

Slutrapport BF projekt nr 300-121

Utveckling av teori för beräkning av tid till antändning

Ulf Wickström, LTU och SP, och Johan Sjöström, SP.

En helt ny enkel och noggrann formel har utvecklats för beräkning av tid till antändning av ytor som utsätts för värmestrålning. Metoden kan användas för att bedöma tid till antändning för föremål/ytor som befinner sig i luft med rumstemperatur men som utsätts för strålning från flammor. Det kan t.ex. vara ett föremål i ett tidigt skede av en brand eller en motstående fasad i ett näraliggande hus där det kommer flammor ut genom fönsteröppningar. Metoden kan t.ex. användas vid utvärdering av resultat i konkalorimetern för att bestämma antändningstemperaturer och/eller materialegenskaper. Den nya metoden har tagits fram med stöd av noggranna numeriska beräkningar dels med finit elementberäkning, dels med Duhamels superpositionsteknik. Jämförelser har gjorts med etablerade beräkningsmodeller som visats sig vara mycket grovt felaktiga.

Då en kropp utsätts för värmestrålning kommer yttemperaturen att stiga och när den når antändningstemperaturen så kommer den att avge brännbara gaser som kan antändas. Den tid det tar är en viktig parameter för att bedöma ett materials brandtekniska egenskaper. En kort antändningstid innebär att materialet snabbt kan sprida en brand och därmed öka risken för en hastig brandutveckling. Det är därför en egenskap som provas direkt eller indirekt i många provningsmetoder.

Till skillnad från de flesta andra metoder är den termiska exponeringen i den s.k. konkalorimetern (ISO 5660) väl definierad. Provkroppen befinner sig i approximativt rumstempererad luft och utsätts för en konstant infallande värmestrålning, \dot{q}_{inc}'' . Den värms då genom strålning och kyls genom konvektion då yttemperaturen är högre än den omgivande luftens. Eftersom det är mycket väldefinierade förhållanden så lämpar sig detta provningsscenario väl för noggranna analyser. Det här projektet är emellertid helt teoretiskt. Några jämförelser med uppmätta resultat visas inte här utan Fourier's värmeledningsekvation förutsätts gälla. Däremot visas att om man kan anta konstanta förhållanden, dvs. infallande strålning, omgivande lufttemperatur, materialdata samt en relativt tjock provkropp, så kan tiden till att ytan får en viss given temperatur (antändningstemperaturen) beräknas enkelt och noggrant med en i projektet framtagna matematisk formel.

Det totala värmeflödet \dot{q}_{inc}'' genom strålning och konvektion till provkroppens yta kan då skrivas som

$$\dot{q}_{tot}'' = \dot{q}_{abs}'' - \dot{q}_{emi}'' + \dot{q}_{con}'' = \varepsilon \dot{q}_{inc}'' - \varepsilon \sigma T_s^4 + h_{con}(T_g - T_s) \quad \text{Eq. 1}$$

där ε är ytans emissivitet, h_{con} den konvektiva värmeövergångskoefficienten, och T_s och T_g ytans respektive den omgivande luftens temperatur. Problemet är nu att bestämma hur lång tid det tar innan ytans temperatur T_s når antändningstemperaturen T_{ig} . Eftersom ytans temperatur varierar med tiden och kylningen av ytan genom emitterad strålning beror på yttemperaturen upphöjt till fyra kan inte yttemperaturen beräknas analytiskt exakt. Man måste använda numeriska metoder, t.ex. finita element, finita differenser eller en numerisk version av Duhamels superpositionsintegral som tagits fram inom projektet.

