

Simulering af temperaturer på overflader eksponeret for solstråling

Af Artur Schönlein og Sönke Senff, Atlas Material Testing Technology GmbH

Når emner eksponeres for og absorberer solens stråler, varmes de op. Den faktiske overfladetemperatur afhænger af materialet, emnets form og vejrfaktorer som fx sollysets styrke, lufttemperatur, vind og luftfugtighed^[1, 2].

Denne artikel præsenterer en simpel model til beregning af overfladetemperaturer. Inddata er de faktiske vejrdata og de specifikke materialeegenskaber. Der redegøres for modellens muligheder og begrænsninger.

Beregningen underbygges desuden af simulering i et klimakammer; som ofte også er den eneste mulighed for en realistisk vurdering af den forventelige overfladetemperatur under naturlige forhold. Forudsætningen er at de naturlige vejrforhold simuleres så realistisk som muligt.

Det kan gøres ved at anvende et klimakammer med en laboratorielyskilde som simulerer solens lys, og udstyr der måler temperaturer på overflader der eksponeres for det kunstige sollys. Klimakammeret valideres ved hjælp af overfladetemperaturfølere med forskellig grad af solabsorbering.

Materialetemperaturer påvirker brugsegenskaberne

De fleste materials brugsegenskaber bestemmes blandt andet af de faktiske temperaturer ved anvendelsen^[3, 4]. Materialerne kan fx være vinduesprofiler^[5] eller andre polymerbaserede materialer. Mikroklimaet på og i bygningsvægge påvirkes, alt afhængigt af materialeegenskaberne^[6], også i væsentlig grad af den absorberede solstråling. Det samme gælder for temperaturer inde i bygninger og biler.

Disse eksempler demonstrerer med al tydelighed vigtigheden af at kende temperaturerne på overflader der eksponeres for solstråling; for hvis man ved hvilke temperaturer der realistisk set kan forventes, kan man træffe diverse forholdsregler til optimering af mikroklimaet fx ved at reducere brugstemperaturen via forbedrede egenskaber for den spektrale refleksion eller et tilpasset design samt en bedre akklimatisering.

Beregning af overfladetemperaturer

Herunder ses en simpel model af hvordan man kan beregne temperaturer på overflader med simple geometrier, der eksponeres for solens stråling (se også Figur 1).

Dette er en balanceligning for den energi der absorberes eller udsendes af området pr. tidsenhed i stationær balance. Variablen der skal bestemmes i ligningen er overfladetemperaturen T_{SURFACE} . Ligningen er:

$$S + L(T_{\text{OVERFLADE}}) + H(T_{\text{OVERFLADE}}) + K(T_{\text{OVERFLADE}}) = 0 \quad \text{Ligning 1}$$

Forklaring:

S absorberet solstråling.

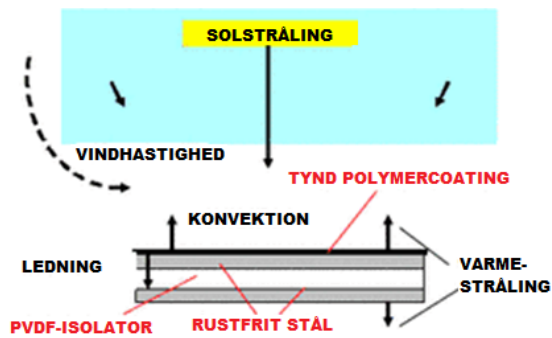
$L(T_{\text{OVERFLADE}})$ langbølget stråling og udsendelse.

$H(T_{\text{OVERFLADE}})$ varmeveksling med den omgivende luft (konvektion).

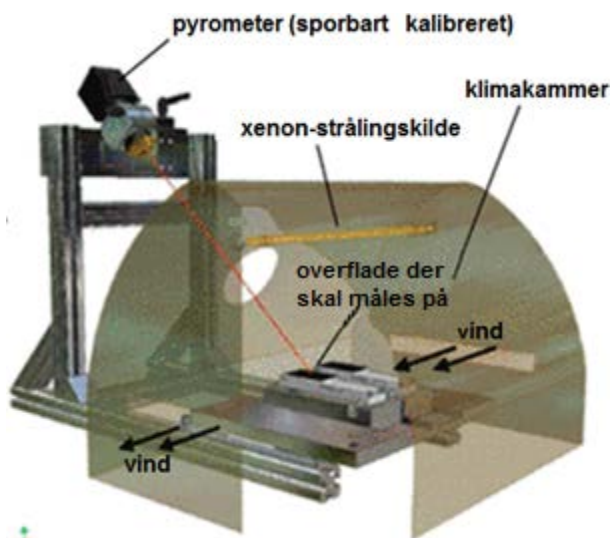
$K(T_{\text{OVERFLADE}})$ varmeveksling ved varmeledning.

