




# Coatings til vindmøllevinger beskytter mod regndråbeerosion

Gentagne sammenstød imellem vindmøllevinger og regndråber, sandpartikler eller insekter kan få vingerne til at erodere og dermed miste effektivitet. Elastiske coatings, der absorberer nedslagsenergien, kan reducere problemet. Men hvordan optimerer man sådanne coatings, når levetiden af dem skal være op til 25 år?

Af Søren Kiil<sup>a</sup>, Kim Dam-Johansen<sup>a</sup> og Pablo L. Bernard Jr.<sup>b</sup>

*a: DTU Kemiteknik, b: Hempel A/S*

Erosion af industrielle materialer ved kontakt med vanddråber er et velkendt fænomen. Allerede for omkring 100 år siden blev der rapporteret om erosion af dampturbineblade som et resultat af sammenstød imellem bladene og vanddråber til stede i den mættede damp. Op igennem 1940'erne observerede flyindustrien skader på især den forreste del af flyene som en direkte følge af vanddråbeerosion.

Vindmøllevinger kan også tage skade af repeterende møder med vanddråber, som det kan ses i figur 1, side 38. Problemet er særlig udtalt, når møllerne er placeret offshore, hvor vanderosionen kan være op til dobbelt så høj som for møller på land. De største møller, der opføres i dag, er på 8 MW, kan have rotordiameter over 160 m og en vingspidshastighed på op mod 100 m/s (360 km/time). I Ingeniøren [2] blev for et par år siden beskrevet, hvordan over 200 vinger på 80 vindmøller i Horns Rev 1 vindmølleparken er blevet repareret godt 10 år efter, de blev opført. Reparationer har også fundet sted ved Rødsand og Middelgrunden. I udlandet er det samme sket bl.a. ved 

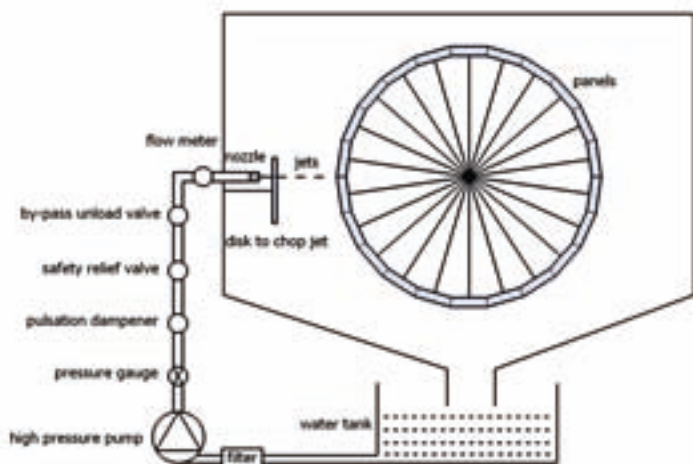


Figur 1. Vindmøllevinge med skade på vingens forkant efter regnerosion. Gengivet fra [1].

Lillgrund i Sverige, Baltic 1 i Tyskland og Barrow i England. Udover udgifter til vedligehold bliver den elektriske effektivitet reduceret, når vingeprofilen eroderes. Eksperimenter i en vindtunnel på DTU har vist, at skader på vingens forkant kan reducere den totale energiproduktion med omkring 5% [2].

## Coatings kan reducere problemet

Der findes flere metoder til at begrænse vanderosion af vindmøllevinger, såsom "tape", som limes på vingernes forkant, eller anvendelse af såkaldte "blade coatings" [3]. Sidstnævnte er elastiske coatings, typisk baseret på polyuretankemi, der kan absorbere kollisionens energi. Det er naturligvis en ekstra omkostning at coate vingen, men især offshore, hvor reparationer er en stor omkostning, kan det være en hensigtsmæssig løsning. Forsigtige skøn i industrien lød for 1-2 år siden på, at omkring halvdelen af alle store (>3 MW) møller fik deres vinger coatet. I dag er tallet formodentlig højere. Men hvordan tester og optimerer man en coating til at holde 20-25 år på en vindmøllevinge, hvor der en stor del af tiden er regndråber eller salt-aerosoler i luften?



Figur 2. Skematisk illustration af vandjet erosionsrig. Malingsprøver placeres på det store hjul, som langsomt roterer (omkring 1 omdrejning/min.). Foran vandjetten er placeret en disk med små huller i, hvorved der dannes dråber, som rammer ind på malingsprøverne. Efter [3].

## Brug af testudstyr

Den foretrukne testmetode til blade coatings er den såkaldte "whirling arm"-metode. Her anvendes et rotorblad, to meter i diameter, hvor coatede stålpaneler boltes fast til det yderste af rotorbladene og derefter roteres i et kraftigt (kunstigt) regnvejr.

