

Bescherming tegen warmtestraling van procesoperators in beschermende kleding

Versie: 1.0, 20 februari 2020



Instituut Fysieke Veiligheid
Facilitair Dienstencentrum
Postbus 7112
2701 AC Zoetermeer
Zilverstraat 91, Zoetermeer
www.ifv.nl
info@ifv.nl
079 330 46 00

Colofon

Opdrachtgever: NEN
Contactpersoon: Paula Bohlander
Titel: Bescherming tegen warmtestraling van procesoperators in
beschermende kleding
Datum: 20 februari 2020
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: Ronald Heus, Kalev Kuklane, Douwe Mol, Boris Kingma
Projectleider: Ronald Heus
Review: Ricardo Weewer
Eindverantwoordelijk: Piet Verhage

Samenvatting

Vanwege de herziening van de richtlijn PGS 29 (Publicatiereeks Gevaarlijke stoffen '29, Richtlijn voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks) is het IFV verzocht validatie-onderzoek met proefpersonen uit te voeren naar de veilige stralingscontouren voor procesoperators in beschermende kleding.

In de huidige handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven is gesteld dat men bij warmtestraling tot maximaal 1 kW/m^2 handelingen mag uitvoeren bij een beginnend incident. De vraag die in dit onderzoek beantwoord diende te worden was of procesoperators gedurende een beperkte tijdsduur (≤ 5 minuten) aan hogere stralingsniveaus kunnen worden blootgesteld dan de huidige op model- en manikinberekeningen gebaseerde limiet van $1,0\text{ kW/m}^2$, zonder dat daarbij de kritische huidtemperatuur van 43 °C wordt overschreden. Hiervoor is een experimentele studie uitgevoerd met 12 proefpersonen in beschermende kleding. Zij zijn maximaal 5 minuten blootgesteld aan stralingsniveaus van $1,5$, $2,0$ en $2,5\text{ kW/m}^2$, waarbij de temperaturen op 5 verschillende huidlocaties zijn gemeten.

De resultaten lieten zien dat in tien van de twaalf gevallen de maximale blootstellingstijd bij $1,5\text{ kW/m}^2$ werd bereikt zonder dat men de kritische huidtemperatuur van 43 °C bereikte of dat men de blootstelling als pijnlijk ervaarde. Twee proefpersonen moesten voortijdig stoppen vanwege het bereiken van een huidtemperatuur (dijbeen) van 43 °C . Bij $2,0\text{ kW/m}^2$ waren slechts twee van de proefpersonen in staat 5 minuten vol te houden, maar met een gemiddelde blootstellingstijd van 3 minuten voor alle proefpersonen zouden nog wel kortdurende handelingen kunnen worden uitgevoerd om een beginnend incident te beheersen. Bij een warmtestraling van $2,5\text{ kW/m}^2$ is het niet meer mogelijk om hulpverleningshandelingen uit te voeren met beschermende kleding voor procesoperators en moet men de omgeving met deze warmtestraling zo snel mogelijk verlaten.

Geconcludeerd kan worden dat de huidige gebruikte EN-ISO 11612 (2015) gecertificeerde beschermende kleding voor procesoperators voldoende bescherming biedt om huidverbranding te voorkomen tijdens kortdurende activiteiten tot 5 minuten bij stralingsintensiteiten van $1,5\text{ kW/m}^2$. Dezelfde kleding biedt ook nog voldoende bescherming gedurende 3 minuten bij $2,0\text{ kW/m}^2$. Zodoende kan het, in de 'Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven', gestelde maximale stralingsniveau voor beschermende kleding voor procesoperators op basis van het uitgevoerde validatieonderzoek worden bijgesteld van $1,0\text{ kW/m}^2$ naar $1,5\text{ kW/m}^2$.

Summary

Because of the revision of the PGS 29 guideline (*'Publicatiereeks Gevaarlijke stoffen '29, Richtlijn voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks'*), the Institute for Safety has been requested to perform a validation study with human subjects to determine safe radiation contours for process operators in protective clothing. The current guideline on maximum allowable levels of heat radiation for short-term deployment (maximum 5 minutes) of (company) firefighters and process operators at industrial companies states that activities may be carried out in the event of a starting incident at a maximum heat radiation of 1.0 kW/m². The question to be answered in this study was whether process operators could be exposed to higher radiation levels for a limited period of time (≤ 5 minutes) than the current on model and mannikin calculations based limit, without exceeding the critical skin temperature of 43 °C.

For this, an experimental study with 12 human subjects dressed in protective clothing was conducted. They have been exposed to radiation levels of 1.5, 2.0 and 2.5 kW/m² for a maximum of 5 minutes, while temperatures were measured at 5 different skin locations. The results showed that for ten of the twelve subjects the maximum exposure time at 1.5 kW/m² was achieved without reaching the critical skin temperature of 43 °C or experiencing the exposure as painful. Two subjects had to stop before maximum exposure time is reached due to a measured skin temperature of 43 °C. At 2.0 kW/m², only two of the subjects were able to sustain the 5 minutes exposure time. However with an average exposure time of 3 minutes at that heat radiation intensity for all subjects, short-term actions could still be performed to control a starting incident. At a heat radiation of 2.5 kW/m², it cannot be recommended to carry out fire and rescue operations with protective clothing for process operators and one must leave that specific environment as quickly as possible.

It can be concluded that the currently used, EN-ISO 11612 (2015) certified, protective clothing for process operators offers sufficient protection to prevent skin burns during short-term activities for up to 5 minutes at radiation intensities of 1.5 kW/m². The same clothing also offers sufficient protection for 3 minutes at 2.0 kW/m². For now, based on the validation study, the maximum radiation level for protective clothing for operators as set in the guidance (*'Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven'*) can be adjusted from 1.0 kW/m² to 1.5 kW/m².

Inhoud

1	Inleiding	7
2	Methode en materialen	9
2.1	Algemeen	9
2.2	Proefpersonen	9
2.3	Ethische overwegingen	10
2.4	Meetdesign	10
2.5	Kleding	14
2.6	Analyse data	15
3	Resultaten	16
3.1	Blootstellingstijd	16
3.2	Huidtemperaturen	17
3.3	Subjectieve metingen	18
4	Discussie	22
5	Conclusies en aanbevelingen	24
5.1	Conclusies	24
5.2	Aanbevelingen	24
	Referenties	25

1 Inleiding

Vanwege de herziening van de richtlijn PGS 29 (PGS29, 2016) is er behoefte aan validatie van eerder uitgevoerd onderzoek (den Hartog & Heus, 2006) (Heus & Denhartog, 2017) naar veilige werkomstandigheden van first responders bij werkzaamheden met een hoge warmtestralingsintensiteit.

