

Beräkningar av självantändning i lager av träpellets

Martin Jonsson

**Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety
Lund University, Sweden**

**Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Report 5339, Lund 2010

**Rapporten har tagits fram i samarbete med SP Sveriges Tekniska
Forskningsinstitut**

Beräkningar av självantändning i lager av träpellets

Martin Jonsson

Lund 2010

Titel: Beräkningar av självantändning i lager av träpellets

Title: Calculations of spontaneous ignition in storages of wood pellets

Författare/Author: Martin Jonsson

Report 5339

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB-5339-SE

Antal sidor/Number of pages: 64

Illustrationer/Illustrations: Martin Jonsson

Keywords

Self-heating, spontaneous ignition, wood pellets, Frank-Kamenetskii, Transient Plane Source, TPS

Sökord

Självpuppvärmning, självantändning, träpellets, Frank-Kamenetskii, Transient Plane Source, TPS

Abstract

The aim of this report is to contribute with information that can be used to improve access to good risk assessments associated with storage of wood pellets. Frank-Kamenetskii theory is described in a manner intended to facilitate for the reader to understand and carry out calculations with the theory. A modeling tool in Microsoft Excel for calculations with Frank-Kamenetskii theory has been developed. A description of constraints that the theory has when it comes to use for storages of wood pellets is given and a summary of alternative modeling techniques have been made. The work has contributed to the development of a methodology for measuring the thermal properties thermal conductivity, diffusivity and specific heat capacity on individual pellets with the Transient Plane Source method (TPS). This has been done through a series of laboratory experiments with TPS measurements in order to examine the significance of possible error sources and to state what you should have in mind when performing this kind of measurements.

Författaren svarar för innehållet i rapporten

© Copyright: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2010.

Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

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

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se/english>

Telephone: +46 46 222 73 60
Fax: +46 46 222 46 12

Förord

Det projekt som denna rapport sammanfattar utgör examensarbete i brandteknik. Syftet med examensarbetet är att utveckla och visa sådan kunskap och förmåga som krävs för att självständigt arbeta som brandingenjör genom att inhämta nya kunskaper samt tillämpa kunskaper förvärvade under utbildningen, applicera dessa på en problemställning inom det brandtekniska området och självständigt lösa den på ett ingenjörsmässigt sätt.

Projektet som jag nu, under mina sista månader på Brandingenjörsprogrammet, genomfört har många gånger stött på patrull. Patruller som förstås har varit ovälkomna men framförallt mycket lärorika att handskas med. Jag vill tacka följande personer för gott samarbete, värdefull hjälp och givande diskussioner:

Per Blomqvist	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Patrick van Hees	Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola
Bengt Bogren	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Robert Jansson	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Jag vill rikta ett särskilt tack till mina huvudsakliga handledare Per och Patrick för att ni tagit er tid och visat bra förståelse för de problem jag kommit med till er.

Lund, december 2010
Martin Jonsson

Sammanfattning

Arbetet handlar om beräkningar av självantändning i lager av träpellets. Syftet är att bidra med information som kan användas till att förbättra möjligheterna till bra riskbedömningar i samband med lagring av träpellets. Ett ökat behovet av detta har uppstått då det planeras för stor expansion av användande av träpellets i danska kraftverk. Frank-Kamenetskii-teori beskrivs på ett sätt som syftar till att underlätta för läsaren att förstå och kunna genomföra beräkningar med teorin. Ett beräkningsverktyg i Microsoft Excel för beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori har utvecklats. Vilka begränsningar som teorin har för användning på lager av träpellets beskrivs och en sammanställning av alternativa beräkningsmodeller har gjorts. Arbetet har bidragit till utveckling av en metod för att, på enskilda pellets, mäta de termiska egenskaperna värmeledningsförmåga, diffusivitet och specifik värmekapacitet med Transient Plane Source-metoden (TPS). Detta har gjorts genom en rad laborativa försök med TPS-mätning i syfte att undersöka eventuella felkällors betydelse och att konstatera vad man bör tänka på vid denna typ av mätningar.

De viktigaste slutsatserna som dragits är följande:

- Det framtagna beräkningsverktyget kan vara värdefullt för att, på ett förhållandevis enkelt sätt, göra en första bedömning av risken för självantändning och när denna kan förväntas ske.
- Det finns ett ganska stort antal faktorer som begränsar Frank-Kamenetskii-teorins lämplighet för användning på lager av träpellets. Det finns dock alternativa, mer avancerade, modeller för beräkningar av självantändning i lager av träpellets.
- Förutsatt att de rekommendationer, angående mätningar med TPS på enskilda pellets, som presenteras i denna rapport följs saknas större felkällor och metoden bedöms vara robust.

Summary

This report deals with calculations of self-ignition in the storages of wood pellets. The aim is to contribute with information that can be used to improve access to good risk assessments associated with storage of wood pellets. An increased need for this has arisen because of planned major expansion of the use of wood pellets in Danish power plants. Frank-Kamenetskii theory is described in a manner intended to facilitate for the reader to understand and carry out calculations with the theory. A modeling tool in Microsoft Excel for calculations with Frank-Kamenetskii theory has been developed. A description of constraints that the theory has when it comes to use for storages of wood pellets is given and a summary of alternative modeling techniques have been made. The work has contributed to the development of a methodology for measuring the thermal properties thermal conductivity, diffusivity and specific heat capacity on individual pellets with the Transient Plane Source method (TPS). This has been done through a series of laboratory experiments with TPS measurements in order to examine the significance of possible error sources and to state what you should have in mind when performing this kind of measurements.

The main conclusions drawn are as follows:

- The calculation tool developed within the project can be useful for, in a relatively simple way, making an initial assessment of the risk of spontaneous ignition and when this can be expected to occur.
- There are quite a number of factors that limit the Frank-Kamenetskii-theory's suitability for use on storages of wood pellets. There are, however, alternative more advanced models for estimation of spontaneous ignition in storages of wood pellets.
- Regarding measurements with TPS on individual pellets: Provided that the recommendations which are presented in this report are followed no significant sources of error should be present and the method is considered robust.

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Mål.....	1
1.3	Syfte.....	1
1.4	Avgränsningar.....	2
1.5	Metod.....	2
1.6	Läsanvisningar	3
2	Fenomenet självantändning.....	5
3	Beräkningar av kritiska lagringskonfigurationer med Frank-Kamenetskii-teori	7
3.1	Bakgrund till Frank-Kamenetskii-teori.....	7
3.2	Antaganden	8
3.3	Tillvägångssätt för beräkningar	9
3.3.1	Beräkning av huruvida självantändning kan ske eller ej	9
3.3.2	Beräkning av tid till antändning.....	10
3.3.3	Möjliga korrekationer till kritiska värden för Frank-Kamenetskii-parametern.....	11
4	Utveckling av beräkningsverktyg i Microsoft Excel	15
4.1	Om beräkningsverktyget.....	15
4.2	Validering	16
4.3	Applikationsexempel	17
4.4	Parameterstudie.....	19
5	Frank-Kamenetskii-teorins begränsningar vid användning för träpellets	21
6	Alternativa modeller för beräkning av självuppvärmning i lager av träpellets	23
7	Bestämning av termiska egenskaper med Transient Plane Source-metoden.....	25
7.1	Teori om Transient Plane Source.....	25
7.2	Försöksuppställning.....	26
7.3	Genomförande	26
7.3.1	Grundexperiment	27
7.3.2	Ytterligare experiment för hantering av felkällor	28
7.3.3	Bestämning av fuktkvot.....	28
7.3.4	Bestämning av densitet	28
7.4	Resultat och diskussion.....	29
7.4.1	Resultat för grundexperimenten.....	29
7.4.2	Variationer inom mätserier	31

7.4.3	Resultat för ytterligare experiment.....	32
7.4.4	Resultat för bestämning av fuktkvot och densitet.....	35
7.4.5	Ytterligare diskussion kring termisk konduktivitet.....	35
7.5	Termiska egenskaper för pelletbulk	35
7.6	Slutsatser om mätmetoden	36
8	Slutsatser	39
9	Förslag till vidare arbete	41
10	Nomenklatur	43
11	Referenser.....	45
	Bilaga 1 – Strukturerad litteratursökning.....	47
	Bilaga 2 – Indata vid validering av beräkningsverktyget i Excel.....	49
	Bilaga 3 – Indata för applikationsexemplen	53

1 Inledning

Nedan beskrivs bakgrunden till arbetet, dess syfte och mål samt på vilket sätt arbetet genomförts.

1.1 Bakgrund

Projektet har utförts på uppdrag av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Resultatet av arbetet är tänkt att kunna användas direkt eller som startpunkt för en viss del av SP's arbete i ett forskningsprojekt om risker med hantering och lagring av träpellets. Projektet är danskt och benämns LUBA-projektet. Bakgrunden till LUBA-projektet är att det planeras för stor expansion av användande och lagring av träpellets i danska kraftverk. Att lagra träpellets i stora kvantiteter medför risk för självantändning. Att så är fallet exemplifieras av ett antal bränder i olika typer av pelletlager som skett på senare tid. Några incidenter finns sammanfattade i SP Rapport 2008:51 (Lönnermark, Persson, & Hogland, 2008, s. 43). En brand i ett lager innebär främst fara för stora ekonomiska förluster men risk att människor skadas finns också. Ett exempel där människor skadats på grund av processer kopplade till självuppvärmning är i samband med avlastning av pellets från bulkfartyget SAGA SPRAY i Helsingborg år 2006 (Sjöfartsverket, 2007). I ett bredare perspektiv kan man även tänka sig störningar för samhället då ett kraftverk, på grund av ett förstört lager, inte kan leverera i normal takt. Om en brand uppstår i till exempel en lagringssilo är det svårt att släcka den varför det är extra viktigt att på ett bra sätt kunna förebygga att det sker. Att med modeller kunna beräkna var gränserna går för att risk för självantändning ska föreligga är en viktig del i det förebyggande arbetet. Här kommer detta arbete, vilket behandlar beräkningar kring självantändning, in i bilden.

1.2 Mål

Målet är att ta fram ett användarvänligt beräkningsverktyg för beräkningar av självantändning av lager av träpellets med Frank-Kamenetskii teori och att utreda alternativa beräkningsmetoder. Dessutom ska arbetet bidra till utvecklingen av mätmetoder för att ta fram, för självantändning, viktiga fysikaliska egenskaper hos träpellets.

Målet är också att ge svar på följande frågeställningar:

- Hur är Frank-Kamenetskii-teorin uppbyggd? Vilka teoretiska antaganden och möjliga korrekationer finns samt vilka är metodens begränsningar vid användning för träpellets?
- Vilka alternativa modeller för beräkning av självuppvärmning i fuktiga reaktiva biologiska material, som passar användning för lager av träpellets, finns?
- Hur ska mätningar av de termiska egenskaperna termisk konduktivitet, termisk diffusivitet och specifik värmekapacitet med Transient Plane Source-metoden (TPS) göras på enskilda pellets? Att besvara denna fråga syftar till att bidra med information som, utanför ramen för detta arbete, kan användas för att besvara den bredare frågan: Hur ska de termiska egenskaperna för träpelletbulk bestämmas?

1.3 Syfte

Syftet med det projekt som denna rapport sammanfattar är att, genom att försöka ge svar på de ovan nämnda frågeställningarna, förbättra möjligheterna till bra riskbedömningar i samband med lagring av träpellets.

1.4 Avgränsningar

Dels för att hålla fokus på de ovan angivna målen och dels för att kunna slutföra arbetet inom given tidsram har vissa avgränsningar gjorts. Dessa presenteras nedan.

- Härledning av Frank-Kamenetskii-teori behandlas endast ytligt.
- Vad gäller beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori behandlas endast vad som ibland kallas direkt utvärdering med Frank-Kamenetskii-teori. Med det menas principen där varje parameter mäts varefter dessa värden används i olika ekvationer. Indirekt utvärdering, som alltså inte behandlas vidare i denna rapport, innebär att tester genomförs där kritiska värden för karakteristisk längd och temperatur mäts. Detta görs för en kropp med känt kritiskt värde för Frank-Kamenetskii-parametern varvid värdet för en grupp av materialegenskaper kan bestämmas utan att varje enskild parameter mäts.
- Beräkningsverktyget för beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori som tagits fram har begränsats till att kunna ta hänsyn till två av de korrektioner som finns att använda (korrektion för yttemperaturen \neq omgivningens temperatur, se kapitel 3.3.3.1, samt korrektion för låg aktiveringsenergi, se kapitel 3.3.3.2).
- Beräkningsverktyget har begränsningen att det är anpassat för ett antal specifika geometrier (i många situationer går det dock att approximera aktuell geometri med någon av de som finns tillgängliga i beräkningsverktyget).
- TPS-mätningar har endast gjorts på enskilda pellets.
- TPS-mätningar har endast gjorts på en sorts pellets.

1.5 Metod

Arbetet började med en litteratursökning som syftade till att ta fram en lista med litteratur som skulle användas under arbetet. Därefter studerades litteraturen för att få en överblick över ämnet och vad som gjorts tidigare.

Nästa steg var att utifrån litteraturen skriva om Frank-Kamenetskii-teorin och dess begränsningar. Metoden för detta var *deskription* (Ejvegård, 2003, ss. 32-33). Därefter utarbetades, genom *modellbildning* (Ejvegård, 2003, ss. 39-41), ett användarvänligt beräkningsverktyg för beräkningar av kritiska förhållanden gällande lagring av träpellets. I nästa fas utfördes en validering av beräkningsverktyget mot tidigare genomförda experiment. Applikationsexempel för beräkningsverktyget togs fram genom att utföra beräkningar för fyra typiska lagerkonfigurationer och en parameterstudie gjordes för att ge en bild av olika materialegenskapers inverkan på risken för självantändning. Vid arbetet med validering, applikationsexempel och parameterstudie utgjorde *kvantifiering* en viktig metod (Ejvegård, 2003, ss. 36-37).

Tredje steget innefattade ytterligare litteraturstudier vilka syftade till att undersöka vilka alternativa beräkningsmetoder som finns för den aktuella problemställningen. De beräkningsmetoder som undersöktes är sådana i vilka viktiga fysikaliska och kemiska processer som fukttransport och reaktionsvärme beaktas. Här var *deskription* den metod som användes.

För att besvara frågan om hur termiska egenskaper hos enskilda pellets ska mätas med Transient Plane Source-metoden (TPS) gjordes en rad laborativa försök. Mätningar gjordes på olika sätt i syfte att undersöka eventuella felkällors betydelse och att konstatera vad man bör tänka på vid denna typ av mätningar.

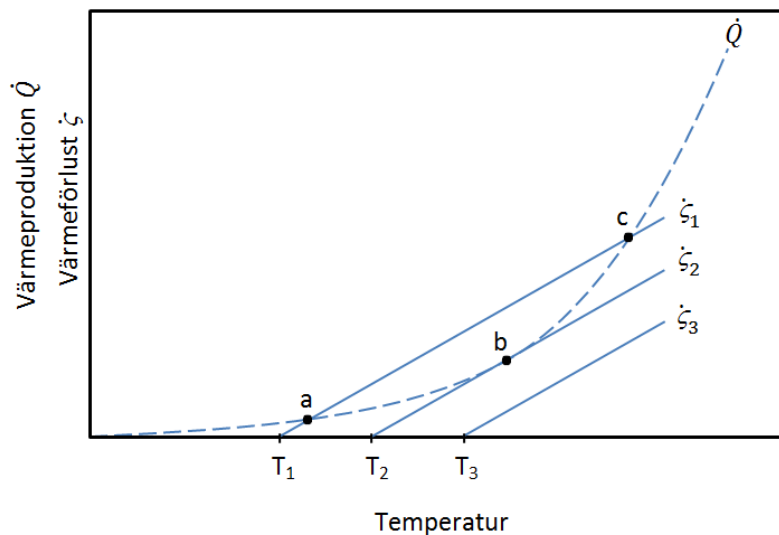
1.6 Läsanvisningar

Vad gäller nomenklatur redovisas alla använda beteckningar, inklusive enheter, under kapitlet Nomenklatur. För att underlätta läsandet förklaras många gånger beteckningarna även löpande när de används.

Angående diskussion så förs denna löpande i anslutning till de fakta som diskuteras. Syftet är att på så vis göra det lätt för läsaren att koppla diskussionen till det som nyligen presenterats.

