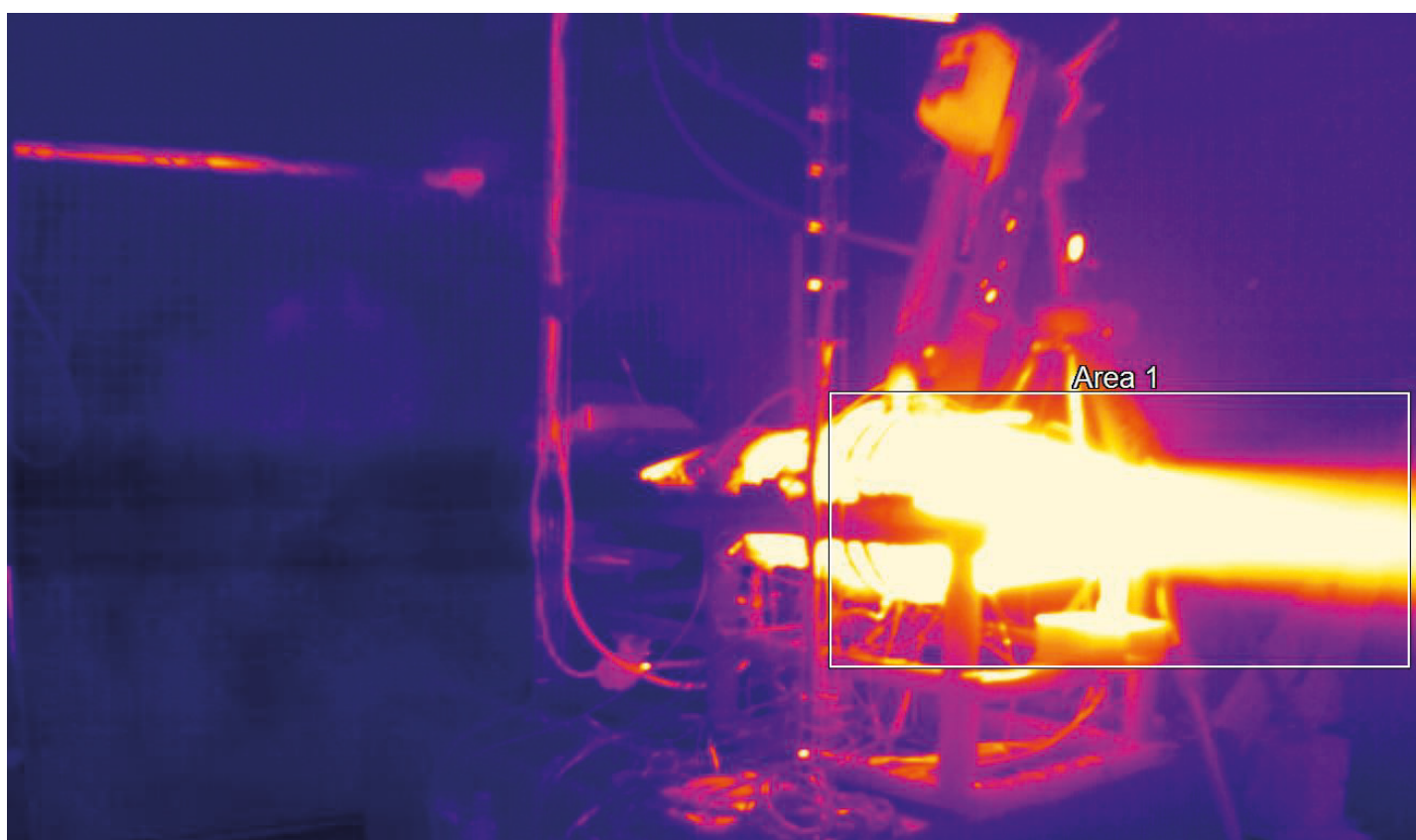


Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60

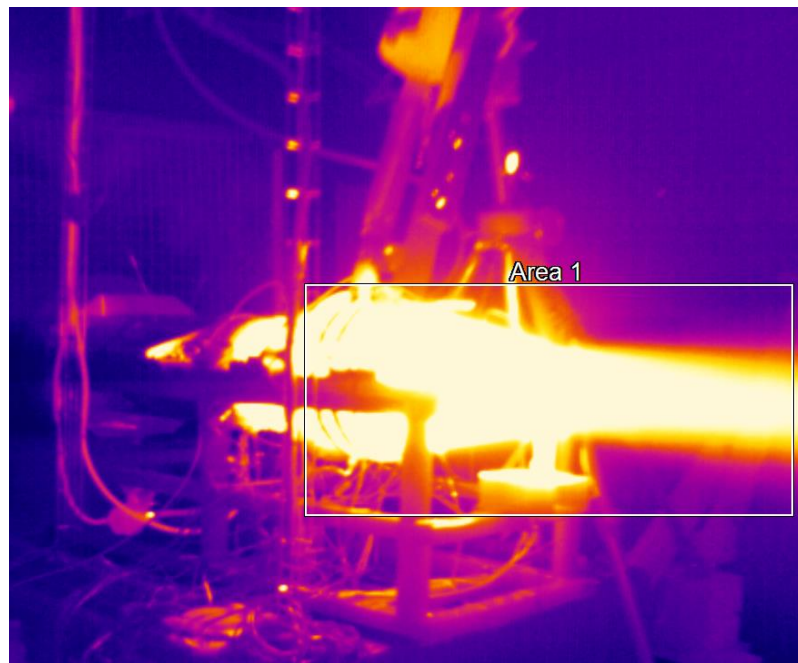
KRISTOFFER DANÈL, BENGT FALLENIOUS



Kristoffer Danèl

Bengt Fallenius

Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60



Titel	Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60
Title	Tests with biojet fuels in MicroTurbo TRI-60 Jet engine
Rapportnr/Report no	FOI-R--5101--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	35
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	Framdrivning och undervattensvapen
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E63183
Godkänd av/Approved by	Henric Östmark
Ansvarig avdelning	Avdelningen för Vapen, skydd och säkerhet

Bild/Cover: FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Under första delen av 2020 har en studie av prestanda och förbränning av två olika biobränslen och tre referensbränslen utförts med turbojetmotorn Microturbo TRI-60.

De i studien ingående bränslen är JP5, JetA1, JP10, ARA - CHCJ-5 och Swedish Biofuels - BIOJET 100 ATJ-SKA, varav de två sistnämnda är biobränslen. Vidare är detta en kvalitativ studie i syfte att jämföra de olika bränslena med avseende på prestanda, sotbildning, förbränningsdynamik och termoakustik.

Med avseende på prestanda kan en lägre specifik bränsleförbrukning (eng. Specific Fuel Consumption, SFC) påvisas för BIOJET 100 ATJ-SKA som ligger 2,7 % lägre än referensbränslet Jet A1. Även turbinutloppstemperatur, infraröd (IR) signatur och sothalt är jämförelsevis låga för BIOJET 100 ATJ-SKA vars värden är lägre eller nära motsvarande för JP5, för vilket insprutningsmunstyckena är designade för. Åt andra hållet visar JP10 på 2,8 % högre SFC och storleksordningar högre värden gällande IR-signatur och sothalt. För övriga bränslen är skillnaderna varierande och mindre, men observerbara.

Några signifikanta skillnader i förbränningsdynamiken eller termoakustiska instabiliteter kan inte observeras vid de driftpunkter som studien genomfördes för. Huruvida detta liksom storleken på sotpartiklar påverkas av en optimering av motorn för ett nytt bränsle kräver vidare och djupare studier.

Nyckelord: Biobränslen, framdrivning, förnyelsebar energi, hållbarhet

Summary

During the first part of 2020, a study of the performance and combustion of two different biofuels and three reference fuels was carried out with the turbojet engine Microturbo TRI-60.

The fuels included in the study are JP5, Jet A1, JP10, ARA - CHCJ-5 and Swedish Biofuels - BIOJET 100 ATJ-SKA, of which the last two are biofuels. Further on, this is a qualitative study with the purpose to compare the different fuels with respect to performance, soot formation, combustion dynamics and thermoacoustics.

In terms of performance, the BIOJET 100 ATJ-SKA shows a 2.7% lower specific fuel consumption (SFC) than the reference fuel Jet A1. Also the turbine outlet temperature, infra-red (IR) signature and soot content is comparatively low for BIOJET 100 ATJ-SKA, whose levels are lower or close to the corresponding of JP5, for which the injection nozzles are designed. In the other end, JP10 shows a 2.8 % higher SFC and orders of magnitude higher values regarding IR-signature and soot content. For the other fuels the disparity is varying and less but observable.

Any significant differences in combustion dynamics or thermoacoustic instabilities cannot be observed at the operational points for which the study is performed. Whether this as well as the size of the soot particles are affected by an optimization of the engine for a new fuel requires further and deeper studies.