Udtrykkene der afhænger af $T_{\text{OVERFLADE}}$ beskrives:

$L(T_{\text{OVERFLADE}}) = \epsilon K \cdot (A + E - \sigma \cdot T_{\text{OVERFLADE}}^4)$ og $H(T_{\text{OVERFLADE}}) = \alpha \cdot (T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}})$ samt $K(T_{\text{OVERFLADE}}) = \lambda \cdot (T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}})/d$. Den langbølgede strålingsbalance beskrives i direktivet VDI 3789 del 2^[7]: A er strålingen fra atmosfæren, E er strålingen fra miljøet, den udsendte stråling er proportional med $T_{\text{OVERFLADE}}^4$. Som absorption eller udsendelse bruges $\epsilon K = 0,9$. Koefficienten af varmeledningen betegnes af λ og isolatorens tykkelse af d .



Figur 1: Skematisk billede af en malet, isoleret rustfri stålplade som eksponeres for de naturlige vejrfaktorer solstråling, omgivende lufttemperatur og vind.



Figur 2: Skematisk billede af et klimakammer til simulering af temperaturer på overflader der eksponeres for solstråling.

T_{AMBIENT} er den omgivende lufttemperatur. For $T_{\text{OVERFLADE}} > T_{\text{AMBIENT}}$ ledes varmestrømmen fra overfladen $H(T_{\text{OVERFLADE}}) < 0$ hen imod solstrålingen $S > 0$ således at energien udsendes fra overfladen. Varmeoverføringskoefficienten $a > 0$ afhænger af vindhastigheden hvorved forholdet "tvungen turbulent luftcirkulation" ^[8] antages. Afhængigt af værdien af de øvrige betingelser reagerer ligningens løsning i større eller mindre grad på ændringer i indgangsværdien "vindhastighed." Ligningen løses med en Newton-iteration. Overfladetemperaturerne på mere komplekse emner og strømninger kan beregnes ved hjælp af proceduren i ^[9].

Klimakammer med laboratorielyskilde

Selv om et klimakammer kun kan nærme sig virkelige forhold, virker det formålstjenligt at simulere naturligt forekommende overfladetemperaturer i et klimakammer — ikke kun som et supplement til beregningen men også som en underbygning af de beregnede overfladetemperaturer. Klimakammeret skal kunne simulere virkelige vejrfaktorer så realistisk som muligt. De relevante faktorer er solstråling, lufttemperatur, vindhastighed, luftstrøm på emnet samt relativ fugtighed. Generelt er de apparater der for tiden anvendes til vejrræghedstest i laboratorier velegnede. Kravene til laboratorieudstyr til vejrræghedstest beskrives eksempelvis i ISO 4892-1 ^[10]. De specielle krav til laboratorielyskilden beskrives senere i denne artikel. Klimaapparater hvis laboratorielyskilder er placeret horisontalt over prøveemnerne foretrakkes til test af emner med komplekse former (se Figur 2). Fordelen ved sådanne kamre er at strålingen på den vandrette prøveoverflade ikke (eller kun i minimal grad) afhænger af refleksionen fra prøven. Prøveemnets overfladetemperatur kan måles berøringsfrit, fx med et pyrometer.

Simulering af solstrålingen

Effekten af solstråling (globalstråling) er en af de vigtigste vejrfaktorer i forbindelse med simulering af overfladetemperaturer på emner der eksponeres for solstråling. Solstrålernes spektrale bestrålingsstyrke afhænger af bølgelængden, og varierer kraftigt både lokalt og i tid på jordens overflade. En spektral energifordeling beregnet efter CESORA ^[11] eller i overensstemmelse med ^[7] kan bruges til at beregne overfladetemperaturer efter Ligning 1.

