

Utvärdering av PIR-isolering med Konkalorimeter

Gustav Hahlin

Avdelningen för Brandteknik

Lunds Tekniska Högskola

Lunds Universitet

Division of Fire Safety Engineering

Lund University

Sweden

Rapport 5570, Lund 2019

Examensarbete på Brandingenjörsutbildningen

Utvärdering av PIR-isolering med konkalorimeter

Gustav Hahlin

Lund 2019

Utvärdering av PIR-isolering med konkalorimeter
Evaluation of PIR-insulation with cone calorimeter

Gustav Hahlin

Report 5570
ISRN: LUTVDG/TVBB--5570--SE

Number of pages: 35

Illustrations: Gustav Hahlin if nothing else is specified

Keywords
PIR, cone calorimeter, ISO-5660

Sökord
PIR, konkalorimeter, ISO-5660

Abstract

In this study four different types of PIR materials have been tested to examine the possibility to use the cone calorimeter (ISO 5660) as a screening tool to evaluate the fire properties of the insulation. As such, manufacturers can be able to make a quick control of the insulation without having to spend resources on full scale testing. One of the materials was from an FM-approved (standard 4880) sandwich panel.

The main conclusion from this report is that the output data in which gave the most differences between the materials was the heat release rate at the early stage and the time to ignition at 35 kW/m². In the performed tests the repeatability was rather low and which therefore leads to uncertainties with the results. However, more testing needs to be done, with more materials involved, if to be sure of the best way to evaluate the material in hand. With the basis in this report a link between full scale and small scale testing was hard to find and more testing with more full scale tested materials is recommended as a next step.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se

Telefon: 046 - 222 73 60

Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se

Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Denna rapport är ett examensarbete vid Brandingenjörsprogrammet som ges vid Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet.

Tack till Dan Madsen och Patrick van Hees på Avdelningen för Brandteknik för vägledning genom detta arbete.

Även ett stort tack till de PIR-tillverkare/återförsäljare som bidrog med material till försöken samt IKEA för att initiera denna pilotstudie.

Sammanfattning

PIR-isolering är ett plastbaserat isoleringsmaterial som blivit vanligt förekommande de senaste åren. Fördelarna med isoleringen är att den ger ett mycket bra termiskt isoleringsvärde samt att den är av låg densitet. En nackdel med PIR är den är brännbar. Olika sammansättningar och tillverkningstekniker för materialet kan dock ge förbättrade brandegenskaper. PIR-isoleringen används ofta i så kallade sandwichpaneler där isoleringen ligger mellan två ytskikt. I brandförsök i fullskala kan man undersöka om dessa paneler är av önskvärd kvalitet gällande sina brandegenskaper. Dessa försök är dock tidskrävande och dyra. I denna studie utvärderas därför möjligheten att använda konkalorimetern som ett screening-verktyg för PIR-isoleringen. Detta för att på ett snabbt och enkelt samt kostnadseffektivt sätt kunna se vilka material som håller önskvärd kvalitet utan att behöva lägga resurser på fullskaleförsök.

Fyra material från olika leverantörer testades i konkalorimetern avseende antändningstid, effektutveckling, massförluster och energiinnehåll. Ett av materialen var från ett FM-approval (4880)-godkänt sandwichpanel-system, det vill säga att systemet inklusive PIR-isoleringen klarat flertalet brandtester, däribland försök i fullskala med en höjd upp till 15 m, i enlighet med standarden 4880. De övriga materialen var otestade i fullskala. Materialen testades generellt i enlighet med ISO-5660-1:2015 och för flertalet olika strålningsnivåer.

Resultaten visade att det var mycket svårt att använda antändningstiderna som en parameter för att skilja materialen åt. Antändningstiderna på de lägre strålningsnivåerna blev mycket ojämna vilket innebär stora osäkerheter och för de högre strålningsnivåerna blev antändningen av materialet mycket snabb vilket försvårar en exakt mätning. Bäst resultat avseende antändningstider erhöles från strålningsnivån 35 kW/m² då skillnaderna mellan material var störst vid denna intensitet.

För övriga parametrar gav maximal effektutveckling per ytenhet samt den genomsnittliga effektutvecklingen per ytenhet 60 sekunder in i försöken störst skillnader mellan materialen emellan. Ett av materialen skilde sig från de andra och presterade mindre bra i majoriteten av försöken, både gällande effektutveckling och antändningstider. För övriga material var skillnaderna inte lika tydliga. Osäkerheterna i resultaten är dock mycket stora vilket gör att slutsatser är svåra att dra. Dels är repeterbarheten på försöken mycket ojämn. Sedermera är skillnaderna mellan det bäst respektive sämst presterande materialet, avseende effektutvecklingen, kring 30 % vilket mycket väl kan ligga inom osäkerhetsområdet för mätningarna.

Koppling mellan utförda småskaleförsök och fullskaleförsök var svår att hitta. Försöken visade generellt på att PIR-materialet som ingick i en fullskaletestad (och godkänd enligt FM-approval standard 4880) sandwichpanel inte erhöles förbättrade egenskaper i något avseende. För att med säkerhet veta om metoden är användbar och om den skulle kunna fungera som ett screenings-test för isoleringen krävs dock att fler försök med PIR-material utförs som också genomgått fullskaleförsök i en sammansatt sandwichpanel.

Summary

PIR-insulation is a plastic insulation material and is widely used in constructions today. The benefits with the insulation is that it has a great insulation value and that it is of low density. A downside with PIR is that it is a combustible material. However, differences in manufacturing methods or composition can give different fire properties. The PIR-insulation is often used in so called sandwich panels, where the insulations lies in the middle between two outer layers. In full scale fire testing the differences in fire properties is shown, and materials with better flame retardant properties is distinguished from those with less good properties. The full-scale testing is however an expensive and time-consuming process. Therefore, in this study the possibility to use the cone calorimeter as a screening tool for PIR foams has been examined.

Four PIR-materials from different suppliers has been tested in the cone calorimeter regarding time to ignition, heat release rate, mass rate loss and energy content. One of the materials was from a FM-approved sandwich panel -system, which means that it has completed the full-scale testing procedure according to the standard 4880. The other materials were not from sandwich panels tested in full scale. The testing was in general performed according the ISO 5660-1:2015 and several different radiant heat flux levels were used.

The results showed great difficulties in using the time to ignition as a parameter for distinguishing the different materials. The ignition times on the lower flux levels were very uneven and that gives large uncertainties in the results. The higher flux levels gave a very fast ignition, which makes the measurements less accurate. Best results were given at the 35 kW/m² level, the greatest differences between the materials was shown at this level.

For the other parameters the peak heat release rate and the average heat release at 60 seconds gave the largest differences between the materials. One of the materials was distinguished by obtaining the highest HHR and the quickest ignition time in the majority of the tests. For the other materials the results were not as clear, the differences could not be pointed out as easily. However, the uncertainties in the results are large and any conclusions is therefore hard to make. The repeatability of the test was not consistent. The difference between the best performing and the least performing material, regarding HRR, was around 30 %, which very well can be within the margin for uncertainty for the readings. More testing is however necessary in order to find the best parameter to use for evaluation of the material in hand.

A link between small scale and full scale were difficult to find. The material that was from an FM-approved (4880) sandwich panel did not in general obtain improved values compared to the other materials. However, to be sure of the usefulness of this method to act as a screening test for the insulation material more research needs to be done and more materials needs to be tested, preferably, materials that are from already full scale tested sandwich panels.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Mål och Syfte.....	2
1.3 Problemställning.....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
2 Teori och litteratur.....	3
2.1 PIR som byggnadsmaterial.....	3
2.2 Brandklasser.....	4
2.3 Tidigare försök.....	6
3 Metod och material.....	7
3.1 Försöksmetodik.....	7
3.2 Osäkerheter vid användandet av konkalorimeter.....	10
3.3 Uppmätta parametrar.....	10
3.2 Material.....	14
4 Resultat.....	15
4.1 Antändningstid.....	15
4.1.1 Kritisk infallande strålning.....	16
4.2 Effektutveckling.....	20
4.3 Massförlust.....	29
4.4 Energiinnehåll.....	31
5 Diskussion.....	33
6 Slutsats.....	35
7 Referenser.....	37

1 Inledning

I detta avsnitt presenteras bakgrund till arbetet samt syfte, målsättning, problemställning och avgränsningar.

1.1 Bakgrund

Idag används PIR - isolering i stor utsträckning vid byggnationer då det är kostnadseffektivt samt ger ett bra isoleringsvärde. PIR används ofta i så kallade sandwichpaneler där isoleringen används som kärnmaterial och ligger i mitten mellan två ytterlager av exempelvis stål, aluminium eller betong. Fördelarna med denna typ av konstruktion är att den är billig, lätt att hantera och ger ett bra isoleringsvärde (J.M. Davies, 2001).

Sandwichpaneler används i stor utsträckning i industrihallar och lagerbyggnader som i Sverige ofta klassificeras som Br3 eller Br2-byggnader (Boverket, 2018). Kravbilderna avseende ytterväggar för Br3- och Br2-byggnader är främst ytskiktsskrav på fasaden som säger att denna ska uppfylla lägst ytskiktssklass D-s2,d2, vilket motsvarar exempelvis träpanel (Svenskt Trä, 2019). Klassificering av ytskikt sker i Sverige och Europa enligt det så kallade Euroklasssystemet som är ett certifieringssystem för byggnadsmaterial (SP, 2018a). Då testas hela sandwichpanelen genom standardiserade provningsmetoder. Det har dock uppenbarats att detta certifieringssystem inte är fullt tillämpligt på just sandwichpaneler då det kan överskatta den brandavskiljande förmågan hos panelerna (Axelsson & Van Hees, 2004).

Då det inte heller ställs några direkta krav på den bakomliggande isoleringen vid byggnation av dessa typer av byggnader är det svårt att veta brandegenskaperna hos denna genom att bara gå efter certifiering enligt Euroklasserna.

I vissa fall kan företag av egen ambition (exempelvis egendomsskydd eller försäkringskrav) ställa högre krav än gällande myndighetskrav. Det kan dessutom vara problematiskt att hålla en genomgående god nivå på byggnadsutformning för företag som verkar i olika länder med olika myndighetskrav. För att säkerställa att en produkt, i detta fall en sandwichpanel med brännbar isolering, uppfyller de egna ställda kraven kan produkter testade i full skala, exempelvis genom försäkringsbolaget FM Globals egna godkännande FM-approvas, användas.

Fullskaleförsök kan avslöja hur sandwichpanelerna inklusive den brännbara isoleringen skulle bete sig i ett verkligt brandförlopp och material som ger önskvärda egenskaper kan då väljas. Problemet med att utföra sådana tester är dock att det är en resurs- och tidskrävande process vilket leder till höga kostnader.

Att identifiera de egenskaper som hos de ingående materialerna som leder till goda resultat i fullskaleförsöken är därför av största vikt. Detta så att man i ett tidigt stadium kan välja bort material som inte har dessa egenskaper. Då den brännbara isoleringen är en av de faktorer som spelar in i hur en PIR-sandwichpanel beter sig i ett brandförlopp så kan det vara av intresse att på ett enkelt och snabbt sätt kunna kontrollera att denna erhåller önskvärda egenskaper.

I detta arbete undersöks därför möjligheten att kunna urskilja PIR-material som har önskvärda egenskaper genom konkalorimeterprovningar. Det är då endast själva isoleringsskummet som testas och inga ytskikt är därmed med och påverkar resultaten. Detta för att se om konkalorimetern skulle gå att använda som ett slags screening-verktyg för isoleringen och den sammansatta konstruktionen. Det skulle ge tillverkare möjligheten att snabbt kunna se om deras material har de egenskaper som eftersträvas.

1.2 Mål och Syfte

Syftet är att undersöka möjligheten att använda försök från konkalorimeterprovningar med isoleringsmaterialet PIR som en screeningmetod för att beskriva ett troligt brandförlopp i fullskaleförsök.

Målet är att genomföra försök på isoleringsskummet (kärnmaterial i en sandwichpanel) utan ytskikt, i konkalorimetern, för att hitta parametrar som är betydelsefulla för PIR-materialens brandegenskaper samt kvantifiera dessa.

1.3 Problemställning

- Vilka kriterier (parametrar) ska användas för att skilja materialen åt?
- Kan man se skillnader på olika PIR-materials brandegenskaper genom försök i konkalorimeter?
- Är det möjligt att klart identifiera egenskaper hos en PIR-isolering som används i en FM-godkänd (enligt standard 4880) sandwichpanel i förhållande till andra typer av PIR-isoleringar?

1.4 Avgränsningar

Arbetet kommer endast inrikta sig på isoleringsmaterialet och ej hela sandwichpaneler. Detta för att undersöka om provningar på endast isolering kan ge en bild av hur en sandwichpanel (med isoleringen som kärnmaterial) skulle prestera i ett fullskaleförsök. Ytskikt kommer alltså inte vara med i testerna utan endast PIR-skummet är i fokus.

Arbetet kommer dessutom avgränsa sig till att endast fyra olika typer kommer jämföras och endast försök i konkalorimeter kommer att utföras.

Ursprungstanken var att jämföra resultat mellan olika material från fullskaleförsök. Detta för att sedan kunna se om resultat i småskaleförsöken överensstämmer med resultat från fullskaleförsöken. Men på grund av svårigheter med anskaffandet av material är endast ett av materialen från en fullskaletestad och godkänd sandwichpanel av FM approvals (standard 4880). De övriga materialen är ej testade i fullskala vilket innebär att det inte med säkerhet går att säga en sandwichpanel innehållande dessa material skulle prestera annorlunda i ett fullskaleförsök.

Jämförelsen blir därför att se om det går att urskilja några tydliga skillnader mellan de olika materialen och om man kan tydligt kan identifiera egenskaper för PIR-materialet som är hämtat från en fullskaleprovad (samt godkänd enligt FM-approvals standard 4880) sandwichpanel. Men på grund av att övriga material är otestade är det svårt att direkt koppla konkalorimeterresultaten med fullskaleförsök.

Sammansättningen hos materialen har ej studerats då information angående detta ej har gått att få fram. Likaså har ingen kemisk analys av materialen har utförts. Sammansättningen är därav okänd. Ingen koppling görs därför mellan materialets sammansättning och brandegenskaperna.

2 Teori och litteratur

I detta avsnitt presenteras bakomliggande fakta samt resultat från tidigare försök som utförts på PIR-isolering i konkalorimetern.

2.1 PIR som byggnadsmaterial

PIR isolering började användas kommersiellt i början av 00 – talet och efter det har användningen ökat snabbt i hela världen. PIR kan ses som en vidareutveckling av fast PUR isolering (Polyuretan) som använts i byggbranschen sedan mitten av 60-talet (BRUFMA, 2017).

PIR (Polyisocyanurat) är ett polymeriskt isoleringsskum som tillverkas genom att reagera en flytande polyol-komponent med en flytande polymerisk isocyanat, metylendifenyl-diisocyanat (MDI), detta tillsammans med skumbildande medel samt en del andra tillsatser, exempelvis flamskyddsmedel. I princip alla typer av PIR innehåller små tillsatser av flamskyddsmedel för att ge en minskad brännbarhet (PIMA, 2014). De flamskyddsmedel som kan tillsättas är oftast organofosfat-baserade, där ett vanligt förekommande ämne är TCPP (PIMA, 2014).

Beståndsdelarna i PIR är desamma som för det mer välkända materialet polyuretan men vid tillverkningen PIR ökas mängden MDI vilket leder till att isocyanurat bildas. Detta ämne gör PIR-material mer värmetåligt och ger en minskad brännbarhet gentemot PUR (BRUFMA, 2017). Isocyanurat i sig själv är dock inte tillräckligt tåligt för att vara användbart för konstruktionsändamål varvid en viss mängd polyuretan måste finnas i materialet (Albani m.fl., 2017).

Fördelarna med PIR är bland annat ett mycket bra isoleringsvärde (λ - värde för PIR ligger mellan 0,022-0,027 W/m*K, att jämföra med mineralull som ligger mellan 0,032-0,044 W/m*K (Greenspec, 2018) Materialet är också väldigt lätt, densiteten ligger på 30-40 kg/m² (Greenspec, 2018) vilket är ungefär densamma som för EPS (expanderad polystyren, 15-30 kg/m² (Greenspec, 2018). Dessutom är PIR lätt att fästa vid andra material samt relativt starkt i förhållande till sin låga vikt vilket gör PIR-isolering fördelaktig i många byggprojekt. (BRUFMA, 2017).

Nackdelarna med materialet är just brandrisken. PIR är en av de skumplaster som har bäst brandegenskaper, till följd av innehållet av polyisocyanurat (PIMA, 2014). Ämnet är dock brännbart och då PIR, som nämnts ovan, även innehåller en viss mängd polyuretan så kan det ge oönskade brandegenskaper. Sammansättningen hos materialet är därför viktig för brandegenskaperna (Albani m.fl., 2017).

PIR-isolering används ofta i så kallade sandwichpaneler, se figur 1 nedan, där isoleringen används som ett kärnmaterial mellan två ytskikt, exempelvis stål, aluminium eller betong. Ytskikt kan även finnas på materialet själv, exempelvis aluminiumfolie eller glasfleece. Sandwichpanelerna kan användas till både vägg och takkonstruktioner och har blivit mycket populärt inom byggbranschen på senare år. Anledningen till den ökade användningen är att de medför ett snabbt byggande och att de är av låg vikt samt att kostnaden kan hållas nere. (J.M. Davies, 2001).

Panelernas brandegenskaper är följaktligen beroende av dels ytskikten och dels sammansättningen hos isoleringsmaterialet.

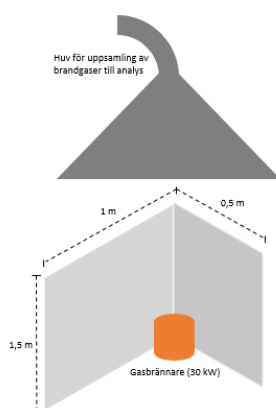


Figur 1: Sandwichpanel med PIR-kärna och ytskikt i stål.

2.2 Brandklasser

Brandkraven för panelerna är klassificerade i brandklasser som fastställs genom standardiserade provningsmetoder. I Europa används det så kallade Euroklasssystemet vilket är ett certifieringssystem av byggnadsprodukter som används sedan början av 2000-talet. Byggnadsmaterial delas in i klasser beroende på hur väl de presterar i de olika testen. Klasserna avseende ytskikt (fasader) sträcker sig från A (obrännbart) till E (brännbara) samt en klass F (otestade material) (Sundström, 2001). För de byggnadstyper som sandwichpaneler ofta används i, exempelvis lagerbyggnader och industribyggnader i ett eller två plan (J.M. Davies, 2001), som i Sverige ofta hänförs till byggnadsklasserna Br2 eller Br3, är det endast dessa ytskiktsskrav på fasaden som ställs på ytterväggskonstruktioner. Ytskiktsskravet är då att fasaden ska klara lägst brandteknisk klass D (Boverket, 2018).

För att ett material ska bli klassat som obrännbart (klass A) ska det klara ett brännbarhetstest enligt ISO 1182 och ett test där det potentiella energibidraget mäts, detta i en så kallad bombkalorimeter enligt standarden ISO 1716 (Sundström, 2001). För att få klassificeringen B eller lägre ska materialet klara av provningar enligt EN 13823 även kallad Single Burning Item (SBI). SBI-metoden innebär att materialet placeras framför en gaslåga på 30 kW, i enlighet med figur nedan (Sundström, 2001). De brandgaser som bildas till följd av exponeringen från lågan samlas upp i en huv likt den i en konkalorimeter och analyseras sedan för att få fram värden för bland annat effektutveckling. SBI kombineras med ett flamspridningstest (ISO 11925) och beroende på hur väl utfallet från provningarna bestäms klassen på materialet (Sundström, 2001).



