempler på kraftige oxidlag kendes fra rustfrit stål og aluminium.

Graden af spændinger og vibrationer vil ligeledes forstærke en korrosionsproces. Det skyldes, at metallet herved interkristalinsk og ved revnedannelse bliver svækket og hurtigere nedbrydes end ved normal korrosion.

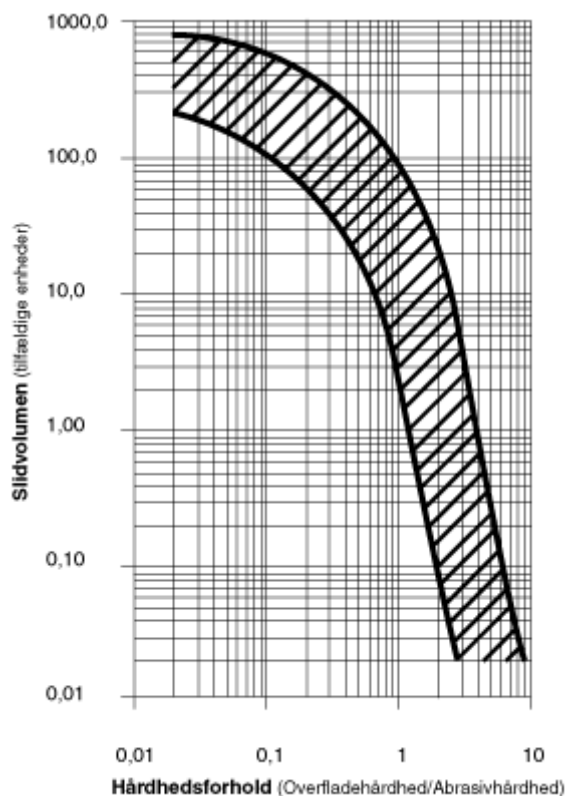
Ved galvanisk korrosion er der elektrisk kontakt mellem to typer af metaller i spændingsrækken, hvorved det mindre ædle metal korroderer hurtigere. Ugunstige arealforhold mellem det ædle og det mindre ædle metal, anode/katode-forholdet, vil forstærke denne proces yderligere. Udgør eksempelvis det ædle metal et stort areal i forhold til det uædle, vil det uædle korrodere hurtigt. Dette fænomen kendes fra galvanisk beskyttelse med en offeranode.

1.1.5 Overfladenedbrydning ved slid

Abrasivt slid

Abrasivt slid er den form for slid, der opstår, når hårde partikler eller hårde, ru overflader glider over en overflade eller kommer i klemme mellem overflader. Abrasivt slid forekommer som regel i større eller mindre grad i næsten alle systemer, der ikke er helt lukkede.

På figur 4 ses en skitse af den principielle sammenhæng mellem en overflades hårdhed og hårdheden af det, som slider på overfladen. Af figur 4 fremgår det tydeligt, at der sker et betydeligt fald i det abrasive slid, når hårdheden på overfladen overstiger hårdheden af det slidende medie, svarende til et hårdhedsforhold på 1.



Figur 4: Abrasivt slid på overflader i afhængighed af forhold i hårdhed mellem overflade og det slidende medie.

Kilde: Teknologisk Institut, Tribologicentret

Har man prøvet at file eller save i et stykke hærdet stål, ved man, hvor svært det er, når stålets hårdhed nærmer sig filens hårdhed. Nøjagtig det samme gør sig gældende ved abrasive slidprocesser.

Eksempler på slidende partikler er sand og støv fra omgivelserne. Består dette hovedsageligt af flint- og kvartspartikler, vil disse typisk have en hårdhed på 1000 til 1200 HV. Stål kan normalt kun hærdes til hårdheder på op til ca. 800 HV. Det er derfor ofte ikke muligt at gøre grundmaterialerne hårdere end det, som slider på dem, hvilket betyder, at der vil opstå slid.

Hastighedsslid / impact slid

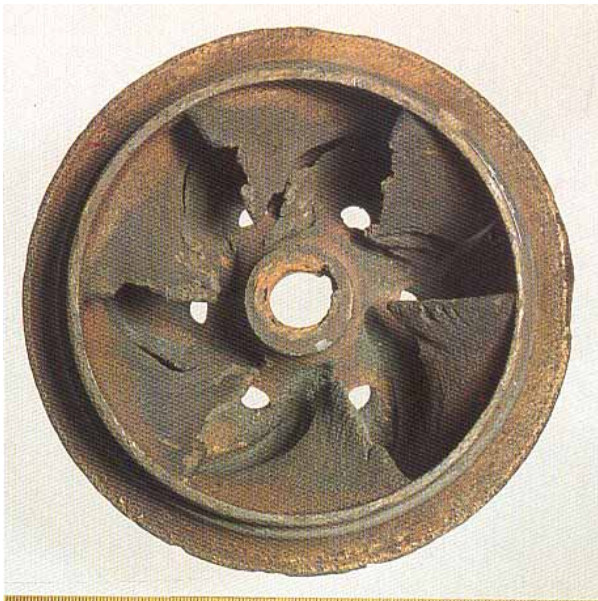
Hastighedserosion skyldes dels partikler, dels afbøjning af hastighed i det metal, der slides. Årsagen til sliddet er typisk den høje hastighed, som bryder den overfladefilm, som metallet måtte have, med det resultat til følge, at der kan fjernes materiale fra overfladen, som væsken herefter bærer væk. Herved kan der dannes karakteristiske gruber og huller, som kan være med til at bestemme sliddets årsag.

Figuren herunder viser typisk erosionshastigheder for metaller udsat for hastighedserosion med havvand.

Hastighedserosion	Erosionshastighed i mg/dm ² /d		
	0,3 m/s	1,2 m/s	8,2 m/s
Metal			
Stål	34	72	254
Støbejern	45	-	270
Bronze	7	2	280
Aluminiums bronze	5	-	236
rustfrit stål	1	0	1

Tabel 3: Hastighedskorrosion for forskellige metaller udsat for havvand. Hastigheden er givet i mg fjernet materiale pr. kvadratdecimeter pr. døgn.

Kilde: *Metals Handbook 9. edition, volume 13, Corrosion*



Billede 2: Eksempel på erosionskorrosion i et løbehjul af støbejern. Her forekommer der både korrosive og slidende elementer. De korrosive elementer skaber korrosionsprodukter, som de slidende elementer herefter fjerner, hvorved materialet langsomt fjernes.

Kilde: *Korrosion Atlas, steel metals*

Kavitationsslid

Kavitation er erosion, som skyldes kollaps af dampbobler. Når trykket på pumpens sugeside kommer under væskens kogepunkt, vil væsken begynde at koge, og der dannes bobler. Når boblerne herefter med væsken føres ind i pumpens trykside, vil de kollapse med stor kraftpåvirkning på pumpen til følge. Der kan således opstå chokbølger med et tryk på op til 4.000 bar. Disse chokbølger skader den beskyttende film, som en overflade måtte have, og herved accelereres processen.

Tabellen herunder viser effekten af en kavitationstest med forskellige metaller i henholdsvis ferskvand og saltvand.

Kavitations erosion/korrosion		Vægttab i mg/h	
Metal	Legering	Ferskvand	Saltvand
Støbejern	Diverse legeringer	65	84
Stål	Diverse legeringer	54	60
Bronze	Diverse legeringer	45	44
Rustfrit stål	Diverse legeringer	16	16

Tabel 4: Resultat af kavitationstest af forskellige metaller i henholdsvis 25°C ferskvand og saltvand. Resultatet er middelværdier for forskellige legeringer udsat for 60 min. test.

Kilde: *Metals Handbook 9. edition, volume 13, Corrosion*

Materialetabet over tid stiger kraftigt, når en korrosion ledsages af en samtidig påvirkning af en erosion eller en kavitation.



Billede 3 og 4: Eksempler på kavitationserosion/korrosion på løbehjul af støbejern. Her forekommer der på samme tid både korrosive elementer og voldsomme kraftpåvirkninger. De korrosive elementer skaber korrosionsprodukter, og de kaviterende påvirkninger fjerner korrosionsprodukterne, hvorved materialet langsomt fjernes. Kavitationen vil også kunne forekomme uden det korrosive element og dermed kunne ødelægge et løbehjul på kort tid, men det korrosive element vil forstærke denne proces.

Kilde: *Korrosion Atlas, steel metals*

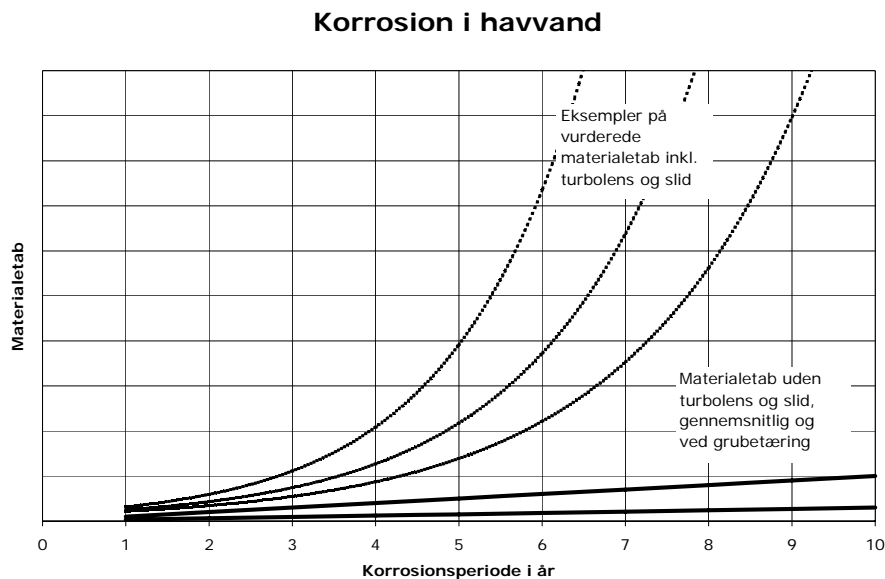


1.1.6 Udvikling i overfladenedbrydning over tid

Udviklingen af overfladenedbrydningen er i de fleste tilfælde empirisk bestemt ved at måle vægttabet af en given prøve udsat for korrosion og/eller erosion over tid. Vægttabet sat i forhold til den medgåede tid og arealet giver herefter et nøgletal for overfladenedbrydningen i mg/h eller mg/dm²/d eller mere retvisende µm/år.

Overfladenedbrydningen er tilsyneladende lineær, dog kan grubetæringer give lokale nedbrydninger, der er meget dybe og som til sidst giver gennemtæringer. Hvis der eksempelvis forekommer grubetæringer som følge af korrosion på stål neddyppet i havvand, på op til 0,5 mm pr. år, kan det forudsiges, hvornår en given gennemtæring vil forekomme, og der kan endog dimensioneres et tæringslag, som beskyttelse mod gennemtæring. På samme måde kan en tæring i ferskvand forudsiges i afhængighed af temperatur og PH-værdi.

Anderledes stiller forholdene sig, når der er tale om turbulens og slid sammen med korrosion, idet der derved ikke er muligt at forudsige materialetabet over tid, ligesom der findes få empiriske data på disse områder. Figuren herunder viser eksempler på vurderede materialetab over tid med og uden turbulens og slid.



Figur 5: Overfladenedbrydning for stål i havvand over tid i µm materialetab.

Kilde: Egen tilvirkning ud fra tidligere fundne data.

Figuren herover illustrerer grafisk udviklingen i materialetab som følge af korrosion med eller uden slid. Da der ved pumpedrift er turbulens og ofte også slid, er det meget vanskeligt at forudsige, hvorledes materialetabet forløber over tid.

1.2 Strømningsstab ved overfladeruhed

En strømning karakteriseres ved hjælp af begreberne laminar/turbulent, inkompressibel/kompressibel og instationær/stationær. En strømning gennem en pumpe vil være turbulent, væsken vil være inkompressibel, og strømningen kan karakteriseres som stationær.

Når der tales om strømningstab, opdeles teorien i strømning gennem rørignende tværsnit og strømning gennem enkeltmodstande.

1.2.1 Strømningstab gennem rørignende tværsnit

Strømningstab gennem rørignende tværsnit afhænger af friktionsfaktoren. Friktionsfaktoren kan beskrives med Reynolds tal, som beskriver en strømning igennem et vilkårligt tværsnit:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D_h}{\nu}$$

hvor Re = Reynolds tal (dimensionsløst)
 v = middelhastigheden i tværsnittet i m/s
 D_h = hydraulisk diameter i m
 ν = kinematisk visositet i m²/s

og den hydrauliske diameter for et vilkårligt tværsnit kan defineres som:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{O}$$

hvor D_h = hydraulisk diameter i m
 A = tværsnittets areal i m²
 O = Tværsnittes omkreds i m

Friktionsfaktoren kan for strømning i ru eller glatte tværsnit empirisk findes ved hjælp af Colebrooks formel. Formlen skal løses iterativt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \cdot \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D_h} \right)$$

hvor λ = friktionsfaktoren (dimensionsløs)
 k = sandruhed i meter
 D_h = hydraulisk diameter i m

Sandruheden er defineret som diameteren på de sandkorn, som oprindeligt blev brugt til at finde strømningstab i rør. Tabellen herunder viser en oversigt over diverse sandruheder for i dette tilfælde overflader i rør.

Kilde til ovenstående udtryk: Danvak Grundbog 2. udgave

Sandruheder

materiale	tilstand	sandruhed i mm
Letmetal	teknisk glat	0,001 - 0,005
Stål	nyt	0,03 - 0,1
	rustent	0,1 - 0,5
	meget rustent	1 - 4
Galvaniseret stål	nyt	0,1 - 0,3
	kalkbelagt	0,5 - 2,0
Støbejern	nyt	0,2 - 0,6
	rustent	0,5 - 1,5
	meget rustent	2 - 5

Tabel 5: Tabellen viser sandruheden for givne materialer. Sandruheden er efter Nikuradse defineret som den diameter af et sandkort, der i et jævnt lag pålimet en glat overflade giver en tilsvarende ruhed af det i tabellen viste materiale i den nævnte tilstand.

