

Lys, vejrpåvirkning og jonglering med tal

Af Allen Zielnik, seniorkonsulent inden for forvitningsstudier og Matt McGreer, produktchef, Atlas Material Testing Technology, LLC

Der er mange faktorer forbundet med studiet af organiske (primært polymere) materials adfærd når de eksponeres for udendørs vejrpåvirkning. Disse faktorer inkluderer ikke blot de belastninger der forårsages af det lokale vejr og deres variationer over tid, men også alle brugsrelaterede stresspåvirkninger, som fx trækbelastning, trykspænding eller forskydningskraft, foruden materialets eller produktets unikke og specifikke nedbrydningsveje under disse kombinerede betingelser. I forlængelse heraf kan vi også sige at "vejrægthed" dækker over et materials reaktion på de påvirkninger det udsættes for i sit brugsmiljø (fx i en bilkabine eller en detailbutik).

Materialenedbrydning

Der er generelt én eller flere forskellige mekanismer ^[1], som kan nedbryde et eksponeret materiale, eller ændre dets vigtige egenskaber – fx udseende eller mekanisk modstandsdygtighed. Disse mekanismer inkluderer, men er ikke begrænset til:

- en fysio-mekanisk proces, der ikke involverer en kemisk ændring.
- fotolytiske effekter af en interaktion med fotoner fra terrestrisk solstråling eller kunstige kilder.
- reaktioner med udefrakommende kemiske agenser, inklusive ozon, rensmidler, syre/alkali, vand o.a.
- frie radikal-reaktioner med nedbrydningsprodukter, der er dannet i materialet under eksponeringen.

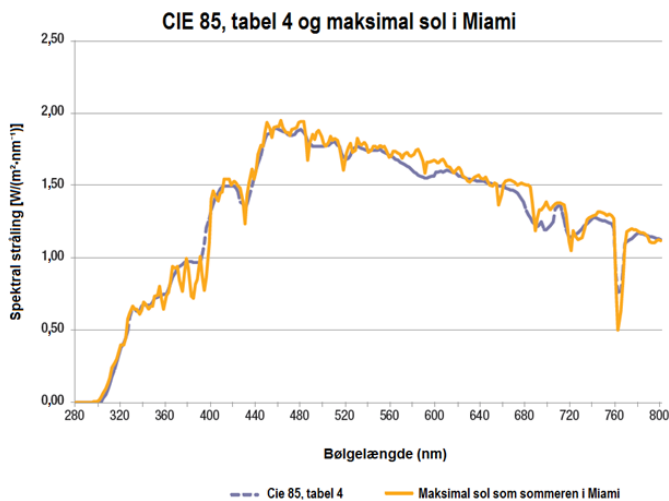
Ofte forekommer én eller flere af disse processer enten simultant eller sekventielt. Kombineret kan de være synergetiske, og de kan indtræffe med forskellige hastigheder, eller påvirke forskellige materialeegenskaber. For eksempel følger de fleste polymerer den almindelige "autokatalytiske fotooxideringscyklus" ^[2] hvor fotoner starter en bindingsspaltningproces, mens de fleste andre kemiske ændringer fortrinsvis er forårsaget af termisk styrede frie radikal-processer.

Kombineret med servicemiljøets iboende variabilitet og ofte cykliske natur udgør disse faktorer en væsentlig hindring for design og implementering af en testmetode. Selv realtidseksponering i et naturligt miljø afhænger af belastningernes gentagelighed samt prøveemnets pålidelighed ved fremstilling af slutproduktet. Når vi så arbejder på at accelerere belastningerne for at opnå kortere testtider, stiger kompleksiteten eksponentielt.

