



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Eindrapport



Project nummer : TEWZ118008

UNIVERSITY OF TWENTE.

LM WIND
POWER
a GE Renewable Energy business



Inhoudsopgave

1.	Project informatie	3
2.	Samenvatting	4
3.	Introductie	5
4.	Doelstellingen	7
5.	Methodologie en resultaten.....	7
6.	Toepassingen en bijdrage aan de doelstellingen van de regeling.....	9
7.	Publicaties.....	10

1. Project informatie

Project nummer	: TEWZ118008
Project titel	: InLEP: Integrated Leading Edge Protection for Offshore Wind Turbine Blades at High Speed
Project manager	: University of Twente
Contactpersoon	: ir. T.H. Hoksbergen (t.h.hoksbergen@utwente.nl)
Project partner	: LM Wind Power (R&D) Holland B.V.
Projectduur	: 01-01-2019 – 31-12-2022
Publicatie datum	: 12-6-2023

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

2. Samenvatting

Klimaatdoelen stellen een hoger aandeel hernieuwbare energie in de energiemix. Wind op zee heeft grote potentie om bij te dragen aan de gestelde doelen doordat grotere turbines meer energie op kunnen wekken. De grotere bladen introduceren echter een nieuwe uitdaging voor de industrie: regenerosie van de voorzijde van het blad. Door de regenerosie is er een significant negatief effect op de jaarlijkse energy productie (AEP) van de windturbine. De bladen van de windturbine worden gezien als haar motor en schade dient zoveel mogelijk te worden voorkomen. Op het moment zijn er geen voorspelbare, betrouwbare en duurzame “Leading Edge Protection” (LEP) systemen ter bescherming van de bladen die geïntegreerd kunnen worden tijdens het productie proces en opereren op snelheden van boven de 100 ms^{-1} . De huidige systemen dienen met regelmaat gerepareerd te worden wat nadelig is voor de operationele kosten en de zogenaamde “levelized cost of energy” (LCoE). De kennis voor het ontwikkelen van een duurzame LEP die geïntegreerd is in het blad tijdens het productieproces is op het moment onbekend door het ontbreken van een duidelijke beschrijving van de hechtingsmechanismen op de interface en het effect van de regenerosiemechanismen op de materiaaleigenschappen. Het begrijpen van de beschreven mechanismen is van belang voor het ontwikkelen en optimaliseren van nieuwe LEP systemen.

Het hoofddoel van het project is het ontwikkelen van een duurzaam en geoptimaliseerd LEP systeem dat is geïntegreerd in het blad gedurende het productie proces door een fundamenteel begrip van de hechtingsmechanismen en regenerosiemechanismen in offshore condities. Het project zal leiden tot een nieuw LEP systeem dat de LCoE met 6% zal verlagen door een toename in jaarlijkse energie productie en een verlaging van de investering en de operationele kosten door een vermindering van schade en reparatie momenten.

Een betrouwbaar aerodynamisch ontwerp van het blad waarin het LEP systeem geïntegreerd is in het composiet blad doormiddel van co-molding gedurende het vacuüm infusie proces is gerealiseerd. De regenerosie eigenschappen en hechting van verschillende thermoplastische materialen is bestudeerd om hun geschiktheid als LEP te analyseren. Hansen oplosbaarheid parameters zijn toegepast om de thermodynamische affiniteit tussen de thermoplastische LEP systemen en de thermoharder harsen in kaart te brengen. De meest geschikte materialen zijn getest op interface sterkte met behulp van de “climbing drum peel test” om hun geschiktheid als LEP systeem te verifiëren. De formatie van de microstructuur op de interface tussen het thermoplastische LEP systeem en de glasvezel versterkte thermoharder matrix is bestudeerd aan de hand van optische microscopie en “atomic force microscopy” (AFM). Richtlijnen voor het maken van een geoptimaliseerd en betrouwbaar co-molded LEP systeem zijn voor het eerst opgesteld voor de beschouwde materialen. Om de geschiktheid van de materialen met betrekking tot regenerosie in kaart te brengen is een “pulsating jet erosion test” (PJET) apparaat ontwikkeld. De verschillende materiaalsystemen zijn getest op druppel impact erosie en de afhankelijkheid van de schade als een functie van impact snelheid en het aantal impacts is gemeten. De schade initiatie en groeimechanismen tijdens druppelerosie zijn voor het eerst omschreven voor de beschouwde materialen. Een uitgebreid numeriek simulatie kader is ontwikkeld om de gemeten schade te voorspellen aan de hand van materiaal eigenschappen en de actieve schade mechanismen beter te begrijpen. De tijdsafhankelijke spanningsverdeling in de LEP systemen is geanalyseerd voor variaties in druppeldiameter, impactsnelheid en laag dikten en materialen. De opgedane kennis over het co-molding proces en de regenerosie schademechanismen zijn toegepast om een demonstrator te ontwikkelen. Deze demonstrator is getest in een “whirling arm” regenerosietester en leidde tot een duidelijke verbetering in levensduur ten opzichte van de huidige LEP materialen. De economische impact van het InLEP concept is kritisch geanalyseerd.