Hvilken spektralfordeling er tilstrækkelig til at simulere overfladetemperaturer i et klimakammer? Først og fremmest skal laboratorielyskilden have et spektrum der ligger så tæt som muligt på solen over hele det spektrale område (UV, VIS, IR). Bestrålingsstyrker beregnet efter CESORA ved middagstid på forskellige steder d. 21. juni (se Tabel 1) viser at en laboratorielyskilde skal have ca. 60 % af den totale bestrålingsstyrke i bølgelængdeområdet 300-800 nm. Denne betingelse kan i tilfredsstillende grad opfyldes med filtreret xenon- og metalhalogenstråling (se spektre på Figur 3).

Validering af et klimakammer med laboratorielyskilde

Følere som reelt er i overensstemmelse med specifikationen for de sorte og hvide standardfølere i ISO 4892-1^[10], bruges til at kontrollere laboratorielyskilden. Kun overfladerne males med forskellige farver. Selv om de forskellige RAL-farver ligner hinanden eller er identiske, er der tydelig forskel på den spektrale refleksion fra de 2 anvendte sæt – især over 800 nm (se Figur 4 og 5). Den beregnede solabsorption for de 2 sæt kan ses i Tabel 2 (kolonne 4 og 5). Ved Sæt B ses en ændring af rækkefølgen (orange og rød).

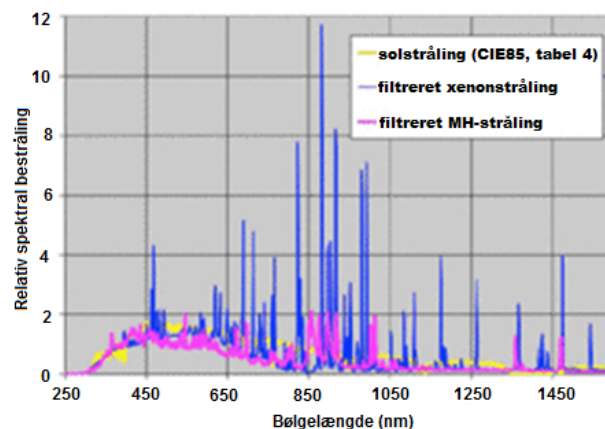
De farvede overfladetemperaturfølere er helt enkelt 1 mm tykke rustfri stålplader (RAL-farver) med 5 mm tyk PVDF-isolering. Temperaturen måles med intervaller på 0,5 sek. Gennemsnitsværdien registreres derefter hvert minut. Der kan gemmes data for i alt 100 timer. Følerne kalibreres iht. en særlig procedure i overensstemmelse med ISO 17025^[14].

Disse overfladetemperaturfølere kan fx bruges til at foretage udendørs målinger i referenceklimaerne i Florida og Arizona og sammenligne disse med målinger taget med en laboratoriestrålekilde i et klimakammer. Til dette formål skal følgende udendørs vejrdata registreres foruden overfladetemperaturerne: omgivende lufttemperatur, vindhastighed, relativ fugtighed og, med passende drejning mod jordens overflade (0°, 45°, 90°), den totale bestrålingsstyrke i bølglængden fra 300 nm til 3.000 nm.

De vejrdata der måles udendørs, kan sammenlignes direkte med data fra et klimakammer. Proceduren for dette er som følger:

1. Måling af udendørs overfladetemperaturer og vejrdata.
2. Beregning af 10-minutters gennemsnit (pga. mulige udsving).
3. Indstilling af de målte vejrdata (10-minutters gennemsnit) i klimakammeret (total bestrålingsstyrke, omgivende lufttemperatur, relativ fugtighed, vindhastighed).
4. Måling af overfladetemperaturer i klimakammer i stationær balance.
5. Sammenligning mellem overfladetemperaturer fra de farvede følere og overfladetemperaturer målt udendørs (10-minutters værdier).

De absolutte temperaturer samt rækkefølgen af overfladetemperaturer i klimakammeret og udendørs, kan sammenlignes ved hjælp af denne procedure.