Procesoperators in de petrochemische industrie hebben een belangrijke rol in het controleren of processen succesvol verlopen en indien nodig zullen zij ingrijpen. Bij verstoringen en incidenten is een procesoperator als eerste ('first responder') op de plaats incident en kan indien nodig maatregelen nemen ter voorkoming van uitbreiding van een incident. Dat betekent dat een procesoperator blootgesteld kan worden aan gevaarlijke omstandigheden en dat kan alleen als daartoe de benodigde persoonlijke beschermingsmiddelen beschikbaar zijn gesteld door de werkgever. Tijdens een beginnende brand kunnen het dichtdraaien van een afsluiter of het plaatsen van een monitor noodzakelijke activiteiten zijn, waarbij een procesoperator mogelijk wordt blootgesteld aan warmtestraling.

In een studie met proefpersonen wordt daarom onderzocht of de beschermende kleding van procesoperators in de petrochemische industrie bij eerder gestelde limietwaarden (Meinster, 2016) daadwerkelijk voldoende beschermt om kortdurende handelingen tot 5 minuten uit te voeren ter voorkoming van uitbreiding van een incident zonder dat men zichzelf in gevaar brengt. Na deze eerste noodzakelijke acties zal worden gewacht op brandweerpersoneel dat beter is toegerust om een incident te bestrijden. Brandweerpersoneel heeft nl. de beschikking over beschermende kleding (EN469, 2006) met een hogere isolatiewaarde en beschikt ook over onafhankelijke ademhalingsbescherming. Met de beschikbare meetopstelling was het niet mogelijk om de maximale stralingsintensiteit waaraan adequaat beschermd brandweerpersoneel kan worden blootgesteld in dit onderzoek met proefpersonen te valideren.

Het doel van dit validatie-onderzoek is om experimenteel vast te stellen of procesoperators in de praktijk in staat zijn om kortdurende handelingen (tot 5 minuten) uit te voeren bij een beginnend incident om te voorkomen dat het incident snel uitbreidt. De tot op heden gehanteerde veilige waarde voor blootstelling is $1,0 \text{ kW/m}^2$. In dit onderzoek worden proefpersonen blootgesteld aan warmtestraling met een intensiteit van $1,5 \text{ kW/m}^2$, $2,0 \text{ kW/m}^2$ en $2,5 \text{ kW/m}^2$.

De vraagstelling van dit onderzoek is of procesoperators gedurende een beperkte tijdsduur (≤ 5 minuten) aan hogere stralingsniveaus kunnen worden blootgesteld dan de huidige gestelde limiet van $1,0 \text{ kW/m}^2$, zonder dat daarbij de kritische huidtemperatuur van $43 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt overschreden. Bovenstaande kritische huidtemperatuur van $43 \text{ }^\circ\text{C}$ is gekozen als veiligheidsmarge, omdat de in de wetenschappelijke literatuur vermelde ondergrens voor huidverbranding bij $44 \text{ }^\circ\text{C}$ ligt (Hatton & Halfdanarson, 1982) (Stoll & Chianta, 1969). Hoewel in sommige publicaties huidverbranding pas ontstaat wanneer de huidtemperatuur boven de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ stijgt (Heus, Wammes, & Havenith, 1994). Ter ondersteuning van de temperatuur- en

tijdmetingen is de proefpersonen aan het einde van de blootstellingstijd gevraagd naar de beleving van temperatuur, comfort en pijn.

2 Methode en materialen

2.1 Algemeen

In een experimentele validatiestudie zijn proefpersonen blootgesteld aan verschillende warmtestralingsintensiteiten om aan de hand van de stijging van de huidtemperatuur te bepalen of de bestaande veilige stralingscontouren voor procesoperators toereikend dan wel te conservatief zijn. De blootstelling aan warmtestraling is eerder beschreven als een standaard onderdeel van een ergonomische testbatterij voor beschermende kleding (Havenith & Heus, 2004).

2.2 Proefpersonen

De experimenten zijn uitgevoerd met twaalf proefpersonen van de Gezamenlijke Brandweer (GB) die zich vrijwillig hebben aangemeld. De proefpersonen zijn alle opgeleid als manschap, omdat de vereiste was dat zij ervaring moesten hebben met blootstelling aan hoge temperaturen. De kenmerken van de proefpersonen staan vermeld in Tabel I.

Tabel I Proefpersonen kenmerken

PP	Sexe	Leeftijd (jr)	Lengte (cm)	Gewicht (kg)	Kleding
1	Vrouw	19	176,0	80,4	Blauw
2	Man	58	186,0	99,3	Blauw
3	Man	43	171,0	87,0	Blauw
4	Man	58	176,0	85,8	Blauw
5	Man	29	198,0	118	Blauw
6	Man	38	178,5	103,8	Rood
7	Man	50	179,6	83,0	Blauw
8	Man	39	185,0	89,5	Rood
9	Man	31	175,5	90,2	Rood
10	Man	21	183,0	78,7	Rood
11	Man	27	186,0	112,0	Rood
12	Man	42	183,0	89,7	Blauw
Gemiddeld		38 ± 13	181,5 ± 7,1	93,1 ± 12,5	

2.3 Ethische overwegingen

Het onderzoek is voorgelegd aan en goedgekeurd door de Toetsingscommissie Proefpersoonexperimenten van TNO. De proefpersonen zijn voorafgaand aan het experiment volledig geïnformeerd over het doel van het onderzoek en de mogelijk risico's. Zij mochten na invulling van een vooraf ingevulde en door een arts getoetste gezondheidsverklaring deelnemen aan het onderzoek. Bij aanvang van de metingen zijn zij geïnformeerd over de procedures en hebben zij een schriftelijke toestemmingsverklaring getekend met daarin opgenomen dat zij te allen tijde zonder opgaaf van redenen het onderzoek mochten staken.

2.4 Meetdesign

In de klimaatkamers van TNO in Soesterberg zijn de proefpersonen in een willekeurige volgorde (Tabel II) drie keer maximaal 5 minuten blootgesteld aan warmtestraling van een infrarood stralingspaneel. Tijd tussen twee sessies voor één proefpersoon was twee uur, waarbij de proefpersonen rustig zaten in een wachtruimte met een constante kamertemperatuur.