En typisk rotorspidshastighed er 150 m/s, og efter tre timer afsluttes forsøget, og malingsprøverne inspiceres for skader. Fysisk set er det en realistisk test, men accelerationsfaktoren fra fuld- til pilotskala er meget høj (25 års eksponering simuleres på tre timer). Da blade coating teknologierne er forholdsvis nye, er der ikke data for fuldskala langtidseksponering endnu. Andre ulemper er, at rotorapparatet, som udgangspunkt, kræver en separat bygning, grundet støj og sikkerhed og uddannet personale til betjening og vedligehold.

## Design af nyt eksperimentelt udstyr

Formålet med indeværende arbejde har været at designe og konstruere nyt eksperimentelt

udstyr til hurtig og økonomisk test af blade coatings. Detaljer kan findes i en ph.d.-afhandling af Shizhong Zhang [3] og to artikler [4,5]. Apparatet skulle være i laboratoriestørrelse, kunne afprøve mange coatingsprøver i samme forsøgsserie, og resultaterne være i overensstemmelse med data fra rotortesten omtalt ovenfor. Det sidste er vigtigt, da rotortesten er blevet en slags standard i malingsindustrien. Målet er eksperimentelt udstyr, som kan benyttes til screeningsforsøg, inden den dyre og afsluttende test og godkendelse foretages i rotorudstyret, typisk hos et eksternt firma.

Efter evaluering af forskellige ideer blev det besluttet at konstruere et apparat, der danner en tynd vandjet, som efterfølgende kan "skæres over" i enkeltdråber. Dråberne skydes ind mod malingsprøven og der undersøges, over tid, for skader i malingsfilmen. Hypotesen var, at man vil få (næsten) de samme skader på coatingen ved at skyde dråber ind mod en (næsten) statisk malingsfilm som ved at bevæge et panel på en rotor igennem et kunstigt regnvejr (rotortesten). I begge tilfælde bliver dråberne slået i mange mindre stykker ved kollisionen. Som beskrevet i [3] er de underliggende mekanismer meget komplekse og forsøg essentielle.

## Vandjet konstrueres

Det blev besluttet at konstruere vandjetten på en sådan måde, at sammenstødshastigheder og frekvenser kunne sikres de samme værdier som i rotortesten. Hastigheden er vigtig, da det såkaldte "water hammer pressure", som er fundet af stor betydning i flyindustrien, er direkte proportionalt med dråbehastigheden [4]. Frekvensen er også vigtig, da en høj frekvens kan bevirke, at materialet, efter et nedslag, ikke har tid nok til at "komme sig" (relaxation) inden den næste kollision, hvorved energien kan akkumulere og resultere i f.eks. revnedannelse.

En skematisk illustration af det nye set-up er vist i figur 2, og i figur 3 ses det fulde set-up. Det hele er placeret på hjul for let at kunne flyttes rundt. Når "malingshjulet" er helt fyldt op, kan der testes 22 coatings på én gang, og hjulet drejer rundt med 0,5-1 omdrejninger/ minut. Vand recirkuleres og et filter sørger for, at eventuelle malingsstykker, fra nedbrudte coatings, ikke forefindes i vandet. Vandjethastigheden kan varieres fra 0-200 m/s. Den lille disk, som sidder foran vandjetten og roterer med meget høje hastigheder, se figur 4, har aflange huller (1 mm brede og 1 cm lange) og sikrer, at vandjetten brydes op i dråber, der efterfølgende rammer coatingsprøverne. På figur 4 ses også en luftdyse, som kan anvendes til at blæse vand væk fra malingsoverfladen og derved simulere, hvad en coating vil opleve på en vinge, som bevæger sig igennem luften med høj hastighed. Selve vanderosionen forgår kun på et meget tyndt område på coatingen, og et enkelt malingspanel kan derfor