En approximativ mycket noggrann metod har tagits fram som bygger på att man antar ett konstant värmeflöde \dot{q}_{eff}'' som kan beräknas som

$$\dot{q}_{eff}'' = \varepsilon(\dot{q}_{inc}'' - \eta \dot{q}_{cr}'') \quad \text{Eq. 2}$$

där η är en reduktionsfaktor och \dot{q}_{cr}'' är den kritiska instrålning då ytan vid antändningstemperaturen befinner sig i termisk jämvikt, dvs

$$\dot{q}_{cr}'' = \sigma T_{ig}^4 + h_{con}(T_{ig} - T_g)/\varepsilon \quad \text{Eq. 3}$$

Enligt teorin som man kan läsa om i flera läroböcker kan man då beräkna tiden det tar till temperaturen för antändning t_{ig} som

$$t_{ig} = \frac{\pi(k\rho c)}{4} \left(\frac{T_{ig} - T_i}{\dot{q}_{eff}''} \right)^2 \quad \text{Eq. 4}$$

Genom jämförelser med numeriska beräkningar med finita elementprogram, Tasef och Comsol, har det visat sig för homogena halvoändliga (tjocka) material så ger Eq. 4 mycket noggranna värden om reduktionsfaktorn η sätts lika med 0.80. Detta har visat sig gälla för en stor variation av parametrarna T_{ig} , \dot{q}_{inc}'' , h_{con} och T_g . Som framgår av Eq. 4 är antändningstiden direkt proportionell mot den termiska trögheten $k\rho c$ som därför kan varieras godtyckligt. Antändningstiden kan således beräknas som

$$t_{ig} = \frac{\pi(k\rho c)}{4} \left(\frac{T_{ig} - T_i}{\varepsilon(\dot{q}_{inc}'' - 0.80 \dot{q}_{cr}'')} \right)^2 \quad \text{Eq. 5}$$

där \dot{q}_{cr}'' beräknas enligt Eq. 3.

Nedan ges några exempel som visar hur beräkningsmetoden kan användas. I exemplet antas en termisk tröghet som motsvaras av massivt trä, men som anges så är den beräknade antändningstiden direkt proportionell mot denna materialparameter.

Exempel – Antändning av massivt trä

Parametervärden antas enligt

Table 1 Parametervärden enligt exempel 1.

$k\rho c$ $\text{W}^2/\text{m}^4\text{K}^2\text{s}$	T_{ig} $^{\circ}\text{C}$	T_i $^{\circ}\text{C}$	T_g $^{\circ}\text{C}$	ε -	h_{con} $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	\dot{q}_{inc}'' W/m^2
196000	300	20	20	1.0	10	20000

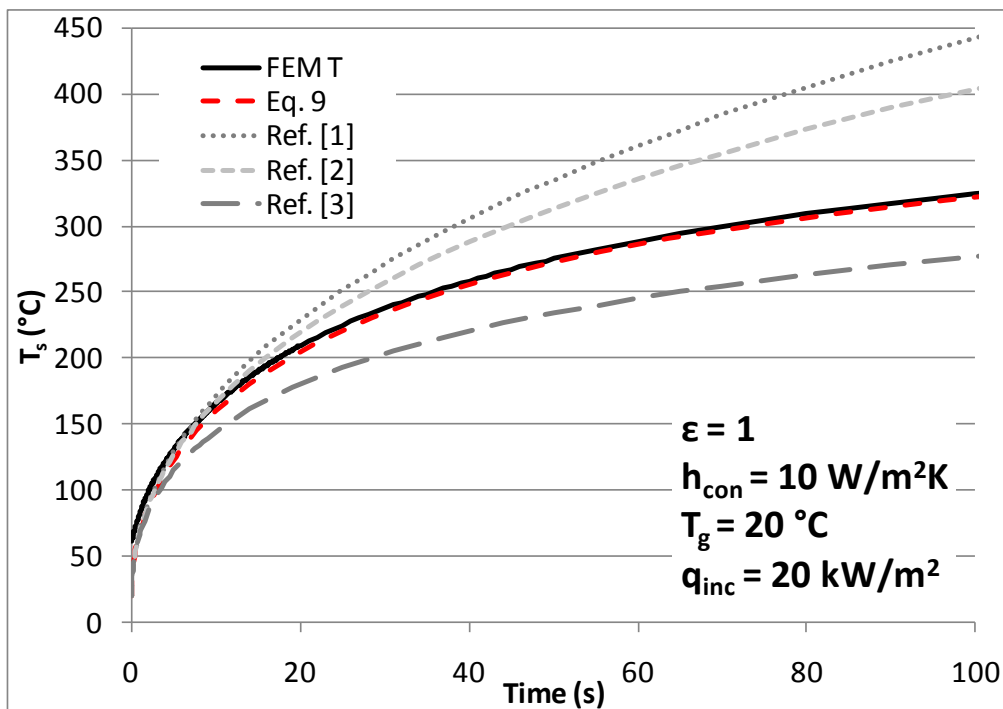
Enligt Eq. 3 erhålles $\dot{q}_{cr}'' = \sigma T_{ig}^4 + \frac{h_{con}(T_{ig}-T_g)}{\varepsilon} = 5.67 * 10^{-8} * (300 + 273)^4 + \frac{10*(300-20)}{1} = 11841 \text{ W/m}^2$ och tiden till antändning kan enligt Eq. 5 beräknas som