Keywords: Biofuels, propulsion, renewable energy, sustainability

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Provuppställning, omfattning och förutsättningar.....	8
2.1	Provomfattning.....	8
2.2	Försöksobjekt och bränslen.....	9
2.3	Försöksuppställning och metodik	10
2.3.1	Försöksuppställning	10
2.3.2	Metodik.....	11
2.3.2.1	Globala parametrar tryck, temperatur och massflöde...	11
2.3.2.2	Övriga prestanda parametrar och korrekationer	15
2.3.2.3	LII, Laser-Induced Incandescence	16
2.3.2.4	Emissionsspektra	17
2.3.2.5	Höghastighetsvideo	17
3	Resultat	19
3.1	Driftsfall 1, $W^*_1 = 5,85$ kg/s.....	19
3.2	Driftsfall 2, $W^*_2 = 5,25$ kg/s	23
3.3	Termoakustik, moder och tryckfluktuationer i brännkammaren	28
3.4	Emissionsspektra.....	29
3.5	LII	30
4	Slutsatser	34
5	Referenser.....	35

1 Inledning

För att minska negativa effekter orsakade av växthusgaser pågår det idag inom ett flertal områden en omfattande omställning till förnyelsebara energikällor. Sveriges långsiktiga klimatmål är att inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser 2045. Även hos försvarssektorns myndigheter ses detta som ett prioriterat område men där arbetet också är ett led i att säkerställa Sveriges och Försvarsmaktens oberoende av fossila bränslen. Försvarssektorns myndigheter har gemensamt beslutat att inrikta arbetet på att bland annat öka andelen av energi från förnybara energikällor [1].

Under första delen av 2020 har en studie av prestanda och förbränning av två olika biobränslen och tre fossilbaserade bränslen utförts i turbojetmotorn Microturbo TRI-60. Studien var en kvalitativ studie i syfte att jämföra olika bränslen med avseende på prestanda, sotbildning, termoakustik och förbränningsdynamik.

Biojetbränsle framställs från biomassa för vilket det i Sverige finns en hög potential för storskalig tillverkning. Detta då landet har goda tillgångar av råmaterial för framställning, bland annat skogsråvara och restprodukter från jordbruk.

Ett av de testade biojetbränslena är från en svensk tillverkare, Swedish BioFuels, vars tillverkning just baseras på rester från skogsbruket.

Studien utfördes i turbojetmotorn TRI60-2 tillverkad av franska Microturbo. Motorn sitter bland annat i den svenska sjömålsroboten Robot 15 (RBS15), motorns maximala dragkraft är ca. 3,7 kN.

2 Provuppställning, omfattning och förutsättningar

2.1 Provomfattning.

I studien genomfördes 20 st. motorprov vid två olika driftsfall och med fem olika bränslen, se Tabell 1. Driftsfallen baserades på två korrigerade luftmassflöden, $W^*_1 = 5,85$ kg/s och $W^*_2 = 5,25$ kg/s vilka motsvarar driftsfallen vid 97,5% respektive 87,5% av maximal nominell dragkraft. Varje bränsle analyserades med avseende på kemisk sammansättning, energiinnehåll och densitet, se Tabell 2.

Tabell 1. Körlogg.

DATUM	LOGG	BRÄNSLE	W^* [KG/S]
2020-01-31	127	Jet A1	5,85
2020-01-31	128	Jet A1	5,85
2020-01-31	129	Jet A1	5,25
2020-02-03	130	Jet A1	5,25
2020-02-03	131	BIOJET-2	5,85
2020-02-04	132	BIOJET-2	5,25
2020-02-04	133	BIOJET-2	5,25
2020-02-04	134	BIOJET-2	5,85
2020-02-05	135	BIOJET-2	5,85
2020-02-05	136	BIOJET-1	5,85
2020-02-13	137	JP5	5,85
2020-02-18	138	JP5	5,85
2020-02-18	139	JP5	5,25
2020-02-19	140	JP5	5,85
2020-02-19	141	JP5	5,25
2020-02-19	142	JP10	5,85
2020-02-19	143	JP10	5,85
2020-02-20	144	JP10	5,25
2020-02-20	146	JP10	5,25

Tabell 2. Karakteristik på bränslen i studien. Det lägre värmevärdet, LHV¹, har erhållits från prov i bombkalorimeter. DLHV anger relativ skillnad mot JET A1.

Bränsle	Densitet G/CM3 @ 15,0 °C	FÄRG	LHV [MJ/KG]	DLHV [%]
JP5	0,8031	Gulaktig	46,2	0,4
JP10	0,9388	Klar	44,6	-3,0
CHCJ 5	0,8213	Klar	45,4	-1,3
BIOJET 100 ATJ – SKA	0,7820	Klar	46,8	1,7
JET A1	0,8060	Klar	46,0	0,0

2.2 Försöksobjekt och bränslen

Proven genomfördes med turbojetmotorn TRI60-2 tillverkad av franska Microturbo. Tri60 är en ren turbojetmotor med en maximal dragkraft på ca 3,7 kN som används i kryssningsmissiler, drönare och målflyg [2]. Inom svenska försvaret står den för framdrivningen av sjömålsroboten RBS15. Motorteknologin bedöms vara sent 70- eller tidigt 80-tal och har relativt modern brännkammardesign bestående av en annulär brännkammare med 12 stycken insprutningsmunstycken och där förbränning sker enligt Rich-burn Quick-quench Lean-burn (RQL). Motorn har en trestegs axialkompressor och en enstegs axialturbin. En stor utmaning har varit att den aktuella motorn är designad för en så kallad shoot & forget - användning, vilket innebär att den inte är avsedd för att monteras isär, än mindre återmonteras. Detta har medfört begränsningar i var och hur man kan placera diagnostikutrustning, samt i hur motorn skall hanteras och underhållas vid längre gångtider än de avsedda 15 minuterna.

Den aktuella motorn är bestyckad med 12 stycken simplex insprutningsmunstycken avsedda för flygfotogen JP5. Det finns även dedikerade insprutningsmunstycken för flygfotogen JP10 som är monterade i andra varianter av TRI-60-motorn. I studien har JP5 och Jet A1 används som referensbränslen. Detaljerad information om Jet A1, JP5 och JP10 kan hittas i [3], nedan ges en kortfattad beskrivning av samtliga bränslen i studien.

JP5

JP5 är ett gult fossilt fotogenbaserat flygbränsle med hög flampunkt (FP > 60 °C) som utvecklades på femtiotalet för användning i flygplan som är stationerade ombord på hangarfartyg, där risken för och konsekvenser av brand är särskilt stor. JP5 är en blandning av kolväten, innehållande alkaner, nafterer och aromatiska kolväten och har en fryspunkt på -46 °C.

Jet A1

Jet A1 är det vanligaste bränslet för civil luftfart med gasturbinmotorer. Jet A1 är en klar fossilt fotogenbaserad vätska. Bränslet innehåller antistatiska additiv och har en flampunkt på 38 °C och en fryspunkt på -47 °C.

JP10

JP10 är avsett som bränsle till missiler vilka drivs av gasturbiner. Bränslet har en låg fryspunkt, -70 °C och hög densitet ca 1 kg/l. Dess flampunkt ligger på 55 °C. Bränslet består av en enda typ av kolväte, exo-tetrahydrodicyclopentadien, C₁₀H₁₆, vilket gör det

¹ Det lägre värmevärdet LHV, *Lower Heating Value*, anger hur mycket energi som kan frigöras som värme vid förbränning av ett bränsle utan att vattenånga kondenseras.

lämpligt för jämförelser med bland annat förbränningssimuleringar. JP10 har sitt ursprung i fossil råvara.

CHCJ 5

CHCJ 5 är tänkt som en ersättare, ett s.k. dropinbränsle för JP5 och har utvecklats i USA av företaget ARA. Bränslet har sin bas i rapsolja och processas via katalytisk termolys (CH- Catalytic Hydrothermolysis) och ingår i kategorin *bio oil to jet*, (OTJ) och ingår i klassen bränslen HEFA²-SKA³. Bränslet ska uppfylla de krav som ställs på JP5 och är mycket likt avseende sammansättning och egenskaper som fossil fotogen (JP5), inklusive i aromatiskt innehåll. CHCJ 5 har sitt ursprung i förnyelsebar råvara.

BIOJET 100 ATJ-SKA

BIOJET 100 ATJ-SKA är tänkt som ett dropinbränsle för Jet A1 och dess militära motsvarighet JP8 och är i slutfasen av godkännandeprocessen som dropinbränsle för civilflyget. Bränslet tillverkas av svenska Swedish Biofuels och har sin bas i skogsråvara och processas via fermentering till alkohol och sedan vidare genom ytterligare processer bl.a. dehydrering och oligomerisering. Bränslet ingår i klassen bränslen ATJ⁴-SKA och skall uppfylla de krav som ställs på Jet A1 och JP8. Den kemiska analysen visar dock på en stor avvikelse i kemisk sammansättning i jämförelse med Jet A1.

2.3 Försöksuppställning och metodik

2.3.1 Försöksuppställning

Turbojetmotorn är monterad via glidskenor i en vagga placerad centralt i en testcell. Testcellen som ursprungligen var avsedd för motorprov med krutraketer har anpassats till prov med gasturbiner. Uppströms motorn sitter ett $2,1 \times 3$ m stort filter som dels filtrerar inströmningsluften men även skapar ett litet tryckfall så att inströmningen till motorns luftintag blir mer radiell. På så sätt undviks problem med markvirvlar samt den ejektorverkan en turbojet kan skapa i en omsluten testcell. Utloppet från testcellen har samma dimension som intagsfiltret, $2,1 \times 3$ m (h $\times$ b) och ansluter direkt till omgivande atmosfär.