Figur 2: Schematisk bild över försöksuppställningen vid test enligt EN 13823, Single Burning Item (SBI)

Ett problem som har uppenbarats vid flertalet tillfällen angående klassificeringen från provningar enligt SBI-metoden är att den kan överskatta ett materials brandavskiljande förmåga, framför allt för sandwichpaneler (Axelsson & Van Hees, 2004). I jämförelser mellan fullskaleförsök och SBI har man sett att SBI-metoden inte överensstämmer med fullskaleförsöken. Sandwichpaneler med PIR-kärna klassas ofta som B i euroklasserna, men på grund av oöverensstämmelserna betyder det alltså inte nödvändigtvis att produkten har önskvärda brandegenskaper (Axelsson & Van Hees, 2004). Det obrännbara ytskiktet är tillräckligt för att ge goda resultat i SBI-testet men i ett riktigt brandscenario kan den brännbara isoleringen exponeras på ett helt annat sätt och därmed bidra till branden (Axelsson & Van Hees, 2004).

Brandegenskaperna för just PIR-materialet kan med hänsyn till ovanstående utgöra en osäkerhet, trots att själva panelen som en helhet uppfyller erforderlig skyddsnivå.

I många fall ställs också högre krav än gällande myndighetskrav vid ny- samt ombyggnationer. Detta kan exempelvis handla om en egen ambition från byggherren för att få ett ökat egendomsskydd eller att ett högre krav ställs från försäkringsbolag. För att försäkra sig om att kvaliteten av byggnadens konstruktionsmaterial, i detta fallet gällande brandegenskaperna, håller en viss lägsta nivå kan produkter testade i fullskala vara ett alternativ.

Referenstestet till SBI, Room Corner test enligt ISO9705, används i vissa fall för att testa ytskikt hos byggnadsmaterial. Metoden utvärderar brandegenskaper hos ytskikt för olika byggprodukter i ett rumsbrandscenario (SP, 2019), vilket då i vissa fall kan ge en bättre bild av hur materialen, framförallt sammansatta material så som sandwichpaneler beter sig vid brand. Precis som nämnts ovan har det visat sig för just sandwichpaneler att SBI inte alltid ger en rättvis bild av produktens brandegenskaper. Jämförelsestudier mellan bland annat Room Corner test och SBI har visat på att SBI tenderar att överskatta brandegenskaperna (Axelsson & Van Hees, 2004). Dock är det SBI som fortsatt är det kravställda testet i enlighet med Euroklasserna för klassificering av sandwichpaneler. Det finns därmed fortsatt stora osäkerheter i brandegenskaperna hos den bakomliggande isoleringen trots att produkten i sig är CE-märkt.

I Sverige används i vissa fall fullskaletestet SP Fire 105 för godkännande av ytterväggskonstruktioner, främst olika typer av fasadsystem, enligt Boverket (Boverket, 2018). För byggnader som hänförs till högre byggnadsklasser än de ovan nämnda (alltså Br1 eller Br0) gäller att ytterväggar ska vara utförda av obrännbart material alternativt ska konstruktionen klara provning enligt just SP Fire 105. Provningsmetoden är dock inte en internationell standard och krävs ej i Sverige vid byggnation med PIR-sandwichpaneler vid uppförandet av Br2 respektive Br3 byggnader. Med hänsyn till detta kan det finnas skäl för både konsumenter och tillverkare av sandwichpaneler att vända sig till andra typer fullskaleförsök i de fall kvalitetssäkring önskas.

För internationella företag som vill försäkra sig om en likvärdig byggnadsutformning oavsett vilket land som byggnaden uppförs i kan det vara problematiskt att olika krav och standarder gäller i olika länder. Regelverken ändras också kontinuerligt och som nämnts ovan kan kraven från myndigheterna vara lägre än egenambitionen. Internationellt sett så finns exempelvis försäkringsbolaget FM-Global som testar godkänner byggnadsmaterial via deras egna godkännande kallat FM-approvals. Detta godkännande är inte kopplat till några myndighetskrav men kan användas just för kvalitetssäkring av exempelvis byggnadsmaterial.

Andra försäkringsbolag så som UL och BRE använder sig av likande, godkännande, kallat LPC-approval (Loss Prevention Council) där fullskaleförsök krävs. FM-approval samt LPC metoder är två av de mest vanligt förekommande fullskaleförsöken för just sandwichpaneler (Apte, 2006).

Brandtesterna som FM-approvals utför och som produkter måste klara för att bli godkända enligt deras egen certifiering presenteras nedan.

För vägg och takpaneler gäller standarden 4880 (FM - approvals, 2015). För att produkten ska bli godkänd enligt denna egna upprättade standarden och få en så kallad *class 1 fire rating* ska den klara två olika typer av fullskaleförsök. För väggpaneler som används utomhus är brandkraven detsamma som för FM 4880 men tillägg görs för att testa bl.a. vindpåverkan (FM-approvals, 2016). Takpaneler för utomhusbruk testas enligt liknade standard kallad FM 4771 (FM-approvals, 2010).

Fullskaleförsöken består dels av ett rumstest enligt standarden UBC 26-3 3 (FM - approvals, 2015) eller motsvarande test enligt ISO9705 (även kallat room-corner test enligt ovan) (SP, 2018b). Ett rum i storleken 2,4x3x2,4 m bekläs med materialet.

Sedan placeras en gasbrännare i hörnet av rummet vilken levererar en effekt i storleksordningen 100 kW under 10 min och sedan 300 kW i de efterföljande 10 minuterna. Flamspridning längs väggar och tak noteras visuellt och likt SBI sugas även brandgaserna upp i en huv och analyseras (SP, 2018b).

Hörntestet enligt FM-approval 4880 består av ett test där man bygger ett hörn av paneler till en höjd om 15,2 m (för att få den högsta klassificeringen) och en brand placeras intill. Branden, bestående av träpallar, antänds och tester fortgår i 15 minuter. För att produkten ska bli godkänd ska flammor inte sprida sig till kanterna av försöksuppställningen. För att produkten ska bli godkänd för användning med obegränsad höjd ska taket ovanför försöksuppställningen inte antända (FM - approvals, 2015). Klarar produkten testen för 9,1 meter blir produkten godkänt för användning understigande 9,1 meter. Klarar produkten kravet för 15,2 meter gäller också då en begränsning av höjd vid användandet. Obegränsad höjd innebär att produkten är godkänt att använda utan restriktioner.

Utöver ovan nämnda försök ska en sandwichpanel (med brännbar kärna) klara ett småskaleförsök i en så kallad FPA (Fire propagation Apparatus). Detta småskaleförsök utförs på den brännbara isoleringen. Försöksapparaturen mäter bland annat flamsspridning över materialets yta. Om flamspridningen är för snabb (enligt FM-approvals riktvärden) kommer fullskaleförsök ej utföras för den aktuella produkten utan produkten underkänns.

En panel med PIR-isolering som blivit godkänt för obegränsad användning enligt FM-approvals och som klarat ovan nämnda tester ger således en indikation på att isoleringsskummet har önskvärda brandegenskaper.

Fördelen med denna typ av tester är att det ger en god bild av hur ett verkligt brandförlopp, med det aktuella byggnadsmaterialet involverat, skulle se ut. Nackdelen med tester likt ovan nämnda är som tidigare nämnts att de är mycket resurskrävande.

2.3 Tidigare försök

Tidigare försök med PIR – isolering i konkalorimeter har framförallt handlat om att utvärdera skillnader mellan material med olika tillverkningsprocesser och med olika tillsatser av flamskyddsmedel.

Konkalorimetern har då använts som ett sätt påvisa en förbättring av brandegenskaperna för materialen. Försöken har dock inte jämfört testerna i konkalorimetern med hur materialen presterar i full skala. För att hitta en lämplig strålningsnivå till försöken har resultat från dessa tidigare rapporter studerats. Man kan se att om strålningen är för hög kan inga skillnader i antändningstid urskiljas vilket då leder till att det inte går att jämföra denna parameter.

I rapporten *Influence of different flame retardants on fire behaviour of modified PIR/PUR polymers* (M. Modestia m.fl., 2001) har försök på PIR och PUR material utförts i konkalorimeter avseende inverkan av olika halogenfria flamskyddsmedel och hur brandegenskaper hos isoleringen förbättras. I dessa försök användes en strålningsnivå på 50 kW/m², antändningstiden har i dessa försök legat på en knapp sekund för samtliga material, man har alltså inte kunnat jämföra denna parameter. Man har dock kunnat se en skillnad i maximaleffektutveckling till följd av olika mängder tillsatt flamskyddsmedel till isoleringsskummen. Den maximala effektutvecklingen har legat mellan 120 och 260 kW/m² (brandeffekt i kW per kvadratmeter materialyta) i dessa försök.

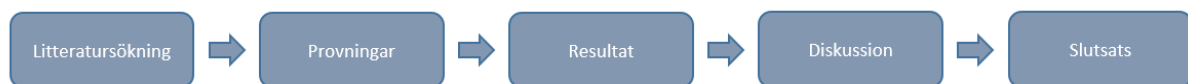
I en annan rapport, *Expandable graphite as an intumescent flame retardant in polyisocyanurate-polyurethane foams* (M. Modestia m.fl., 2001) studeras inverkan av grafit som flamskyddsmedel i PIR skum och har utvärderats i konkalorimeter. Även här har en strålningsnivå på 50 kW/m² använts och likaså kan inte antändningstiden jämföras då tiden till antändning är för snabb. Skillnader i effektutveckling visar på en tydlig förbättring som funktion av mängden flamskyddsmedel. Den maximala effektutvecklingen ligger i försöken på 40 – 120 kW/m².

Tidigare försök av Polyuretanskum (PUR) har också varit av intresse i litteratursökningen då det som tidigare nämnts är snarlikt PIR i kemisk sammansättning. I rapporten *Synthesis and fire properties of rigid polyurethane foams made from a polyol derived from melamine and cardanol* (Meng Zhang m.fl, 2014) utreds brandegenskaper hos olika PUR-skum tillverkade med olika metoder och med olika tillsatser. Resultaten är likt ovanstående rapporter endast en jämförelse mellan materialen och ingen jämförelse har gjorts mellan tester i full skala och tester i konkalorimetern. I författarnas rapport används en strålningsnivå på 35 kW/m² vilket ger antändningstider på mellan 3-5 sekunder och man kan även se att det materialet med högst effektutveckling också antänder först. Den maximala effektutvecklingen ligger mellan 110 och 210 kW/m². Total frigjord energi är i storleksordningen 15- 20 MJ/m² under brandprovet.

I rapporten *Use of cone calorimeter for evaluating fire performances of polyurethane foams* (M. Checchin m.fl, 1998) utförs försök för att utvärdera konkalorimeterns möjlighet att urskilja olika bra PUR-isoleringskum. Även i dessa försök har inte materialens prestationer i full skala tagits i beaktning. I deras försök har en stor skillnad i antändningstider påvisats (mellan 2-16 sekunder). Strålningsnivån har då legat på 40 kW/m². Här har man fått resultat avseende maximal effektutveckling som ligger mellan 48 och 300kW/m².

3 Metod och material

Experiment används som metod för att för att uppnå målet och arbetet kommer generellt följa arbetsgången som presenteras i figur 3, i enlighet med rapporten Att skriva en rapport (Björklund & Paulsson, 2002). En inledande litteraturstudie, se avsnitt 2.3, genomförs för om möjligt bestämma vilka ungefärliga strålningsnivåer som är lämpliga att använda vid försöken samt ge referensdata som försöken kan jämföras med. Sedan kommer provningarna på de olika materialen att utföras i konkalorimetern och data samlas in. Data från provningarna jämförs sedan sinsemellan och presenteras i ett resultatavsnitt. Rapporten avslutas med ett diskussionsavsnitt där eventuella felkällor, förslag till fortsatt forskning samt slutsatser från arbetet tas upp.



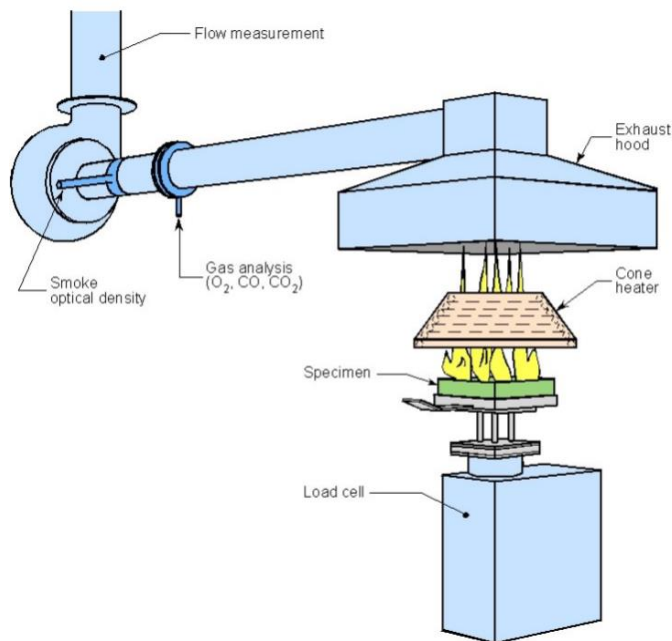
Figur 3: Arbetsgång

3.1 Försöksmetodik

Försöken i denna studie har utförts i en konkalorimeter, se figur 4. Att konkalorimetern väljs före andra småskaleförsök är på grund det är en relevant och beprövad mätmetod för just detta avseende. Konkalorimetern används i stor uträkning i hela världen vid produktutveckling och för kontroll av produkters brandegenskaper (SP, 2018). Den ger också ett standardiserat test som går att upprepa på andra platser vilket är fördelaktigt om testet ska kunna användas för att bedöma produkters kvalitet avseende brandegenskaper (NIST, 2017)

Konkalorimetern i dess nuvarande tappning började användas i slutet av 1980-talet och har blivit en av de mer väletablerade testmetoderna i kategorin småskaleförsök inom brandområdet. Idag finns det över 300 konkalorimeterutrustningar världen över (NIST, 2017).

Apparaturen består av en konformad värmekälla som i det standardiserade testet ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015) kan utsätta provmaterialet med en värmestrålning upp till 75 kW/m². Under konen placeras provet i en ställning innehållande en våg för mätning av massförlust. Vid provet kan en gniststrare placeras som fungerar som antändningskälla för de brandgaser som bildas vid pyrolysen av materialet. Ovan konen sitter en huv kopplad till en fläkt vars uppgift är att suga upp de rökgaser som bildas för att sedan kunna analysera dessa. I rökkanalen sitter även en laser vilken mäter röktätheten.



Figur 4: Principskiss av en konkalorimeter, bilden är hämtad, med tillstånd, från SP (SP, 2018).

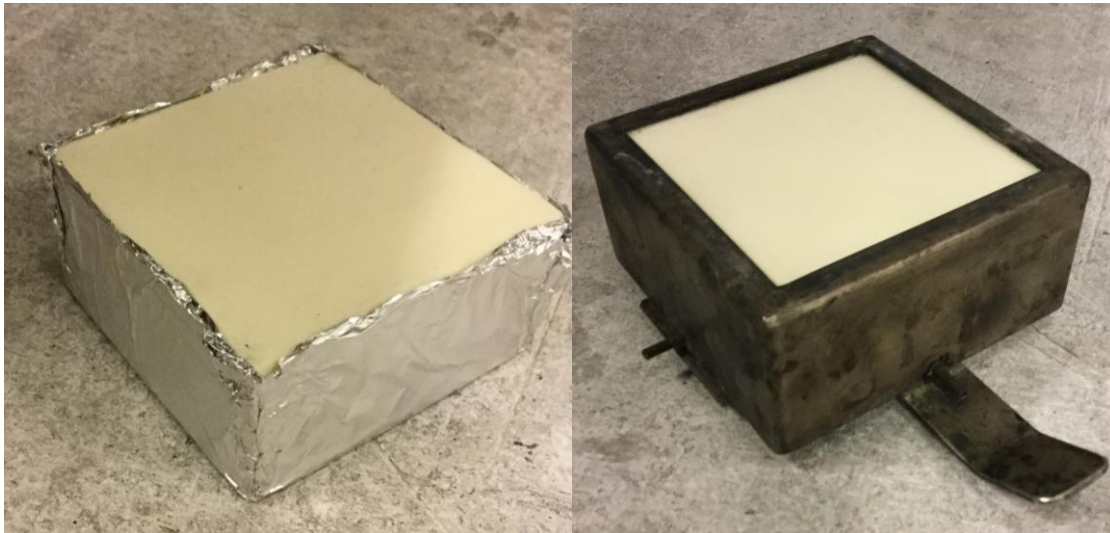
Metodiken för försöken är generellt de som beskrivs i standarden ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015).

Testförfarandet enligt standarden är enligt nedan:

1. Initiala förberedelser – Innefattar inställningar och kalibrering av försöksutrustningen.
2. Testprocedur – Provningsen börjar med att en minuts basdata (*baseline data*) samlas in. Intervall för insamling av data är som standard 5 sekunder. Strålningsskärmen ska vara stängd innan provet placeras i under värmekällan och temperaturen på strålningsskärmens utsida ska vara understigande 100 °C. Sedan placeras provhållaren innehållandes provet i ställningen. Till sist startas provningen genom att strålningsskärmen öppnas och provet exponeras för värmekällan. Ginstalstraren placeras snabbt efter att strålningsskärmen öppnats ovan provet (inom 1 sekund).
3. Insamling av data – Tid till antändning noteras (tid till att en stabil flamma uppstått). Om flamma ej uppstått inom 30 minuter avbryts försöket. Data samlas in antingen till 30 minuter efter att antändning skett eller till dess att syrekonzentrationen stabiliserar sig på ett värde som är större än koncentrationen innan testet minus 100 µl/l eller att provets massa understiger 0,1 gram i minst 60 sekunder. Standarden anger att tre försök ska utföras så länge effektutvecklingen vid 180 s ej skiljer mer än med 10 % av medelvärdet för något försök (om medelvärdet understiger 10 kW/m² ska dock som standard sex försök genomföras).

I försöken som utförts i denna rapport har tre stycken försök utförts för var och en av materialen för samtliga strålningsnivåer i enlighet med standarden, undantaget 50 kW/m² där endast ett försök per material utfördes.

Försöken inleddes med att proven förbereddes. Samtliga ytskikt (stål, aluminiumfolie, glasfleece) togs bort så att endast isoleringsskummet skulle exponeras i konkalorimetern. Materialet sågades sedan i bitar (98x98x48 mm.) för att passa i provhållaren. Proven dammsögs sedan försiktigt för att avlägsna eventuella dammpartiklar som skulle kunna påverka antändningstiden då damm antas kunna antändas lättare än det fasta materialet. Bitarna vägdes en och en innan provet slogs in i aluminiumfolie för att skydda sidorna från värmeförluster.



Figur 5: Visar hur provbitarna slogs in i folie för att skydda kanterna från värmeförluster, i bilden till höger är provet placerat i provhållaren.

Proven placerades sedan i provhållaren. Vid försöken användes den tillhörande ramen dock utan det metallnät som i vissa fall kan användas vid försök med den standardiserade provhållaren. Se figur 5 för utformning av provet, arean på öppningen är i detta fall 88,4 cm. Proverna testades horisontellt, vilket rekommenderas då inget material kan falla bort från ytan (Babrauskas, Development of the Cone Calorimeter, 1982). Tändkällan (gnistalstrare) användes vid samtliga försök. Innan testerna inleddes kalibrerades apparaturen i enlighet med det normala kalibreringsförfarandet (Twilley & Babrauskas, 2001). Hastigheten på fläkten ställdes in så att flödet i kanal var 24 l/s. Avståndet mellan konen och provet kontrollerades så att avståndet mellan de båda var exakt 25 mm och vågen tarerades inför varje försök.

Försöken inleddes med en strålningsnivå på 20 kW/m². Detta då de tidigare försöken som utförts på PIR, enligt litteraturgenomgången i föregående kapitel, visade att en lägre strålningsnivå gav en större skillnad i antändningstider. Tidigare försök, se avsnitt 2.3 för mer detaljerad information, visade att 35 kW/m² gav mycket tydligare skillnader än om högre strålningsnivåer användes. För att undersöka om en ännu lägre strålningsnivå gav ytterligare skillnader sänktes alltså nivån från 35 kW/m² till 20 kW/m².