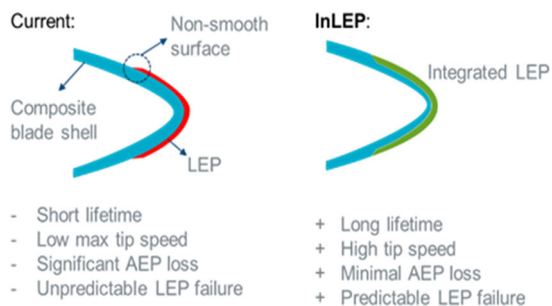
3. Introductie

Een schone en betrouwbare energievoorziening gepaard met lage kosten is benodigd in Europa om de broeikasgasuitstoot met 80-95% te verminderen in 2050 zoals gesteld in de “Energy Roadmap 2050” door de Europese Commissie [1]. Deze doelstelling heeft behoorlijke implicaties voor de hernieuwbare energie sector om te kunnen concurreren met fossiele brandstoffen en de opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden Celsius zoals genoemd in het klimaatakkoord van Parijs. Wind op zee heeft veel potentie om meer energy te produceren door het gebruik van grotere wind turbines. De Noordzee kan een hoofdrol spelen voor Nederland in het behalen van de gestelde doelen in het klimaatakkoord van Parijs. Zoals door de Nederlandse overheid gesteld in de “Roadmap of Offshore Wind Energy 2030” zal de windvoorziening op de Noordzee moeten groeien tot 11.5 GWh in 2030 [2]. Om de gestelde doelen te realiseren is het noodzakelijk dat de kosten van wind op zee reduceren en dat innovatie en concurrentie op het gebied van nieuwe, grotere wind turbines wordt gestimuleerd. Op het moment wordt de sector uitgedaagd door het probleem van regenerosie van de voorkant van de windturbine bladen door de extreme weersomstandigheden en de hoge snelheid van de uiteinden van de bladen. De gevolgen van regenerosie, in de vorm van schade en de benodigde reparaties, hebben een significante impact op de “Levelized Cost of energy” (LCoE) en jaarlijkse energie productie (AEP). Als voorbeeld, in 2018 moesten ongeveer 2000 bladen (van 646 turbines) worden gerepareerd na een paar jaar in operatie doordat de schade door regenerosie de coating laag dusdanig beschadigd had dat deze niet langer effectief was [3].

Het is duidelijk dat regenerosie een van de meest relevante beperkingen is voor het verder verlagen van de LCoE. De belangrijkste oorzaak is dat er op dit moment geen coating systeem is dat gedurende lange tijd bescherming biedt tegen regenerosie schade. Daarnaast is er onvoldoende kennis over de relevante fysische fenomenen die verantwoordelijk zijn voor de regenerosie schade wat het ontwikkelen van een geoptimaliseerd coating systeem verder belemmert.

Doel:

Het hoofddoel van het InLEP project is het ontwikkelen van een duurzaam en geoptimaliseerd hybride coating systeem dat is geïntegreerd in het composiet wind turbine blad. Een fundamenteel begrip van de hechtingsmechanismen en de regenerosie weerstand speelt daarbij een centrale rol. Het project zal leiden tot de mogelijkheid om robuuste LEP systemen te ontwikkelen en te optimaliseren voor offshore condities. De LCoE zal dalen met 6% door het verminderen van het verlies in AEP en het vermijden van LEP schade en reparatie.