2 Fenomenet självantändning

Med begreppet självuppvärmning menas här en process där ett instabilt material, utan tillförsel av energi, reagerar varvid värme bildas och i en betydande omfattning hindras från att lämna materialet. Det som orsakar hindret kan vara en låg termisk konduktivitet hos materialet eller den isolering som behållaren, i vilken materialet förvaras, bidrar med. Värmebildande reaktioner består främst av oxidationsreaktioner och eventuellt, i de fall det handlar om biologiska material, reaktioner som sker på grund av biologisk aktivitet. I fallet träpellets är det dock inte troligt att biologisk aktivitet bidrar till värmeproduktionen, se kapitel 5. Även fysikaliska processer kan bidra till värmeproduktion, då främst i form av adsorption av vatten. Vid oxidationsreaktioner frigörs värme i samband med spontana reaktioner mellan materialet och syre i den omgivande luften. För att självuppvärmning ska kunna ske krävs normalt att ämnet som oxideras är poröst. Detta eftersom oxidationsreaktionerna endast sker på materialets ytor (Babrauskas, 2003, s. 369). Metabolism hos svampar och bakterier är orsaken till värmeproduktion av biologisk natur.



Figur 1. Värmeproduktion respektive värmeförluster enligt Semenovs modell av självantändning. Figuren producerad med utgångspunkt i (Drysdale, 1998, s. 197).

Självantändning sker om värmeproduktionen i materialet överstiger värmeförlusterna. För att detta ska inträffa krävs att kritiska förhållanden föreligger vilket innebär att en kombination av en rad olika villkor ska vara uppfyllda. Det handlar bland annat om omgivande temperatur samt materialkroppens storlek och form.

Figur 1 ger en principiell bild av hur värmebalansen styr ett självantändningsförlopp. Figuren utgår från Semenovs teori. Ett av antagandena för denna är att temperaturen är samma överallt i det reagerande materialet, därav lämpar den sig främst för välblandade gaser och vätskor (Gray, 2002, ss. 2:215-216). Figur 1 ger dock en generell förståelse för konceptet med värmebalans. Är värmeproduktionen större än förlusterna kommer materialets temperatur att öka. Är däremot värmeproduktionen mindre än förlusterna så minskar naturligtvis temperaturen. Punkterna a, b och c representerar jämviktsslägen där produktion och förluster är lika stora. I dessa lägen är materialets temperatur konstant. Om materialets temperatur i utgångsläget är lika med omgivningstemperaturen T_1 så är värmeproduktionen större än förlusterna vilket resulterar i att en temperaturökning sker tills punkten a nås. Denna punkt representerar en stabil jämviktspunkt eftersom en liten ändring av temperatur i någon av riktningarna kommer att medföra att förhållandet mellan

värmeproduktion och värmeförluster blir sådant att systemet återgår till punkten a. Punkt c däremot representerar en instabil jämviktspunkt. Om en liten temperaturminskning sker när systemet befinner sig i detta läge kommer omedelbart förlusterna vara större än produktionen varvid systemet förflyttas till jämviktsläge a. Om istället minsta temperaturökning sker blir produktionen större än förlusterna vilket skulle resultera i antändning. För att denna antändning ska ske krävs att yttre energi tillförs för att överföra systemet från punkt a till bortom punkt c. I ett sådant fall är det alltså inte självantändning som sker. Pondera att materialet istället har samma temperatur som omgivningstemperaturen T_3 . I detta läge är produktionen omedelbart större än förlusterna och antändning kommer, utan någon tillförsel av yttre energi, oundvikligen att ske. Detta är självantändning. Om utgångsläget är att materialet och omgivningen har temperaturen T_2 kommer temperaturen öka till jämviktspunkten b. Läget i punkten b är instabilt och minsta höjning av temperaturen skulle innebära en skenande reaktion resulterande i antändning. Är starttemperaturen för materialet och omgivningen det minsta högre än T_2 kommer alltså självantändning att ske förr eller senare. Denna temperatur benämns kritisk omgivningstemperatur.

En teori som tar hänsyn till att temperaturen inte är samma överallt i det reagerande materialet och som ofta används för beräkningar kring självantändning i fasta material är Frank-Kamenetskii-teorin. Hur denna är uppbyggd och används beskrivs i nästa kapitel.

3 Beräkningar av kritiska lagringskonfigurationer med Frank-Kamenetskii-teori

Den första person som lade fram en teori för fenomenet självantändning var Nikolai Semenov. Frank-Kamenetskii utvecklade 1939 en teori för självantändning som tar hänsyn till en icke-linjär temperaturprofil i materialet, vilket Semenovs teori inte gör. Frank-Kamenetskiis teori ligger till grund för modeller som ofta används när det gäller beräkningar av kritiska förhållanden för självantändning i fasta material. Även om många samband tagits fram av andra personer, bland vilka Philip Thomas spelat en viktig roll, så används ofta Frank-Kamenetskii-teori som ett samlingsnamn för modeller som tar hänsyn till en inre temperaturprofil. Nedan följer en genomgång av olika aspekter av Frank-Kamenetskii-teori. Först presenteras en kort bakgrund till teorin därefter vilka antaganden som den baseras på och slutligen hur man går tillväga för att genomföra beräkningar. Längre fram i kapitlet kan du läsa om möjliga korrekationer och i ett senare kapitel om modellens begränsningar vid användning för träpellets.

3.1 Bakgrund till Frank-Kamenetskii-teori

För ett endimensionellt värmefflöde med värmeproduktion beskrivs energibalansen av

$$\dot{q}'''(T) = \rho C \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{d^2T}{dx^2}$$

Där \dot{q}''' är värmeproduktion (W m^{-3}), ρ är densitet (kg m^{-3}), C är specifik värmekapacitet ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T är temperatur (K), t är tid (s), λ termisk konduktivitet ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) och x är sträcka (m).

Detta betyder i ord

$$\text{värmeproduktionen} = \text{energi som värmer materialet} - \text{energi som leds ut ur materialet}$$

En viss del av den värme som produceras i materialet värmer alltså materialet och resterande del leds ut ur materialet.

Grunden för Frank-Kamenetskiis koncept bygger på energibalans och att tillståndet är oberoende av tiden.

Oberoendet av tid medför att $\rho C \frac{dT}{dt} = 0$ vilket gör att energibalanskvationen övergår till

$$\dot{q}'''(T) = -\lambda \frac{d^2T}{dx^2}$$

Denna ekvation tillsammans med de antaganden som presenteras i nästa kapitel ledde fram till att Frank-Kamenetskii kunde härleda ett uttryck för en dimensionslös hastighet för värmeproduktion, vilken betecknas δ . Denna är kärnan i alla beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori.

Frank-Kamenetskii-parametern definieras av

$$\delta = \frac{\rho Q A}{\lambda} \cdot \frac{E r^2}{R T_0^2} \cdot e^{-E/R T_0}$$

där

δ = Frank-Kamenetskii-parametern (-)

ρ = bulkdensitet (kg m^{-3})

Q = reaktionsvärme (J kg^{-1})

A = pre-exponentiella faktorn i Arrheniusuttrycket för värmeproduktion i en kropp (s^{-1})

λ = termisk konduktivitet ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

E = aktiveringsenergi (J mol^{-1})

r = karakteristisk längd för lagringskonfigurationen (m). Se Tabell 1.

R = universella gaskonstanten ($R=8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T_0 = omgivningens temperatur (K)

3.2 Antaganden

De antaganden som ligger till grund för Frank-Kamenetskiis ursprungliga teori är följande (Beever, 1995, ss. 2:180-189):

1. Reaktionshastigheten hos den enda värmegenererande reaktionen antas följa Arrheniusekvationen. Det innebär att reaktionshastigheten är en funktion av temperaturen på ett sådant sätt att den är proportionell mot $e^{-E/RT}$, där T är den temperatur vid vilken reaktionen sker. Detta innebär att reaktionshastigheten vid en viss temperatur är konstant över tiden och att den ökar exponentiellt med ökande temperatur.

Tydligare uttryckt vad gäller Arrheniusantagandet kan sägas att hastigheten för värmeproduktion antas följa uttrycket $\dot{q}''' = Q \rho A e^{-E/RT}$ (Pauner & Bygbjerg, 2007).

2. Aktiveringsenergin antas vara så pass hög att $\varepsilon = \frac{RT_0}{E} \ll 1$.
3. All värmetransport genom kroppen antas ske i form av ledning.
4. Värmeövergången, i form av strålning och konvektion, från kroppens yta till omgivningen antas vara så pass stor att kroppens yta har samma temperatur som omgivningen.

Detta kan konkretiseras genom att säga att Biottalet antas gå mot oändligheten. Biottalet ges av

$Bi = \frac{hr}{\lambda}$ där h är det effektiva värmeövergångstalet.

5. Materialet antas vara isotropt och homogent samt ha fysikaliska egenskaper som inte beror av temperaturen.

3.3 Tillvägagångssätt för beräkningar

Detta kapitel behandlar endast vad som ibland kallas direkt utvärdering med Frank-Kamenetskii-teori. Med det menas principen där varje parameter mäts varefter dessa värden används i olika ekvationer. Indirekt utvärdering, som alltså inte behandlas vidare här, innebär att tester genomförs där kritiska värden för karakteristisk längd och temperatur mäts. Detta görs för en kropp med känt kritiskt värde för Frank-Kamenetskii-parametern varvid värdet för en grupp av materialegenskaper kan bestämmas utan att varje enskild parameter mäts. För mer information om indirekt utvärdering hänvisas till arbetet av Beever (1995, ss. 2:185-186).

3.3.1 Beräkning av huruvida självantändning kan ske eller ej

Huvudkonceptet för beräkningar av kritiska förhållanden är att man beräknar värdet för en dimensionslös parameter kallad Frank-Kamenetskii-parametern δ (även presenterad i kapitel 3.1) ur

$$\delta = \frac{\rho Q A}{\lambda} \cdot \frac{E r^2}{R T_0^2} \cdot e^{-E/R T_0}$$

Det framräknade värdet jämförs med tabellerade kritiska värden, δ_c , vilka beror på kroppens geometri. Om $\delta > \delta_c$ så kan självantändning ske.

Värdet på δ_c finns härlett för ett antal geometrier. Ett urval av dessa presenteras i Tabell 1 nedan.

Tabell 1. Värde på δ_c för olika geometrier. (Gray, 2002, s. 2:219)

Geometri	Mått	δ_c
Oändlig platta	Bredd $2r$	0,878
Rektangulärt block	Sidor $2l, 2r, 2m$ där $r < l, m$	$0,873(1 + r^2/l^2 + r^2/m^2)$
Kub	Sida $2r$	2,52
Oändlig cylinder	Radie r	2,00
Cylinder där diametern = höjden	Höjd $2r$, radie r	2,76
Kort cylinder*	Höjd $2L$, radie r	$2,00 + 0,841(r^2/L^2)$
Sfär	Radie r	3,32
Oändligt rektangulärt block	Sida $2r$	1,700

*från (Beever, 1995, s. 2:181). Ingen definition av kort cylinder har kunnat hittas i litteraturen men den tolkning som gjorts är att en cylinder är en kort cylinder så länge höjden < diametern.

Viktigt att observera är att värdena för δ_c i Tabell 1 endast är korrekta om antagandena för teorin är giltiga i den aktuella situationen. Är detta inte fallet finns korrekationer för ett antal avvikelser från antagandena, dessa presenteras längre fram.

Genom att använda ekvationen för Frank-Kamenetskii-parametern och Tabell 1 kan man alltså bestämma kritiskt värde för storleken på en lagringskonfiguration, r , givet en viss omgivningstemperatur, T_0 . Omvänt om man har en given storlek på lagret kan man bestämma kritiskt värde för omgivningens temperatur.

3.3.2 Beräkning av tid till antändning

Förutsatt att man kommit fram till att självantändning kan ske, det vill säga att $\delta > \delta_c$, är det också intressant att kunna bestämma den tid det beräknas ta till självantändning för en viss lagerkonfiguration. Skulle det till exempel vara så att man kommit fram till att självantändning kan ske och att tiden till det inträffar beräknas till två månader så är det ofarligt om det är så att lagret aldrig ligger längre än en vecka. Babrauskas (2003, ss. 391-395) har sammanställt ett flertal modeller för att beräkna tid till antändning eller TTI (time to ignition) som det ofta benämns. Nedan presenteras två av dessa. Att just dessa valts beror på att de är förhållandevis lätta att förstå och smidiga att använda samt att ingen uppgift hittats om vilken modell som är bäst. För grundkällorna hänvisas till arbetet av Babrauskas.

3.3.2.1 "Zinn och Mader-modellen"

Intuitivt kan man tänka sig att den tid det tar till antändning borde bero på hur pass kritiska förhållandena är. Det aktuella angreppssättet talar för att det stämmer. Modellen bygger på en dimensionslös tid till antändning, τ , som funktion av kvoten δ/δ_c . Antaganden för modellen är att $Bi \rightarrow \infty$ och att ytemperaturen är konstant. I en praktiskt användbar förenkling av grundmodellen beräknas först τ ur uttrycket

$$\tau = \frac{1}{\alpha + \beta(\delta/\delta_c) - \gamma(\delta/\delta_c)^{-1/2}}$$

Där α , β och γ är konstanter enligt tabellen nedan.

Tabell 2. Konstanter för beräkning av TTI enligt Zinn och Mader-modellen.

Geometri	α	β	γ
Platta	1,07	0,00380	0,941
Cylinder	2,30	0,0187	1,95
Sfär	3,90	0,0390	3,46

Slutligen beräknas tid till antändning t_{ig} , i sekunder, ur

$$t_{ig} = \tau \cdot \frac{\rho C r^2}{\lambda}$$

3.3.2.2 "Buddington-modellen"

För situationer som innebär att förhållandena är kritiska i låg omfattning, det vill säga att $\delta > \delta_c$ men inte $\delta \gg \delta_c$, kan följande modell användas. Den använder en adiabatisk tid till antändning, t_{ad} , det vill säga den tid det skulle ta till antändning förutsatt att inga värmeförluster fanns. Denna beräknas genom

$$t_{ad} = \frac{C}{AQ} \cdot \frac{RT_0^2}{E} \cdot e^{E/(RT_0)}$$

där C är specifik värmekapacitet ($J Kg^{-1} K^{-1}$).

Sedan beräknas TTI, det vill säga t_{ig} , ur

$$t_{ig} = \frac{t_{ad} M(Bi)}{(\delta/\delta_c - 1)^{1/2}}$$

Där $M(Bi)$ väljs ur tabellen nedan.

Tabell 3. Konstanten $M(Bi)$ för beräkning av TTI med Buddington-modellen.

Geometri	$M(Bi)$ då $Bi \rightarrow \infty$
Platta	1,5336
Cylinder	1,4288
Sfär	1,3160

För gränsfallet $Bi \rightarrow 0$ gäller $M(Bi) = 1,6344$. Framtagna värden för M som gäller för andra värden på Bi finns också men eftersom intervallet inom vilket $M(Bi)$ varierar är relativt snävt så kan det, enligt Babrauskas (2003), ofta anses tillräckligt att välja ett av de två extremvärdena. Om man vill få konservativa värden på TTI skall $M(\infty)$ användas.

Enligt Beever (1995) gäller att modellen ger bra värden för TTI när $\delta/\delta_c < 2$ och att avvikelsen då $\delta/\delta_c < 3$ som mest är 20 procent.

3.3.2.3 Diskussion om beräkning av tid till antändning

Förutom dessa två sätt att beräkna tid till antändning finns en rad andra, se arbetet av Babrauskas (2003), som alla har sina för och nackdelar. Både Gray (2002) och Babrauskas (2003) diskuterar osäkerheterna kring beräkningar av TTI och kommer fram till att dessa i allmänhet är stora. En av de starkast bidragande orsakerna till detta är enligt arbetet av Babrauskas (2003) att antagandet om att endast en exotermisk reaktion bidrar till värmeproduktionen ytterst sällan stämmer. Att dra någon slutsats om vilket sätt som ger bäst resultat är svårt och skulle kräva en större utredning än vad som får plats inom ramen för detta arbete.

Vad gäller antagandet att $Bi \rightarrow \infty$ för ”Zinn och Mader-modellen” kan man tänka sig att om en korrektion som tar hänsyn till annat värde på Bi används vid beräkning av δ_c så krävs inte längre antagandet. Detta har dock inte kunnat bekräftas.