All stationsnumrering och sensorbenämning sker enligt den rekommenderade nomenklaturen i [4].

Särskild vikt har lagts vid att mäta luftmassflödet och bränslemassflödet så noggrant som möjligt. Bränslemassflödet mäts direkt med en Coriolismassflödesmätare (Krohne Optimass 6000) medan luftmassflödet mäts indirekt genom att mäta tryck, temperaturer och relativ luftfuktighet. För att erhålla god strömningskvalitet på den inströmmande luften har riktlinjerna enligt [5] [6] [7] & [8] följts, där ett noggrant designat luftintag leder in luften till ett anströmningsrör vilket i sin tur ansluter till motorn. På anströmningsröret finns fyra tryckhål med diameter 0,5 mm borrade på en och samma station, kallad AIP⁵, fördelade 90° i azimutal-led. Vid denna axiella station men vid två olika radier är två totaltryckssonder placerade. Deras radie är motsvarar en mittpunkt för en areaviktning av två koncentriskt stora areor.

Nedströms kompressorn mäts totaltryck och totaltemperatur med specialdesignade sonder vilka följer rekommendationerna i [5]. På utsidan av brännkammaren finns det totalt nio stycken tryckgivare monterade så att sensorhuvudet är i nivå med innerytan av

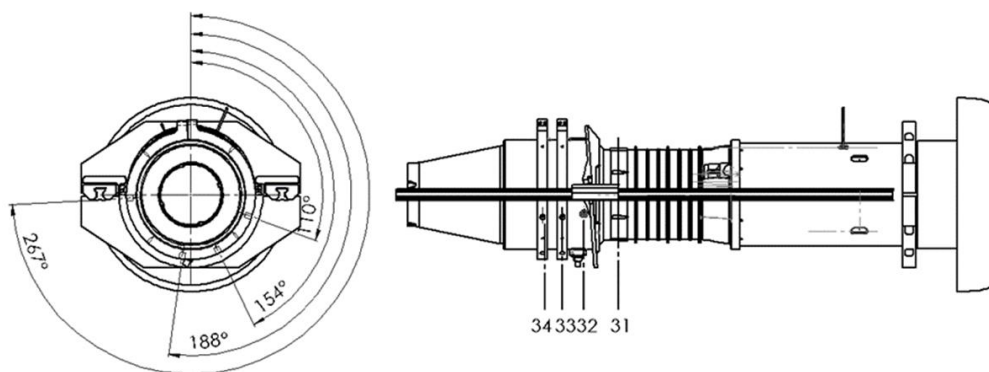
² HEFA - Hydroprocessed Fatty Acid Esters and Free Fatty Acid

³ SKA - Synthesized Kerosene with Aromatics

⁴ ATJ - Alcohol to Jet

⁵ AIP- Aerodynamic Interface Plane, ett tvärsnitt i vilket man mäter aerodynamiska storheter som tryck, temperatur, snedblåsning m.m.

brännkammarens tryckbärande skal. På så sätt undviks mätfel orsakade av sensorns montering. Tryckgivarna är fördelade i axiell led på tre stationer längs brännkammaren och på fyra azimuthala vinklar. Åtta av givarna är monterade i aluminiumringar, fyra i varje ring, vilka klämts och limmats fast på brännkammarens utsida, Figur 1 och en av dessa är monterad i ett befintligt uttag på station 32. Den azimuthala positionen har bestämts efter att en enklare modanalys av de azimuthala tryckmoderna gjorts för att på så sätt erhålla information om vinkelfördelning av tryckamplitudens maxima och minima. För att erhålla bästa upplösning på av tryckmoderna har tryckgivarna placerat enligt primtalsfördelning av de första fyra moderna erhållna från modanalysen.



Figur 1. Ritning på TRI-60 motorn med placeringen av tryckgivare för mätning av brännkammartryckets variation. Givare och sonder på station 34 och 33 är monterade i aluminiumringar.

Nedströms turbinen inne i utloppsdysan mäts tre totaltemperaturer med hjälp av termoelement.

Varvtalet mäts med motorns varvtalsgivare vilken ger ifrån sig nio pulser per varv.

Den nuvarande diagnosuppsättningen innefattar 63 mätpunkter samplade vid flera olika samplingshastigheter och insamlade av ett gemensamt National Instruments (NI) PXI-1085 chassi som ger en gemensam tidsstämpel. Systemet har samplingshastigheter upp till 103 kHz. Vid drift övervakas motorn av ett separat styrsystem och en uppsättning givare som delvis är dubblerade med de som används av datainsamlingssystemet för själva motorproven. Genom styrsystemet mäts även in- och utgående oljetryck- och temperaturer samt temperaturer hos motorns ytterhölje och vibrationsnivåer.

Studier av flamdynamiken och de kemiska förbränningsprocesserna möjliggörs av ett optiskt arrangemang som genom ett av tändarhålen ger åtkomst direkt in i brännkammaren. Mätningarna görs med en emissionsspektrometer och en höghastighetskamera (Photron SA5).

Vid uppställningen har särskild vikt lagts på att erhålla data med hög noggrannhet gällande luftmassflöde, bränslemassflöde och dragkraft.

2.3.2 Metodik

2.3.2.1 Globala parametrar tryck, temperatur och massflöde

De globala parametrarna innefattar de som beskriver motorns driftstillstånd och har tidskontanter högre än 0,1 s. Här ingår motorns dragkraft, tryckförhållande, varvtal, bränsle- och luftmassflöden samt temperaturer på komponenter, luft, bränsle och förbränningsgaser. Som tidigare nämnts har särskild fokus lagts på att erhålla luftmassflödet med hög noggrannhet, och här ingår mätningar av tryck, temperatur och luftfuktighet. Alla globala parametrar samlas in via olika dedikerade moduler, d.v.s.

insamlingskort med hög upplösning, upp till 24 bitar, vilka är monterade i NI PXI-1085 chassit.

2.3.2.1.1 Tryckmätning

Tryckmätning görs av luftens totaltryck och statiska tryck, bränsletryck och oljetryck. De olika tryckgivarna och dess noggrannheter finns sammanställda i Tabell 3. Där det önskats särskilt hög noggrannhet har tryckmätning gjorts med sensorer av typen GE-DRUCK UNIK 5000, vilka har en noggrannhet på 0,04 % av fullskala. Dessa har i sin tur kopplats in på var sin kanal på ett bryggförstärkarkort, NI-4330. De tryck som mäts med dessa givare är bland annat inloppstryckets statiska och totala komponenter, kompressortryck, atmosfärstryck samt referenstrycket i motorprovcellen. Atmosfärstryck mäts med ett separat system, där en KIMO C310-BO -SPI2-ATMO – transmitter mäter atmosfärstryck, stagnationstemperatur och relativ luftfuktighet. Två uppsättningar transmittar säkerställer mätningar av dessa parametrar både utanför och inuti motorprovcellen. Signalerna från de två transmittarna samlas in med NI:s strömmåtkort – NI-6239. Oljetryck och bränsletryck mäts med tryckgivare av modell WIKA A10. Alla tryckmätningar samlas in med 10 kHz där det sparade värdet är medelvärdesbildat av tio mätvärden vilken ger en effektiv samplingsfrekvens av 1 kHz.

Tabell 3. Sammanställning över tryckgivare och deras mätosäkerheter. "FS" betecknar "Fullskala".

Typ av givare	Mätosäkerhet	Mäter/utgör grund till
DRUCK-UNIK-5000	±0,04 % av FS	Massflöde luft, atmosfärstryck, omgivningstryck, kompressortryckförhållande
KIMO C310-BO -SPI2-ATMO	±20 Pa	Atmosfärstryck
WIKA A10	±0,25 % FS	Bränsletryck, oljetryck
KULITE XTL-190M & XTEL-190M	±0,10 % FS	Brännkamartryck & dess fluktuationer, plenumtryck nedströms kompressor

2.3.2.1.2 Dragkraftsmätning

Dragkraften mäts med två stycken 3 kN lastceller vars ena del är monterad i motorvaggan och den andra i en kullagrad släde vid vilken motorn i sin tur är fäst. Att jämn fördelning av lasterna erhålls vid drift har säkerställts genom injustering vid kalibrering med vikter och trissa. Enligt datablad är mätosäkerheten mindre än 0,017 %. Varje lastcell är kopplad till var sin kanal på ett bryggförstärkarkort NI-4330. Data samlas in med 10 kHz där det sparade värdet är medelvärdesbildat av tio mätvärden vilken ger en effektiv samplingsfrekvens av 1 kHz.