Figuur 1: Huidige oplossing (links) en InLEP concept (rechts)

Offshore windparken liggen op moeilijk bereikbare plekken en hebben vaak te kampen met extreme weer condities zoals regen, hagel, sneeuw en ultraviolet licht. Daarnaast hebben huidige wind turbines snelheden aan de uiteinden van de bladen van $>100 \text{ ms}^{-1}$. Om de bladen te beschermen zijn de producenten (OEMs) actief op zoek naar LEP oplossingen. Op het moment zijn er twee gangbare typen LEP beschikbaar [4]: in-mold coatings (epoxy of polyester gelcoats) en post-mold coatings (bijv. ProBlade® van LM Wind power alsmede andere tapes of shells). LEP tapes falen catastrofaal in delaminatie voor hoge impact snelheden en grote regendruppels. In 2016 is een methode gepatenteerd waarbij ultra hoog moleculair gewicht polyethyleen (UHMWPE) gehecht wordt aan het composiet blad doormiddel van een rubberen tussenlaag [5]. In een patent uit 2017 [6] wordt een thermoplastisch LEP systeem geïntegreerd in het composieten blad of een deel daarvan tijdens het productieproces. In alle beschreven LEP oplossingen [4-6] is de kwaliteit

van de hechting op de interface van de materialen niet voldoende bekend en beschreven. De behoefte naar het ontwikkelen van nieuwe kennis betreffende de fysische morfologie en chemische hechting op de interface is daarom van belang. Dit betekent dat de haalbaarheid van de recente ontwikkelingen [5,6] niet geverifieerd is voor offshore condities waar de schademechanismen gedreven worden door de kwaliteit van de hechting van de interface. Om een goede bonding te kunnen realiseren is een systematisch industrieel onderzoek benodigd waarin de hechtingskwaliteit en de LEP materiaal eigenschappen worden gekoppeld aan het productieproces gegeven in Figuur 1 en de regenerosie levensduur.

De schademechanismen als gevolg van regenerosie van LEP systemen gebaseerd op thermoharders en metalen is recent onderzocht in de literatuur [7-12]. De levensduur van de materialen is gemeten als gevolg van water druppel impact door middel van “whirling arm” regenerosietests (RET) of “jet-based” RET [7-9]. Daarnaast zijn verschillende numerieke modellen ontwikkeld [10-12] om de impact respons van de materialen te voorspellen. Zowel het testen alsmede het modelleren van thermoplastische LEP materialen die zijn geïntegreerd in het blad, zoals gepatenteerd in [6], is tot op heden niet gedaan in de literatuur. Daarnaast is de hoeveelheid beschikbare data van RET beperkt en de correlatie met de ontwikkelde modellen op het gebied van regenerosie schade initiatie en groei ontbreekt. Het beter begrijpen van de fundamentele fysische fenomenen en het koppelen van experimenten aan modellen zorgt ervoor dat het ontwerpen van geoptimaliseerde LEP systemen voor offshore wind turbines in de toekomst haalbaar zal zijn.

Referenties

- [1] European Commission, 2012 Energy Roadmap 2050. Available online: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf (accessed on 23 May 2018).
- [2] Minister Wiebes (EZK), “Routekaart windenergie op zee 2030”, Retrieved and downloaded 20th May 2018, from <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2018/03/27/kabinet-maakt-plannen-bekend-voor-windparken-op-zee-2024-2030>
- [3] Energy News: Offshore Wind Fiasco: Renewables Industry Faces \$Billions In Compensation For Early Repairs. Retrieved 20th May 2018, from <https://www.thegwpc.com/offshore-wind-fiasco-green-industry-faces-billions-in-compensation-for-early-repairs/>
- [4] Cortés E, Sánchez F, O’Carroll A, Madramany B, Hardiman M, Young TM. On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating–Laminate Adhesion on Rain Erosion Performance. *Materials*. 2017 Sep 28;10(10):1146.
- [5] Theile B, Hoffmann A, inventors; Wobben Properties GmbH, assignee. Rotor blade element for a wind turbine, rotor blade, and a production process therefor and wind turbine with rotor blade. United States patent application US 14/913,668. 2016 Jul 21.
- [6] Drachmann HG, inventors; LM Wind Power Patent Holding A/S, applicant. A wind turbine blade having an erosion shield. European patent allocation WO 2017012632 A1
- [7] Zhang S, Dam-Johansen K, Nørkjær S, Bernad Jr PL, Kiil S. Erosion of wind turbine blade coatings– Design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation. *Progress in Organic Coatings*. 2015 Jan 1;78:103-15.
- [8] Tobin EF, Young TM, Raps D, Rohr O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities. *Wear*. 2011 Jul 29;271(9-10):2625-31.
- [9] Valaker EA, Armada S, Wilson S. Droplet Erosion Protection Coatings for Offshore Wind Turbine Blades. *Energy Procedia*. 2015 Jan 1;80:263- 75.
- [10] Keegan MH, Nash DH, Stack MM. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013 Sep 4;46(38):383001.
- [11] Banerjee S. Modeling and Simulation of Solid Particle Erosion of Protective Films (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
- [12] Slot HM, Gelinck ER, Rentrop C, van der Heide E. Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models. *Renewable Energy*. 2015 Aug 1;80:837-48.