3.3.3 Möjliga korrektioner till kritiska värden för Frank-Kamenetskii-parametern

Som nämnts tidigare finns ett antal korrektioner som kan appliceras i de fall aktuella förhållanden sträcker sig utanför de antaganden som teorin bygger på. Beever (1995) har gjort en tydlig sammanställning av olika korrektioner, nedan presenteras de viktigaste bland dessa. För ursprungskällorna till korrektionerna hänvisas till arbetet av Beever. Korrektionerna utgår från de värden för δ_c som ges i Tabell 1. I de fall flera korrektioner krävs byggs dessa succesivt på varandra.

3.3.3.1 Yttemperaturen \neq omgivningens temperatur

Ett av antagandena som Frank-Kamenetskii-teorin bygger på är att kroppens yta har samma temperatur som omgivningen, det vill säga att $Bi = \frac{hr}{\lambda} \rightarrow \infty$. Detta gäller sällan i verkligheten och därför behövs oftast en korrektion. När varken $Bi \rightarrow 0$ eller $Bi \rightarrow \infty$ gäller kan följande korrektion användas.

$$\delta_c(Bi) = \delta_c(Bi \rightarrow \infty) \cdot \frac{Bi}{2} \left(\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi \right) \cdot e^{\left(\frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi} \right)}$$

De värden på δ_c som ges i Tabell 1 är $\delta_c(Bi \rightarrow \infty)$.

3.3.3.2 Låg aktiveringsenergi

Normalt sett är värdet på E/R högt, typiska värden är i storleksordningen 10^4 . Därmed gäller i de flesta fall att aktiveringsenergin är så pass hög att $\varepsilon = \frac{RT_0}{E} \ll 1$ och ingen korrektion behövs. Skulle så inte vara fallet kan följande korrektion användas.

$$\delta_c(\varepsilon) = \delta_c(\varepsilon = 0) \cdot (1 + 1,07\varepsilon)$$

De värden på δ_c som ges i Tabell 1 är $\delta_c(\varepsilon = 0)$.

3.3.3.3 Reaktantkonsumtion

Innebörden av det första antagandet för teorin, vilket säger att hastigheten för värmeproduktionen antas följa Arrheniusekvationen, är bland annat att den tillgängliga mängden reaktanter förblir oförändrad. I verkligheten är det naturligtvis så att i och med att en kemisk reaktion fortgår så minskar reaktantkoncentrationen gradvis. En minskning av reaktantkoncentrationen medför en minskning av reaktionshastigheten. Antagandet är acceptabelt i de fall då reaktionen är så pass exotermisk att reaktantkonsumtionen som skett fram till dess att antändning sker är försumbar. Gäller inte detta kan korrektionen som beskrivs nedan användas.

Effekten av reaktantkonsumtion styrs av den dimensionslösa parametern B som ges av

$$B = \frac{E}{RT_0^2} \cdot \frac{Q}{C}$$

Som kan ses av uttrycket ger höga värden på reaktionsvärme, Q , vilket är fallet för starkt exotermiska reaktioner, höga värden på parametern B .

För att kunna använda korrektionen krävs att man har ett värde på reaktionsordningen, n , där reaktionshastigheten beror på reaktantkoncentrationen, c , på ett sådant sätt att

$$\text{hastigheten} \propto c^n$$

Förutsatt att man har värden på parametrarna B och n är det möjligt att genomföra en korrektion för reaktantkonsumtion. Ett antal olika korrektioner presenteras i arbetet av Beever (1995). Vilken av dessa som passar bäst beror på värdet på B .

3.3.3.4 Syrediffusion

För att en reaktion som kräver syre ska kunna fortgå ostört krävs att en tillräcklig mängd syre hela tiden finns tillgänglig. Sjunker syrekoncentrationen så kan reaktionshastigheten och därmed värmeproduktionen minska. Tillräckligt låg syrekoncentration medför att reaktionen stannar helt. När det gäller porösa fasta material, till exempel lager av träpellets, så tillförs syre genom diffusion genom materialet. Om ett lager som vid fri syretillgång är föremål för självuppvärmning stängs in i en lufttät behållare så tillförs inget nytt syre från omgivningen. För sådana förhållanden har det konstaterats att den befintliga syremängden endast räcker till en temperaturökning med några få grader på grund av syreberoende reaktioner (Babrauskas, 2003, s. 383). Vid en sådan lagring finns ingen risk för självantändning orsakad av reaktioner, exempelvis oxidation, som kräver syre.

Normalfallet för lagring av träpellets är att lagringen inte sker i en lufttät behållare. En starkt bidragande orsak till begränsad syretillgång är då begränsningar för diffusion av luft genom materialet. Det finns en analytisk metod framtagen av Takeno och Sato (1980) för att ta hänsyn till dessa begränsningar men hur den fungerar

är för avancerat för att redovisa här. Nämnvärt är att enligt deras modell så ökar δ_c , som förväntat, med minskad diffusivitet, syrekonzentration och reaktionsvärme.

4 Utveckling av beräkningsverktyg i Microsoft Excel

Som en del i projektet har ett användarvänligt beräkningsverktyg för beräkningar av självantändning med Frank-Kamenetskii-teori tagits fram. Verktöget består av en arbetsbok som skapats i Microsoft Excel 2010. Med detta kan beräkningar göras för att bestämma var gränsen går för att en viss lagringskonfiguration ska medföra risk för självantändning. Beräkningarnas riktighet bestäms naturligtvis av begränsningarna i den tillämpade teorin.

4.1 Om beräkningsverktyget

De problem som kan lösas är följande:

Problem a): Kritisk storlek för en lagringskonfiguration vid en viss omgivningstemperatur

Problem b): Kritisk temperatur för en viss lagringskonfiguration

Problem c): Tid till antändning (förutsatt att kritiska förhållanden föreligger)

För vissa avvikelser från grundantagandena för Frank-Kamenetskii's teori finns, som presenterats tidigare, korrekationer som kan användas. I beräkningsverktyget finns möjlighet att använda två av dessa, nämligen:

Korrektion 1: korrektion för yttemperaturen \neq omgivningens temperatur (avvikelse från antagande 4)

Korrektion 2: korrektion för låg aktiveringsenergi (avvikelse från antagande 2)

Indata som användaren måste ange för att lösa respektive problem presenteras i tabellen nedan. För att använda Korrektion 1 krävs dessutom ett värde på effektiva värmeövergångstalet h ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Genom att använda Korrektion 1 kan man även ta hänsyn till eventuell isolering som omsluter det självuppvärmade materialet. Detta görs genom att ta med isoleringen vid bestämning av det effektiva värmeövergångstalet. Om detta är ett korrekt sätt att ta hänsyn till isolering är inte säkert men i brist på andra sätt kan detta användas.

Tabell 4. Indata som krävs för att lösa respektive problem med beräkningsverktyget i Excel. X betyder att indata krävs.

Beteckning	Förklaring	Enhet	Problem a)	Problem b)	Problem c)
ρ	bulkdensitet	Kg m^3	X	X	X
Q^*	reaktionsvärme	J kg^{-1}	X	X	X
A^*	pre-exponentiella faktorn i Arrheniusuttrycket för värmeproduktion i en kropp	s^{-1}	X	X	X
λ	termisk konduktivitet (bulk)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	X	X	X
E	aktiveringsenergi	J mol^{-1}	X	X	X
R	universella gaskonstanten	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	X	X	X
T_0	omgivningens temperatur	K	X		X
r	karakteristisk längd, beror av geometri (se Tabell 1)	m		X	X
C	specifik värmekapacitet (bulk)	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$			X
l	längd hos en av sidorna i en rektangulär låda (se Tabell 1)	m	Indata krävs för lösning av samtliga problem dock endast om det handlar om en rektangulär låda		
m	längd hos en av sidorna i en rektangulär låda (se Tabell 1)	m	Indata krävs för lösning av samtliga problem dock endast om det handlar om en rektangulär låda		
L	halva höjden hos en kort cylinder (se Tabell 1)	m	Indata krävs för lösning av samtliga problem dock endast om det handlar om en kort cylinder		

*Ofta används produkten $Q \cdot A$ som indata

Vissa av beräkningarna görs iterativt. Detta görs automatiskt av Excel och antingen görs iterationerna 100 gånger eller tills förändringen blir maximalt 0,001 -det som inträffar först. Skulle man som användare vilja ändra gränserna för de iterativa beräkningarna är det möjligt att göra det i programmets inställningar.

4.2 Validering

Blomqvist o.a. (2007) skriver om experiment som har genomförts där en cylinderformad 1 m³ pelletbulk placerats i ett uppvärmt utrymme varvid tid till antändning observerats. För att få en uppfattning om hur verklighetstrogna resultat beräkningsverktyget i Excel ger för tid till antändning har två av dessa experiment simulerats. Skillnaden mellan experimenten var att i det ena var omgivningstemperaturen 80 °C och i det andra var den 105 °C. Det som i (Blomqvist, o.a., 2007, s. 9) kallas första experimentet respektive andra experimentet benämns här Experiment 1 respektive Experiment 2. Vilka indata som använts och antaganden som gjorts vid beräkningarna där hänsyn tagits till isolering presenteras i Bilaga 2.

Tabell 5. Tid till antändning. Experimentellt uppmätt respektive beräknat med beräkningsverktyget i Excel.

	Experiment 1	Experiment 2	
Experimentellt uppmätt tid till antändning (Blomqvist, o.a., 2007)	Experimentet avslutades efter 32 h utan att antändning skett (dock observerades en förhöjd temperatur i pelletbulken)	37 h	
Beräknad tid till antändning	med hänsyn till isolering*	Zinn och Mader-modellen: 386 h Buddington-modellen: 248 h	Zinn och Mader-modellen: 196 h Buddington-modellen: 17 h
	utan hänsyn till isolering**	Zinn och Mader-modellen: 572 h Buddington-modellen: 421h	Zinn och Mader-modellen: 217 h Buddington-modellen: 21 h
	helt utan korrekationer	Ej självantändning	Zinn och Mader-modellen: 264 h Buddington-modellen: 29 h

*Korrektion 1 används och ett resulterande värmeövergångstal, vilket bestäms av konvektion och isolering, används.

**Korrektion 1 används, värmeövergångstalet bestäms endast av konvektion.

Diskussionen nedan gäller beräknad tid till antändning där hänsyn tagits till isolering, det vill säga den mest verklighetstrogna beräkning som kan göras med beräkningsverktyget. Övriga beräkningar har tagits med för att läsaren ska få en uppfattning om hur stor skillnaden blir beroende på olika sätt att beräkna.

Beräkningarna gav att för båda experimenten var $\delta > \delta_c$ vilket innebär att självantändning kan ske. Jämförelsen i Tabell 5 visar på skillnader mellan uppmätt tid och beräknade tider för Experiment 2, vilket är det experiment som är mest intressant att studera. Buddington-modellen predikterar antändning efter ungefär hälften så lång tid jämfört med vad som uppmättes vid experimentet. Zinn och Mader-modellen ger antändning efter cirka fem gånger så lång tid jämfört med vad som uppmättes vid experimentet. Detta är stora skillnader men resultaten tolkas som att man genom att titta på resultaten från båda modellerna ändå ges en tillräckligt bra bild för att kunna göra en grov uppskattning av när antändning kan förväntas ske.

Anledningarna till skillnaderna kan vara många. Dels är den verkliga situationen långt från antagandet om att $Bi \rightarrow \infty$ vilket gäller för Zinn och Mader-modellen och dels beräknades δ/δ_c till ca 10 vilket troligen är ett för

høgt värde för att Buddington-modellen ska ge korrekta resultat. Förvisso har korrektion gjorts för avsteget från antagandet om att $Bi \rightarrow \infty$ vid beräkning av δ_c men huruvida detta kan anses gälla som en tillräcklig korrektion för att Zinn och Mader-modellen ska vara giltig är osäkert.

Dessa två förklaringar är troligen starkt bidragande till skillnaderna mellan resultaten från de båda modellerna och uppmätt tid. Den slutsats som dras utifrån denna jämförelse är att osäkerheten vid beräkning av tid till antändning med dessa två modeller är stor, vilket stämmer med vad både Gray (2002) och Babrauskas (2003) skriver generellt om osäkerheter vid beräkning av tid till antändning. Dock verkar en sammanvägning av de båda modellernas resultat kunna användas för att göra en grov uppskattning av tid till antändning. Viktigt att påpeka är att vid beräkningarna har ingen hänsyn till begränsad syrediffusion eller reaktantkonsumtion tagits. Om dessa effekter hade tagits med skulle resultatet blivit högre värden på tid till antändning.

4.3 Applikationsexempel

Här presenteras applikationsexempel för beräkningsverktyget i Excel. Lagren som beräkningar utförts för är representativa för lagringskonfigurationer som används i dagsläget alternativt kan bli aktuella i framtiden.

Tabell 6. Lager som simulerats.

	Lager 1: Tornsilo	Lager 2: Normal lagringssilo	Lager 3: Stor lagringssilo	Lager 4: Planlager
Form	Cylinder	Cylinder	Cylinder	Rektangulär låda
Dimensioner	Diameter: 8 m Höjd: 40 m	Diameter: 25 m Höjd: 25 m	Diameter: 60 m Höjd: 40 m	Längd: 50 m Bredd: 30 m Höjd: 10 m
Väggmaterial	Betong	Stålblåt	Betong	Antas sakna väggar
Vägg tjocklek	20 cm	5 mm	7 cm	-

Vad gäller pelletegenskaper har två olika uppsättningar simulerats, Pelletbulk 1 och Pelletbulk 2. Pelletbulk 2 är enligt Blomqvist och Persson (2008, s. 140) mer aktiv än Pelletbulk 1. Omgivningstemperaturen har satts till 25 °C.

Tabell 7. Pelletegenskaper som använts vid simuleringarna. Data från (Blanchard, 2007).

	Pelletbulk 1	Pelletbulk 2
λ	0,17 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,17 W m ⁻¹ K ⁻¹
$Q \cdot A$	5,7 · 10 ⁹ J kg ⁻¹ s ⁻¹	1,8 · 10 ¹¹ J kg ⁻¹ s ⁻¹
E	77 KJ mol ⁻¹	86 KJ mol ⁻¹
ρ	668 kg m ⁻³	640 kg m ⁻³

Simuleringar gjordes först där hänsyn till väggarnas isolerande effekt togs, genom korrektion av δ_c , det är resultaten från dessa simuleringar som redovisas i Tabell 8 nedan. Därefter gjordes samma simuleringar om utan att hänsyn till väggarna togs. Intressant är att det knappt gjorde någon skillnad för resultaten om väggarnas isolerande effekt togs med eller ej (skillnad för tid till antändning < 1%). Detta förklaras, åtminstone

till viss del, av kombinationen av att både betong och stålplåt har relativt hög termisk konduktivitet tillsammans med att väggarna är förhållandevis tunna.

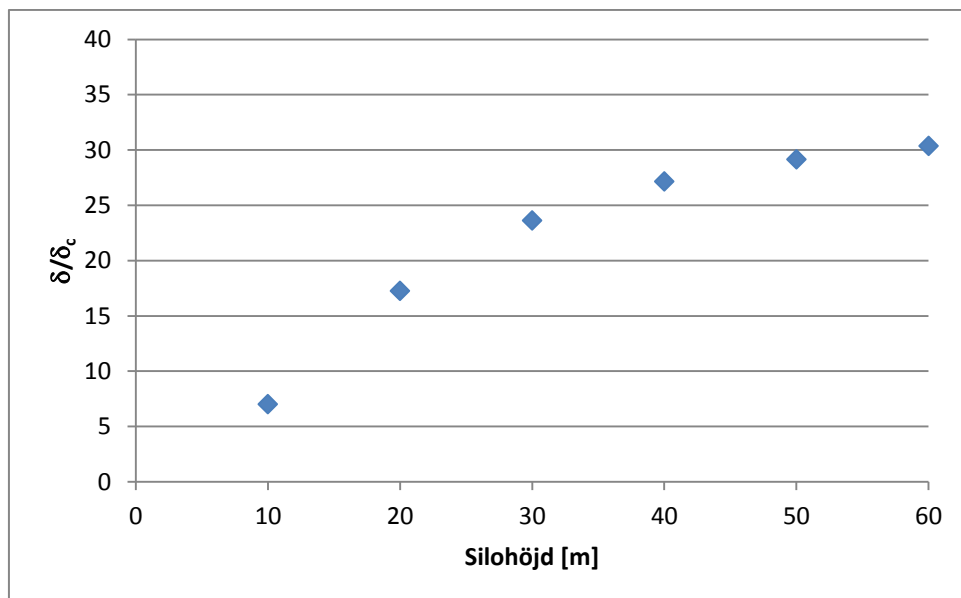
Tabell 8. Resultat för simuleringarna. Ja om självantändning kan ske, Nej om inte. t_z = tid till antändning enligt Zinn och Mader-modellen, t_b = tid till antändning enligt Buddington-modellen.