Kilde: Danvak Grundbog 2. udgave

Det specifikke strømningstab kan herefter findes som:

$$P\Delta = \lambda \cdot \frac{1/2 \cdot \rho \cdot v^2}{D_h}$$

hvor

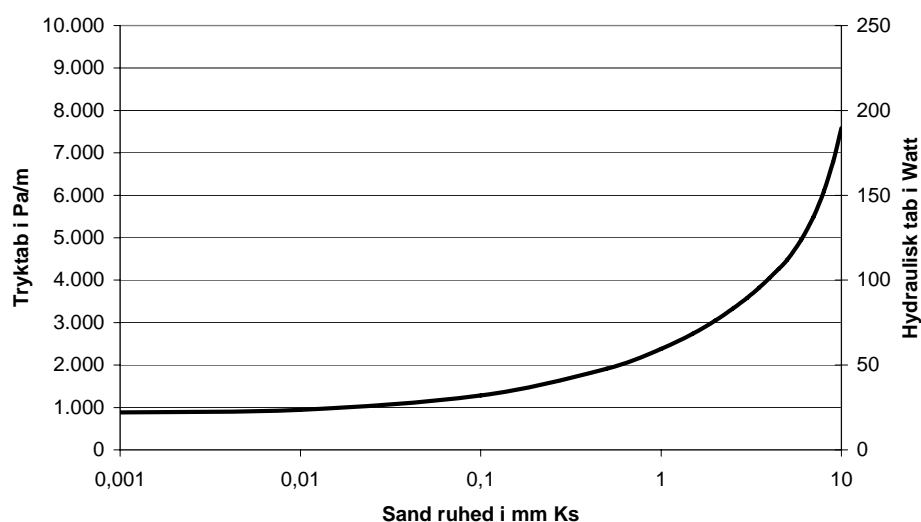
- $P\Delta$ = specifikt tryktab i Pa/m
- λ = friktionsfaktoren (dimensionsløs)
- ρ = væskens lokale densitet i kg/m^3
- v = middelhastigheden i tværsnittet i m/s
- D_h = hydraulisk diameter i m

Kilde: Danvak Grundbog 2. udgave

Der er foretaget beregninger vedr. tryktab i rør som følge af stigende ruhed. Beregningerne ses af figuren herunder. Det ses, at stigende ruhed medfører stigende tryktab og dermed hydraulisk tab ved gennemstrømning af et rør.

Kilde: Egentilvirkning efter ovenstående formler

Tryktab i rør i afhængighed af ruhed
vand 20°C, 100 m³/h, Ø100 mm, længde 1 meter



Figur 6: Tryktab i rør i afhængighed af sandruhed.

Kilde: Egen tilvirkning ud fra ovenstående udtryk

1.2.2 Strømningstab gennem enkeltmodstande

Tryktabet i enkeltmodstande kan ikke beskrives ud fra overfladeruhed alene, da der i en enkeltmodstand herudover kan være krumninger, bøjninger, indsvævninger, udvidelser mm. Der beskrives trykfaldet mere simpelt ud fra det tab i dynamisk tryk, enkeltmodstanden afstedkommer på væskens vej gennem den.

$$\Delta P_e = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

hvor ΔP_e = tryktabet i enkeltmodstanden i Pa
 ζ = tryktabsfaktoren for enkeltmodstanden (dimensionsløst)
 ρ = væskens lokale densitet i kg/m³
 v = middelhastigheden i det mindste tværsnit i enkeltmodstanden i m/s

Specielt for ventiler er der traditionelt regnet med specielle værdier, som er afhængige af flowet igennem ventilen.

$$\Delta p_v = 1,27 \cdot 10^9 \cdot \rho \cdot \frac{q_v^2}{k_v^2}$$

hvor ΔP_v = tryktabet i ventilen i Pa
 ρ = væskens lokale densitet i kg/m³
 q_v = flow igennem ventilen i m³/s
 k_v = den specifikke konstant for ventilen i m³/h

1.2.3 Sammenhæng med strømningstab og hydraulisk tab

For en strømmende inkompressibel væske beskriver Bernoullis ligning energitætheden i væsken ved følgende udtryk:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot z + c_p \cdot \rho \cdot \Delta T$$

hvor U = energitætheden i J/kg
 ρ = væskens lokale densitet i kg/m³
 v = væskens lokale hastighed i m/s
 p = lokalt statisk tryk i Pa
 g = tyngdens acceleration i m/s²
 z = lokal geometrisk højde i m
 c_p = væskens varmekapacitet
 ΔT = temperaturstigningen i væsken

Energitætheden er konstant så længe, der ikke tilføres eller fjernes energi fra systemet. Er der en pumpe i systemet, tilføres der energi og herved fås følgende udtryk for det hydrauliske arbejde, idet det antages, at den lokale højdeforskel ved ind- og udløb er konstant:

$$P_h = (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + p_2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 - p_1) \cdot q$$

hvor P_h = den hydrauliske effekt i J
 q = væskens flow i kg/s

Kilde til ovenstående: Danvak Grundbog 2. udgave

1.3 Energiomsætning i pumper

Energital i pumper skyldes flere forhold:

- 1) hydrauliske tab i løbehjul og pumpehus
- 2) mekaniske tab i lejer og lejetætninger
- 3) tab som følge af indre lækage (slidring)

Tab i pumper kommer ikke trykenergien til gode, men bliver til temperaturstigning i væsken, og pumpevirkningsgrad defineres herefter som:

$$\eta_p = \frac{\Delta p_t}{\Delta p_t + c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

hvor η_p = virkningsgraden for selve pumpen (akselvirkningsgrad)
 Δp_t = total trykstigning over pumpen i Pa
 c_p = varmekapacitet for væsken i J/kg·°C
 ρ = vægtylde for væsken i kg/m³
 ΔT = temperaturstigning for væsken gennem pumpen i °C
Kilde: Danvak Grundbog 2. udgave

Det er de hydrauliske tab i løbehjul og pumpehus samt tab i indre lækager, som en coating og en renovering af pumpen vil kunne reducere.

1.3.1 Tab i pumper i afhængighed af pumpens specifikke hastighed

Pumper karakteriseres ved deres specifikke hastighed, som er givet ved følgende udtryk:

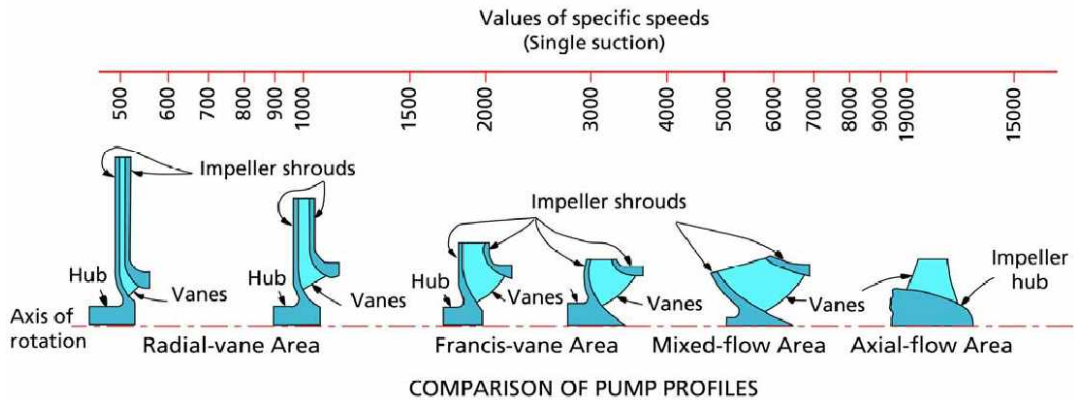
$$N_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0.75}}$$

hvor N_s = pumpens specifikke hastighed
 n = pumpens omløbstal i o/min
 Q = pumpens ydelse i m³/h ved bedste virkningsgrad
 H = pumpens differensstryk i meter vandsøjle ved bedste virkningsgrad.
Kilde: Centrifugal and Axial Flow pumps, 2. edition, Stepanoff, 1957

Specifik hastighed er introduceret i amerikanske lærebøger, og de fleste pumpebøger er amerikanske og opererer derfor med amerikanske størrelser. Derfor er specifik hastighed i SI-enheder 1,16 gange større end US-enheder.

En pumpe specifikke hastighed kan bruges i designfasen til at identificere det optimale og fysiske bedste design for en given pumpe. Lav specifik hastighed er ensbetydende med lavt flow og typisk højt tryk, og omvendt er høj specifik hastighed ensbetydende med højt flow og lavt tryk.

Lav specifik hastighed medfører normalt radiale pumper, og høj specifik hastighed betyder normalt aksiale pumper. For værdier midt imellem anvendes normalt en blanding af de to ærketyper (se efterfølgende figur, bemærk US-enheder).



Figur 7: Design for givne pumper i afhængighed af specifik hastighed.
Kilde: *Centrifugal and Axial Flow pumps, 2. edition, Stepanoff, 1957*

Specifik hastighed kan bruges til at sammenligne pumper og til at få en forståelse for pumpe størrelse og pumpeperformance. I tabellen herunder er oplyst pumper, som der tidligere er målt på, samt to eksempler:

Dalum: Dalum Papirfabrik indgik i et tidligere projekt omkring coating af pumper støttet af Energistyrelsen og gennemført under projektledelse af Teknologisk Institut i Tåstrup. Projektet anviste på denne pumpe en effektivitetsforbedring på næsten 30 % efter en coating. Dalum pumpen er en typisk trykydende pumpe med et forholdsvis lavt flow. Det giver den en forholdsvis lav specifik hastighed. Løbehjulet på denne pumpe er smalt med en stor diameter.

Ejby: Ejby Rensningsanlæg indgik i samme projekt. Denne pumpe opnåede efter coating en besparelse på ca. 13 %. Pumpen er en typisk flowydende pumpe med et forholdsvis lavt tryk. Det giver pumpen en forholdsvis høj specifik hastighed. Løbehjulet på denne pumpe er bredt med en middel diameter.

Høj N_s : Ærketype høj specifik er en pumpe med særligt højt flow og næsten ingen tryk. Det medfører en særlig høj specifik hastighed og et næsten åbent aksialt løbehjul.

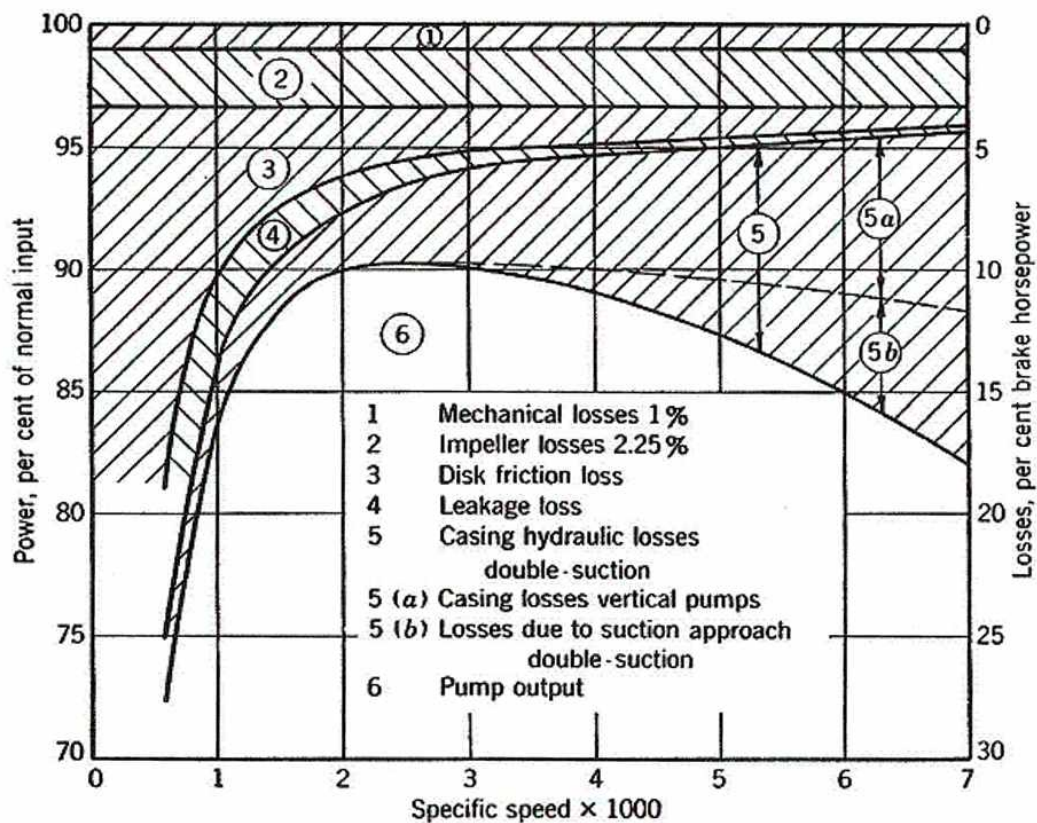
Lav N_s : Ærketype lav specifik er en pumpe med et særligt højt tryk og næsten ingen flow. Det medfører en lav specifik hastighed og et særligt smalt løbehjul med en stor diameter.

Eksempler		Dalum	Ejby	1	2
n	o/min	2.915	1460	750	5000
Q	m ³ /h	120	450	1000	50
H	meter	75	15	5	150
N_s	SI-enheder	1.253	4.063	7.093	825
N_s	US-enheder	1.079	3.498	6.107	710

Tabel 6: Eksempler på beregnede specifikke hastigheder.
Kilde: *Egen tilvirkning ud fra ovenstående*

De typiske tab i en pumpe kan således opgøres i afhængighed af den specifikke hastighed. Det er vist i følgende figur. Figuren giver et godt indblik i tabenes fordeling i afhængighed af pumpens specifikke hastighed (US-enheder). Tallene i figuren refererer til følgende tab/arbejde.

- 1) Mekaniske tab
- 2) Løbehjulstab
- 3) Løbehjulsfriktionstab
- 4) Indre lækagetab (volumetrisk tab)
- 5a) Hydrauliske tab i pumpehus enkeltansugende pumpe
- 5b) Hydrauliske tab i pumpehus dobbeltansugende pumpe
- 6) Nyttiggjort pumpearbejde (hydraulisk effekt)

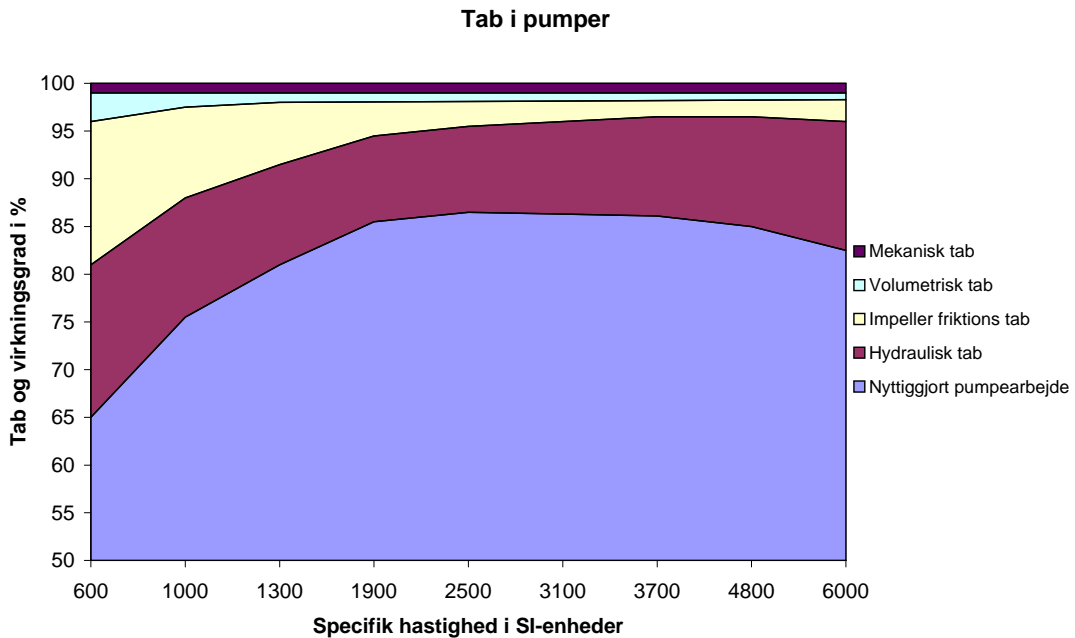


Figur 8: Tab i en dobbeltansugende pumpe som funktion af den specifikke hastighed.
 Kilde: *Centrifugal and Axial Flow pumps, 2. edition, Stepanoff, 1957*

De enkelte tab i pumpen er gennemgået detaljeret i det følgende.