Primære stressfaktorer i forbindelse med vejrpåvirkning

I forbindelse med naturlige vejrægthedstest samt laboratorietest med accelereret vejrpåvirkning har man historisk set, og med god grund, fokuseret på de primære belastninger fra varme, lys og fugt – en stærk "treenighed" ved vejrpåvirkning. Dette betyder dog ikke at "sekundære" miljøbelastninger, såsom atmosfæriske gasser eller syreregn, er uden betydning. Faktisk er de en væsentlig faktor for visse nedbrydningsmekanismer. Men ved de fleste materialer gælder det at disse sekundære belastninger a) spiller en mindre eller mere specialiseret rolle i forbindelse med vejrpåvirkning, og b) er svære eller umulige at integrere i eksisterende accelererede test eller udstyr.

I alle naturlige miljøer varierer treenigheden af stressfaktorer i både daglige (dags-) og langsigtede sæsonmæssige (og længere) cyklusser. Men korttidsudsving, som fx forbigående skyer og regn, kan også påvirke stressniveauerne. Som vi siger, "Klimaet er det du forventer, vejret er det du får." Disse centrale stressfaktorer er forbundet indbyrdes (fx påvirkes fugten af varmen), så jo mere deres naturlige balance afviger fra virkelige forhold, jo større sandsynlighed er der for at eksponeringerne ikke korrelerer. Desuden kan de tre stressfaktorer ikke alle "accelereres" med samme hastighed, hvilket ofte betyder at korrelationen falder når man forsøger at accelerere testen.



Figur 1: Reference fra CIE udgivelse 85, tabel 4 kontra spektrale energifordelinger målt i Miami om sommeren når solen er på sit højeste.

Derfor er det gængse spørgsmål "Hvor længe skal jeg eksponere mit materiale i et laboratorieapparat for at det vil svare til et års eksponering i Florida (eller en anden lokalitet)?" mere komplekst end mange er klar over – især dem der ikke er dybt involveret i forvitningsstudier.

Den største forhindring for at kunne besvare spørgsmålet definitivt er den kendsgerning at det ikke er muligt at foretage en absolut karakterisering af de dynamiske forhold hos lys, fugt, temperatur og luftforurenende stoffer i et prøveemnes mikroklima under eksponeringen.

Men fremskridt inden for tilførsel, kontrol og måling af lys – som ofte er den vigtigste stressfaktor ved vejrpåvirkning af et organisk materiale – giver et udgangspunkt for at foretage sammenligninger mellem naturlige eksponeringer og eksponeringer i et laboratorie.

“Lysets” spektrale kvalitet

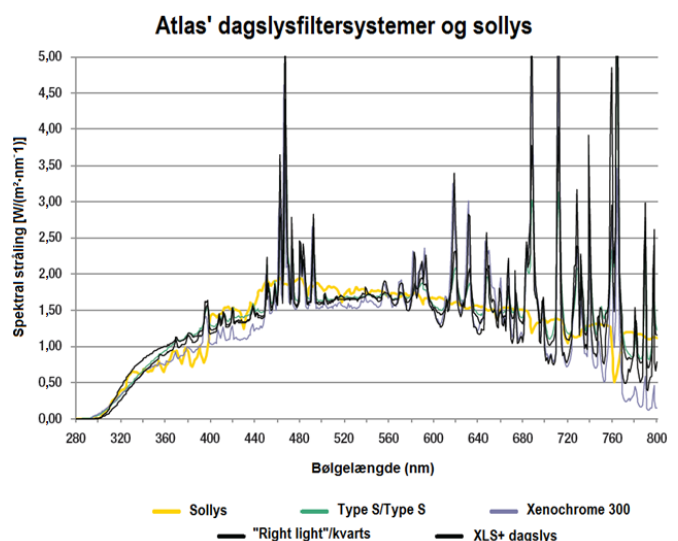
Teknisk set refererer udtrykket *lys* kun til de elektromagnetiske bølgelængder som kan ses med det blotte øje (mellem ca. 400 nm og 700 nm). Mens *lys* bruges om de fleste kunstigt oplyste, primært indendørs, miljøer, bruges udtrykket *terrestrisk solstråling* om udendørs eksponeringer i det komplette solspektrum. Men i almindelig praksis anvender man ofte de uvidenskabelige termer *sollys*, *dagslys* eller *UV-lys*.