2.3.2.1.3 Varvtalsmätning

Motorn är från fabrik försedd med en rotor med magnetisk pickup som ger ifrån sig 9 elektriska pulser per varv. Pulserna behöver inte förstärkas, men eftersom nivån varierar med 2-36 V och signalkvaliteten vid lägre varvtal är dålig måste den konditioneras innan den tas in på pulsmätarkortet NI-6366. Signalkonditionering görs med en egentillverkad krets som identifierar flankerna och skapar ett pulståg samt håller signalnivån under 5 V⁶.

2.3.2.1.4 Temperaturmätning

Temperaturer mäts dels med resistiva prober s.k. PT100-element vilka ger en hög noggrannhet men är begränsade i temperatur upp till ca 250 °C och dels med termoelement

⁶ Övre nivå för TTL är 5V

av typ K vilka kan mäta temperaturer upp till ca 1270 °C fast med något lägre noggrannhet. Termoelementen uppfyller noggrannhetsklass 1 enligt standarden IEC 60584-2, vilken förutsätter att sonden mäter med ett intervall som understiger $\pm 1,5$ °C upp till 375 °C toleransen över detta värde beskrivs enligt: $(\pm T \times 0,004)$, vilket vid 800 °C blir $\pm 3,2$ °C. PT100-elementen uppfyller noggrannhetsklass A enligt standarden IEC 60751 vilken förutsätter att sonden mäter med ett intervall som understiger $\pm(0,15 + 0,002 |T|)$ vilket vid 20 °C blir $\pm 0,19$ °C. Signalerna från termoelementen har tagits in på insamlingskortet NI-4353 vilka har ett inbyggt kallt lödställe. Signalerna från PT-100 elementen har tagits in på insamlingskort av typen NI-4357. Temperatursignalerna mäts med en insamlingsfrekvens av 90 Hz. Behovet av medelvärdesbildning har inte funnits eftersom sensorhuvudet ger en naturlig medelvärdesbildning.

Mätning av luftens och förbränningsgasernas temperatur görs med fördel vid stagnationsförhållanden, vilket här har gjorts enligt den rekommenderade praxis som återfinns i [5]. För att mäta stagnationstemperatur hos en strömmande gas korrekt enligt [5] & [8] har bland annat specialdesignade sonder monterats i motorns gasström.

2.3.2.1.5 Massflödesmätning

Två massflöden mäts, inloppsluftens och bränslets. Bränslemassflödet mäts med en mätare av Coriolistyp av märket Krohne och modell Optimass 6000. Databladet uppger en noggrannhet på 0,1 % av mätt värde. Luftens massflöde har räknats fram vilket förutsätter en uppställning utformad enligt [7] & [9] och baseras på kännedom om följande parametrar, luftens tryck (stagnationstryck, p_0 , och statiskt tryck, p , i inloppet), stagnationstemperatur, T_0 , relativ luftfuktighet, RH, förhållandet mellan de specifika värmena, γ , strömrörets inloppsdiameter, D , och Reynolds tal, Re , på den inströmmande luften. Massflödet kan räknas fram enligt sambanden (1)–(4) nedan:

$$\dot{m} = \frac{\pi D^2}{4} C_D \frac{p}{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}} \sqrt{\frac{2 \left(1 - \frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}}{\left(\frac{R_{univ}}{M_m} T_0\right) \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{M_m} = \frac{p_0}{M_{dry\ air} \left(p_0 - RH e^{\left(12,03 - \frac{4025}{T-38,15}\right)} \right) + M_w \left(RH \times e^{\left(12,03 - \frac{4025}{T-38,15}\right)} \right)}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi d}, \quad \begin{cases} Re < 10^6 & C_D = 0,99822 - 6,59298 \times Re^{-0,5} \\ Re > 10^6 & C_D = 0,99822 - 0,10449 \times Re^{-0,2} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_{ref} + 110,3}{T + 110,3}, \quad (4)$$

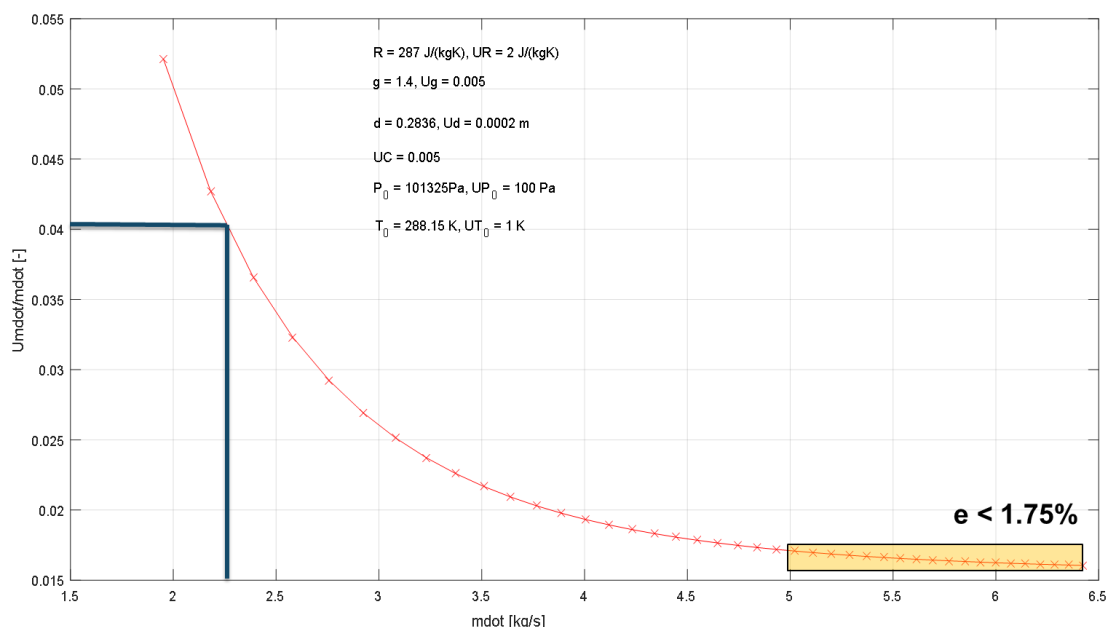
där μ_{ref} är luftens viskositet vid referenstemperaturen $T_{ref} = 288,15$ K, $\mu_{ref} = 1,7894 \times 10^{-5}$ kg/(m s), $M_{dry\ air}$ är molmassan hos torr luft $M_{dry\ air} = 28,967$ kg/kmol och M_w molmassan hos vattenånga, $M_w = 18,01$ kg/kmol. Som ses i ekvation (3) beror inströmningstalet, C_D , på Reynoldstal vilket i sin tur beror på massflödet, här har ett iterativt förfarande krävts vilket i realtid itererats fram i 90 Hz. För att uppskatta osäkerheten hos det framräknade massflödet har varje ingående variabels osäkerhet tagits hänsyn till. Den totala osäkerheten $U\dot{m}$, kan fås genom roten ur summan av de partiella derivatorna i kvadrat enligt :

$$U\dot{m} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial d} \times UD\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial C_D} \times UC_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_0} \times Up_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial p} \times Up\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \gamma} \times U\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial R} \times UR\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T_0} \times UT_0\right)^2} \quad (5)$$

där D betecknar intagsdiametern och R betecknar gaskonstanten. Det maximala felet för varje variabel antas ha en kvadratisk fördelning och har antingen uppskattats eller baseras på uppgifter i sensorns datablad. Därefter har en variation av de nominella värdena gjorts som motsvarar motorns driftsenvelop, på så sätt erhålles osäkerheten på massflödet som funktion av massflödets storlek. De värden som använts i osäkerhetsanalysen presenteras med sina nominella värden och osäkerheter i Tabell 4, och resultatet visas i Figur 2.

Tabell 4. Ingående variabler i framräkning av massflöde och dess mätosäkerhet.

Variabel	Symbol	Nominellt värde	Grund-osäkerhet
DIAMETER I MÄTPLAN (AIP) [M]	D	0,2836	0,001
INSTRÖMNINGSTAL [-]	C_D	1	0,005
STAGNATIONSTRYCK [PA]	p_0	101325	100
STATISTK TRYCK [PA]	p	$p_0 - 400 \rightarrow 4500$	40
KVOT AV SPECIFIKA VÄRMEN (LUFT)	γ	1,4	0,005
GASKONSTANT INTAGSLUFT [J/KG K]	R	287	2
STAGNATIONSTEMPERATUR [K]	T_0	288,15	1



Figur 2. Relativ mätosäkerhet, e , som funktion av luftmassflöde. Variabler enligt tabell 4. Gränsen för 4 % relativ osäkerhet markeras med svart linje och motsvaras av luftmassflödet, $\dot{m}_{dot} = 2,25$ kg/s. Driftsenvelopen markeras med en orange rektangel, här understiger mätosäkerheten 1,75 %.