		Lager 1: Tornsilo	Lager 2: Normal lagringssilo	Lager 3: Stor lagringssilo	Lager 4: Planlager
Pelletbulk 1	Ja/Nej	Nej	Ja	Ja	Ja
	δ/δ_c	0,61	4,24	17,25	1,88
	t_z (dygn)	-	5460	20913	3199
	t_b (dygn)	-	535	239*	1100
Pelletbulk 2	Ja/Nej	Nej	Ja	Ja	Ja
	δ/δ_c	0,54	3,79	15,41	1,68
	t_z (dygn)	-	5472	20625	3419
	t_b (dygn)	-	618	272*	1342

*På grund av det höga värdet på δ/δ_c är det tveksamt om Buddington-modellen ger relevanta värden.

Simuleringarna gav att självantändning kan ske för alla lagerkonfigurationer utom Lager 1: Tornsilo. För Normal lagringssilo och Planlager uppnåddes en något längre tid till antändning för Pelletbulk 2 jämfört med Pelletbulk 1 vilket kan förklaras av att Pelletbulk 2 har högre aktiveringsenergi än Pelletbulk 1. Hur det kommer sig att det omvända gäller för tid till antändning för Stor lagringssilo är oklart. Siffrorna för tid till antändning ska tolkas med extra försiktighet då osäkerheten vid dessa beräkningar enligt Gray (2002) och Babrauskas (2003) i allmänhet är stor.

För att få en uppfattning om hur situationen förändras med varierande silohöjd genomfördes en undersökning för detta på ett av lagren. Lager 3: Stor lagringssilo och Pelletbulk 1 användes. Hänsyn togs till väggarnas isolerande effekt. För att göra beräkning av δ_c måste man välja vilken geometri, bland de som listas i Tabell 1, det handlar om. Undersökningen har gjorts för geometrin Kort cylinder. Resultaten är relevanta till och med den höjd där höjden är lika med diametern eftersom geometrin för högre höjder inte längre är Kort cylinder. Resultatet visas i Figur 2. Som diagrammet visar ökar graden av kritiskt förhållande, i form av värde på kvoten δ/δ_c , i lägre takt med ökande silohöjd. Resultatet är logiskt om man tänker sig att om silon blir tillräckligt hög så kommer i princip all värmeöverföring till omgivningen ske ut åt sidorna varpå en ytterligare ökning av silohöjden knappt spelar någon roll.



Figur 2. δ/δ_c som funktion av silohöjd för Lager 3: Stor lagringssilo.

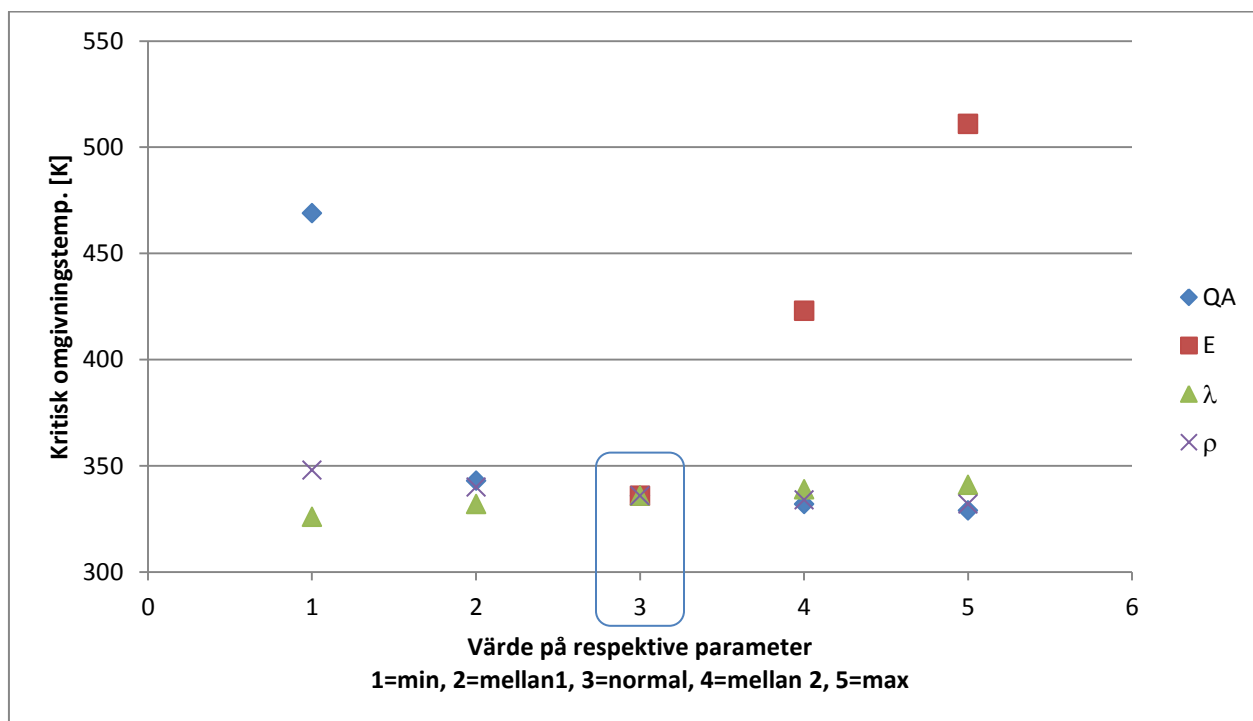
4.4 Parameterstudie

För att få en uppfattning om hur de olika parametrarna termisk konduktivitet (λ), reaktionsvärme multiplicerat med pre-exponentiella faktorn i Arrheniusuttrycket för värmeproduktion ($Q \cdot A$), aktiveringsenergi (E) respektive densitet (ρ) påverkar resultaten har en parameterstudie utförts. Att produkten $Q \cdot A$ används istället för de båda parametrarna var för sig beror på att man ofta har indata i form av värde på denna produkt. Först valdes ett normalvärde samt ett minimivärde och ett maximivärde för varje parameter, därefter simulerades läget med normalvärde för alla parametrar och slutligen varierades en parameter i taget medan de andra behöll sina normalvärden. Det lager som använts vid simuleringarna är Normal lagringssilo, se Tabell 6. Hänsyn tas till väggarnas isolerande effekt, nämnas bör att denna effekt är ytterst liten eftersom väggarna består av 5 mm stålplåt. Lagrets storlek är given och det resultat som studeras är kritisk omgivningstemperatur.

Tabell 9. Värden på parametrar som varierats i parameterstudien.

	Minimivärde	Mellanvärde 1	Normalvärde	Mellanvärde 2	Maximivärde
λ ($W m^{-1} K^{-1}$)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$Q \cdot A$ ($J kg^{-1} s^{-1}$)	$1 \cdot 10^7$	$6,251 \cdot 10^{10}$	$1,250 \cdot 10^{11}$	$1,875 \cdot 10^{11}$	$2,5 \cdot 10^{11}$
E ($KJ mol^{-1}$)	50	75	100	125	150
ρ ($kg m^{-3}$)	200	425	650	825	1000

I diagrammet nedan redovisas resultatet av parameterstudien.



Figur 3. Sammanfattande diagram för parameterstudien. Kritisk omgivningstemperatur som funktion av olika värden på de olika parametrarna enligt Tabell 1. Kritisk temperatur för de två lägsta värdena på E redovisas ej då dessa hamnade under 274 K, vilket är beräkningsverktygets undre begränsning.

Tydligt är att inom de studerade intervallen för de olika parametrarna är det variationer hos värdet på E som påverkar resultatet mest. Intressant är också att variationer hos värdet på Q·A inte påverkar resultatet speciellt mycket med undantag för minimivärdet som medför en kraftig höjning av kritisk omgivningstemperatur. Både λ och ρ påverkar resultatet i förhållandevis liten utsträckning.

Frank-Kamenetskii-teori har en rad begränsningar som minskar dess lämplighet för användning på lager av träpellets. I nästa kapitel tas detta upp.

5 Frank-Kamenetskii-teorins begränsningar vid användning för träpellets

När det gäller lager av träpellets finns ett antal faktorer som begränsar Frank-Kamenetskii-teorins lämplighet. Först och främst skall grundantagandena för teorin beaktas. För avvikelser från vissa av dessa finns som tidigare nämnts korrekationer att använda. Här tas några för träpelletlager specifika faktorer upp.

Fukt är en av dessa. Ingen hänsyn tas till fuktens inverkan vilken, beroende på aktuella betingelser, både kan inverka på ett sätt som minskar risken för självantändning och på ett sätt som ökar den. Är utgångsläget att pelletbulken har en högre fukthalt än den skulle ha vid jämvikt med omgivningen kommer vatten förångas vilket är en endotermisk reaktion. Alltså förlängs tiden till antändning. Är det istället så att pelletbulken är torrare än omgivande luft kommer den ta upp fukt tills jämvikt uppstår. Detta sker genom kondensation och sorption vilket är exotermiska reaktioner som alltså bidrar till en temperaturhöjning och därmed ett snabbare självuppvärmningsförlopp (Babrauskas, 2003, s. 399). Om självuppvärmning väl satt fart kan temperaturen inte stiga till mer än 100 °C innan all eventuell fukt transporterats bort. Denna fukttransport kräver energi och tar tid vilket innebär att tiden till antändning förlängs. En ytterligare effekt som fukt har är att ökad fukthalt medför en förhöjd termisk konduktivitet λ vilket gör att Frank-Kamenetskii-parametern får ett lägre värde och benägenheten till självantändning minskar.

Eftersom träpellets består av biologiskt material kan man tänka sig att biologisk aktivitet, liknande den som sker i komposthögar, i någon omfattning bidrar till värmeproduktionen. Skulle så vara fallet skulle det medföra avsteg från antagandena för Frank-Kamenetskii-teorin. Dels eftersom det skulle innebära att mer än en värmegenererande reaktion bidrar till uppvärmningen och dels är det oklart huruvida sådana reaktioner följer Arrheniusekvationen för värmeproduktion. Det finns dock två huvudsakliga faktorer som talar för att inverkan från biologisk aktivitet i lager av träpellets är försumbar. För det första värms materialet upp till över 100 °C i samband med tillverkningsprocessen (Nielsen, 2004) vilket innebär sterilisering. För det andra krävs ett fuktinnehåll över 20 % för att biologisk nedbrytning ska kunna ske (Hogland & Marques, 2003, s. 65). Förutsatt att träpelletsen hanteras och lagras på ett riktigt sätt bör aldrig denna nivå nås. Som exempel kan nämnas att träpellets normalt har ett fuktinnehåll på 5-15% (Zakrisson, 2002, s. 4).

Även om ingen uppvärmning på grund av biologisk aktivitet sker kan man ändå tänka sig att fler än en reaktion bidrar till värmeproduktionen. Detta på grund av att det är möjligt att flera av de ämnen som trä består av oxideras parallellt, eventuellt med olika dominerande reaktioner beroende på temperatur.

Ett pelletlager är uppbyggt av en mängd enskilda pellets mellan vilka små ihåligheter bildas. Dessutom bildas ofta zoner med finfraktion i samband med fyllning av ett lager. Alltså utgör det inte ett homogent material vilket innebär en avvikelse från ett av grundantagandena. I vilken omfattning detta gör att beräkningarna avviker från verkligheten är osäkert. Det kan också vara så att ett lager fylls i flera olika omgångar vilket medför att det kan bildas lager av pellets vilka är olika vad gäller både fuktinnehåll och andra materialegenskaper. I ett sådant fall blir beräkningarna än mer osäkra.

I nästa kapitel beskrivs mer avancerade modeller som har färre begränsningar.



Foto: Martin Jonsson

6 Alternativa modeller för beräkning av självuppvärmning i lager av träpellets

Här presenteras alternativa modeller för beräkning av självuppvärmning. Syftet är att ge en överblick över mer avancerade sätt att beskriva självuppvärmning och självantändning hos fuktiga reaktiva biologiska material. Alla modeller som presenteras är av intresse för modellering av självuppvärmning i lager av träpellets.

Krause, Schmidt och Lohler (2006) presenterar en numerisk modell för att beskriva självantändning och fortplantning av glödbränder i lager av bulkmaterial och damm. Modellen består av en uppsättning partial-differential-ekvationer för transport av värme och massfraktioner av åtta olika kemiska ämnen. Några av de generella fördelarna med numerisk lösning av kopplade värme- och masstransportproblem är enligt författarna

- Att det inte finns några begränsningar i geometri
- Att tidsberoende temperaturutveckling kan följas fortlöpande från uppvärmning till utbrunnet material
- Att man kan ta hänsyn till valfria randvillkor
- Att man kan ta hänsyn till kinetik och diffusionskontrollerade reaktionsordningar

Bland nackdelarna med den aktuella modellen vid användning för träpellets kan nämnas att det kan vara komplicerat att ta fram stökiometriska data inkluderande den elementära sammansättningen hos bränslet samt hos de fasta respektive gasformiga förbränningsprodukterna, vilka alla krävs som indata till modellen. Bland antagandena som angreppssättet bygger på finns att lagret antas vara en homogen och isotrop kropp samt att varken partikelstorleksfördelning eller fukt beaktas. Modellen har validerats mot experimentella data för självantändning av damm av brunskol vid sänkt syrekonzentration. Resultatet blev att beräknade värden av temperatur som medför självantändning överensstämde väl med experimentellt uppmätta värden, dock ej för syrekonzentrationer lägre än 5 %.

I rapporten *A numerical model to simulate smouldering fires in bulk materials and dust deposits* (Krause, Schmidt, & Lohler, 2006) dras slutsatsen att precisionen för indata är avgörande för beräkningsresultaten och att pålitligheten hos experimentella metoder för framtagande av dessa är av mycket stor vikt.

I en annan modell som bygger på exakt samma grundkoncept har man inkluderat fukt i beräkningarna (Krause, Schmidt, & Lohler, 2005b). Källtermer för kondensation respektive förångning som används kommer från ett annat arbete av samma författare (Krause, Schmidt, & Lohler, 2005a). För att lösa ekvationssystemet, bestående av 11 partial-differential-ekvationer, numeriskt har författarna använt den kommersiella finita-element-koden FEMLAB. Modellen i sig är inte kommersiellt tillgänglig men den som är intresserad av att få beräkningar gjorda kan kontakta Ulrich Krause (ulrich.krause@bam.de).

Yan, Blomqvist, Göransson, Holmstedt, Wadsö, & Van Hees (2005) beskriver en validering av en tredimensionell CFD-modell framtagen av den först nämnda författaren. Numeriska resultat från simuleringar jämfördes med testdata för småskaliga självuppvärmningsförsök med sågspån och träpellets. Det visade sig att simuleringarna gav resultat som stämde mycket bra med de experimentellt uppmätta värdena för temperatur. Denna modell är framtagen för simulering av självantändning i bränslen av biomassa och tar hänsyn till alla de viktigaste fysikaliska och kemiska aspekterna som påverkar förloppet. Bland de processer som modellen tar hänsyn till kan nämnas konvektion och diffusion i poröst material, förångning och kondensation och

värmeproduktion. Indata som krävs är permeabilitet, porositet, fukttinnehåll, kompaktdensitet, reaktionshastighet samt termiska egenskaper som specifik värmekapacitet och termisk konduktivitet.

Det kan slutligen konstateras att den genomförda litteratursökningen resulterade i ganska få modeller som anses riktigt intressanta för modellering av självantändning i lager av träpellets. Den av de ovan nämnda modellerna som bör vara mest intressant är CFD-modellen framtagen av Zhenghua Yan. Detta motiveras med att den tar hänsyn till flest faktorer och att den använts med god överensstämmelse mot experimentella data för just träpellets. Det vore dock intressant att se resultat från en motsvarande validering mot storskaliga experiment.

Det är viktigt att påpeka att de mer avancerade modellerna, i jämförelse med beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori, i allmänhet kräver både större arbetsinsats och indata som är mindre lättillgänglig. De ställer också större krav på den som ska genomföra beräkningarna eftersom denne måste vara insatt i de program och den programmering som krävs.

Nästa kapitel behandlar mätning av vissa av de termiska egenskaper vilka kan behövas som indata vid modellering av självantändning.