Tabel II Gerandomiseerde volgorde van blootstelling aan verschillende stralingsintensiteiten van de proefpersonen

Sessie Proefpersoon	1	2	3
	Straling kW/m ²	Straling kW/m ²	Straling kW/m ²
1	1,5	2,0	2,5
2	2,0	2,5	1,5
3	2,5	1,5	2,0
4	2,5	2,0	1,5
5	1,5	2,5	2,0
6	2,0	1,5	2,5
7	2,0	1,5	2,5
8	2,5	2,0	1,5
9	1,5	2,5	2,0
10	1,5	2,5	2,0
11	2,5	2,0	1,5
12	2,0	1,5	2,5

2.4.1 Test setup

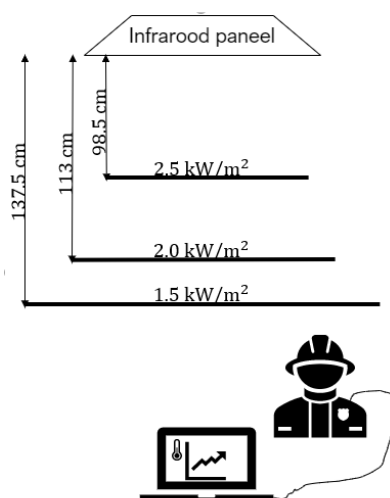
De proefpersonen werden blootgesteld aan warmtestraling gegenereerd door een 11x2 infrarood paneel (Elstein FSR 400) systeem (Fig. 1). De afmetingen van het paneelsysteem zijn 150x50 cm, waarbij het onderste paneel 21 cm boven de vloer zit. Elk paneel straalt maximaal 25,6 kW/m² (500 °C bij 400 W) uit bij een stralingshoek van 90° (keramische infrarood paneelradiatoren). Door de afstand van de proefpersonen ten opzichte van het paneelsysteem te variëren, konden de verschillende stralingsintensiteiten worden bereikt. De juiste afstanden zijn vastgesteld in eerdere testen met een WBGT-meetinstrument ('wet bulb globe temperature'¹) (Fig. 1), waarbij de (zwarte) bol-temperatuur gerelateerd is aan de stralingsintensiteit.

¹ WBGT is een gewogen gemiddelde van de globetemperatuur, de luchttemperatuur en de natteboltemperatuur. De globetemperatuur of (zwarte) bol-temperatuur is hierbij een maat voor de door mensen ervaren temperatuur ten gevolge van warmtestraling.



Figuur 1 Stralingspaneel

De afstanden zijn te vinden in het schematische overzicht van de meetopstelling in figuur 2. Om klimaatverschillen door opwarming van de ruimte door het stralingspaneel te voorkomen, vond het experiment plaats in een geregelde klimaatkamer ingesteld op een omgevingstemperatuur van 20 °C en 50 % relatieve vochtigheid. De proefpersonen waren uitgerust met huidtemperatuursensoren (thermistors) aangesloten op een MSR145 (MSR Electronics, Zwitserland) voor continue registratie van huidtemperaturen (borst, buik, bovenarm, dijbeen en knie) en droegen de normale beschermende kleding voor procesoperators inclusief een helm en zonnebril. Hoewel in de praktijk straling van rondom kan komen is voor dit onderzoek in verband met de veiligheid van de proefpersonen gekozen voor alleen aanstraling aan de voorzijde. Dat betekent ook dat de warmtestraling de gehele blootstellingsduur op één zijde van het lichaam is gericht.



Figuur 2 Meetopstelling

2.4.2 Test procedure

Alle experimenten werden op één dag uitgevoerd. Na eerst uitgebreid te zijn geïnformeerd over het doel van het onderzoek verklaarden de proefpersonen dat ze vrijwillig aan het onderzoek deelnamen door middel van een ondertekende toestemmingsverklaring. Voorafgaand aan elke sessie werden de huidtemperatuursensoren bevestigd met behulp van lucht- en waterdamp doorlatende tape (Fixomull Stretch). Daarna werden vooraf aan de blootstelling de subjectieve beleving van temperatuur, comfort, pijn en ervaren inspanning (Borg, 1982) bepaald (Tabel III). Vervolgens werd de MSR datalogger na het betreden van de klimaatkamer met een kabel verbonden aan een laptop waardoor real-time monitoring van de huidtemperatuur mogelijk was. Daarna werd de proefpersoon geïnstrueerd om scheencontact te maken (Fig. 3) met een omgekeerd U-vormig houten kistje dat precies was uitgelijnd op een gespecificeerde afstand, afhankelijk van de blootstellingsconditie, terwijl de proefpersonen rechtop stonden tegenover het stralingspaneel. Vervolgens is het kistje weggehaald en moesten de proefpersonen lichte loopbewegingen maken op de plaats, waarbij de tenen niet van de grond mochten komen om de proefpersonen op de juiste plaats te fixeren. De blootstellingstijd werd ingesteld op maximaal vijf minuten. Criteria om eerder te stoppen waren: een huidtemperatuur op een van de gemeten locaties boven 43 °C, of het verzoek van de proefpersonen dat het niet langer acceptabel is om voor het stralingspaneel te blijven, bijvoorbeeld vanwege pijn. Gedurende de laatste 30 seconden van een sessie of direct na het afbreken van de test indien één van de gemeten huidtemperaturen de 43 °C had bereikt of als de proefpersoon op eigen verzoek wilde stoppen, is opnieuw gevraagd naar de subjectieve beleving van temperatuur, comfort, pijn en ervaren inspanning. Voor elke deelnemer was de tijd tussen de verschillende sessies minimaal twee uur.