Fotokemiens første lov, Grotthuss-Drapers lov, fastslår at for at en fotokemisk reaktion kan finde sted, skal lyset absorberes af et kemisk stof. Inden for fotokemi er det nok at sige at forskellige strukturer i et molekyle, løseligt defineret som kromoforer, kan absorbere fotonenergi ved visse frekvenser. Ved fotonedbrydning kan denne energi resultere i bindingsspaltning og efterfølgende kemiske reaktioner hvoraf mange nedbryder de ønskelige materialeegenskaber. Eftersom fotonenergi, efter Plancks lov, står i omvendt forhold til bølgelængde, er den ultraviolette strålings korte bølgelængder typisk mere skadelige, selvom uønsket fotokemi også kan skyldes længere bølgelængder.

På grund af denne materialespecifikke afhængighed af bølgelængden er strålskildens *spektrale energifordeling* (SPD) helt afgørende; i forbindelse med vejrpåvirkning skal SPD ligge så tæt på *terrestrisk solstråling* som muligt. Skønt "sollys" varierer med mange faktorer, er det målreferencespektrum der oftest anvendes i internationale vejrpåvirkningsstandarder, dét der beskrives i Den Internationale Belysningskommissions (CIE), Udgivelse 85, Tabel 4 [3].

Da Miami ofte bruges som et vigtigt referencepunkt inden for vejrpåvirkning, viser figur 1 CIE-referencen samt data målt om sommeren på Atlas testanlæg i det sydlige Florida (Miami).

Hidtil har filtreret xenonlys været kendt som det tætteste spektrale match til direkte og glasfiltreret terrestrisk solstråling ved laboratorievejrpåvirkning i kommercielt øjemed. Dette skyldes hovedsageligt den iboende karakter hos den rene xenongas' udladningsspektrum. Men forskellige xenoninstrumenter vil have små variationer i den spektrale energifordeling da denne afhænger af lampens og instrumentets geometri, lampens kølemetode (luft kontra vand) og tilgængeligheden af specielle optiske filterglas med forskellige former og transmissionskarakteristikker. Figur 2 viser en sammenligning mellem de spektrale energifordelinger i nogle af Atlas' "dagslys"- filtersystemer, mens figur 3 viser en sammenligning mellem spektrale energifordelinger der er filtreret gennem vinduesglas.



Figur 2: Spektrale energifordelinger i almindelige xenon-"dagslys"-filtre og 26° sydvendt maksimal sommarsol i Miami. Data normaliseret ved 560 nm.

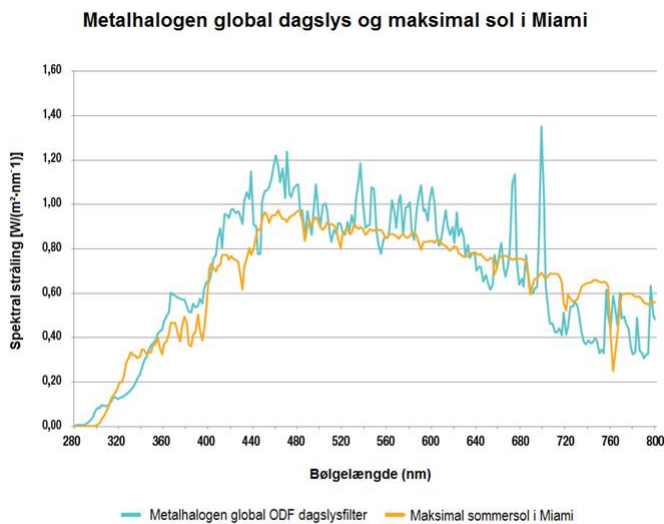
Bemærk at på trods af mindre forskelle mellem xenonlampe- og filterteknologier er spektrene ret ens, og ligger desuden meget tæt op ad både standardreference og sollys målt i Miami, især i de kritisk korte UV-bølgelængder. Bemærk også at ikke alle Atlas' filterkombinationer er vist, kun de mest anvendte.

