

Bengt Eiderfors, Marlene Andersson, Oskar Parmhed, Stefan Olsson,
Mattias Elfsberg, och Dennis Menning

IR-signatur och gelade bränslen

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd
147 25 Tumba

FOI-R--1304--SE

September 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Bengt Eiderfors, Marlene Andersson, Oskar Parmhed, Stefan Olsson,
Mattias Elfsberg, och Dennis Menning

IR-signatur och gelade bränslen

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1304--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år September 2004	Projektnummer E2383
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2 73 Flygfarkostteknik - övrigt	
Författare/redaktör Bengt Eiderfors Marlene Andersson Oskar Parmhed Stefan Olsson Mattias Elfsberg Dennis Menning	Projektledare Bengt Eiderfors	
	Godkänd av Jon Tegnér	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FMV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel IR-signatur och gelade bränslen		
Sammanfattning (högst 200 ord) Del 1. Alla farkoster avger IR-strålning av olika våglängd och intensitet, för militära farkoster är i regel en låg IR-signatur en viktig designparameter. Genom att göra beräkningar av IR-signaturer kan de faktorer som bidrar till signaturen bestämmas och minimeras. IR-signaturen beräknas genom att en strålningsmodell appliceras på resultatet från en stömningsmekanisk simulering. I den föreliggande studien har en konverterare utarbetats för att koppla samman IR-strålningsmodellen SIGGE med resultaten från beräkningssystemet FOAM, använt för att utföra strömningsberäkningen. Slutligen har systemet applicerats på en motorkonfiguration från VAC och den resulterande IR-strålningen beräknats. Del 2. Med ett gelat bränsle minskar hanteringsriskerna, det ger även möjlighet att tillföra energirika fasta partiklar i bränslet. Inledande försök har genomförts där robotbränslet JP-10 har gelats. Reologisk studie har genomförts på det gelade bränslet och den visade att bränslegelen har god gelstyrka vid 7,5 viktsprocent gelningsmedel Cab-O-Sil® (SiO₂). Atomiseringsförsök med denna blandning har utförts med en luftassisterat munstycke och som referensvätska har vatten använts. Uppskattningsvis höll geldropparna cirka 100 µm i diameter och vattendropparna cirka 50 µm.		
Nyckelord IR-signatur, SIGGE, FOAM, gelat bränsle, JP10, Cab-O-Sil		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 38 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1304--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Bekämpning och skydd	
	Month year September 2004	Project no. E2383
	Subcategories 51 VVS med styrda vapen	
	Subcategories 2 73 Air Vehicles Technologies	
Author/s (editor/s) Bengt Eiderfors Marlene Andersson Oskar Parmhed Stefan Olsson Mattias Elfsberg Dennis Menning	Project manager Bengt Eiderfors	
	Approved by Jon Tegnér	
	Sponsoring agency FMV	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) IR-signature and gelled fuels		
Abstract (not more than 200 words) Part 1. All vehicles emit IR radiation of different wavelength and intensity. For military vehicles a low IR signature is usually an important design parameter. By computing the IR signature, factors contributing to the signature can be determined and minimized. The IR signature is computed by applying a radiation model to the results of a fluid mechanics computation. In the present study a converter has been created to connect the radiation code SIGGE to the simulation software package FOAM, used for the fluid mechanics computations. Finally, this system has been applied to an engine configuration from VAC and the IR radiation has been computed. Part 2. With a gelled fuel the risks while handling the fuel decreases, and it gives the possibility to add energetic solid particles. Initial studies have been performed where the high density fuel JP-10 been gelled. Rheological studies have been conducted on the gelled fuel and it showed good gel strength at 7.5 weight percent gelling agent, Cab-O-Sil® (SiO₂). Atomization tests with this mixture have been carried out with an air assisted atomizer and water as a reference liquid. The estimated droplet size for the gelled fuel was approx. 100 µm diameter and the water droplets approx. 50 µm.		
Keywords IR-signature, SIGGE, FOAM, gelled fuel, JP10, Cab-O-Sil		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 38 p.	
	Price acc. to pricelist	

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Del 1.

IR-signatur från motorflammar - Slutrapport	5
Inledning	5
1: Sammankoppling av FOAM och SIGGE	5
1.1 LES-simulering av jetstråle.....	5
1.2: CFD-beräkning av modellflamman	6
1.3: Konverterare	6
1.4: IR-signaturberäkningar av modellflamman	7
2: Applikation av metoden på en faktisk motor.....	8
2.1: Val av motorkonfiguration.....	8
2.2: CFD-beräkningar av flamman från den valda motorn.....	8
2.3: IR-signaturberäkningar av vald flamma	10
3: Slutsatser och fortsättning.....	12
Tack.....	12
Referenser	13
Appendix A: Numerisk strömningsmekanik	14
Appendix B: SIGGE	15
B.1: Detaljerad beskrivning av SIGGE.....	15

Del 2.

Inledning	18
Atomisering, sprayning	18
Reologi.....	19
Förbränning.....	19
Logistik	20
Gelning av bränslet	20
Material och metoder	21
Kemikalier.....	22
Gelning av JP-10.....	23
Mekaniska egenskaper hos framställd gel	24
Resultat och diskussion.....	24
Slutsatser	25
Sprayning	25
Försöksuppställning	26
Resultat	28
Förslag till fortsatt arbete.....	28
Referenser	29
Bilagor.....	29
Bilaga 1. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid -40°C	30
Bilaga 2. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 0°C.....	33
Bilaga 3. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 20°C.....	36

IR-signatur från motorflammar - Slutrapport

Inledning

Alla farkoster avger IR-strålning av olika våglängd och intensitet, vilket ger upphov till en IR-signatur. För en flygfarkost/robot ger även en varm motorstråle ett stort bidrag till IR-signaturen. För militära farkoster är i regel en låg IR-signatur en viktig designparameter. Genom att göra beräkningar av IR-signaturer kan de faktorer som bidrar till signaturen bestämmas och minimeras. I robotsammanhang är det av intresse att studera olika bränslen och hur dessa bidrar till IR-signaturen.

IR-strålningen från en motor bestäms till stor del av motorns, eller jetstrålens, temperatur. I större detalj har emellertid olika ämnen olika strålningsegenskaper och strålningen bestäms därtill av ämnets temperatur, fas och tryck. Vad gäller IR-strålningen från en jetmotor består denna av två delar. Först och främst finns IR-strålning direkt från motorn, det vill säga strålning som avges av de olika delarna i motorn (svartkroppsstrålning). Denna strålning är för det mesta dominerande. Utöver denna finns emellertid också IR-strålning som avges från de gaser som ingår i själva jetstrålen. Denna strålning kommer dels att bero på den lokala temperaturen, dels på det lokala trycket och dels på vilka gaser som ingår i jetstrålen. Gaser som kan förväntas ingå i en jetstråle är bland annat kväve och syre som är de huvudsakliga beståndsdelarna i luft, men även förbränningsgaser som koldioxid, kolmonoxid, vatten med mera. Kväv- och syrgas ger ingen IR-strålning, emedan koldioxid, kolmonoxid och vatten gör det. För att kunna beräkna signaturen från en jetstråle måste därför först jetstrålens tillstånd bestämmas i termer av gaskoncentrationer, temperatur och tryck. För att göra detta görs en strömningsmekanisk simulering av jetstrålen. Det är då viktigt att ta hänsyn till halten av de individuella gaserna. Det är också viktigt att ta noggrann hänsyn till den närvarande turbulensen eftersom denna kommer att påverka såväl gaskoncentrationer som det lokala trycket och temperaturen. Ur simuleringen fås även temperaturerna på de olika motordelarna och den yttre geometrin, under antagande att materialets yttemperatur är densamma som gastemperaturen närmast ytan. IR-bidraget från dessa ytor adderas till IR-bidraget från jetstrålen.

En kod, SIGGE [1], för beräkning av IR-signaturer har utvecklats vid FOIs avdelning för Flygteknik. För att kunna beräkna IR-signaturen med SIGGE krävs en CFD-lösning¹ med tillhörande beräkningsnät. Vid beräkning av CFD-lösningar kan olika ansatser göras. De idag vanligast förekommande ansatserna vid numerisk integrering av strömningsfält är LES² och RANS³ (se kapitel 2.2 och Appendix A). På grund av IR-signaturens känslighet för turbulenta och temporala fluktuationer har för detta arbete en LES-lösning använts. Denna lösning har beräknats med hjälp av beräkningssystemet FOAM [2] vid FOIs avdelning Vapen och Skydd. En ytterligare motivation för att använda FOAM är dess förmåga att inkludera kemiska processer direkt vid beräkning av det turbulenta strömfältet. Detta är en egenskap som på sikt kan komma att vara av stort intresse om exempelvis förbränning av olika bränslen skall studeras.

I kapitel 1 beskrivs hur IR-signaturkoden SIGGE har kopplats samman med beräkningssystemet FOAM. För detta ändamål har en befintlig LES-lösning för en modellflamma från FOAM använts. En lämplig motorkonfiguration har valts för att testa hela kedjan, från geometri till IR-signatur via CFD-beräkning. Motorkonfigurationsvalet och beräkningarna finns beskrivna i kapitel 2. I kapitel 3 återfinns några slutsatser och förslag på fortsatt arbete. Teorin bakom LES och beräkningskoden SIGGE finns kortfattat beskrivna i Appendix A respektive Appendix B.

1: Sammankoppling av FOAM och SIGGE

1.1: LES-simulering av jetstråle

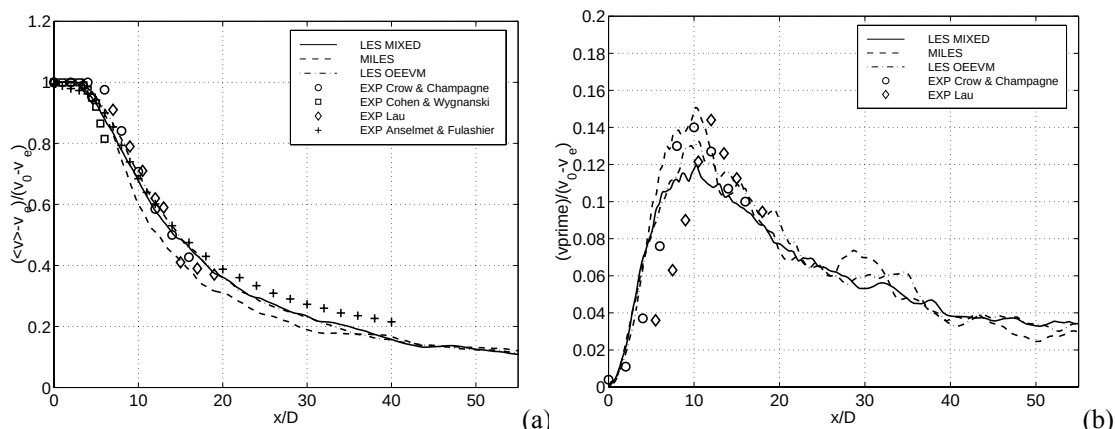
Inom ramen för det här presenterade arbetet har inte den simulerade jetstrålen kunnat jämföras med trovärdiga observationer. Därför presenteras här kortfattat en tidigare simulering av en jetstråle tillsammans med tillgängliga observationer.

¹ Computational Fluid Dynamics

² Large-Eddy Simulations

³ Reynolds Averaged Navier-Stokes

Den i detta stycke presenterade jetstrålen är en subsonisk isotherm stråle med Reynoldstal (Re_D) 95599, baserat på strålens diameter, D , strålens utgångshastighet, v_j och den molekylära viskositeten, ν . Strålen går från munstycket ut i en domän med homogen hastighet v_∞ . Beräkningsdomänen är $60D$ lång och $20D$ bred, bestående av 1,2 miljoner celler. Denna stråle har samma kemiska sammansättning som den omgivande luften. Figur 1 visar en jämförelse av LES-simulerade och uppmätta värden.



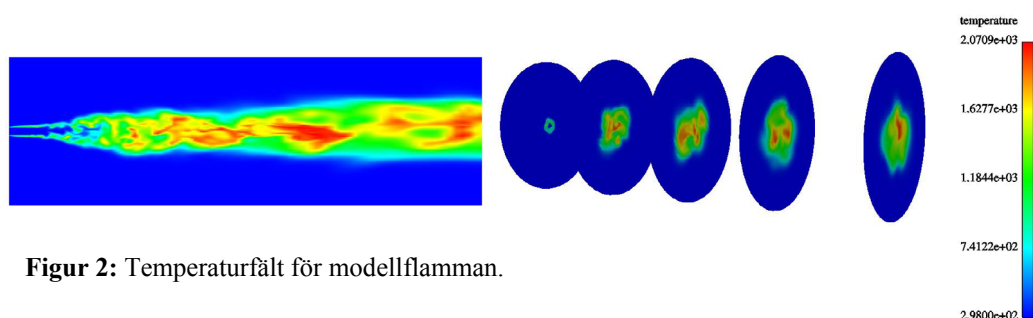
Figur 1. Hastighetskomponenter längs med jetstrålens utsträckning, tillsammans med observationer. (a) hastighet längs med jetstrålens utsträckning, (b) rms av hastighets-fluktuationerna från (a).

Figur 1 visar att LES-simuleringen har en god överensstämmelse vad beträffar hastighet, (panel a). Vad beträffar RMS-värdena (panel b) är överensstämmelsen acceptabel. Dock visar det sig att RMS är ett så pass känsligt statistiskt mått att en längre period av medelvärdesbildning hade varit önskvärd. En längre period av medelvärdesbildning skulle ge slätare kurvor i Figur 1b och därmed möjliggöra en noggrannare jämförelse med observationerna. Sammanfattningsvis kan sägas att den presenterade studien visar att LES är en användbar metod för att simulera en jetstråle.

1.2: CFD-beräkning av modellflamman

För utvecklandet av en konverterare mellan de existerande strömnings- och strålnings-koderna användes en modellflamma från en tidigare utförd studie. Denna flamma består av en brinnande $CO/H_2/N_2$ jet med hastigheten 45 m/s och diametern 7.72 mm, och har således den för IR-beräkningarna viktiga skillnaden i kemisk sammansättning mellan strålen och den omgivande luften. Flamman finns mer precist beskriven i [3]. Som exempel visas i Figur 2 temperaturfältet från den använda modellflamman.

1.3: Konverterare



Figur 2: Temperaturfält för modellflamman.

IR-koden SIGGE använder ett generellt dataformat, FFA-data-formatet [4], både internt och för alla indatfiler. FOAM använder inte detta format. Därför har inom projektets ram en konverterare, som omvandlar utdata från FOAM till indata till SIGGE (FFA-formatet), utvecklats.