Figuur 3 Bepalen van de positie voor het stralingspaneel

Tabel III Subjectieve belevingsschalen

Temperatuursensatie	Comfortbeleving	Pijnsensatie	Ervaren inspanning
-4 Zeer koud	0 Neutraal	0 Geen pijn	6
-3 Koud	1 Licht oncomfortabel	1 Enigszins pijnlijk	7 Extreem licht
-2 Koel	2 Oncomfortabel	2 Pijnlijk	8
-1 Enigszins koel	3 Zeer oncomfortabel	3 Zeer pijnlijk	9 Zeer licht
0 Niet warm, niet koel	4 Zeer, zeer oncomfortabel	4 Zeer, zeer pijnlijk	10
1 Enigszins warm			11 Licht
2 Warm			12
3 Heet			13 Enigszins zwaar
4 Zeer heet			14
			15 Zwaar
			16
			17 Zeer zwaar
			18
			19 Extreem zwaar
			20 Maximaal

2.5 Kleding

Alle experimenten zijn uitgevoerd met gebruikte, maar schone kleding van procesoperators van ExxonMobil. De kleding, bestaande uit een jas en een broek, is (EN-ISO11612, 2015) gecertificeerd. Alle proefpersonen hebben bij alle sessies dezelfde kleding gedragen. De kleding is door ExxonMobil geleverd in twee uitvoeringen, nl. donkerblauw en rood (Fig. 4), die in stofsamenstelling niet van elkaar verschiden. Onder de beschermende kleding voor procesoperators droegen alle proefpersonen alleen een korte onderbroek en een T-shirt.



Figuur 4 Beschermende kleding voor procesoperators

2.6 Analyse data

Van alle data van de verschillende blootstellingsintensiteiten zijn met behulp van Excel bereik (minimum; maximum waarden), gemiddelde waarde, mediaan (middelste waarneming) en standaardafwijkingen bepaald van de blootstellingsduur, huidtemperaturen en de subjectieve metingen voor elke stralingsintensiteit.

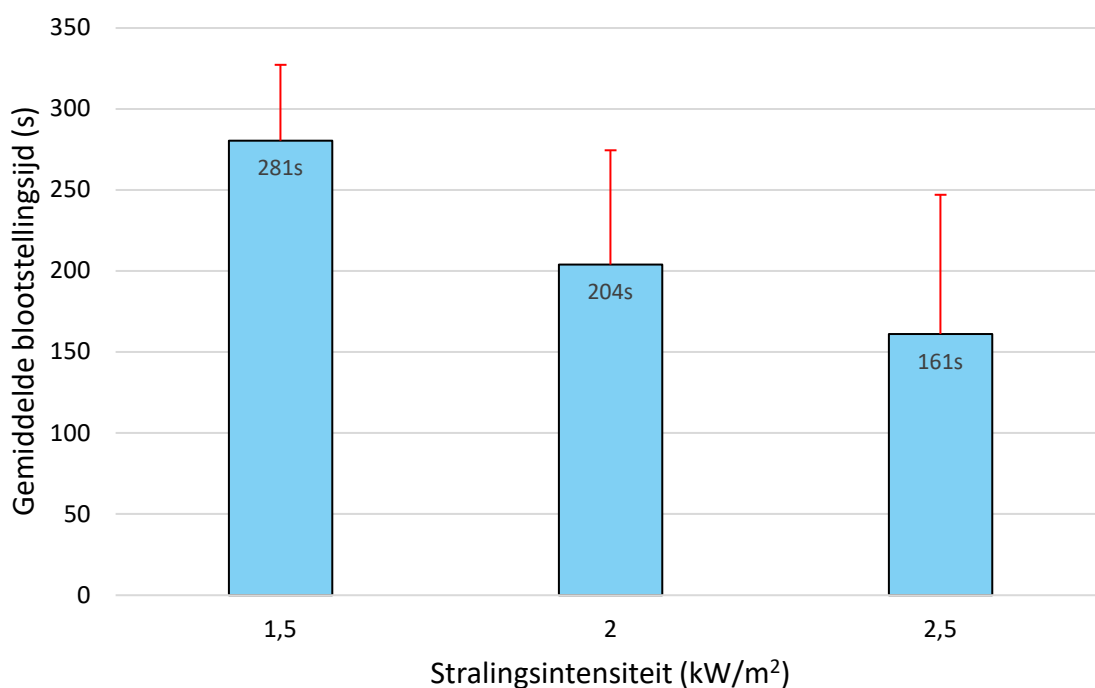
Eventuele verschillen in maximale blootstellingstijd en de subjectieve metingen tussen de stralingsintensiteiten zijn getoetst met behulp van een variantieanalyse met een overschrijdingskans van 0,05 om te bepalen of de verschillen significant waren.

3 Resultaten

De belangrijkste resultaten van de warmtestralingsexperimenten worden in dit hoofdstuk gegeven.

3.1 Blootstellingstijd

De gemiddelde blootstellingstijd inclusief de standaardafwijking bij de verschillende stralingsintensiteiten is weergegeven in figuur 6.