$$t_{ig} = \frac{3.14*196000}{4} \left(\frac{300-20}{1.0*(20000-0.80*11841)} \right)^2 = 72 \text{ s.}$$

Andra metoder

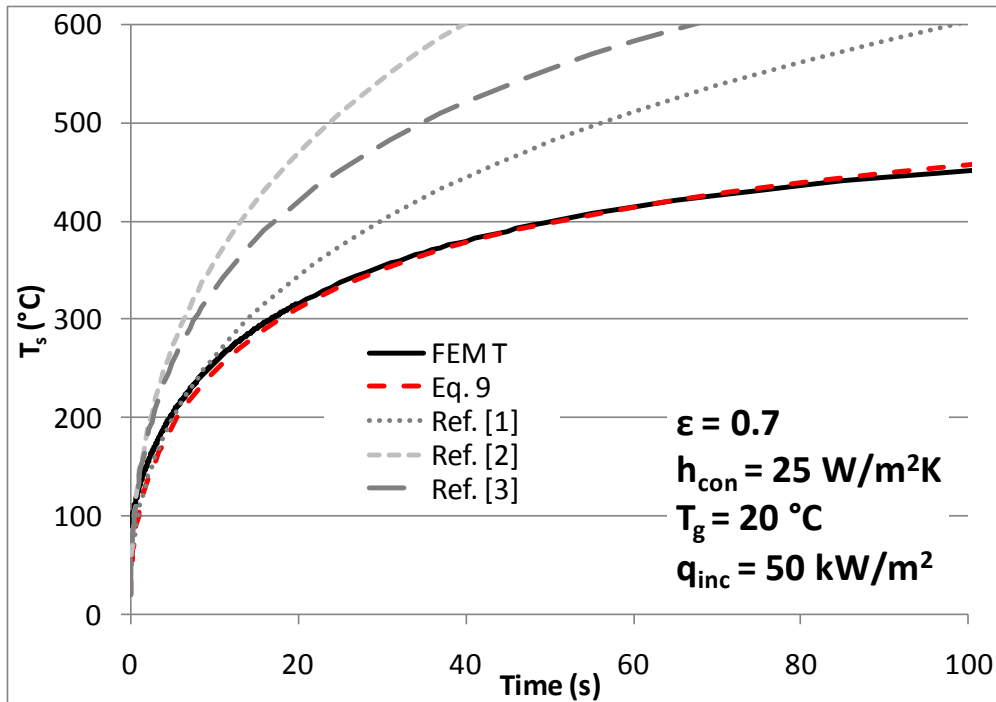
I litteraturen i form av kända läroböcker och handböcker finns andra metoder beskrivna. Bl.a. kan nämnas referenserna [1-3]. De ger alla olika resultat och de är alla fel. De approximerar alla kylningen av ytan genom strålning och konvektion som proportionell mot skillnaden mellan yttemperaturen och omgivningens temperatur. De kan på så sätt härleda analytiska formler som är relativt svåra att tillämpa men som framför allt ger felaktiga resultat.