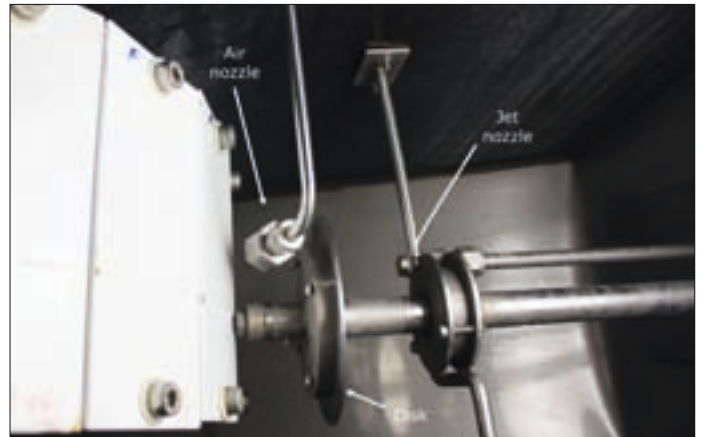
genbruges til mange forsøg ved at malingspanelet forskydes på en skinne (ikke vist). For at opnå en sammenlignelig testtid skal vandjetten, med 22 paneler, køre i 66 timer for, at hvert panel eksponeres i tre timer ligesom i rotortesten. Den samme nedslagsfrekvens som i rotortesten blev opnået ved at justere omdrejningshastigheder og radier af malingshjul og den lille disk samt hulstørrelsen og antal huller i disken. Hvert panel udsættes, til forskel for under reelle forhold, kun for dråber nogle procent af tiden.

### Blade coatings

Til forsøgene blev anvendt to forskellige blade coatings baseret



Figur 3. Vandjet apparat på DTU Kemiteknik til eksperimentelle forsøg med blade coatings. Den grå kasse nederst er vandtanken. Selve hjulet med malingsprøver er beskyttet af et kabinet af vandfast træ. Motor og pulsdæmper mv. kan også skimtes. Efter [3].



Figur 4. Nærbillede af vanddysen og hjul med malingsprøver. Den roterende disk kan også ses. Luftdysen bruges til at simulere "afvanding" af malingsprøver, som det må forventes finder sted på en rigtig vindmøllevinge, der roterer med høj hastighed. Efter [5].

på bindere af polyuretan. Begge bindere bestod af en kommerciel polyesterpolyol hærdet med en isocyanatrimmer (dvs. funktionalitet på 3). Der var dog i de to tilfælde en forskel i hærdernes fleksibilitet i krydsbundet tilstand. Begge malinger indeholdt  $TiO_2$ -pigmenter og "standard" fyldstoffer. Malingerne blev sprøjtepåført ved højt tryk ("airless spray"), og hærdetiden var omkring en uge. Den totale filmtykkelse for malingsystemet (inkl. primer) var godt 400  $\mu m$ . Yderligere detaljer kan findes i [4].

# FOODTECH

Processing & Packaging | 1.- 3. november 2016



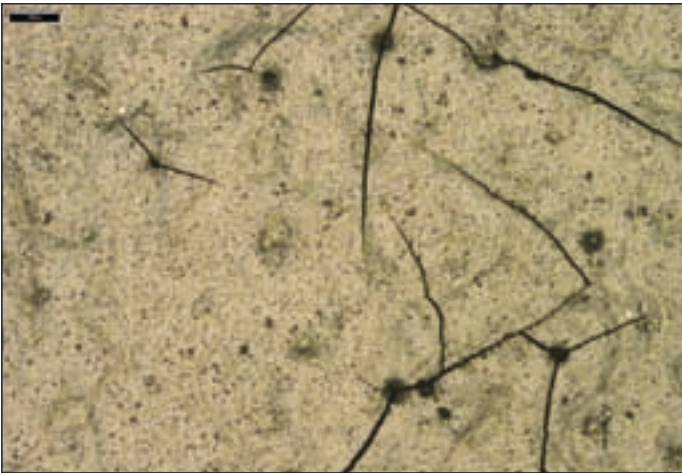
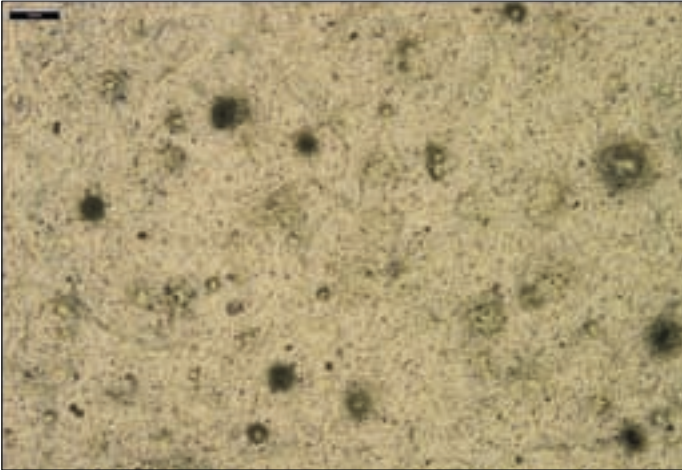
Nordeuropas største fagmesse for fødevareteknologi

BOOK STAND I DAG  
PÅ FOODTECH.DK



Hosting EHEDG World Congress and International DAIRY and FOOD Contest





Figur 5. Optiske mikroskopibilleder af en blade coating, som har været udsat for regndråbeerrosion i det nye set-up. Øverst ses en maling, som endnu ikke har været eksponeret. I midten og nederst samme maling efter eksponering. For alle tre billeder gælder, at den lille bjælke øverst i venstre hjørne er 200  $\mu\text{m}$ . Billederne er ikke fra det samme område på malingsprøven. Efter [4].