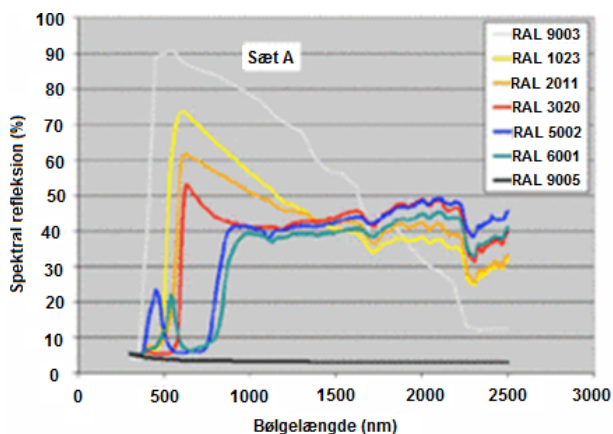
Figur 3: Spektre af filtreret xenon- og metalhalogen (MH)-stråling samt solstrålingsspektraler iht. CIE85, tabel 4^[12] genberegnet efter CESORA^[13].

Tabel 1: Bestrålingsstyrker i forskellige bølglængdeområder beregnet efter CESORA^[11] for referenceklimaerne i Arizona og Florida samt for en typisk fodboldbane i Mellemeuropa og Cape Town (VM i fodbold 2010). Spektre beregnes ved middagstid – hvor solen står højest på himlen – d. 21. juni. Tabellens sidste kolonne indeholder bestrålingsstyrker for referencespektret ved laboratorietest af vejrægthed i CIE85, Tabel 4^[12] beregnet efter CESORA^[13].

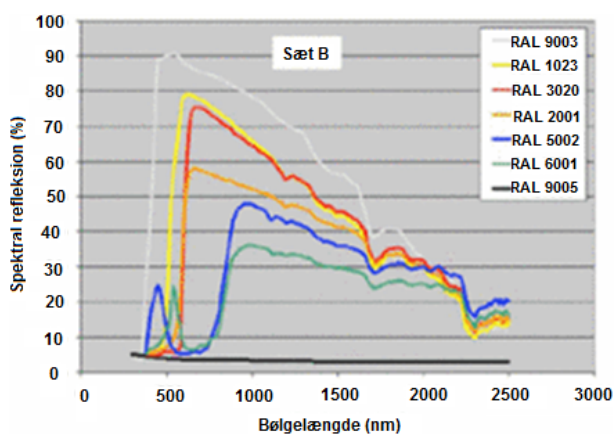
Bølglængde-område (nm)	Arizona E (W/m ²)	Florida E (W/m ²)	Frankfurt E (W/m ²)	Cape Town E (W/m ²)	CIE85 Tabel 4 E (W/m ²)
280-300	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
300-400	60	62	48	62	66
400-800	566	584	468	567	617
800-4000	420	387	350	430	434
280-4000	1046	1033	866	1059	1117

Tabel 2: Coatingens solabsorberende egenskaber til måling af overfladetemperaturer. Anden og tredje række: RAL-farver; fjerde og femte række: procentdel af absorberet solstråling. Procentdelen af absorberet stråling beregnes ud fra den målte spektralrefleksion, og globalstrålingen beregnes efter CESORA^[11] (fx i september).

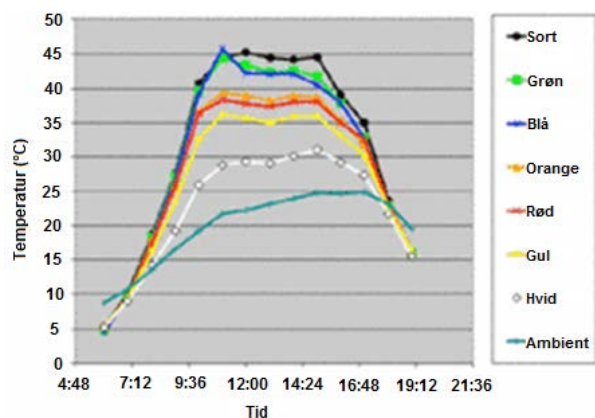
Farve	Hvid	Gul	Orange	Rød	Blå	Grøn	Sort
RAL (Sæt A)	9003	1023	2011	3020	5002	6001	9005
RAL (Sæt B)	9003	1023	2011	3020	5002	6001	9005
Absorption (A)	25 %	53 %	62 %	70 %	79 %	82 %	96 %
Absorption (B)	25 %	48 %	63 %	56 %	77 %	81 %	96 %



Figur 4: Spektral refleksion fra "Sæt A" af de farvede overfladetemperaturfølere til validering af et klimakammer.