Alternative lyskilder

Specielle metalhalogenlamper, udstyret med enten dagslys- eller vinduesglasfiltre, bruges også ved vejrpåvirkning i tekniske anlæg. Fordelen ved metalhalogen er at det giver et større lysudbytte i forhold til effekten end xenon. Til gengæld kræver det betjening over et mindre effektområde, da det ellers vil påvirke den spektrale energifordeling. Skønt metalhalogen ikke matcher det terrestriske solspektrum lige så godt som filtreret xenon, er det ved test i store kamre (fx walk-in eller drive-in) et praktisk alternativ til xenon (figur 4).

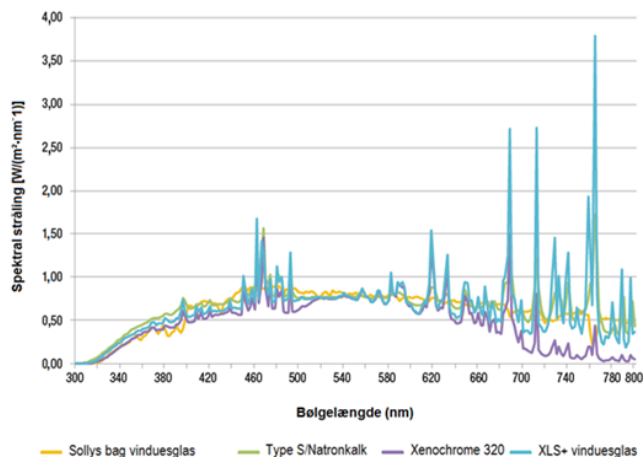
Lamper med sortlys-lysstofrør bruges i fluorescerende kondenseringsapparater. Da disse mangler de længere UV- og synlige bølgelængder, er de spektralt set mangelfulde sammenlignet med sollys; men UVA-340-lampen er dog et godt spektralt match til den lave del af de terrestriske UV-solstråler. Fluorescerende kondensering er almindeligt anvendt, især til UV-/fugtscreening af belægningsmasser på metalprøveplader. Se vejledningen i ISO 4892-1 [4], gengivet i ASTM G151 [5], for detaljer om vejrægthedstestfaktorer som kan reducere korrelationen med udendørs eksponeringer.

Det skal bemærkes at UVB-313-lampen udsender UV-C-bølgelængder, som ikke når jordens overflade. De overordnede internationale standarder for fluorescerende UV-lamper (ISO 4892-3 [6] og ASTM G154 [7]) inde-



Figur 4: Den spektrale energifordeling i Atlas' metalhalogen global- (MHG) lampe med dagslysfilter sammenlignet med maksimal sommervind i Miami. Data normaliseret ved 560 nm.

Dagslys bag vinduesglas (xenonbue) og sollys bag vinduesglas



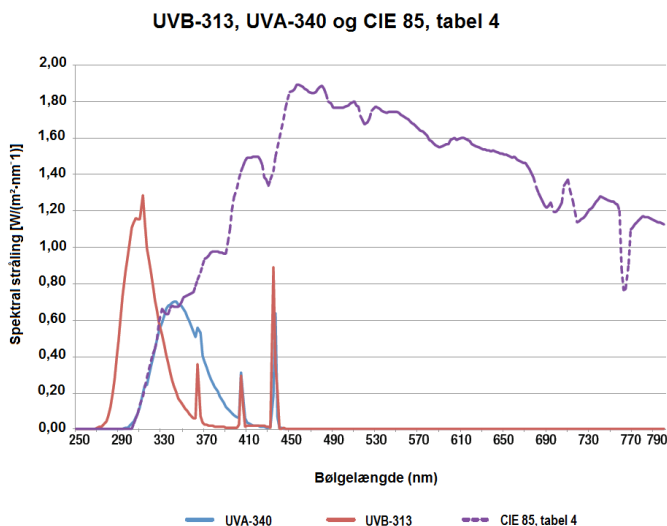
Figur 3: Spektrale energifordelinger i "vinduesglas"-xenonfilter og 26° sydendt maksimal sommervind under glas i Miami. Data normaliseret ved 560 nm.

holder specifikke advarende noter om at "disse lamper kan resultere i ældningsprocesser, som ikke forekommer udendørs", og "det anbefales ikke at bruge disse lamper til simulering af sollys," selvom de er kendt for at blive anvendt til dette formål (*caveat emptor*, "køber skal passe på").