4. Doelstellingen

Het hoofddoel van het InLEP project is het verminderen van de LCoE voor offshore windturbines met 6% door het ontwikkelen van een geoptimaliseerd LEP systeem tegen regenerosie met inachtneming van de hechtingsmechanismen van de interface en de actieve fysische mechanismen bij druppelimpact.

De onderzoeksdoelen zijn:

Doel-1: Het bepalen van de hechtingskwaliteit gebaseerd op de fysische en chemische adhesie alsmede het bepalen van de sterkte van de verbinding op het grensvlak tussen de LEP materialen en het co-molded composiet blad.

Doel-2: Het identificeren van de schade initiatie en groei mechanismen met behulp van een nieuw ontwikkeld numeriek model om voorspellingen over regenerosie voor het eerst te valideren.

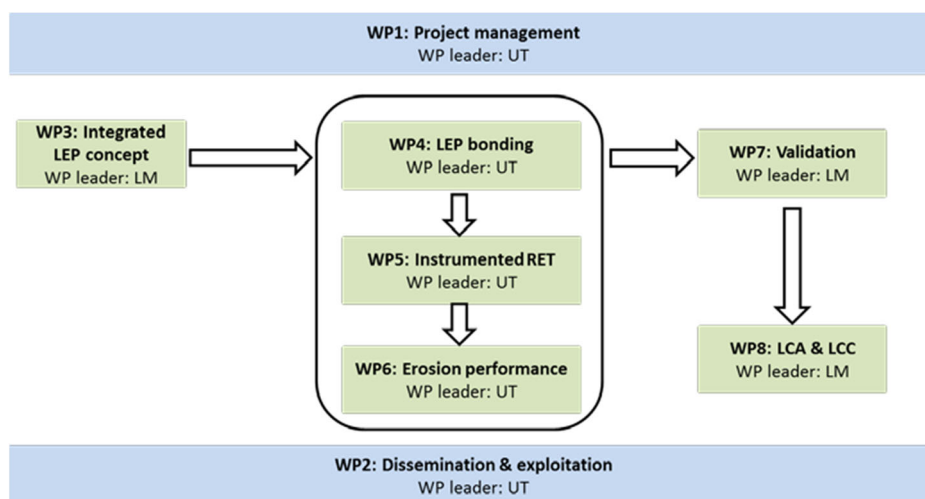
Doel-3: Het demonstreren van het effect van proces parameters en materialen op de regenerosie eigenschappen van het ontwikkelde LEP concept.

Doel-4: Het optimaliseren en valideren van het nieuw ontwikkelde LEP concept door middel van nieuwe kennis opgedaan in een betrouwbare regenerosietester.

Doel-5: Het optimaliseren van het LEP systeem om het verlies in AEP te minimaliseren (door het aerodynamische design)

5. Methodologie en resultaten

De algehele aanpak van het InLEP project is weergegeven in Figuur 2 door middel van de “work packages” (WPs). De omschrijving van de inhoud van de individuele WPs volgt.



Figuur 2: Overzicht van de WPs in het InLEP project.

WP1: Project management

Het project en het vennootschap zijn zo gemanaged dat de brede doelen van het project gewaarborgd zijn en de kennis en expertise tussen de deelnemers effectief overgedragen is. In totaal hebben er 9 project management meetings binnen het consortium plaatsgevonden. Daarnaast zijn er tweewekelijkse technische meetings geweest om samenwerking tussen de deelnemers te stimuleren.

WP2: Dissemination & exploitation

Om de zichtbaarheid van het InLEP project te vergroten alsmede de methodologie, de ontwikkelde modellen en de fundamentele regenerosie mechanismen onder de aandacht van een breder publiek te brengen zijn er in totaal 12 wetenschappelijke artikelen gepubliceerd. Deze artikelen zijn te vinden in hoofdstuk 6. Daarnaast is de voortgang van (delen van) het project gepresenteerd op verschillende (inter)nationale wetenschappelijke conferenties.