Universitetet i Darmstadt har ligeledes i 2001 kortlagt tabene i centrifugalpumper. Dette er dels gjort ved detaljerede undersøgelser af pumper i en speciel teststand, dels ved hjælp af teoretiske computersimuleringer i forbindelse med testene. Resultatet er meget lig de amerikanske tal og kan ses af figuren herunder.

Udgangspunktet for figuren er en pumpe, der leverer 180 m³/h og har et omdrejningstal på 1.450 o/min. Bemærk, at der her er tale om SI-enheder.



Figur 9: Tab i pumper i afhængighed af specifik hastighed.

Kilde: *Study on improving the energy efficiency of pumps, European Commission, february 2001*

Fælles for begge undersøgelser er, at de væsentlige tab i en pumpe er løbehjulsfriktionstab og hydrauliske tab. Mindre væsentlige tab er mekaniske tab og volumetriske tab.

Det ses af figureerne, at de største virkningsgrader kan opnås ved pumper med højt specifikt hastighed, dvs. pumper, der typisk har et højt flow og en lille trykhøjde. Omvendt vil pumper med lavt specifikt omløbstal, dvs. pumper med typisk lavt flow og stor trykhøjde, ikke opnå høj virkningsgrad.

Den eneste forskel på de to undersøgelser er, at den første medtager løbehjulstab, et konstant tab på 2,25 %, som dækker over, at løbehjulet rent design/konstruktionsmæssigt ikke er i stand til at omsætte al hastighedsenergi til trykenergi.

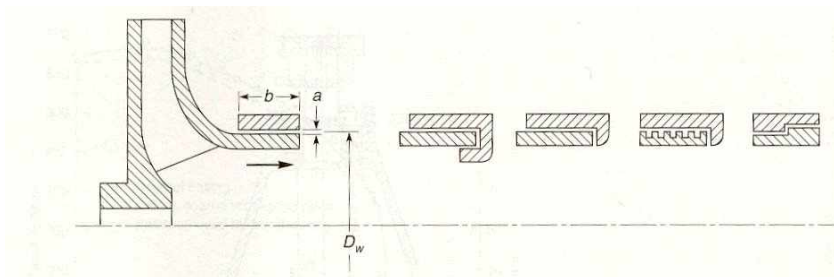
De enkelte tab i en pumpe er gennemgået detaljeret i det følgende.

1.3.2 Mekaniske tab

Mekaniske tab er tab i lejer, pakdåser og lejetætninger. Disse udgør normalt konstante tab i en pumpe på ca. 1 % af pumpens tilførte akseffekt. Kun i specielle tilfælde med ekstraordinære krav til tætninger eller i tilfælde med defekte tætninger vil dette tab være interessant. I relation til coating af en pumpe er disse tab ikke interessante.

1.3.3 Volumetriske tab (lækagetab)

Lækagetabet refererer til, det tab, der opstår som følge af slidte indre slidringe mellem trykside og sugeside i pumpen. Dette tab kaldes også leveringsgrad, dvs. forholdet mellem det flow, der leveres af omløberen og det flow, der rent faktisk forlader pumpen. Differencen løber internt i pumpen, som en recirkulerende massestrøm. Ved flertrinshpumper vil tabet ligeledes kunne foregå mellem de enkelte trin i pumpen. Lækagetabet er afhængig af trykket, udformningen og tilstanden af de indre slidringe.



Figur 10: Typer af indre slidringe mellem løbehjul og pumpehus.
Kilde: *Centrifugal pump, Users Guidebook, Sam Yedidiah, 1996*

Tabet af flow i den indre slidring mellem løbehjul og pumpehus er givet ved følgende udtryk:

$$Q_L = K \cdot \pi \cdot a \cdot D_w \cdot \left(\frac{2 \cdot g \cdot (P_C - P_S)}{\gamma} \right)^{0,5}$$

hvor Q_L = tabet af flow i m³/h
 K = konstant
 a = spaltegabet i den indre slidring i mm
 D_w = løbehjulets diameter i mm
 g = gravitationskonstant 9,81 m/s²
 P_C = trykket på tryksiden af løbehjulet i Pa
 P_S = trykket på sugesiden af løbehjulet i Pa
 γ = pumpemediets vægtylde i kg/m³

Kilde: *Centrifugal pump, Users Guidebook, Sam Yedidiah, 1996*

Det ses af udtrykket, at spaltetabet er afhængigt af trykforskellen mellem trykside og sugeside i 0,5 potens og ligefrem proportionalt med spaltetabet i mm og løbehjulets diameter i mm.

Tabellen herunder viser beregnede lækagetab i pumper som følge af varierende længde-/breddeforhold af forskellige slidringe ved 4 sæt af omdrejningstal. Omdrejningstallene gælder for 60 Hz motorer. Tabene er beregnet som en procentdel af den normale kapacitet for en 3" pumpe med et 10" løbehjul og med en slidring på 4".

Af tabellen kan det ses at ved stærkt slidte slidringe, kan der tabes op til 20 % af kapaciteten. I dette eksempel ved et ligeløbsgab på 0,039 ", svarende til 0,99 mm.















Lækagetabet som følge af varierende gab mellem slidringe afhænger meget af pumpens specifikke hastighed. Tabet er størst ved den laveste specifikke hastighed, hvor trykforskellen er størst mellem tryk og sugeside på løbehjulet.

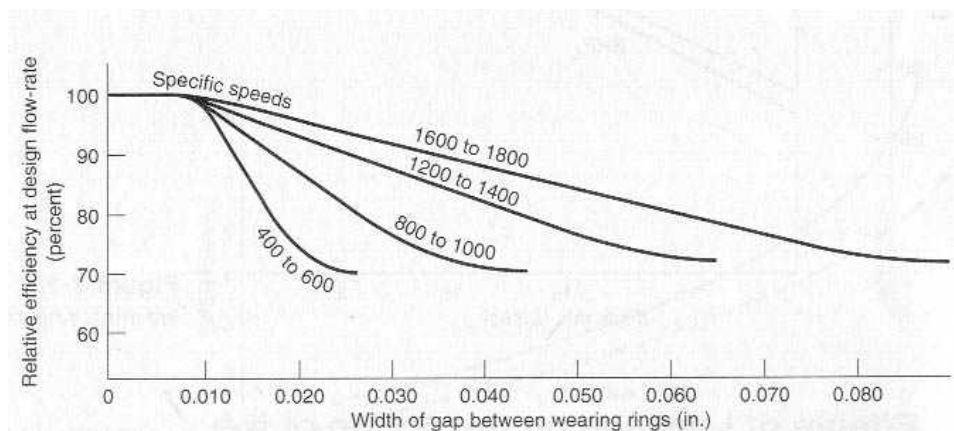
Ved høj specifik hastighed, dvs. ved lavt tryk og højt flow, anvendes normalt åbne aksiale løbehjul. Her er der ingen slidring, men i stedet et gab mellem skovlbladet og pumpehuset. Det er i dette gab, at den interne lækage vil forekomme.

Figuren herunder viser tabet i afhængighed af normal kapacitet for pumper med en simpel slidring med en længde på ca. 20 mm. Det ses af figuren, at tabet stiger voldsomt ved lav specifik hastighed og kun er beskedent påvirket ved høj specifik hastighed. Det ses desuden af figuren, at lækagetabet ikke kommer højere end 30 %.

Bemærk, specifik hastighed i US-enheder.

Table 7: Typiske tab af kapacitet i afhængighed af varierende længde-/breddeforhold for tætningsgab
Kilde: *Centrifugal and Axial Flow pumps, 2. edition, Stepanoff, 1957*

		a In.	b In.	Leakage per cent at r.p.m.			
				1400	1700	2000	2500
1		0.012	1 1/16	1.52	1.80	2.00	2.18
2		0.012	1 1/16	2.85	3.32	3.52	3.70
3		0.012	1 1/16	3.52	4.03	4.33	4.50
4		0.017	1 1/16	6.06	6.65	6.70	6.70
5		0.020	1 1/16	7.92	8.62	8.86	8.60
6		0.029	1 1/16	13.2	13.9	14.0	14.0
7		0.039	1 1/16	18.7	19.6	19.8	20.0
8		0.017	1 1/16	4.83	5.38	5.58	5.52
9	Circular groove 1/16 x 1/16 1/8 apart	0.029	1 1/16	12.7	13.5	13.7	13.6
10		0.011	1 1/16	3.18	3.68	3.94	4.08
11		0.021	1 1/16	8.53	9.04	9.15	9.19
12		0.011	1 1/16	2.52	2.88	2.92	2.98
13	1/16 x 1/16 spiral groove	0.021	1 1/16	6.24	6.68	6.89	6.82
14		0.010	1 1/16	2.55	3.03	3.28	3.44
15		0.010	1 1/16	2.07	2.34	2.45	2.52



Figur 11: Lækagetab gennem slidring i afhængighed af specifik hastighed. Bemærk at gabet er opgivet i ", dvs., tallet skal multipliceres med 25 for at få det i mm. Y-aksen angiver tabet i forhold til design flow.

Kilde: *Centrifugal pump, Users Guidebook, Sam Yedidiah, 1996*

1.3.4 Løbehjulsrotationstab.

Løbehjulsrotationsstab refererer til det tab, der er som følge af, at den cirkulære omløber roterer i pumpemediet tæt på pumpehuset. Herved opstår der et friktionsstab, som er afhængig af dels overfladeruhed, dels omløbstal og omløberens diameter. Stigende overfladeruhed, stigende omløbstal og stigende diameter for omløberen vil alle betyde større omløberrotationsstab.

Tabet er givet ved følgende udtryk:

$$P_D = K \cdot n^3 \cdot D^5$$

hvor P_D = effekttab ved disk friktion i Watt
 K = pumpe-specifik konstant
 n = omløberens omløbstal i o/min
 D = omløberens diameter i meter

Kilde: Centrifugal and Axial Flow pumps, 2. edition, Stepanoff, 1957

Som det ses af formlen og figurerne tidligere, udgør løbehjulrotationstab en væsentlig del af det samlede tab i en pumpe. Tabet forøges kraftigt ved lavere specifik hastighed, dvs. ved en kombination af højt tryk og lavt flow. Det skyldes, at pumper med lavt specifik hastighed normalt har løbehjul med en stor diameter og højt omløbstal. Som det ses af formlen, forstærker det tabet kraftigt. Impelleromløbstabet kan udgøre 15 % af den tilførte energi ved de laveste specifikke hastigheder.

Tabet kan minimeres ved en glattere overflade på løbehjulets yderside og på pumpehusets inderside, der vender mod løbehjulet. Jo glattere overfladerne er, jo mindre er dette tab. Her kommer coatingen ind i billedet, idet den glatte overflade på kompositten reducerer impellerfriktionstabet kraftigt.

1.3.5 Hydrauliske tab

De sidste tab kaldes under ét hydrauliske tab. Det refererer til det tab, der opstår som følge af, at der strømmer væske gennem pumpens indløb, gennem løbehjulet og ud af pumpens udløb. Jo højere flow og jo højere ruhed, desto større tab vil der forekomme. Derfor vil dette tab også være størst i forbindelse med pumper med høj specifik hastighed, dvs. pumper med forholdsvis lavt trykhøjde, men meget højt flow.

Litteraturen angiver ikke specifikke udtryk for dette tab. Det er i eksemplet beregnet som residual, dvs., det tab der er tilbage, når de andre tal er fratrukket. Det er dog muligt at beskrive tabet ud fra alm. flowtabsformler med Reynolds tal, se afsnit 1.1.9. Tabet angives til 10-15 % af den tilførte effekt til pumpen afhængig af den specifikke hastighed.

Den etablerede pumpelitteratur angiver et stigende hydraulisk tab med stigende specifik hastighed, hvor undersøgelsen i Darmstadt tilsyneladende angiver et nogenlunde konstant tab uafhængigt af den specifikke hastighed. I alle tilfælde betyder dette tab meget, og her vil specielt en coating af overfladen på indersiden af pumpehuset have stor gavnlig effekt.

1.4 Viden om effektivitetsforbedring ved en coating af en pumpe

Ud fra allerede foretagne coatinger og renoveringer af pumper har det været muligt at indsamle data over de tidligere realiserede gevinster.

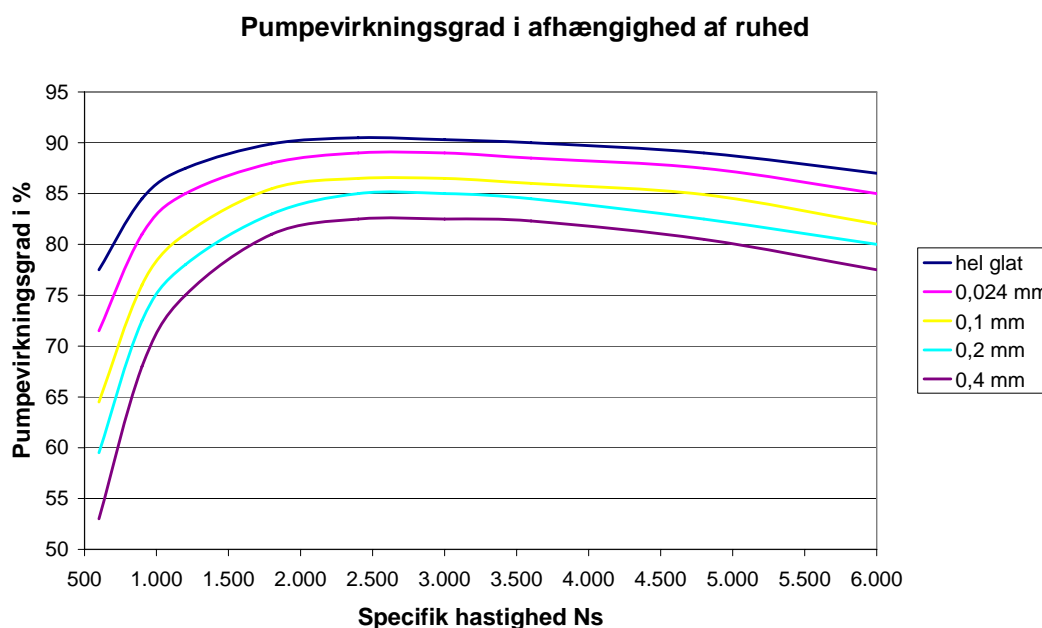
Dataene består dels af laboratoriemålinger, dels af målinger udført efterfølgende i felten.