Materialen provades även med strålningsnivåerna 30, 35, 40, 45 samt 50 kW/m² avseende antändningstid för att generera data för beräkning av kritisk infallande strålning för antändning. Vid provning för 50 kW/m² uppmättes likt tidigare försök antändningstider understigande 1 sekund varvid försök på högre strålningsnivåer ansågs vara otjänligt då så pass snabba antändningstider är svåra att mäta exakt och har då procentuellt stora osäkerheter.

Övriga parametrar så som effektutveckling, energinnehåll och massförlust uppmättes först vid en och samma strålningsnivå, 40 kW/m². Försöken avslutades generellt när flamman hade slocknat, vilket således utgör ett avsteg från standarden enligt ovan, detta då fokuset i dessa tester ej låg på efterglödtid. Kontrolltester utfördes dock där de 10 efterföljande minuterna efter att flamman slocknat studerades.

Efter en första utvärdering av resultaten togs beslutet att nya försök på 50 respektive 30 kW/m² var lämpliga att utföra. Dessa försök inriktade sig på effektutvecklingen (maximal samt genomsnittlig vid 60 sekunder). Efter att ett test per material utförts på respektive nivå togs sedan beslutet att två ytterligare försök var lämpliga att utföra för 30 kW/m². Lägre strålningsnivåer än 30 kW/m² användes inte för att jämföra dessa parametrar då de allt för stora skillnaderna i antändningstid, för samma material, vid dessa nivåer ansågs påverka resultaten för dessa parametrar. Om exempelvis materialet får värmas upp under en lång tid innan det antänder jämfört med om materialet antänder direkt kan resultaten bli ojämförbara.

En känslighetsanalys för den kritiska infallande strålningen utfördes genom att resultaten för 25, 35 respektive 50 kW/m² plockades bort var för sig för att se hur mycket det påverkade slutresultatet.

3.2 Osäkerheter vid användandet av konkalorimeter.

Alla typer av mätningar ger en viss mängd av osäkerhet i resultatet. Detta är oundvikligt och något som måste tas i beaktning när mätningar utförs. I de flesta fall fås inte mätvärdet från direkta mätningar utan är en funktion av flera ingående parametrar enligt nedan (Janssens, 2016).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Där Y är det sanna mätvärdet, f är sambandet mellan mätvärdet och de ingående parametrarna och X är de ingående parametrarna.

I fallet där effektutvecklingen mäts i konkalorimetern representeras detta samband av ekvation [2] enligt avsnitt 3.5 nedan. Osäkerheter i mätfel av syrekoncentrationen, densitet, temperatur och flöde samt hur väl antagandet om energiproduktion per förbrukad mängd syre stämmer överens med aktuellt bränsle bidrar alla till osäkerheten i effektutvecklingen (Janssens, 2016)

I tidigare försök utförda av Janssens har denna osäkerhet visat sig ligga på +/- 11 % (Janssens, 2016). Dessa försök gjordes på glasfiberarmerad plast. Det har dock visat sig att ju lägre effektutveckling som ett material producerar desto större blir osäkerheterna i konkalorimetern. Detta då skillnaden i syrehalt mäts i ett spann som är anpassat för en högre effektutveckling (Enright & Fleischmann, 1999). I framtagandet av konkalorimetern användes PMMA (termoplast) samt träprov (Röd Ek) vilka gav en maximal effektutveckling på kring 800 kW/m² respektive 300 kW/m² (Babrauskas, Development of the Cone Calorimeter, 1982).

3.3 Uppmätta parametrar

Nedan presenteras de parametrar som uppmäts i konkalorimetern och som används vid jämförelsen av materialen. Parametrarna är generellt de av SFPE rekommenderade (Babrauskas, The Cone Calorimeter, 2016). Dessutom kommer parametern *kritisk infallande strålning* att jämföras, detta för att kunna jämföra antändningstider från flera olika försök för att på så sätt minska osäkerheter i resultaten.

Massavbrinningen från dess att flaman slocknat och efterföljande 10 minuter studeras också, vid ett av försöken, för att om möjligt kunna se skillnader i hur mycket pyrolysgaser materialet kan bilda efter att ha brunnit under en tid. Rökutvecklingen studeras inte då det är materialets brandmotståndsförmåga som ligger i fokus och inte materialens förmåga att producera sot.

Antändningstid (s)

Denna parameter uppmäts genom att tiden mellan att provet blir exponerat för värmestrålningen och att provet antänds med konkalorimeterns gnistalstrare. Antändning av materialet definieras som att en flamma syns på ytan av provet och att flaman inte slocknar inom 10 sekunder från att den först synliggjorts (ISO, 2015). Det är en okulär bedömning och är beroende av att personen som ansvarar för försöken är uppmärksam på när provet antänder och är snabb på att notera detta. Antändningstid är en mycket viktig egenskap avseende hur ett material presterar i en verklig brand (Bengtsson, 2001). Därför är denna tid intressant att ha med i jämförelsen av materialen.

Ett material antänder precis då tillräckliga mängder med pyrolysgaser bildats för att ge en brännbar luft-/bränsleblandning vid ytan (Bengtsson, 2001). Hur snabbt materialet kan bilda dessa brännbara gaser bestämmer alltså hur snabbt materialet antänder. Hur snabbt dessa gaser kan bildas beror i sin tur på hur angeläget materialet är att släppa ifrån sig pyrolysgaser samt temperaturen på ytan. För att ett fast material ska antända med hjälp av en antändningskälla krävs en yttemperatur på omkring 300 – 400 °C (Bengtsson, 2001). Det krävs alltså att en tillräcklig mängd energi tillförs till ytan så att avkylningen, energiförluster, från ytan inte överstiger den tillförda energin. Energiförlusterna från ytan är konvektiva förluster samt konduktiva (strålningsförluster kan bortses då de mycket små energiförlusterna via strålning inte påverkar nämnvärt). Skillnaderna materialen emellan blir naturligt de konduktiva, alltså hur snabbt värme kan ledas bort från ytan. För termiskt tjocka material bestäms detta framförallt av materialets värmeupptagningsförmåga (Drysdale, 2011).

Värmeupptagningsförmågan ($k\rho c$ alt $\lambda\rho c$) anges i $W^2 s/m^4 K^2$ och beror av materialets värmeledningsförmåga k alternativt λ ($W/m K$), densitet ρ (kg/m^3) samt den specifika värmekapaciteten c ($J/kg K$). Ett material som är välisolerat ger således en låg värmeupptagningsförmåga. En lägre värmeupptagningsförmåga gör att mindre energi leds bort från ytan, detta ger följaktligen en högre yttemperatur och en snabbare antändning (Bengtsson, 2001).

Materialet räknas som termiskt tjockt, det vill säga att värmeförluster baksidan av materialet inte anses påverka uppvärmningen, om (Drysdale, 2011):

$$L > 4\sqrt{(\alpha t)} \quad [0]$$

Där:

L = Tjockleken på materialet (m)

α = termiska diffusiviteten (m^2/s) = $k/\rho c$

T = tiden (s)

För aktuellt material ligger värmeledningsförmågan λ på omkring 0,023 ($W/m K$) och densiteten är ca 40 kg/m^3 . För att approximera α används ett värde för polyuretanskum (Drysdale, 2011): 1400 (m^2/s). Tjockleken på provet är 48 mm. Detta ger en tid under vilken materialet räknas som termiskt tjockt på ca: **350 s**. Då materialet bildar ett tydligt kollager som också verkar isolerande antas sambandet gälla trots att materialet i sig bidrar med energi.

Kritisk infallande strålning (kW/m^2)

Denna parameter används för jämförelsen då den möjliggör användande av flera antändningstider från försök på olika strålningsnivåer. Detta ger i sin tur en minskad osäkerhet i resultatet då fel vid ett mätillfälle inte ger lika stort utslag på slutresultatet. Den kritiska infallande strålningen är den minsta strålning som krävs för antändning av ett material. Den grundar sig i en teori utvecklad av Janssens (Babrauskas, The Cone Calorimeter, 2016) där Janssens, för termiskt tjocka material, kunde härleda detta samband:

$$\dot{q}''_e = \dot{q}''_{cr} \left[1 + 0,73 \left(\frac{\lambda\rho c}{h_{eff}^2 t_{ig}} \right)^{0,55} \right] \quad [1]$$

Där:

\dot{q}''_e = Den infallande strålningen mot en yta (kW/m^2)

\dot{q}''_{cr} = Den kritiska infallande strålningen (kW/m^2)

h_{eff}^2 = Värmeöverföringskoefficient vid ytan vid antändning ($kW/m^2 \cdot K$)

t_{ig} = Tid till antändning (s)

$\lambda\rho c$ = Värmeupptagningsförmåga ($W^2 s/m^4 K^2$)

Sambandet mellan den infallande strålningen och antändningstiden upphöjd till - 0,55 är således linjärt.

Detta ger i sin tur att skärningspunkt med X-axeln ger den kritiska infallande strålningen \dot{q}''_{cr} . Lutningen på linjen ger ett värde på värmeupptagningsförmågan. En låg lutning ger således en låg värmeupptagningsförmåga vilket är precis det som ger en högre yttemperatur och därmed krävs det en lägre infallande strålning för att materialet ska antända.

För att möjliggöra en beräkning av \dot{q}''_{cr} krävs mätningar av antändningstiden på flera olika strålningsnivåer. För att sedan föra in resultaten från samtliga försök i ett diagram med tid till antändning upphöjd till – 0,55 på y-axeln och den infallande strålningen på x-axeln.

Effektutveckling (kW/m²)

Effektutvecklingen mäts i konkalorimetern genom att skillnad i syrehalt mellan rökgaserna och den omgivande luften. Mätningarna baseras på en teori av *Clayton Huggett* som bygger på att effektutvecklingen hos ett material är proportionell mot mängden syre som förbrukas vid förbränningen (Huggett, 1980). För de flesta material genereras 13,1 MJ energi per kilo syre som krävs för förbränningen (Janssens, 2016). Skillnaden i syrehalt är alltså precis den mängd syre som använts till förbränningen och på så sätt kan effekten räknas ut. Följande samband i enlighet med ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015) används för att beräkna effektutvecklingen:

$$\dot{q} = (\Delta h_c / r_0)(1,10)C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \times \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1,105 - 1,5X_{O_2}} \quad [2]$$

Där:

\dot{q} = Effektutveckling (kW)

$\Delta h_c / r_0$ = Utvecklad energi per kilo förbrukat syre = 13,1 * 10³ (kJ/kg)

C = Kalibreringskonstant för flöde i kanal (m^{0,5} g^{0,5} K^{0,5})

Δp = Skillnad i densitet (kg/m³)

$X_{O_2}^0$ = Initial syrehalt (1)

X_{O_2} = Uppmätt syrehalt (1)

T_e = Gastemperatur vid flödesmätaren (K)

Effektutvecklingen per areaenhet beräknas sedan genom att dividera med arean av provet (i detta fall är arean lika med provhållarens öppning, det vill säga 88,4 cm²):

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A_s} \quad [3]$$

Där:

\dot{q}'' = effektutveckling per areaenhet (kW/m²)

\dot{q} = effektutveckling (kW)

A_s = Area av prov (m²).

För effektutvecklingen presenteras även värden för maximal effektutveckling samt genomsnittlig effektutveckling vid 60, 180 samt 300 sekunder efter antändning. Den genomsnittliga effektutvecklingen beräknas genom att integrera effektutvecklingen från start till aktuell tidpunkt med intervall om 5 sekunder. Summan delas sedan med den aktuella tiden, exempelvis 60 sekunder.

En faktor som kan påverka effektutvecklingen är om och i vilket omfattning materialet kan bilda ett kollager. Om ett lager kol lägger sig ovan på den exponerade ytan kan detta skydda materialet från strålningen och på så sätt minska effekten. För att undersöka kol-lagret sågas ett av proven itu för att få en bild av provet i genomskärning.

Massavbrinning (kg/m² s)

Massavbrinningen visar på hur mycket massa provet förlorar varje sekund och är direkt kopplad till hur mycket effekt ett material kan producera. Den genomsnittliga massavbrinningen från att 10 % av totala massförlusten har skett tills att 90 % av massförlusten har skett används för att jämföra materialen och beräknas genom följande linjära samband, i enlighet med ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015):

$$\dot{m}''_{10-90} = \frac{m_{10} - m_{90}}{t_{90} - t_{10}} \times \frac{1}{A_s} \quad [4]$$

Där:

$$\Delta m = m_s - m_f$$

$$\Delta m = \text{Massförlust (g)}$$

$$m_s = \text{Massa vid start (g)}$$

$$m_f = \text{Massa vid slut (g)}$$

$$m_{10} = m_s - 0,10\Delta m \text{ (g)}$$

$$m_{90} = m_s - 0,90\Delta m \text{ (g)}$$

$$t_{10} = \text{Tidpunkt när 10 \% av massförlust inträffat (s)}$$

$$t_{90} = \text{Tidpunkt när 90 \% av massförlust inträffat (s)}$$

$$A_s = \text{Area av prov (m}^2\text{)}$$

För beräkning av massavbrinning mellan tiden för slocknad flamma och de 10 efterföljande minuterna används samma metodik som ovan men m_{10} representeras då av massan vid slut och m_{90} representeras av massan vid 600 sekunder efter slocknad flamma. För t_{90} används tiden 600 s och för t_{10} används tiden 0.

Effektiv förbränningsvärme (MJ/kg)

Den effektiva förbränningsvärmens är den energi som ett material kan frigöra för varje gram massa som avges. Detta betyder således att förbränningsvärmens i kombination med massavbrinningen är vad som ger en effektutveckling, vilket kan utläsas i sambandet nedan. En låg förbränningsvärme ger alltså en låg effektutveckling vilket är eftersträfvärdt om materialet ska prestera bra i ett brandscenario. Denna parameter beräknas genom att effektutvecklingen integreras över hela testförloppet, summan ger då totala mängden energi som frigjorts. För att få fram förbränningsvärmens divideras sedan den totala energin med den massa som förbrukats under förloppet, enligt följande samband i enlighet med ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015):

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum \dot{q} \Delta t}{m_s - m_f} \quad [5]$$

Där:

$$\dot{q} = \text{effektutveckling (kW)}$$

$$\Delta t = \text{tidssteg om 5 sekunder (s)}$$

$$m_s = \text{Massa vid start (g)}$$

$$m_f = \text{Massa vid slut (g)}$$

Total frigjord energi (MJ/m²)

För att beräkna den totala energin som frigjorts per ytenhet används ett tillvägagångssätt liknade det för den effektiva förbränningsvärmens. Skillnaden ges av att den totala energin som frigjorts divideras med ytan för provet och är alltså inte beroende av hur mycket massa som gått åt för att producera energin (ISO, 2015).

$$Q'' = \frac{\sum \dot{q} \Delta t}{A_s} \quad [6]$$

Där:

Q'' = Total frigjord energi per ytenhet (MJ/m²)

\dot{q} = effektutveckling (kW)

Δt = tidssteg om 5 sekunder (s).

3.2 Material

Materialen som används för jämförelsen presenteras i tabell 1 nedan. Fyra olika PIR-isoleringsmaterial studeras. Ett av materialen, material 1, används som isoleringsmaterial i sandwichpaneler som är testade och godkända enligt försäkringsbolaget FM-globals egna godkännande FM – approvals (standard 4880) för användning utan höjdbegränsning. Övriga PIR-material ingår ej i sandwichpaneler testade i fullskala.

Tabell 1: Sammanställning av materialen som testas och jämförs i detta arbete.

MATERIAL	TYP	VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA ¹ (Δ)	DENSITET ²
1	PIR	0,022 (W/m K)	33 (kg/m ³)
2	PIR	0,023 (W/m K)	35 (kg/m ³)
3	PIR	0,027 (W/m K)	41 (kg/m ³)
4	PIR	0,022 (W/m K)	29 (kg/m ³)

1: Värden för värmeledningsförmågan från tillverkare av respektive material.

2: Densiteten uppmättes genom att 10 st. provbitar vägdes samt mättes för att ge en genomsnittlig densitet.

4 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten från försöken för respektive parameter.

4.1 Antändningstid

Försöken inleddes med en strålningsnivå om 20 kW/m². Denna nivå visade sig dock vara för låg då antändning ej inträffade vid provning av material 2. Nivån höjdes då till 25 kW/m² vilket användes som en lägsta nivå i försöken, detta då 25 kW/m² gav antändning för samtliga material.

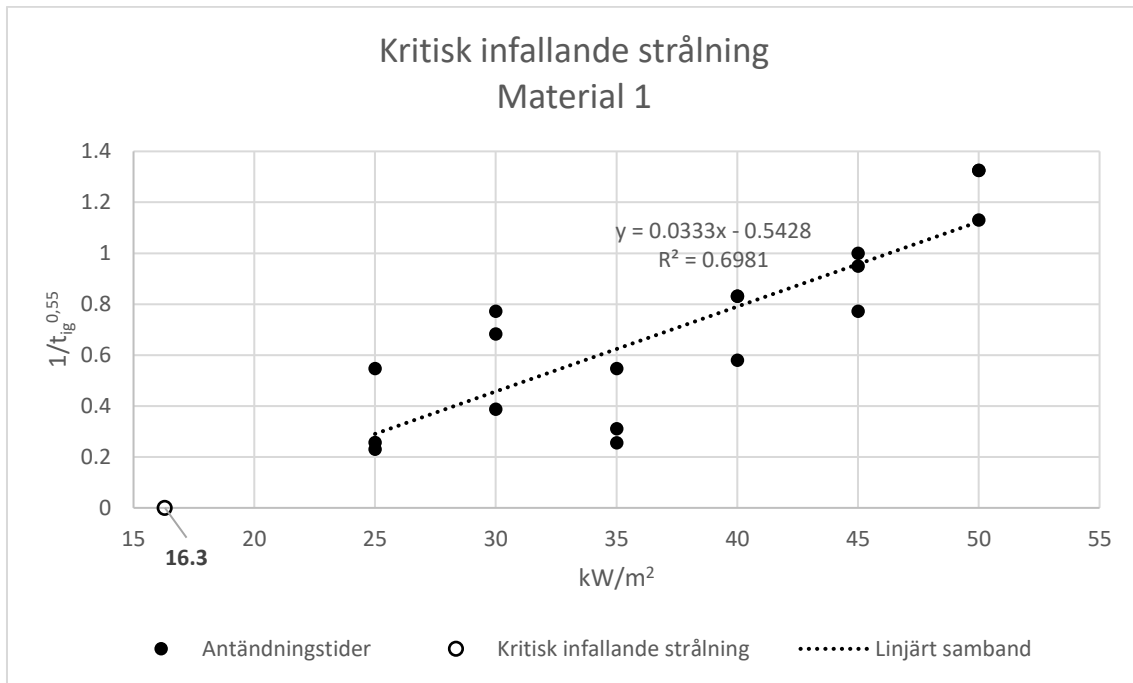
Antändningstiderna för de olika materialen presenteras i tabell nedan.

Tabell 2 Tid till antändning för respektive material vid de olika strålningsnivåerna. Tre försök utfördes för varje material och strålningsnivå.