WP3: Integrated LEP concept

Een haalbaarheidsstudie aangaande produceerbaarheid en mechanische eigenschappen is uitgevoerd om het meest geschikte materiaal voor LEP toepassing te identificeren. Gedetailleerd onderzoek is uitgevoerd om de maakbaarheid en het design voor het concept te realiseren. De hechtingskwaliteit en erosie sterkte zijn in kaart gebracht door middel van experimenten om de keuze voor het uiteindelijke materiaal en gekozen concept te bevestigen.

WP4: LEP bonding

Vacuüm infusie is gebruikt als methode om het gekozen LEP concept door middel van co-bonding te integreren in het composieten wind turbine blad. Fysische hechting door diffusie van polymeerketens tussen de thermoplastische LEP en thermoharder hars alsmede chemische hechting door reactieve oplosmiddelen in de hars (bijv. polyester of epoxy) vinden plaats tussen de verschillende materialen gedurende het uithardingsproces. De fysische morfologie en geassocieerde interface dikte zijn bepaald door microscopie (optisch, "scanning electron" (SEM) en "atomic force" (AFM)). "Climbing drum peel" tests zijn uitgevoerd om de sterkte van de hechting te karakteriseren en te relateren aan de proces parameters en de resulterende fysische morfologie van de diffusie-zone. Het effect van het type vezelversterking op de eigenschappen en morfologie van de interface is onderzocht. Proces richtlijnen zijn opgesteld voor verschillende LEP materialen gebaseerd op de gekarakteriseerde interface morfologie en sterkte als functie van procestemperatuur.

WP5: Instrumented RET

Een uitgebreide geïnstrumenteerde RET is ontwikkeld om diepgaande kennis te vergaren over de regenerosie schadeontwikkeling door middel van in-situ metingen. Een geïnstrumenteerde kleinschalige "pulsating jet erosion test" (PJET) opstelling met instelbare eigenschappen van de water straal is ontwikkeld en geïnstalleerd in het laboratorium op de Universiteit Twente. De schade initiatie en groei mechanismen door waterdruppelimpact zijn bestudeerd door middel van optische microscopie, confocaal microscopie en SEM. Een algoritme is ontwikkeld dat volume verlies en oppervlakte ruwheid van de samples kan meten als functie van het aantal impacts.

WP6: Erosion performance

Een numerieke eindige elementen (FEM) simulatie is ontwikkeld gebaseerd op de fysische fenomenen aangaande regendruppelimpact. Impact van een enkele waterdruppel is gemodelleerd met behulp van de "smoothed particle hydrodynamics" (SPH) methode in de commerciële software ABAQUS. Daarnaast is een twee fase vloeistof simulatie ontwikkeld die demping door de aanwezige luchtlaag mee neemt in het bepalen van de contactdruk tussen de waterdruppel en de LEP laag. Dit model is ontwikkeld in het commerciële software pakket Comsol Multiphysics®. De volgende opsomming weergeeft de toegepaste en ontwikkelde modellen voor het bepalen van de regenerosie levensduur in WP6:

- Fysisch model om de contactdruk te bepalen
- Dynamisch spanningsmodel voor de LEP systemen en interfaces. Het model kan ook het effect van oppervlakteruwheid en inclusies/defecten meenemen.
- Levensduur model gebaseerd op de voorgaande modellen en het "Rainflow counting" algoritme en de Palmgren-Miner regel voor vermoeiingsschade.

De trends in levensduur van het LEP systeem als functie van de parameters zijn in kaart gebracht.

WP7: Validation

Het ontwikkelde LEP concept en de co-molding techniek zijn gevalideerd in een betrouwbaar laboratorium volgens de technische specificaties. Een sub-component van het wind turbine blad van ongeveer 0.5 m is geproduceerd met een enkele kromming vergelijkbaar met de kromming aan de voorzijde van het blad. De regenerosie eigenschappen van deze demonstrator zijn getest in een “whirling arm” RET die deel uitmaakt van de testfaciliteiten van LM Wind in Denemarken. Naast de erosie eigenschappen zijn ook de invloed van milieu effecten zoals UV-licht en temperatuur onderzocht. Daarnaast zijn ook de effecten van defecten, tussenlagen en andere relevante proces parameters in kaart gebracht.