Konverteraren är skriven i FORTRAN90. Den läser in filer, nät- och lösningsfiler, från FOAM. Lösningen skall vara nodcentrerad. FOAM ger en lösningsfil för varje parameter. Endast de parametrar som kommer att användas i SIGGE läses in av konverteraren. Dessa parametrar är tryck, temperatur och koncentrationer av gaserna koldioxid, CO_2 , och vatten, H_2O . Konverteraren skriver sedan ut en ny

beräkningsnätfil på FFA-formatet samt en fil där relevanta lösningsparametrar finns sammanställda på FFA-format. Konverteraren genererar även en randvillkorsfil som beskriver de olika rändernas tillstånd.

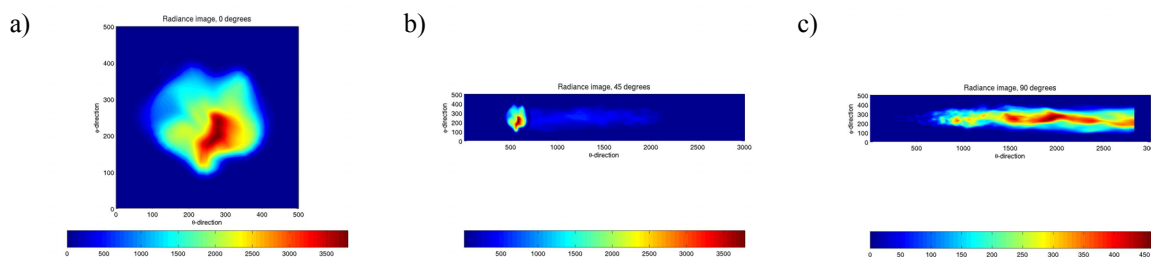
1.4: IR-signaturberäkningar av modellflamman

IR-beräkningarna är gjorda på ett avstånd av 10 m. Dämpningen p.g.a. atmosfären har beräknats med hjälp av MODTRAN⁴. I Tabell 1 är indata för IR-beräkningarna samlade och i Figur 3 ses radiansbilder från IR-beräkningarna.

⁴ Standardprogram för att beräkna atmosfärstransmission/dämpning och atmosfärradians med spektral upplösning på 2 cm⁻¹.

Tabell 1: Indata för IR-beräkningarna av modellflamman

	Bakifrån	45°	90°
Vågtalsintervall	2000-2800 cm^{-1} (3-5 μm)	2000-2800 cm^{-1} (3-5 μm)	2000-2800 cm^{-1} (3-5 μm)
Vågtalsupplösning	5 cm^{-1}	5 cm^{-1}	5 cm^{-1}
”Field-of-view”	0.005°×0.005°	0.03°×0.005°	0.03°×0.005°
Antal pixlar	500×500	3000×500	3000×500

**Figure 3:** Radiansbilder [W/sr/m^2] för modellflamman, sedd bakifrån (a), i 45° (b) och 90° (c) på 10 m avstånd inklusive dämpning från atmosfären.

2: Applikation av metoden på en faktisk motor

2.1: Val av motorkonfiguration

Motorkonfigurationen som valts har gjorts tillgänglig av Volvo Aero Corporation (VAC) i Trollhättan. För denna finns såväl en öppen geometribeskrivning liksom ett färdigt beräkningsnät. Geometrin är enkel och kan därför passa för framtida studier med olika typer av bränslen. För den här motorn finns även RANS beräkningar utförda av VAC, [5], med CFD-koden VOLSOL, [6].

2.2: CFD-beräkningar av flamman från den valda motorn

Numerisk strömningsmekanik (CFD – computational fluid dynamics) används för att beskriva tillståndet hos en fluid givet vissa yttre begränsningar såsom geometri och externa krafter. Ofta används idag numeriska metoder för att finna lösningar till de ekvationssystem som styr lösningen. Beroende på tillgängliga datorresurser och problemets komplexitet kan olika ansatser göras för att finna en lösning. Flera av dessa ansatser inkluderar mer eller mindre drastiska förenklingar av de styrande ekvationerna. Det mest extrema exemplet är de förenklingar som krävs för att göra ett problem analytiskt lösbart.

Det vanligaste sättet att finna lösningar till strömningsproblem inom tekniska tillämpningar idag är ”Reynolds-Averaged Navier-Stokes” (RANS). Som alternativ till RANS har under senare tid ”Large-Eddy Simulation” (LES), eller storvirelsimulering vunnit utrymme. RANS är normalt betydligt mindre resurskrävande än LES, och har under lång tid varit den huvudsakliga lösningsmetoden för tekniska tillämpningar. Emellertid dras RANS också med vissa signifikanta begränsningar. Det medelvärde som impliceras av namnet, medelvärdesbildar alla fluktuationer och modellerar dessa separat. Även om denna modellering avsevärt minskar beräkningstiden begränsar den också lösningen. En annan begränsning är att RANS-lösningar ofta är stationära. Dessa båda begränsningar kan vara obetydliga eller avsevärda, beroende på problemet.

LES är vanligen betydligt mer kostnadskrävande än RANS vad gäller beräkningsresurser. I LES upplöses alla skalor och hela strömningen simuleras explicit, utom den del som sker på den så kallade sub-grid skalan. Detta innebär att den turbulenta strömning som äger rum på skalor som är så små att de inte löses upp av det aktuella beräkningsnätet istället modelleras. Användandet av LES innebär ett antagande om att alla relevanta delar av strömningen lösts upp och dessa simuleras sedan explicit och tidsnoggrant. För problem med stor turbulent komplexitet, icke-stationaritet, eller där strömningen samverkar med annan

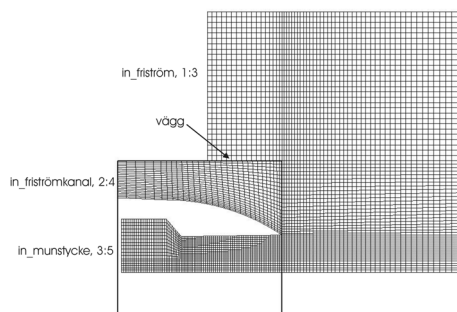
fysik, till exempel vid förbränning, ger LES ovärderlig ytterligare information och måste betraktas som överlägsen RANS. För en mer detaljerad genomgång av LES se Appendix A.

I det föreliggande arbetet har en tidigare forskningsversion av beräkningssystemet FOAM⁵ [2] använts. FOAM är ett generellt beräkningssystem för kontinuummekaniska problem. FOAM har en modulär struktur och använder vad som kan tolkas som ett högnivåspråk för att beskriva de styrande ekvationerna. FOAM har genomgått omfattande validering i ett flertal konfigurationer. Bland andra valideringar som gjorts har FOAM också applicerats på en jetflamma (se [3] och kapitel 1.1), inte olik den här presenterade.

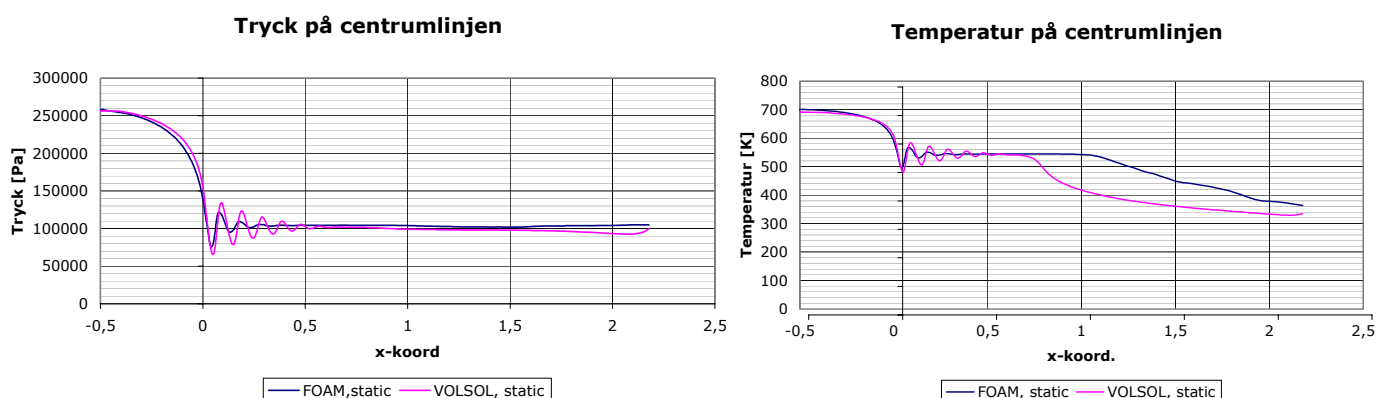
FOAM har i det föreliggande arbetet applicerats på den i kapitel 2.1 presenterade motorkonfigurationen från VAC. Randvärden för simuleringen framgår av Tabell 2. Bränslet som använts i simuleringen är dekan ($C_{10}H_{22}$). Simulering har utförts vid marktryck, motsvarande höjden noll meter. Ytterligare simuleringar vid alternativa höjder har ej utförts.

Tabell 2: Randvillkor för CFD-beräkningar.

	Munstycke	Friström kanal	Friström
Total temperatur [K]	700	280	280
Total tryck [Pa]	270000	270000	10400
Statisk temperatur [K]			273.9
Statiskt tryck [Pa]			102391
Hastighet [m/s]			50
Mach			0.1494
Koncentration CO_2 [%]	6.044	0.0	0.0
Koncentration H_2O [%]	2.725	0.0	0.0



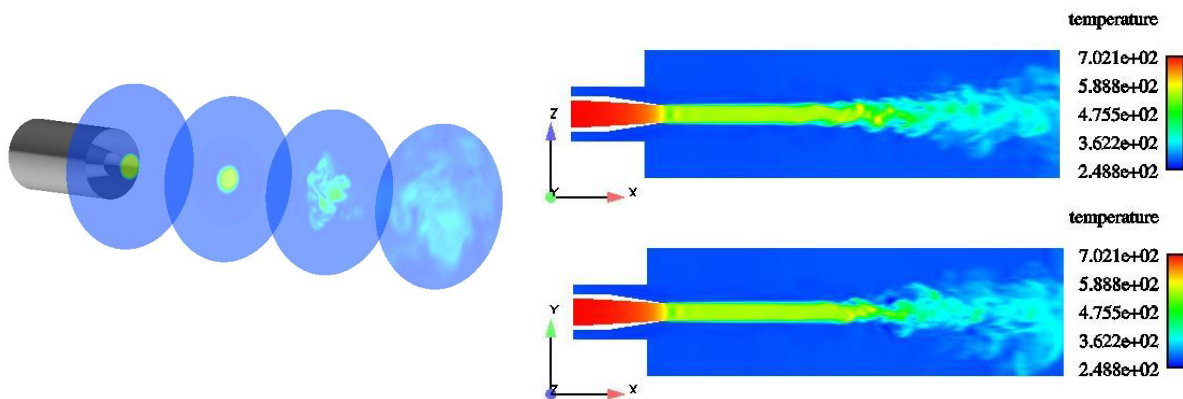
Resultaten av LES-beräkningarna medelvärdesbildades och jämfördes med beräkningarna gjorda med VOLSOL, se Figur 4.



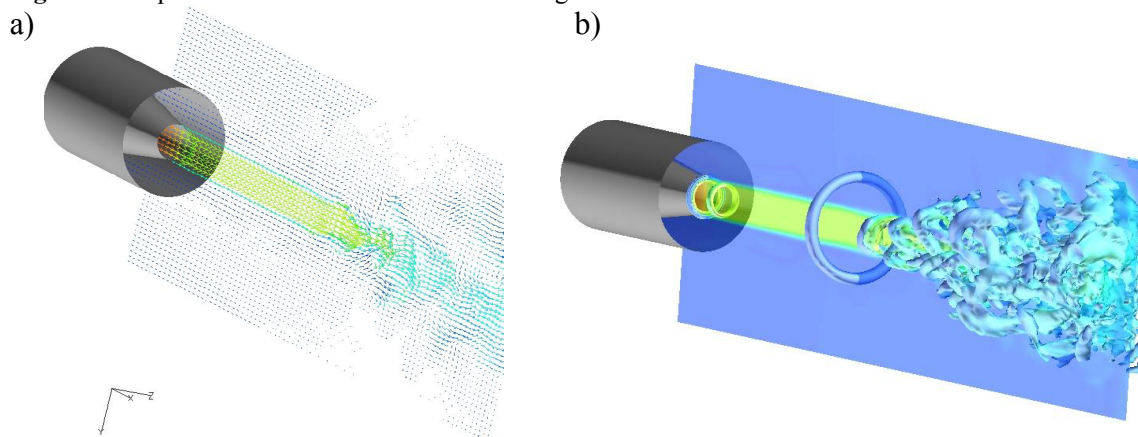
Figur 4: Jämförelse av tryck och temperatur ut med centrumlinjen för beräkningar utförda med CFD-koderna FOAM och VOLSOL, respektive.

För IR-beräkningarna användes en instationär lösning, där temperaturfältet inte var symmetriskt, se Figur 5 och 6.

⁵ Field Operation And Manipulation



Figur 5: Temperaturfält för den instationära lösningen sett ur olika vinklar.



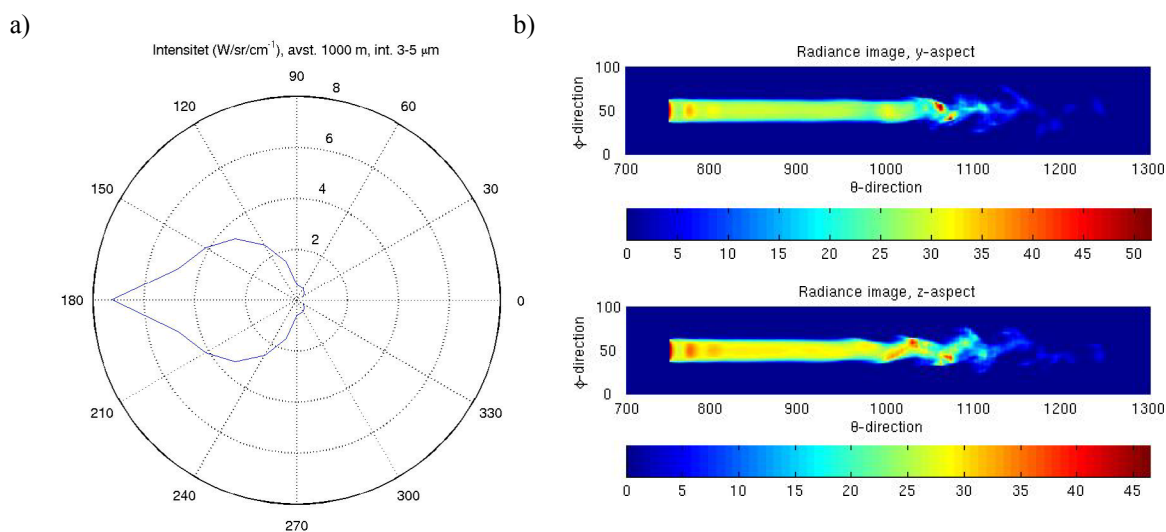
Figur 6: a) Hastighetsfältet färgat med temperaturen. b) Iso-vortisitets ytor färgade med temperaturen.