7 Bestämning av termiska egenskaper med Transient Plane Source-metoden

Oavsett vilken metod som används för att göra beräkningar om självantändning är det av stor vikt att de indata som används har hög kvalitet. Ett sätt att bestämma termiska egenskaper är genom att använda Transient Plane Source-metoden (TPS). Här beskrivs experiment som genomförts med denna metodik för att bestämma termiska egenskaper för träpellets. Huvudsyftet med denna del av arbetet är att bidra till att utveckla en metod för bestämning av termisk konduktivitet, diffusivitet och specifik värmekapacitet med TPS för enskilda pellets.

7.1 Teori om Transient Plane Source

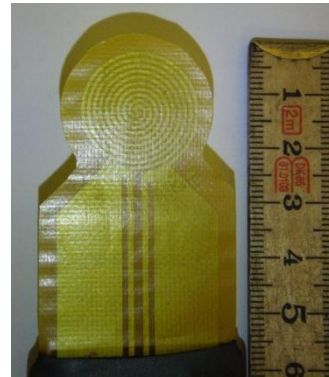
Det använda systemet är tillverkat av företaget Hot Disk. Hur tekniken fungerar och används beskrivs detaljerat i manualen Instruction Manual Hot Disk Thermal Constants Analyser Software (Hot Disk AB, 2007). Här ges en kort introduktion om systemet.

Metoden baseras på användningen av en sensor bestående av en elektriskt ledande dubbelspiral av nickel. Spiralen är på båda sidor täckt av ett tunt lager av ett isolerande material. Total tjocklek för en sensor varierar från 60 μm till cirka 0,25 mm. Sensorn placeras mellan två provkroppar av det material som ska undersökas. Mätningarna går till så att en variabel ström som styrs för att uppnå en konstant effekt skickas genom sensorn under en begränsad tid. Sensorn fungerar, förutom som värmekälla, också som en resistanstermometer vilken mäter temperaturen som funktion av tid. Dessa mätningar analyseras av systemet genom en iterationsprocess mellan olika lösningar på värmeflödesekvationen och resulterar i värden för termisk konduktivitet ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) och diffusivitet ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$) samt specifik värmekapacitet per volymenhet ($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$) för det undersökta materialet. Den volymetriska specifika värmekapaciteten ingår inte i iterationen utan beräknas ur

$$\text{Specifik värmekapacitet} = \frac{\text{termisk konduktivitet}}{\text{termisk diffusivitet}}. \text{ (Hot Disk AB, 2007)}$$

Mätningarna ger värden på de termiska egenskaperna för den temperatur vid vilken mätningen görs. Vill man ha värden för olika temperaturer måste alltså mätningar vid dessa temperaturer göras.

Metoden baseras på ett antagande om att sensorn reagerar som om den befinner sig i ett oändligt medium vilket ställer krav på förhållandet mellan provkroppens och sensorns storlek samt mättiden. För att ta hänsyn till antagandet är det då viktigt att mättiden inte är längre än att inverkan från provkroppens yttre gränser undviks, man vill alltså inte att värmevågen ska gå ända ut till randen av provkroppen. För att få korrekta resultat är det också viktigt att provkropparna är i termisk jämvikt med omgivningen när mätningarna görs. Som mått på metodens precision anges att reproducerbarhet för respektive parameter är enligt följande: +/- 2 % för termisk konduktivitet, +/- 5 % termisk diffusivitet och +/- 7 % för specifik värmekapacitet (per volymenhet). (Hot Disk AB, 2007)



Figur 4. Exempel på TPS-sensor.

7.2 Försökuppställning

En sensor med radien 2,001 mm (sensor: kapton 7577) placeras mellan två provkroppar vilka placeras i en, till systemet hörande, provhållare. För att minimera risken för inverkan från konvektion och för att maximera kontakten mellan provkropp och sensor dras en skruv åt vilken pressar provkropparna mot varandra. En skyddshuv placeras över provhållaren för att minimera temperaturförändringar i provkropparnas närmaste omgivning. Det rum i vilket försöken genomförs är klimatkontrollerat till



Figur 5. Försökuppställning. Från vänster: PC, TPS-enhet, provhållare med skyddshuv.

ca 22°C och 65 % relativ fuktighet. Sensorns kabel kopplas till TPS-enheten vilken i sin tur är kopplad till en PC. För samtliga mätningar gäller att en och samma sorts pellets använts, nämligen pellets med diametern 8 mm från en fabrik i Ulricehamn. Alla pellets som användes hade hämtats från fabriken vid ett och samma tillfälle.

7.3 Genomförande

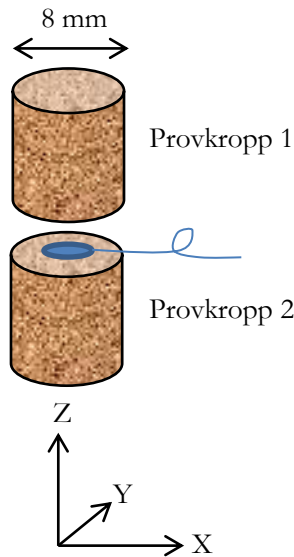
För att kunna göra mätningar med den aktuella utrustningen krävs att ytorna på provkropparna, mellan vilka sensorn ska placeras, är plana. För att uppnå detta slipades pelletsen på sandpapper. På grund av träpelletsens struktur krävdes speciell teknik vid slipningen för att undvika att bitar ramlade bort från ytan eller kanterna. Vid slipning i pelletsens längdriktning gjordes slipningen för hand på sandpapper fastlimmat på en glasskiva. För slipning av pelletsens ändrar däremot krävdes att ett varv med tejp drogs runt pelletsen och att slipningen därefter gjordes på bandslipmaskin. Samtliga mätningar gjordes i serier om 5 stycken mätningar där inga förutsättningar förändrades mellan varje mätning. För att undvika att en temperaturgradient kvarstod, i provkropparna, på grund av föregående mätning sattes det tidsmässiga mellanrummet mellan varje mätning till 30 min. Vid uppställning av ett försök överförs värme från fingrarna till provkropparna. För att låta dessa återta jämvikt med omgivningens temperatur fick uppställningen stå orörd minst två timmar innan mätningar påbörjades.



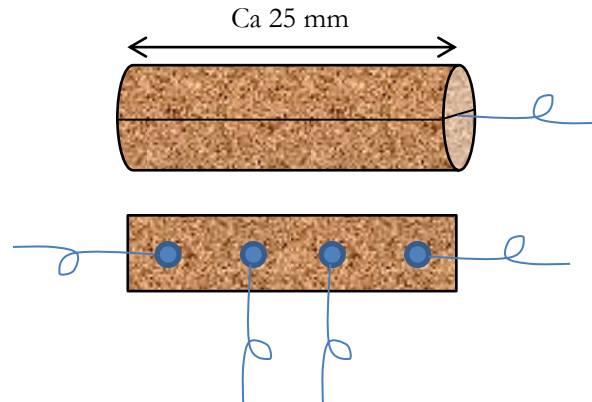
Figur 6. Provberedning. Slipning av pellet i dess längdriktning.

Vid uppstart av en mätning krävs att man talar om för programmet vilken effekt som ska användas och över hur lång tid mätningen ska göras. Den effekt och tid som använts är 0,02 W respektive 10 sekunder. Att just denna effekt och tid använts bygger dels på instruktioner i manualen och dels på erfarenhet från tidigare mätningar som gjorts på SP i Borås.

7.3.1 Grundexperiment



Figur 7. Princip för mätningar i X-Y-planet. TPS-sensor placerad mellan två pellets. Denna uppställning benämns Stående.



Figur 8. Princip för mätningar i Z-Y-planet. TPS-sensorns position mellan de båda halvorna varieras mellan de fyra placeringarna enligt figuren. Denna uppställning benämns Liggande. De fyra positionerna benämns Position 1-4.

Målsättningen med grundexperimenten var att ge svar på följande frågor:

- Varierar de mätta egenskaperna i Z-led?
- Ger mätningar i X-Y-planet samma värden som mätningar i Z-Y-planet?
- Hur påverkas resultaten av en torkning av provkropparna?

För att svara på dessa frågor gjordes mätningar enligt Figur 7 på fyra olika sätt:

1. Underdel Provkropp 1 mot underdel Provkropp 2
2. Underdel Provkropp 1 mot överdel Provkropp 2
3. Överdel Provkropp 1 mot underdel Provkropp 2
4. Överdel Provkropp 1 mot överdel Provkropp 2

Samt mätningar enligt Figur 8 på fyra olika positioner. För att göra det enklare rent praktiskt delades dessa mätningar upp på två provkroppspär och alltså användes två positioner per par istället för fyra positioner på ett par som Figur 8 visar.

Mätningar gjordes också på provkroppar som torkats. Torkningen gjordes i en ugn med temperaturen 55 °C i ca 60 h. Anledningen till att temperaturen sattes så pass låg var för att undvika att förändra pelletsens kemiska sammansättning. Först gjordes mätning på ej torkade provkroppar varefter mätning gjordes på samma provkroppar men nu torkade.

7.3.2 Ytterligare experiment för hantering av felkällor

Under arbetets gång uppkom ett antal frågor kring eventuella felkällor:

- Påverkas resultaten av hur hårt skruven, som pressar provkropparna mot varandra, dras åt?
- Går det bra att använda en mindre sensor eller skulle detta innebära att mätningarna sker på enskilda korn istället för på pelleten i stort?
- Påverkas resultaten av vilken ytråhet ytorna, mot vilka sensorn ligger, har?
- Påverkas resultaten av värmepåverkan som kan uppstå på pelletsens ytor i samband med slipning på bandslipmaskin?
- Påverkas resultaten av vilka datapunkter som operatören väljer att analysera? *För att förstå denna fråga krävs att läsaren antingen själv jobbat med den aktuella TPS-metoden eller sätter sig in i den genom att läsa manualen (Hot Disk AB , 2007)*
- Varierar de mätta termiska egenskaperna mellan olika pellets av samma sort?
- Har fuktkvoten hos pelleten ändrats under den tidsperiod som mätningarna genomförts och därmed påverkat mätresultaten?
- Uppnås samma resultat om provkroppsparen monteras isär mellan mätningar? Med andra ord: är repeterbarheten god?

För att ge svara på åtminstone vissa av dessa frågor genomfördes ett antal experiment: ett där skruven, som pressar provkropparna mot varandra, drogs åt väldigt löst, ett där den minsta sensorn (sensor: 7531 som har radien 0,526 mm) användes, ett på provkroppar där värmepåverkan vid slipning på bandslipmaskin provocerats fram, ett test där valet av datapunkter att analysera varierades inom vad som kan anses vara en rimlig operatörsberoende variation förutsatt att operatören följer de anvisningar och råd som finns i manualen (Hot Disk AB , 2007) samt ett där fem mätningar gjordes på ett och samma provkroppspår med ommontering mellan varje mätning. Resultaten från de ovan nämnda mätningarna finns i kapitel 7.4.3.

7.3.3 Bestämning av fuktkvot

Tillvägagångssätt:

1. Vägde skål
2. Vägde skål + ca 300 gram pellets
3. Torkning ca 2 dygn i ugn med temp. 105 °C
4. Vägde skål + pellets
5. Beräknade fuktkvoten ur $Fuktkvot = \frac{\text{vikt pellets före torkning} - \text{vikt pellets efter torkning}}{\text{vikt pellets efter torkning}}$

Den våg som användes ger värden, i gram, med två decimaler.

7.3.4 Bestämning av densitet

Tillvägagångssätt:

1. En pellet slipades plan på ändarna
2. Längd och diameter mättes med skjutmått. Fem mätningar i vardera riktningen gjordes.
3. Medelvärde för längd och diameter beräknades
4. Volymen beräknades
5. Pelleten vägdes
6. Densiteten beräknades ur $Densitet = \text{vikt/volym}$
7. Steg 1-6 utfördes på tre pellets varefter ett medelvärde beräknades

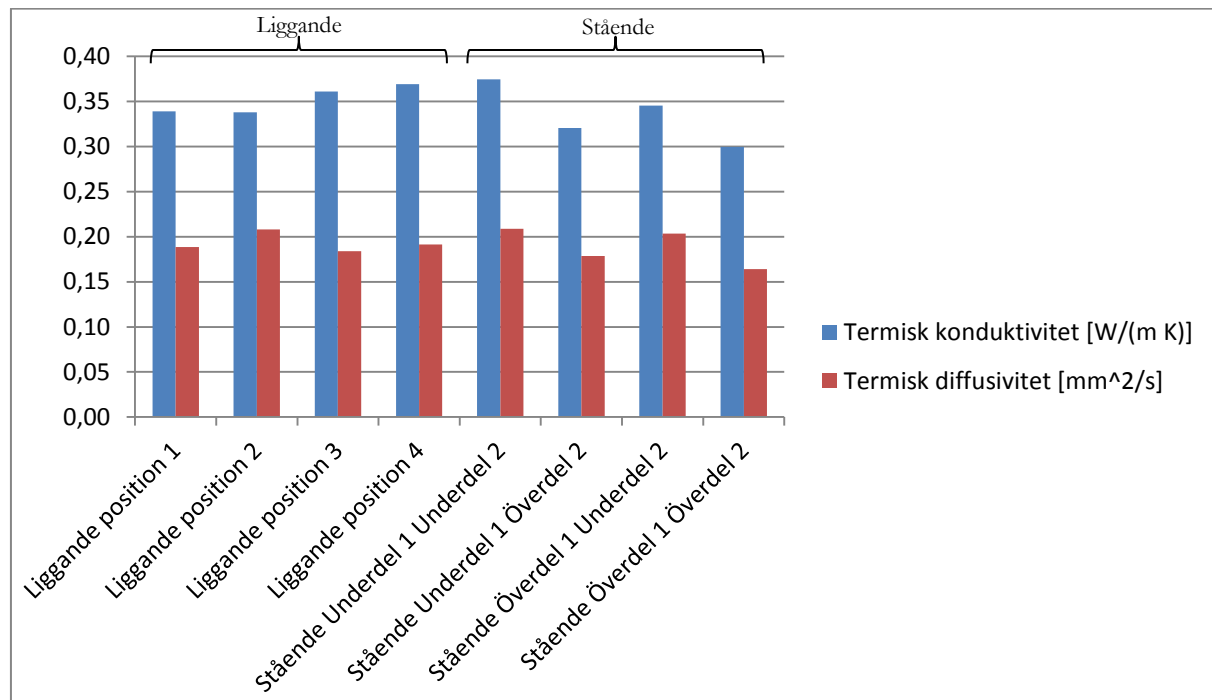
Det skjutmått som användes är digitalt och ger värden, i mm, med två decimaler. Den våg som användes ger värden, i gram, med två decimaler.

7.4 Resultat och diskussion

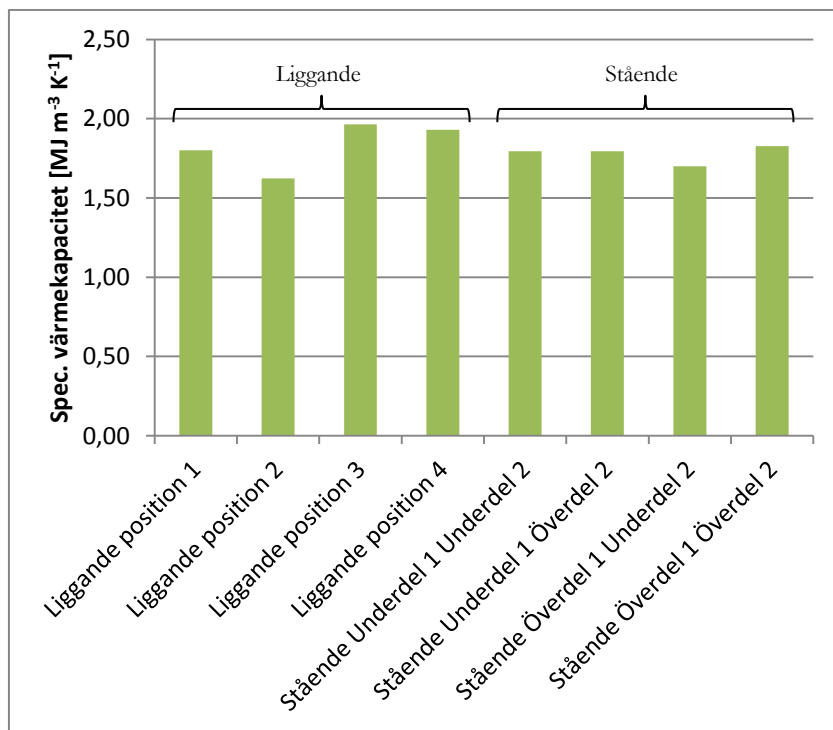
Nedan presenteras resultaten för genomförda experiment. Observera att specifik värmekapacitet inte mäts utan beräknas ur *Specifik värmekapacitet* = $\frac{\text{termisk konduktivitet}}{\text{termisk diffusivitet}}$. Med anledning av detta och för att göra diagrammen tydligare utelämnas specifik värmekapacitet i vissa av diagrammen. Resultaten diskuteras löpande i anslutning till de figurer och tabeller i vilka de presenteras.