WP8: Life cycle costing (LCC)

De economische impact van het innovatieve InLEP concept is bepaald door een “Life Cycle costing” (LCC) aan het einde van het project. De resultaten van deze analyse dragen bij aan een sterkere marktpositie. De inventarisatie en analyse van economische implicaties van het ontwikkelde LEP concept gedurende haar volledige levensduur is geïdentificeerd in de LCC. De belangrijke elementen zijn onder anderen de maakbaarheid, transport kosten, CAPEX, OPEX en AEP.

6. Toepassingen en bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

Het InLEP project heeft bijgedragen aan kennisontwikkeling op het gebied van regenerosie schademechanismen en diffusie kinetica in co-molded thermoplastische/thermoharder systemen. Het ontwikkelde concept heeft geleid tot meer duurzame en betrouwbare LEP systemen en een reductie van de LCoE voor wind turbines op zee.

De PJET RET ontwikkeld in WP5 geeft inzicht in de schademechanismen voor druppel impact en kan worden gebruikt voor verder onderzoek naar regenerosie schademechanismen in andere materiaalsystemen.

Het numerieke model ontwikkeld in WP6 stelt het mogelijk schade locaties en levensduur van materialen te voorspellen. Verdere ontwikkeling van het model en het meten van de juiste input parameters kan leiden tot een optimalisatie framework voor LEP systemen met locatieafhankelijke weersomstandigheden. Dit zorgt er voor dat de regenerosie schademechanismen en LEP systemen ook in de toekomst voorspelbaar blijven en verdere ontwikkeling van de wind turbines mogelijk is.

7. Publicaties

Het project heeft geresulteerd in de volgende wetenschappelijke publicaties:

- [1] Erartsin O, Zanjani JS, Baran I. Thermoset/Thermoplastic Interphases: The Role of Initiator Concentration in Polymer Interdiffusion. *Polymers*. 2022 Apr 6;14(7):1493.
- [2] Zanjani JS, Baran I, Akkerman R. Characterization of interdiffusion mechanisms during co-bonding of unsaturated polyester resin to thermoplastics with different thermodynamic affinities. *Polymer*. 2020 Nov 17;209:122991.
- [3] Zanjani JS, Baran I. Co-bonded hybrid thermoplastic-thermoset composite interphase: Process-microstructure-property correlation. *Materials*. 2021 Jan 8;14(2):291.
- [4] Salomão GR, Gojzewski H, Erartsin O, Baran I. Novel co-bonded thermoplastic elastomer-epoxy/glass hybrid composites: The effect of cure temperature on the interphase morphology. *Polymer Testing*. 2022 Nov 1;115:107736.
- [5] Erartsin O, Zanjani JS, Baran I. Warpage of fiber-reinforced thermoset polymers co-bonded to thermoplastics. In *Proceedings of the SAMPE EUROPE Conference and Exhibition 2021*.
- [6] Zanjani JS, Baran I, Akkerman R. Combatting rain erosion of offshore wind turbine blades by co-bonded thermoplastic-thermoset hybrid composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Oct 1 (Vol. 942, No. 1, p. 012024)*. IOP Publishing.
- [7] Erartsin O, Zanjani JS, Baran I. Unravelling the interphase - bond strength relationship in novel co-bonded thermoplastic - thermoset hybrid composites for leading edge protection of wind turbine blades. *Polymer testing*. Volume 117, January 2023, 107856
- [8] Erartsin O, Zanjani J, Baran I. Bond Strength of Co-Bonded Thermoplastic Leading Edge Protection (LEP): The Effect of Processing-Driven Interphase Morphology. In *Key Engineering Materials 2022 (Vol. 926, pp. 1786-1794)*. Trans Tech Publications Ltd.
- [9] Hoksbergen TH, Baran I, Akkerman R. Rain droplet erosion behavior of a thermoplastic based leading edge protection system for wind turbine blades. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Oct 1 (Vol. 942, No. 1, p. 012023)*. IOP Publishing.
- [10] Hoksbergen N, Akkerman R, Baran I. The Springer model for lifetime prediction of wind turbine blade leading edge protection systems: A review and sensitivity study. *Materials*. 2022 Feb 3;15(3):1170.
- [11] Hoksbergen TH, Akkerman R, Baran I. Liquid droplet impact pressure on (elastic) solids for prediction of rain erosion loads on wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023 Feb 1;233:105319.
- [12] Hoksbergen TH, Akkerman R, Baran I. Coating stress analysis for leading edge protection systems for wind turbine blades. In *20th European Conference on Composite Materials, ECCM 2022: Composites meet Sustainability (Vol. 5, pp. 113-120)*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.