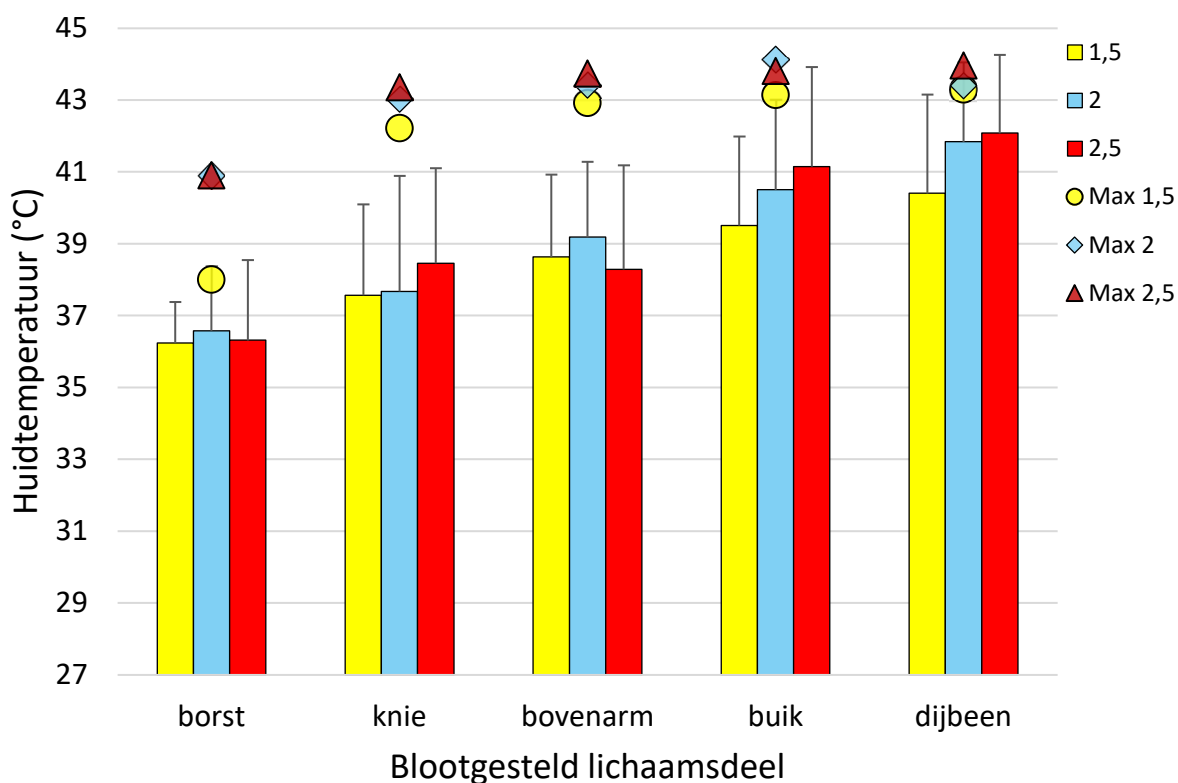


Figuur 6 De gemiddelde blootstellingstijd en de standaardafwijking bij de verschillende stralingsintensiteiten.

De mediaan waarden voor de blootstellingstijd bij de stralingsintensiteiten van 1,5 kW/m², 2,0 kW/m² en 2,5 kW/m² liggen op respectievelijk 300 s, 195 s en 149 s. Vanwege twee proefpersonen die bij 1,5 kW/m² de maximale blootstellingstijd niet gehaald hebben ligt de gemiddelde blootstellingstijd iets lager dan 5 minuten, terwijl de mediaan voor deze stralingsintensiteit wel 5 minuten is. De twee proefpersonen die eerder moesten stoppen vanwege het bereiken van een te hoge huidtemperatuur gaven aan dat ze dat niet zo hebben ervaren. De blootstellingstijd bij 1,5 kW/m² is significant hoger dan bij 2,0 en 2,5 kW/m², terwijl de laatste twee niet significant van elkaar verschillen.

3.2 Huidtemperaturen

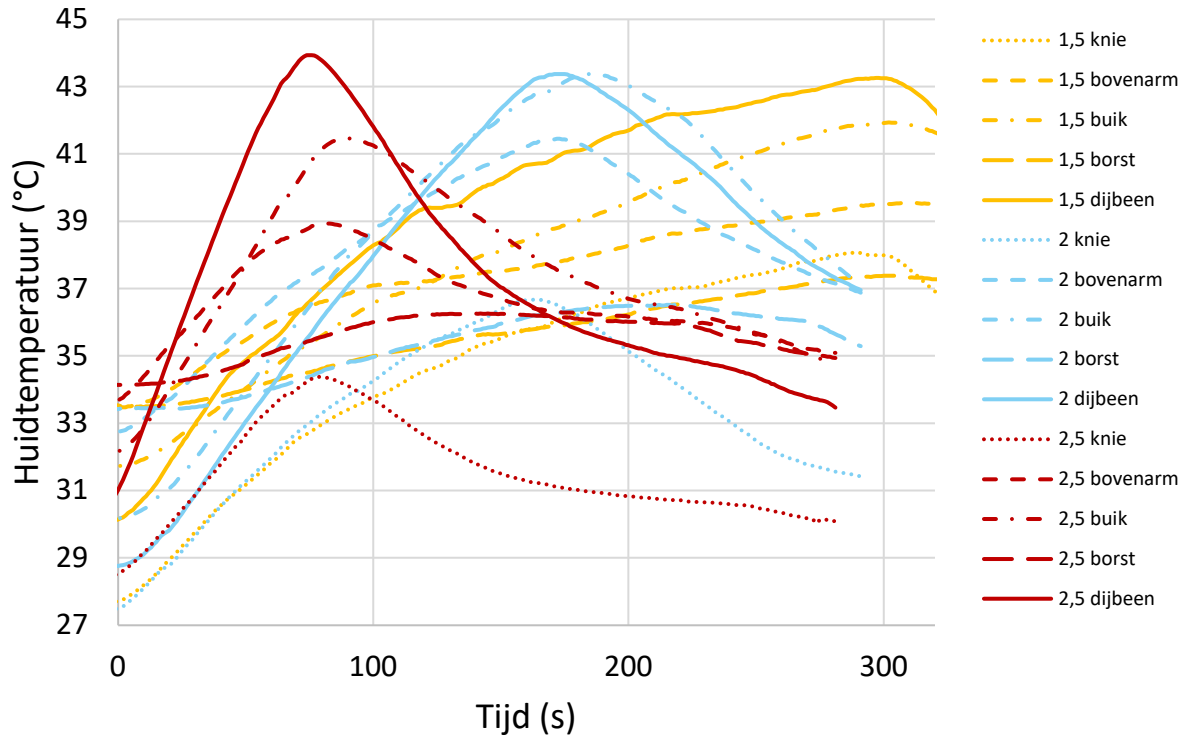
De hoogste bereikte huidtemperaturen op de verschillende huidlocaties gemiddeld over de proefpersonen zijn voor elke stralingsintensiteit weergegeven in figuur 7.



Figuur 7 Hoogst gemeten huidtemperaturen en standaardafwijking op de verschillende lichaamslocaties gemiddeld over de proefpersonen, inclusief de individueel bereikte maximale huidtemperaturen op die locaties voor de verschillende stralingsintensiteiten.

Gemiddeld blijven de huidtemperaturen voor alle blootstellingsniveaus beneden de kritische waarde van 43 °C, maar individueel zijn er met uitzondering van de temperatuur op de borst temperaturen van 43 °C of hoger gemeten. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de sessies zijn afgebroken bij een waarde van 43 °C en hogere waarden in principe niet mogelijk waren, behalve wanneer de huidtemperaturen nog doorstegen als gevolg van de warmtecapaciteit van de kleding.

In figuur 8 is als voorbeeld het temperatuurverloop van de verschillende huidlocaties in de tijd van één proefpersoon (nr. 6) weergegeven tijdens de drie blootstellingsniveaus.