Nedan visas ett exempel på relationen mellan antändningstid och antändningstemperatur för en specificerad strålningsnivå på 20 kW/m^2 och med emissivitet, konvektiv värmeövergångskoefficient och omgivningstemperatur enligt exemplet ovan. I diagrammet visas hur väl den nya enkla metoden sammanfaller med noggranna FEM-analyser. Figuren visar också hur tokigt det kan bli om man använder de tre populära metoder som finns publicerade i internationella välkända text- och handböcker. Enligt exemplet ovan beräknas antändningstiden till 72 s. Enligt ref. [1] beräknas den till ca 38 s, enligt ref. [2] till 41 s och enligt ref. [3] till långt över 100 s. Sammanfattningsvis ger alltså dessa metoder mycket stora fel.



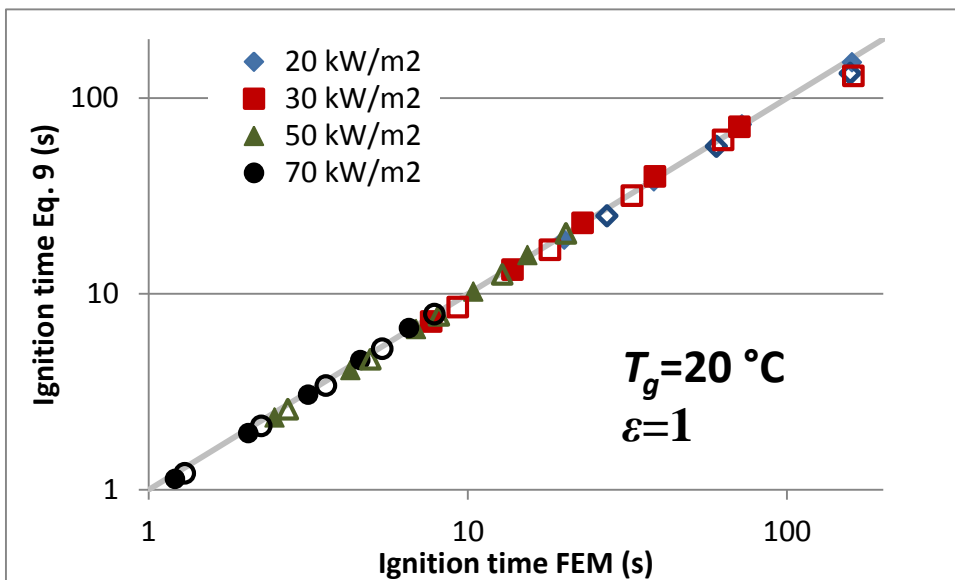
Figur 1 Samband mellan beräknad tid till antändning och antändningstemperatur enligt den nya enkla metoden (Eq. 5), enligt noggrann FEM-beräkning respektive enligt referenserna [1-3]. Infallande strålning $\dot{q}_{inc}'' = 20 \text{ kW/m}^2$.

Figur 2 visar sambandet mellan antändningstid och temperatur för en betydligt högre infallande strålning, $\dot{q}_{inc}'' = 50 \text{ kW/m}^2$. Notera att Eq. 5 även i detta fall ger ett korrekt samband mellan antändningstid och antändningstemperatur, medan motsvarande tider beräknade enligt referenserna [1-3] i det här fallet kraftigt underskattar tiden till antändning.