Lokalitet	Pumpefunktion	Motoreffekt (kW)	Coating		Renov. tætn.	Energibesparelse
			Hus	Hjul		
Dalum	industrivand	55	x	x		25%
Ejby	rensningsanlæg	30	x	x		13%
Hjørring	fjernvarme	110	x	x		5%
Trefor	fjernvarme	30	x	x		15-20%
JCS	Vand	300	x	x		9%

Tabel 8: Eksempler på kendte effektivitetsforbedringer af pumper efter en coating med komposit.

Kilde: Teknologisk Institut og Chesterton

Herudover har universitetet i Darmstadt lavet undersøgelser om ruhedens indflydelse på energiforbruget i en pumpe. Resultaterne ses af figuren herunder.



Figur 12: Overfladeruhedens indflydelse på pumpevirkningsgrad. Resultatet bygger på test i pumpestand efter pålimning af sandkorn efter Nikuradse ruhedsdefinition. De farvede virkningsgradforløb refererer til diameteren på de pålimede sandkorn. Beregning af tab i afhængighed af specifik hastighed er dels testet ved EDB-simuleringer.

Kilde: Study on improving the energy efficiency of pumps, European Commission, february 2001

Undersøgelsen bygger på en pumpe, som er belagt med sandkorn med forskellige størrelser, efter den såkaldte Ks-norm, som beskriver ruheden ud fra diameteren på sandkorn, som pålimet overfladen vil give den samme ruhed.

Forskerne i Darmstadt anfører, at en sandruhed på 0,025 mm svarer til en topkvalitet sandstøbning, og 0,1, 0,2 samt 0,4 mm svarer til stigende grad af korrosion og erosion. Hel glat svarer til en sandruhed tæt på 0 mm. Forskerne anfører endvidere, at coating af pumpehjul og pumpehus medfører, hvad der i undersøgelsen svarer til en hel glat overflade.

Undersøgelsens resultater viser, coating af en helt ny pumpe kan give op til 5 % i energibesparelser, og at der kan opnås mere end 20 % for slidte og korroderede pumper med lav specifik hastighed.

Tabellen herunder viser typiske sandruheder ved forskellige grader af korrosion på metaller. Her anføres det, at der typisk skal regnes med sandruheder for støbejern på 0,2–0,6 for nyt støbejern og helt op til 2–5 mm for stærkt korroderet støbejern.

Sandruheder

materiale	tilstand	sandruhed i mm
Letmetal	teknisk glat	0,001 - 0,005
Stål	nyt	0,03 - 0,1
	rustent	0,1 - 0,5
	meget rustent	1 - 4
Galvaniseret stål	nyt	0,1 - 0,3
	kalkbelagt	0,5 - 2,0
Støbejern	nyt	0,2 - 0,6
	rustent	0,5 - 1,5
	meget rustent	2 - 5

Tabel 9: Tabellen viser sandruheden for givne materialer. Sandruheden er efter Nikuradse defineret som den diameter af et sandkort, der i et jævnt lag pålimet en glat overflade giver en tilsvarende ruhed af det i tabellen viste materiale i den nævnte tilstand.

Kilde: Danvak Grundbog 2. udgave

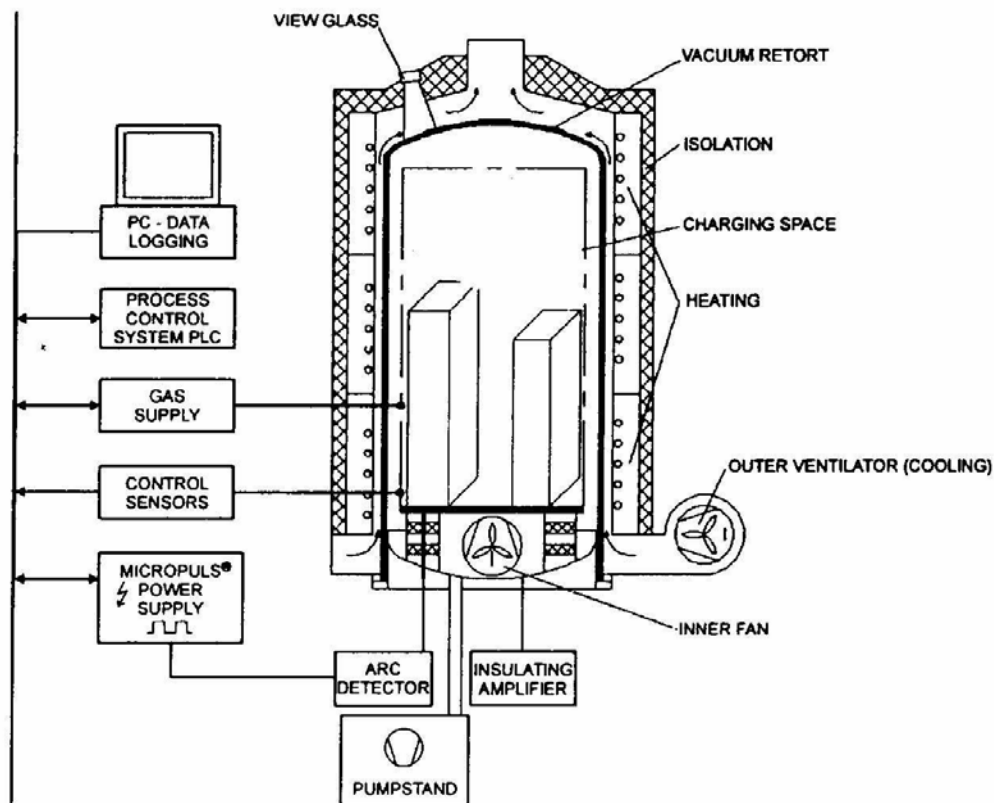
1.5 Beskrivelse af alternative teknologier til den traditionelle coating

Plasmabaserede vakuumprocesser

Den gruppe af overfladebehandlingsprocesser, som betegnes plasmabaserede vakuumprocesser, udgøres af forskellige procestyper. Eksempler på sådanne processer er plasmanitrering, ionimplantering, plasma CVD og PVD. Fordelen ved disse processer er, at der er en bred vifte af kombinations- og variationsmuligheder, som gør det muligt at skræddersy behandlingen efter de ønskede egenskaber og anvendelser. I det følgende beskrives de enkelte processer både med hensyn til princip og procestype.

1.5.1 Plasmanitrering

Processen foregår i en vakuumovn i en atmosfære bestående af fortyndet ammoniak eller en gasblanding bestående af kvælstof og brint. Princippet er baseret på tilstedeværelsen af en spændingsforskel mellem to elektroder. Emnerne, som ønskes behandlet, er forbundet som katode, hvilket betyder, at der opstår en negativ spænding på emneoverfladen. I figur 15 ses en principskitse af plasmanitreringsanlægget, som anvendes hos Tribologiceret, Teknologisk Institut.



Figur 13: Schematisk oversigt over plasmanitreringsanlæg hos Tribologiceret i Århus. I et kraftigt elektrisk felt ioniseres kvælstof og accelereres med stor hastighed imod emneoverfladen, som herved nitreres. Herved øges overfladehårdhed og korrosionsbestandighed.

Kilde: Teknologisk Institut, Tribologiceret.

Som resultat af kollisioner med elektroner ioniseres kvælstofgassen, hvorefter gasmolekylerne accelereres imod emneoverfladen, der agerer katode. Når de accelererede kvælstofatomer eller -molekyler kolliderer med emneoverfladen, resulterer det i en opvarmning af overfladen. Opvarmningen bevirker, at det er muligt for kvælstoffet at diffundere ind i materialet.

Processen kan udføres ved temperaturer i et bredt interval fra 350-580 °C [*Kilde: Overfladebehandling, stål*], hvilket betyder, at processen er meget fleksibel. Afhængigt af de valgte procesparametre vil der ved plasmanitrering kunne observeres en dannelse af et hvidt compoundlag. Compoundlaget udgøres af et mikroskopisk lag bestående af forskellige nitrider. Lagtykkelsen kan variere fra 5-50 µm afhængig af den anvendte procestemperatur og procestid. Det er primært muligheden for at kontrollere dannelsen af compoundlaget kombineret med den relativ lave procestemperatur og dimensionsbestandigheden på emnerne, som gør plasmanitrering meget anvendelig som overfladebehandlingsproces.

Compoundlaget kan have en vis smørende effekt, hvilket gør den ønsket i nogle tilfælde og uønsket i andre. Den relativ lave procestemperatur betyder, at en efterfølgende varmebehandling af emnerne i mange tilfælde er unødvendig. Dimensionsbestandigheden er unik for de fleste diffusionsprocesser, da der ikke dannes en egentlig belægning på overfladen.

Plasmanitrering anvendes i stort omfang til behandling af sliddele, hvor grundmaterialet er designet med henblik på en senere nitrering. Dette gøres med henblik på at opnå de optimale kombinationer af hårdhed og nitrerdybde. I disse tilfælde er der tale om specielle ståltyper, som er fremstillet med henblik på nitrering, hvorfor de kaldes nitrerståle [*Kilde: Overfladebehandling, stål*]. Ved opsummering af de vigtigste egenskaber, som opnås ved plasmanitrering fås:

- Høj overfladehårdhed
- Stor slidstyrke
- Stor termisk stabilitet
- Høj udmattelsesstyrke
- God dimensionsbestandighed
- Forbedret korrosionsbestandighed for ikke-rustfrie ståltyper

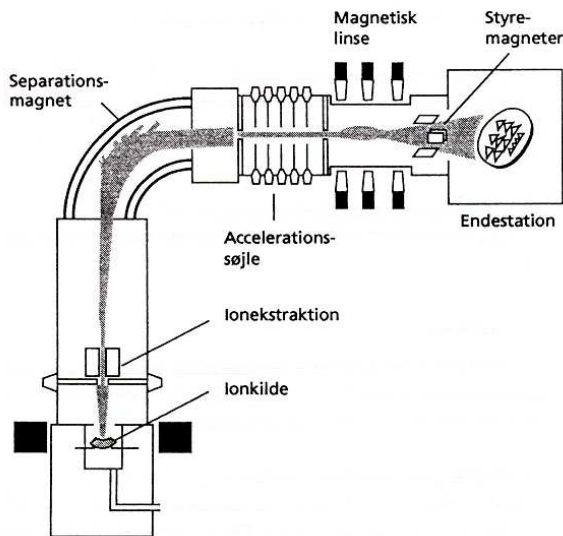
1.5.2 Ionimplantering

Umiddelbart er det vanskeligt at placere ionimplantering i en systematisk gruppering af overfladebehandlingsprocesser. Dette skyldes, at processen afviger fra de øvrige processer i kraft af de tekniske karakteristika. Ionimplantering er en tør proces, som hverken kan betegnes som en diffusion- eller belægningsproces, men derimod som en omlegering af det yderste overfladelag.

Omlegningen opnås ved at skyde ioniserede partikler med høj hastighed mod emneoverfladen. Derved trænger ionerne ind i de yderste 0,1 – 0,5 μm af materialet [Kilde: *Overfladebehandling, Stål*], hvorved emneoverfladens fysiske og kemiske egenskaber ændres. De egenskaber, som primært kan bearbejdes er slid-, friktions-, korrosions- og udmattelsesegenskaber. Den kemiske struktur i overfladelaget er afgørende for de opnåede egenskaber af overfladen. Følgende procesparametre har indvirkning på den kemiske struktur i overfladelaget:

- Grundmateriale
- Ionetype
- Ionenergi
- Iondosis

I princippet kan processen forløbe med en hvilken som helst ioniseret partikel som medie, men de mest anvendte medier er kvælstof og krom. Ionimplantering af kvælstof medfører en relativ høj slidstyrke, mens krom bl.a. styrker korrosionsegenskaberne. Ionenergien er et mål for ionernes hastighed, hvilket har betydning for de opnåelige indskydningsdybder, mens iondosis er et mål for mængden af indskudte ioner. Processen udføres ved hjælp af en ionaccelerator bestående af forskellige elementer. Dette kan skitseres på figur 16, som viser en ionaccelerator af samme type, som anvendes på Tribologicenteret, Teknologisk Institut.



Figur 14: Skematisk oversigt over ionimplanteringsanlæg hos Tribologicentret i Århus. Ved hjælp af en accelerator kan der skydes ioner ind i en metaloverflade, som herved ændrer karakteristisk imod højere bestandighed over for eksempelvis korrosion og slid.
Kilde: Teknologisk Institut, Tribologicentret.

En af fordelene ved ionimplantering er de store muligheder for selektiv overfladebehandling. Dette kan gøres forholdsvis præcist, da ionestrålen kan formes efter ønske og scanne hen over nøje definerede områder.

I kraft af, at overfladebehandlingen foretages ved hjælp af ionestrålen, er processen en sigtelinieproces. Dette bevirker, at overfladen, som ønskes behandlet, skal kunne rammes direkte af ionestrålen. Dermed opstår en begrænsning i forhold til placeringen af emnet. Som regel placeres emnet således, at ionestrålen ikke er rettet mere end 45° fra vinkelret på overfladen.

Med henblik på at opnå en homogen behandling er det nødvendigt at bevæge ionstråle og emne i forhold til hinanden. Dette kan løses ved at bevæge ionstrålen oppefra og ned, med en bevægelse fra side til side, ved hjælp af styremagneter. Desuden roteres den vandafkølede emneholder med konstant hastighed.

Da det behandlede lag er en integreret del af overfladen, er der ingen problemer med manglende vedhæftning. Desuden ændres overfladens mikrostruktur ikke, hvilket betyder, at et poleret emne ikke skal efterpoleres efter behandling. Den uændrede overfladestruktur betyder ydermere, at der ikke sker nogen form for makroskopisk målændringer. Dette gør ionimplantering velegnet til præcisionsværktøjer og højglanspolerede emner.