7.4.1 Resultat för grundexperimenten

Nedan presenteras resultaten för grundexperimenten samt diskussion kring dessa.



Figur 9. Termisk konduktivitet och diffusivitet. Resultat för mätningar på Liggande respektive Stående.



Figur 10. Specifik värmekapacitet. Resultat för mätningar på Liggande respektive Stående.

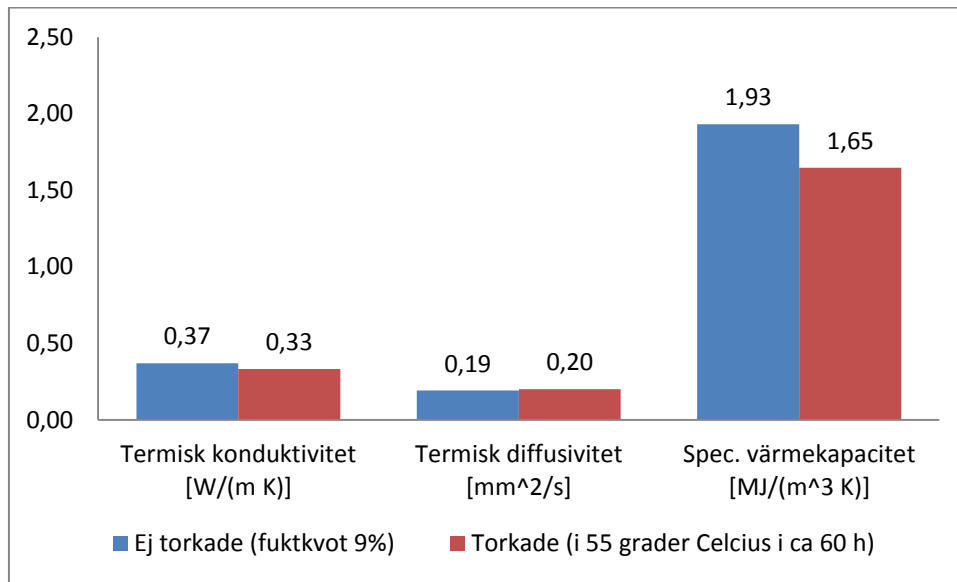
Tabell 10. Statistik för mätningar på Liggande. Inkluderar position 1-4.

	Termisk konduktivitet	Termisk diffusivitet	Spec. värmekapacitet
Medel	0,35 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,19 mm ² s ⁻¹	1,83 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv.	0,02 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,01 mm ² s ⁻¹	0,15 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv. i procent av medel	4,5 %	5,5 %	8,5 %

Tabell 11. Statistik för mätningar på Stående. Inkluderar de fyra olika kombinationerna av vändning av Provkropp 1 och Provkropp 2.

	Termisk konduktivitet	Termisk diffusivitet	Spec. värmekapacitet
Medel	0,34 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,19 mm ² s ⁻¹	1,78 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv.	0,03 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,02 mm ² s ⁻¹	0,06 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv. i procent av medel	9,6 %	11,1 %	3,1 %

Med hjälp av resultaten som presenteras i Figur 9 och Figur 10 samt Tabell 10 och Tabell 11 konstateras att de uppmätta egenskaperna varierar något i pelletsens längdriktning (Z-led i Figur 7) men att ingen signifikant skillnad mellan mätningar i X-Y-planet jämfört med mätningar i Z-Y-planet kunnat observeras. Det pekar alltså mot att materialet är isotropt men det kan inte uteslutas att mätningar på en pellet som kapas i en annan vinkel, exempelvis 45 graders vinkel mot symmetriaxeln, kan ge andra resultat.



Figur 11. Resultat för mätning innan respektive efter torkning. Mätning gjord på Liggande position 4.

Precis som väntat påverkas resultaten av materialets fukttinnehåll, se Figur 11. Högre fukttinnehåll gav högre värde på termisk konduktivitet vilket är rimligt då vatten har högre konduktivitet än luft. Termisk diffusivitet däremot visade omvänt förhållande, det vill säga högre fuktkvot resulterade i lägre diffusivitet. I siffror kan konstateras att torkningen, från fuktkvoten 9 %, medförde en minskning av termisk konduktivitet med ca 11 % och en höjning av termisk diffusivitet med ca 5 %.

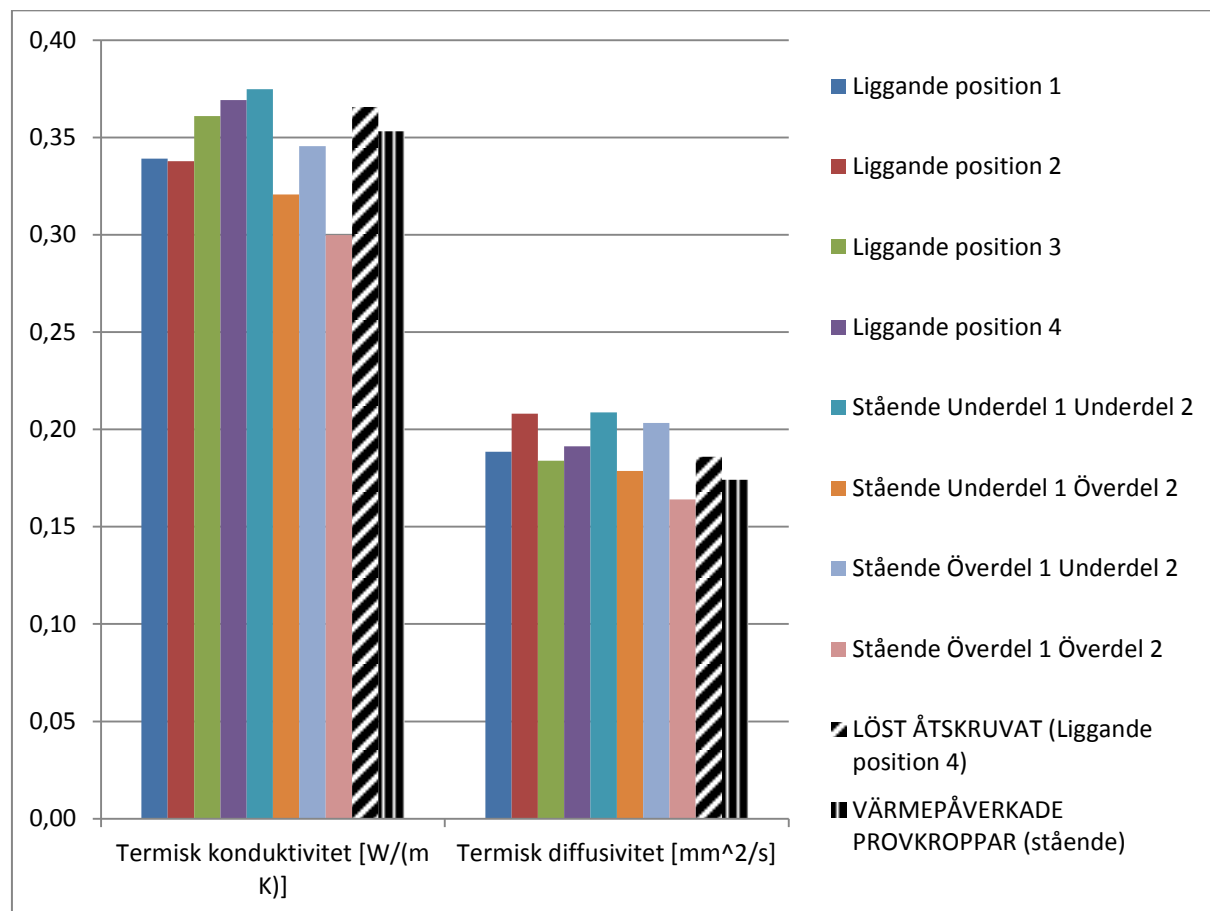
Något som funderades på i samband med försöken var om fuktkvoten hos provkropparna förändrades under den tidsperiod som mätningarna genomfördes och därmed påverkade mätresultaten. De mätningar av fuktkvot som gjordes visade på en viss förändring av denna under den aktuella tidsperioden. Kombinationen av att förändringen var liten (0,1 procentenheter) och att ingen tidsberoende trend kunnat observeras hos mätresultaten från TPS-mätningarna talar för att denna felkälla inte spelat en betydande roll. För att få så bra mätningar som möjligt bör provkropparna först slipas och därefter konditioneras så att de kommer i fuktmässig balans med den omgivning i vilken TPS-mätningarna därefter ska göras.

7.4.2 Variationer inom mätserier

En analys av mätdata inom de olika mätserierna, bestående av 5 mätningar per serie, för grundexperimenten visar att standardavvikelse i procent av medelvärde varierar i intervallen 0,1-0,3 % för termisk konduktivitet, 0,5-3,6 % för termisk diffusivitet och 0,3-3,8 % för specifik värmekapacitet.

7.4.3 Resultat för ytterligare experiment

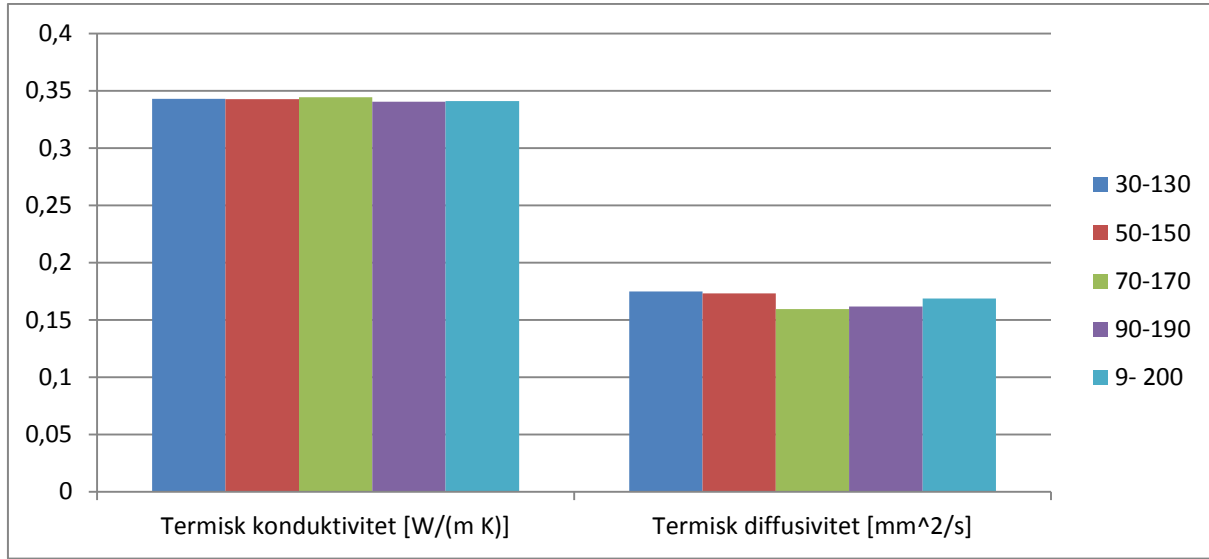
Här presenteras resultaten för de ytterligare experiment som utförts samt diskussion kring dessa.



Figur 12. Jämförelse som visar inverkan av att den skruv som pressar provkropparna mot varandra är löst åtskruvad samt, på grund av slipning, värmepåverkade ytor hos provkropparna.

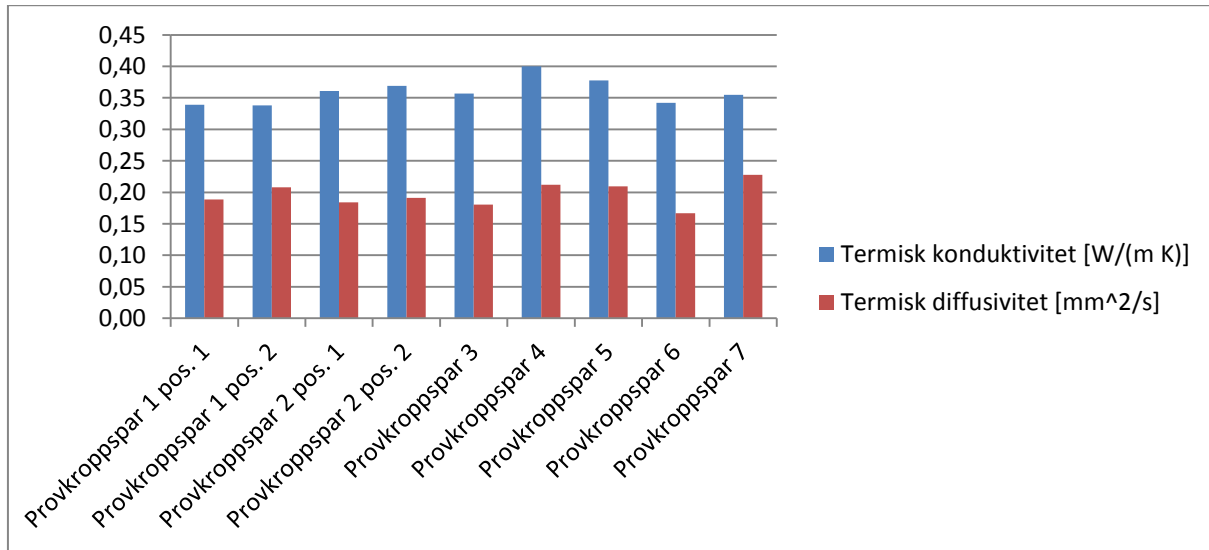
Angående felkällor har konstaterats att det inte gör någon skillnad om skruven som pressar provkropparna mot varandra, dras åt relativt hårt med handkraft eller om den dras åt väldigt löst, se Figur 12. Detta är bra då det annars hade krävts en vidare utredning för att bestämma hur hårt skruven ska dras åt för att mätningarna ska ge korrekta värden.

Det experiment som gjordes på ytor som utsatts för värmepåverkan i samband med slipning på bandslipmaskin resulterade inte i andra mätresultat än ej värmepåverkade ytor, se Figur 12. Detta är positivt eftersom metoden alltså verkar okänslig för denna påverkan vilken kan uppstå vid oförsiktig slipning. Konstaterar samtidigt att vid provberedning bör det undvikas att ytorna blir brända eftersom det eventuellt kan uppstå fall där ytorna blir mer brända än de blev i det genomförda experimentet. I ett sådant fall kan eventuellt mätresultaten påverkas.



Figur 13. Inverkan av val av datapunkter att analysera. Varje serie representerar ett intervall med datapunkter som tagits med i analysen.

Den undersökning som gjorts för att kontrollera om det spelar roll vilka datapunkter operatören väljer att ta med i analysen visar, som kan ses i Figur 13, att metoden är okänslig för dessa variationer. Det ska dock påpekas att denna undersökning endast gjorts för ett försök och att det därmed inte kan uteslutas helt att denna operatörsberoende bedömning kan påverka resultaten. För att eliminera denna risk vore det önskvärt att leverantören, Hot Disk AB, preciserade tydligare hur detta val ska göras.