2.3: IR-signaturberäkningar av vald flamma

IR-beräkningarna är gjorda på ett avstånd av 1000 m. Atmosfärsdämpningen har beräknats med hjälp av MODTRAN. I Tabell 3 är indata för IR-beräkningarna samlat.

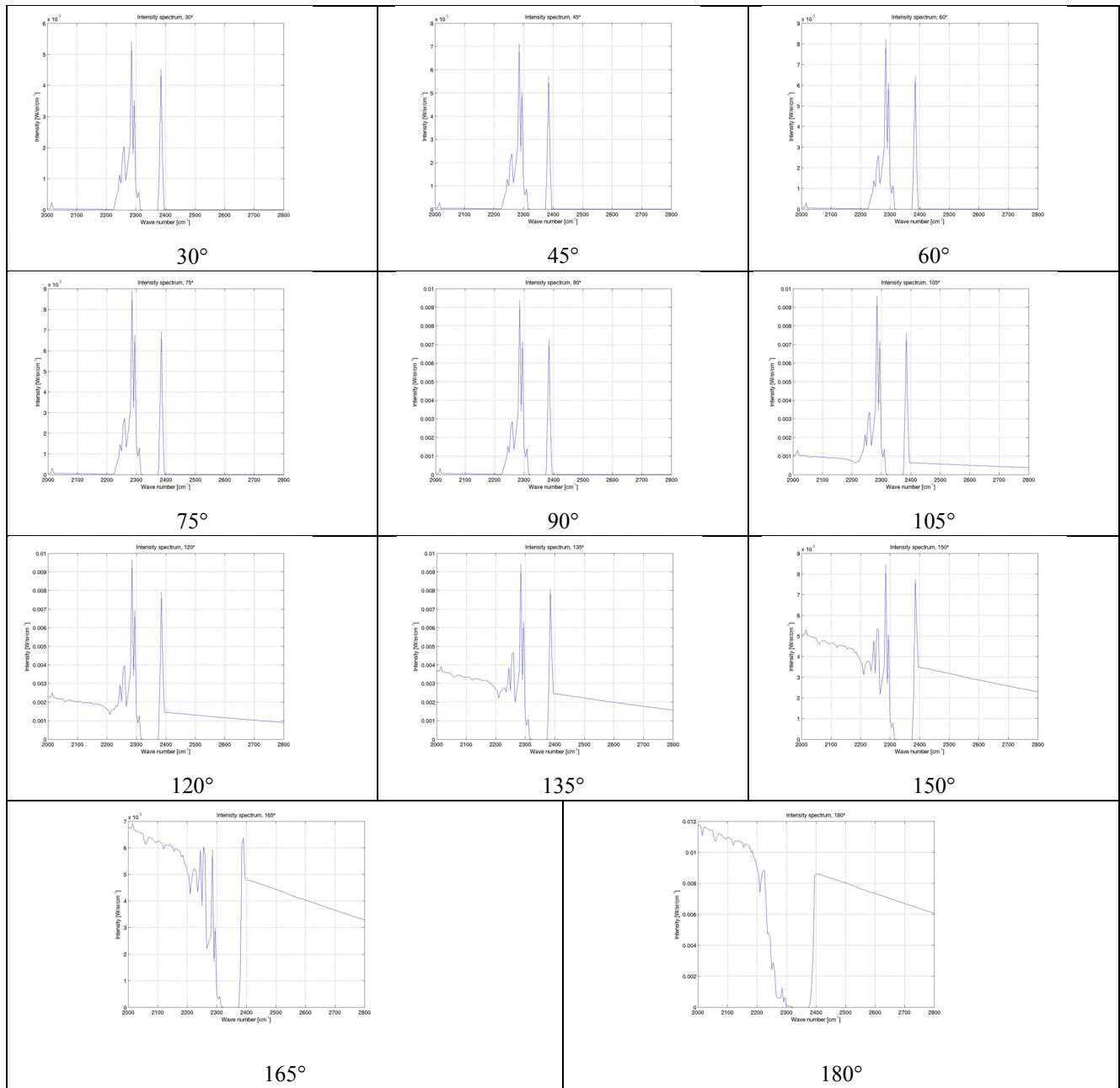
Tabell 3: Indata för IR-beräkningarna

Vågtalsintervall	2000-2800 cm^{-1} (3-5 μm)
Vågtalsupplösning	5 cm^{-1}
"Field-of-view"	0.25°×0.025°
Antal pixlar	~1000×100
Max antal reflektioner	0
Emissivitet	0.7
Reflektivitet	0.3



Figur 7: a) Polärplot över intensiteten. b) Radiansen motsvarande temperaturfälten i Figur 5.

Radiansbilder räknades fram för 90° både med ”view position” på y-axeln och z-axeln, se Figur 7, för att påvisa effekten av den instationära lösningen. I x-y-planet beräknades intensiteten för vinklar mellan 30° och 330°, där 180° motsvara rakt bakifrån, med steg om 15°, se Figur 7 och 8.



Figur 8: Intensitetsspektra för vinklar mellan 30° och 180°, där 180° representerar rakt bakifrån med full insyn i motorn.

3: Slutsatser och fortsättning

Alla farkoster avger IR-strålning av olika våglängd och intensitet, vilket ger upphov till en IR-signatur. För en flygfarkost/robot ger även en varm motorstråle ett stort bidrag till IR-signaturen. För militära farkoster är i regel en låg IR-signatur en viktig designparameter. Genom att göra beräkningar av IR-signaturer kan de faktorer som bidrar till signaturen bestämmas och minimeras. I robotsammanhang är det av intresse att studera olika bränslen och hur dessa bidrar till IR-signaturen. I den föreliggande studien har en konverterare utarbetats för att koppla samman IR-beräkningar med strömningsberäkningar. Med hjälp av tidigare existerande simuleringsresultat för en jetflamma har ett konverteringsprogram skapats. Detta gör det möjligt att driva IR-strålningsmodellen SIGGE med resultat från beräkningssystemet FOAM, använt för att utföra LES-beräkningen. Slutligen har den nu tillgängliga uppsättningen verktyg applicerats på en motorkonfiguration från VAC och den resulterande IR-strålningen beräknats. Arbetet har utförts som ett samarbete mellan FOIs avdelningar för Flygteknik samt Vapen och skydd, som vardera stått för respektive IR- och strömningsberäkningar.

Resultaten visar att de aktuella verktygen kan samverka på ett tillfredsställande sätt. Detta öppnar möjligheter för framtida studier av motorkonfigurationer med olika typer av bränslen.

Beroende på uppdraget kan flyghöjden variera, då flyghöjden påverkar både strömningen och IR-signaturen är det av stort intresse att studera dess effekt. Något som tyvärr inte rymdes i budgeten för detta projekt.

Ett effektivt sätt att minska IR-signaturen från motorn är att utforma en dysa (kanal och munstycke) som ger minimal insyn till motorns heta delar och maximal uppblandning med den omgivande luften. En noggrann studie av hur kanalens krökning och munstyckets geometri påverkar IR-signaturen för robotar skulle vara av stort intresse.

Genom att kombinera LES-beräkningar med IR-beräkningar så som skett i detta projekt, har man stora möjligheter att se momentana effekter i IR-signaturen (värmetoppar). Dessa försvinner om man medelvärdesbildar så som i RANS-beräkningar. För att få en uppfattning om detta är signifikant bör en sådan studie genomföras och igenom detta projekt finns numera ett utmärkt verktyg för detta.

Tack

Detta arbete har finansierats av FMV inom ramen för FoT10. Författarna vill tacka Volvo Aero Corporation i Trollhättan för motorgeometrin och valideringsdata. Vidare tackas Christer Fureby för allt hjälp med CFD-beräkningarna och värdefull information om FOAMs dataformat.

Referenser

- [1] Andersson M., "SIGGE V1.0 *Theory, Implementation and Verification*", FOI-R-0828-SE, (2003).
- [2] Weller H.G., Tabor G., Jasak H. & Fureby C., "A Tensorial Approach to CFD using Object Oriented Techniques", *Comp. in Physics*, **12**, p 629, (1997).
- [3] Barlow R.S., Fiechtner G.J., Carter C.D. & Chen J.-Y., "Experiments on the Scalar Structure of Turbulent CO/H₂/N₂ Jet Flames", *Comb. & Flame*, **120**, p 549, (2000).
- [4] Wallin S., Standardized Data Format, version 1, FFAP-A-950, (1992).
- [5] Privat kommunikation med Anders Hellgren och Bernhard Gustafsson, VAC.
- [6] Eriksson L.E., "A Third Order Accurate Upwind-Based Finite-Volume Scheme for Unsteady Compressible Viscous Flow", VAC Report 9370-154, Volvo Aero Corporation, Sweden, (1990).
- [7] Pope S.B., "Turbulent Flows", Cambridge University Press, 771pp, (2000)

Appendix A: Numerisk strömningsmekanik

I LES (Large Eddy Simulation) separeras strömningen i stor- och småskalig strömning. Detta görs för att kunna använda en lägre upplösning än den som krävs för en DNS (Direct Numerical Simulation), i vilken alla strukturer beaktas. Det grundläggande antagandet i LES är att det är den storskaliga turbulensen som är viktig medan den småskaliga turbulensens bidrag huvudsakligen är att dissipera energi. Rent analytiskt innebär detta att de styrande ekvationerna lågpasfiltreras med avseende på rumslig utsträckning. I Navier-Stokes ekvationer, och i verkligheten, kopplas emellertid alla skalorna samman. Därför krävs modellering av de ej upplösta skalorna. Denna filtrering medför att nya, ej upplösta termer dyker upp i ekvationerna. Så filtreras

$$\begin{aligned}\partial_t(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{S}, \\ \partial_t \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0,\end{aligned}\tag{A.1}$$

där $\mathbf{S}$ är spänningstensorn, till:

$$\begin{aligned}\partial_t(\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \otimes \tilde{\mathbf{v}}) &= -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{S}} - \mathbf{B}), \\ \partial_t \bar{\rho} + \nabla \cdot \bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} &= 0,\end{aligned}\tag{A.2}$$

där ” $\sim$ ” markerar att en Favré-filtrering gjorts för att ta hänsyn till variationer i densiteten. I (A.2) är $\mathbf{B}$, kallad subgridspänningstensorn, representerar effekten av de ej upplösta skalorna. Eftersom $\mathbf{B}$ representerar just ej upplösta processer måste $\mathbf{B}$ modelleras i termer av upplösta variabler. Detta görs normalt med hjälp av en av ett flertal existerande ’subgridskalem modeller’. För närvarande finns två modelleringsstrategier: *Funktionell modellering* vilken innebär modellering av verkan av subgridskalorna på de upplösta skalorna. Denna verkan är huvudsakligen av energetisk natur vilket innebär att endast energitransporten mellan de två skalområdena behöver modelleras. *Strukturell modellering* består av modellering av $\mathbf{B}$ utan att ta med någon kunskap om naturen hos växelverkan mellan de olika skalorna. Sådana modeller kan baseras på en serieutvecklingsteknik, balansekvationer, likhet mellan skalor eller andra deterministiska förhållningssätt. Här används funktionell modellering i vilken energitransporten från de stora skalorna till subgridskalorna antas vara likvärdig med en Brownsk rörelse så att,

$$\mathbf{B}_D = -2\nu_k \bar{\mathbf{D}},\tag{A.3}$$

där $\mathbf{B}_D$ är den deviatoriska delen (motsvarar skjuvning) av $\mathbf{B}$, ν_k är subgridviskositeten och $\mathbf{D}$ är deformationshastighetstensorn. För att sluta (A.3) behövs modeller för ν_k och k , den turbulenta kinetiska energin. För detta antar vi att det existerar karakteristiska längd- och hastighetsskalor (λ och v) och dessutom förutsätter vi separation mellan stora (upplösta) skalor och små subgridskalor. Bland dessa modeller finner vi den välbekanta Smagorinsky (SMG) modellen,

$$k = c_l \Delta^2 \|\bar{\mathbf{D}}\|^2, \quad \nu_k = c_D \Delta^2 \|\bar{\mathbf{D}}\|,\tag{A.4}$$

där Δ representerar maskvidden i beräkningsnätet och enekvationsmodellen (OEEVM) (efter eng. One Equation Eddy Viscosity Model),

$$\partial_t(k) + \nabla \cdot (k \mathbf{v}) = -\mathbf{B} \cdot \bar{\mathbf{D}} + \nabla \cdot ((\nu + \nu_k) \nabla k) + c_\epsilon k^{3/2} / \Delta, \quad \nu_k = c_k \Delta k^{1/2},\tag{A.5}$$

där modellkoefficienterna (c_l , c_D , c_k and c_ϵ) bestäms antingen från energispektrats karakteristiska beteende ($E \propto |k|^{-5/3}$) eller från ett dynamiskt tillvägagångssätt.

En mer detaljerad beskrivning av LES kan fås i exempelvis [7].

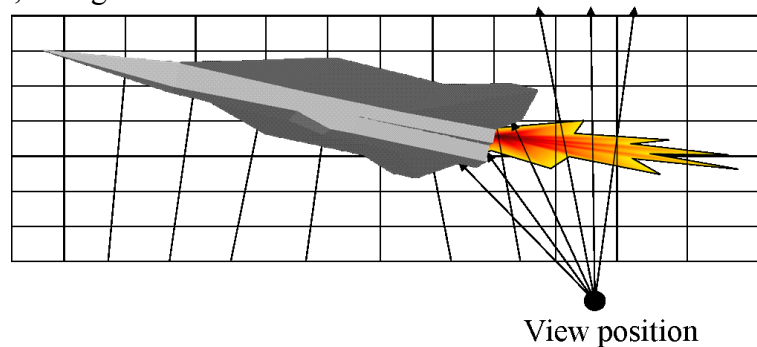
Appendix B: SIGGE

En kod, SIGGE, för beräkning av IR-signaturer har utvecklats av avdelningen för Flygteknik vid FOI. Koden bygger på att strålar dras genom ett CFD-nät och sedan beräknas IR-strålningens utbredning längs strålen (line-of-sight-metoden). Strålarna dras från en tänkt IR-sökare till olika delar på farkosten och dess motorstråle. Koden tar även hänsyn till reflektioner i kaviteter. Koden kan hantera alla upptänkliga geometrier med tillhörande CFD-lösningar. Koden är skriven i FORTRAN 90 och kan köras parallellt.

SIGGE kan hantera geometrier med hög komplexitet. Bidrag från gas, ytor och bakgrund kan beaktas och bidrag från olika ytor kan enkelt särskiljas. Resultatet presenteras som intensitetsspektra, radiansbilder, totalintensitet, totalradians och polärplottar. Bidrag från olika komponenter kan separeras ut.