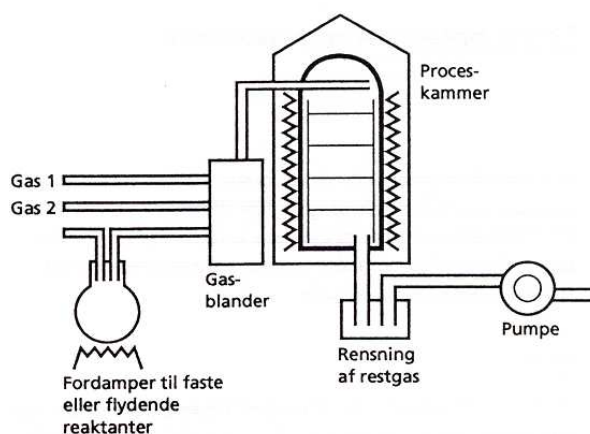
1.5.3 Chemical Vapour Deposition (CVD)

CVD er en decideret belægningsproces. Forkortelsen, som også anvendes på dansk, dækker over det engelske udtryk *Chemical Vapour Deposition*. En dansk oversættelse kunne udtrykkes som: *Deponering fra en kemisk aktiv dampfase* [Kilde: *Overfladebehandling, Stål*].

CVD-belægninger dannes ved kemisk reaktion mellem forskellige kemiske forbindelser. Selve deponeringen finder sted, når gasblandingen kommer i kontakt med en opvarmet overflade, hvilket medfører en kemisk reaktion. Reaktionen resulterer i et reaktionsprodukt på fast form, som deponeres på den opvarmede overflade.

Som en variant af den konventionelle CVD-proces, som foregår ved relativt høje temperaturer, kan nævnes PECVD (Plasma Enhanced CVD). PECVD foregår i et plasma og under vakuum (200 Pa), hvilket gør det muligt at køre processen ved relativt lave temperaturer.

Plasmaet dannes ved hjælp af et elektrisk felt, som påføres en reaktor via jævnstrøm og medfører en accelereret strøm af elektroner. Et plasma er en fasetilstand, hvor en større eller mindre del af gassen er ioniseret. Energien, der kræves for, at reaktionerne kan forløbe, kommer fra kollisioner mellem de accelererede elektroner og ioner i plasmaet. I figur 17 ses en principskitse af et PECVD-anlæg af samme type, som der anvendes på Tribologitentret, Teknologisk Institut.



Figur 15: Skematisk oversigt over PECVD hos Tribologitentret i Århus. Ved hjælp af et elektrisk felt dannes plasma af de forbindelser, der ønskes belagt på emnet, typisk forbindelser af Titanium.

Kilde: Teknologisk Institut, Tribologitentret

Resultatet af processen bliver en deponering af det ønskede reaktionsprodukt på emneoverfladen. De overskydende reaktanter og reaktionsprodukter ledes bort med en gasstrøm af f.eks. argon, der også anvendes til at fortynde reaktionsgasserne, så der opnås de ønskede mængdeforhold. Hvis reaktanterne ikke allerede befinder sig på gasform, fordampes de i fordampere, som ses nederst til venstre på figur 17. Metalkilden udgøres som regel af metalhalogenider på væskeform, mens de resterende komponenter oftest er på gasform. De mest anvendte belægnings på Tribologicenteret, Teknologisk Institut er slidstærke titanbaserede belægningstyper, som ses i tabel 16.

Ved CVD-belægning opnås en homogen lagtykkelse, da alle reaktanter er på gasform. Desuden udemærker CVD-processen sig ved ikke at være en sigtelinieproces, hvilket gør det muligt at belægge emnerne fra alle sider og ikke kun på flader, som kan ses direkte fra en strålingskilde. Huller med en dybde på op til 10–50 gange diameteren kan belægges på indersiden [Kilde: *Overfladebehandling, Stål*].

Det er i princippet muligt at belægge med alle materialer, metaller såvel som kemiske forbindelser. Også emnet kan være af et hvilket som helst materiale, når blot det kan modstå processtemperaturen og tilstedeværelsen af reaktionsreaktanter. De slidbeskyttende belægnings, som udføres på Tribologicenteret, Teknologisk Institut har en tykkelse på 3–15 µm med en hårdhed på op til 4000 HV. I tabel 16 ses hårdheden på forskellige slidbelægnings. På grund af den forholdsvis høje hårdhed, der er fremherskende ved de titanbaserede belægnings, anvendes de oftest til sliddele.

Belægning	Typisk lagtykkelse / [µm]	Hårdhed / [HV]
TiN	3-5	2400
TiC	3-5	2800 – 4000
TiCN	3-5	2500 – 3000

Tabel 10: Oversigt over PECVD belægnings hos Tribologicentret i Århus, samt karakteristika for opnåelig lagtykkelse og hårdhed.

Kilde: Teknologisk Institut, Tribologicentret

1.5.4 Physical Vapour Deposition (PVD)

På linie med CVD er PVD betegnelsen for en tør belægningsproces. PVD er en engelsk forkortelse for *Physical Vapour Deposition*, men forkortelsen anvendes også på dansk. Forkortelsen er en fællesbetegnelse for en række belægningsprocesser, som bygger på en fysisk fordampning og efterfølgende deponering af en metalkomponent. PVD-processer kan opdeles efter tre forskellige hovedprincipper.

Vakuumsfordampning

Fordampning i vakuum er den simpleste af PVD-processerne. Ved denne metode opvarmes belægningsmaterialet, til det fordampes. Opvarmningen kan ske ved elektrisk opvarmning eller ved hjælp af en elektronstråle. Da der er langt mellem gasmolekylerne i højvakuum, er der stor sandsynlighed for, at belægningsmaterialet vil bevæge sig direkte til emnet og kondensere på overfladen uden at støde sammen med andre molekyler.

Under disse trykforhold er den frie middelstrækning mellem 1–100 m [Kilde: *Overfladebehandling, Ståå*]. Dette betyder, at en partikel i gennemsnit kan bevæge sig over denne strækning uden at støde ind i en anden partikel. På baggrund heraf betegnes processen som værende en sigtelinieproces, hvor der kun kommer belægning på de områder, der kan ses direkte fra kilden.

Med henblik på at gøre belægningen mere homogen og sprede belægningsområdet, kan kammeret tilføres en inaktiv gas, f.eks. argon ved meget lavt tryk. Herved vil nogle partikler af belægningsmaterialet støde sammen med argonatomerne og ændre retning, hvilket medfører en spredning af belægningen. Dette har dog omkostninger i form af, at partiklerne har mindre energi, når de rammer overfladen.

Som supplement til den inaktive gas kan der benyttes en reaktiv gas, som oftest er kvælstof, hvilket giver mulighed for dannelse af forskellige nitrider. På denne måde kan der ved kemisk reaktion dannes keramiske belægninger, som er hårdere end udgangsmaterialet alene. Eksempelvis kan metallisk titan fordampes i en atmosfære af kvælstof og argon, hvorved der opnås deponering af et hårdt titannitridlag.

PVD-belægning efter vakuumfordampningsteknikken har visse begrænsninger primært i kraft af den fysiske udformning af procesanlægget. Da metallet opvarmes, først til væskeform og siden til gasform, er emnet, der ønskes belagt tvunget til at befinde sig over metalkilden, som igen er tvunget til at være placeret i vandret position. Dette sætter sine begrænsninger ved mere kringlede geometrier.

Arc-fordampning

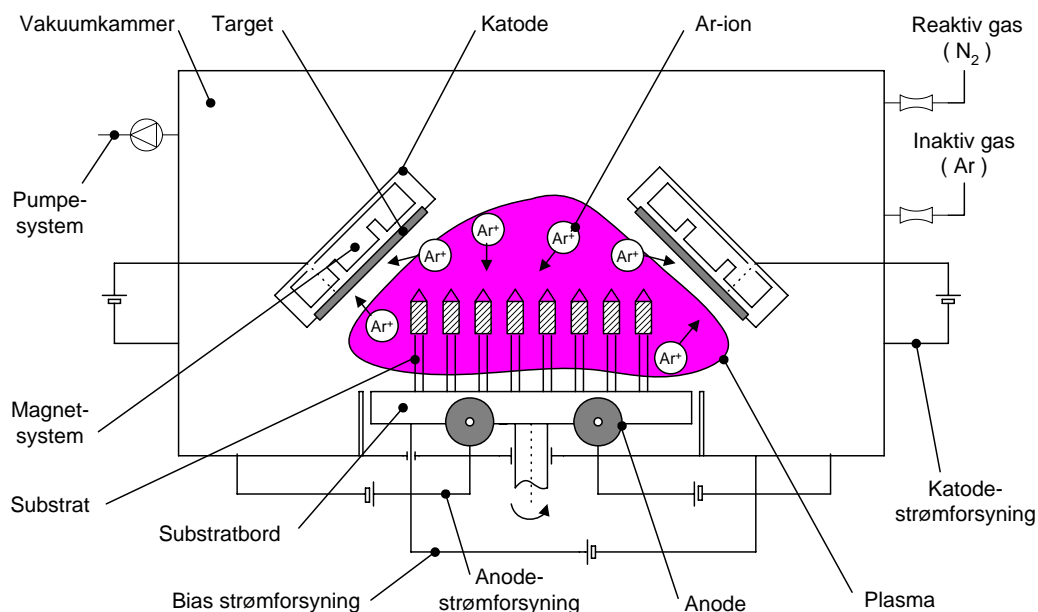
Arc-fordampning minder i princippet meget om vakuumfordampning, men med færre begrænsninger til placeringen af metalkilden. Ved arc-fordampning sker fordampningen ved, at små gnister springer rundt på metalkilden, også kaldet targetmaterialet.

Dette medfører en relativ stor dannelse af ioniseret belægningsmateriale. Den øjeblikkelige fordampning, som er resultatet af kontakten mellem gnisten og targetet, medfører, at der ikke dannes noget targetmateriale i smeltet form. Derfor kan strålingskilderne placeres mere frit end ved vakuumfordampning, og muligheden for en mere homogen belægning vokser. På minussiden skal det bemærkes, at der kan opstå sprøjt fra metalkilden, så ruheden af den færdige belægning kan være højere end ved de øvrige processer.

Sputtering

Denne metode adskiller sig fra de to øvrige PVD-metoder ved ikke direkte at være en fordampningsproces, men rettere en forstøvningsproces. Ved sputtering udnyttes det, at atomer og elektroner med høj energi ved kollision med en fast overflade vil løsrive atomer eller molekyler fra overfladen som resultat af impulsoverførsel. På denne måde dannes atomer eller molekyler "støv" af det faste stof, som skal bruges til belægning. Til beskyddning af overfladen anvendes ioner af ædelgasser, primært argon, da de ikke reagerer med den beskyttede overflade eller løsrevne partikler.

Der findes en variant af sputtering-teknikken, hvor det elektriske felt er suppleret med et magnetfelt med henblik på at forøge partiklernes frie middelstrækning. Denne teknik benævnes magnetron sputtering og er af samme type, som anvendes i Tribologicenterets anlæg. I figur 18 ses en principskitse af magnetron sputtering-anlægget, som er installeret på Tribologicenteret.



Figur 16: Skematisk oversigt over PVD-udstyret hos Tribologiceretret i Århus. Den ønskede belægning fordampes og deponeres herefter på emnet.

Kilde: Teknologisk Institut, Tribologiceretret

PVD-processen kan betegnes som værende en sigtelinieproces. Herved forstås, at de partikler, der fordampes, bevæger sig i rette linier fra fordampningskilden. Dette betyder, at der ikke opnås belægning rundt om hjørner, medmindre emnet bevæges. Derfor er der i processen anbragt et substratbord, som er en roterende emneholder, der sikrer, at emnerne opnår en homogen lagtykkelse.

På figuren ses desuden, at der kan tilføres en reaktiv gas som supplement til arbejdsgassen, hvilket i de fleste tilfælde gøres i form af kvælstof, ilt eller kulstofholdige gasser. Dette kaldes reaktiv magnetron sputtering. Fordampningskilden er i de fleste tilfælde titan, krom, aluminium eller grafit, som kombineret med de reaktive gasser giver mulighed for forskellige belægningskompositioner.

Da processen er en sigtelinieproces, sættes der krav til emnernes geometri og dimensioner. Dette betyder, at partiklerne fra fordampningskilden helst skal ramme substratoverfladen i en vinkel mellem 45° og 90° , og det betyder ydermere, at det ikke er muligt at belægge længere ned i huller dybere end ca. lysningsdiameteren.

Belægningen udføres batchvis, hvilket betyder, at prisen afhænger af emnets størrelse og mulighed for fiksering i proceskammeret. Overordnet kan det siges, at små emner tillader større stykantal pr. batch og dermed en lavere stykpris, mens det modsatte er tilfældet for store emner. Grænsen for hvor store emner der kan belægges, afhænger af maksimumdimensionen for belægningszonen i kammeret. På Tribologiceretrets udstyr kan emner op til $\varnothing 400$ mm og maksimalt 500 mm i højden belægges.

1.5.5 Sol-gel-belægninger

Overfladebehandlingen, som bygger på sol-gel-teknologien, må betragtes som en laktype. Den kan være opbygget som 1-komponent eller fler-komponent system. Hærdeprocessen foregår ved stuetemperatur eller ved at varme op til ca. 200°C eller alternativt med UV-lys eller IR stråling. Lakken kan påføres med traditionelle metoder kendt fra lakeringsindustrien, det vil sige: sprøjtning, rulning, neddykning mm.



Figur 17: Skematisk oversigt over Sol-gel-teknologien. Sol-gel-teknologien bygger på nanoteknologien, hvor de korrosionsbeskyttende eller hærdende materialer findes i lakken som nanopartikler, der danner et netværk på overfladen ved hærningen,

Kilde: Center for Materialeprøvning, Teknologisk Institut, Tribologicentret

Sol-gel-processen består af to syntesetrin, hvor der først dannes en kolloid væske, som indeholder partikler i størrelsen 5-15 nm, ved specielle teknologier op til 50 nm. Denne blanding kaldes en sol. Dernæst krydsbindes indholdsstofferne under fjernelse/fordampning af opløsningsmidlet, og der dannes et tredimensionalt netværket, også betegnet en gel. Syntesetrinnene, der efterfølges, kan påføres substratoverfladen i en direkte proces, hvor der dannes meget tynde belægninger med en lagtykkelse på 10 til ca. 500 nm. Som vist i figur 20 omdannes metalalkoxid-væsken til en sol via en kombineret hydrolyse- og polymerisationsproces.

Denne sol indeholder de omtalte nanopartikler i kolloidial form. Solen kan blandes og kombineres med andre soler eller kemiske reagenser og påføres herefter substratoverfladen, hvor geleringsprocessen indledes. Sol-gel-teknologien tillader syntetisering af meget forskellige produkter, såsom tynde funktionelle belægninger, keramiske porøse strukturer samt keramiske fiber.