Figur 5: Spektral refleksion fra "Sæt B" af de farvede overfladetemperaturfølere til validering af et klimakammer.



Figur 6: Daglig bane (10-minutters gennemsnit pr. time) for Sæt B af de farvede plader i Arizona d. 28. marts 2009: en delvist overskyet dag med kraftig vind om morgenen.

Resultater fra udendørs målinger

Vejrdata og overfladetemperaturer der registreres udendørs, er stærkt svingende alt afhængigt af vejr-situationen (fx vindstød, skyer). 10-minutters gennemsnit beregnes for at forenkle evalueringen. Figur 6 viser en daglig kurve for Sæt B af de farvede plader. Temperaturadskillelsen mellem de forskellige malede plader starter og slutter tydeligvis så snart globalstrålingen når omtrent 300 W/m^2 . Dette er tilfældet mellem kl. 8 og 9 og mellem kl. 16 og 17. Det skal bemærkes at vejrdata, som er registreret derudover, ofte ikke registreres på det samme sted som prøveemnernes materialetemperatur (i vores tilfælde farvede plader), så det er meget muligt at mikroklimaet kan afvige dér. Tabel 3 viser en liste over 10-minutters gennemsnittene sammen med de overfladetemperaturer der er beregnet ved hjælp af Ligning 1 i Arizona på forskellige tidspunkter af dagen d. 4. september 2008. De målte vejrdata bruges som inputvariabler. De beregnede temperaturer er af samme størrelse og i samme rækkefølge som de faktisk målte temperaturer. Der afsløres mindre og lidt større afvigelser der afhænger af farven og tiden og som kan forklares med utilstrækkelige lokale vejrdata samt den simple beregningsmodel (se afsnit 2). Andre eksempler på beregnede overfladetemperaturer kan ses i [2].

Resultater fra målinger i et klimakammer

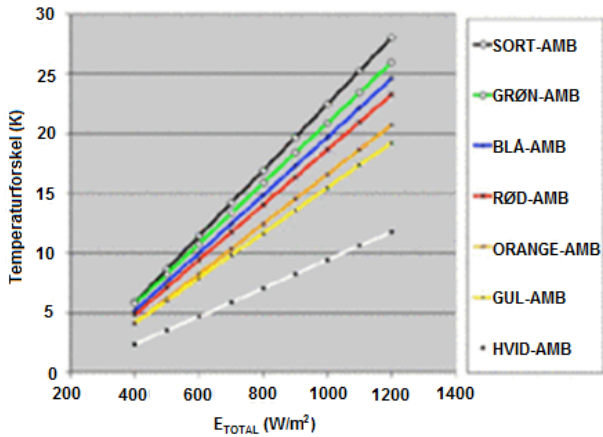
Xenon- og metalhalogenlamper giver en temperaturadskillelse der stiger i takt med bestrålingsstyrken (eksempler: Figur 7, Sæt A og Figur 8, Sæt B) som også kan påvirkes af ændringen i lufthastigheden (luftstrømmen på emnet) over overfladen.

En ændring i den omgivende lufttemperatur får overfladetemperaturen på bestrålede emner til at stige tilsvarende [15], [16]. Derfor kan forskellige overfladetemperaturer målt i hhv. laboratorieapparater og udendørs sammenlignes med hinanden når den omgivende lufttemperatur (målt iht. meteorologiske principper 2 m over jordens overflade med strålingsbeskyttelse) trækkes fra den målte overfladetemperatur ($\Delta T = T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}}$, ofte omtalt som COLOR - AMB i teksten).

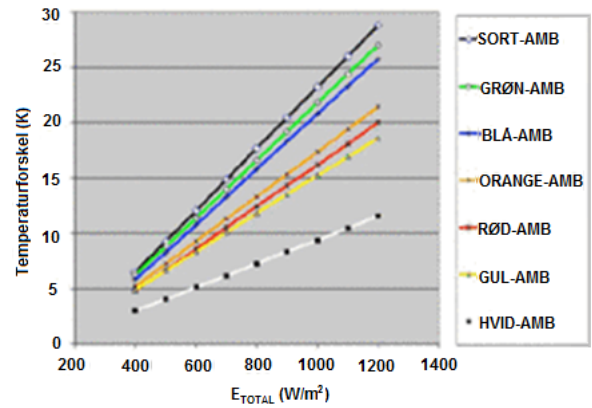
Sammenligning mellem overfladetemperaturer målt hhv. udendørs og i et klimakammer med laboratorielyskilde

Overfladetemperaturer der er målt hhv. udendørs og i klimakammeret, sammenlignes med hinanden for at validere laboratorielyskilden. Adskillige daglige kurver evalueres til dette formål. Figur 9 viser et eksempel fra d. 4. september 2008 kl. 13. Den samme rækkefølge og størrelse som udendørs temperaturer reproduceres af xenon- og MH-stråling på det farvede Sæt A.