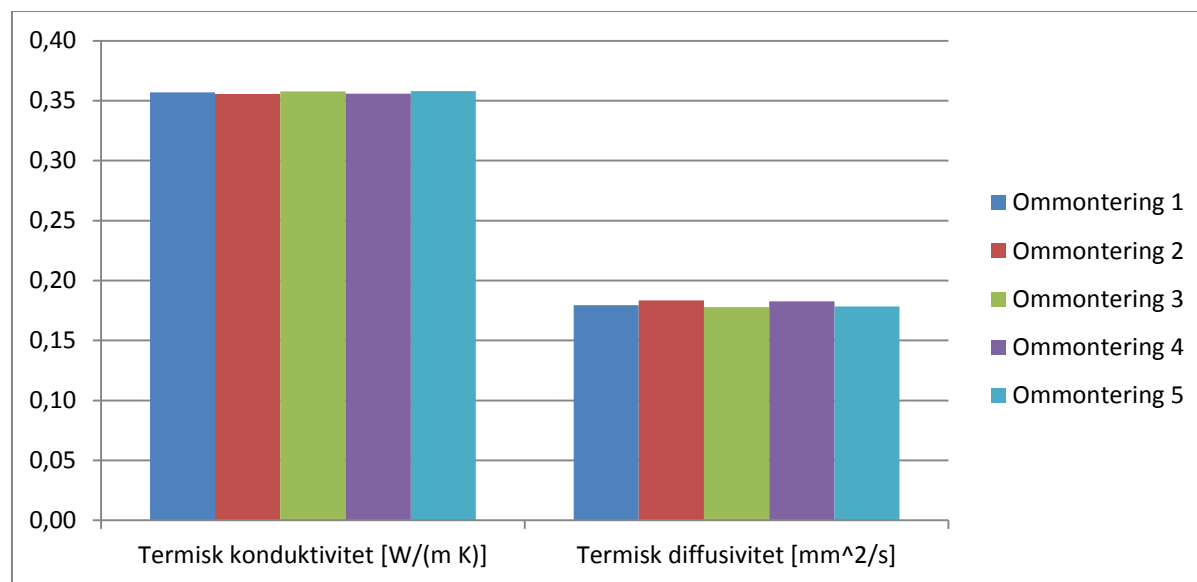


Figur 14. Variation mellan olika provkroppspar. Mätningar gjorda på liggande uppställning.

Tabell 12. Statistik för variation mellan olika provkroppspär. Statistiken gäller samma mätningar som presenteras i Figur 14.

	Termisk konduktivitet	Termisk diffusivitet	Spec. värmekapacitet
Medel	0,36 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,20 mm ² s ⁻¹	1,84 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv.	0,02 W m ⁻¹ K ⁻¹	0,02 mm ² s ⁻¹	0,16 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Standardavv. i procent av medel	5,6 %	9,7 %	9,0 %

De variationer mellan olika pellets av samma sort som Figur 14 och Tabell 12 visar på talar för att det kan vara lämpligt att göra mätningarna på fler än ett provkroppspär för att sedan beräkna medelvärden för framtagna parametrar.



Figur 15. Variation mellan mätningar där provkroppspären monterats om mellan varje mätning, i övrigt är inga förutsättningar förändrade mellan mätningarna.

Som tydligt visas i Figur 15 är variationen mellan resultaten från mätningarna där provkroppspären monterats om mellan mätningarna nära obefintlig. Reproducerbarheten för mätningarna är alltså i detta avseende mycket god.

Ett försök gjordes där den minsta sensorn (sensor: 7531 som har radien 0,526 mm) användes. Vid utvärderingen av mätresultaten konstaterades att mätningarna inte kan anses pålitliga. Detta på grund av att den graf som visar temperaturökning som funktion av tid hade ett hackigt utseende vilket enligt manualen (Hot Disk AB, 2007, s. 26) medför att man bör avstå från vidare analys av data från experimentet. Utifrån detta kan slutsatsen dras att det för aktuell pelletsort är olämpligt att använda denna sensor. Orsaken till att mätningarna med denna storlek på sensor inte kan anses pålitliga kan vara att sensorn är för liten i förhållande till kornstorleken i pelleten. Detta skulle kunna medföra att mätningarna görs på enskilda korn istället för på pelleten i stort. Anledningen till att det är intressant att veta om den minsta sensorn går att använda är att vissa pelletsorter har en mindre diameter än de som experimenten utförts på och att det för mätningar med TPS-systemet på dessa kan krävas att den minsta sensorn används. Förutsatt att resonemanget ovan om

kornstorlek stämmer kan det vara möjligt att använda den minsta sensorn på pellets som är sammansatt av tillräckligt små korn.

Huruvida resultaten påverkas av vilken ytråhet provkropparna får vid provberedning genom slipning har inte undersökts experimentellt. Enligt manualen (Hot Disk AB, 2007, s. 16) ska ytans ojämnhet vara minst cirka en storleksordning mindre än diametern hos sensorn. Den ytråhet som uppstår på grund av slipning på fint sandpapper bedöms följa dessa riktlinjer med marginal. Det är dock viktigt att kontrollera ytan så att inga flisor lossnat vid slipningen.

Parallellt med de mätningar som beskrivs här gjordes, utanför ramen för det projekt som denna rapport sammanfattar, också mätningar av specifik värmekapacitet med en till systemet hörande applikation med namnet Specific Heat Application. Metoden är speciellt framtagen för att mäta specifik värmekapacitet. Resultaten från dessa är i dagsläget ej sammanställda men det kan nämnas att en första jämförelse mellan de resultat som gavs med de TPS-mätningar som behandlas i denna rapport och de som gavs med Specific Heat Application visar på god överensstämmelse. Detta talar för att det inte är nödvändigt att använda Specific Heat Application utan att det räcker med att använda TPS-mätningarna som beskrivits mer ingående i denna rapport. Anledningen till att Specific Heat Application inte är att föredra är att denna endast ger data för specifik värmekapacitet vilket innebär att termisk konduktivitet och diffusivitet måste bestämmas genom separata mätningar.

7.4.4 Resultat för bestämning av fuktkvot och densitet

Fuktkvoten bestämdes vid två olika tillfällen, med en veckas mellanrum, under den tidsperiod om ca två veckor som experimenten utfördes. Vid första tillfället var den till 9,0 % och vid andra mättillfället 8,9 %.

Densiteten, vilken bestämdes för pellets med fuktkvoten 9,0 %, var 1197 kg/m³.

7.4.5 Ytterligare diskussion kring termisk konduktivitet

Thunman och Leckner (2002) presenterar samband för att utifrån uppgifter om träs densitet, fukttinhåll och krympningsegenskaper beräkna värdet för termisk konduktivitet. Under arbetets gång upptäcktes att de med TPS-metoden uppmätta värdena verkar stämma förhållandevis bra med den modell för trä i vinkelrät riktning mot fibrerna som Thunman och Leckner presenterar. Observera att ingen noggrann analys gjorts men iakttagelsen talar ändå för att det skulle kunna vara intressant att utreda om det är så att med TPS-metoden uppmätta värden generellt stämmer med modellen. Är så fallet behöver inte termisk konduktivitet mätas utan kan istället lika gärna beräknas med modellen.

7.5 Termiska egenskaper för pelletbulk

De experiment som beskrivs ovan handlar om bestämning av termiska egenskaper för enskilda pellets. Det som normalt krävs som indata till modeller för beräkningar om självantändning är bulkegenskaper. Parallellt med de försök som beskrivs i denna rapport gjordes också experiment med TPS-mätningar på träpelletbulk. Slutsatsen från dessa mätningar blev att det inte tycks möjligt att uppnå stabila resultat med denna metod. För att få korrekta indata till modeller för självantändning från mätningar med TPS verkar det alltså som att mätningarna ska göras på enskilda pellets och därefter, om så krävs, översättas till värden för bulk.

Det finns möjligheter att översätta de termiska egenskaperna specifik värmekapacitet, termisk konduktivitet samt termisk diffusivitet för enskilda pellets till egenskaper för bulk. Det ligger utanför avgränsningarna för detta arbete att gå in i detalj på hur detta bör göras, nedan presenteras dock en introduktion till hur det skulle kunna gå till.

Vad gäller specifik värmekapacitet är översättningen enkel eftersom egenskapen är oberoende av om pelletsen ligger i ett visst mönster eller ej. Specifik värmekapacitet för en blandning, i detta fall en pelletbulk, bestäms enligt Flynn (1998) ur

$$C = \sum_i \omega_i C_i$$

där ω_i är massfraktion (kg/kg) av komponent i .

För termisk konduktivitet är översättning inte lika enkelt eftersom egenskapen beror av hur komponenterna är orienterade i blandningen. Flynn (1998) har gjort en sammanställning av olika modeller för denna typ av beräkningar men det är inte tydligt vilken av dessa som passar bäst att använda eller hur bra värde de olika modellerna skulle ge för det specifika fallet träpelletbulk. Någon vidare utredning av vilken modell som bör användas ryms inte inom ramen för detta arbete.

När man bestämt specifik värmekapacitet och termisk konduktivitet för pelletbulken är det lätt att bestämma termisk diffusivitet för densamma. Detta görs genom att använda sambandet

$$\text{termisk diffusivitet} = \frac{\text{termisk konduktivitet}}{\text{specifik värmekapacitet}}$$

För att göra översättningar från egenskaper för enskild pellet till egenskaper för pelletbulk behövs bulkdensitet. En mätning av bulkdensitet för pellets med diametern 8 mm från en fabrik i Ulricehamn genomfördes i samband med experimenten beskrivna i detta kapitel (kapitel 7). Bulkdensiteten uppmättes till 706 kg/m³ (medel för mätningar på pellets med längderna 25 mm respektive 8 mm). Ingen mätning av fuktkvot gjordes på dessa.

7.6 Slutsatser om mätmetoden

De genomförda experimenten har gett svar på de huvudsakliga frågorna vilka presenteras under rubriken 7.3.1 samt större delen av de frågor som rör eventuella felkällor, se kapitel 7.3.2. De viktigaste slutsatserna som dragits är följande:

- Det spelar ingen roll om mätningar görs med stående eller liggande uppställning av pellets. Rent praktiskt är provberedningen för liggande uppställning lättare att genomföra och rekommenderas därför.
- De termiska egenskaperna varierar starkt med fuktkvoten och därför bör provkropparna först slipas till önskad form och därefter konditioneras så att de kommer i fuktmässig balans med den omgivning i vilken TPS-mätningarna därefter ska göras.
- Serier om fem mätningar utan förändrade förutsättningar är fullt tillräckligt och eventuellt kan antalet minskas.
- På grund av variationer mellan olika pellets av samma sort kan det vara lämpligt att genomföra mätningar på åtminstone fem provkroppspår för att sedan beräkna medelvärdet för de termiska egenskaperna.
- För den pelletsort som undersökningen gjorts på är det lämpligt att använda sensor 7577 vilken har radien 2,001 mm. Att använda den minsta sensorn, sensor 7531 som har radien 0,526 mm, är olämpligt. Vidare undersökningar krävs för att svara på om det går att använda minsta sensorn på pellets med mindre kornstorlek.

Det samlade intrycket efter genomförda experiment är att mätmetoden är robust i den mening att inga svårförklarliga variationer i mätresultat uppkommit och de eventuella felkällor som uppmärksammats antingen har ringa inverkan eller är relativt lätta att undvika.

Undersökningen har gjorts på en sorts pellets vilket är viktigt att ha i åtanke då det inte helt kan uteslutas att mätningar på andra pelletsorter skulle kunna ge andra resultat och slutsatser.

8 Slutsatser

Efter genomfört arbete kan konstateras att de för projektet uppsatta målen anses uppnådda. Nedan konkretiseras de viktigaste slutsatser som dragits under arbetet.

Det beräkningsverktyg för beräkningar av självantändning med Frank-Kamenetskii-teori som tagits fram fungerar användarmässigt bra. Resultaten från beräkningar med verktyget skall tolkas med de bakom Frank-Kamenetskii-teorin liggande antagandena i åtanke. Den validering som gjorts av beräkningsverktyget talar för att resultat från detta kan vara värdefulla för att göra en första bedömning av risken för självantändning. I beräkningsverktyget finns två modeller för beräkning av tid till antändning tillgängliga. Vid valideringen visade det sig att den ena överskattade tiden medan den andra underskattade den. Genom att titta på resultaten från båda modellerna verkar en grov uppskattning av tid till antändning kunna göras. Den parameterstudie för parametrarna termisk konduktivitet (λ), reaktionsvärme multiplicerat med pre-exponentiella faktorn i Arrheniusuttrycket för värmeproduktion ($Q \cdot A$), aktiveringsenergi (E) samt densitet (ρ) som genomförts med beräkningsverktyget visar att det, inom det studerade intervallen för parametrarna, är variationer hos värdet på aktiveringsenergin som påverkar resultaten mest. För låga värden på $Q \cdot A$ är även denna parameter starkt påverkande medan inverkar på resultatet från variationer av värden på λ och ρ är förhållandevis liten. Verktyget skulle kunna utvecklas med fler korrekationer.

Det finns ett ganska stort antal faktorer som begränsar Frank-Kamenetskii-teorins lämplighet för användning på lager av träpellets. Att inverkan av fukt inte tas med i beräkningar med teorin är en av dessa. En annan är att det kan vara så att fler än en reaktion bidrar till värmeproduktionen vilket skulle innebära att antagandet för teorin om att endast en reaktion bidrar inte stämmer med verkligheten. Att biologisk aktivitet skulle bidra till detta är dock inte troligt förutsatt att pelletsen hanteras och lagras på ett riktigt sätt. Ännu en faktor som begränsar teorins lämplighet för användning på lager av träpellets är att dessa lager, främst på grund av zoner med finfraktion och de mellanrum som bildas mellan enskilda pellets, inte utgör ett homogent material vilket innebär en avvikelse från ett av grundantagandena för teorin.

Det finns dock alternativa, mer avancerade, modeller för beräkningar av självantändning i lager av träpellets. Mer avancerade i avseendet att de tar hänsyn till fler av de fysikaliska och kemiska processer som påverkar ett självuppvärmningsförlopp. Av de förhållandevis få sådana modeller som hittats anses modellen av Zhenghua Yan mest intressant eftersom den tar hänsyn till flest faktorer och har validerats mot experiment med just träpellets. Bland de processer som modellen tar hänsyn till kan nämnas konvektion och diffusion i poröst material, förångning och kondensation och värmeproduktion. Viktigt att påpeka är att de mer avancerade modellerna, i jämförelse med beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori, i allmänhet kräver både större arbetsinsats och indata som är mindre lättillgänglig. Trots Frank-Kamenetskii-teorins begränsningar bedöms, utifrån resultatet för den validering som gjorts, beräkningsverktyget i Excel vara värdefullt för att ge en indikation om huruvida risk för självantändning föreligger och om så är fallet efter hur lång tid detta förväntas ske. Osäkerheterna kopplade till beräkning av tid till antändning är dock stora vilket skall beaktas vid användning av resultaten.

För enskilda pellets kan de termiska egenskaperna konduktivitet, diffusivitet och specifik värmekapacitet bestämmas med Transient Plane Source-metoden (TPS). Egenskaperna är inte rikttningsberoende varvid mätningar kan göras på valfri ledd dock är det rent praktiskt lättast att göra mätningarna tvärs pelletens längdriktning. Förutsatt att de rekommendationer som presenteras i kapitel 7.6 följs saknar metoden större felkällor och anses robust. För beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori är det termiska egenskaper för

pelletbulk som krävs som indata och inte egenskaper för enskilda pellets. Alltså måste mätdata från den undersökta metoden översättas till motsvarande värden för bulk för att fungera som indata till sådana beräkningar. En vidare undersökning av hur detta bör göras behövs. Vid en sådan utredning bör fokus ligga på termisk konduktivitet. Detta eftersom värden för specifik värmekapacitet är lätt att översätta och förutsatt att värden för pelletbulkens specifika värmekapacitet samt termiska konduktivitet är kända är termisk diffusivitet lätt att räkna ut, se kapitel 7.5.

9 Förslag till vidare arbete

Under arbetet med projektet har ett antal punkter som är relevanta för vidare arbete uppkommit. Det som listas nedan har redan tagits upp på olika ställen i rapporten men sammanfattas här för att göra det lättare att urskilja dessa förslag till vidare arbete.