2.3.2.2 Övriga prestanda parametrar och korrekationer

2.3.2.2.1 Korrigerade mätvärden

För att erhålla jämförbara data från provtillfällena med olika atmosfäriska förhållanden (atmosfärstryck och temperatur), måste massflödet, dragkraften och varvtalet korrigeras. Detta görs enligt ekvationerna (8) - (10). De korrigerade värdena relateras till tryck och temperatur vid noll höjd och standardatmosfär, dvs $P_{ref} = 101,325 \text{ kPa}$ och $T_{ref} = 288,15 \text{ K}$.

$$\text{Relativt tryck: } \delta = \frac{P}{P_{ref}} \quad (6)$$

$$\text{Relativ temperatur: } \theta = \frac{T}{T_{ref}} \quad (7)$$

$$\text{Korrigerat varvtal: } N^* = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (8)$$

$$\text{Korrigerad dragkraft: } FG^* = \frac{FG}{\delta} \quad (9)$$

$$\text{Korrigerat massflöde luft: } W^* = \frac{W\sqrt{\theta}}{\delta} \quad (10)$$

2.3.2.2.2 Overall Temperature Distribution Factor - OTDF

Utloppstemperaturens variation kvantifieras med mätetalet som kallas "Overall Temperature Distribution Factor" - OTDF eller bara "Pattern factor". OTDF ska mätas innan inloppsledskenorna till turbinen (station 4) och kan erhållas enligt ekvation (11) men förutsätter då ett flertal mätpunkter i utloppstvärsnittet. Station 31 är nedströms kompressorn i inloppet till brännkammaren.

$$OTDF = \frac{(T_{4max} - T_{4mean})}{(T_{4mean} - T_{31})} \quad (11)$$

2.3.2.2.3 Isentropisk kompressorverkningsgrad

Kompressorns isentropiska verkningsgrad, η_2 , är ett mått på hur väl kompressorn arbetar och definieras enligt ekvation (12)

$$\eta_2 = \frac{h_{03s} - h_{01}}{h_{03} - h_{01}}, \quad (12)$$

där h_{03} är luftens entalpi direkt nedströms det sista kompressorsteget och h_{01} är entalpin i tvärsnittet för AIP. Indexet s, benämner isentropiska förhållanden. I det aktuella fallet kan det med stor noggrannhet antas att det specifika värmets C_p och kvoten mellan specifika värmen C_p och C_v , dvs γ är konstant ($\gamma = 1,4$), och följaktligen kan entalpierna i (12) ersättas med $C_p T$ vilket medför att (12) kan skrivas om enligt:

$$\eta_2 = \frac{T_{03s} - T_{01}}{T_{03} - T_{01}}. \quad (13)$$

Den isentropiska temperaturen T_{03s} kan i sin tur skrivas om enligt:

$$T_{03s} = T_{01}(\pi_{31})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (14)$$

där π_{31} representerar tryckförhållandet över kompressorn, $\pi_{31} = P_{03}/P_{01}$.

2.3.2.2.4 Globalt ekvivalenstal ϕ

Det globala ekvivalenstalet ϕ är kvoten mellan aktuell och stökiometrisk bränsle/luft-blandning enligt:

$$\phi = \frac{FAR}{FAR_{stoichmetric}}, \quad (15)$$

där FAR står för *Fuel Air Ratio*, dvs. kvoten mellan bränsle och luft.

$FAR_{stoichmetric}$ beräknas enligt massbalans för antalet kolatomer i bränslet enligt [10]. För samtliga bränslen utom JP10 har en medelmolekyl i bränslet ansatts till $C_{12}H_{23}$ vilket ger $FAR_{stoichmetric} = 0,0682$. För JP10 som består av en enskild typ av molekyl, $C_{10}H_{16}$, blir $FAR_{stoichmetric} = 0,0704$. Ansättningen av samma medelmolekyl, $C_{12}H_{23}$, för biobränslena som för Jet A1 och JP5 kan motiveras av att dessa biobränslen ska vara drop-in-bränslen för sina fossilbaserade motsvarigheter.

2.3.2.2.5 Specifik bränsleförbrukning, SFC⁷

Ett mycket viktigt mått inom all framdrivning är hur väl systemet kan göra om en viss mängd (massa) bränsle till nyttig dragkraft. Här används godhetstalet *SFC* vilket anger hur många kilo bränsle per timme det går åt per genererad korrigerad dragkraft i Newton enligt ekvation (16).

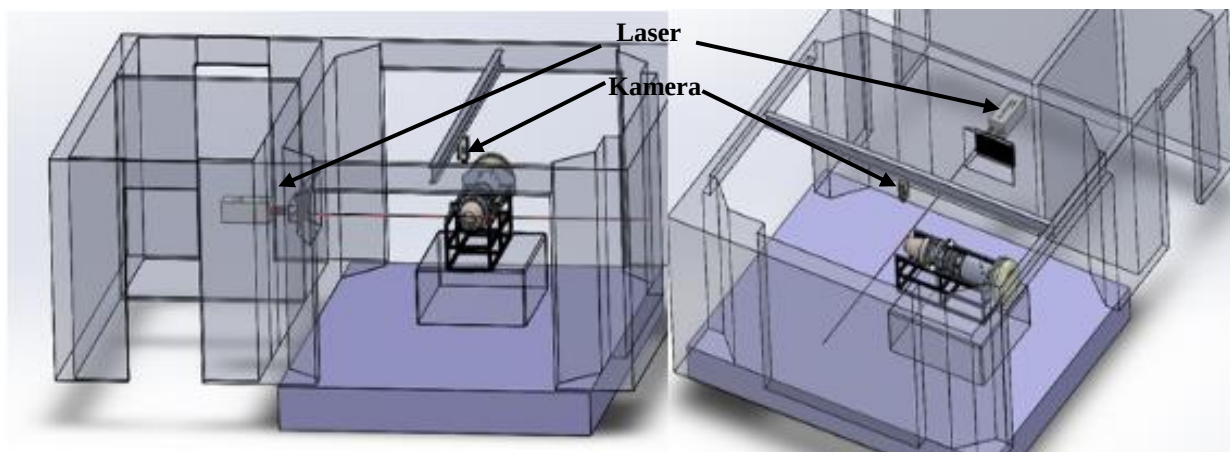
$$SFC = 3600 \times \frac{FG^*}{\dot{m}_{fuel}} \quad (16)$$

Där $\dot{m}_{fuel}$ är massflöde bränsle i g/s.

2.3.2.3 LII, Laser-Induced Incandescence

För att kunna diagnosticera förekomsten av sot i utloppet på motorn, har en laserbaserad teknik kallad LII används. Sot är i de flesta förbränningsprocesser inte önskvärd, och tyder på en icke komplett förbränningsprocess. I militära jetmotorapplikationer är den dessutom en IR-strålningskälla och sotet kan även lämna synliga spår i luften och utgör grund för kondensationstrimmar. Detaljerna kring LII beskrivs ibland annat [11] & [8], men kortfattat bygger LII på att sotpartiklar hettas upp till ca 4000 K genom att under nanosekunder belysas med högenergilaser. Vid dessa temperaturer strålar sotpartiklarna kraftigt enligt Plancks fördelningskurva för svartkroppar. Den utstrålade intensiteten beror bland annat på mängden sot som blir belyst med lasern. I försöket användes en laser av modell EKSPLA NL303G-20-SH-TM-AW vars energi i varje puls är 1 J vid 1064 nm. Pulslängden är mellan 3-6 ns och stråldiametern ca 8 mm. Kameran är en ICCD-kamera av modell Andor DH334T-18F-63, vars sensor har en upplösning på 1024×1024 pixlar med 16 bitars intensitetsdynamik. Lasern placerades i teknikrummet intill testcellen varifrån strålen gick genom en smal slits i två 20 mm stålplåtar monterade i fönstret in till försökscellen, se Figur 3. Kameran monterades i testcellen på en balk i taket som går längs motorn så att vinkelrät vy mot utloppet och laserstrålen åstadkoms. Optiken gav ett bildfält på 164×164 mm med en skalfaktor på 6,25 pixlar/mm. Ytterst på objektivet var ett bandpassfilter monterat med genomsläpplighet av våglängder mellan 300 och 800 nm, vilket effektivt blockerar ljus i laserns våglängd (1064 nm).

⁷ SFC Specific Fuel Consumption



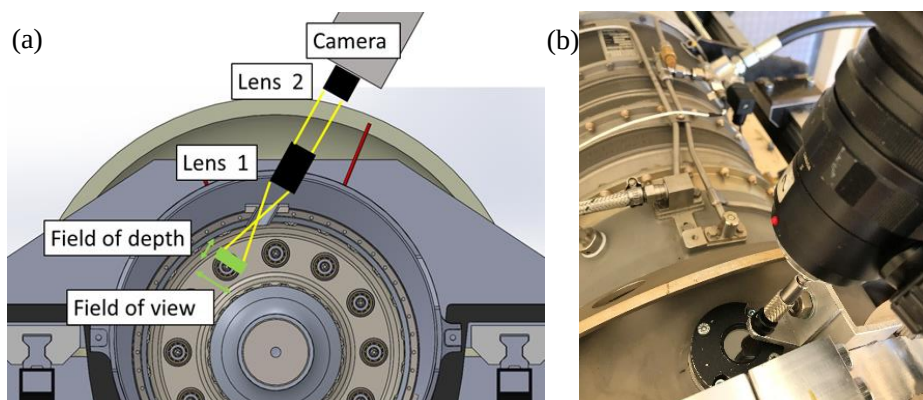
Figur 3. Placering av laser samt kamera för LII-mätningar.