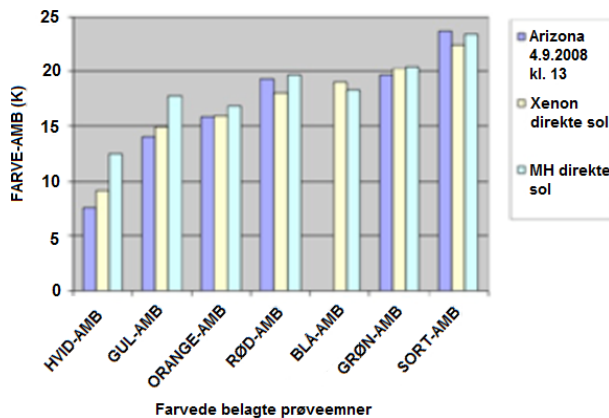
Sammenligningen med Sæt B (Figur 10) viser en god overensstemmelse mellem rækkefølgen og de absolutte temperaturer fra hhv. målingen i Arizona d. 30. marts 2009 og i xenon-klimakammeret. I MH-klimakammeret er rækkefølgen af overfladetemperaturerne for hhv. den røde og den orange temperatur forskellige. Dette kan skyldes temperaturforskelle på måleniveauet i apparatet. Også udendørs kan rækkefølgen lejlighedsvis være forskellig i tilfælde af mindre temperaturforskelle (fx med orange/rød eller blå/grøn) der skyldes voldsomme svingninger (vindstød eller skyer på målestedet). Dette forekommer især ved totale bestrålingsstyrker på $<600 \text{ W/m}^2$ (fx: Tabel 4, Sæt B, kl. 16).



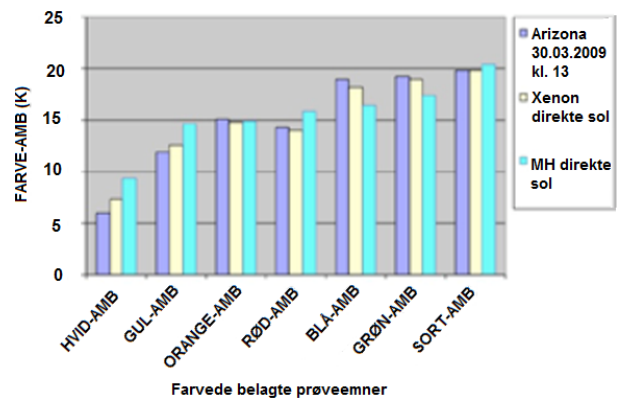
Figur 7: Overfladetemperaturforskelle ($DT = T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}} = \text{COLOR} - \text{AMB}$) af farvede plader (Sæt A) i et laboratorieapparat til vejrgæthedstest med xenonlampe ved lav lufthastighed, ca. 1m/s (Xenotest® Beta, filter XENOCHROME® 300 (direkte solstråling iht. CIE85, Tabel 4)).



Figur 8: Overfladetemperaturforskelle ($\Delta T = T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}} = \text{COLOR} - \text{AMB}$) for farvede plader (Sæt B) i et laboratorieapparat til vejrgæthedstest med xenonlampe ved lav lufthastighed, ca. 1m/s (Xenotest Beta, filter XENOCHROME 300 (direkte solstråling iht. CIE85, Tabel 4)).



Figur 9: $T_{\text{OVERFLADE}} - T_{\text{AMBIENT}} = \text{FARVE} - \text{AMB}$ af farvede plader (Sæt A) i Arizona d. 4. september 2008 kl. 13 i et xenon- og et MH-laboratorieapparat til vejrgæthedstest. Den totale bestrålingsstyrke E_{TOTAL} er 990 W/m^2 . Vindhastighederne er mellem 3 m/s og 1,5 m/s for Arizona og xenon, for MH ca. 0,2 til 0,4 m/s.