Sol-gel-belægningen beskytter overfladen med en 1-10 μm tynd, typisk transparent film, der består af et kovalent bundet netværk af uorganiske og organiske forbindelser i en såkaldt hybridstruktur. Ofte anvendes silica-baserede belægningssystemer, som medfører hårdheder op til ca. 1000 HV. Dermed opnås fordelagtige slidegenskaber. Sol-gel-belægningen har desuden den fordel, at de har en udglattende effekt på ru overflader. Ydermere er det muligt at designe de kemiske egenskaber på belægningens overflade, så der kan opnås afvisende egenskaber og dermed mulighed for at reducere kalkaflejring og biofouling. Dette er egenskaber, som også kan opnås ved visse belægningstyper fremstillet ved PVD-processen. Der er i et andet Elfor-projekt (Elbesparelser ved kalk-, fouling- og friktionsnedsættende materialer, projektnr.: 334-8) opnået meget lovende resultater vedrørende reduktion af kalkaflejring ved brug af PVD- og sol-gel-overflader.

2 Formidlingsoversigt

Der har løbende været offentliggjort resultater og fremtidsperspektiver igennem hele projekforløbet. I de følgende afsnit er alle disse formidlinger medtaget.

2.1 Offentliggjorte artikler

Der er offentliggjort artikler og foredrag i følgende medier:

2.1.1 DDV oktober 2004

Stort potentiale i coating

Af Peter Jürgensen

Pumpeproducenten DESMI i Nørresundby har gennem en årrække haft stor fokus på coating. Processen består i, at man påfører et lag coatingsmateriale på indersiden af pumpen, således at man opnår en forbedret virkningsgrad og slidstyrke.

"Materialerne er gennem årene gradvis blevet langt bedre, og med f.eks. kompositmaterialer kan der opnås stor slidstyrke og øget holdbarhed", fortæller divisionschef, civilingeniør Mads R. Sørensen. Komposit er kun ét af mange mulige materialer, som kan anvendes i forbindelse med coating. "Komposit" er ikke noget entydigt materiale, men dækker blot over, at belægningen består af flere elementer, som til sammen øger - i dette tilfælde en pumpe - holdbarhed samt medfører en forbedring af pumpens virkningsgrad. De forskellige materialer, som komposit består af, sørger for at binde hinanden sammen, så de passer til det relevante behov. Udover at komposit be-



Flere konkrete projekter udført af pumpeproducenten DESMI viser, at coating kan forbedre pumpepumpers virkningsgrad. Hidtil er der opnået resultater på op til syv procent.

grænser korrosion og øger slidstyrken, bidrager dets glatte overflade også til, at pumpen får en højere virkningsgrad.

Coating er i øvrigt mest effektivt i forbindelse med store pumper, som har flere driftstimer, og det er derfor disse, som altovervejende

bliver coated. Dette skyldes at den samlede energibesparelse er størst under disse forhold og en kort tilbagebetalingstid på investeringen kan opnås. De senere år har DESMI også med stor succes coated ældre pumper, som dermed får forlænget deres levetid.

Det primære formål med overfladebehandling er i øvrigt altid at forlænge pumpens levetid samt øge eller fastholde virkningsgraden. En høj virkningsgrad bidrager til at mindske det samlede energiforbrug, og energibesparelser er som bekendt et aktuelt fokusområde for både den private og den offentlige industri.

Udviklingsarbejde fortsætter

"Hvorvidt der er god økonomi i at coate en pumpe med f.eks. kompositmaterialer, afhænger helt af, hvor meget pumpen bruges. Der er således altid tale om en individuel vurdering. Men under alle omstændigheder er der et meget stort potentiale i coating, og i fremtiden vil vi derfor fortsætte vores udviklingsarbejde på dette område. Således har vi nedsat en arbejdsgruppe, som skal arbejde med coating. Vi har gennemført flere konkrete projekter, hvor vi har opnået en forbedring af virkningsgraden på fem til syv procent - dels på nye, dels på gamle pumper", siger Mads R. Sørensen.

Grundfos tilbyder kompositbelægning på nye pumper



Når overfladebehandling med korrosionsbestandige materialer nu er ved at vinde indpas i visse dele af industrien, skal forklaringen blandt andet søges i, at det efterhånden er blevet dyrt at fremstille en pumpe af ædelmetaller eller andet rustfrit materiale. Komposit har således vist sig at være en billig og effektiv løsning - også selv om den i regelen kun holder i nogle år.

Af Peter Jürgensen

Hos en af verdens største pumpeproducenter, Grundfos, har man gennem den senere tid fulgt de resultater, der er opnået, når det gælder kompositbelægning af pumper. Det meget effektive bindemiddel er oprindeligt bedst kendt som isoleringsmateriale til rumskibe, men har siden begyndelsen af 1990'erne i stigende grad været benyttet i dele af industrien - blandt andet i rør, valser samt til en række maskin-komponenter, der er udsat for stort slid eller korrosion.

"Vi ved, at der man i f.eks. energisektoren har arbejdet med kompositbelægninger, og derfor har vi besluttet at se lidt nærmere på de muligheder, som materialet rummer. Grundfos har ikke selv ønsket at gå ind i et egentligt udviklingsarbejde, men vi har dog udført mindre forsøg med pumper i saltvandsmiljøer, så vi er i stand til at imødekomme kundernes krav", fortæller Senior Key Account Manager, Uwe Pørksen. Grundfos' DK A/S.

"Vores foreløbige konklusion er, at kompositbelægning af pumper er i stand til at reducere korrosion og slid og dermed forlænge pumpens levetid. Den store gevinst vil være, at pumpens

virkningsgrad ikke vil forringes grundet korrosion og slid. Derved forbedres driftsvilkårene, lige som der spares penge."

Tidligere på året deltog Uwe Pørksen i en studietur til Asnæsværket, hvor man de seneste otte år har belagt pumper med komposit. Resultaterne herfra er meget lovende.

"Konkret vil pumpekøberne derfor tilbyde sine kunder, at de kan få deres pumper overfladebehandlet med f.eks. keramiske kompositmaterialer.

Uwe Pørksen mener, at det fortsat er umuligt at sige noget om, hvor stor en fremtidig komposit har som korrosionsbeskyttende materiale, da der forskes løbende i anvendelse af nye materialer til fremstilling af pumper, hvor der stilles høje krav til materialets styrke og levetid. Han er dog ikke i tvivl om, at det er en meget solid form for overfladebehandling. Ikke mindst har kompositbelægning vist sig anvendeligt, når man ønskede at coate gamle pumper, som allerede har været i drift i adskillige år.

"Vores udgangspunkt er dog, at vi kun vil overfladebehandle med komposit, hvis kunden ønsker det til sine nye pumper. Samtidig vil vi formentlig bede nogle af vores underleverandører om at foretage selve belægningen.

Bedst eget til aggressive miljøer

"Så vidt vi kan vurdere, har komposit ingen egentlige negative egenskaber. Derimod har det muligvis nogle begrænsninger, som vi endnu ikke kender. Vi vil derfor foreslå vores kunder, at begrænse brugen af denne belægning til nogle udvalgte applikationer, hvor det er muligt at dokumentere en økonomisk fordel. Det kan f.eks. være fjernvarmepumper, pumper til svømmebade eller havvands-applikationer - med andre ord alle de steder, hvor pumpen befinder sig i aggressive miljøer", siger Uwe Pørksen.

Når komposit tilsyneladende er ved at vinde indpas i visse dele af industrien, skal forklaringen blandt andet søges i, at det efterhånden er blevet dyrt at belægge en pumpe med ædelmetaller eller andet rustfrit materiale.

Et spørgsmål om driftsøkonomi

"Når alt kommer til alt, vil det altid være en afvejning mellem flere hensyn, hvilken type materiale, man bør anvende til belægning af pumper. Både driftsøkonomiske overvejelser og ønsket om effektiv korrosionsbeskyttelse spiller således en rolle. I en tid, hvor virksomheder bliver stadig mere omkostningsbevidste, er det jo Alfa og Omega, om pumpen kan

holde så lang tid som muligt - og i øvrigt bevare en høj virkningsgrad i længst mulig tid. En støbejernpumpe vil således kunne fungere i adskillige år i et fjernvarmeværk eller i en svømmebadsinstallation, men undersøgelser har vist, at pumpens virkningsgrad forringes gennem årene, og omkostningerne til drift af pumpen kan stige væsentligt grundet dens reducerede virkningsgrad. Hvis den samme pumpe derimod blev benyttet til pumpning af saltvand, ville den tæres op i løbet af kort tid.

Kompositbelægger man derimod pumpen til fjernvarmeværket og svømmebade, vil man undgå en forringelse af virkningsgraden, og belægges saltvands-pumpen med komposit, vil den kunne holde i mange år. I sidste instans drejer det sig om at opnå de bedst tænkelige driftsomkostninger og dermed spare penge. Efter nogle år vil det være en god idé at adskille pumpen og eventuelt reparere kompositbelægningen, hvis der er behov for det. Kompositen påføres oftest i to lag med hver sin farve. På den måde er det nemt at se, hvor sliddet er størst, og hvornår det er tid til at belægge igen", siger Uwe Pørksen.



VEDLIGEHOOLD, DRIFT OG ØKONOMI 7/04 1

Renovering af centrifugalpumper

Af John Moritzen,
Jakob Albertsen A/S

Foreløbige resultater i et forskningsprojekt støttet af Elfor, for forskning til udvikling i bedre elanvendelse, støtter tidligere antagelser om at pumper både får en bedre virkningsgrad og bedre ydelse efter en indvendig coating med komposit. Denne artikel omtaler kort forskningsprojektet og beskriver fremgangsmåden ved en coating.

Forskningsprojektet tæller deltagere fra Lokalenergi, Århus, Teknologisk Institut Tåstrup, Chesterton / Mastertech, E2 Asnæsværket, Desmi Pumper og Jakob Albertsen A/S. Projektet ledes af Lokalenergi og det forventes afsluttet omkring sommerferien 2005.

De foreløbige resultater af projektet viser at en stor del af energiomsætningen i pumper går til hydrauliske tab, som følge af medieflowet igennem pumpen, samt til impeller friktionstab, som skyldes at løbehjulet cirkulerer i pumpehuset og dermed skaber en friktion mellem løbehjul og pumpelemme og mellem pumpelemme og pumpehus. Hertil kommer tab igennem de indre tætninger i pumpen. Dette er beskedent ved godt vedligeholdte pumper, men det kan

antage store værdier, op til 30%, hvis der er tale om stærkt slidte tætningsringe.

Projektet viser at der i pumper kan forventes tab i størrelsesordenen 15% til 35%. Dette gælder nyere pumper. Ældre, korroderede og slidte pumper har højere tab, som følge af større friktion i pumpen. En metode til at forbedre virkningsgraden og ydelsen på pumper og samtidig fastholde den er således en coating med kompositmaterialer. En sådan coating med en særlig høj vedhæftningsgrad vil dels skabe en helt glat overflade, glatte end for den helt nye pumpe, men den vil ydermere kunne fastholde denne overflade, på grund af kompositens stærke egenskaber.

For at pumpen kan coates med komposit er det nødvendigt at demontere pumpehuset, og transportere den til det serviceværksted, som skal foretage coatingen.

Efter nedtagning af pumpen, placeres pumpen typisk på en alm. palle, hvor den fastsures for transporten til serviceværkstedet. Er pumpen så stor at den ikke kan være på en alm. palle, må der enten anvendes specielle paller eller en anden form for en transport, eksempelvis transport med en kranbil. I enkelte tilfælde er pumpen så stor at det er nødvendigt at foretage forarbejde og coating på stedet.

Når pumpen ankommer til serviceværkstedet rengøres den. Hvis pumpen har kørt med saltvand eller anden væske med klorider / syre, er det nødvendigt at foretage en kloridtest (Bresle-Sampler kloridtest) og en (SCAT test for jernsulfat og pH-værdi). Er testene positive er det nødvendigt at rense overfladerne af metallet, da de ellers vil skade vedhæftningen af coatingen til overfladen. Forureningen kan fjernes enten ved en damprensning, en opbevaring i blødgjort vand eller ved en opvarmning til 400°C i en ovn i nogle timer.

Renhed og ruhed er nødvendig for at opnå optimal vedhæftning af kompositten. Forureningerne fjernes normalt ved en sandblæsning. Det sker typisk i kabiner med frisstråledyser drevet vha. trykluft. Blæsemidlet er normalt stålsand eller stålgrit, men der kan også anvendes aluminiumoxid (kurund).

Der foretages afdækning af skruehuller og pumpelemme, som ikke må sandblæses, eksempelvis indre tætninger. Der blæses til ønsket renhed, normalt Sa2,5 - 3. En blæsning til renhed Sa 2,5 -3 giver normalt en passende normal ruhed på R-max ca. 75 -125 my. Renhed og ruhed er essentiel for at en efterfølgende coating får den ønskede levetid. En svensk undersøgelse har vist at levetiden for en coating kan reduceres til få år, hvis der ikke er tilstrækkelig forbehandling før en coating.

Efter endt rengøring skal coatingen med komposit foretages hurtigst muligt og for den rå og ubeskyttede

metal overflade begynder at anløbe. Coatingen foregår normalt i et opvarmet værksted, hvor pumpehus og løbehjul kan tempereres til en passende høj temperatur, der giver kompositmaterialet en passende viskositet. Der foretages nødvendigvis afdækning af skruehuller, tætningsringe og andre dele, som er ikke skal belægges med komposit.

Kompositmaterialet er kemisk hærdende og består af en base og en hærdet, som blandes meget omhyggeligt sammen før påføring. Når hærdningen først er iblandet basen, er der kun ca. 15 min. til at arbejde, før materialet er så trægt at de ikke er til at påføre (pot-life). Derfor blandes materialet i små portioner, som det tager under 15 min. at påføre.

Normalt påføres kompositmaterialet med pensel. Det skyldes dels at en pensel giver optimal befugtning af overfladen ved første lag, dels at en pensel kan komme ind i alle hulrum i et pumpehus og løbehjul. Der påføres



Sandblæst stål overfalde til renhed Sa 2,5 - 3. Alle urenheder er fjernet og overfladen er fri for skygger. Overfladeruhedsprofil (R-max) skal være 75 til 125 my.

Kilde: Jakob Albertsen a/s



Pumpe og løbehjul ankommer på palle til serviceværksted for coating. I dette tilfælde en fjernvarmepumpe

Kilde: Mastertech/Chesterton

Forureninger der skal fjernes for belægning	
emne	resultat
salte / syre	klorider, osmosisk effekt
olie	
fedt	
støv	manglende vedhæftning
rust	
gammel belægning	
glodeskal	galvanisk korrosion

Tabel 1: Forureninger der skal fjernes for coating, normalt med sandblæsning, klorider fjernes ved speciel rensning eller opvarmning. Kilde: Korrosion, Force-Instituttet, 2004

normalt flere lag komposit. I pumper udsat for alm. slid normalt kun 2 lag på hver ca. 200 til 250 my, således at den samlede lagtykkelse bliver ca. 400 til 500 my.