2.3.2.4 Emissionsspektra

Förbränning är en benämning på en mängd kemiska processer som i grunden består i oxidation och nettoavgivning av värme. För att få en bättre inblick i de olika delprocesserna och på så sätt bättre kunna jämföra med förbränningskinetiska modeller kan man mäta vilka elektromagnetiska emissioner som avges. Oftast kan man härleda en specifik process till ett visst frekvensspektra. Fotoner emitteras när atomer och molekyler återgår från ett exciterat tillstånd. Excitationen har sitt ursprung i de kemiska reaktionerna. Med hjälp av en spektrometer kan strålningen som funktion av våglängd mätas. Resultatet kallas ett emissionsspektra. Spektrometern fångar även s.k. svartkroppsstrålning som emitteras enligt Plancks strålningslag [12]. Eftersom sot är en effektiv svartkroppsstrålare kan denna signal ge information om hur mycket sot som bildas. Mätningarna av emissionsspektrat gjordes med en emissionsspektrometer av typen AvaSpec ULS2048CL-EVO-RS-UA. Den mäter inom våglängdsområdet 200-1100 nm med 16 bitars intensitetsupplösning. För insläpp av emissionsspektra till sensorn finns sex olika storlekar på slitsar tillgängliga. Dessa måste anpassas till ljusintensitet och påverkar vilken våglängdsupplösning som kan erhållas. I de aktuella mätningarna användes en 25 µm slits vilket ger 1,4 nm upplösning. Åtkomst till förbränningszonen i brännkammaren realiserades genom ett safirglasfönster som monterades i öppningen avsedd för kruttändaren. En fiberoptisk pickup monterades parallellt med objektivet till höghastighetskameran så att den fångade delar av det ljus som mynnade genom safirglaset, se Figur 4b.

2.3.2.5 Höghastighetsvideo

Flammans form och utbredning samt dess variationer i tid och rum har kvantifierats med hjälp av en Photron SA5 kamera. Kamerans CMOS-sensor ger en ljuskänslighet på ISO 10 000. Kameran kan filma med upp till 7000 bilder/s med 1024 × 1024 pixlars upplösning, men vid de aktuella proven krävdes det 20 000 bilder/s vilket medförde att endast 704 × 520 pixlars upplösning kunde erhållas. En modanalys av tryckets huvudmoder visade att frekvenserna som var av intresse att undersöka befann sig under 10 kHz. Enligt Nyquistkriteriet krävs det dubbla samplingsfrekvensen av den högsta möjliga frekvensen av intresse för att denna ska identifieras. En optikuppställning med dubbla objektiva, se Figur 4a, möjliggjorde att en stor avbildningsyta i objektplanet inne i brännkammaren kunde fångas på bild. På SA5 kameran satt det en 31 mm distansring till vilken ett objektiv (Nikkor 105mm) var monterat, 200 mm framför detta satt ett bak- och framvänt 90mm Leitz – objektiv monterat. Insamlingen startades med gemensam triggsignal till höghastighetstryckmätningarna.



Figur 4. (a) Representativ bild på uppställningen med höghastighetskamera. (b) Fönster in till brännkammen och fiberoptisk pickup för mätning av emissionsspektra. Högst upp till höger i bild syns det bak och framvända objektivet till höghastighetskameran

3 Resultat

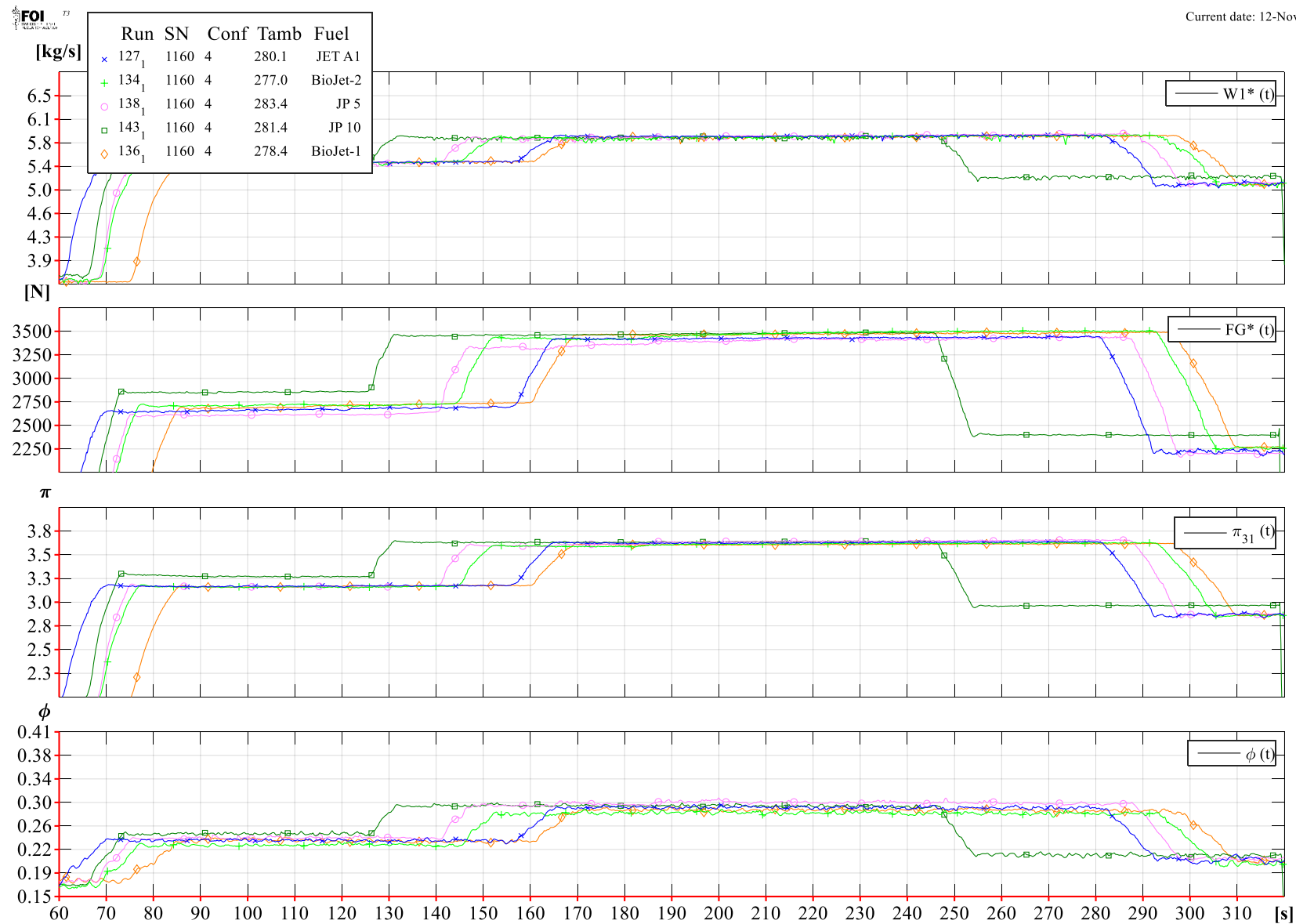
De driftpunkter som valts baseras på två olika massflöden luft. De två korrigerade massflödena luft som valts är $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$ och $W^*_2 = 5,25 \text{ kg/s}$, vilket motsvarar 97,5 % respektive 87,5 % av maximalt nominellt massflöde luft. Störst fokus i rapporten läggs på 97,5 %- driftsfallet. Ett typiskt prov startas automatisk med ett FADEC⁸ – styrprogram, när alla värden är stabila efter uppstart, ställs ett massflöde luft, vanligen 5,5 kg/s, in där man låter motorn varmköras under ca 90 s. Därefter ställs önskad driftpunkt in vilken regleras aktivt av styrprogrammet. Efter att mätdata samlats in avslutas körningen genom att först gå ner på ett lågt varvtal, ca 2250 rpm, och därefter trycka på stoppknappen, vilken stänger bränsleventilen och därav stängs motorn av.

3.1 Driftsfall 1, $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$

Fem olika körningar har valts som underlag för analysen. Resultat presenteras dels som grafer i Figur 5-7. och dels i tabellform, Tabell 5, som ett medelvärde baserat på ett tidsintervall där driftstillståndet avseende korregerat massflöde och korregerad dragkraft varit stabilt och på rätt nivå.

I Figur 5 visas driftstillstånd för prov vid $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$ som funktion av tiden för prov med fem olika bränslen, Jet A1, Swedish Biofuels ATJ – SKA BioJet 100 (BioJet-2 i graferna), JP5, JP10 och BioJet CHCJ 5 (BioJet-1 i graferna). I den översta grafen visas det korregerade massflödet, där det kan noteras att stabila och gemensamma driftstillstånd inträffar mellan tiderna 185 och 240 s och i detta intervall kan jämförelser göras. I grafen under visas den korregerade dragkraften, FG^* , här visas att stabila värden gällande dragkraft inträffar först vid tiden ca 190 s. Nivån är knappa 3,5 kN och det visar sig att de två biobränslena och JP10 ligger något högre än JP5 och Jet A1. Grafen i längst ner i Figur 5 visar det globala ekvivalenstalet ϕ .