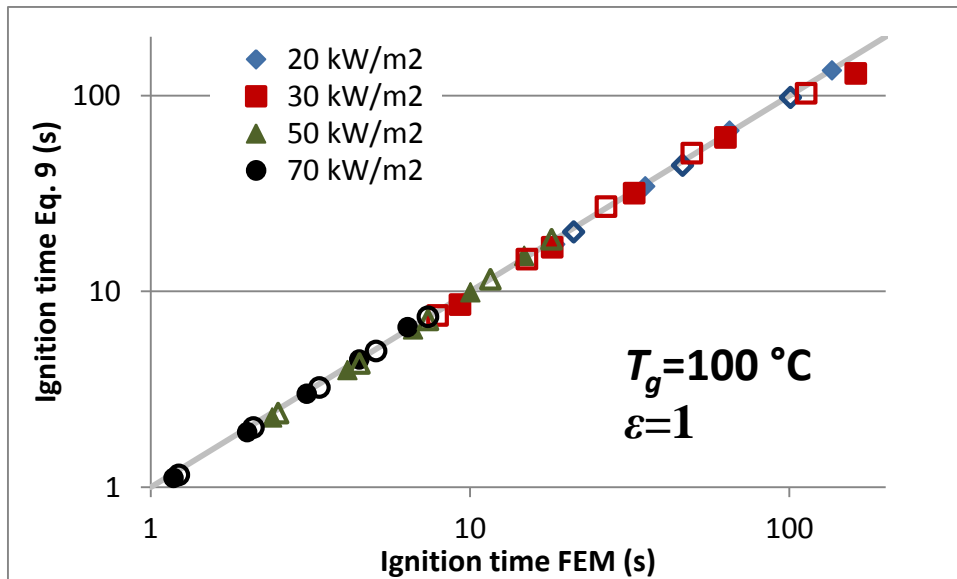


Figur 2 Samband mellan beräknad tid till antändning och antändningstemperatur enligt den nya enkla metoden (Eq. 5), enligt noggrann FEM-beräkning respektive enligt referenserna [1-3]. Infallande strålning $q_{inc}'' = 50 \text{ kW/m}^2$.

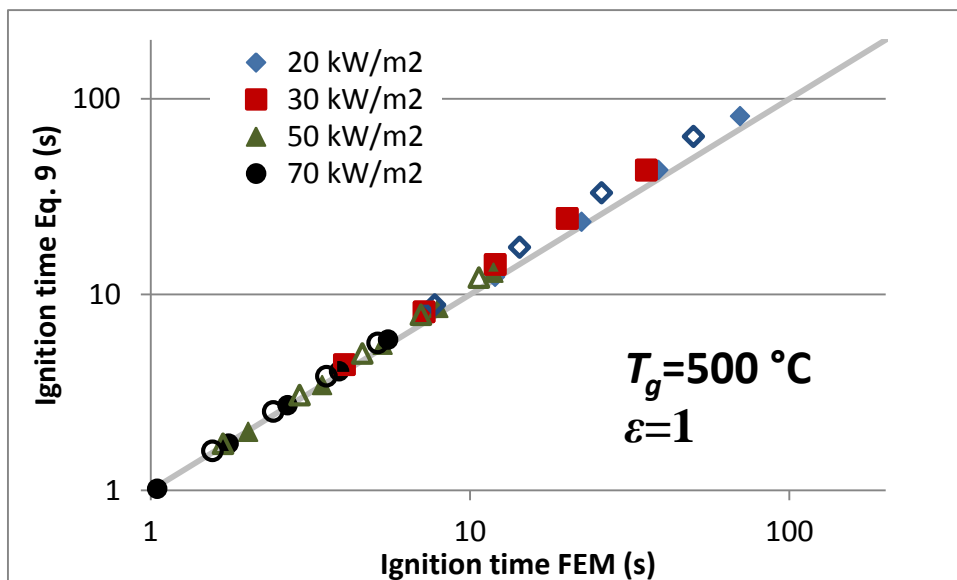
Figur 3 visar en jämförelse mellan antändningstider beräknade med FEM respektive Eq. 5 för $T_g = T_i = 20 \text{ °C}$. Figur 4 och Figur 5 visar motsvarande samband för respektive $T_g = 500 \text{ °C}$. Överensstämmelsen är samtliga fall frapperande!