Figur 10: $T_{\text{SURFACE}} - T_{\text{AMBIENT}} = \text{COLOR} - \text{AMB}$ MG af farvede plader (Sæt B) i Arizona d. 30 marts 2009 kl. 13 i et xenon- og et MH-laboratorieapparat til vejrgæthedstest. Den totale bestrålingsstyrke E_{TOTAL} er 1070 W/m^2 . Vindhastighederne er mellem 3 m/s og 6 m/s for Arizona, for xenon ca. 3 m/s og for MH ca. 0,2 til 0,4 m/s. For MH skulle den totale bestrålingsstyrke indstilles til 850 W/m^2 for at målingen kunne opnå de specificerede temperaturer. Det skyldes at det ikke var muligt at øge lufthastigheden i det specielle apparat.

Tabel 3: Målte (målt) og beregnede (bereg.) overfladetemperaturer efter Ligning 1 for Sæt A og vejrparametre på forskellige tidspunkter af dagen i Arizona på en skyfri dag d. 4. september 2008 (10-minutters gennemsnit).

Enhed	Dato	4. september 2008				
h	Klokken	9:00	11:00	13:00	15:00	16:00
W/m ²	E _{TOTAL}	593	939	990	743	523
°C	T _{AMBIENT}	32,3	36,2	38,5	39,8	39,5
%	U	16,5	17,4	11,6	8,6	9,1
m/s	Vind	2,7	2,4	1,7	3,0	2,1
	Hvid (målt)	37,4	43,5	46,1	45,0	44,0
	Hvid (bereg.)	36,2	43,0	46,4	44,4	43,2
	Gul (målt)	40,9	49,8	52,5	49,5	47,8
	Gul (bereg.)	39,2	47,9	52,0	48,0	46,0
	Orange (målt)	42,0	50,4	54,4	50,5	48,0
	Orange (bereg.)	40,4	49,4	53,8	49,1	46,9
	Rød (målt)	44,2	51,9	57,8	53,5	49,7
	Rød (bereg.)	41,0	50,8	55,4	50,1	47,7
	Blå (målt)	Målte data er utilgængelige				
	Blå (bereg.)	42,0	52,4	57,2	51,3	48,6
	Grøn (målt)	44,7	55,4	58,2	53,0	51,1
	Grøn (bereg.)	42,3	52,9	57,8	51,7	58,9
	Sort (målt)	45,9	55,9	60,2	55,3	52,1
	Sort (bereg.)	43,7	55,3	60,6	53,5	50,3

Tabel 4: $T_{SURFACE} - T_{AMBIENT} = COLOR - AMB$ af farvede plader (Sæt B) i Arizona d. 30. marts 2009 kl. 9 og kl. 16 i et xenon- og et MH-laboratorieapparat til vejrægthedstest: en fin, skyfri dag.

	ΔT (K)	Arizona	Xenon direkte	MH direkte
E_{TOTAL} = 590 W/m²	Hvid-UMG	2,7	3,7	5,3
	Gul-UMG	6,0	6,4	8,6
V_{VIND} = 4,0 m/s	Orange-UMG	8,1	7,4	8,8
	Rød-UMG	7,9	7,2	9,6
	Blå-UMG	9,0	9,2	8,7
	Grøn-UMG	9,4	9,5	10,2
Kl. 9	Sort-UMG	11,3	9,7	12,4
	ΔT (K)	Arizona	Xenon direkte	MH direkte
E_{TOTAL} = 587 W/m²	Hvid-UMG	3,9	4,97	5,2
	Gul-UMG	7,5	8,11	8,6
V_{VIND} = 2,5 m/s	Orange-UMG	9,7	9,34	8,8
	Rød-UMG	10,3	9,04	9,6
	Blå-UMG	11,1	11,51	8,6
	Grøn-UMG	11,2	11,86	10,2
Kl. 16	Sort-UMG	15,6	13,10	12,3

Resumé

Overfladetemperaturstigningen forårsaget af globalstråling begynder så snart solstrålingen når materialets overflade. Ved eksempelvis $E_{TOTAL} = 360 \text{ W/m}^2$ er den maksimale overfladetemperatur allerede varmet op til ca. 5 K (afhængigt af vindhastigheden på målestedet) over den omgivende lufttemperatur.