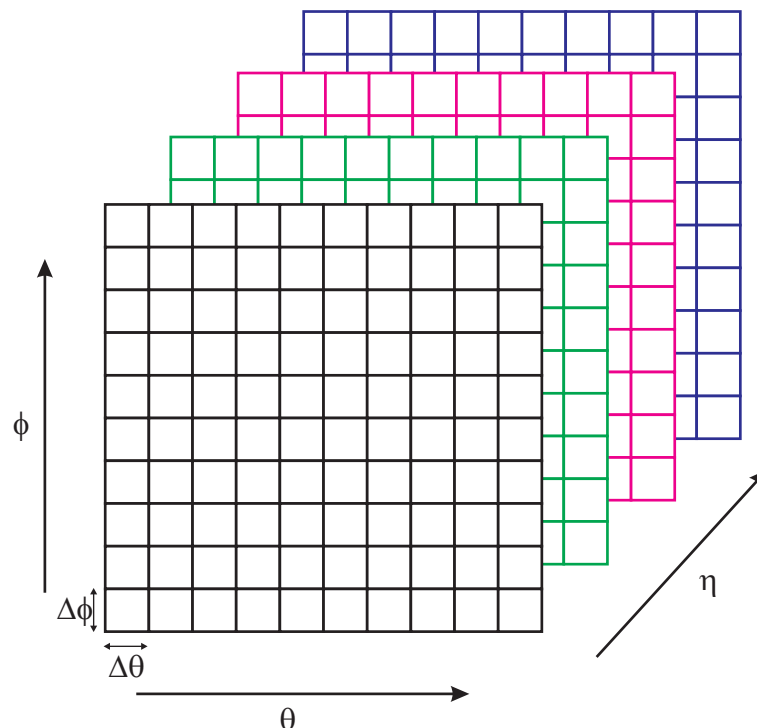
B.1: Detaljerad beskrivning av SIGGE

IR-signaturkoden SIGGE använder en CFD-lösning som indata. Det intressanta området är indelat i små volymer som ger ett nät, se Figur B1.



Figur B1: Strålar dras från "view position" mot objektet i fråga genom beräkningsnätet.

I varje volymenhet (celler) ger CFD-lösningen ett värde för variabler som temperatur, tryck och gaskoncentration. Användaren definierar en imaginär sensor, som består av ett plan med ett antal pixlar, vilket ger en IR-bild för varje specificerat vågtal, se Figur B2.



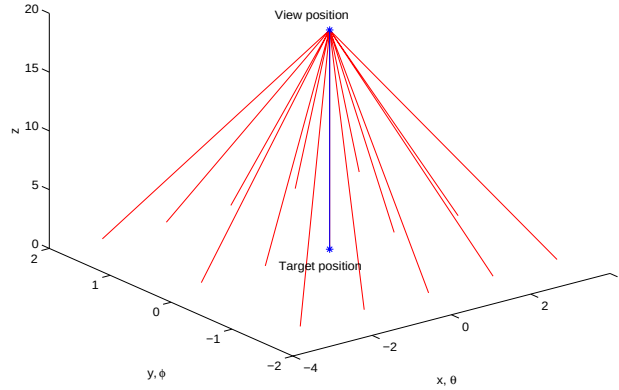
Figur B2: Imaginär sensor definierad av användaren. Sensorn beräknar en bild för varje vågtal, η . Varje pixel har ett "field-of-view" på $\Delta\theta \times \Delta\phi$.

Varje pixel har ett "field-of-view" på $\Delta\theta \times \Delta\phi$, vilket ger ett totalt "field-of-view" på $n_\theta \Delta\theta \times n_\phi \Delta\phi$, där n_θ och n_ϕ är antalet pixlar i θ - och ϕ -riktningarna. Antalet strålar som dras genom nätet, $n_\theta \times n_\phi$, och vinkelupplösningen, $\Delta\theta \times \Delta\phi$, definieras av användaren.

Användaren definierar även "view position", vilket är den position som den imaginära sensorn är placerad i, och "target position", vilket är den position i rummen som sensorn är riktad mot. "Target position" är även den position som bildplanet alstras i.

All denna information används för att dra strålar från "view position" genom nätet. Varje stråle skiljer sig från sina grannar med vinklarna $\Delta\theta$ och $\Delta\phi$. Alltså kommer varje stråle motsvara en pixel på den imaginära sensorn. I Figur B3 är en "view position" och en "target position" definierad. I detta fall kommer riktningen av sensorn gå parallellt med z-axeln. Den imaginära sensorn och bildplanet kommer därför att sammanfalla med x-y-planet. θ -riktningen kommer då att gå parallellt med x-axeln och ϕ -riktningen parallellt med y-axeln.

Ett användarinterface, XSIGGE, är under utveckling. XSIGGE hjälper användaren att definiera de olika parametrarna som behövs.



Figur B3: Strålar dragna från "view position", där den centrala strålen är dragen mot "target position". Varje stråle skiljer sig från sina grannar med vinklarna $\Delta\theta$ och $\Delta\phi$.

Om geometrin är axi-symmetrisk behöver inte hela rummen definieras upp. Nätet kommer att speglas runt symmetriaxeln och värden från CFD-lösningen kommer att associeras med celler i det virtuella nätet. SIGGE kan hantera nät som definierar halva rummen eller en fjärdedel av rummen, med ett respektive två symmetriplan.

Den spektrala radianzen, L_η , för de ingående komponenterna, gas, vägg och bakgrund, beräknas för varje stråle och adderas:

$$L_\eta^{\text{gas}} = \sum_{i=1}^{\# \text{celler}} (L_{b\eta}^i (\tau_{\eta,i-1} - \tau_{\eta,i})) \quad L_\eta^{\text{bakgrund}} = L_{b\eta}^{\text{bakgrund}} \tau_{\eta, \# \text{celler}}$$

$$L_\eta^{\text{vägg}} = \varepsilon(\theta) L_{b\eta}^{\text{vägg}} \tau_{\eta, \# \text{celler}} \quad L_\eta^{\text{total}} = L_\eta^{\text{gas}} + L_\eta^{\text{vägg}} + L_\eta^{\text{bakgrund}}$$

I ekvationerna ovan är η vågtalet, $\tau_{\eta,i}$ transmissiviteten från i :te cellen till "view position", ε är den vinkelberoende emissiviteten från väggen och $L_{b\eta}^{\text{bakgrund}}$ är bidraget från bakgrunden definierad vid randen av nätet. $L_{b\eta}$ är den spektrala svartkroppsstrålningen som ges av:

$$L_{b\eta} = \frac{2\pi h c_0^2 \eta^3}{\pi (e^{hc_0 \eta / kT} - 1)} = \frac{C_1 \eta^3}{e^{C_2 \eta / T} - 1} \quad \text{där} \quad C_1 = 2hc_0^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$C_2 = hc_0 / k = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ Km}$$

Här är h Plancks konstant, c_0 ljusets hastighet i vacuum, k Boltzmanns konstant och T temperaturen.

Den spektrala intensiteten, I , ges av:

$$I_\eta = L_\eta \times A$$

där A är arean av bildplanet. En mer utförlig beskrivning av SIGGE finns i referens [1].

Del 2.

Innehållsförteckning

Inledning	18
Atomisering, sprayning.....	18
Reologi.....	19
Förbränning.....	19
Logistik	20
Gelning av bränslet	20
Material och metoder	21
Kemikalier.....	22
Gelning av JP-10.....	23
Mekaniska egenskaper hos framställd gel	24
Resultat och diskussion.....	24
Slutsatser	25
Sprayning	25
Försöksuppställning	26
Resultat	28
Förslag till fortsatt arbete.	28
Referenser	29
Bilagor.....	29
Bilaga 1. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid -40°C	30
Bilaga 2. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 0°C.....	33
Bilaga 3. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 20°C.....	36

Inledning

Det finns flera anledningar till att gela ett bränsle. Bland annat blir riskerna vid transport och hantering mindre eftersom det vid eventuellt läckage inte rinner ut lika stor mängd bränsle, samt att det som rinner ut inte får samma utbredning, se figur 1 och 2. En annan fördel är att det går att erhålla en stabil suspension med energirika fasta partiklar, som t.ex. bor. Detta ger en möjlighet att skapa nya bränslen med högre vikt- och volymspecifik impuls.



Figur 1. 50 ml JP-10



Figur 2. 50 ml gelad JP-10

Bränslet som användes under försöken beskrivna i denna rapport är JP-10 som gelats med Cab-O-Sil® (SiO_2), vilket är ett oorganiskt gelningsmedel. De flesta oorganiska gelningsmedel är inerta dvs. deltar inte i förbränningen. Detta leder till att både vikt- och volymspecifika impulsen för det gelade bränslet minskar jämfört med samma bränsle ogelat. Ett sätt att undvika en inert komponent i bränslet är att använda ett organiskt gelningsmedel, med andra ord en polymer. Ett gelat bränsle ger flera fördelar men ställer också andra krav jämfört ett ordinärt flytande bränsle inom områden som atomisering, reologi, förbränning och logistik.

Atomisering, sprayning

Vid atomisering av bränslen är det för det mesta fördelaktigt med så små droppar som möjligt eftersom dessa är både lättare och snabbare att förånga och förbränna.

Det är många parametrar som styr droppstorleken vid atomisering. För det mesta är den viktigaste parametern vätskans viskositet, men om en polymerlösning skall atomiseras tillkommer en parameter som påverkar droppstorleken än mera, nämligen förlängningsviskositeten. Det finns en hel uppsjö olika metoder att atomisera vätskor. Som kuriosas kan nämnas att en av de största tillverkarna av munstycken har mer än 87 000 modeller att välja mellan.

Reologi

Hos ett gelat bränsle är det viktigt att känna dess reologiska egenskaper, tex. viskositet, gelstyrka, skjuvtunnande, tixotropi, förmåga att bära partiklar, förlängningsviskositet, etc.

En vanlig vätska som tex. vatten är en Newtonsk vätska, dvs. viskositeten är linjär med skjuvhastigheten. Icke-Newtonska vätskor är de som inte går att beskriva med Navier-Stokes ekvationer. Alla viskoelastiska vätskor är icke-Newtonska, men alla icke-Newtonska är inte viskoelastiska. En elastisk polymerlösning som är skjuvtunnande har ofta en stark ökning i förlängningsviskositet. Även mycket utspädda polymerlösningar av flexibla polymerer kan ha extremt hög förlängningsviskositet. Det är mycket viktigt att känna till om vätskan är sträckningstunnande eller förtjockande (jmf skjuvtunnande). Vid atomisering är töjningshastigheterna ofta höga och förlängningsviskositeten ökar kraftigt med töjningshastigheten, dvs. med ett normalt bränsle erhålls finare droppar med ökad injektionshastighet men detta behöver inte vara sant för en polymerlösning.

Upptäckten av förlängningsviskositet är förhållandevis ny jämfört med klassisk viskositet.

Förlängningsviskositet uppträder hos polymerer och lösningar med polymerer. Den kan enkelt beskrivas som att polymerkedjorna fungerar som fjädrar, dvs. efter att vätskan har töjts har den förmågan att dra ihop sig igen. Förlängningsviskositeten framträder tydligt när en polymer extruderats. Efter att den pressats ut ur munstycket sväller den till en tvärsnittsarea som är större än munstyckets, detta fenomen kallas normalt för "die-swell". De vanligaste botemedlen vid stor "die-swell" är att sänka extruderingshastigheten eller att använda ett mycket långt extruderingsmunstycke.

Förbränning

En avgörande egenskap vid förbränning är förångningshastigheten hos bränslet.

Med ett bränsle som består av endast en molekyl tex. JP-10 är det förhållandevis lätt att bestämma förångningshastigheten. Detta tillsammans med droppstorleken ligger till grund för dimensionering av brännkammaren. När flera komponenter ingår i bränslet blir det betydligt mer komplicerat, speciellt om ångpunkterna skiljer sig väsentligt och antalet faser bränsledroppen genomgår under förångningen.

Förbränningen av en multikomponent bränsledroppe med brännolja (eng. medium to heavy fuel oil drop) kan beskrivas i fem steg [1]:

1. Upphettnings av droppen och förångning av komponenter med låg ångpunkt.
2. Självantändning och förbränning med någon termisk nedbrytning samt förångning av flyktiga komponenter.
3. Utbredd genomslagskokning (eng. disruptive boiling) och uppsvällning av droppen med termisk nedbrytning som ger tung tjära.
4. Förbränning av återstående flyktiga vätskor och gaser från nedbrytningen av tjäran, vilken kollapsar och bildar en kolstruktur (eng. cenosphere).
5. Långsam heterogen förbränning av kolstrukturen.

Logistik

Ett gelat bränsle måste hanteras annorlunda logistiskt då det inte går att pumpa och hälla som ett traditionellt flytande bränsle.

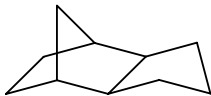
Tänkvärda hanteringsproblem:

- Går ej att suga upp med pump.
- Behöver troligen pressas ur bränsletanken med t.ex. en ballongtank eller en cylindertank med kolv.
- Hur får man bort luftblåsor i bränslet?
- Troligen måste tank och rörledningar vakuumpumpas innan tankning. Detta kan ge kavitation i gelen när tankningen påbörjas, vilket i sin tur kräver omrörning för att undvika klumpning i tanken.

Gelning av bränslet

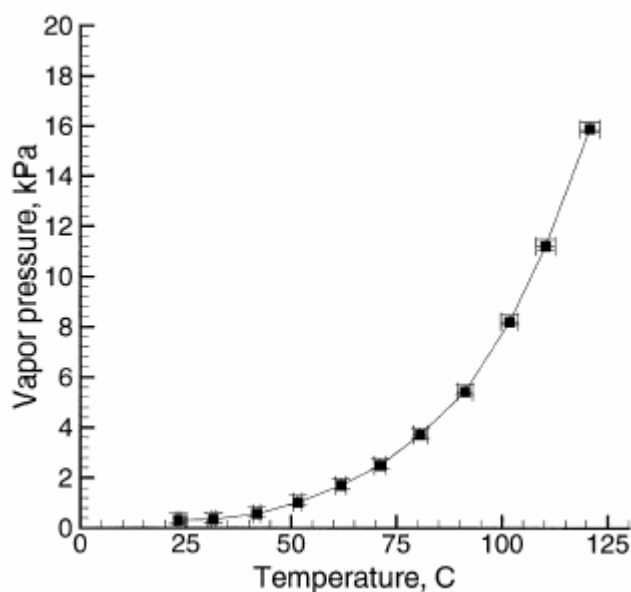
Jetbränslet *Jet Propulsion-10* (JP-10) används idag till robotar inom den amerikanska militären och även inom Försvarsmakten, bland annat i RBS 15. JP-10 består av en enda molekyl-exotetrahydrodicyklopentadien- och är därmed kemiskt sett ett väldefinierat bränsle. Ämnet har egenskaper som lämpar sig väl för användningen som ett bränsle i robotmotorer, bland annat hög densitet, relativt hög flampunkt (jämfört med petroleumdestillat) och bra lågtemperaturegenskaper. Några av egenskaperna hos JP-10 är sammanfattade nedan (Tabell 1).