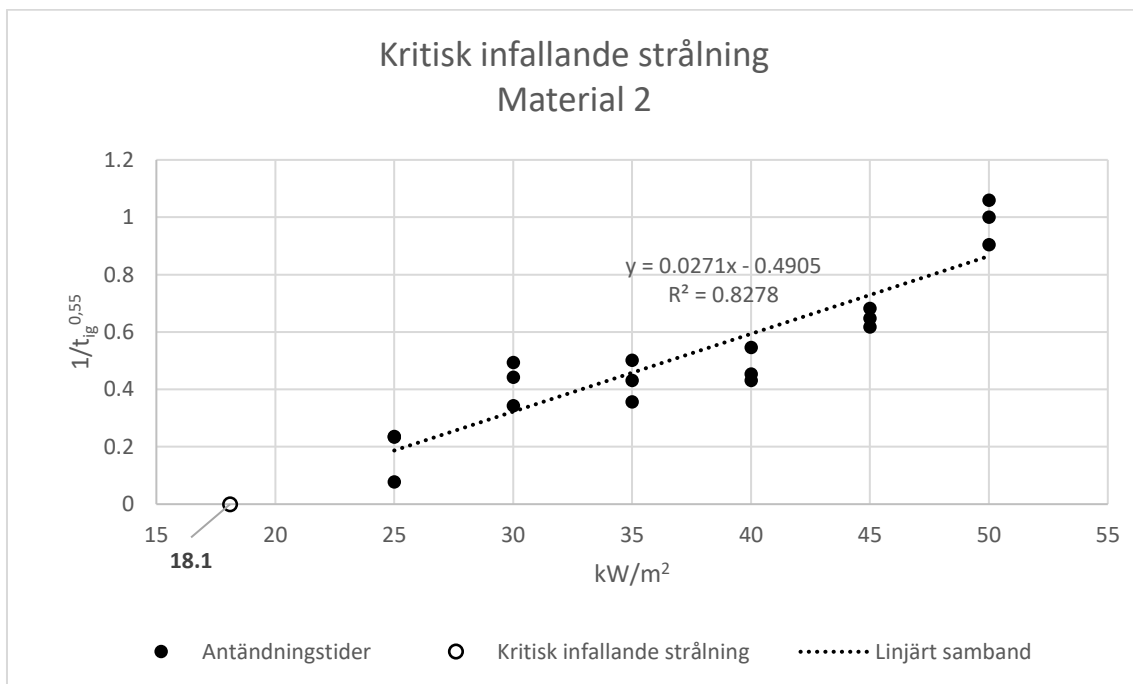
TID TILL ANTÄNDNING (s)					
STRÅLNING (kW/m ²)	Test	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
25	1	3,0	14,0	23,6	5,0
	2	14,5	103,9	50,2	4,5
	3	11,9	13,8	13,5	3,1
30	1	2,0	4,4	34,1	4,1
	2	5,6	3,6	6,7	1,0
	3	1,6	7,0	8,8	1,9
35	1	12,9	6,5	7,4	0,8
	2	3,0	4,6	3,4	0,9
	3	8,4	3,6	2,7	1,3
40	1	2,7	4,2	4,3	0,9
	2	1,4	4,6	11,7	0,7
	3	1,4	3,0	2,6	5,0
45	1	1,6	2,2	3,7	1,1
	2	1,1	2,0	2,7	0,8
	3	1,0	2,4	1,6	0,9
50	1	0,6	1,2	1,3	0,3
	2	0,8	0,9	1,5	0,6
	3	0,6	1,0	4,0	0,5

4.1.1 Kritisk infallande strålning

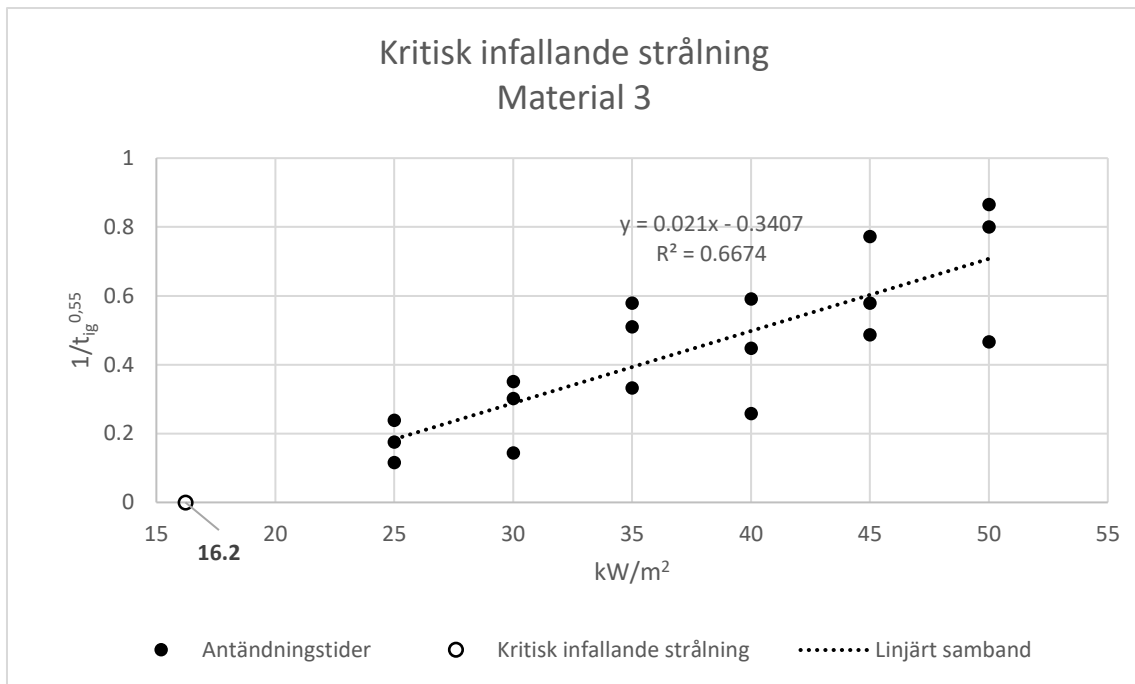
Graferna nedan visar på sambandet mellan tid till antändning och strålningsnivå. I enlighet med ekvation [1] är skärningen med x-axeln värdet för den kritiska infallande strålningen. R^2 – värdet som kan ses i graferna är determinationskoefficienten och beskriver hur mycket av variationen som kan förklaras med ekvationen, alltså hur väl den linjära anpassningen stämmer. Ett perfekt samband ger en determinationskoefficient på 1.



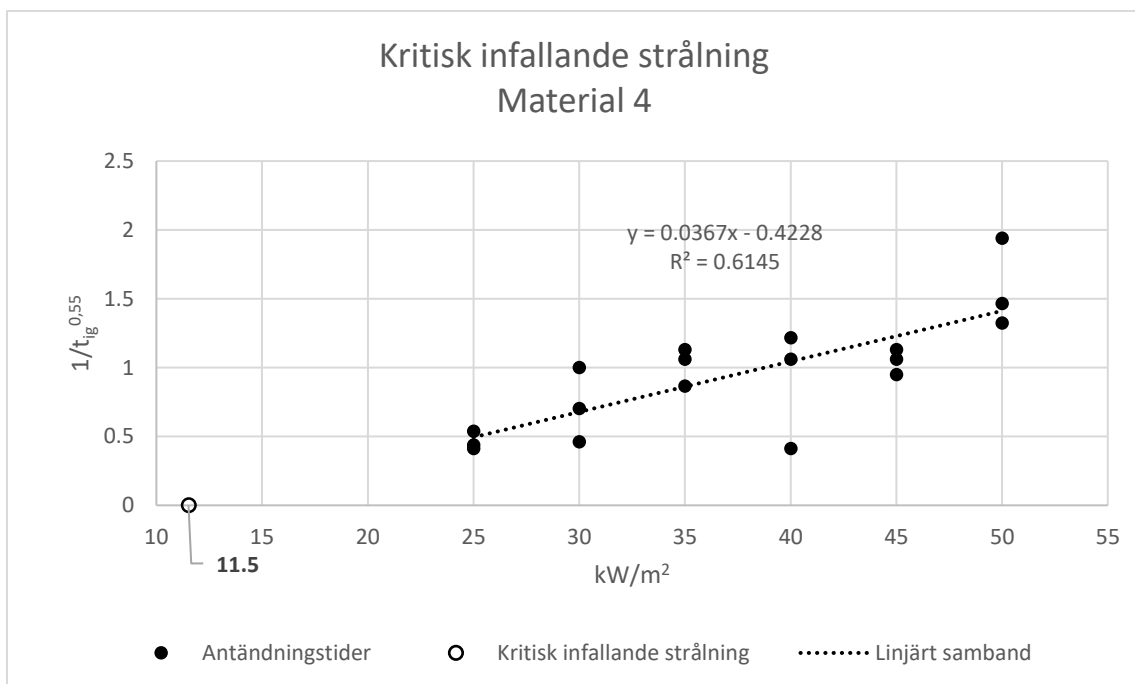
Figur 6: Det linjära sambandet mellan tiden till antändning (upphöjd till -0,55) och infallande strålning för material 1. Den kritiska infallande strålningen ges av skärningen med x-axeln



Figur 7: Det linjära sambandet mellan tiden till antändning (upphöjd till -0,55) och infallande strålning för material 2. Den kritiska infallande strålningen ges av skärningen med x-axeln



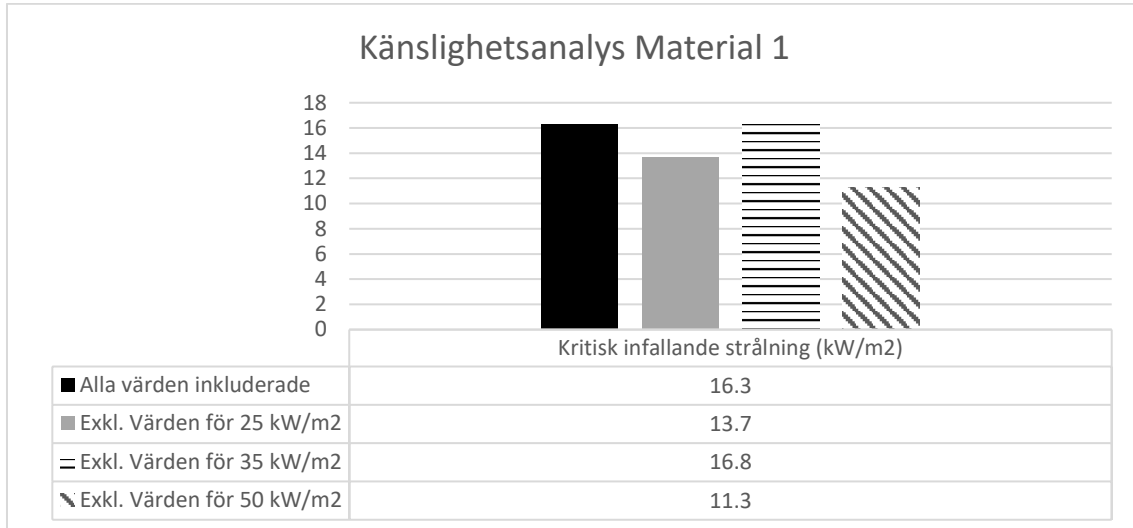
Figur 8: Det linjära sambandet mellan tiden till antändning (upphöjd till -0,55) och infallande strålning för material 3. Den kritiska infallande strålningen ges av skärningen med x-axeln



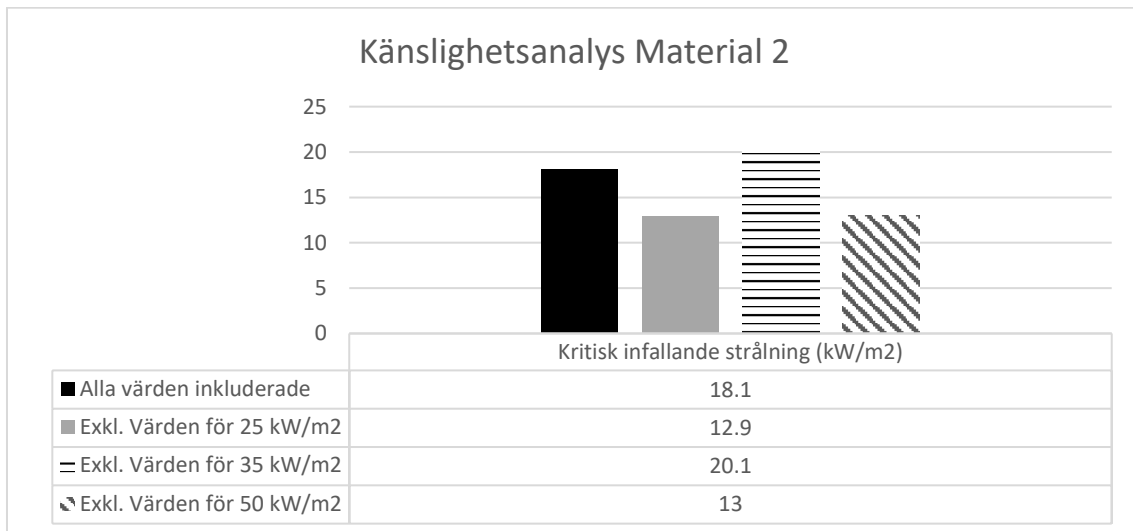
Figur 9: Det linjära sambandet mellan tiden till antändning (upphöjd till -0,55) och infallande strålning för material 4. Den kritiska infallande strålningen ges av skärningen med x-axeln

Känslighetsanalysen för den kritiska infallande strålningen presenteras i figurerna samt tabell nedan. Denna utfördes genom att antändningstiderna för strålningsnivåerna 25, 35 respektive 50 kW/m² plockades ur ekvationen för att undersöka hur mycket detta påverkade slutresultatet.

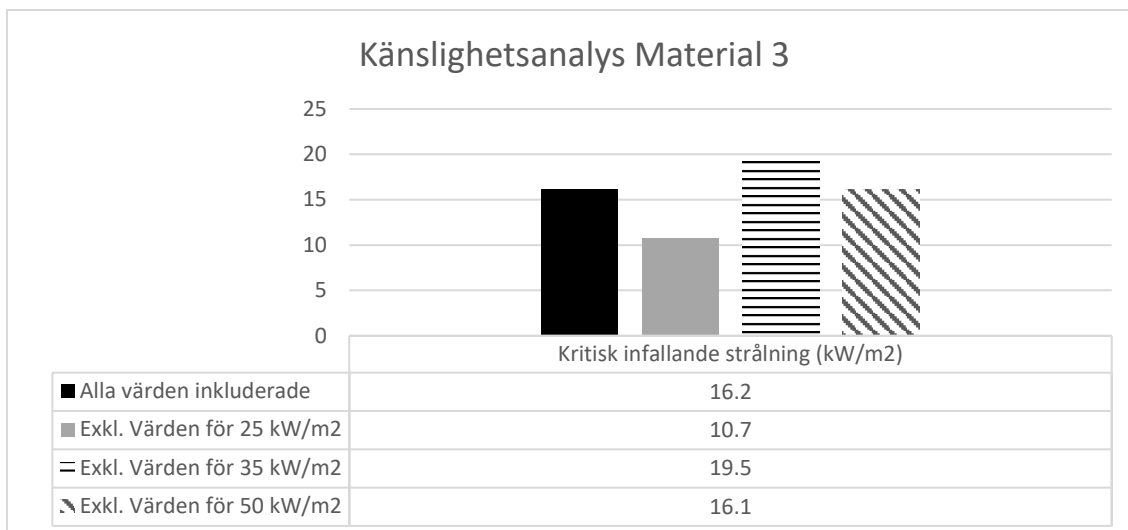
Skillnaderna mellan slutresultaten och resultaten om en strålningsnivå plockades bort presenteras i figurerna nedan.



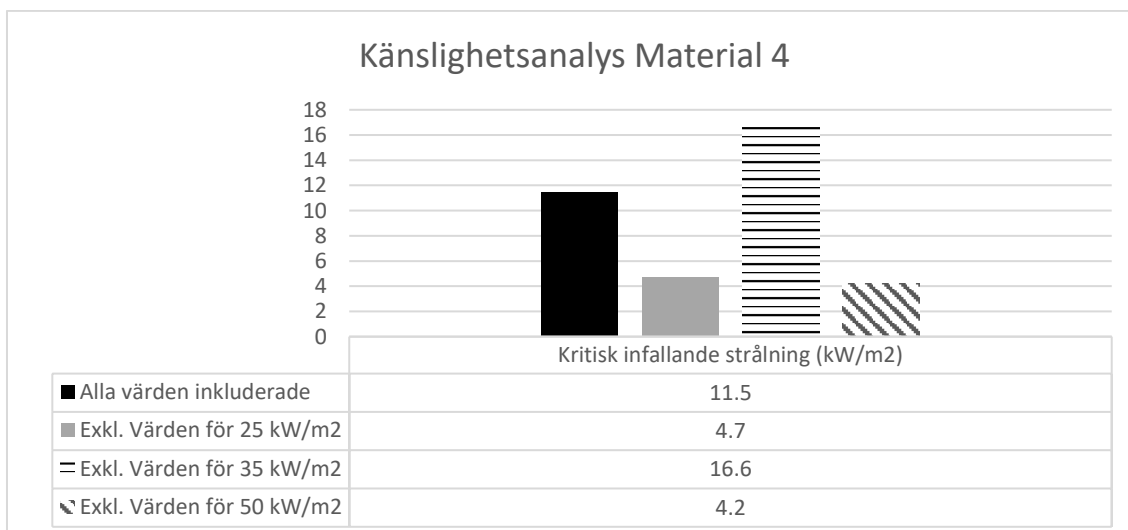
Figur 10: Visar resultaten av den känslighetsanalys som utförts för beräkningen av den kritiska infallande strålningen för material 1. Det framräknade värdet enligt graferna ovan (där värden från samtliga strålningsnivåer inkluderas) jämförs med resultat där en strålningsnivå i taget exkluderas från beräkningen.



Figur 11: Visar resultaten av den känslighetsanalys som utförts för beräkningen av den kritiska infallande strålningen för material 2. Det framräknade värdet enligt graferna ovan (där värden från samtliga strålningsnivåer inkluderas) jämförs med resultat där en strålningsnivå i taget exkluderas från beräkningen.



Figur 12: Visar resultaten av den känslighetsanalys som utförts för beräkningen av den kritiska infallande strålningen för material 3. Det framräknade värdet enligt graferna ovan (där värden från samtliga strålningsnivåer inkluderas) jämförs med resultat där en strålningsnivå i taget exkluderas från beräkningen.



Figur 13: Visar resultaten av den känslighetsanalys som utförts för beräkningen av den kritiska infallande strålningen för material 4. Det framräknade värdet enligt graferna ovan (där värden från samtliga strålningsnivåer inkluderas) jämförs med resultat där en strålningsnivå i taget exkluderas från beräkningen.

Sammanställning av resultaten med skillnaden i procent mellan slutresultaten och resultaten om en strålningsnivå plockades bort presenteras i tabell nedan.

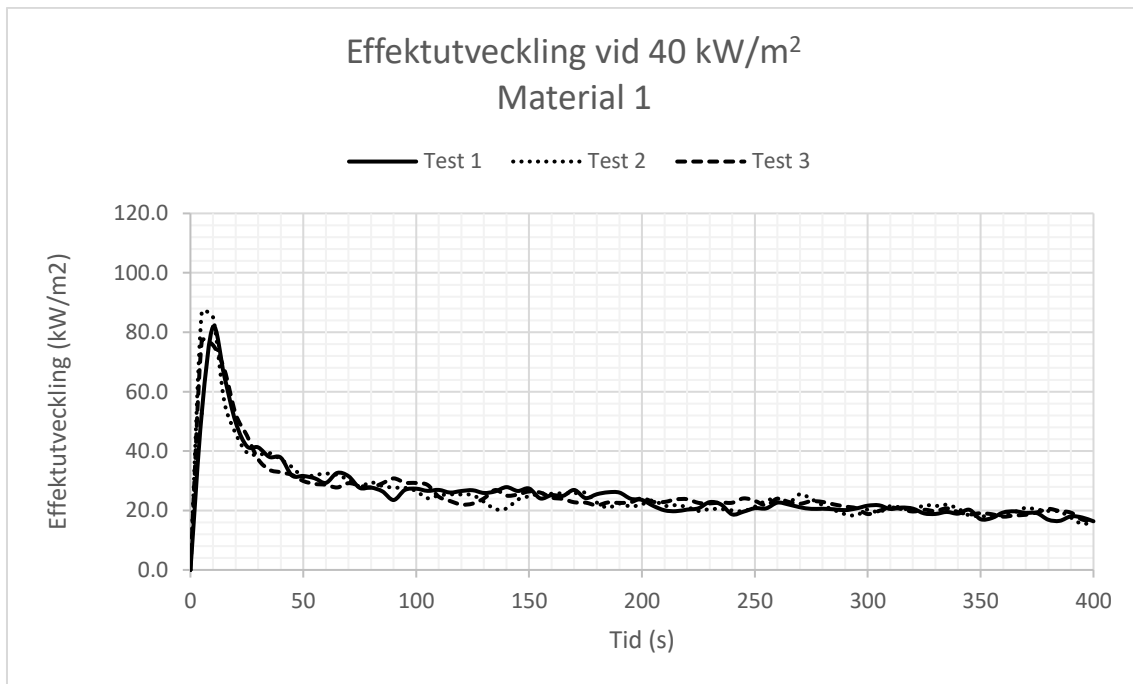
Tabell 3: Skillnad i procent mellan beräknat värde för kritisk infallande strålning och ett värde där tiderna för 25, 35 respektive 50 kW/m² ej tas med i beräkningen.