⁸ FADEC – Full Authority Digital Engine Control, är ett digitalt styrsystem som kontrollerar motorns drifttillstånd.



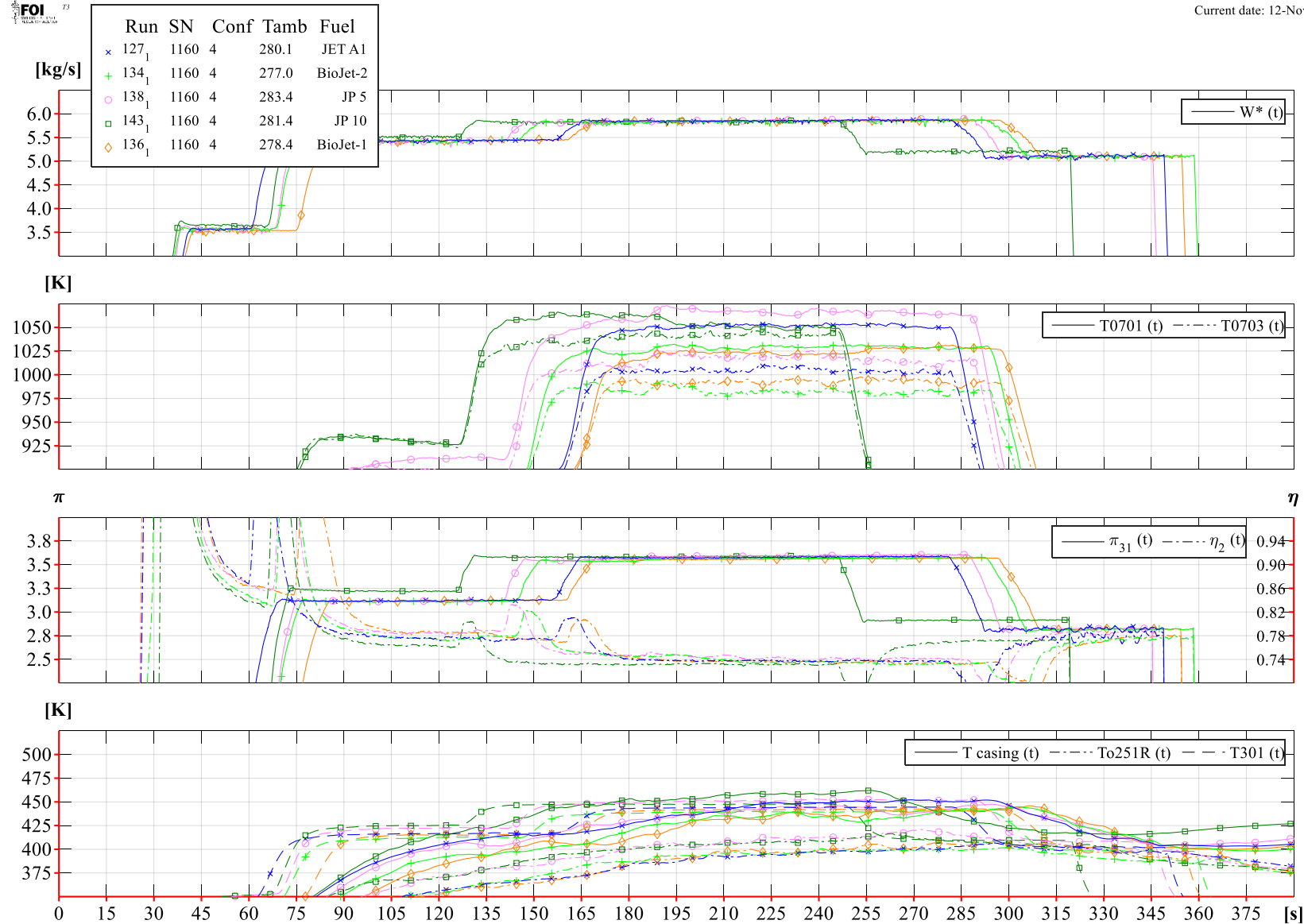
Figur 5. Driftstillstånd som funktion av tid för prov vid $W^*_1 = 5,85$. Graferna i turordning ovanifrån: korrigerat massflöde, W^* , korrigerad dragkraft FG^* , kompressortryckförhållande π_{31} , globalt ekvivalenstal ϕ .

I den översta grafen i Figur 6 visas som tidigare det korregerade massflödet. I grafen under visas två av de tre mätta turbinutloppstemperaturerna T0701 och T0702 vars prober sitter 120° isär i utloppet strax bakom turbinen. Här finns en skillnad i temperatur mellan dessa positioner på ca 50 °C för alla bränslen utom JP10. För JP10 har temperaturerna till en början en spridning på ca 30 °C för att sedan minska till ca 10 °C då temperaturen vid T0701 närmar sig den vid T0702. Spridningen i temperatur i utloppet är inget ovanligt och härstammar från dels hur väl de heta zonerna i brännkammaren blandas ut med sekundärluften och dels på fördelningen av bränsleinsprutnings-munstyckena, vilka i TRI60-2 motorn är placerade med 30° delning. Variationerna strävas till att alltid hållas till ett minimum och enligt [10] ska variationerna understiga 50 °C och idealt vara mindre än 20 °C.

Att JP10 avviker från de övriga bränslena skulle kunna förklaras av att det behövs ett lägre insprutningstryck för att uppnå driftsfallet, vilket medför att flamman inte pressas bakåt i samma utsträckning som hos de övriga bränslena, på så sätt får den dels en något längre sträcka och tid för omblandning och dels att sekundärluften då får ett större penetrationsdjup i primärzonen, vilket i sin tur ger en bättre omblandning. Ytterligare slutsatser som kan dras från grafen är att de två biobränslena ger en lägre utloppstemperatur där Swedish Biofuels ATJ – SKA BioJet 100 är lägst, i medeltal ca 25 °C lägre än Jet A1 och 30-40 °C lägre en JP5. Detta är ett viktigt resultat då det i praktiken möjliggör att ta ut en högre effekt alternativt minskar de termiska lasterna och på så sätt förlänger drifttiden för alla delar från brännkammaren och bakåt i en jetmotor. Det skulle även kunna nyttjas till att minska IR –signaturen.

Den tredje grafen uppifrån visar kompresstryckförhållande, π_{31} och kompressorns isentropiska verkningsgrad, η_2 . Nivåerna hos π_{31} för de olika bränslena är som förväntat samstämmiga och konstanta och följer driftpunkten för sitt motsvarande korregerade massflöde. Här visas att verkningsgraden ökar med tiden vilket kan förklaras med att spalten mellan kompressorhus och kompressorblad minskar allt eftersom kompressorn värms upp.

Grafen längst ner i Figur 6 visar totaltemperaturen nedströms kompressorn, T_{03} , brännkammarens ytterhöljestemperatur T_{casing} , samt returoljans temperatur, T_{O25R} . Dessa parametrar visar huruvida stabila förhållanden erhållits avseende s.k. ”heat soaking” och visar att efter ca 210 s är det relativt stabila temperaturer, förutom returoljetemperaturen, vilken inte påverkar mätningarna i fråga.



Figur 6. Driftstillstånd som funktion av tid för prov vid $W^*_1 = 5,85$. Graferna i turordning ovanifrån: korrigerat massflöde, W^* , utloppstemperaturer T0701 och T0702, kompressortryckförhållande π_{31} och isentropisk kompressorverkningsgrad η_2 , brännkammarens ytterhöljestemperatur T_{casing} . Returoljans temperatur T_{025R} understiger grafens temperaturområde.

Baserat på tider för stabila driftsförhållanden avseende korrigerat massflöde av luft och korrigerad dragkraft har en tabell med medelvärden för ett antal globala driftsparametrar tagits fram, se Tabell 5. I tabellen presenteras driftsförhållandena för de olika bränslena. Här presenteras även insprutningstrycket; P_{inj} , och deltaeffekter avseende avvikelse från det nominella värde som begärts av styrprogrammet ($W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$) samt SFC med utfallet för Jet A1 som referens. I tabellen syns tydligt att lägst SFC har BioJet-2 - Swedish Biofuels ATJ – SKA BioJet 100, med 2,7 % lägre förbrukning än Jet A1. Detta kan delvis förklaras med det 1,7 % högre energiinnehållet (Tabell 2). JP10 visar på högst SFC med nästan samma värde som för JP5. Detta bedöms som märkligt eftersom motorn och dess bränslesystem ska vara anpassat för JP5. Att JP10 och BioJet-2 ligger i varsin ända av SFC för de olika bränslena åskådliggörs i Figur 7, där denna trend visar sig över en större del av driftsenveloppen. Här visas SFC som funktion av korrigerad dragkraft, driftstillståndet för $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$ är markerat med en orange rektangel.

Tabell 5. Medelvärden på driftstillstånd och dess skillnader.