Tabell 1 Fysikaliska och kemiska egenskaper för *Jet Propulsion-10* (JP-10). [2, 3]

Egenskap	Enhet	Värde
Summaformel	C_xH_y	$C_{10}H_{16}$
Densitet	g/cm^3	0,94
Smältpunkt, T_m	$^{\circ}C$	-110
Flampunkt	$^{\circ}C$	54
Värmevärde	MJ/m^3	39,6
Specifik impuls	s	297,4
Molekylstruktur	-	

Exotetrahydrodicyklopentadien (JP-10) är en termiskt stabil molekyl som även vid högre temperaturer ($>600^{\circ}C$) endast bildar en mindre mängd sönderfallsprodukter såsom alkaner, alkener, cykloalkener, cyklopentadiener och alkylbenzener.[3]

JP-10 är lämpligt som bränsle ur säkerhetsmässig synvinkel, då föreningen har ett lågt ångtryck över ett brett temperaturområde (Figur 3).



Figur 3 Uppmätt ångtryck för JP-10 vid olika temperaturer.[4]

En förbättring av de säkerhetsmässiga aspekterna med JP-10 som robotbränsle, avseende hantering, flyktighet och brandfarlighet kan ske genom gelning av ämnet. Projektets fokus har legat på att genomföra gelningsförsök med lämpligt gelmedel för att få fram en gel med lämpliga mekaniska egenskaper för tillämpning som robotdrivämne. En inledande karakterisering av framställd gel har varit målsättningen tillsammans med genomförandet av utsprutningsförsök av gelen i försöksrigg. Detta för att simulera gelens beteende under kraftig mekanisk påverkan, vilket sker under ett eventuellt framdrivningsförlopp hos en utskjuten robot.

Material och metoder

Inledningsvis genomfördes gelningsförsök med alifatiska kolväten (opolära) och vatten (polärt) för att utvärdera skillnaden i gelningsbeteende hos material med opolära och polära egenskaper. Cab-O-Sil® valdes som gelningsmedel då det är ett gelämne med välkända egenskaper, samt även kommersiellt lättillgängligt. Det visade sig i dessa försök att betydligt större mängder gelmedel i form av amorft kiseldioxid (Cab-O-Sil®) krävdes för att uppnå en högre viskositet hos vatten än för motsvarande mängd alifatiska kolväten. Homogena blandningar kunde framställas utan problem och gelförsöken gick vidare med gelning av JP-10 med samma gelmedel som använts i de inledande försöken.

Kemikalier

De kemikalier som använts vid framställning av gelad JP-10 är sammanfattade nedan (Tabell 2):

Tabell 2 Kemikalier som använts vid gelningsförsök med bränsle

Kemikalie	Empirisk formel	Funktion
JP-10	$C_{10}H_{16}$	Bränsle
Cab-O-Sil [®]	SiO_2	Gelmedel
Magnesiumsulfat	$MgSO_4$	Torkmedel

Gelmedlet Cab-O-Sil[®] (Cabot Corporation, USA) är en amorf form av kiseldioxid som framställs vid hög temperatur (1800°C) under samtidig förbränning i vätgas och syrgas av kiseltetraklorid. Förbränningsreaktionen skapar kiseldioxidmolekyler som kondenserar och bildar kiseldioxidpartiklar. Dessa i sin tur bildar sedan vid avkylning (<1710°C) SiO_2 -aggregat som är 0,2-0,3 µm långa. [5] Agglomerering av dessa mikrometerstora kiseldioxidaggregat bildar till sist det fluffiga pulver som utgör den amorfa kiseldioxiden (Figur 4).



Figur 4 Gelmedlet Cab-O-Sil[®] i ren form.

Valet av Cab-O-Sil[®] som gelmedel togs på grund av materialets inerta egenskaper, samt att kiseldioxid i sig är en mycket termiskt stabil förening. Det oorganiska materialet är också bättre att använda för inledande utsprutningsstudier, då förlängningsviskositetsfenomenet ej uppstår. Några av egenskaperna hos Cab-O-Sil[®] är sammanfattade nedan (Tabell 3).

Tabell 3 Egenskaper hos gelmedlet Cab-O-Sil[®]. [5]

Cab-O-Sil [®]	Refraktivt index	Densitet (g/cm ³)	Intermolekylär struktur	Vatteninnehåll (vikt-%)	Ytarea (m ² /g)	Renhet
Egenskap	1,46	0,04-0,05 (0,08) (komprimerad)	Amorf	<0,5	200	<60 ppm HCl

Gelning av JP-10

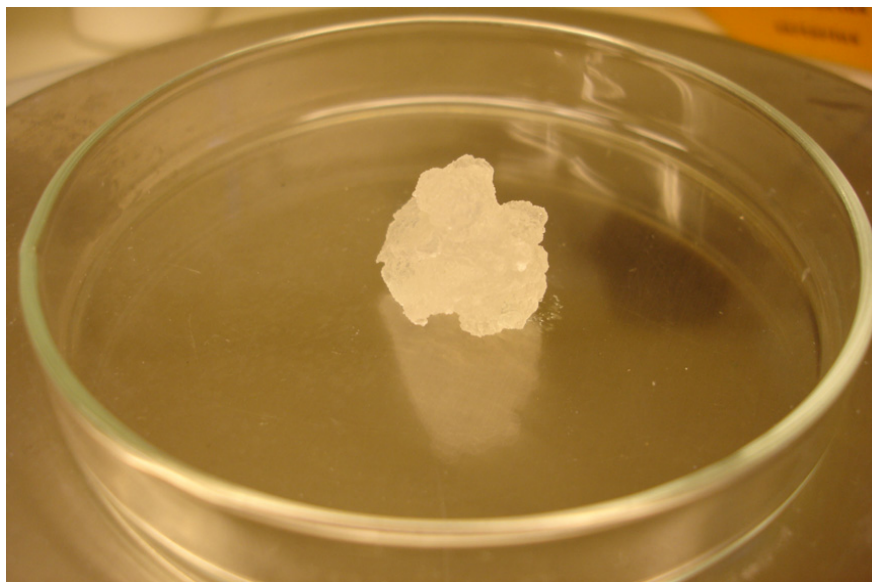
Torkning av JP-10 (1,0 kg) skedde före gelning genom tillsättning av magnesiumsulfat (50 g) för att avlägsna eventuellt närvarande vatten. Magnesiumsulfatet filtrerades av direkt efter genomförd torkning. Gelmedlet (Figur 4) torkades genom värmning i ugn vid 110°C i 2,0 timmar.

Gelning av JP-10 skedde därefter för hand genom uppvägning av bestämd mängd JP-10 i glasbägare med efterföljande portionsvis tillsättning av gelmedel (Figur 5).



Figur 5 Upphållad JP-10 (vänster) och portionsvis iblandning av gelmedel (höger).

Den framställda gelen innehöll 7,5 vikt-% kiseldioxid och var något opak, troligtvis på grund av innesluten luft i matrisen. Gelen bibehöll formen vid utläggning på petriskål (Figur 6). En mindre mängd gel togs ut för karakterisering, medan resterande mängd användes för experimentellt bruk i försöksrigg.



Figur 6 Gelad JP-10 med 7,5 vikt-% kiseldioxid (Cab-O-Sil®).

Mekaniska egenskaper hos framställd gel

En inledande analys av de mekaniska egenskaperna hos den framställda JP-10-gelen genomfördes med reometer (StressTech Rheologica) vid -40, 0 och 20 grader Celsius, där den dynamiska gelstyrkan uppmättes vid frekvensen 1 Hz. En slät bottenplatta av stål användes tillsammans med en slät 20 mm topplatta av aluminium. Gapet mellan plattorna vid analys var 1,000 mm. Mätintervallet var 5 sekunder. En mer detaljerad återgivning av specificerade parametrar är beskriven i Bilaga 1-3.

Resultat och diskussion

JP-10 med 7,5 vikt-% gelmedel bedömdes vara en stark gel vid alla tre temperaturer, då skjuvmodulen G' $\gg G''$ (förlustmodulen), samt att G' och G'' uppvisade konstanta värden över ett brett frekvensområde (Bilaga 1-3). Gelstyrkan är det konstanta värde G' antar i det linjära viskoelastiska området för gelen vid aktuell mättemperatur och de uppmätta värdena för gelstyrkan hos JP-10-gelen är angivna nedan (Tabell 4).

Tabell 4 Uppmätt gelstyrka vid olika temperaturer hos gelad JP-10 (7,5 vikt-% Cab-O-Sil®).

Ämne	Temperatur (°C)	Gelstyrka, G' (Pa)
JP-10 med 7,5 vikt-% SiO ₂	20	20000
”	0	31000
”	-40	45000

Slutsatser

Framställning av gelad JP-10 fungerar bra i liten skala (<1 kg) vad avser tillverkningsprocedur och homogenitet på gelen. Amorf kiseldioxid är ett bra gelmedel ur kompabilitetssynpunkt, men bidrar ej till förbränningen, då materialet är helt inert. Gelegenskaperna går att styra genom tillsats av önskad mängd eller kvalitet kiseldioxid, i detta fall Cab-O-Sil®.

Gelen bibehåller formen över tiden i fritt tillstånd, vilket medför att gelen är bättre än ett motsvarande drivämne i vätskeform ur säkerhetssynpunkt.

Nackdelen med gelen är dock att en iblandning av 7,5 vikt-% inert material borde påverka prestandan hos bränslet negativt och att vid tillverkning kan eventuell inneslutning av luft ytterligare sänka prestandan hos bränslet, samt orsaka inhomogeniteter.

En framställningsprocess som minimerar luftinneslutningar är därför ett måste vid gelning av JP-10 och andra vätskedrivämnena.

Sprayning

För att undersöka om det gelade bränslet gick att atomisera på samma sätt som ett flytande bränsle konstruerades en försöksanordning som sönderdelar bränslet med hjälp av en luftström, så kallad aerodynamisk atomisering. Aerodynamisk atomisering är en teknik som ofta används i luftförbrukande motorer och lämpar sig väl för bränslen med hög viskositet.

Det gelade bränslet, figur 7, består av 92,5 viktprocent JP-10 och 7,5 viktprocent av gelningsmedlet Cab-O-Sil®. Figur 7 visar gelat bränsle.

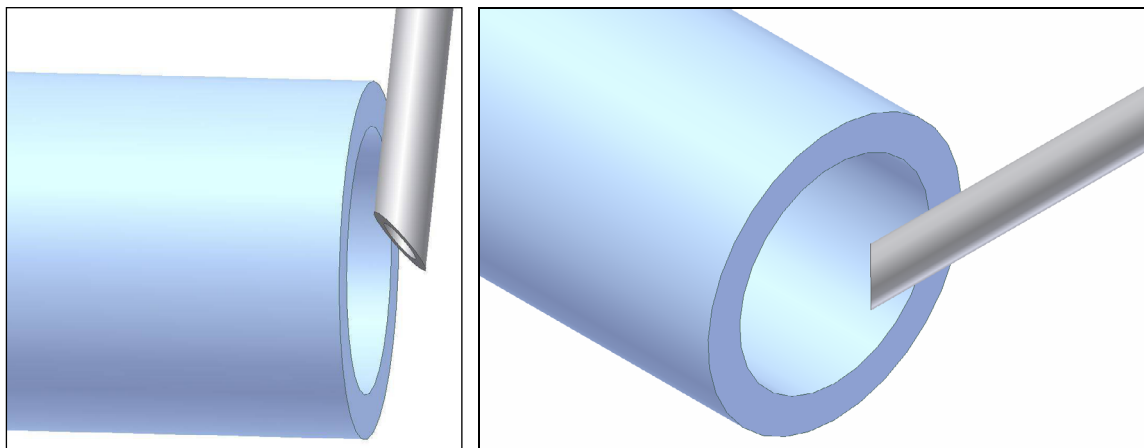


Figur 7. Gelat bränsle. Burköppningen är 5,5 cm invändigt.

Tanken en kolv/cylindertank fylldes med hjälp av spateln i fig. 7. Tanken och gelen avluftades hjälpligt med kraftiga vibrationer.

Försökuppställning

Försökuppställningen bygger på tekniken luftassisterad atomisering, där bränslet injiceras i en luftström som sedan ska slå sönder bränslet. Utan en assisterande luftström kommer inte bränslet att atomiseras dvs ett vätskebränsle sprutas ut i en sammanhängande stråle och ett gelat bränsle i strängar (korv). Luften matas ut från ett rör med 6 mm innerdiameter. I anslutning till luftutloppets mitt är bränslemunstycket placerad. Bränslemunstycket har en innerdiameter/ytterdiameter om 0,8 mm respektive 1,3 mm. Munstyckets spets är vinklad mot luftströmmen för att undvika undertryck i munstycket, vilket blir fallet då munstyckets spets vinklas med luftströmmen. Undertryck i munstycket gör att bränslet i gelen förångas och lämnar gelningsmedlet kvar vilket leder till att munstycket sätter igen. Om munstycket har för liten diameter pressas bränslet ut ur gelen med stopp i munstycket som följd. Figur 8 visar munstycket och luftutloppet.



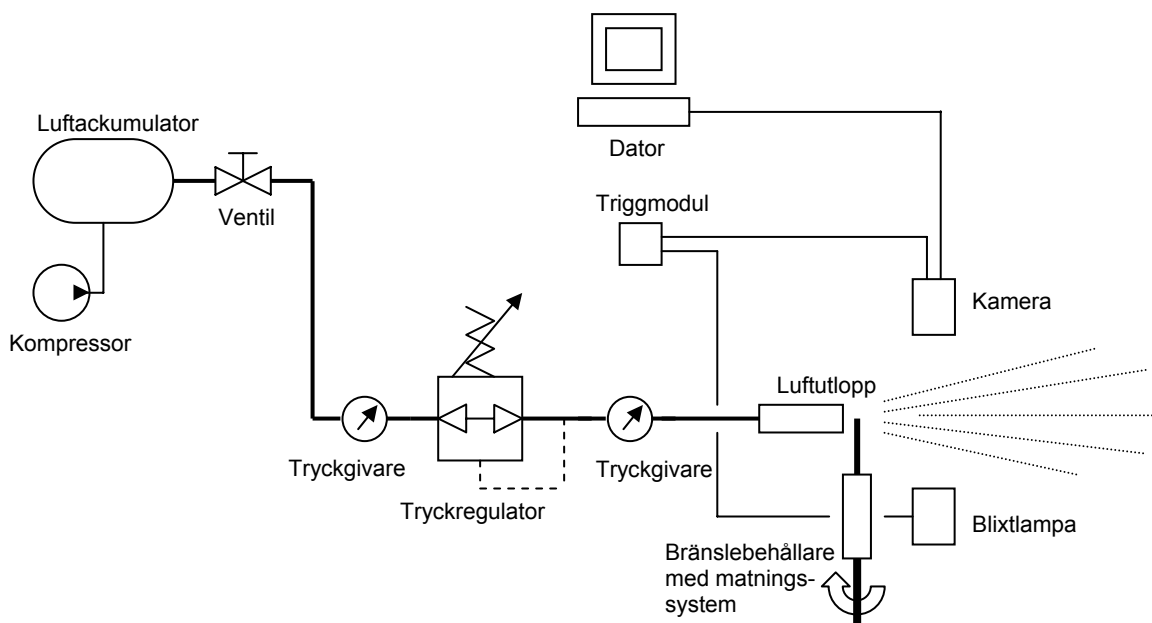
Figur 8. Munstycket och luftutloppet.