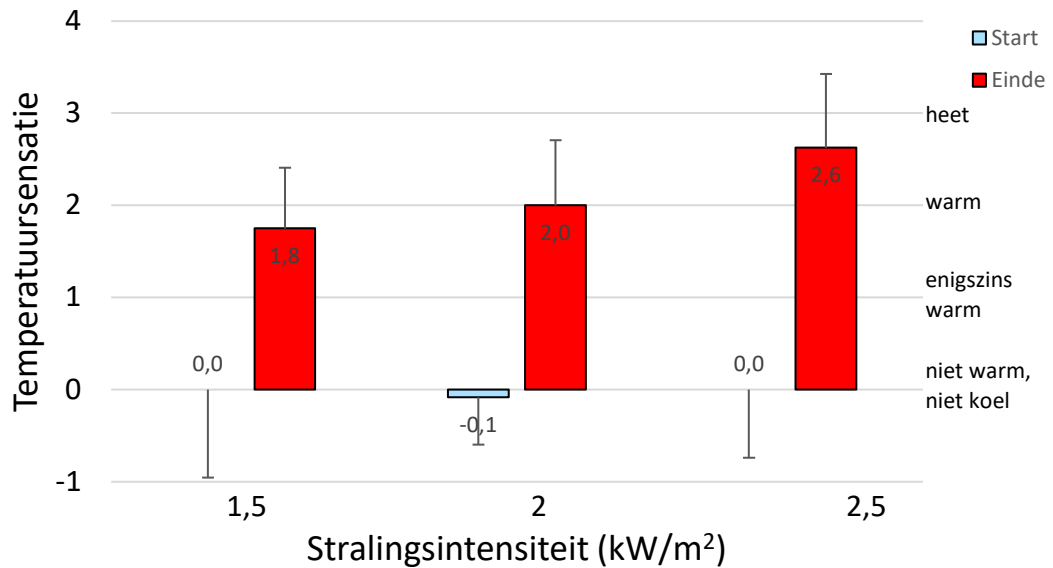


Figuur 8 Huidtemperaturen (knie, bovenarm, buik, borst en dijbeen) van proefpersoon 6 tijdens blootstelling aan de verschillende stralingsintensiteiten.

In de grafiek is te zien dat deze proefpersoon bij 1,5 kW/m² de volledige 5 minuten is blootgesteld. Deze proefpersoon moest bij 2 en 2,5 kW/m² eerder stoppen vanwege het bereiken van een huidtemperatuur van 43 °C (dijbeen).

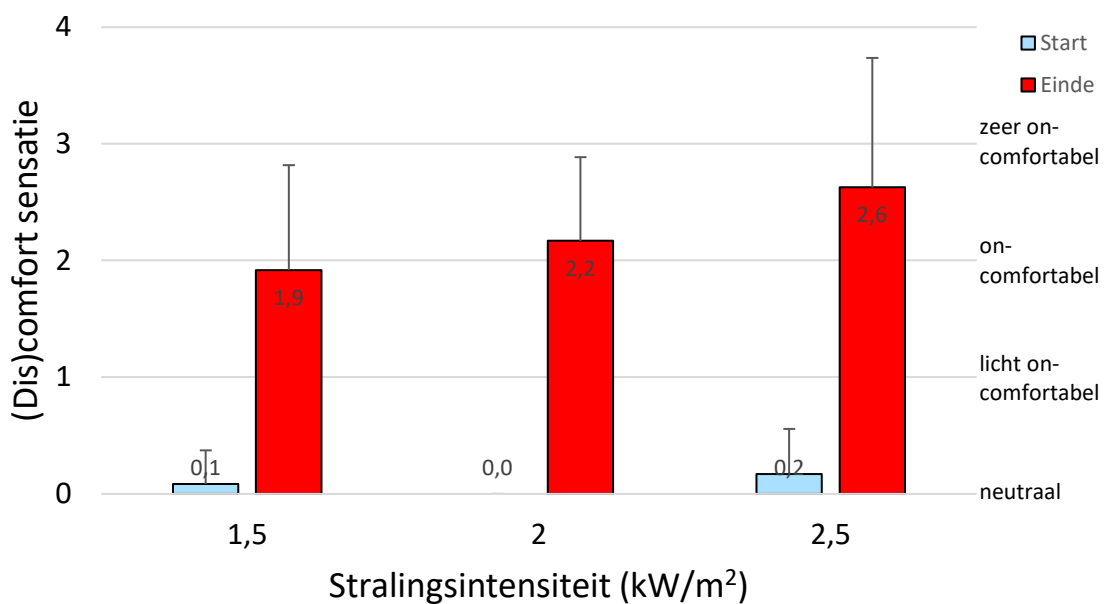
3.3 Subjectieve metingen

De temperatuursensatie en beleving van comfort, pijn en ervaren inspanning zijn in de volgende figuren (Fig. 9 – 12) weergegeven.



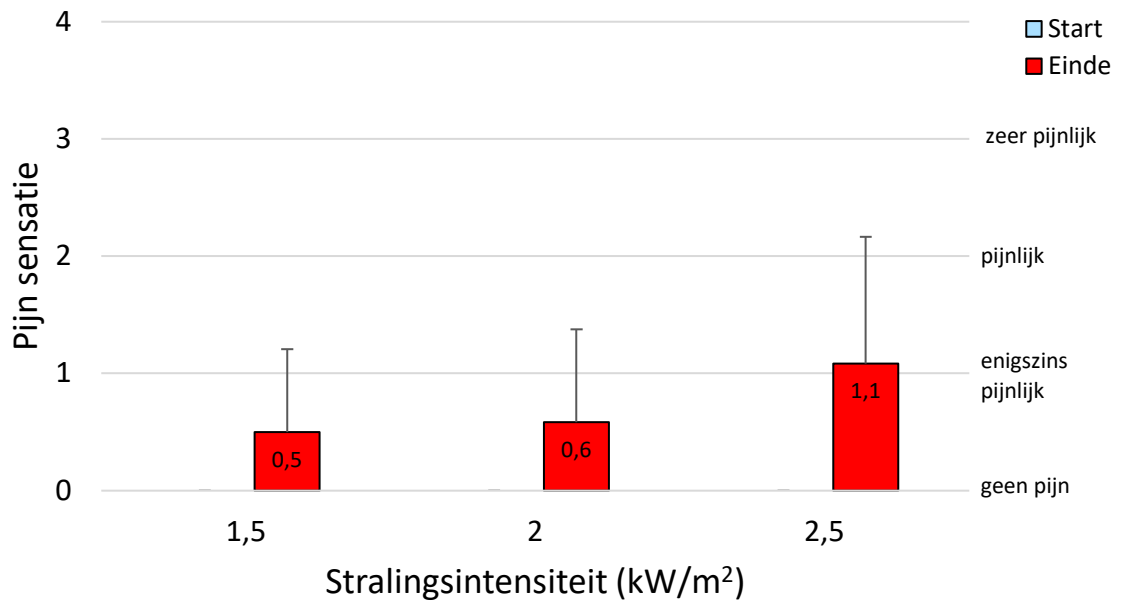
Figuur 9 Gemiddelde temperatuursensatie inclusief standaardafwijking voor en na blootstelling aan verschillende stralingsintensiteiten.