Det er almindeligt at der anvendes komposit af forskellige farver til de to lag. Dels for at kunne se hvor langt man når under påføringen af andet lag, dels for at kunne følge et evt. slid af kompositten ved en senere inspektion af pumpen. Imellem hvert lag hærder kompositten op i ca. 30 min, før det næste lag påføres. Det er imidlertid vigtigt at det næste lag påføres inden hærden er tilendebragt, da vedhæftningen mellem lagene ellers ikke bliver optimal.

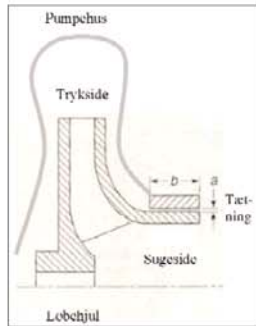


Illustration af tætningsringens placering i en pumpe. a er spaltens bredde og b er spaltens længde. Hvis målet a bliver for stort, vil der flyde pumpemedie igennem spalten fra pumpens trykside til pumpens sugeside, alt afhængig af trykforskellen. Kilde: Egen tilvirkning ud fra figur i Centrifugal pump, Users Guidebook, Sam Yedidiah, 1996



Pumpehus og løbe-hjul til en fjernvarmepumpe. Her ses de efter den færdige coating med komposit i 400 til 500 µm lag-tykkelse. Indre slidringe og pakke-flader må ikke coates af hensyn til pasningerne her. Bemærk kompositens meget glatte overflade, som i forhold til pumpens og løbehjulets oprindelige sandstøbte overflade reducerer friktion og pågroning betydeligt. Kilde: Mastertech/Chesterton



Efter endt påføring af det sidste lag komposit hæves temperaturen omkring pumpen til ca. 40°C, hvorved hærden af kompositten fremskyndes, ligesom kompositten flyder bedre sammen. Efter endt hærden fjernes alle afdækninger og øvrige reparationer foretages, eksempelvis afbalanceering af løbehjul.

Udover den traditionelle coating kan der desuden foretages forbedringer i pumpen vedr. de indre tætningsringe og akseltætninger. Den indre tætning har til formål at hindre vandgennemstrømning fra pumpens trykside til pumpens sugeside, netop på det sted hvor løbehjulet er tættest på pumpehuset. Selve tætningen består af 2 ringe som kører tæt på hinanden og dermed kun efterlader en smal spalte imellem sig. En normal og intakt tætning har en spalte på 0,2 – 0,3 mm.

Hvis ikke tætnings ringene er intakte vil det betyde at der løber vand forbi tætningen tilbage til sugesiden,

med det resultat at der netto ikke er leveret vandmængde ud af pumpen. Det er derfor vigtigt at renovere tætningen, såfremt den er slidt. Med en meget slidt tætningsring kan der tabes op til 30 % af flowet igennem pumper og dermed 30 % energiforbrug. Normale tab igennem ikke slidte tætningsringe udgør sjældent mere end 2-4 %.

En renovering af en slidt tætningsring består normalt i at de slidte ringe demonteres og nye isættes. Ringene

kan være fastgjort med skruer, men de kan også være presset/slået i. Enkelte tætningsringe kan ikke skiftes, idet de er opbygget sammen med pumpen. I sådanne tilfælde er det nødvendigt at opbygge det slidte materiale med komposit og herefter med diamantstål bearbejde kompositten tilbage på mål, ved at løbehjul og pumpehuset monteres i en stor drejebænk. Denne sidste operation er bekostelig i forhold til blot at udskifte en tætningsring i messing.

Efter endt coating og evt. reparationer af indre tætningsringe, foretages den sidste finish på pumpen, hvorefter den pakkes og gøres klar til forsendelse tilbage til kunden. Den samlede operation foretages normalt på 5 arbejdsdage, men i enkelte tilfælde er det nødvendigt at haste operationen hurtigere igennem, eksempelvis i de tilfælde hvor kunden ikke har en reservepumpe og således står uden sikkerhed i tilfælde af havari.

Resultater fra projektet har påvist at der kan spares op til 20% i energi ved at coate pumper indvendig med kompositmaterialer. En pumpe der optager 20 kW og kører 4.000 timer pr. år, vil således kunne spare op til 10.000 kr. pr. år i el-omkostninger. Hertil kommer mindre vedligeholdelse. En indvendig coating af en 20 kW pumpe vil typisk hos Jakob Albertsen a/s beløbe sig til 10-15.000 kr.

Det er ved test og simuleringer blevet påvist at det ikke er nødvendigt at coate hele pumpens indre for at opnå energibesparelser. De vigtigste områder er ydersiden af løbehjulet og indersiden af huset, der hvor løbehjulet cirkulerer. Hvis det således er vanskeligt at komme til at coate, bør disse områder prioriteres højest.

Energiomsætning i pumper

Nye forskningsresultater omkring energiomsætningen i pumper har bevist, at en coating af indersiden af centrifugalpumper vil gavne virkningsgraden og reducere de løbende vedligeholdelsesomkostninger

Af John Moritzen

I et igangværende projekt støttet af Elfor - gennem midler til forskning og udvikling i effektiv el-anvendelse - er der nu kommet de første nye resultater omkring energiomsætning i pumper samt metoder til at opnå bedre virkningsgrad og reducere vedligeholdelsesomkostninger. Forskningsprojektet tæller deltagere fra Lokalenergi, Teknologisk Institut Tåstrup og Århus, Chesterton/Mastertech, E2 Asnæsværket, Desmi Pumper og Jakob Albertsen A/S. Sidstnævnte virksomhed beskriver i følgende artikel projektets formål og resultater. Projektet ledes af Lokalenergi og forventes afsluttet i løbet af sommeren 2005.

Formål

Projektets formål er at undersøge tabene i pumper samt at påvise, i hvilket omfang en coating af indersiden af centrifugalpumper med kompositmateriale vil kunne gavne virkningsgraden og reducere de løbende vedligeholdelsesomkostninger til pumpedriften. Projektet er understøttet af felttest og laboratoriemålinger. Pumperne undergår her detaljerede tekniske undersøgelser før og efter en indvendig coating med kompositmaterialer, for på den måde at kunne eftervise og determinere en effektiviserings- og vedligeholdelsesmæssig gevinst.

Forskningsprojektet har først og fremmest undersøgt energiomsætningen i pumper. Her har der dels været brugbare resultater fra amerikansk litteratur samt reelle forskningsresultater fra Universitetet i Darmstadt i Tyskland. I Darmstadt har man i en årrække forsket i energiomsætning i pumper og blandt andet deltaget i flere forskningsprojekter i EU sammenhæng.

Energiomsætning

Forskerne i Tyskland har ved hjælp af en teststand og simuleringmodeller været i stand til de-

taljeret at beskrive energiomsætningen i pumper afhængig af deres specifikke hastighed. Specifik hastighed bruges til at beskrive pumpens design. Lav specifik hastighed er meget radiale pumper med lavt flow og højt tryk. Høj specifik hastighed er aksiale pumper med højt flow og lavt tryk. En pumpe's specifikke hastighed er givet ved følgende udtryk:

$$N_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}}$$

Hvor:

N_s = pumpe's specifikke hastighed.

n = pumpe's omløbstal i o/min.

Q = pumpe's ydelse i m³/h ved bedste virkningsgrad.

H = pumpe's differenstrøg i meter vandsøjle ved bedste virkningsgrad.

En pumpe's tab

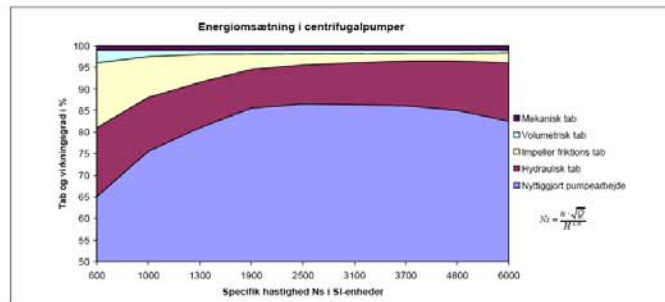
Resultatet af undersøgelser i Darmstadt viser, at en stor del af energiomsætningen i pumper går til hydrauliske tab, som følge af medieflowet igennem pumpen samt til impeller-friktionstab. Impeller-friktionstab skyldes alene det faktum, at løbehjulet cirkulerer i pumpehuset og dermed skaber en friktion mellem løbehjul og pumpelem og mellem pumpelem og pumpehus. Impeller-friktionstab er størst

ved meget radiale pumper, dvs. pumper der giver meget højt tryk. Det hydrauliske tab er derimod højt uanset pumpe-design, dog med en stigende tendens ved de mere aksiale pumpetyper.

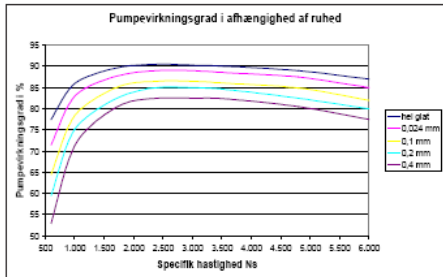
Resultater fra universitetet i Darmstadt har påvist, at der kan spares op til 20 procent i energi ved at coate pumper indvendig med kompositmaterialer. En pumpe der optager 20 kW og kører 4.000 timer pr. år, vil således kunne spare op til 10.000 kroner pr. år i el-omkostninger. Hertil kommer mindre vedligeholdelse. En indvendig coating af en 20 kW pumpe vil typisk hos Jakob Albertsen a/s beløbe sig til 10-15.000 kroner.

De volumetriske tab beskriver tabene igennem de indre tætninger i pumpen, typisk tætningsringe. Dette er beskedent ved godt vedligeholdte pumper, men det kan antage store værdier op til 30 procent, hvis der er tale om stærkt slidte tætninger i specielt radiale pumper med stor trykforskel mellem pumpe's trykside og sugeside. De mekaniske tab beskriver tab i lejer og ydre tætninger. Disse tab er også beskedne for godt vedligeholdte pumper.

Der kan således i pumper forventes tab i størrelsesordenen 15 til 35 procent afhængig af den specifik-



Tab i pumper i afhængighed af specifik hastighed.



ke hastighed. Dette gælder nyere pumper. Ældre, korroderede og slidte pumper har højere tab, som følge af større friktion i pumpen. Forskerne i Darmstadt har yderligere ved test og simuleringer påvist, at overfladeruheid fører til yderligere tab i pumpen. Disse opdagelser er gjort ved at belægge indersiden af pumper med pålimede sandkorn med stigende diameter i henhold til Ks-standarden for ruheidsbetegnelse, og så efterfølgende at teste pumperne i en teststand.

Forskerne anfører, at nye sandstøbte pumper har en ruheid svarende til 0,024 mm. Korroderede pumper har stigende overfladeru-

heid. Helt glat svarer til en poleret eller coatet overflade.

Forbedring via coating

En metode til at forbedre virkningsgraden på pumper og samtidig fastholde den, er således en coating med kompositmaterialer. En sådan coating med en særlig høj vedhæftningsgrad vil dels skabe en helt glat overflade, glattere end for den helt nye pumpe, men den vil ydermere kunne fastholde denne overflade på grund af kompositens stærke egenskaber. Den sidste del af det Elfor støttede forskningsprojekt går derfor ud på at undersøge den opnåelige gevinst ved at coate hele indersiden eller dele af indersiden på pumper.

Overfladeruheids indflydelse på pumpevirkningsgraden. Resultatet bygger på test i pumpestand efter pålimning af sandkorn efter Nikuradse ruheidsdefinition. De farvede virkningsgradforløb refererer til diameteren på de pålimede sandkorn. Beregning af tab i afhængighed af specifik hastighed er dels testet, dels simuleret.

Dels for at eftervise resultatet i praksis i efterfølgende laboratoriemålinger på Teknologisk Institut i Tåstrup og dels for at understøtte laboratorieresultaterne med praktiske målinger i felten.

De udvalgte pumper i projektet er nu ved at blive coatet med komposit og der er foretaget feltmålinger og laboratorietest før coating. I løbet af den kommende tid, vil der komme resultater efter en coating med kompositmaterialer samt resultater fra feltmålingerne. Disse resultater samt resultater omkring levetiden for komposit coatingen samt den positive effekt på vedligeholdelsesomkostningerne, vil blive dokumenteret i en rapport, som forventeligt vil foreligge omkring sommeren 2005. ■

Det er ved test og simuleringer blevet påvist, at det ikke er nødvendigt at coate hele pumpens indre for at opnå energibesparelser. De vigtigste områder er ydersiden af løbehjulet og indersiden af huset, der hvor løbehjulet cirkulerer. Hvis det således er vanskeligt at komme til at coate, bør disse områder prioriteres højest.


INTERNATIONAL

Er olien for varm?
Har du set vores hydraulik-og gearoliekølere?
Ellers har du nu muligheden for at prøve en Hydac industrikøler gratis.

Vi kommer til dig, monterer køleren og tester systemet.

Er du tilfreds med resultatet, betaler du kun for køleren. Hvis ikke, tager vi den med retur. Du betaler hverken for kørsel eller montering.

**Ingen risiko
Kun muligheder**

Ring direkte til vores serviceafdeling Henrik Lakman på tlf.: 702 702 29 og aftal et tidspunkt, der passer dig.

Hydac A/S
Tlf: 702 702 99
www.hydac.dk

Prøv en
Hydac køler

GRATIS





Coating af pumper

Et netop afsluttet projekt har dokumenteret, at coatingteknologien har en positiv effekt på virkningsgraden på et stort udsnit af pumper anvendt i Danmark

Coatingteknologien, som med rette har nydt stor opmærksomhed de seneste år og som i korte træk består i at smøre/male kompositmateriale på udsatte overflader, har i mange år været brugt på kraftværker i bestræbelserne på at levetidsforlænge anlæggene. I det senere år er der desuden kommet fokus på de glattere - og mere robuste - overfladers positive indflydelse på energieffektiviteten. Og her kommer pumperne ind i billedet.

Et FoU-projekt støttet med ELFORs PSO midler er nu ved at nå sin afslutning. En projektgruppe bestående af Lokaleenergi (projektleder), Mastertech, Jacob Albertsen, DESMI og Teknologisk Institut har gennem de seneste år gået bag om coatingteknologien. Projektet har som sagt valgt at fokusere indsatsen omkring pumperne. Dels fordi der er en betydelig elanvendelse i Danmark til dette område - ca. 7 procent - og dels for at bygge videre på et tidligere FoU-projekt afsluttet i 2002 af Teknologisk Institut.