Frammatning av bränslet till nålen sker genom att en kolv pressar bränsle ur en bränslebehållare vars innerdiameter är 32 mm. Kolven är ansluten med en gängad axel vilken ska roteras för att mata bränsle. Stigningen på gängorna och varvtalet skruven roteras med ger ett visst bränsleflöde.

I dessa försök var bränslets volymflöde 0,7 dl/min vilket gav ett massflöde för JP-10 om ca 0,66 g/s. Luftens systemtryck var vid samtliga försök 1,5 bar vilket gav ett volymflöde på ca 10 m³/h och ett massflöde på ca 3,3 g/s. För att erhålla en stökiometrisk blandning skall massförhållandet mellan luft och JP-10 vara 14,2 ($A/F = 14,2$). Under försöken var bladningsförhållandet $A/F = 5$ vilket kan vara rimligt då sprayen sprutas in i en brännkammare där luft redan finns.

Luftens hastighet vid utloppets mynning var uppskattningsvis ca 300 m/s och bränslets hastighet i munstycket var 1,4 m/s.

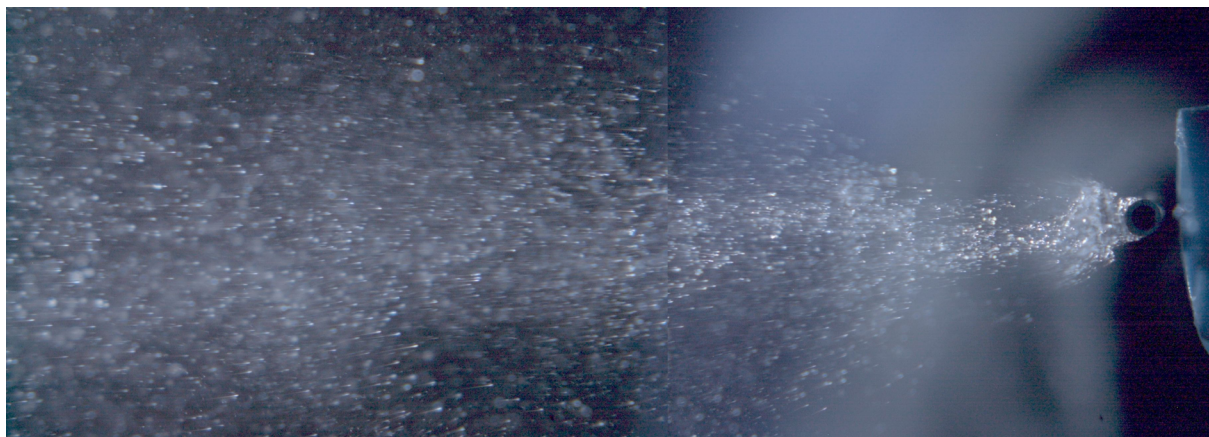
För att registrera spraybilden användes en digitalkamera (Nikon D1) och en blixtlampa (Perkin Elmer MVS-2601-CE96) med en typisk ljuspulslängd på 4,6 μ s. Kameran placerades vinkelrätt mot luftströmmen och var försedd med ett 105 objektiv (MicroNikkor 105) som ställdes in för att få ett bildfält som var ca 2 cm lång och skärpan lades där spraybildens yta förväntades vara. Blixtlampan placerades mitt i mot kameran. Försöken utfördes i ett mörklagt rum med blixtlampan som enda ljuskällan för att minimera rörelseoskarpan vilken då endast blir beroende av blixtlampans ljuspulstid. För att synkronisera kameran och blixtlampan användes en triggmodul som först skickade ut en signal till kameran som då öppnade slutaren, sedan en signal till blixtlampan som då avfyrades. Kamerans slutartid, upplösning, ljuskänslighet m.m. kontrollerades från en dator där även bilden som togs hamnade. Figur 9 visar en schematisk bild över försökssupställningen.



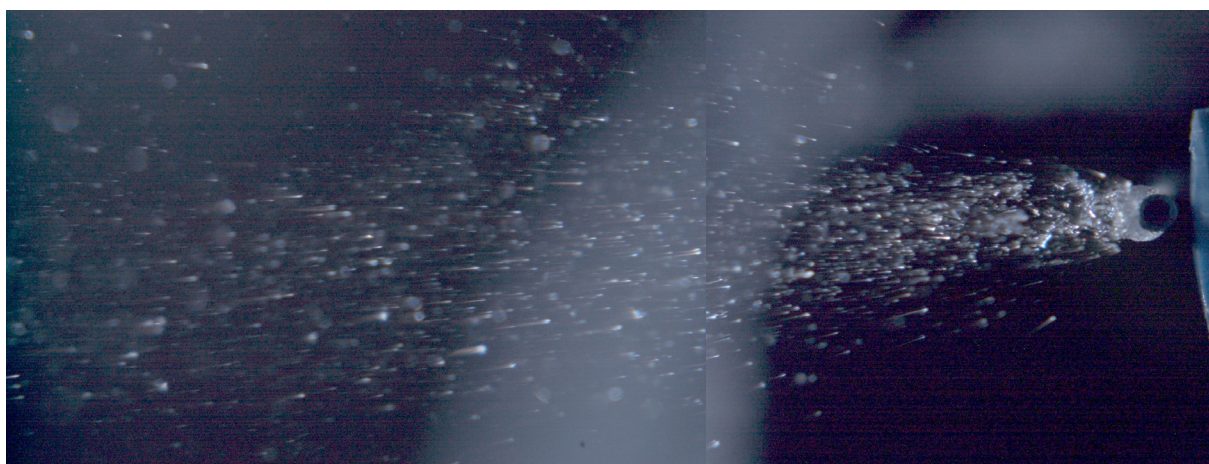
Figur 9. Försökssupställningen.

Resultat

Som referens sprayades vatten. Figur 10. visar ett försök med vatten och figur 11. ett försök med gelat bränsle. Respektive figur består av två sammanfogade bilder där ett är taget med munstycket med i bildfältet, därefter har kameran vridits och ytterligare en till bild tagits för att få ett längre bildfält.



Figur 10. Vatten. Bildfältet är 14 mm x 36 mm.



Figur 11. Gelat bränsle. Bildfältet är 14 mm x 36 mm.

Samma luftflöde och vätskeflöde användes i båda fallen, det är alltså samma volym vatten som gel som atomiseras. Figurerna 10 och 11 visar tydligt att det blir betydligt fler droppar då vattnet atomiseras än då gelen atomiseras vilket betyder att droppstorleken hos vattnet är betydligt mindre än hos gelen. En uppskattning ur bilderna ger en typisk droppdiameter hos vatten på 50 μm och hos gelen på 100 μm . En halvering av diametern vid given totalvolym ger fyra gånger fler droppar, vilket är rimligt om man jämför figurerna.

Förslag till fortsatt arbete.

Ett fortsatt arbete inom geladebränslen bör delas upp i två steg:

Steg 1. Framtagning och grundläggande studier av lämpliga gelningskandidater för t.ex. JP-10, med avseende på kemiska, reologiska egenskaper samt energiinnehåll.

Steg 2. När ett antal lämpliga gelningskandidater tagits fram, bör vidare arbete ske i samarbete med universitet/högskola som har tillgång till avancerad utrustning för atomiseringsanalys och förbränningsanalys. Givetvis är det en stark återkoppling till steg 1.

Referenser

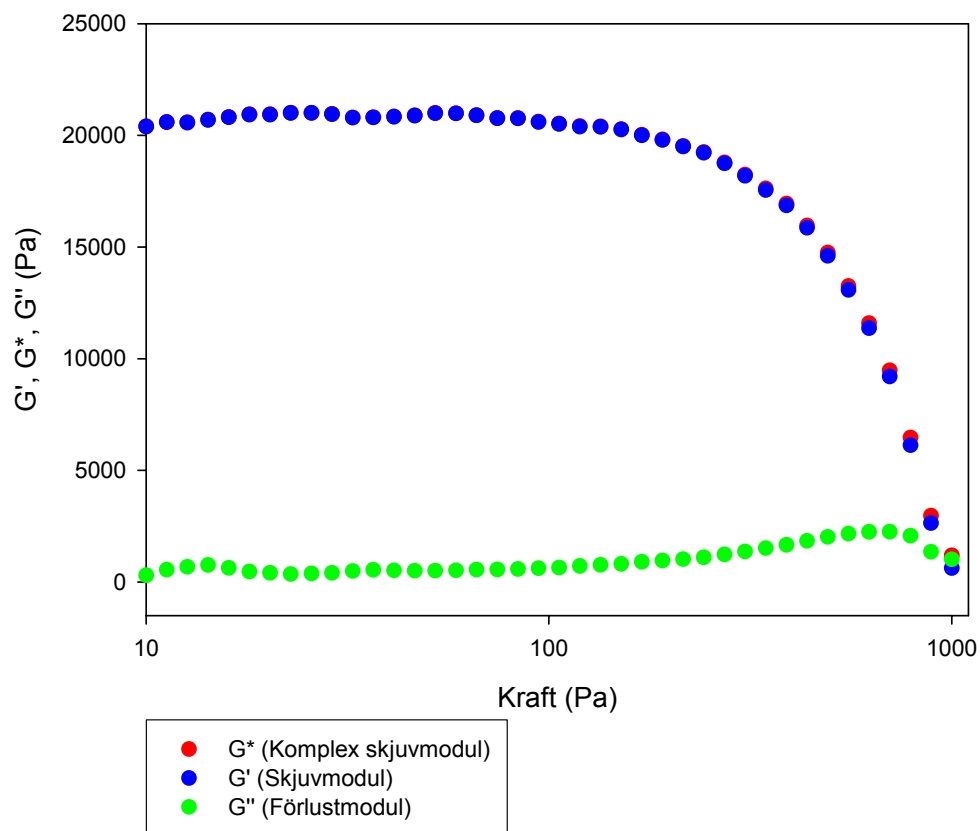
1. Lefebvre, A H., *Atomization and Sprays*. 1989 ISBN 0-89116-603-3
2. Sandén, R., *Flytande och gelade drivämnen för raket- och rammotorer*. 2000, Vapen och Skydd: FOI. p. 20.
3. Striebich, R.C. and J. Lawrence, *Thermal Decomposition of high-energy density materials at high pressure and temperature*. J. Anal. Pyrolysis, 2003. **70**: p. 339-352.
4. Shepherd, J.E. and J.M. Austin, *Detonations in hydrocarbon fuel blends*. Combustion and Flame, 2003. **132**: p. 73-90.
5. Cabot Corporation, *Product Information Sheet: Cab-O-Sil® Untreated Fumed Silica - Properties & Functions*, p.35

Bilagor

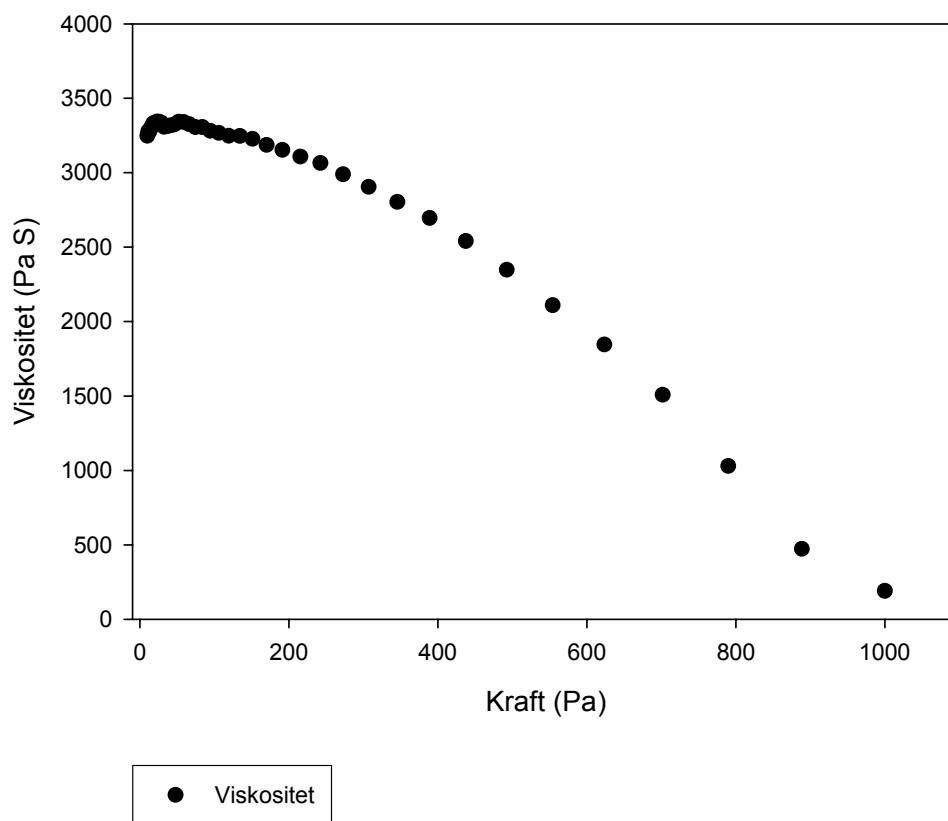
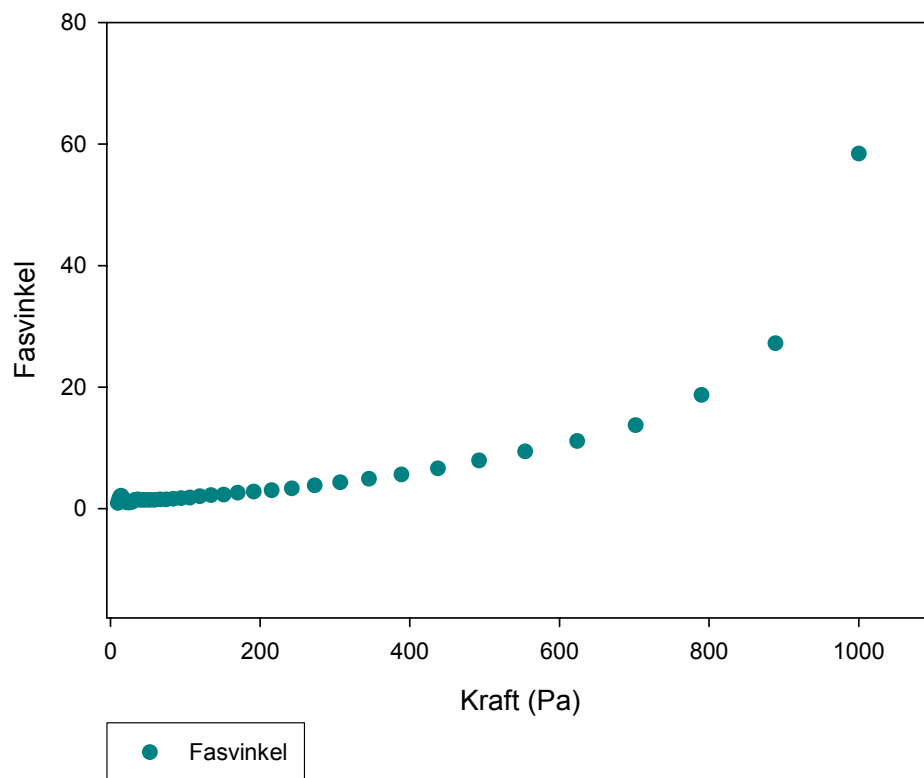
1. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid -40°C.
2. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 0°C.
3. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 20°C.