De beginwaarden van de temperatuursensaties zijn neutraal en in alle gevallen gelijk. De temperatuursensatie aan het einde bij de blootstelling bij 1,5 kW/m² verschilt significant van de temperatuursensatie bij 2,5 kW/m². De overige sensaties zijn niet significant verschillend.



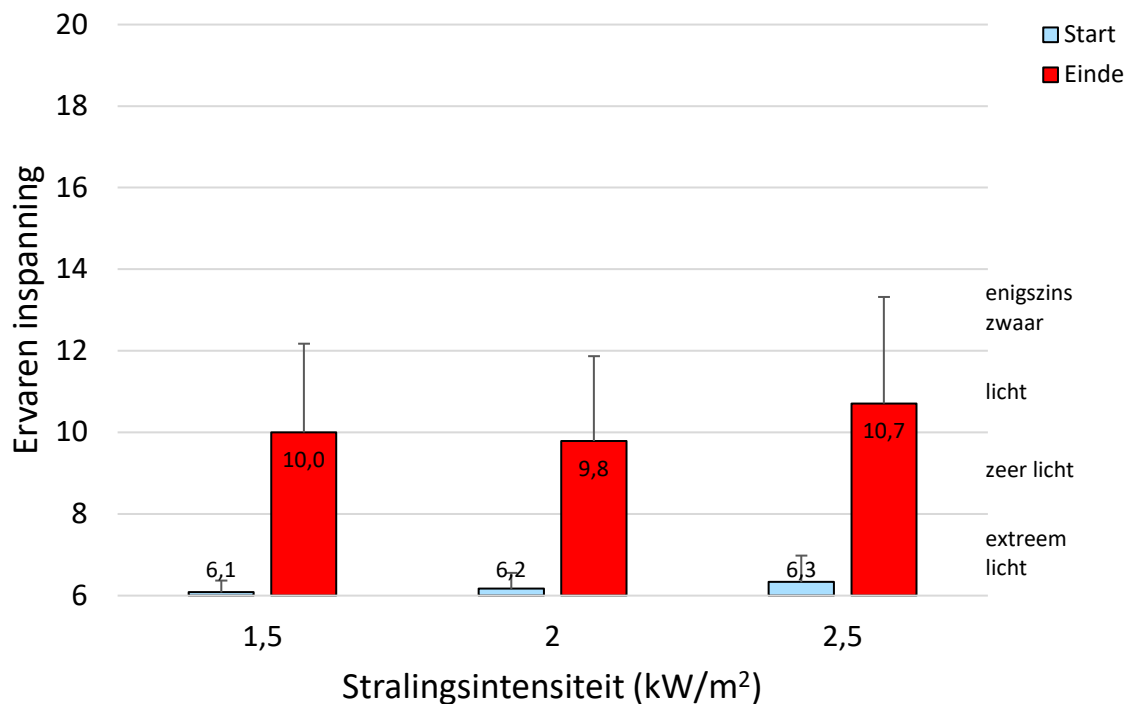
Figuur 10 Gemiddeld comfortbeleving inclusief standaardafwijking voor en na blootstelling aan verschillende stralingsintensiteiten

Voorafgaand aan de blootstelling voelden alle proefpersonen zich comfortabel. Het discomfort na afloop van de blootstellingsperiode liep van '(licht) oncomfortabel' tot 'zeer oncomfortabel'. Het discomfort neemt toe naarmate de stralingsintensiteit hoger was, maar de verschillen zijn niet significant.



Figuur 11 Gemiddeld ervaren pijnbeleving inclusief standaardafwijking voor en na blootstelling aan verschillende stralingsintensiteiten

Zoals verwacht had voorafgaand aan de blootstelling niemand pijn. De gemiddelde pijnbeleving na afloop van de blootstelling varieerde van 'geen pijn' tot 'enigszins pijnlijk'. Hoewel er een licht oplopende tendens te zien is naarmate de stralingsintensiteit toeneemt zijn er geen significante verschillen tussen de verschillende stralingsintensiteiten.



Figuur 12 Gemiddeld ervaren inspanning inclusief standaardafwijking voor en na blootstelling aan verschillende stralingsintensiteiten

Vooraf waren de proefpersonen in rust en ervarden geen inspanning. De inspanning na afloop werd als 'zeer licht' tot 'licht' ervaren. Er zijn geen significante verschillen in ervaren inspanning na afloop tussen de verschillende blootstellingsniveaus.

4 Discussie

Omdat in dit onderzoek bij een tweetal proefpersonen de kritische huidtemperatuur van 43 °C werd bereikt kan de vraagstelling van het onderzoek niet zomaar bevestigend worden beantwoord. Toch lijkt het verantwoord om, op basis van dit met proefpersonen uitgevoerde validatie-onderzoek naar blootstelling aan warmtestraling, de eerder gestelde limietwaarde van maximaal 1,0 kW/m² (Meinster, 2016) voor procesoperators als een enigszins conservatieve schatting aan te merken. Deze schatting was gedaan op basis van eerdere onderzoeken met fysische modellen (den Hartog & Heus, 2006) en een thermische manikin (Heus & Denhartog, 2017). In het huidige onderzoek is gebleken dat de proefpersonen op een tweetal uitzondering na geen enkel probleem hadden met een blootstelling van 5 minuten aan 1,5 kW/m². Bovendien hebben de twee proefpersonen die eerder moesten afhaken vanwege het bereiken van een kritische temperatuur van 43 °C op het dijbeen vermeld dat ze de temperatuur niet als (te) hoog hebben ervaren. De resultaten zijn eveneens in lijn met de door Efectis (Mierlo van & Lemaire, 2016) vastgestelde veilige warmtestralingscontour van 1,5 kW/m² voor omstanders bij grote branden.