Figur 3 Jämförelse mellan antändningstider beräknade med FEM respektive Eq. 5 för $T_g = 20 \text{ °C}$. Den räta linjen representerar en perfekt överensstämmelse. Fyllda och tomma symboler representerar $h_{con}=10$ respektive $25 \text{ W/m}^2\text{s}$. T_{ig} varierar mellan 200 och 400 °C.



Figur 4 Jämförelse mellan antändningstider beräknade med FEM respektive Eq. 5 för $T_g = 100$ °C. Den räta linjen representerar en perfekt överensstämmelse. Fyllda och tomma symboler representerar $h_{con}=10$ respektive 25 W/m²s. T_{ig} varierar mellan 200 och 400 °C.



Figur 5 Jämförelse mellan antändningstider beräknade med FEM respektive Eq. 5 för $T_g = 500$ °C. Den räta linjen representerar en perfekt överensstämmelse. Fyllda och tomma symboler representerar $h_{con}=10$ respektive 25 W/m²s. T_{ig} varierar mellan 200 och 400 °C.

Duhamel's superpositionsprincip för exakt beräkning av tid till antändning

Förutom den förenklade modellen presenterad ovan så har en algoritm för att exakt beräkna tid till antändning av, exempelvis halvoändliga (termiskt tjocka), kroppar.

Enligt Duhamel's superpositionsprincip så kan t.ex. yttemperaturen, $T_s(t)$, av en tjock kropp som utsätts för ett tidsberoende värmeflöde, $\dot{q}''(t)$, skrivas

$$T_s(t) = T_i + \dot{q}''(0)A(t) + \int_0^t \frac{d\dot{q}''}{d\tau} A(t - \tau) d\tau,$$

där T_i är initialtemperaturen och den s.k. responsfunktionen

$$A(t) = 2 \sqrt{\frac{t}{\pi k \rho c}}.$$

Vi beskriver detta som en diskret serie

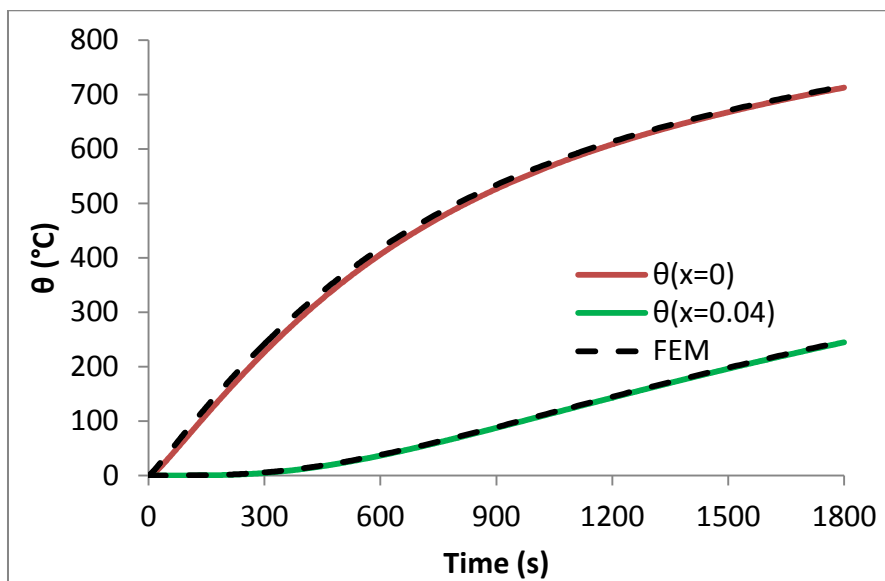
$$T_N = T_i + \dot{q}''_0 A_N + \sum_{i=1}^N (\dot{q}''_i - \dot{q}''_{i-1}) A_{N-i}.$$