Bilaga 1. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid -40°C

Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid -40 grader C och 1Hz



Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid -40 grader C och 1Hz



Energetic Materials

StressTech

REOLOGICA Instruments AB

Oscillation stress sweep

2004-08-18 17:25:08

Oscillation Stress Sweep Gel br E2383 7,5wt% gelmedel (SiO₂) i JP-10

DMG

Stress sweep för att bestämma det linjära viskoelastiska området för materialet.

Applied stress from 10¹ till 10³ Pa, 1 Hz, -40gr C, delay time 1 s, integration periods: 3,

P 20 ETC Disp Gap 1.000 mm

Sample loading method: To gap

Maximum loading force 6.366E+4Pa Proceed when force is below 1.273E+4Pa or when waiting more then 1.000E+3s

Prompt for rotor release

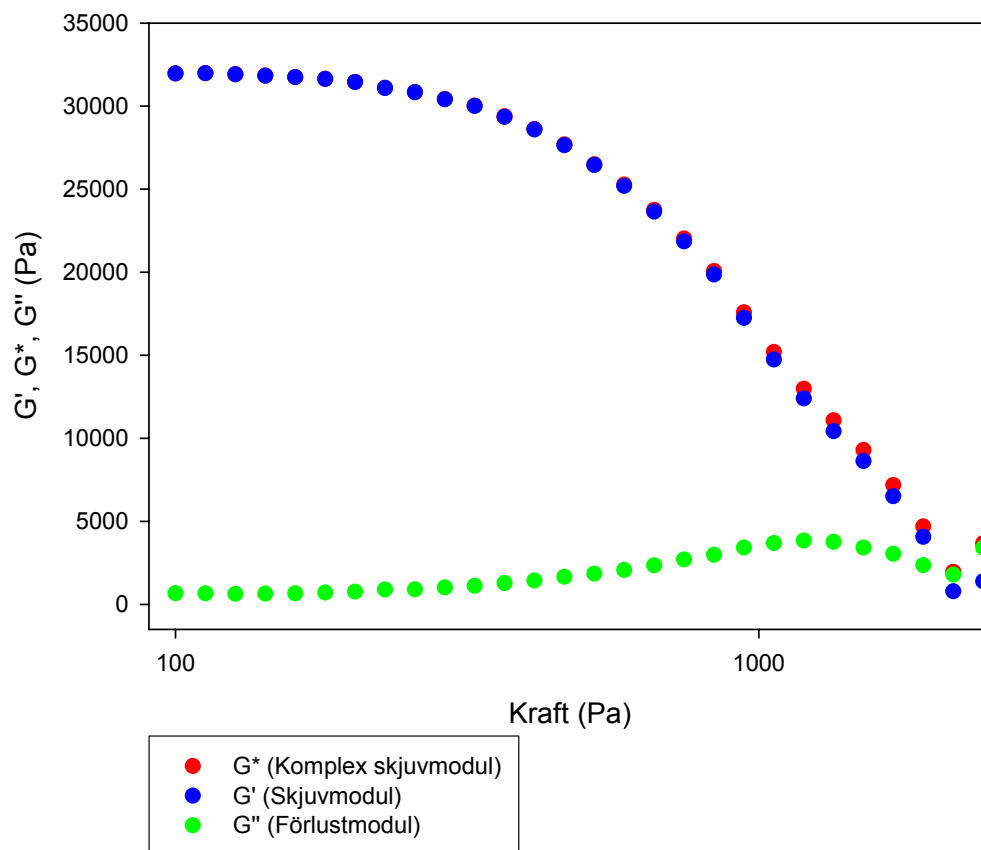
Manual control Number of measurements 1 Measurement interval 5.000E+1 s

Frequency table Frequency 1.000E+0 Hz Delay time 1.000E+0 s Integration periods 3 FFT size 512

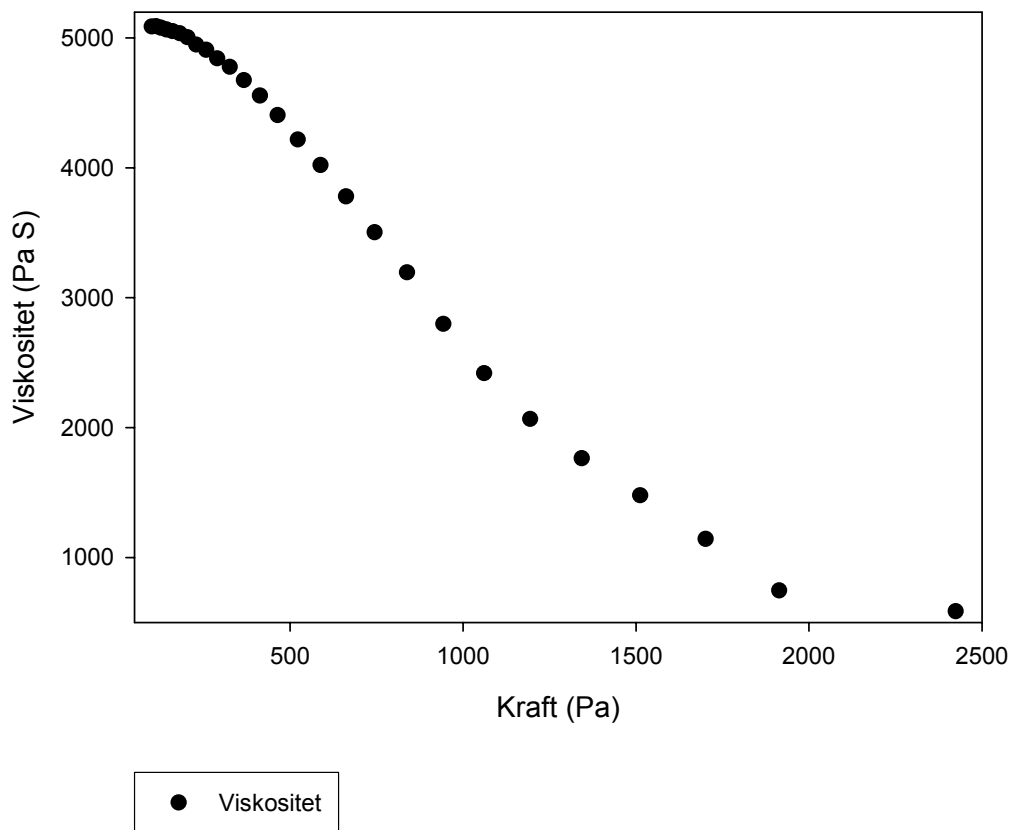
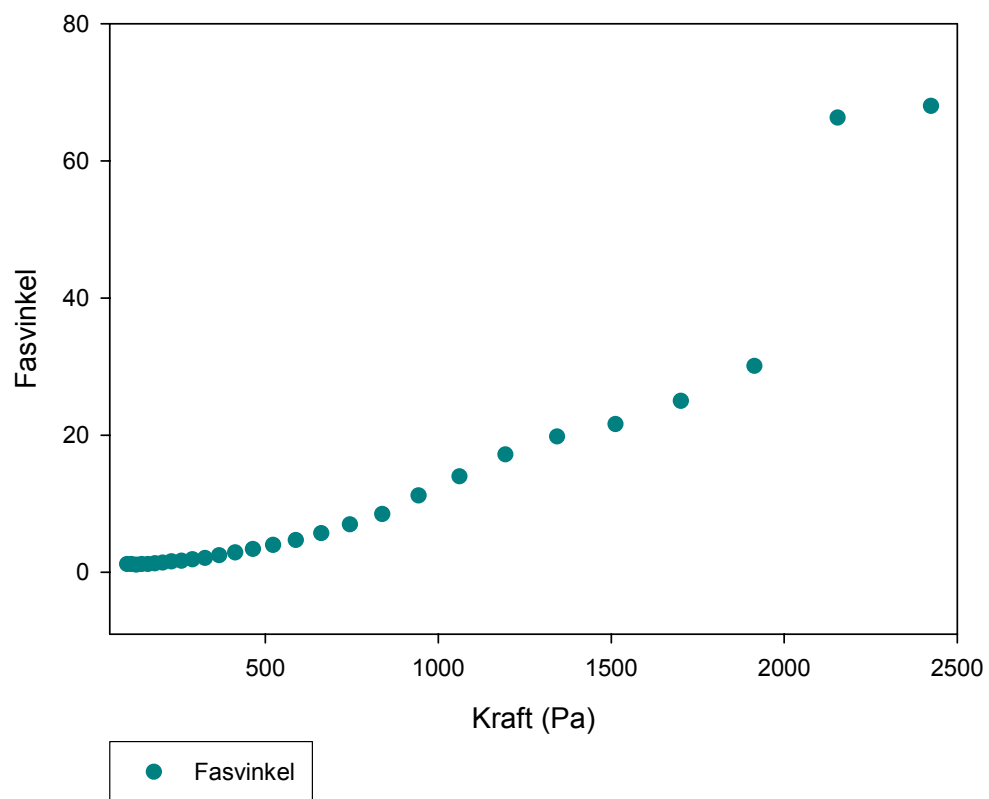
Time s	Temperature °C	Frequency Hz	Stress Pa	Strain	Phase degree	G* Pa	G' Pa	G'' Pa	Viscosity* Pa s
1,1	-42,2	1,0	10,0	0,0	0,9	20400	20400	307,6	3247
8,1	-42,2	1,0	11,3	0,0	1,5	20600	20590	553,8	3278
15	-42,1	1,0	12,7	0,0	1,9	20580	20570	682,4	3276
22	-42,3	1,0	14,3	0,0	2,1	20700	20690	764,3	3295
29	-42,3	1,0	16,0	0,0	1,8	20820	20810	636,4	3313
35,9	-42,3	1,0	18,1	0,0	1,3	20940	20930	470,4	3332
42,9	-42,2	1,0	20,3	0,0	1,1	20940	20930	410,5	3332
50	-42,1	1,0	22,9	0,0	1,0	21000	21000	358,4	3343
56,9	-42,2	1,0	25,7	0,0	1,0	21000	21000	377,6	3342
63,9	-42,1	1,0	28,9	0,0	1,1	20960	20950	410,1	3336
70,9	-42,3	1,0	32,6	0,0	1,4	20790	20790	495,8	3309
77,9	-42,5	1,0	36,7	0,0	1,5	20810	20800	543,0	3312
84,9	-42	1,0	41,3	0,0	1,4	20840	20830	520,3	3317
91,9	-42,2	1,0	46,4	0,0	1,4	20890	20880	511,8	3324
98,9	-42,1	1,0	52,2	0,0	1,4	21000	20990	505,3	3342
105,9	-42,4	1,0	58,8	0,0	1,4	20990	20980	525,7	3340
112,9	-42,2	1,0	66,2	0,0	1,5	20900	20900	553,6	3327
119,8	-42,3	1,0	74,4	0,0	1,5	20770	20770	561,5	3306
126,9	-42,4	1,0	83,8	0,0	1,6	20770	20760	581,4	3306
133,9	-42,1	1,0	94,3	0,0	1,7	20610	20600	618,4	3281
140,8	-42,3	1,0	106,0	0,0	1,8	20520	20510	653,3	3267
147,8	-42,2	1,0	119,3	0,0	2,0	20410	20390	721,0	3248
154,9	-42,2	1,0	134,3	0,0	2,2	20400	20380	767,2	3246
161,8	-42,3	1,0	151,2	0,0	2,3	20280	20260	818,6	3227
168,8	-42,1	1,0	170,1	0,0	2,6	20020	20000	903,3	3187
175,8	-42,3	1,0	191,4	0,0	2,8	19810	19790	967,2	3153
182,8	-42,3	1,0	215,4	0,0	3,0	19520	19500	1025,0	3107
189,8	-42,2	1,0	242,4	0,0	3,3	19250	19220	1109,0	3065
196,8	-42,4	1,0	272,8	0,0	3,8	18780	18740	1236,0	2989
203,8	-42,2	1,0	307,0	0,0	4,3	18240	18190	1368,0	2904
210,8	-42,3	1,0	345,5	0,0	4,9	17620	17550	1518,0	2804
217,8	-42,4	1,0	388,8	0,0	5,6	16940	16860	1667,0	2696
224,7	-42,5	1,0	437,5	0,0	6,6	15960	15860	1849,0	2541
231,8	-42,2	1,0	492,4	0,0	7,9	14750	14610	2019,0	2348
238,8	-42,1	1,0	554,1	0,0	9,4	13250	13080	2165,0	2110
245,8	-42,2	1,0	623,6	0,1	11,1	11590	11370	2240,0	1845
252,8	-42,2	1,0	701,7	0,1	13,7	9474	9203	2251,0	1508
259,8	-42,4	1,0	789,7	0,1	18,7	6467	6125	2073,0	1029
266,8	-42,5	1,0	888,6	0,3	27,2	2968	2640	1356,0	472
273,8	-42,4	1,00	1000,00	0,85	58,40	1195	626	1017,00	190

Bilaga 2. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 0°C

Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid 0 grader C och 1Hz



Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid 0 grader C och 1Hz



Energetic Materials

StressTech

REOLOGICA Instruments AB

Oscillation stress sweep

2004-08-18 17:12:50

Oscillation Stress Sweep Gel br E2383 7,5wt% gelmedel (SiO₂) i JP-10

DMG

Stress sweep för att bestämma det linjära viskoelastiska området för materialet.