Lokal Energi og Teknologisk Institut præsenterer i denne artikel resultaterne af projektet.

Undersøgelsens pumper

I et tidligere projekt blev der dokumenteret besparelser på to større pumper henholdsvis

45 kW og 55 kW. I denne undersøgelse har det været et ønske at undersøge andre dele af markedet. Derfor har man suppleret de tidligere undersøgelser med følgende installationer:

- Roskilde Sygehus (Smedegaard - 0,2 kW).
- Skagen Varmeværk (DESMI - 7,5 kW).
- Holstebro Badeland (Grundfos - 11 kW).
- Hjørring Varmeforsyning (DESMI - 65 kW).
- Holstebro Varmeforsyning (DESMI - 9 kW).
- Ny1 - projekt (DESMI - 2 kW).
- Ny2 - projekt (DESMI - 2 kW).

Pumperne adskiller sig fra de tidligere valgte ved, at de generelt er meget mindre, samt at specielt pumper anvendt i varmforsyning er dækket godt ind.

Disse er ikke valgt, fordi varmforsyning er et specielt belastet pumpermiljø, men fordi de står for en betydelig elanvendelse og branchen derfor forventes at kunne være et godt sted at starte for at få løftet teknologien fra kraftværkerne ud til et bredere snit af elforbrugere.

Projektet er tidligere beskrevet i Teknisk Nyt nr. 7-2005.

Desuden er det valgt at medtage nogle meget små nye pumper i undersøgelser. Dels for at se, om teknologien også har positiv effekt på små pumper og dels for at se, om en lille ny pumpe kan fastholde den nødvendige performance, når de nødvendige lagtykkelser af komposit påføres pumpehjul og pumpehus.

Overblik over resultaterne

Projektets forsøgsresultater er samlet i *tabel 1*.

Resultaterne supplerer den tidligere undersøgelse med en mere nuanceret vurdering af coatingteknologiens muligheder, idet der jo tidligere kun var kigget på to pumper.

De nye resultater er frembragt dels på Teknologisk Instituts testbænk til pumper dels på test faciliteter hos Grundfos og DESMI.

Resultaterne viser energimæssige forbedringer over hele linien, hvis der ses bort fra den lille kedelpumpe ▶

	Roskilde Sygehus	Skagen Varmeværk	Holstebro Badeland	Hjørring Varmeforsyning	Holstebro Varmeforsyning	Ny1 DESMI projekt	Ny2 DESMI projekt	Dalum Papir	Ejby Rensningsanlæg
Flow [m ³ /h]	12,5	180	200	600	250	35	35	120	450
Δp [mVS]	6	15	12	40	13	18	18	75	15
N [o/min]	2800	1275	1500	1500	1000	2900	2900	2915	1460
Ns	2600	2250	3300	2300	2300	1950	1950	1250	4060
η _{for} [%]	34	77	58	80	70	50	50	48	50
η _{efter} [%]	34	77	69	84	72	56	57	62	52
Δη [%]	0	0	19	5	3	12	14	29	4
Pumpetype	C / TL	C / TL	C / TL	C / TL	C / TL	C / TL	C / TL	C / TL	Hidrost
Str. P ₁ [kW]	0,2	7,5	11	65	9	2	2	55	30
Coat	855 HT	855 HT	S2	855 HT	855 HT	855	S2	855	855
Status	Ny	Ny	Brugt	Brugt	Ny	Ny	Ny	Brugt	Renov.
Belastning	Vand	Vand	Chlor	Vand	Vand	Vand	Vand	Vand	Slam

Tabel 1.

Pumper

pe hos Roskilde Sygehus på 200 W. Tages der udgangspunkt i pumpernes bedste effektivitetspunkt er der målt forbedringer i virkningsgraden på mellem 3 og 29 procent. De mest markante forbedringer er set hos Dalum og Holstebro Badeland. Disse installationer er kendetegnet ved dels en meget høj alder - Dalum pumpen var 15 år gammel - og dels et meget »hårdt« miljø. På Holstebro Badeland tærer klorindholdet eksempelvis hårdt på pumpen.

Interessant og meget overraskende er det at se virkningsgradsforbedringer på henholdsvis 12 og 14 procent for de to nye ens DESMI pumper. Forskellen ligger i, at de er coated med to forskellige materialer. Det ene coatingmateriale S2 har en meget glat overflade, mens 855 er et mere ru, men også mere robust materiale. I *tabellen*, hvor der er angivet et HT, betyder det, at der er anvendt et materiale, som kan klare højere temperaturer.

De angivne arbejds punkter for pumperne (tryk, flow og virkningsgrad) er alle angivet i pumpens bedste effektivitetspunkt. I *tabellen* er angivet en ikke så kendt størrelse - Ns - specifikt omløbstal - for at kunne sammenligne pumpe typer imellem (høj tryk, lav tryk osv.). Som det ses ligger anvendelsen af pumperne meget ofte i området 2000-3000 for det specifikke omløbstal, og i det tidligere projekt (Dalum & Ejby) er der konstateret forbedringsmuligheder på begge sider af dette interval ved anvendelse af coating.

På basis af dette må man konkludere, at coating vil have en gavnlig effekt på energieffektiviteten på en meget stor del af pumpe driften i Danmark - dog er de mindre undtaget, hvilket er omtalt senere i artiklen.

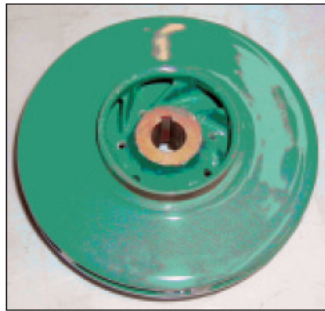
Ny coated pumpe - 2 kW

På *billede 2a* og *2b* ses løbehjulet for den testede pumpe i henholds-

Coatingen foretages med kompositmaterialer. En sådan coating med en særlig høj vedhæftningsgrad vil skabe en helt glat overflade - oftere glattere end for en helt ny pumpe. Den glatte overflade er bevisligt medvirkende til en langt bedre pumpevirkningsgrad.



Billede 2a.



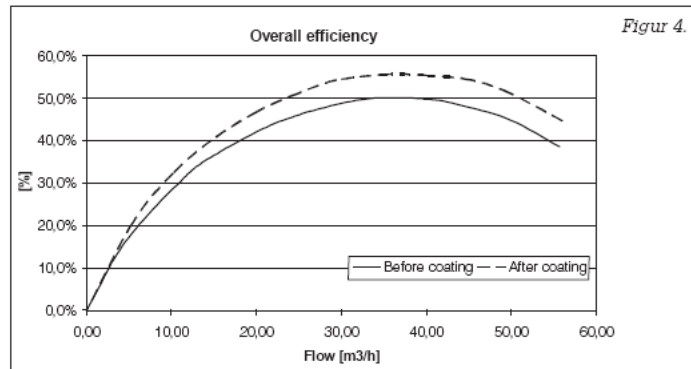
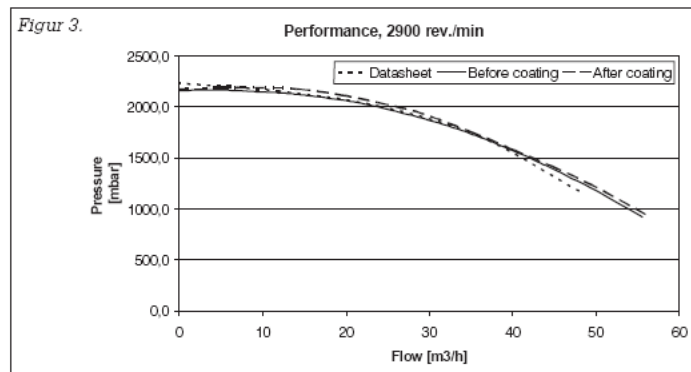
Billede 2b.

vis traditionel stand og coated stand. Man kan faktisk med det blotte øje se, at overfladen er langt mere glat i den coatede form.

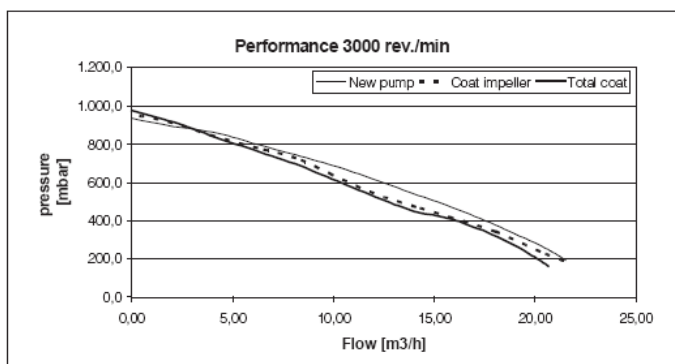
Løbehjulet hører hjemme i en DESMI PVLN 1050.23, som har påmonteret en 3 kW standardmotor - en tørløber (motoren kan udskiftes) som sælges i stort stk. tal til såvel varme applikationer som industrielle applikationer.

Pumpen er testet på Teknologisk Institut, og resultaterne er vist på *figur 3* og *4*. For det første ses, at lagtykkelsen på trods af den lille størrelse - ca. 0,5 mm - ikke påvirker pumpens ydelse nævneværdigt. I *figur 3* er vist den af leverandøren lovede ydelse (datablad), målt ydelse for traditionel pumpe og målt ydelse for coated pumpe. Der er stort set sammenfald mellem disse kurver.

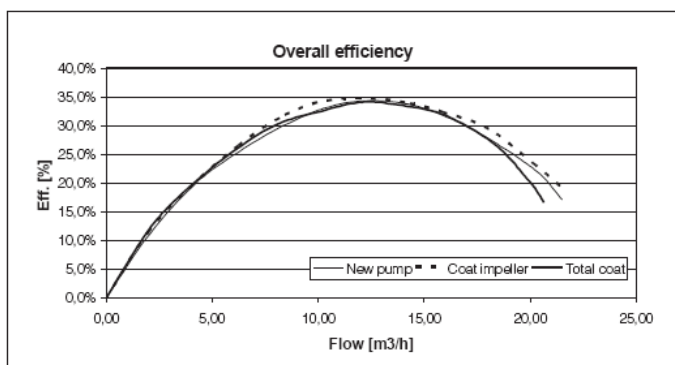
Figur 4 viser den totale virkningsgrad (pumpe og motor) for den traditionelle pumpe og den coatede pumpe. Resultatet viser en markant forbedring over en meget stor del af arbejdsområdet. Pumpeleverandørens katalog viser altid kun pumpevirkningsgrad, hvorfor disse data ikke er sammenlignelige med de målte data.



Pumper



Figur 5.



Figur 6.

Ny coated pumpe - 200 W

På en lille Smedegaard pumpe til et kedelanlæg T4-90-2 er valgt at coate pumpe i trin for dels at analysere den samlede effekt af coatingen dels udviklingen undervejs.

Figur 5 viser, at lagtykkelsen på ca. 0,5 mm trods alt synes at være for stor en belastning for en sådan lille pumpekonstruktion. Efter coating af løberen måles en synlig forringelse af pumpe ydeevne. Dog skal det bemærkes, at de målte ændringer er meget små, og ligger inden for den ydelse pumpele-

verandøren garanterer for pumpe.

På effektivitetskurven - figur 6 - ses ikke nogle forbedringer af virkningsgraden, tværtimod indikerer målinger, at der må forventes en forringelse af virkningsgrad i det høje flowområde. I øvrigt i samme område hvor lagtykkelsen forstyrrer de hydrauliske forhold i pumpe mest for denne lille pumpe.

Den testede pumpe er en meget lille pumpe - en stor villa pumpe - og det er i virkeligheden overraskende, at coatingen ikke gør mere skade på de hydrauliske for-

Levetids økonomi	Coated	Uncoated
Indkøb af pumpe	55000	55000
Vedligehold - tætninger	35000	35000
Vedligehold - pumpehjul	0	35000
Elektricitet (50 øre pr. kWh)	1.350.000	1.575.000
Coating udgift (2 gange)	75000	0
Totale udgifter 15 år	1.515.000	1.700.000

Tabel 7.

hold. Dette bevirker, at teknologien rent faktisk også kan anvendes på disse små pumper som en levetids forlængende foranstaltning. Vedligehold, pumpe skift osv. kan være en relativt stor udgiftspost for en pumpe i denne størrelse.

Levetidsøkonomi

I artiklen er gennemgået dokumentation for, at teknologien har en positiv effekt på virkningsgraden på et meget stort udsnit af pumper anvendt i Danmark.

Teknologien er dog stadigvæk relativt omkostningstung, blandt andet på grund af den meget vigtige overfladeklargøring inden materialet påføres.

Med udgangspunkt i Dalum pumpe er totaløkonomi beregnet over en 15 års periode i tabel 7.

Eksemplet viser, at selv med prisniveauet i dag er coating et godt instrument til at få nedsat udgifter til drift og vedligehold af pumpeanlæg. Set over de 15 år er prisniveauet ca. 90 procent med anvendelse af coating set i forhold til det normale udgiftsniveau. Kunne man prissætte produktionsstop osv. i forbindelse med vedligehold ville det jo gøre regnskabet noget bedre.

Med tiden når coatingprisen går ned i takt med større udbredelse og med stigende energipriser, vil

Næste etape vil blive ventilatorerne. Der er allerede lavet nogle spæde forsøg med positive resultater til følge. Det er projektgruppens plan at anbefale Elfor at støtte en større undersøgelse i 2006, der tager udgangspunkt i ventilatorer anvendt i belastede miljøer.

dette positive billede blive endnu mere udtalt.

Fremtiden

Projektet blev fremlagt på årets EEMODS-konference i Heidelberg i september. Inden jul i år vil den endelige projektrapport blive offentliggjort med testresultater samt teoretiske afsnit, der går bag om belastningen på pumper og forklaring af coatings virkemåde i henhold hertil, der vil endvidere blive udarbejdet en slags 1-2-3 folder om coating. Dertil vil der blive holdt indlæg på diverse konferencer.

2.2 Indlæg afholdt på Eemods 05

Coating of pumps in the perspective of energy efficiency

- About the paper
- Why use coating
- Potential based on research so far
- Life time economics
- What is coating
- Why is it working
- Performance & efficiency for a new pump
- Performance & efficiency for a small pump
- Conclusions & future



2.3 Indlæg afholdt på erfa-seminar 05

F&U - Coating af pumper

- Baggrund
- Hvorfor bruge coating
- Potentiale ud fra projektets resultater
- Levetids-betragtninger
- Hvad er coating og hvorfor virker det
- Coatings indflydelse på ydelse og virkningsgrad
 - Fysisk belastede pumper
 - Nye pumper
 - Små pumper
- Hvad gør energirådgiveren nu ?
- Fremtiden



Vi giver dig råd, så du får tid!