## Resultater af forsøgene

De første forsøg blev kørt med kontinuerte jets (altså uden disk) og en jethastighed på 157 m/s. Allerede efter 30 s begyndte den ene coating at vise tegn på erosionsskader og efter 10 minutter fulgte den anden efter. På figur 5 ses det under mikroskopering, hvordan skaderne udviklede sig for den ene coating. På det øverste billede ses malingen inden eksponering. Der er ikke nogle revner, men dog små områder, som adskiller sig fra resten af malingen. Sådanne ”defekter” behøver ikke at være

et problem i andre sammenhænge, men som det ses på det midterste billede, hvor malingen har været udsat for vandjetten, udvikler revnedannelsen sig fra de små mørke områder. I det nederste billede, som er taget et andet sted på malingsprøven, er stykker af malingen helt væk. En mulig forbedring af malingen kan derfor være at arbejde mod at undgå mikroskopiske defekter i den påførte maling, men det er ikke sikkert, at det kan lade sig gøre i industriel skala.

Ved forsøg med diskrete vandjets, som krævede længere forsøgstider, viste sig en væsentlig forskel i malingernes evne til at modstå erosion. Det var overraskende, at malingen med det mest fleksible bindersystem klarede sig dårligst. Dråbe hastigheden var meget afgørende for, hvor hurtigt skader opstod. Under en vis hastighed sås ingen erosion. Nedslagsfrekvensen havde også betydning ved høje frekvenser, dog kun når dråbe hastigheden var tilstrækkelig høj. En øget frekvens ved lav dråbe hastighed gjorde altså ingen forskel.

## Vandjet versus rotor

En vigtig faktor er, som tidligere nævnt, at resultaterne genereret i vandjetten er i god overensstemmelse med rotortesten. Det betyder i praksis, at en rangorden af de forskellige coatings ydeevne i de to apparaturer skal stemme overens. Det viste sig ikke at være tilfældet. Heller ikke da undersøgelsen blev udvidet til otte forskellige blade coatings, og parameterrummet blev undersøgt mere bredt (også med ”vingekrumning” på malingsprøverne og brug af luftdyse [5]), var der nogen god overensstemmelse. Konklusionen må derfor være, at mekanismerne bag vanddråbeerrosion er temmelig forskellige i de to apparater. Det er altså ikke det samme at ”skyde” dråber ind mod en overflade som at bevæge en overflade ind igennem faldende dråber, heller ikke selvom hastigheder og nedslagsfrekvenser er ens. Videre arbejde på området kunne tage udgangspunkt i videooptagelser med højhastighedskamera, hvor det forsøges at afdække de underliggende erosionsmekanismer for de to apparater.

## Konklusion

Blade coatings benyttes til at beskytte vindmøllevinger mod regndråbeerrosion. Det er blevet undersøgt, om et apparat kan designes i laboratoriestørrelse til hurtig test og rangorden af coatings. Det er afklaret, at den absolut vigtigste parameter er dråbe hastigheden, men også nedslagsfrekvensen har betydning ved høje dråbe hastigheder. Det har endnu ikke været muligt at korrelere det nye jet set-up med den veletablerede rotortest.

For en uddybende beskrivelse af emnet henvises til nedenstående referencer.

Tak til Hempel Fonden for støtte til forskningsarbejdet.

E-mail:

Søren Kiil, sk@kt.dtu.dk

Referencer

1. Rampel, L. Rotor blade leading edge erosion – real life experiences, Wind Systems Magazine (Issue date 24.10.2012) 22-24.
2. Wittrup, S. Vingeforkanter er som dækkene på en bil, Ingeniøren, November, 2013.
3. Zhang, S., Accelerated rain erosion of wind turbine blade coatings, Ph.D. afhandling, DTU Kemiteknik, 2015.
4. Zhang, S., Dam-Johansen, K., Nørkjær, S., Kiil, S. (2015) Erosion of wind turbine blade coatings - Design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation, Prog. Org. Coat., 78, 103-115.
5. Zhang, S., Dam-Johansen, K., Bernar, P.L., Kiil, S. (2015), Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: Effects of water cushioning, substrate geometry, impact distance, and coating properties, 328, 140-148.