MATERIAL	KÄNSLIGHETSANALYS - KRITISK INFALLANDE STRÅLNING		
	Exklusive värden för 25 kW/m ²	Exklusive värden för 35 kW/m ²	Exklusive värden för 50 kW/m ²
1	15 %	4 %	30 %
2	29 %	11 %	28 %
3	34 %	20 %	1 %
4	59 %	44 %	63 %

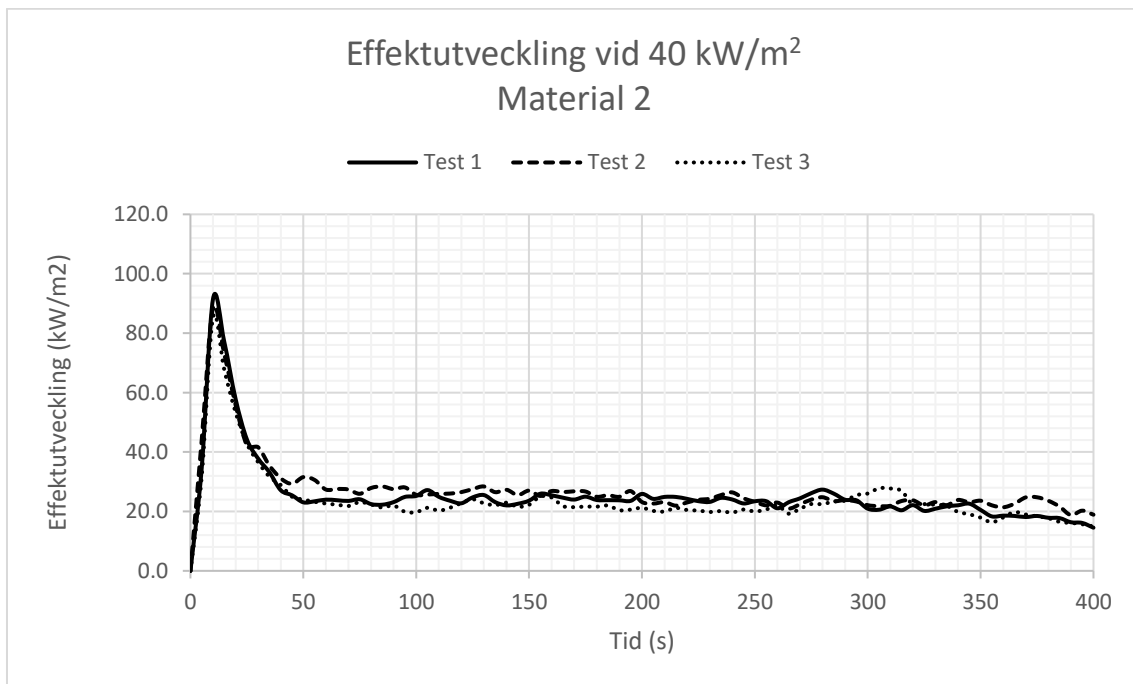
Från tabellen ovan kan man se stora skillnader i värdet för den kritiska infallande strålningen till följd av vilka strålningsnivåer som används för beräkningen.

4.2 Effektutveckling

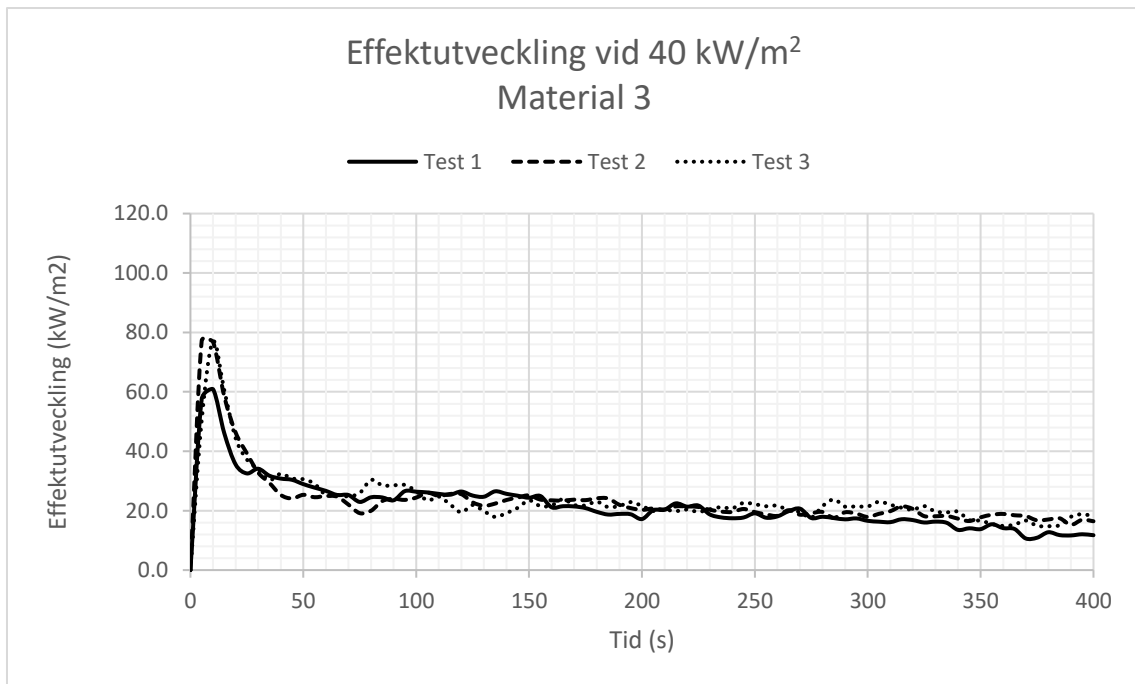
Nedan presenteras materialens effektutveckling vid de olika strålningsnivåerna.



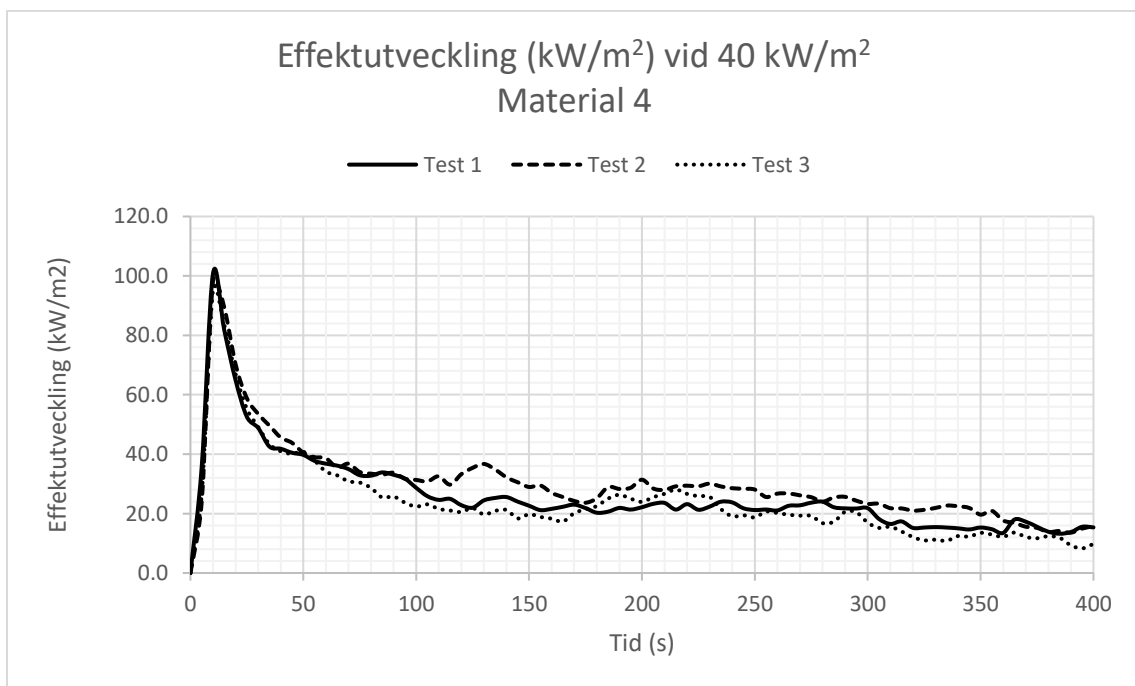
Figur 14: Effektutveckling per ytenhet (0-400 s.) för material 1 vid strålningsnivå 40 kW/m²



Figur 15: Effektutveckling per ytenhet (0-400 s.) för material 2 vid strålningsnivå 40 kW/m²

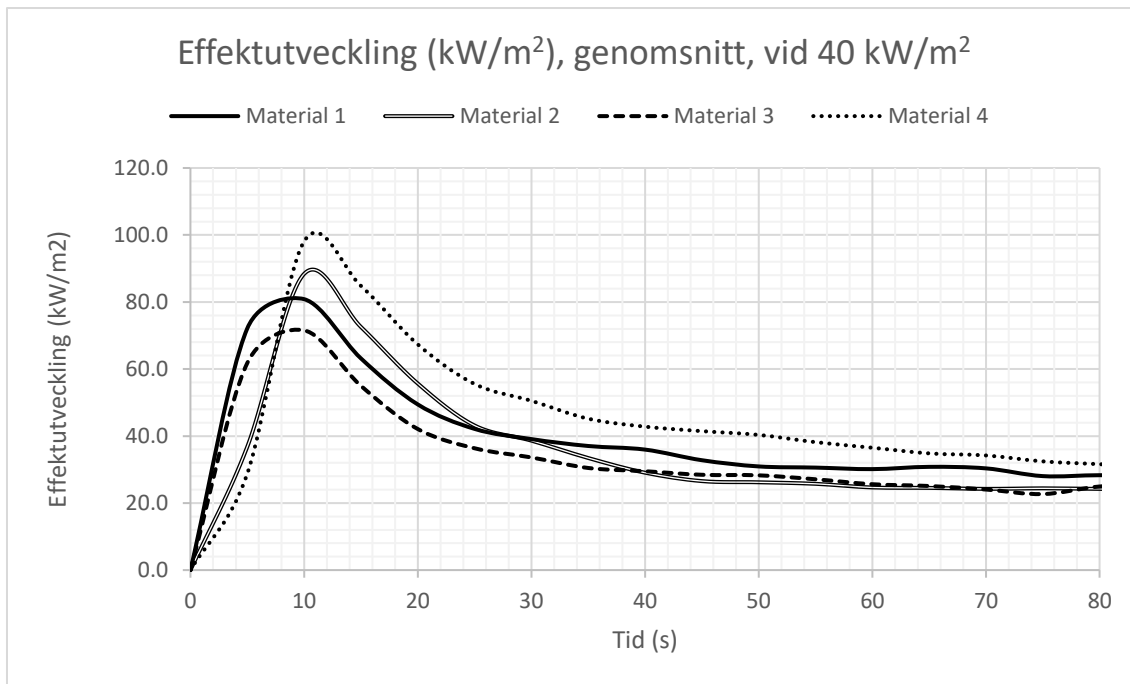


Figur 16: Effektutveckling per ytenhet (0-400 s.) för material 3 vid strålningsnivå 40 kW/m²



Figur 17: Effektutveckling per ytenhet (0-400 s.) för material 3 vid strålningsnivå 40 kW/m²

Den genomsnittliga effektkurvan där alla tre försöken sammanvägts beräknades också. Denna presenteras i figur 14.



Figur 18: Effektutveckling per ytenhet i genomsnitt. De tre försöken för respektive material har här adderats och sedan har den genomsnittliga effektkurvan beräknats genom att dividera med 3.

Försöken för 40 kW/m² sammanställdes och visas i tabellen nedan, maximal effektutveckling samt den genomsnittliga vid 60, 180 samt 300 sekunder för alla försök presenteras här.

Tabell 4: Sammanställning av försöken vid 40 kW/m². Avg. (average) visar på det genomsnittliga värdet för de tre försöken som utfördes.

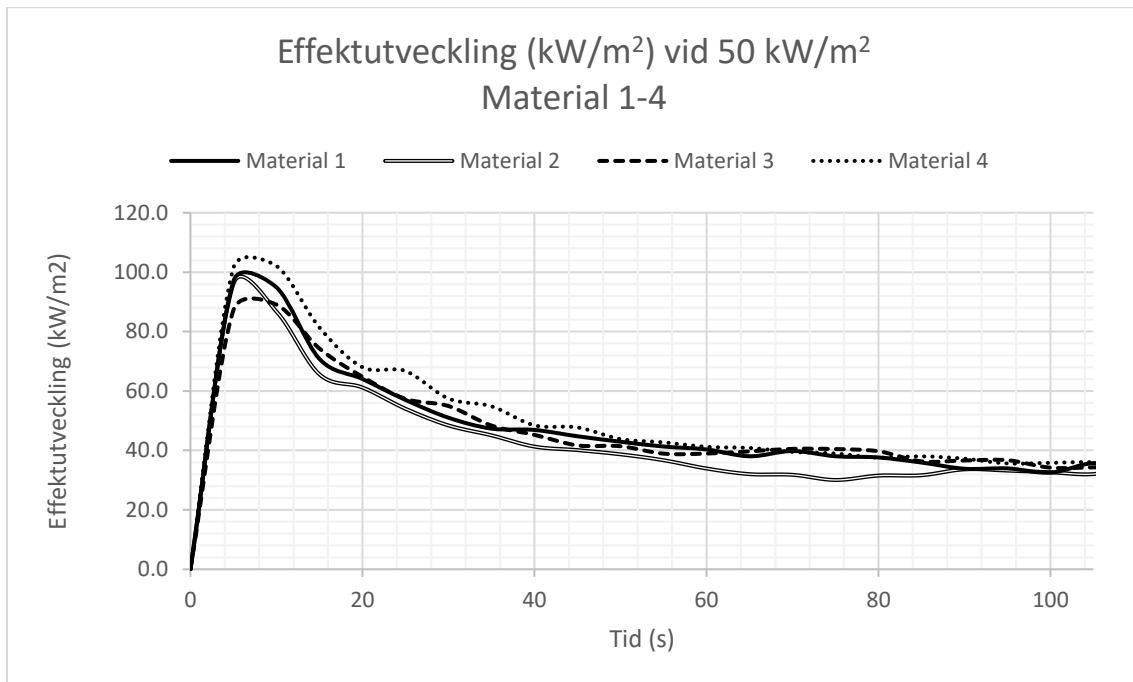
EFFEKTUTVECKLING SAMMANSTÄLLNING (kW/m²) VID STRÅLNINGSNIVÅ 40 kW/m²

MATERIAL	Test	Maximal	Genomsnittlig vid 60 s	Genomsnittlig vid 180 s	Genomsnittlig vid 300 s
1	1	81,8	43,5	32,2	27,9
	2	86,7	44,4	31,8	27,7
	3	76,0	43,0	31,5	28,0
	Avg.	81,5	43,6	31,8	27,9
2	1	91,5	41,1	29,8	27,5
	2	88,4	44,1	32,5	29,0
	3	85,3	39,0	27,7	25,2
	Avg.	88,4	41,4	30,0	27,2
3	1	60,7	35,6	28,0	24,3
	2	77,2	38,2	28,4	25,0
	3	76,9	39,1	28,7	25,6
	Avg.	71,6	37,3	28,4	25,0
4	1	100,8	50,5	34,8	29,8
	2	98,2	54,2	38,8	34,2
	3	95,2	51,4	32,2	28,0
	Avg.	98,1	52,0	35,3	30,1

Från ovanstående tabell kan man utläsa en skillnad mellan materialen som är i storleksordningen **27 %** respektive **28 %** för den maximala samt den genomsnittliga effektutvecklingen vid 60 sekunder. För genomsnittlig vid 180 samt 300 sekunder är skillnaderna ungefär **20 %**.

Man kan från ovanstående tabell även utläsa skillnaden mellan varje enskilt försök och medelvärdet för alla tre försöken, för respektive strålningsnivå. I inget av fallen är skillnaden större än 10 % mellan medelvärdet och det enskilda försöket.

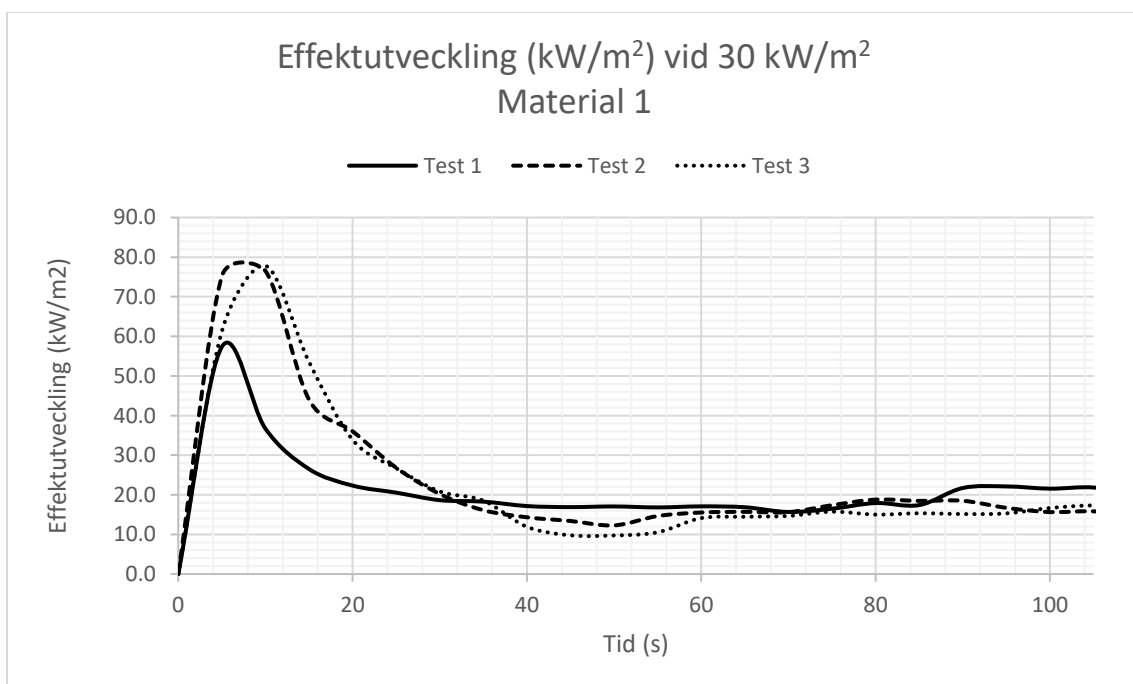
Nedan presenteras effektutvecklingen för samtliga material vid försöket (ett per material) för 50 kW/m².