- Genomföra ytterligare jämförelser mellan simuleringar med beräkningsverktyget i Excel och genomförda experiment. Syftet med detta skulle vara att få en mer komplett bild av hur väl resultat från beräkningsverktyget stämmer med verkligheten.
- Införa fler korrekationer i beräkningsverktyget. Syftet med detta skulle vara att förbättra beräkningsverktyget.
- Införa fler modeller för beräkning av TTI i beräkningsverktyget. Syftet med detta skulle vara att förbättra beräkningsverktyget.
- Jämföra beräkningar med Frank-Kamenetskii-teori med de alternativa modellerna (se kapitel 6) samt genomförda experiment. Syftet skulle vara att undersöka dels hur bra de alternativa modellerna stämmer med verkligheten och dels hur resultaten från dessa förhåller sig till resultaten från beräkningsverktyget i Excel.
- Jämföra TPS-metoden med andra sätt att bestämma de aktuella termiska egenskaperna. Syftet skulle vara att dra slutsatser om vilken metod som ger bäst mätresultat samt vilken som är tidsmässigt samt ekonomiskt effektivast.
- Utföra de mätningar med TPS-metoden vilka presenteras i denna rapport på andra sorters pellets för att kunna dra mer generella slutsatser om hur mätningarna bör göras.
- Göra en grundlig undersökning vad gäller hur bra modellen för termisk konduktivitet av Thunman och Leckner (2002) stämmer för träpellets (se kapitel 7.4.5). Syftet skulle vara att undersöka om det är så att man utifrån uppgifter om densitet, fuktinnehåll och krympningsegenskaper kan beräkna termisk konduktivitet inte därmed inte måste mäta denna egenskap.
- Utreda i detalj hur egenskaperna termisk konduktivitet, diffusivitet och specifik värmekapacitet för enskild pellets kan översättas till egenskaper för bulk (se kapitel 7.5).

10 Nomenklatur

σ	termisk diffusivitet ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).
\dot{q}'''	värmeproduktion (W m^{-3})
ρ	densitet (kg m^{-3})
λ	termisk konduktivitet ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
δ	Frank-Kamenetskii-parametern (-)
δ_c	kritiskt värde för δ (-)
ε	$\varepsilon = \frac{RT_0}{E}$ (-)
τ	dimensionslös tid till antändning (-)
α	konstant som beror av geometri (-)
β	konstant som beror av geometri (-)
γ	konstant som beror av geometri (-)
ω	massfraktion (kg/kg)
A	pre-exponentiella faktorn i Arrheniusuttrycket för värmeproduktion i en kropp (s^{-1})
Bi	Biottalet (-)
C	specifik värmekapacitet ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c	reaktantkoncentration (-)
E	aktiveringsenergi (J mol^{-1})
H	höjd hos en kort cylinder (m), se Tabell 1
h	effektivt värmeövergångstal ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
L	halva höjden hos en kort cylinder (m)
l	längd hos en av sidorna i en rektangulär låda (m), se Tabell 1
m	längd hos en av sidorna i en rektangulär låda (m), se Tabell 1
M(Bi)	konstant som beror av geometri samt Bi (-)
n	reaktionsordning (-)
Q	reaktionsvärme (J kg^{-1})
r	karaktäristisk längd för lagringskonfigurationen (m), se Tabell 1
R	universella gaskonstanten ($R=8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
T	temperatur (K)
T_0	omgivningens temperatur (K)
t	tid (s)
t_{ad}	adiabatisk tid till antändning (s)
t_{ig}	tid till antändning (s)
x	sträcka (m)

11 Referenser

- Babrauskas, V. (2003). *Ignition Handbook*. Issaquah, WA 98027: Fire Science Publishers.
- Beever, P. F. (1995). *Self-heating and Spontaneous Combustion*. In the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition. Quincy: National Fire Protection Association.
- Blanchard, E. (2007). *Simulation of self-heating in wood pellet storage using input data from small-scale experiments*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Brandteknik.
- Blomqvist, P., & Persson, H. (2008). Self-heating in storages of wood pellets. *Conference proceedings of World bioenergy 2008* (ss. 138-142). Jönköping: The Swedish bioenergy association.
- Blomqvist, P., Persson, H., Van Hees, P., Holmstedt, G., Göransson, U., Wadsö, L., o.a. (2007). An experimental study of spontaneous ignition in storages of wood pellets. *Proceedings of Fire and Materials Conference 2007*. San Francisco: Interscience.
- Drysdale, D. (1998). *An introduction to fire dynamics*. Second edition. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Ejvegård, R. (2003). *Vetenskaplig metod*. Malmö: Studentlitteratur.
- Flynn, D. R. (1998). *Response of high performance concrete to fire conditions: review of thermal property data and measurement techniques*. Millwood: National Institute of Standards and Technology.
- Gray, B. (2002). *Spontaneous Combustion and Self-heating*. In the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. Quincy: National Fire Protection Association.
- Hogland, W., & Marques, M. (2003). Physical, biological and chemical processes during storage and spontaneous combustion of waste fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 40, 50-69.
- Hot Disk AB . (2007). Instruction Manual Hot Disc Thermal Constants Analyser Software Version 5.9.
- Kanury, M. A. (1975). *Introduction to combustion phenomena*. New York: Gordon and Beach Science Publ.
- Krause, U., Schmidt, M., & Lohler, C. (2005a). A study on the influence of liquid water and water vapour on the self-ignition of lignite coal - experiments and numerical simulations. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18:167-177.
- Krause, U., Schmidt, M., & Lohler, C. (2005b). Computations on the coupled heat and mass transfer during fires in bulk materials, coal deposits and waste dumps. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference 2005 Frankfurt*. Frankfurt.
- Krause, U., Schmidt, M., & Lohler, C. (2006). A numerical model to simulate smouldering fires in bulk materials and dust deposits. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19:218-226.
- Lönnermark, A., Persson, H., & Hogland, W. (2008). *Biobränslen och avfall - Brandsäkerhet i samband med lagring*. SP Rapport 2008:51. Borås: SP Sveriges tekniska forskningsinstitut.
- Nielsen, N. (2004). *Wood pellet production and the importance of raw material storage*. Köpenhamn: Faculty of Life Sciences, University of Copenhagen, Denmark.

- Pauner, M. A., & Bygbjerg, H. (2007). Spontaneous ignition in storage and production lines: Investigation on wood pellets and protein powder. *Fire and Materials*, ss. 31:477-494.
- Sjöfartsverket. (2007). *Bulk Carrier SAGA SPRAY - VRWW5 – Fatal Accident on 16 November, 2006*. Norrköping: Sjöfartsverket.
- Takeno, T., & Sato, K. (1980). Effect of Oxygen Diffusion on Ignition and Extinction of Self-Heating Porous Bodies. *Combustion and Flame*, ss. 38:75-87.
- Thunman, H., & Leckner, B. (2002). Thermal conductivity of wood-models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy*(23), 47-54.
- Yan, Z., Blomqvist, P., Göransson, U., Holmstedt, G., Wadsö, L., & Van Hees, P. (2005). Validation of CFD model for simulation of spontaneous ignition in bio-mass fuel storage. *Fire safety science - proceedings of the eighth international symposium* (ss. 151-162). International association for fire safety science.
- Zakrisson, M. (2002). *Internationell jämförelse av produktionskostnader vid pelletstillverkning*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogshushållning.

Bilaga 1 – Strukturerad litteratursökning

Denna bilaga ger inblick i den litteratursökning som genomfördes i arbetets inledande fas.

Använda sökord:

- Frank-Kamenetskii
- alternative to Frank-Kamenetskii
- spontaneous ignition calculation
- "self heating" calculation
- "self ignition" calculation
- "self heating" biological
- "self ignition " biological

Använda databaser:

1. Fire Safety Science Bibliographic Database (IAFFS), Proceedings of the International Symposiums
Adress: <http://iaffs.haifire.com/html/index.htm>
2. BFRL Publications Online (Building and Fire Research Laboratory)
Adress: <http://www.nist.gov/bfrl/publications.cfm>
3. Fire Model Survey
Adress: <http://www.firemodelsurvey.com/index.html>
4. SP:s publikationsdatabas
Adress: <http://www.sp.se/sv/publications/Sidor/Publikationer.aspx>
5. MSB:s publikationer
Adress: <http://www.msb.se/>
6. ELIN@ → Artiklar
Adress: <http://elin.lub.lu.se/elin?func=loadTempl&templ=basicSearch&lang=se&ef=getYears>
7. COMPENDEX (Använde databasen Compendex samt databasen Inspec)
För att få tillgång till denna databas krävs inloggning, adressen nedan ger information om databasen.
Adress: <http://elin.lub.lu.se/elin?func=resInfo&resid=28&lang=en>
8. Google Scholar
Adress: <http://scholar.google.se/>
9. Web of Science
Adress:
http://apps.isiknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=N1Gj54aHdEo3H62dFK&preferencesSaved=

Bilaga 2 – Indata vid validering av beräkningsverktyget i Excel

Här redovisas indata och antaganden som gjorts vid beräkningarna där hänsyn tagits till väggarnas isolerande effekt.

$$\rho = 668 \text{ kg/m}^3 \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 5)}$$

$$QA = 6 \cdot 10^9 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 5)}$$

$$\lambda_{\text{bulk}} = 0,17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (antagit)}$$

$$E = 77 \cdot 10^3 \text{ J mol}^{-1} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 5)}$$

Geometri: Cylinder där diameter = höjd

$$r = \text{radien} = 550 \text{ mm} = 0,55 \text{ m} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 7)}$$

$$T_{0,\text{experiment 1}} = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ K} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 9)}$$

$$T_{0,\text{experiment 2}} = 105 \text{ }^\circ\text{C} = 378 \text{ K} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 9)}$$

$$C = 1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 5)}$$

$M(\text{Bi}) = 1,4288$ vilket gäller för cylinder då $\text{Bi} \rightarrow \infty$. Att använda värdet som gäller då $\text{Bi} \rightarrow \infty$ trots att Bi i verkligheten inte alls närmar sig oändligt stort innebär att detta bidrar till att de beräknade värdena för tid till antändning blir lägre.

Bestämning av värde på $h =$ effektiva värmeövergångstalet

Att ta hänsyn till isoleringens inverkan är svårt men för att behandla dess inverkan på något sätt ses isoleringen här som ett bidrag till den yttre värmeövergången. Bortser från strålningens inverkan på värmeövergångstalet. Det värmeövergångstal som använts beräknas därför enligt följande

$$h_{\text{resulterande}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{konvektion}}} + \frac{1}{h_{\text{isolering}}}}$$

$$\lambda_{\text{isolering}} = 0,051 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (Blomqvist, o.a., 2007, s. 5)}$$

$$h_{\text{isolering}} = \frac{\lambda_{\text{isolering}}}{\text{tjocklek}_{\text{isolering}}} = \frac{0,051}{0,05} = 1,02 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Eftersom luften kring pelletbehållaren är strömmande, på grund av den fläkt som användes vid experimenten, är konvektionen av typen påtvingad.

Genomsnittligt värmeövergångstal på grund av konvektion över sträckan L (m) ges av

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_f}{L}$$

där K_f är fluidens termiska konduktivitet ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) och Nu är Nussels tal (-).

Förenklar situationen till ett luftflöde parallellt med en plan yta samt antar att filmtemperaturen är lika med starttemperaturen T_0 för experimenten. Luftflödet som fläkten gav var $16,3 \text{ m}^3/\text{min}$ vilket resulterar i att luftens medelhastighet var $0,063 \text{ m s}^{-1}$. Reynolds tal ges av

$$Re = \frac{ux}{\nu}$$

där u är fluidens medelhastighet (m s^{-1}), x är sträcka (m) och ν är kinematisk viskositet ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

$$Re_{\text{experiment 1}} = \frac{0,063 \cdot 1,1}{21,07^{-6}} = 3289,04$$

$$Re_{\text{experiment 2}} = \frac{0,063 \cdot 1,1}{23,64^{-6}} = 2931,47$$

För en plan yta gäller att om $Re < 3,2 \cdot 10^5$ så är flödet laminärt. Flödet är alltså laminärt vid båda experimenten. Därför används följande samband för att bestämma värdet på Nussels tal, Nu (Kanury, 1975)

$$\overline{Nu}_L = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

Prantls tal ges av

$$Pr = \frac{\nu}{\sigma}$$

där ν är kinematisk viskositet ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) och σ är termisk diffusivitet ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

$$Pr_{\text{experiment 1}} = \frac{21,07^{-6}}{0,3030^{-4}} = 0,6954$$

$$Pr_{\text{experiment 2}} = \frac{23,64^{-6}}{0,3418^{-4}} = 0,6916$$

Nu fås

$$\overline{Nu}_{L,\text{experiment 1}} = 0,664 \cdot 3289,04^{1/2} \cdot 0,6954^{1/3} = 33,7376$$

$$\overline{Nu}_{L,\text{experiment 2}} = 0,664 \cdot 2931,47^{1/2} \cdot 0,6916^{1/3} = 31,7928$$

Dessa värden tillsammans med $k_{f,\text{experiment 1}} = 0,0302 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ respektive $k_{f,\text{experiment 2}} = 0,0321 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ger

$$h_{\text{konvektion,experiment 1}} = \bar{h}_{\text{experiment 1}} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_f}{L} = \frac{33,7376 \cdot 0,0302}{1,1} = 0,9262 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$h_{\text{konvektion,experiment 2}} = \bar{h}_{\text{experiment 2}} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_f}{L} = \frac{31,7928 \cdot 0,0321}{1,1} = 0,9278 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Slutligen kan $h_{\text{resulterande}}$ bestämmas

$$h_{\text{resulterande,experiment 1}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{konvektion}}} + \frac{1}{h_{\text{isolering}}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,9262} + \frac{1}{1,02}} = 0,4854 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$h_{\text{resulterande,experiment 2}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{konvektion}}} + \frac{1}{h_{\text{isolering}}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,9278} + \frac{1}{1,02}} = 0,4859 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Dessa värden är de värden på effektivt värmeövergångstal som satts in i beräkningsverktyget i Excel.

Bilaga 3 – Indata för applikationsexemplen

Uppgifter om olika lager och pelletbulkvar som simulerats redovisas i kapitel 4.3. Här redovisas ytterligare indata som använts vid beräkningarna för applikationsexemplen.

$$C = 1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Geometri för Lager 1 och 3: Kort cylinder

Geometri för Lager 2: Cylinder där diametern = höjden

Geometri för Lager 4: Rektangulär låda

$M(Bi)$ för Lager 1, 2 och 3 = 1,4288 vilket gäller för cylinder då $bi \rightarrow \infty$. Att använda värdet som gäller då $bi \rightarrow \infty$ trots att Bi i verkligheten inte alls närmar sig oändligt stort innebär att detta bidrar till att de beräknade värdena för tid till antändning blir lägre.

$M(Bi)$ för Lager 4 = 1,5336 vilket gäller för platta då $bi \rightarrow \infty$. Att använda värdet som gäller då $bi \rightarrow \infty$ trots att Bi i verkligheten inte alls närmar sig oändligt stort innebär att detta bidrar till att de beräknade värdena för tid till antändning blir lägre.

Korrekktioner som använts: Korrekktion 1. Att Korrekktion 2 inte använts beror på att i samtliga fall var $\varepsilon = \frac{RT_0}{E} \ll 1$ varvid denna korrekktion ej behövs.

Tabell 13. Värden på effektivt värmeövergångstal h som använts vid beräkningarna.

	Lager 1	Lager 2	Lager 3	Lager 4
h när ingen när hänsyn till väggarnas isolerande effekt tas ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	4	4	4	4
h när hänsyn till väggarnas isolerande effekt tas ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	2,32	3,998	3,19	-

När hänsyn till väggarnas isolerande effekt togs så kombinerades konvektionens och de isolerande väggarnas effekt till ett resulterande värde på h medan värdet på h bestämdes av enbart konvektion när väggarnas isolerande effekt inte togs hänsyn till.

Metod för bestämning av $h_{\text{konvektion}}$

För att uppskatta värdet på h förenklas situationen till en plan vertikal yta och ytans temperatur antas vara 20 K högre än omgivningstemperaturen. Denna situation skulle kunna uppstå beroende på en kombination av självuppvärmningens och yttre faktorerers bidrag till en förhöjd yttemperatur.

$Gr \cdot Pr$ beräknades till $>10^9$, därför användes följande uttryck för beräkning av Nussels tal, Nu (Kanury, 1975)

$$\overline{Nu}_L = 0,13(Gr \cdot Pr)^{1/3}$$

Slutligen beräknades $h_{\text{konvektion}}$ ur

$$h_{\text{konvektion}} = \bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_f}{L}$$

Metod för bestämning av $h_{\text{resulterande}}$

Följande ekvation användes för att beräkna ett resulterande värde för värmeövergångstalet

$$h_{\text{resulterande}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{konvektion}}} + \frac{1}{h_{\text{isolering}}}}$$

där $h_{\text{isolering}}$ beräknades ur

$$h_{\text{isolering}} = \frac{\lambda_{\text{isolering}}}{\text{tjocklek}_{\text{isolering}}}$$

För de väggar som består av betong användes $\lambda = 1,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ och för väggarna av stålplåt användes $\lambda = 1,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ vilket är typiska värden för respektive material (Drysdale, 1998, s. 33).