Når man sammenligner disse forskellige spektrale energifordelinger med et referencespektrum, som fx CIE 85 eller sollyset i Miami, taler de ligeartede (eller forskellige) kurver for sig selv. Men denne analyse er kvantificeret i tabel 1, der omfatter sammenligninger mellem strålingsprocenter ved forskellige bølgelængdeområder vedrørende enten "total UV" (300-400nm) eller "UV plus synligt lys" (300-800 nm). Variationen af forskellige spektrale energifordelinger for xenonbue i figur 2 kan synes ret lille, og faktisk opfylder de alle kravene til "dagslys"- filtersystemer i ISO 4892-2 [8] og ASTM G155 [9]. Imidlertid bør det understreges at disse små uligheder kan resultere i betydelige forskelle i typen af fotolytiske ændringer i de eksponerede materialer [10], og på hvor hurtigt ændringerne sker.

SPD og fotonedbrydning

Et fotosensitivt materiales specifikke reaktion og den deraf følgende effekt på de relevante egenskaber, afhænger både af den specifikke materialekemi (og dens nedbrydningsveje), og af den specifikke påførte lysbelastning (den spektrale energifordeling). Med reference til Plancks lov, som er nævnt ovenfor, kan selv små forskelle i den spektrale energifordeling have en betydelig indvirkning, som det fremgår af tabel 1. Til eksempel er visse materialer, såsom polykarbonat, meget følsomme over for cut-on bølgelængden. Ved sådanne materialer kan enhver afvigelse fra den nominelle cut-on af terrestrisk solstråling forvrænge nedbrydningen, hvilket resulterer i nedsat korrelation mellem den kunstige og den naturlige eksponering. Denne forskel i materialets reaktion kan forekomme selv når forskellige xenonlamper og filterkombinationer overholder de ofte brede spektrale krav til "dagslys" for en standardtestmetode som nævnt herover.



Figur 5: Fluorescerende "sortlys"-lamper og spektrale energifordelinger iht. CIE 85 reference. Data normaliseret ved 340 nm.

Den totale UV-del af sollys omfatter kun en lille procentdel af den samlede energi som vist i tabel 1; alligevel er den ofte ansvarlig for hovedparten af fotonedbrydningen. Selv om de korte bølgelængders spektrale strålingsniveauer synes små, skal man være opmærksom på at tilsyneladende tilsvarende spektrale energifordelinger faktisk kan variere betydeligt hvad angår stråling ved kritisk korte bølgelængder. For at forbedre testkorrelationen er det derfor et vigtigt mål at få det "rigtige lys" gennem forbedret lampe- og filterteknologi, på trods af at teststandarder ofte afviser at vedtage de seneste forbedringer for at kunne forblive historisk bagudkompatible.

Nyttige radiometriske termer

Selv om fotometriske enheder såsom lux (lx) ofte bruges til at kvantificere lys som er synligt for det menneskelige øje, giver radiometriske målinger "SI-målinger" (SI = det internationale enhedssystem) over hele det elektromagnetiske spektrum. Radiometriske målinger anvendes universalt inden for vejrpåvirkning, og til de fleste undersøgelser af lysægthed og fotostabilitet. Da forholdet mellem terminologi og enheder ofte er forvirrende for personer der er uerfarne på området, vil en kort gennemgang være fordelagtig.