Overfladetemperaturerne der er målt udendørs, kan estimeres effektivt ved hjælp af en simpel model (Ligning 1). De største usikkerhedsfaktorer er det utilstrækkelige kendskab til vindhastigheder på målestedet samt varmeoverføringskoefficienten for konvektionen som ofte kun kan være en god tilnærmelse til referencerne.

Ved en given materialegeometri og solabsorption afhænger temperaturforskellen $\Delta T = T_{OVERFLADE} - T_{AMBIENT}$ kun af den totale bestrålingsstyrke og den fri og/eller tvungne konvektion (vindhastighed, vindretning).

Laboratorieapparatet til vejrpåvirkning med xenon- og metalhalogenlamper kan effektivt reproducere den naturlige temperaturadskillelse mellem farvede plader når vejrparametrenes bestrålingsstyrke (UV+VIS ca. 60 % af den totale stråling), vindhastighed og omgivende lufttemperatur simuleres på passende vis. Dette gælder ikke kun ved middagstid men også for hele den daglige bane.

Referencer

- [1] W.D. Ketola, R.M. Fischer, "Surface Temperatures of Materials in Exterior Exposures and Artificial Accelerated Tests," *Accelereret og Udendørs Holdbarhedstest af Organiske Materialer*, ASTM, STP 1202, 1994.
- [2] A. Schönlein, O.Haillant, S. Senff, "Surface Temperatures of Color Painted Specimens in Natural and Artificial Weathering with Different Laboratory Light Sources for Optimized Testing and Investigations," 4. europæiske symposium om vejrægthed, Budapest, september 2009
- [3] Robert L. Feller; "Accelerated Aging: Photochemical and Thermal Aspects," *The Getty Conservation Institute*, 1994.
- [4] Jan F. Rabek, "Polymer Photodegradation, Mechanisms and Experimental Methods," *Chapman & Hall, University Press, Cambridge*, 1995.
- [5] H. K. Hardcastle, "Predicting Maximum Field Service Temperatures from Solar Reflectance Measurements of Vinyl," *Journal of Vinyl & Additive Technology*, september 1998, vol. 4, nr. 3.
- [6] O. Frank, N. Rüther, "Zeitgeraffte Alterung von Putzen und Untersuchung der Befallswahrscheinlichkeit von Putzen durch Algen mittels versuchstechnischer Umweltsimulation," 38. årlige GUS-konvent, marts 2009.
- [7] VDI 3789 del 2, "Interactions between Atmosphere and Surfaces – Calculation of Short-wave and Long-wave Radiation," *VDI-håndbog Reinhaltung der Luft*, volume 1, 1994.
- [8] VDI Heat Atlas, "Berechnungsblätter für den Wärmeübergang," 6. udvidede udgave, VDI-forlag, 1991.
- [9] T. Reichert u.a., "Ist eine virtuelle Produktqualifikation für Kunststoffbauteile möglich? - Sachstandsbericht aus dem Verbundforschungsbericht ViPQuali," 38. årlige GUS-konvent, marts 2009.
- [10] ISO 4892-1: "Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 1: General Guidance," 2007
- [11] A. Kühlen, B. Severon, "Kalkulation solarer Strahlungsparameter in der Materialprüfung," *Society for Environmental Simulation e.V.*, 2004.
- [12] Publ. nr. CIE85 1. udgave 1989, *Teknisk rapport "Solar Spectral Irradiance"*; 1989.
- [13] A. Schönlein, "Künstlicher Sonnenschein – Simulation der Sonnenstrahlung in Bewitterungsgeräten," *Farve og Lak*, september 2009, 115. udgave.
- [14] A. Schönlein, "Traceable Calibrated Surface Temperature Sensors for Weathering," 7. internationale symposium om vejrægthed, ISW, Yokohama, oktober 2008.
- [15] K. Scott, Z. Zhang, W. Buttner, "Knowing T," *Eur. Coat. J.*, 11, 2006.
- [16] W.D. Ketola, R.M. Fischer, K.P. Scott, R. Quinn, "Surface Temperatures of Materials Exposed in a Xenon-Arc Device Controlled with Different Black Panels"; forberedet til ISO/TC61/SC6/WG2, september 2000.