De proefpersonen droegen onder hun beschermende kleding voor proces operators enkel een korte onderbroek en een T-shirt. Hierdoor was op een deel van de huid direct contact mogelijk met de beschermende kleding. De proefpersonen moesten daarom ook continue bewegen op de plaats om te voorkomen dat de (te) warme kleding bij aanraking alsnog huidverbranding kon optreden. Deze lichte inspanning had geen invloed op de warmteopbouw in het lichaam wat ook bleek uit de waarden van de ervaren inspanning ('zeer licht' – 'licht') tijdens alle blootstellingsniveaus.

De temperatuursensoren op de borst en de buik zaten onder de onderkleding. Ondanks die extra bescherming zijn in enkele gevallen op de buik toch temperaturen boven de 43 °C gemeten, waardoor de blootstelling eerder moest worden afgebroken. Niet alle proefpersonen hadden op dat moment het gevoel dat het te warm was om verder te kunnen. Mogelijke oorzaak van het bereiken van de kritische huidtemperaturen is dat de kleding relatief strak zat ter hoogte van de buik en de (isolerende) luchtlaag daardoor minder was. Hoewel deze temperatuur niet direct tot huidverbranding zal leiden (Hatton & Halfdanarson, 1982) (Stoll & Chianta, 1969) is het wel belangrijk de personen met een huidtemperatuur van 43 °C zo snel mogelijk het gebied met de warmtestraling verlaten om te voorkomen dat (eerstegraads) verbranding optreedt.

De lagere niet kritische temperaturen op de borst ten opzichte van de overige locaties kunnen verklaard worden doordat de temperatuursensoren onder de borstzakken zaten waardoor de huid beter werd beschermd door extra beschermende textiellagen.

Voldoende ruimvallende kleding en eventueel een extra kledinglaag dragen mogelijk bij aan een betere bescherming voor procesoperators tegen hoge warmtestralingsniveaus. Houdt er in dat geval wel rekening mee dat bij langdurige werkzaamheden de mogelijkheden om zweet te verdampen worden beperkt en de werkomstandigheden oncomfortabel worden. Extra isolerende lagen kunnen procesoperators mogelijk in staat stellen om zelfs ook bij 2,0 kW/m² nog werkzaamheden te verrichten. Op basis van de huidige experimenten is

gebleken dat zonder extra onderkleding men gedurende ruim drie minuten kon worden blootgesteld aan deze warmtestraling. Bij $2,5 \text{ kW/m}^2$ is de acceptabele blootstellingstijd te kort om nog snel maatregelen te kunnen nemen bij een incident.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Op basis van het uitgevoerde onderzoek met de procesoperators kleding kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De huidige gebruikte EN-ISO 11612 (2015) gecertificeerde procesoperator kleding biedt voldoende bescherming om huidverbranding te voorkomen tijdens kortdurende activiteiten tot 5 minuten bij stralingsintensiteiten van 1,5 kW/m².
- Tot 3 minuten biedt de kleding voor de meeste personen voldoende bescherming tegen een stralingsintensiteit van 2,0 kW/m².
- Extra (lang) ondergoed en voldoende ruim vallende kleding draagt mogelijk bij aan de bescherming van procesoperators tegen hogere warmtestralingsniveaus.
- Bij hogere stralingsintensiteiten dan 2,0 kW/m² is de in dit onderzoek gebruikte EN-ISO 11612 (2015) kleding ongeschikt om als beschermende kleding bij incidentbestrijding te dragen.
- De in de 'Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en procesoperators bij industriële bedrijven' gestelde maximale stralingsniveaus voor beschermende kleding voor proces operators kunnen op basis van het uitgevoerde validatieonderzoek worden bijgesteld van 1kW/m² naar 1,5 kW/m².

5.2 Aanbevelingen

Het validatie-onderzoek naar de bescherming van beschermende kleding voor procesoperators leverde belangrijke informatie op om de huidige richtlijnen voor arbeid bij maximaal aanvaardbare stralingsniveaus verder te preciseren.

Verder wordt aangeraden om tijdens (geplande) oefenmomenten met plasbrandbestrijding huidtemperatuurmetingen uit te voeren bij de kandidaten om de huidige gesimuleerde experimenten in de klimaatkamer te toetsen.

Tenslotte heeft vergelijkbaar onderzoek met beschermende kleding voor de brandweer sinds het jaar 2000 niet meer plaatsgevonden. Aangezien brandweerkleding de afgelopen twee decennia sterk is verbeterd met betrekking tot bescherming tegen hitte wordt aangeraden om ook een vergelijkbaar experimenteel onderzoek voor brandweerkleding uit te voeren met proefpersonen die worden blootgesteld aan hogere stralingsniveaus dan die voor beschermende kleding van procesoperators. Op die manier kunnen de in de handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet van maximaal 5 minuten van (bedrijfs)brandweerpersoneel ook gevalideerd worden.

Referenties

- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(5), 377-381.
- den Hartog, E., & Heus, R. (2006). Veilige stralingscontouren bij incidenten - gerelateerd aan warmtebelasting voor hulpverleners. *TNO-DV3 2006 C024*. Soesterberg: TNO Defensie en Veiligheid.
- EN469. (2006). *Protective clothing for firefighters - Performance requirements for protective clothing for Firefighting*. CEN.
- EN-ISO11612. (2015). *Protective clothing - Clothing to protect against heat and flame - Minimum performance requirements*. CEN.
- Hatton, A., & Halfdanarson, H. (1982). Role of Contact Resistance in Skin Burns. *J. Biomedical Engineering*, 4, 97-102.
- Havenith, G., & Heus, R. (2004). A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Applied Ergonomics* 35 (1), 3-20.
- Heus, R., & Denhartog, E. (2017). Maximum allowable exposure to different heat radiation levels in three types of heat protective clothing. *Industrial Health*, 55, 529–536.
- Heus, R., Wammes, L., & Havenith, G. (1994). *Bescherming van de Nederlandse militair tegen hitte en vlammen; voorstudie*. TNO Technische Menskunde. Soesterberg: TNO Defensie-onderzoek.
- Meinster, J. (2016). Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven. Landelijk Expertisecentrum BrandweerBRZO.
- Mierlo van, R., & Lemaire, A. (2016). Onderzoek veilige afstand geplande vreugdevuren Scheveningen en Duindorp 2016-2017. *2016-Efectis-R001439*. Bleiswijk: Efectis Nederland.
- PGS29. (2016). Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 29: versie 1.1 . *Richtlijn voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks*.
- Stoll, A. M., & Chianta, M. A. (1969). Method and rating system for evaluation of thermal protection. *Aerospace Medicine*, 40, 1232-1238.