- **Irradians** er den indfaldende strålingseffekt over et givent område (eller simpelthen det lys der falder på et specifikt område af en overflade), typisk angivet i enheden watt pr. kvadratmeter (W/m^2).
- **Spektral irradians** er en overflades irradians pr. bølgelængdeenhed, almindeligvis angivet i watt pr. kvadratmeter pr. nanometer ($W/m^2 \cdot nm^{-1}$) eller $W/m^2 @ xx \text{ nm}$.
- **Strålingseksponering eller solindfald** er den indfaldende strålingsenergi over et specifikt område integreret over tid, eller "dosis." Enhederne er $(W/m^2) \cdot \text{tid}$ (sekunder, s), som er $(W \cdot s)/m^2$. Eftersom 1 joule (J) pr. definition = $1 W \cdot s$, vil man ved at erstatte J med $W \cdot s$ få:

$$\text{Strålingseksponeringsdosis (J/m}^2\text{)} = \text{Irradians (W/m}^2\text{)} \cdot \text{Tid (s)}$$

Det er typisk for at angive smalbånds-strålingsenergidoser (fx 340 nm, 420 nm) i "kilojoule" (faktisk kJ/m^2); bredbåndsværdier (fx 295-385 nm, 300-400 nm eller 300-800 nm, 295-2500 nm) i "megajoule" (faktisk MJ/m^2); og eksponeringsperioder i timer (h) snarere end i sekunder. Derfor kan vi erstatte $h \cdot 3600 \text{ s/h} = \text{sekunder}$ i ligningen herover, hvilket giver:

$$J/m^2 = W/m^2 \cdot 3600 \cdot (s/h)$$

For at omregne til "kilojoule" kan man fx dividere begge sider med 1000, hvilket giver den velkendte ligning:

$$kJ/m^2 = W/m^2 \cdot 3,6 \cdot h$$

For nemheds skyld skrives enheder for irradians og strålingsenergi ofte (men ukorrekt) i "kortskrift" som *pr. m²* i stedet for det teknisk korrekte *pr. (m²·nm⁻¹)*. Men i alle tilfælde skal bølgelængden (eller bølgelængdeområdet) altid specificeres for enten irradians- eller strålingsenergiværdierne for at have nogen betydning.

En "kilojoule" af 340 nm stråling er ikke det samme som en "kilojoule" af 300-400 nm stråling, og kostbare fejl begås når man overser dette. Ligeledes må bølgelængder ikke blandes i formlerne hvis de skal være gyldige. Endelig skal evt. beregnede testsluttider ud fra irradians- og strålingsenergiværdierne medregnes i den samlede testtid hvis testmetoden indeholder nogle "mørke" tidsperioder.

Lys er ikke kun en faktor ved vejrpåvirkning

Når vi prøver at besvare spørgsmålet "Hvor mange timer i et apparat til test af vejrægthed svarer til et års eksponering i Miami (eller et andet sted)?", begynder vi ofte med at sammenligne hvor lang tid det tager instrumentet at levere en tilsvarende mængde simuleret solstråling – fx "total ultraviolet stråling" (TUV) – som et års eksponering i Miami. Selv hvis vi er i stand til at opnå det, er der ikke tale om "korrelation," men snarere kun en "ækvivalent" UV-dosis. (Bemærk: termen "ækvivalent" anvendes med vilje i citationstegn for at indikere at det ikke nødvendigvis på alle måder svarer til de faktiske nedbrydningsmekanismer/-hastigheder pga. forskellen i den spektrale energifordeling, den spektrale cut-on osv., som forklaret overfor. Derfor gælder en række forbehold i forbindelse med materialevejrpåvirkning – ISO 4892-1 og ASTM G151.) Af en eller flere af følgende årsager vil man aldrig kunne garantere at identiske prøvemønstre der udsættes for den samme totale strålingseksponering fra forskellige kilder, eller gentagen eksponering fra den samme kilde, vil udvise identiske ændringer i egenskaber:

- 1. Materialer er selektivt følsomme over for bølgelængdeenergifordelingen.** Et specifikt materiale kan opføre sig anderledes når det eksponeres for kilder med forskellig spektral energifordeling, som kan ses i de tidligere viste grafer over spektralenergifordeling.
- 2. Fotokemiske reaktioner kan være temperaturfølsomme.** Alternativt kan fotoner igangsætte fotonedbrydning, men det er ofte termisk drevne sekundære reaktioner, som fx oxidering og frie radikal-reaktioner (den autokatalytiske fotooxidationscyklus), som fortsætter, og ofte resulterer i størstedelen af skaden. Temperaturerne som materialerne mærker under eksponering for naturlige betingelser, afhænger af naturen, og vil variere hver time, dag og sæson. De fleste laboratorieeksponeringer definerer en specifik sort pladetemperatur (BPT eller BST) eller kammertemperatur (CHT) med en tolerance på blot få grader. Af denne grund kan nedbrydningshastighederne variere de 2 eksponeringer imellem.
- 3. Effekten af fugt (i en hvilken som helst fase) kan forårsage fysisk eller kemisk nedbrydning under eksponeringen.** Fugtleveringen i en laboratorieeksponering kan simulere naturlige forhold ret godt, men kondensationens varighed, befugtningens hyppighed, ændringer i fugtigheden og eksponering for forurenende stoffer, som fx syrerregn, skal tages i betragtning som ekstra variabler for vejrpåvirkningsprocesserne i hhv. naturlige - og laboratorieeksponeringstest. Og prøvetemperaturen påvirker ligeledes fugten. Nedbrydning kan fortsætte alene ved reaktioner på vand (hydrolyse), eller synergetisk med lys og varme.

Spectral sammenligning mellem forskellige strålskilder der anvendes til udendørs testbetingelser

Strålskilde	Bølgelængdeområde Reference/filter System/pæretype	% stråling kontra "Total UV" (300-400 nm)						% stråling kontra UV + synligt		
		280 < λ ≤ 300	300 < λ ≤ 320	320 < λ ≤ 340	340 < λ ≤ 360	360 < λ ≤ 380	380 < λ ≤ 400	λ < 300	300 ≤ λ ≤ 400	400 ≤ λ ≤ 800
Referencespektrum	CIE 85, tabel 4	0,00	5,0	16,9	20,6	26,4	31,1	0,00	9,9	90,1
Xenonbue	Maksimal sol i Miami	0,10	6,3	18,0	21,3	26,7	27,7	0,006	9,3	90,6
	"Right Light"/kvarter	0,05	4,8	16,3	22,5	26,1	30,3	0,003	11,2	88,8
	Type S/Type S	0,48	4,8	13,3	21,3	27,4	32,8	0,04	10,5	89,4
	Xenochrome 300	0,54	6,0	14,5	21,7	25,7	31,6	0,04	10,2	89,8
Metalhalogen	XLS+ dagslys	0,02	3,3	13,2	21,9	28,0	33,6	0,00	10,0	90,0
	MHG	1,25	5,9	9,8	20,8	30,9	31,3	0,11	10,2	89,8
Fluorescerende UV	UVA-340	0,20	8,9	30,6	33,7	19,9	15,9	0,10	91,4	8,8
	UVB-313	24,54	45,7	21,2	5,4	2,7	9,5	18,55	73,1	8,3

Spectral sammenligning mellem forskellige strålskilder der anvendes til indendørs testbetingelser

Strålskilde	Bølgelængdeområde Reference/filter System/pæretype	% stråling kontra "Total UV" (300-400 nm)						% stråling kontra UV + synligt		
		280 < λ ≤ 300	300 < λ ≤ 320	320 < λ ≤ 340	340 < λ ≤ 360	360 < λ ≤ 380	380 < λ ≤ 400	λ < 300	300 ≤ λ ≤ 400	400 ≤ λ ≤ 800
Referencespektrum	Miami bag glas	0	0,38	9,7	22,8	32,4	34,7	0	7,89	92,1
Xenonbue	Type S/Natronkalk	0	1,84	11	22,1	29,4	35,7	0	10,73	89,3
	Xenochrome 320	0	0,78	8,8	22,4	31	37	0	10,63	89,4
	XLS+ dagslys bag vinduesglas	0	1,24	10,8	22,3	29,8	35,8	0	9,31	90,7

Tabel 1: Strålingsprocenter sammenlignet med "Total UV" (300-400 nm) eller UV + synligt lys (300-800 nm) for filtersystemer brugt til hhv. udendørs (øverste tabel) og indendørs (nederste tabel) testbetingelser.