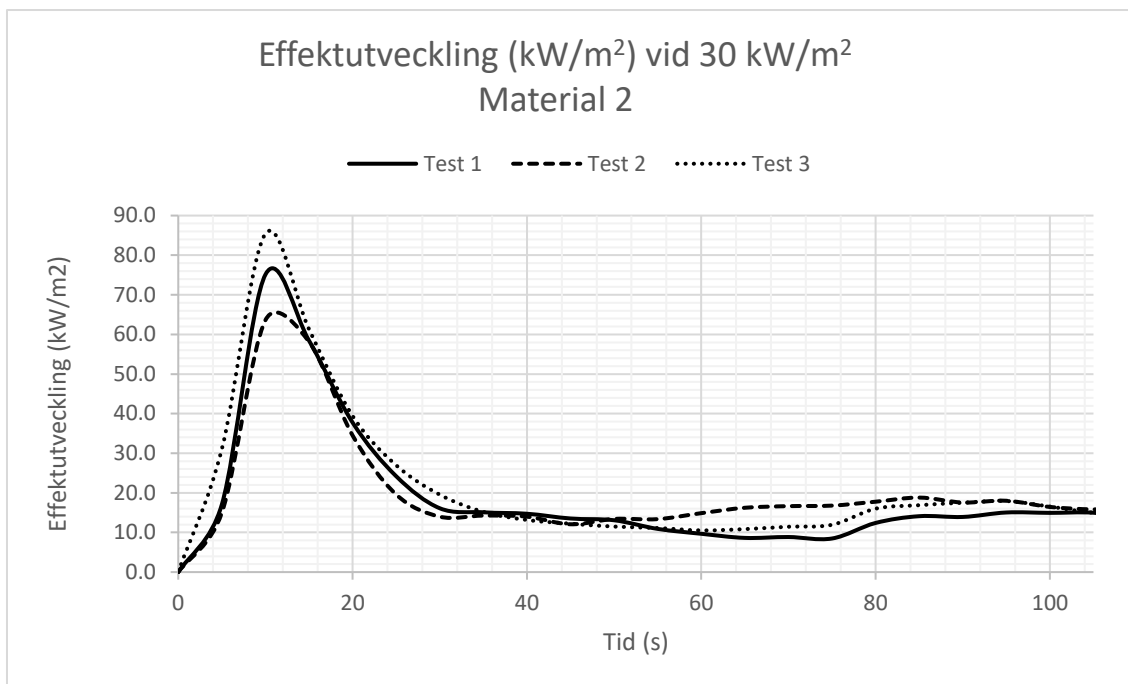
Figur 19: Visar på effektkurvan vid försöken för 50 kW/m².

Resultatet i figur 16 ovan visar på en mindre skillnad mellan största och minsta effektutveckling (ca 13 %) jämfört med tidigare försök på 40 kW/m².

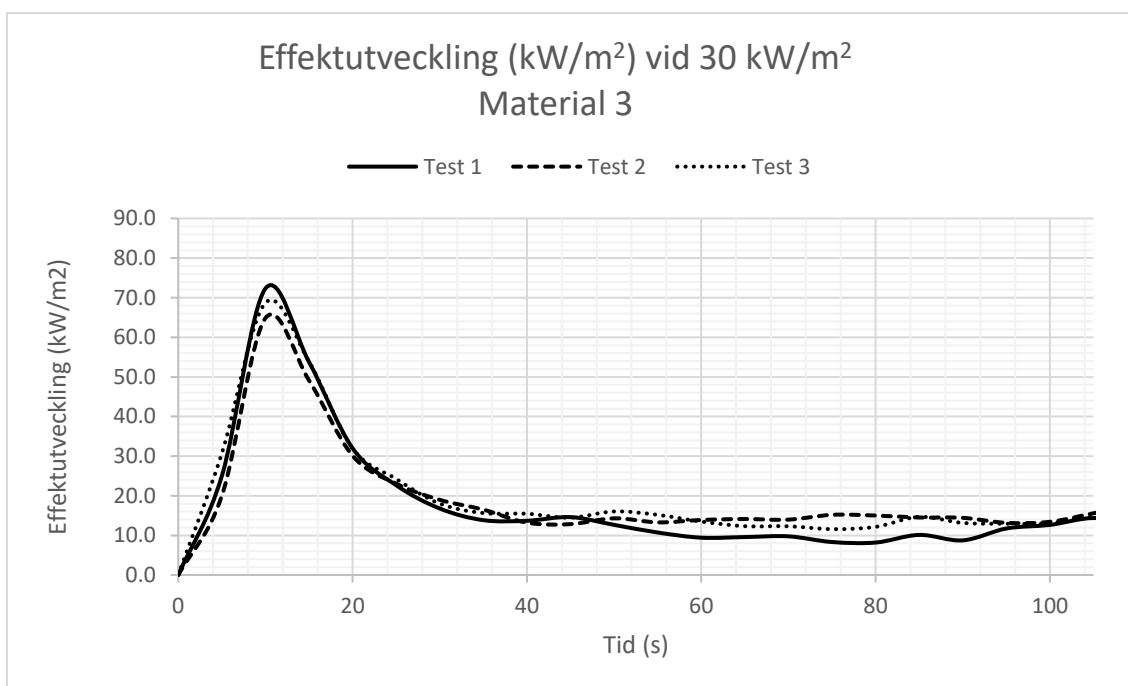
Tre stycken försök för varje material utfördes för strålningsnivån 30 kW/m² där fokus låg på maximal effektutveckling samt genomsnittlig vid 60 sekunder.



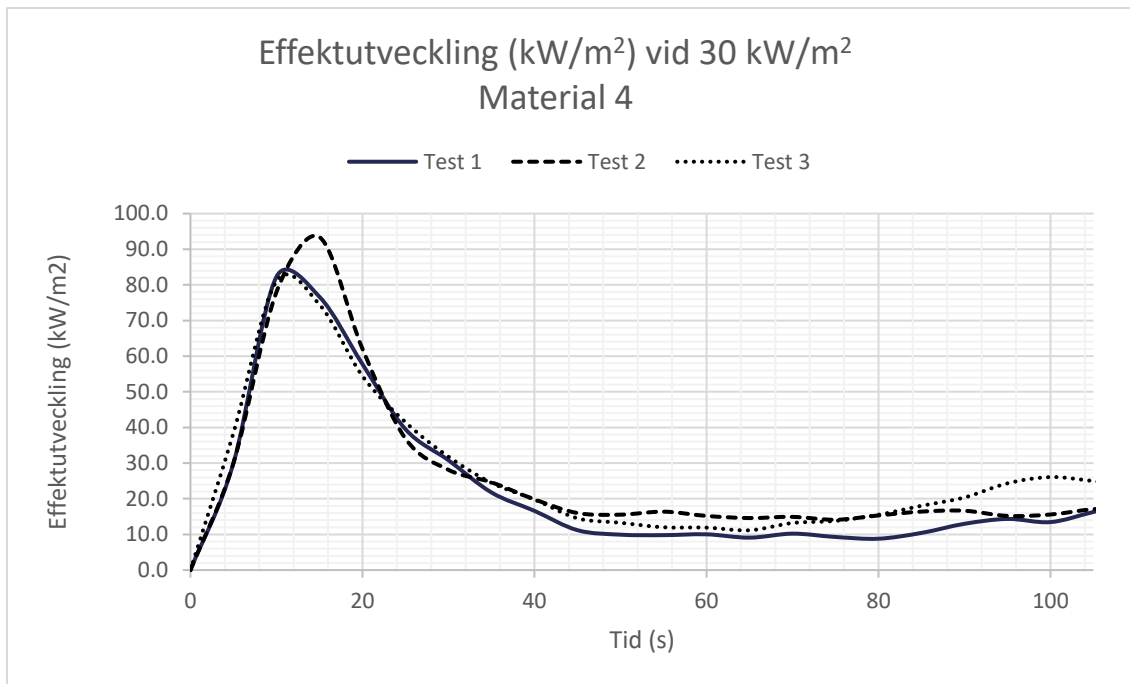
Figur 20: Effektutvecklingen per areaenhet för material 1 vid försöken för 30 kW/m².



Figur 21: Effektutvecklingen per areaenhet för material 2 vid försöken för 30 kW/m².

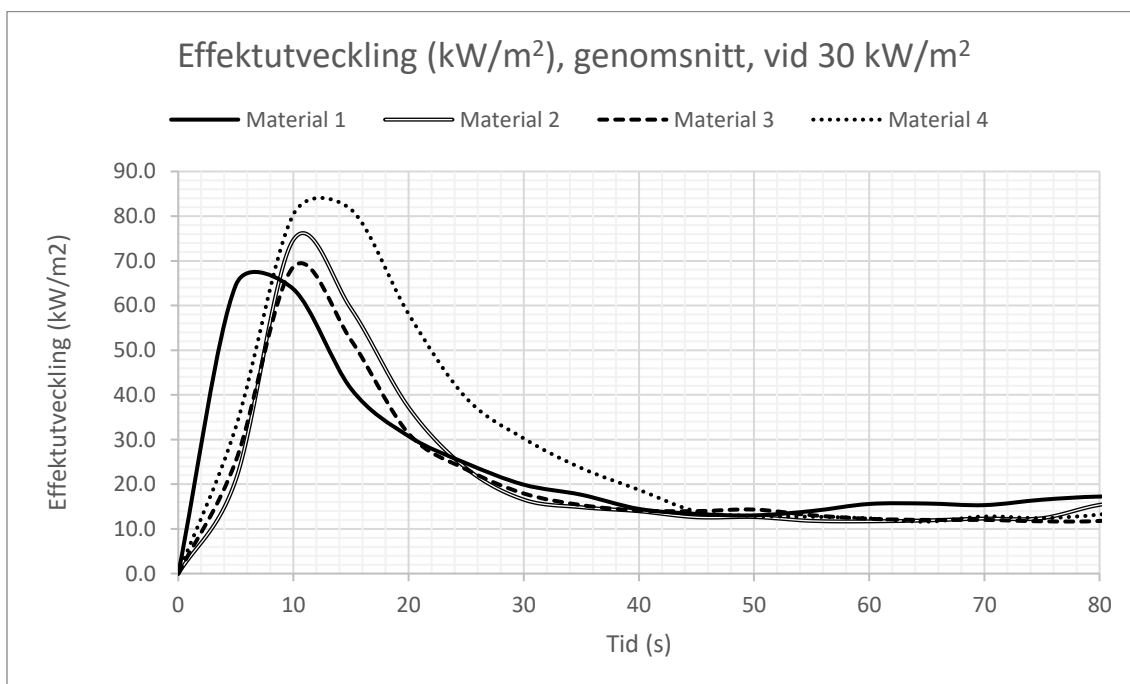


Figur 22: Effektutvecklingen per areaenhet för material 2 vid försöken för 30 kW/m².



Figur 23: Effektutvecklingen per areaenhet för material 4 vid försöken för 30 kW/m².

På samma sätt som vid försöken för 40 kW/m² beräknades även den genomsnittliga effektkurvan för samtliga tre försök.



Figur 24: Effektutveckling per ytenhet i genomsnitt. De tre försöken för respektive material har här adderats och sedan har den genomsnittliga effektkurvan beräknats genom att dividera med 3.

I tabellen nedan presenteras en sammanställning av resultaten för försöken vid 30 kW/m².

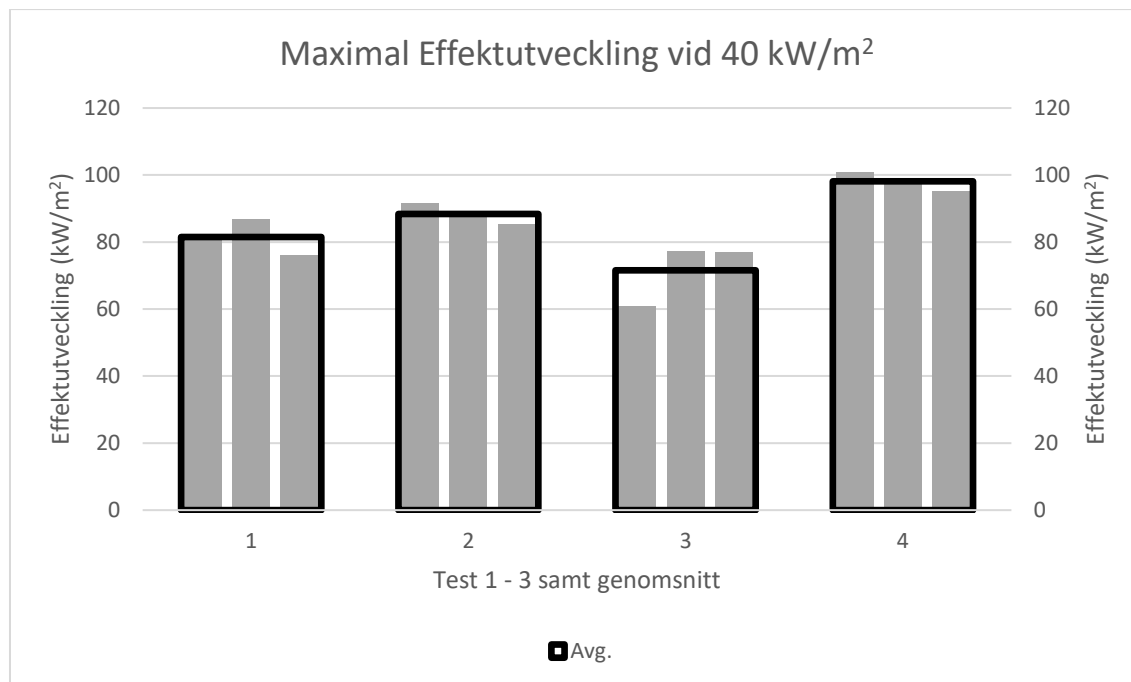
Tabell 5: Sammanställning av försöken vid 30 kW/m². Avg. (average) visar på det genomsnittliga värdet för de tre försöken som utfördes.

EFFEKTUTVECKLING SAMMANSTÄLLNING (KW/M²) VID STRÅLNINGSNIVÅ 30 KW/ M²

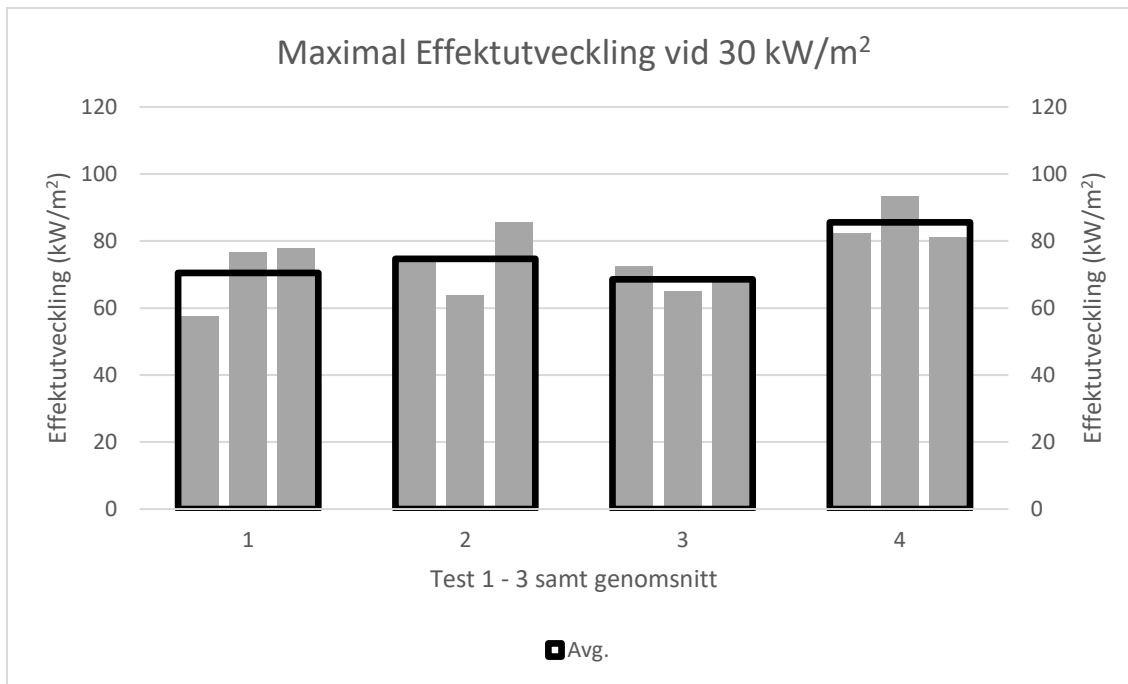
MATERIAL	Test	Maximal	Genomsnittlig vid 60 s
1	1	57,4	23,5
	2	76,5	30,0
	3	77,8	28,6
	Avg.	70,5	27,4
2	1	75,1	25,1
	2	63,6	21,7
	3	85,4	27,9
	Avg.	74,7	24,9
3	1	72,3	22,4
	2	64,8	22,7
	3	68,7	26,0
	Avg.	68,6	23,7
4	1	82,3	31,1
	2	93,4	34,9
	3	81,0	34,5
	Avg.	85,6	33,5

I tabellen ovan kan man utläsa skillnader mellan materialen som ligger på **20 %** för den maximala effektutvecklingen (mellan högsta och lägsta värde). För den genomsnittliga effektutvecklingen vid 60 sekunder är skillnaden **30 %**.

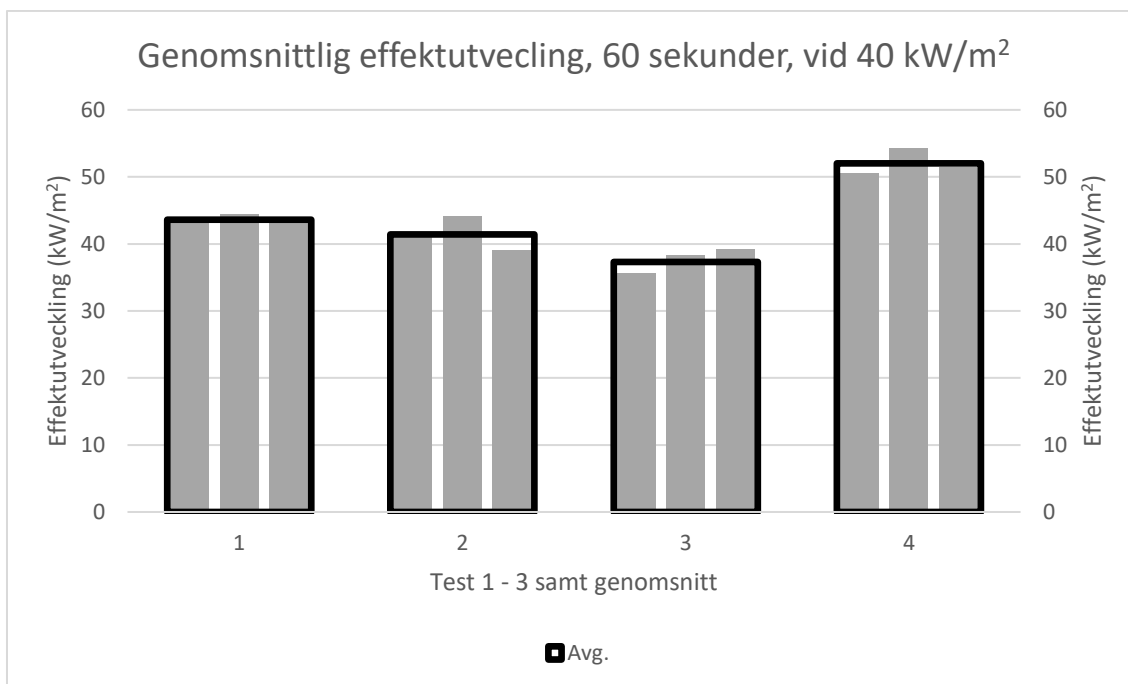
I diagrammen nedan visualiseras skillnaderna mellan materialen avseende maximal effektutveckling samt den genomsnittliga effektutvecklingen vid 60 sekunder. Dessa visas för både försöken vid 40 samt 30 kW/m².