Därefter använder vi en återkoppling mellan föregående tidsstegs ytemperatur och beräkningen av nuvarande tidsstegs värmeflöde vid ytan. Vi kan därmed ta i beaktning de fulla icke-linjära randvillkoren som faktiskt existerar vid en brandutsatt yta, dvs. nettoflödet till ytan beror av ytemperaturen upphöjt till 4. Emitterad strålning.

$$\dot{q}''_{tot,i} = \varepsilon [\dot{q}''_{inc,i} - \sigma [T_{i-1}(0,t)]^4] + h [T_{g,i} - T_{i-1}(0,t)]$$

Vi har skapat makro-filer i Matlab och Excel som finns att ladda ner på SP's hemsida för att göra dessa beräkningar automatiskt. Dessa kan användas av exempelvis forskare eller brandingenjörer som vill beräkna temperaturutvecklingen på en yta som utsätts för brandpåverkan.

Metoden går att göra hur exakt man vill genom att modifiera en tidssteg. Exempel på beräkning av ytemperaturen hos en halvoändlig vägg finns i figur 6.



Figur 6

Temperaturen hos en ytan och 4 cm in i kroppen hos ett material ($h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon = 0.7$, $k = 1.5 \text{ W/mK}$, $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ and $c = 750 \text{ J/kgK}$) som absorberar strålning (en strålningstemperatur motsvarande standardbrandkurvan) samt en konvektiv värmeöverföring mot en gas (också enligt standardbrandkurvan) samt som kyls av emitterad strålning.

2013-06-17

Mer information om bakgrunden finns att läsa i ett manuskript skickat för publicering och som kan skickas vid begäran.

Sammanfattning och slutsatser

- En ny enkel explicit formel för att beräkna den tid det tar för ytan till en kropp skall nå antändningstemperaturer har tagits fram. Den har jämförts med noggranna beräkningar med finita elementmetoden med två olika program (Tasef och Comsol) och visats ge mycket goda närmevärden.
- Den nya metoden har också jämförts med tre andra förenklade metoder kända från litteraturen. Dessa visat sig vara påfallande felaktiga och dessutom svårare att tillämpa.
- En ny metodik baserad på Duhamel's superpositionsprincip har också utvecklats där icke-lineära randvillkor kan beaktas. Metodiken kan med fördel användas för ytor utsatta för strålning och konvektion (icke-lineära randvillkor) där den visats sig ge mycket noggranna resultat. Makro-filer till Matlab och Excel har tagits fram för nedladdning från SP's hemsida.

Referenser

- [1] Drysdale, D. "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed., John Wiley and Sons, ISBN 0-471-90613-1, 1985.
- [2] Quintiere, J.G., "Fundamentals of Fire Phenomena". John Wiley and Sons, ISBN-13 978-0-470-09113-5, 2006.
- [3] Torero, J.L., "Flaming ignition of solid fuels", Section 2, pp 2-260, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th ed., 2008.

Övrig rapportering

1. Ulf Wickström, abstract presented at the SFPE annual conference in Savannah, GA, 2011.
2. Ulf Wickström, Johan Sjöström and Alexandra Byström, NEW METHOD FOR CALCULATING TIME TO REACH IGNITION TEMPERATURE, presenterad och publicerad, Interflam 2013.
3. Johan Sjöström, Ulf Wickström, Using feedback superposition of linear response functions in fire sciences, insänt till Fire Technology för publicering.
4. Johan Sjöström, Ulf Wickström, ANALYTICAL METHOD FOR TIME-TEMPERATURE RELATIONS AT SURFACES OF SEMI-INFINITE SOLIDS, insänt till Fire Safety Journal för publicering.
5. Christian Pelo, ANTÄNDNING AV TRÄ MED OLIKA FUKTHALTER - experiment och teori, exjobb under slutförande vid Luleå TU.
6. Ulf Wickström, inarbetade avsnitt i utkast till lärobok, HEAT TRANSFER IN FIRE TECHNOLOGY.