Opstilling af model for og forudsigelse af nedbrydning ved vejrpåvirkning

Man har igennem årtier arbejdet på at opstille en model for, og dermed forudsige, polymerers og coatings nedbrydning ved vejrpåvirkning, og langsomt men sikkert sker der fremskridt, som det er fremgået af forskningsartikler og konferencepræsentationer gennem årene. Men der findes endnu ikke et fysisk modstykke til en "forenet feltteori" for vejrpåvirkning, og eksisterende modeller er enten kun valideret for specifikke materialer under specifikke betingelser, eller begrænset til et snævert udvalg af bestemte kommercielle formuleringer.

To grundlæggende fakta kan få opgaven med modellering til at virke næsten uoverskuelig. Det første er at især kommercielle polymerer generelt ikke er særligt rene materialer, og interne defekter samt additiver og forurenende stoffer kan påvirke nedbrydningskemi ved vejrpåvirkning fundamentalt. Det andet angår den naturlige omskiftelighed, som er en fast egenskab hos udendørs eksponeringer. Det er forvirrende at vejrpåvirkningens konstant skiftende karakter forventes at være tilstrækkeligt simuleret af kunstige testmetoder, som kræver kontrol (ved stabil tilstand) af de samme påvirkninger. Det er sandsynligt at vi aldrig vil blive i stand til at designe vejrrægthedstest, og instrumenterne til at udføre dem i, der efterligner det virkelige vejr fuldstændigt. Og jo mere vi forsøger at accelerere vejrpåvirkningen i laboratoriet, jo mere sandsynligt er det at vi giver balancen af den centrale vejrpåvirkninger fra varme, lys og fugt en forkert drejning, og mindsker korrelationen.

Men ved at planlægge hvordan man bedst påfører treenigheden af stressfaktorer til vejrpåvirkning, såsom bedre simulering af terrestrisk solstråling, og testparametre som belastningsniveauer og -cyklusser der bedre efterligner faktiske udendørs betingelser, jo mere sandsynligt er det at testresultaterne vil korrelere, og blive anset for at være pålidelige og til at stole på til kvalifikationsprøvning for vejrrægthed og forudsigelse af brugslevetiden.

Referencer

- [1] M. Roylance, D. Roylance, kapitel 14 i *Forms of Polymer Degradation Overview, Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials*, L. Hihara, R. Adler, R. Latanision redaktører, CRC Press, 2013.
- [2] Š.Chmela, kursus 4. *Fotonedbrydning af polymerer*, konference om avancerede miljørigtige polymerer, Bratislava, Slovakiet, 2013.
- [3] CIE udgivelse 85-1989, *Solar Spectral Irradiance*, 1989.
- [4] ISO 4892-1:2016 Plast – Metoder til eksponering for kunstig belysning i laboratorier – Del 1: Generel vejledning, 2016.
- [5] ASTM G151-10 Standardpraksis for eksponering af ikkemetalliske materialer i accelererede apparater der anvender laboratorielyskilder, 2010.
- [6] ISO 4892-3:2016 Plast – Metoder til eksponering for kunstig belysning i laboratorier – Del 3: Fluorescerende UV- lamper, 2016.
- [7] ASTM G154-12a Standardpraksis for betjening af fluorescerende UV-apparater til eksponering af ikkemetalliske materialer, 2012.
- [8] ISO 4892-2:2013 Plast - Metoder til eksponering for kunstig belysning i laboratorier a) Del 2: Xenonbuelamper, 2013.
- [9] ASTM G155-13, Standardpraksis for betjening af xenonapparater til eksponering af ikkemetalliske materialer, 2013.
- [10] M. Nichols, *Refining Accelerated Weathering Testing to Anticipate Outdoor Exposure Performance*, 2010 Internationalt symposium om naturlig og accelereret vejrpåvirkning, Tokyo, 2010.