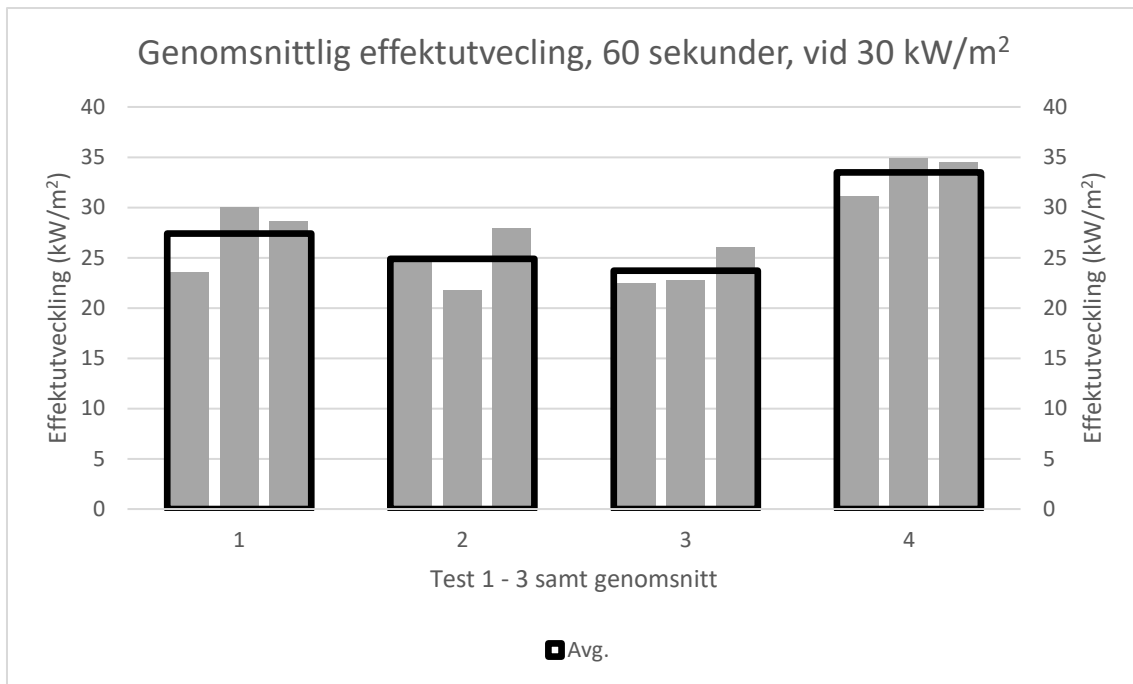
Figur 25: Diagram över de olika materialens maximala effektutveckling vid försöken för strålningsnivån 40 kW/m², de färgade staplarna representerar resultatet från var och en av de enskilda försöken. Linjerad stapel representerar genomsnittet från de tre försöken.



Figur 26: Diagram över de olika materialens maximala effektutveckling vid försöken för strålningsnivån 30 kW/m², de färgade staplarna representerar resultatet från var och en av de enskilda försöken. Linjerad stapel representerar genomsnittet från de tre försöken.

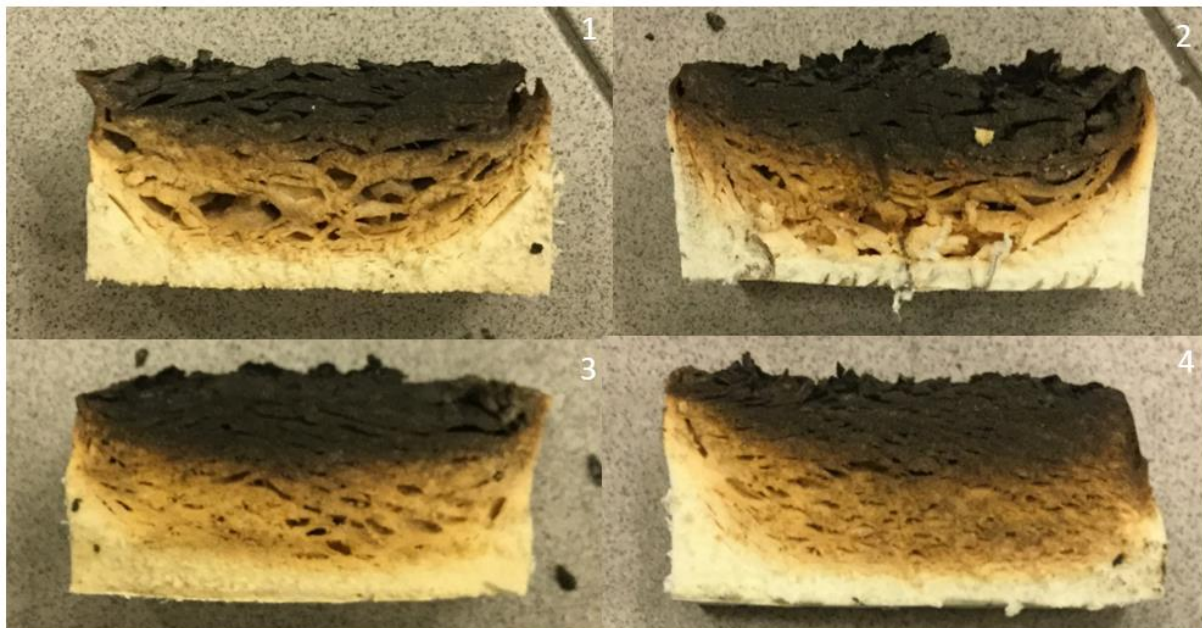


Figur 27: Diagram över de olika materialens genomsnittliga effektutveckling 60 sekunder in i försöket vid provning för strålningsnivån 40 kW/m², de färgade staplarna representerar resultatet från var och en av de enskilda försöken. Linjerad stapel representerar genomsnittet från de tre försöken.



Figur 28: Diagram över de olika materialens genomsnittliga effektutveckling 60 sekunder in i försöket vid provning för strålningsnivån 40 kW/m², de färgade staplarna representerar resultatet från var och en av de enskilda försöken. Linjerad stapel representerar genomsnittet från de tre försöken.

För att få en bild av hur kollagret som bildas vid förbränningen skiljer sig åt mellan proven togs bilder av proven i genomskärning. Dessa bilder togs efter att proven testats vid 30 kW/m² och är tagna direkt efter att flaman slocknade. Det innebär att proverna har blivit exponerade för strålningen i ungefär 10 min.



Figur 29: Bild i genomskärning av proverna för material 1-4 efter försök vid 30 kW/m².

Alla material bildar ett tydligt kollager. Detta är i princip i samma omfattning för samtliga material (ungefär 30 % av den totala tjockleken).

Även provbitar som blivit exponerade för 50 kW/m² samt provbitar som blivit exponerade i ytterligare 10 minuter efter att flaman slocknat studerades i genomskärning. Dessa prover visade dock på samma tendenser som man kan se i figuren ovan, det vill säga att kollagret blev ungefär lika tjockt.

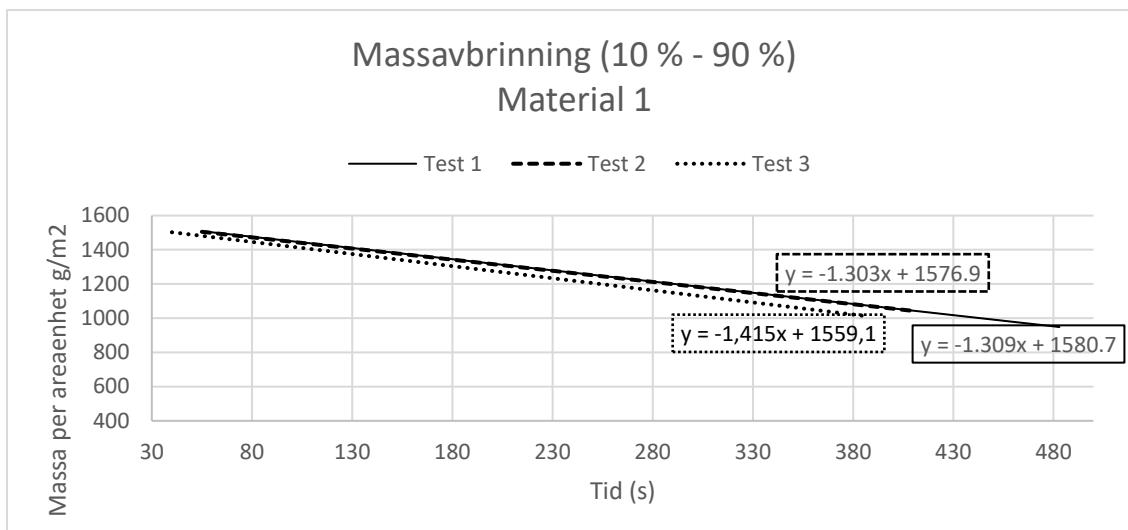
4.3 Massförlust

Nedan presenteras resultaten avseende massförluster. Massförlusterna beräknades för försöken vid 40 kW/m². Massavbrinningen har beräknats i enlighet med ekvationerna i avsnitt 3.5. Massavbrinning 10 % -90 % (i enlighet med SFPE-handboken (Babrauskas, The Cone Calorimeter, 2016)) avser massavbrinningen som skett mellan att 10 % av den totala massförlusten inträffat och att 90 % av den totala massförlusten inträffat. Massavbrinning 600 sekunder efter slut avser den massavbrinning som skett mellan tidpunkten för att flamman slocknade och de 600 efterföljande sekunderna. Denna parameter uppmättes vid ett av försökstillfällena.

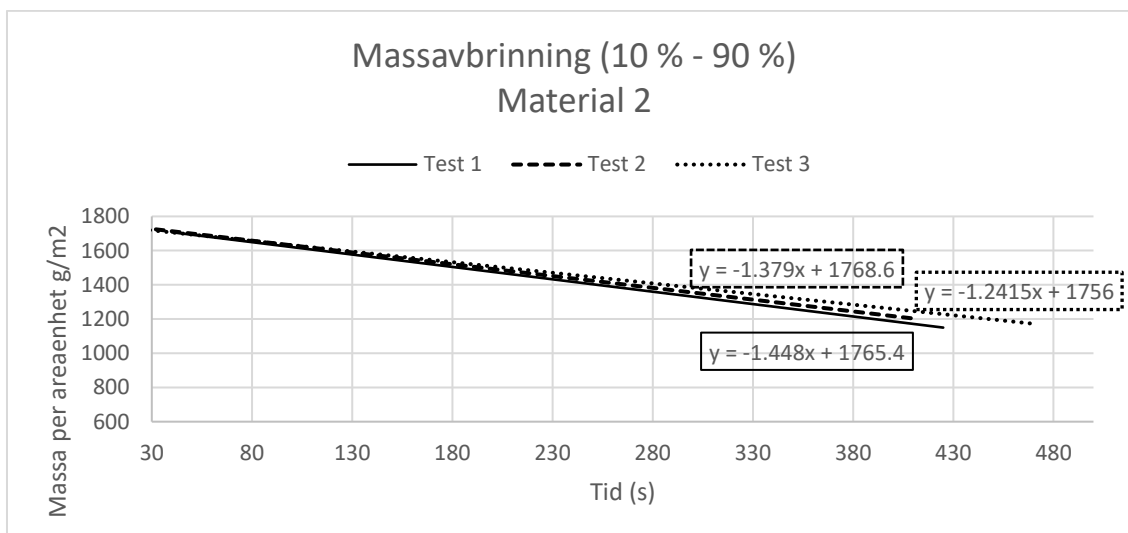
Tabell 6: Sammanställning av massförlust, försöken utfördes vid 40 kW/m².

MASSFÖRLUST SAMMANSTÄLLNING							
VID 40 kW/m ²							
MTL	Test	Massa start (g)	Massa slut (g)	Massförlust (g)	Massavbrinning 10%-90% (g/s m ²)	Massa 600s efter slut (g)	Massavbrinning 600s efter slut (g/s m ²)
1	1	13,93	7,77	6,2	1,3		
	2	13,82	8,68	5,1	1,3	4,75	0,74
	3	13,82	8,44	5,4	1,4		
	Avg.			~5,6	~1,3		
2	1	15,71	9,55	6,2	1,4		
	2	15,82	10,06	5,8	1,4	6,66	0,64
	3	15,81	9,76	6,0	1,2		
	Avg.			~6,0	~1,3		
3	1	18,32	13,50	4,8	1,0		
	2	18,79	13,03	5,8	1,2	9,19	0,72
	3	18,27	12,20	6,0	1,2		
	Avg.			~5,5	~1,1		
4	1	13,16	6,46	6,7	1,5		
	2	13,35	6,66	6,7	1,5	3,02	0,69
	3	13,26	6,62	6,6	1,4		
	Avg.			~6,7	~1,5		

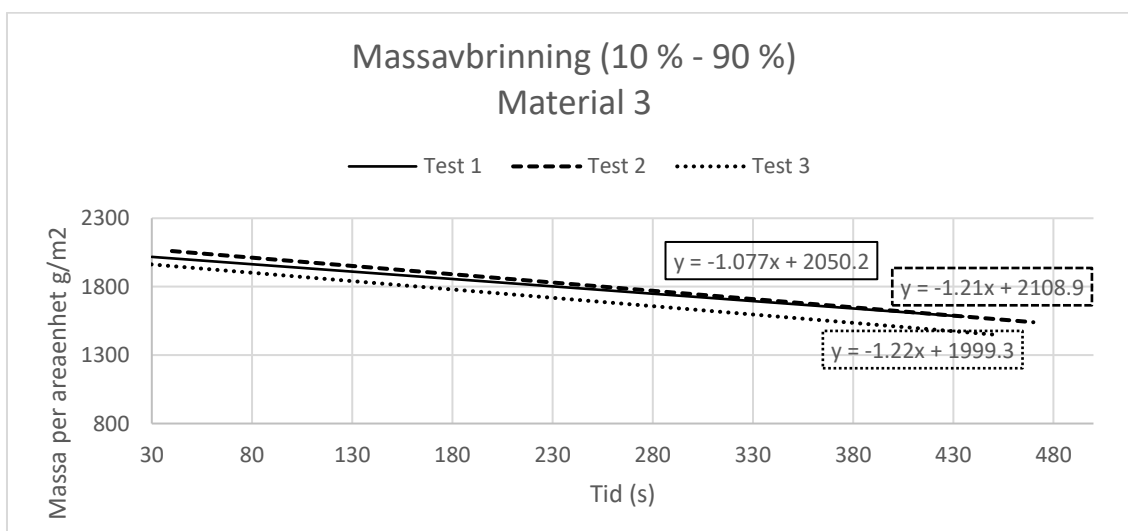
I tabellen ovan kan man se skillnader i hur snabbt materialen förlorar massa vid förbränning. Skillnaderna mellan bästa och sämsta värde är för massförlust 18 %. För massavbrinning är skillnaden ungefär 17 %. Massavbrinningen mellan att flamman slocknade och de 600 efterföljande sekunderna visar på en skillnad på 15 %. Resultaten åskådliggörs även i graferna nedan. Lutningen på linjen är förändringen i massa per sekund d.v.s. massavbrinningen.



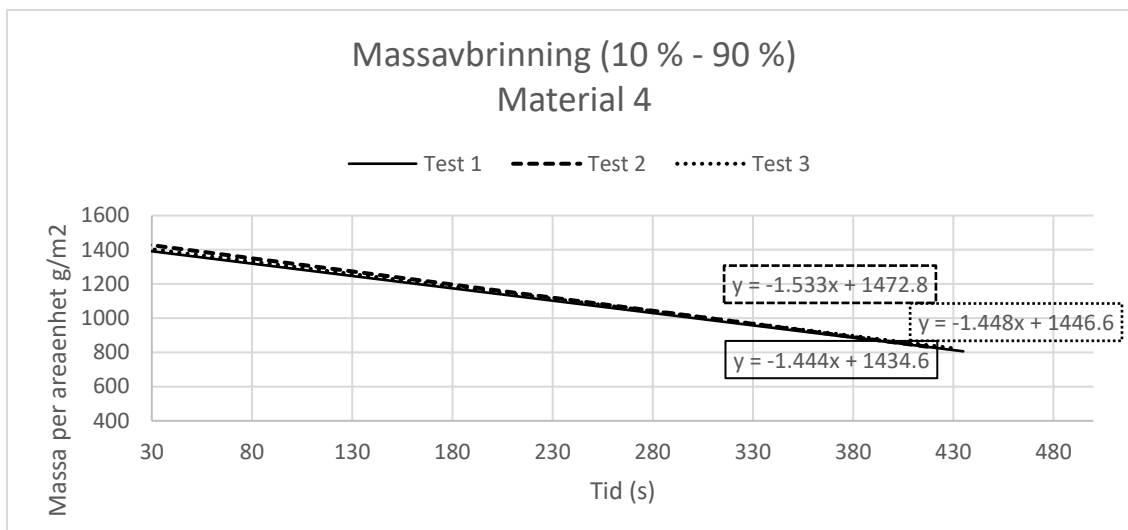
Figur 30: Massavbrinning mellan att 10 % av totala massförlusten för material 1 inträffat till att 90 % av den totala massavbrinningen inträffat.



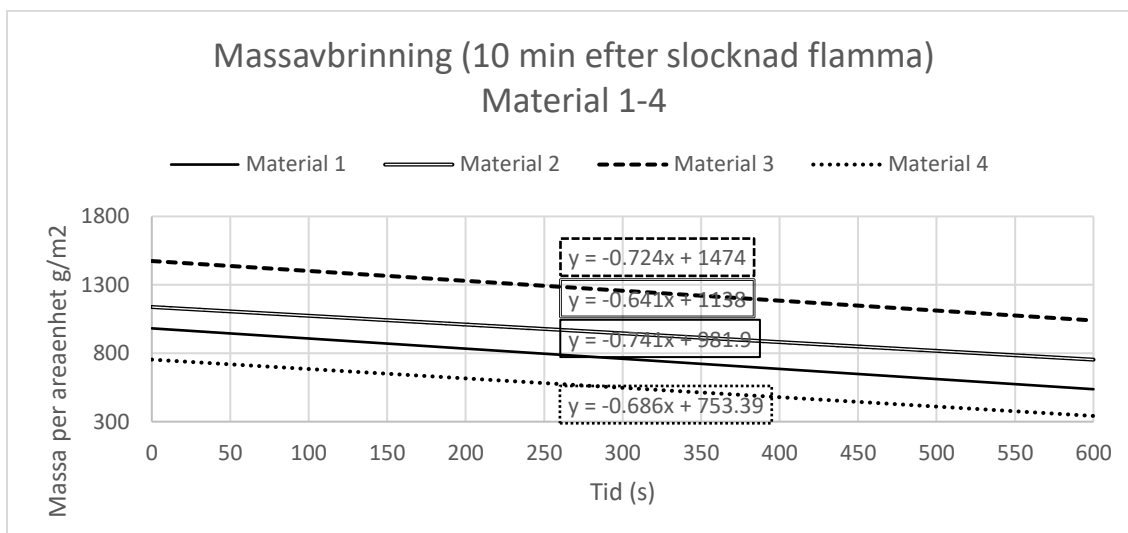
Figur 31: Massavbrinning mellan att 10 % av totala massförlusten för material 2 inträffat till att 90 % av den totala massavbrinningen inträffat.



Figur 32: Massavbrinning mellan att 10 % av totala massförlusten för material 3 inträffat till att 90 % av den totala massavbrinningen inträffat.



Figur 33: Massavbrinning mellan att 10 % av totala massförlusten för material 4 inträffat till att 90 % av den totala massavbrinningen inträffat.



Figur 34: Massavbrinningen från att flaman slocknade och de 10 efterföljande minuterna för samtliga material.

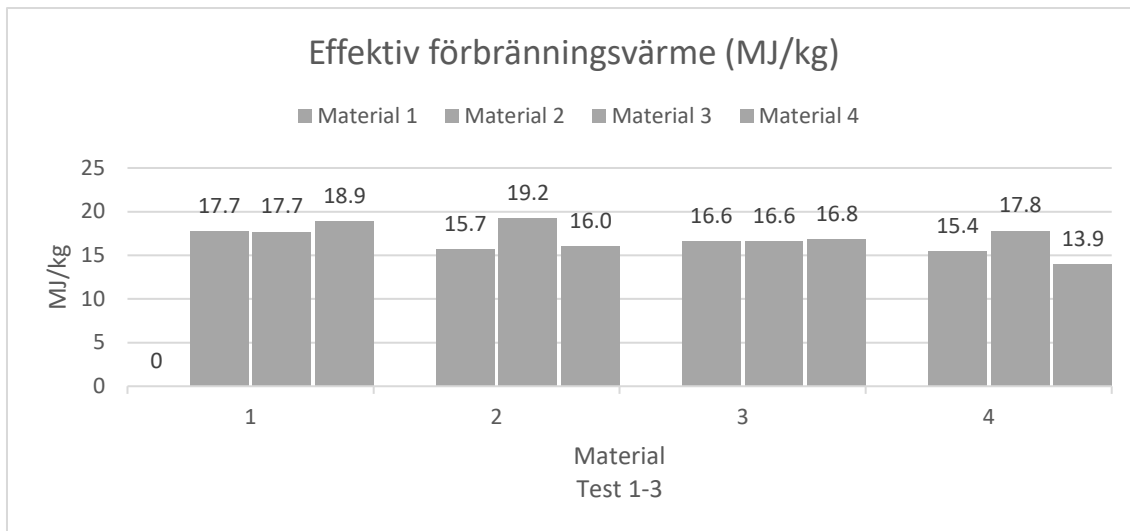
4.4 Energiinnehåll

Den effektiva förbränningsvärmens samt den totala frigjorda energin beräknades i enlighet med ekvation 5 respektive 6. För dessa beräkningar krävdes tiden för testförloppet, tid till att flaman slocknade, vilket presenteras i tabell 6.