Applied stress from 10³ till 10⁴ Pa, 1 Hz, 0gr C, delay time 1 s, integration periods: 3,

P 20 ETC Disp Gap 1.000 mm

Sample loading method: To gap

Maximum loading force 6.366E+4Pa Proceed when force is below 1.273E+4Pa or when waiting more then 1.000E-

Prompt for rotor release

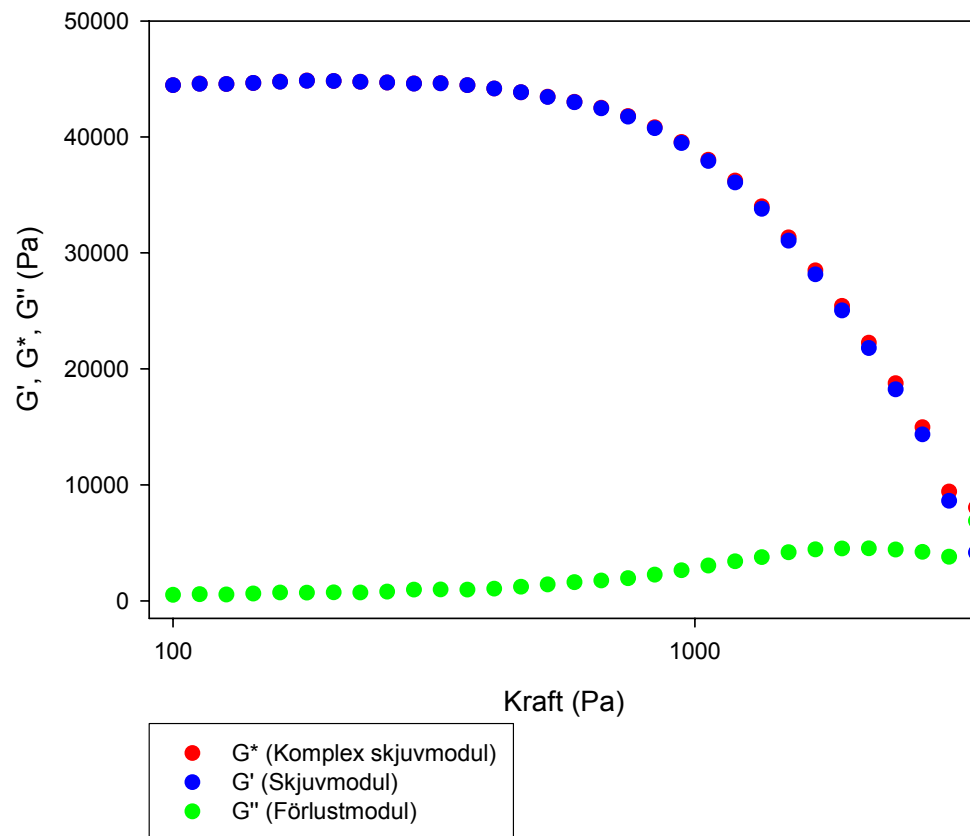
Manual control Number of measurements 1 Measurement interval 5.000E+1 s

Frequency table Frequency 1.000E+0 Hz Delay time 1.000E+0 s Integration periods 3 FFT size 512

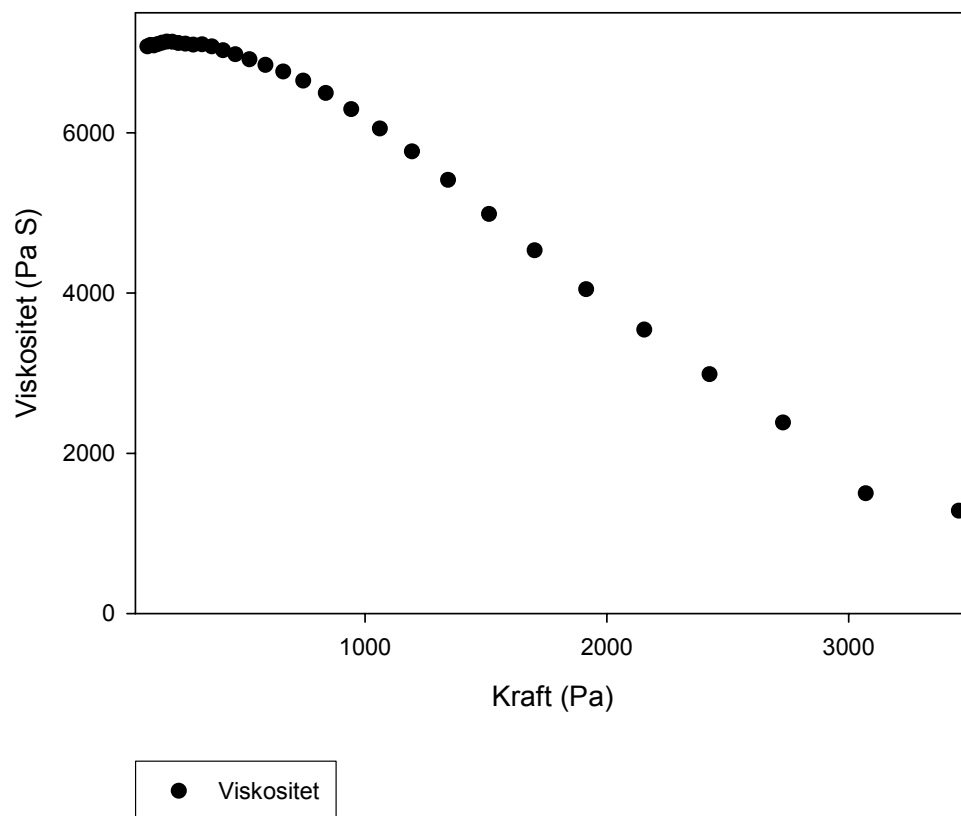
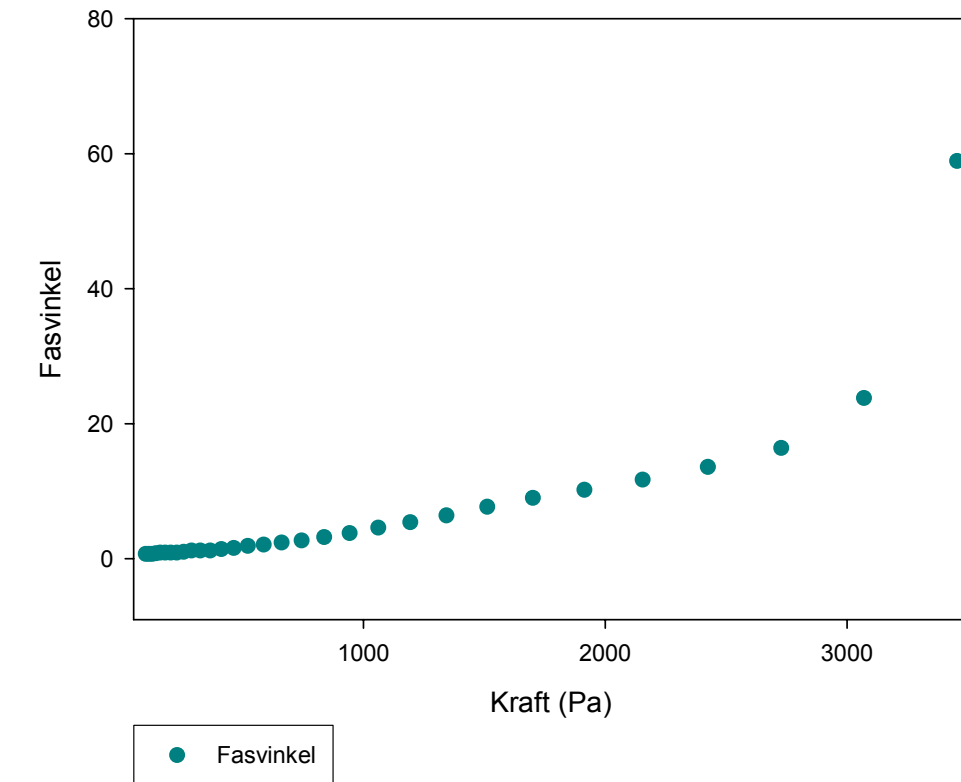
Time s	Temperature °C	Frequency Hz	Stress Pa	Strain	Phase degree	G* Pa	G' Pa	G'' Pa	Viscosity* Pa s
1,1	-0,9	1,0	100,0	0,0	1,2	31970	31960	672,4	5088
8,1	-0,8	1,0	112,5	0,0	1,2	31980	31980	654,4	5090
15,2	-0,8	1,0	126,6	0,0	1,1	31910	31900	622,9	5078
22,2	-0,5	1,0	142,5	0,0	1,2	31830	31820	640,3	5066
29,1	-0,4	1,0	160,4	0,0	1,2	31740	31740	659,0	5052
36,2	-0,2	1,0	180,5	0,0	1,3	31640	31630	706,7	5036
43,2	-0,2	1,0	203,1	0,0	1,4	31450	31440	758,2	5006
50,1	-0,1	1,0	228,5	0,0	1,6	31100	31080	894,2	4949
57,1	-0,2	1,0	257,2	0,0	1,7	30840	30830	904,5	4909
64,1	0,0	1,0	289,4	0,0	1,9	30420	30400	1021,0	4842
71,1	0,0	1,0	325,7	0,0	2,1	30020	30000	1113,0	4778
78,0	0,1	1,0	366,5	0,0	2,5	29380	29350	1272,0	4676
85,1	0,1	1,0	412,5	0,0	2,9	28620	28590	1430,0	4556
92,1	0,0	1,0	464,2	0,0	3,4	27690	27640	1659,0	4406
99,1	-0,2	1,0	522,3	0,0	4,0	26500	26440	1838,0	4218
106,0	0,0	1,0	587,8	0,0	4,7	25270	25190	2072,0	4022
113,0	0,1	1,0	661,5	0,0	5,7	23750	23640	2351,0	3780
120,0	0,0	1,0	744,4	0,0	7,0	22020	21850	2694,0	3504
127,0	-0,1	1,0	837,7	0,0	8,5	20070	19850	2983,0	3195
134,0	0,0	1,0	942,7	0,1	11,2	17580	17240	3418,0	2798
141,0	0,0	1,0	1061,0	0,1	14,0	15190	14740	3688,0	2419
148,0	0,0	1,0	1194,0	0,1	17,2	12980	12390	3841,0	2066
154,9	0,0	1,0	1343,0	0,1	19,8	11070	10420	3756,0	1763
161,9	0,0	1,0	1512,0	0,2	21,6	9287	8635	3418,0	1478
169,0	0,0	1,0	1701,0	0,2	25,0	7182	6510	3034,0	1143
175,9	0,0	1,0	1914,0	0,4	30,1	4688	4055	2353,0	746
182,9	-0,1	1,0	2154,0	1,1	66,3	1956	785	1791,0	311
189,9	0,1	1,0	2424,0	0,7	68,0	3677	1375	3410,0	585

Bilaga 3. Resultat från reologisk analys av gelad JP-10 vid 20°C

Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid 20 grader C och 1Hz



Oscillation Stress Sweep av gelad JP-10 (7,5 vikt-% SiO₂) vid 20 grader C och 1Hz



Energetic Materials

StressTech

REOLOGICA Instruments AB

Oscillation stress sweep

2004-08-18 17:22:40

Oscillation Stress Sweep Gel br E2383 7,5wt% gelmedel (SiO₂) i JP-10

DMG

Stress sweep för att bestämma det linjära viskoelastiska området för materialet.

Applied stress from 10³ till 10⁴ Pa, 1 Hz, 20gr C, delay time 1 s, integration periods: 3,

P 20 ETC Disp Gap 1.000 mm

Sample loading method: To gap

Maximum loading force 6.366E+4Pa Proceed when force is below 1.273E+4Pa or when waiting more then 1.000E

Prompt for rotor release

Manual control Number of measurements 1 Measurement interval 5.000E+1 s

Frequency table Frequency 1.000E+0 Hz Delay time 1.000E+0 s Integration periods 3 FFT size 512

Time s	Temperature °C	Frequency Hz	Stress Pa	Strain	Phase degree	G* Pa	G' Pa	G'' Pa	Viscosity* Pa s
1,1	19,9	1,0	100,0	0,0	0,7	44460	44460	506,8	7077
8,1	20,0	1,0	112,5	0,0	0,7	44580	44570	574,8	7095
15,1	20,1	1,0	126,6	0,0	0,7	44560	44550	540,3	7091
22,0	20,2	1,0	142,5	0,0	0,8	44640	44640	633,1	7105
29,1	20,2	1,0	160,4	0,0	0,9	44760	44750	710,1	7124
36,1	20,1	1,0	180,5	0,0	0,9	44840	44830	697,6	7137
43,0	20,1	1,0	203,1	0,0	0,9	44820	44820	733,2	7134
50,0	19,8	1,0	228,5	0,0	0,9	44750	44740	716,8	7121
57,1	19,9	1,0	257,2	0,0	1,0	44690	44680	787,2	7112
64,0	20,2	1,0	289,4	0,0	1,2	44600	44590	970,5	7098
71,0	19,9	1,0	325,7	0,0	1,2	44630	44620	972,9	7104
78,0	20,0	1,0	366,5	0,0	1,2	44460	44450	961,6	7077
85,0	19,9	1,0	412,5	0,0	1,4	44170	44160	1058,0	7030
92,0	20,0	1,0	464,2	0,0	1,6	43850	43840	1211,0	6980
99,0	20,1	1,0	522,3	0,0	1,9	43460	43440	1411,0	6917
106,0	20,0	1,0	587,8	0,0	2,1	43020	42990	1608,0	6846
113,0	20,1	1,0	661,5	0,0	2,4	42500	42470	1749,0	6764
120,0	19,9	1,0	744,4	0,0	2,7	41790	41740	1947,0	6650
126,9	20,1	1,0	837,7	0,0	3,2	40820	40750	2251,0	6496
134,0	20,2	1,0	942,7	0,0	3,8	39560	39470	2642,0	6295
141,0	20,2	1,0	1061,0	0,0	4,6	38030	37910	3047,0	6053
147,9	19,8	1,0	1194,0	0,0	5,4	36230	36070	3409,0	5767
154,9	19,9	1,0	1343,0	0,0	6,4	34010	33800	3776,0	5412
161,9	20,0	1,0	1512,0	0,0	7,7	31330	31050	4186,0	4986
168,9	20,0	1,0	1701,0	0,1	9,0	28490	28140	4442,0	4534
175,8	20,0	1,0	1914,0	0,1	10,2	25430	25030	4516,0	4047
182,8	20,1	1,0	2154,0	0,1	11,7	22260	21800	4529,0	3543
189,8	20,0	1,0	2424,0	0,1	13,6	18760	18230	4422,0	2985
196,8	20,1	1,0	2728,0	0,2	16,4	14960	14350	4216,0	2382
203,8	20,1	1,0	3070,0	0,3	23,8	9419	8621	3793,0	1499
210,8	20,3	1,0	3455,0	0,4	58,9	8049	4163	6889,0	1281
217,8	20,1	1,0	3888,0	0,1	81,6	52050	7587	51490,0	8284
224,8	20,1	1,0	4375,0	0,0	22,6	488200	450800	187400,0	77700
231,8	20,0	1,0	4924,0	0,0	52,5	374700	228000	297300,0	59630
238,8	19,9	1,0	5541,0	0,0	80,9	113700	18080	112300,0	18100
245,9	19,9	1,0	6236,0	0,1	76,7	76800	17710	74730,0	12220
252,8	20,0	1,0	7017,0	0,0	58,4	317400	166500	270200,0	50520