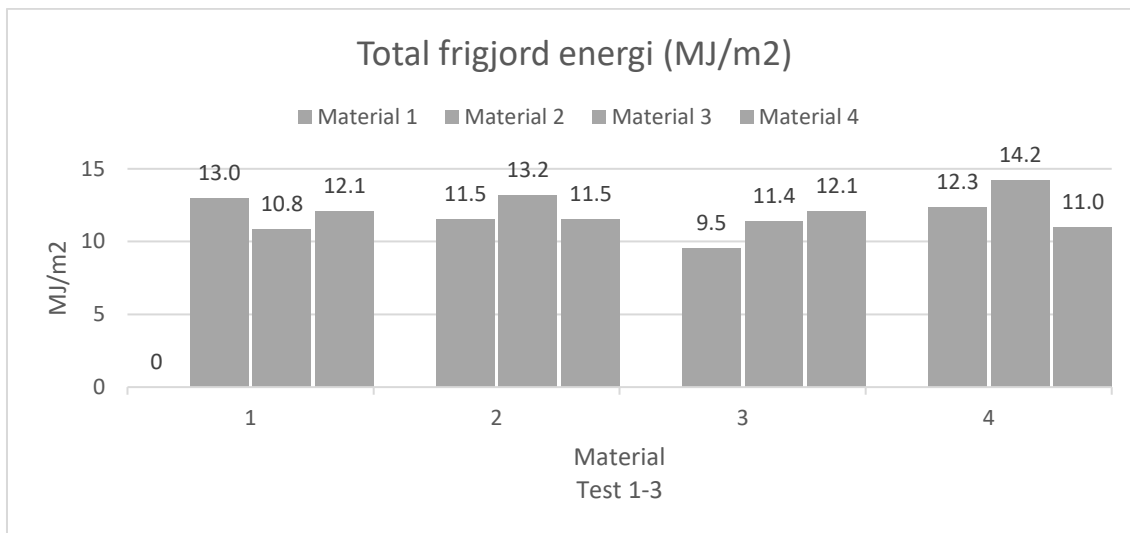
Tabell 7: Tid till slocknad flamma för samtliga test vid strålningsnivån 40 kW/m².

TID TILL SLOCKNAD FLAMMA (S)				
MATERIAL	Test 1	Test 2	Test 3	
1	597	432	511	
2	494	520	521	
3	466	545	617	
4	513	508	553	

Den beräknade effektiva förbränningsvärmens samt total frigjord energi för materialen presenteras i nedanstående diagram. Dessa värden är för försöken vid 40 kW/m². Resultaten är mycket jämna för alla material. För den effektiva förbränningsvärmens är värdet kring 16-18 MJ/kg i genomsnitt. För den totala frigjorda energin är värdet i genomsnitt mellan 11-12 MJ/m².



Figur 35: Effektiv förbränningsvärme (test 1-3) för samtliga material vid 40 kW/m².



Figur 36: Total frigjord energi för samtliga material och försök vid 40 kW/m².

5 Diskussion

Resultaten från provningarna i konkalorimetern visar inte på några tydliga skillnader mellan de olika PIR-materialen. Om någon direkt slutsats skulle vara möjlig att dra hade skillnaderna mellan materialen behövt vara större. Material 1, som ingår i en sandwichpanel som är fullskaletestad och godkänd i enlighet med FM-approvals (4880) egna krav, visar generellt inte på några förbättrade testvärden gentemot de övriga materialen.

Det kan vara svårt att genom konkalorimetertester på isoleringsmaterialet kunna avgöra om ett vägg-/taksystem innehållandes denna isolering har önskvärda brandegenskaper. Likt svårigheterna som tidigare nämnts med att använda SBI-metoden för att utvärdera sandwichpanelernas brandavskiljande förmåga, där ytskikten får en allt för stor roll, kan det alltså vara svårt att endast titta på isoleringen. Hela systemet med både ytskikt och isolering avgör hur väl brandegenskaper för panelen blir och att titta enskilt på bara isoleringsmaterialet kan vara problematiskt.

En viktig sak att poängtera är att de otestade materialen inte är bevisat att vara sämre än material 1 i ett riktigt brandscenario. Det är bara så att dessa material inte ingår i en sandwichpanel som är testad i fullskala enligt FM-approvals standard 4880. Övriga material skulle därför mycket väl kunna ge likvärdiga testresultat om de ingick i samma typ av panel vid test i fullskala, med samma förutsättningar. Att skillnader är svåra att uttyda gör därför att det inte med säkerhet går att avgöra metodens lämplighet.

Det hade också varit önskvärt att fler typer av PIR-isolering testades då detta man då detta hade givit ett större underlag och därmed hade man med större säkerhet kunnat avgöra metodens användbarhet. Svårigheter med anskaffandet av material bland annat beroende på begränsad tid gjorde att endast fyra olika typer av PIR införskaffades. Flertalet leverantörer av isolering använder också sig av samma PIR-producent, det vill säga skummet är detsamma, vilket gör det svårare att hitta olika material.

Genomgående för de flesta provningarna är att material 4 visar på mindre goda brandegenskaper, exempelvis då detta material genererar en högre effektutveckling samt har snabbare antändningstider. Det går därmed att urskilja detta material, men skillnaderna är inte definitiva. Osäkerheterna i resultaten är stora. Som tidigare nämnts har försök utförda av Janssens visat på osäkerheter i storleksordningen +/- 11 % för effektutvecklingen vid konkalorimeterprovningar. Som också nämnts har effektutvecklingens storlek betydelse för hur stora osäkerheterna blir, lägre effektutvecklingen innebär en större osäkerhet. Detta då syrehalten mäts i ett spann som är anpassat för en högre effektutveckling (över 300 kW/m²) (Enright & Fleischmann, 1999). Det är därför rimligt att anta att osäkerheterna vid dessa försök, där den maximala effektutvecklingen ligger under 100 kW/m², är större än de +/- 11 % som Janssens uppmätt vid försök på plastmaterial. Detta innebär således att de skillnader som uppvisats mycket väl kan ligga inom området för osäkerheten vilket är problematiskt för utvärdering av ett materials brandegenskaper.

För den maximala effektutvecklingen är skillnaderna omkring 20 – 30 % mellan det mest väl presterande och det minst väl presterande materialet. Denna effektutveckling ligger mellan 60-90 kW/m². Detta känns som ett rimligt resultat då man i tidigare försök har uppmätt resultat mellan 40-300 kW/m² beroende på olika tillsatser av flamskyddsmedel. Den genomsnittliga effektutvecklingen vid 60 sekunder gav lite större skillnader än den maximala effektutvecklingen. Skillnaderna materialen emellan för denna parameter ligger kring ca 30 %. Detta är den parameter som totalt sett gav störst skillnader i provningarna. Material 1 är för denna parameter näst sämst, detta materialet är alltså det enda som ingår i en fullskaleprovad sandwichpanel.

Vad gäller antändningstider varierar tiderna kraftigt försöken emellan. Det är alltså svårt att hitta jämna resultat, vilket gör dem svåra att jämföra. Likt tidigare försök är antändningstiderna vid de högre nivåerna mycket snabba, kring sekunden. Att antändningstiderna är så pass snabba beror till stor del av att materialen har mycket god isoleringsförmåga. Det låga isoleringsvärdet i kombination med en relativt låg densitet ger en låg värmeupptagningsförmåga. Detta gör att energi har svårt att ledas bort från ytan vilket gör att yttemperaturen ökar i en snabb takt.

De skillnader man kan se vid de snabbaste antändningstiderna (kring en sekund) är mycket osäkra då skyddet till strålningskällan öppnas manuellt och tiden till att provet exponeras för strålningen kan därmed skilja försöken emellan. Även reaktionstiden för den som gör bedömningen skall tas i beaktning då det finns en fördröjning mellan att flaman visar sig och att stoppuret stannas, denna fördröjning är olika från försök till försök då den mänskliga faktorn spelar en betydande roll.

Jämnast jämförbara resultat avseende antändningstider fås vid nivån 35 kW/m², lägre än denna nivå ger mycket stora differenser från försök till försök. Vad som orsakar dessa skillnader är inte helt lätt att avgöra. Vid 35 kW/m² kan man se en antydning till att material 1 ger längre tid till antändning vilket kan vara eftersträvansvärt om metoden ska kunna användas som en utvärdering PIR-material i avseende på användning i sandwichpaneler. Det är dock som tidigare nämnts en hel del osäkerheter i dessa mätningar och det innebär svårigheter om metoden ska fungera, det måste gå att göra om samma försök och få ut samma resultat av det.

En tydlig skillnad, som också är genomgående för resultaten, är att material 4 är klart sämst avseende antändningstider. Detta material antänder nästan direkt när provet blir exponerat för strålningen i många fall. Materialet är också det med lägst densitet vilket kan vara av betydelse då bidrar till ett lägre ρc_p -värde.

Den kritiska infallande strålningen visade sig vara svår att använda till jämförelsen. Detta på grund av att de kraftigt varierande antändningstiderna ger ett osäkert linjärt samband (osäkerheten ligger kring 30 %, att utläsa från determinationskoefficienten). Osäkerheterna visar också tydligt i den känslighetsanalys som utfördes där resultaten varierade med upp till 60 % om antändningstiderna från en av strålningsnivåerna inte togs med i beräkningen. Den kritiska infallande strålningen gav inte heller någon bild av att material 1 presterade bättre än något annat av materialen, undantaget material 4 som även här var klart sämst. Av ovan nämnda orsaker kan slutsatsen dras att den kritiska infallande strålningen inte är lämplig att använda för att jämföra och utvärdera PIR-material. Det krävs dock fler försök med fler material och på olika strålningsnivåer för att med säkerhet kunna avgöra detta.

Massavbrinningen visar på små skillnader, man kan till exempel se att material 4 har en något högre massavbrinning och massförlust men då dessa skillnader inte är i samma storleksordning som för effektutvecklingen är det klart sämre att jämföra massförlust och massavbrinning. Massavbrinningen mellan att flaman slocknade till att 10 minuter hade gått är ungefär densamma för samtliga material. Man kan också se i effektkurvorna att efter att den stora effekt-toppen passerat ligger materialen och pyr i ungefär samma effekt under en lång tid, där skiljer sig inte material åt och detta fortsätter också efter att flaman slocknat. Man kan dock se att effekten är mycket låg i alla fall och detta är troligtvis inte det som påverkar om materialet ska prestera bra respektive dåligt i fullskaleförsök.

Gällande energi är också här resultaten svåra att dra några slutsatser ifrån. För den effektiva förbränningsvärmen är resultat mycket jämna, kring 16-18 MJ/kg. I detta fall ger material 4 lägre energiutveckling, vilket går ifrån övriga resultat. För den totala frigjorda energin ligger materialen kring 11-12 MJ/m². Detta är något lägre än vad man uppmätt för polyuretan skum vid tidigare försök, vilket är naturligt då PIR ska prestera bättre jämfört med föregångaren PUR. Även för den totala frigjorda energin är resultaten jämna och svårtolkade, inget material sticker ut. Det långa förloppet där materialet ligger och pyr och effektutvecklingen är mycket låg verkar göra att skillnaderna i den totala energin som frigörs slätas ut.

Effektutvecklingen gav som sagt bäst resultat avseende att se skillnader mellan materialen och då var det främst det tidiga förloppet som studerades då det är där skillnaderna är tydligast. Då effektutvecklingen såg mest intressant ut efter att försöken på 40 kW/m² slutförts gjordes ytterligare tester för att se om en högre-/lägre strålningsnivå skulle ge större skillnader. För 50 kW/m² kunde man se att resultaten samlades än mer samtidigt som resultaten visade på en större spridning för 30 kW/m². Därför gjordes fler tester på 30 kW där det dock visade det sig att resultaten varierade kraftigt från försök till försök och skillnaderna var inte så stora som första försöket gav sken av. Även på 40 kW/m² varierade effektutvecklingen mellan de olika försöken och detta innebär självklart att det finns en hel del osäkerheter även här.

Kollagrets tjocklek visade sig bli ungefär lika tjockt för alla fyra materialen. Det går inte att koppla det med något av de andra resultaten och därmed är det en ointressant egenskap att titta på. Att alla materialen bildar ett så pass tydligt kollager kan vara en av anledningarna till att effektutvecklingen sjunker till en så låg nivå och att den nivån blir ungefär samma för alla materialen. Kollaget kan därför mycket väl vara avgörande för materialets egenskaper och möjligen skulle en längre exponeringstid kunnat ge större skillnader materialen emellan. Detta är något som skulle kunna undersökas ytterligare i eventuella fortsatta studier. Det som talar emot att en längre exponeringstid skulle ge större skillnader är att även proverna som hade blivit exponerade i tio ytterligare minuter hade ungefär samma tjocklek på kollaget.

Man kan från provningarna se svårigheter i att använda konkalorimetern som ett screening-verktyg för PIR-isoleringen, i alla fall om man tittar på kopplingen mellan ett småskaleförsök som detta och försök i full skala. Repeterbarheten är relativt ojämn och materialen generellt ligger relativt nära varandra i flertalet testade parametrar vilket innebär att osäkerheterna oftast är större än skillnaderna. Att ett av materialen går att särskilja från de övriga visar dock på att det går att hitta en eller flera parametrar som kan användas för att särskilja olika PIR-material. De parametrar som bäst urskilde detta material är den genomsnittliga effektutvecklingen vid 60 sekunder samt antändningstiden vid en strålningsnivå på 35 kW/m².

Att man kan urskilja material 4 visar ändå på att det finns parametrar från konkalorimeterna som kan vara användbara för att utvärdera PIR-isoleringsmaterial. För att kunna göra koppling till fullskaleförsök krävs dock mycket fler provningar med flera olika typer av PIR-material. Helst av allt skulle ett flertal sandwichpaneler med PIR-isolering testats i fullskala för att sedan jämföra de resultaten med resultat från konkalorimeterprovningar av isoleringen. Då hade man med säkerhet kunna se om konkalorimetern går att använda till detta just detta ändamål.

6 Slutsats

Det är svårt att se tydliga skillnader mellan materialen genom tester i konkalorimetern. Repeterbarheten är dålig vid lägre strålningsnivåer och osäkerheterna är stora. Skillnaderna är därför inte säkerställda. Det går att urskilja ett av materialen och de parametrar som ger bäst resultat gäller effektutveckling i det tidiga förloppet (maximal samt genomsnittlig vid 60 sekunder) samt antändningstider vid strålningsnivå 35 kW/m². Det går dock inte att se att PIR-isoleringen som ingår i en FM-approvals (4880) testad sandwichpanel ger förbättrade värden och ingen koppling kan göras mellan dessa försök och fullskaleförsök.

För att med säkerhet kunna avgöra om konkalorimetern går att använda för att utvärdera brandegenskaper för PIR-isolering krävs ett större resultatunderlag från provningar på fler material. Även andra försöksprocedurer än den normala kan testas för att se om det möjligt kan ge mer önskvärda resultat.

7 Referenser

- Albani m.fl. (2017). *Mass loss and flammability of insulation materials used in sandwich panels during the pre-flashover phase of fire*. Wiley Online Library.
- ANSI. (2018, 01 15). *SDO: FM Approvals LLC*. Retrieved from standardportal.org: https://www.standardsportal.org/usa_en/sdo/fm.aspx
- Apte, V. B. (2006). *Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining*. Boca Ranton, FL. USA: Woodhead Publishing Lt.
- Axelsson, & Van Hees. (2004). *New data for sandwich panels on the correlation between the SBI test method and the room corner reference scenario*. Borås: Fire Mater.
- Babrauskas, V. (1982). *Development of the Cone Calorimeter*. Washington D.C.: U.S. Department of Commers.
- Babrauskas, V. (2016). The Cone Calorimeter. In SFPE, *SFPE Handbook of fire protection engineering, Vol.1, 5th ed.* (pp. 952-980). New York: Springer.
- Bengtsson. (2001). *Enclosure Fires*. Räddningsverket.
- Björklund, M., & Paulsson, U. (2002). *Att skriva en rapport*. Lund: LTH.
- Boverket. (2018). *Boverkets byggregler BFS (2011:6 med ändringar till och med BFS 2018:4)*. Boverket.
- BRUFMA. (2017). *What is PIR/PUR*. Retrieved from brufma.co.uk: <http://brufma.co.uk/what-is-pirpur/>
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley.
- Enright, P., & Fleischmann, C. (1999). Uncertainty of Heat Release Rate Calculation of the ISO56604 Cone Calorimeter Standard Test Method. *Fire Technology, vol. 35*.
- FM - approvals. (2015). *Approval Standard for Class 1 Fire Rating of Building Panels or Interior Finish Materials*. FM - approvals.
- FM-approvals. (2010). *Approval standard for class 1 panel roofs*. FM-approvals.
- FM-approvals. (2016). *Approval standard for exterior wall systems*. FM-approvals.
- Fredelius, A. (2017). Flera fel i branddrabbade Grenfell Tower. *Ny Teknik*.
- Greenspec. (2018, 01 15). *Insulation materials and their thermal properties*. Retrieved from greenspec.co.uk: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>
- Huggett, C. (1980). Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements. *Fire Mater*, 61-65.
- ISO. (2015). *ISO 5660-1*. Genève: ISO.
- J.M. Davies. (2001). *Lightweight sandwich construction*. Manchester UK: CIB Working Commission.
- Janssens, M. (2016). Calorimetry. In SFPE, *SFPE Handbook of fire protection engineering, Vol.1, 5th ed.* (pp. 905-951). New York: Springer.
- M. Checchin m.fl, C. C. (1998). *Use of cone calorimeter for evaluating fire performances of polyurethane foams*. Venezia, Italy: Elsevier Science Ltd.
- M. Modestia m.fl, A. L. (2001). *Expandable graphite as an intumescent flame retardant in polyisocyanurate-polyurethane foams*. Padova, Italy: Elsevier Science Ltd.
- M. Modestia m.fl., A. L. (2001). *Influence of different flame retardants on fire behaviour of modified PIR/PUR polymers*. Padova, Italy: Elsevier Science Ltd.

- Meng Zhang m.fl, J. Z. (2014). *Synthesis and fire properties of rigid polyurethane foams made from a polyol derived from melamine and cardanol*. Elsevier Science Ltd.
- NIST. (2017, 11 05). *Cone Calorimeter*. Retrieved from nist.gov: <https://www.nist.gov/laboratories/tools-instruments/cone-calorimeter>
- PIMA. (2014). *Polyiso Insulation And Flame Retardants*. Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Assosiation.
- SP. (2018, 01 15). *Information om ISO 5660 - Konkalorimeter*. Retrieved from sp.se: https://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/ISO_5660_konkalorimeter/Sidor/default.aspx
- SP. (2018a, 01 15). *Europeisk brandklassning av material, produkter och konstruktioner*. Retrieved from sp.se: <https://www.sp.se/sv/index/information/fireclassification/Sidor/default.aspx>
- SP. (2018b, 01 15). *Information om Room Corner Test*. Retrieved from sp.se: https://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/ISO_9705_Room_corner_test/Sidor/default.aspx
- SP. (2019, 04 09). *sp.se*. Retrieved from Information om Room Corner Test: https://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/iso_9705_room_corner_test/sidor/default.aspx
- Sundström, B. (2001). *Euroklass i svensk byggnorm - Jämförelse mellan svenska och europeiska brandklasser för byggprodukter*. SP.
- Svenskt Trä. (2019, 04 09). *Träguiden*. Retrieved from Brandklasser för material och konstruktioner: <https://www.traguiden.se/om-tra/byggfysik/brandsakerhet/brandklasser-for-material-och-konstruktioner/>
- Twilley, W. H., & Babrauskas, V. (2001). *User's Guide for the Cone Calorimeter*. Gaithersburg, MD: Fire Testing Technology Limited.