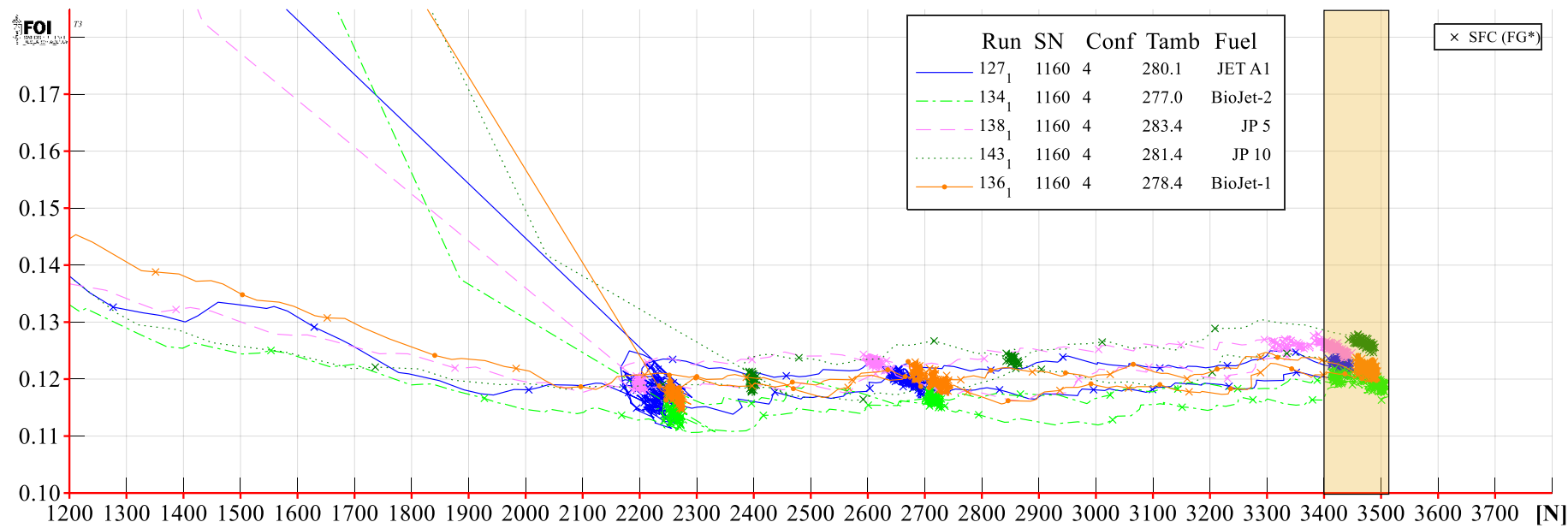
Logg	Bränsle	W^* [kg/s]	ΔW^* (5,85)	$\%W^*_{nom}$	FG^* [kN]	π_{31}	$N1^*$ [rpm $\times$ 1000]	$PINJ$ [kPa]	ϕ	SFC [kg/(Nh)]	ΔSFC^9 [%]
127	JET A1	5,851	+0,001	+0,02	3,43	3,63	27,49	1389	0,292	0,123	0,0
143	JP10	5,844	-0,006	-0,10	3,48	3,64	27,54	1236	0,304	0,126	+2,8
136	BioJet-1	5,838	-0,012	-0,20	3,47	3,61	27,43	1356	0,288	0,122	-0,5
134	BioJet-2	5,847	-0,003	-0,05	3,49	3,62	27,46	1387	0,284	0,119	-2,7
138	JP5	5,859	+0,009	+0,15	3,41	3,64	27,55	1438	0,300	0,126	+2,6

3.2 Driftsfall 2, $W^*_2 = 5,25 \text{ kg/s}$

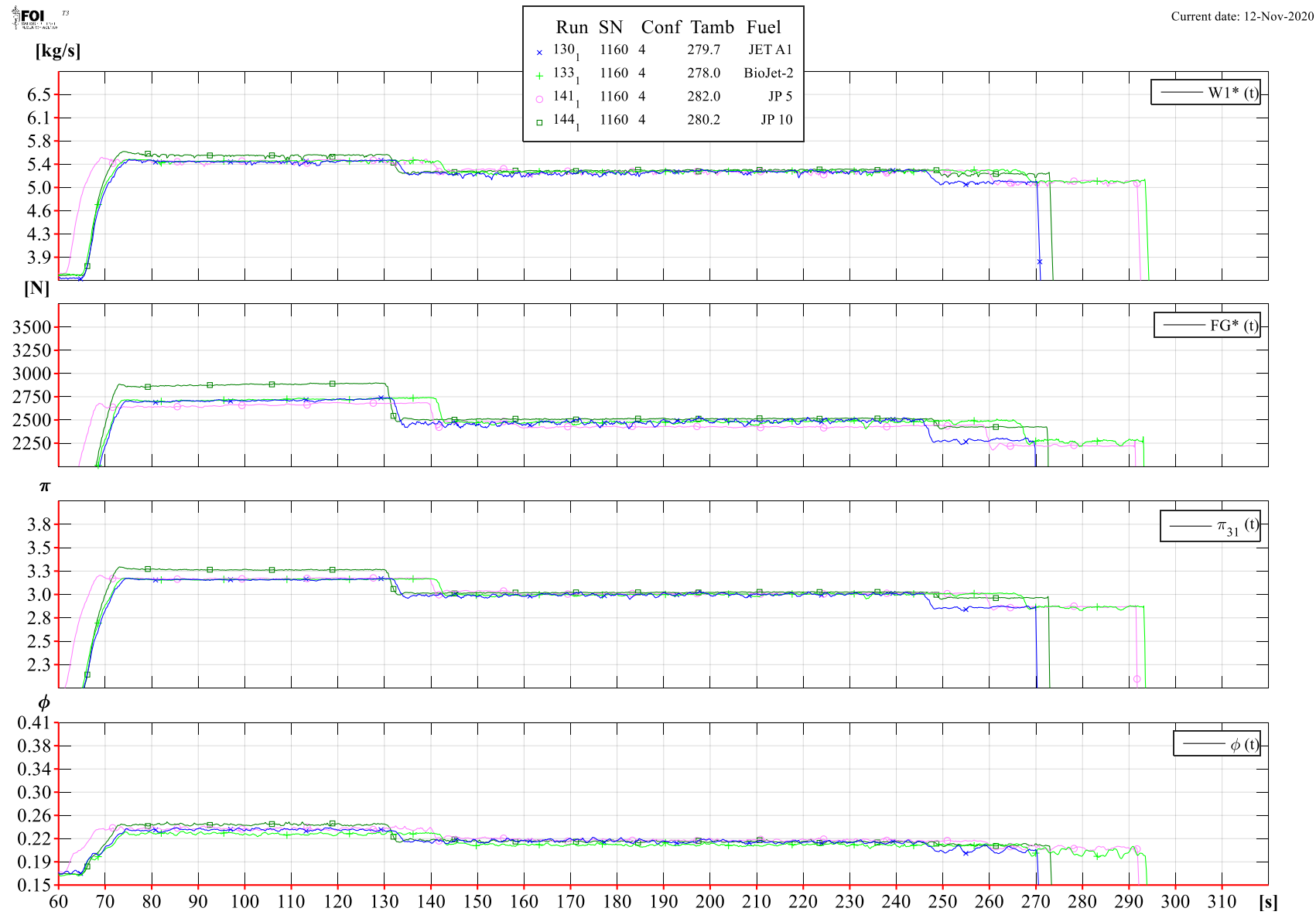
För driftsfallet med det lägre korrigerade massflödet presenteras resultaten på samma sätt som tidigare. Här saknas det dock underlag för ARA:s bränsle CHCJ 5 (BioJet-1) eftersom inte tillräckliga mängder bränsle fanns tillgängligt för att genomföra prov vid det driftsfallet.

I Figur 8 visas driftstillstånd för prov vid $W^*_2 = 5,25 \text{ kg/s}$ som funktion av tiden för prov med fyra olika bränslen, Jet A1, Swedish Biofuels ATJ – SKA BioJet 100 (BioJet-2 i graferna), JP5, och JP10. I den översta grafen visas det korrigerade massflödet, här kan ses att stabila och gemensamma driftstillstånd inträffar mellan tiderna 160 och 240 s och i detta intervall skulle jämförelser kunna göras. I grafen under visas den korrigerade dragkraften, FG^* , här visas att stabila värden inträffar för samma tidsintervall som för luftens massflöde. Nivån är ca 2,5 kN och man ser att dragkraften för JP5 ligger något lägre än för övriga bränslen. I grafen längst ner i Figur 8 visas det globala ekvivalenstalet. I den andra grafen uppiifrån i Figur 9 ser man att turbinutloppstemperaturerna är samstämmiga förutom för JP10. Detta är tvärt emot vad som kunde ses i driftsfall W^*_1 och det skulle behövas ytterligare studier för att kunna göra en bättre analys av orsakerna. I Figur 10 visas SFC som funktion av korrigerad dragkraft och här syns samma trend som tidigare, dvs. att BioJet-2 - Swedish Biofuels ATJ – SKA BioJet 100, har lägst SFC och JP10 högst. Detta syns när medelvärdesbildning gjorts och visas i Tabell 6, dock med mindre skillnader än vid det högre driftsfallet W^*_1 .

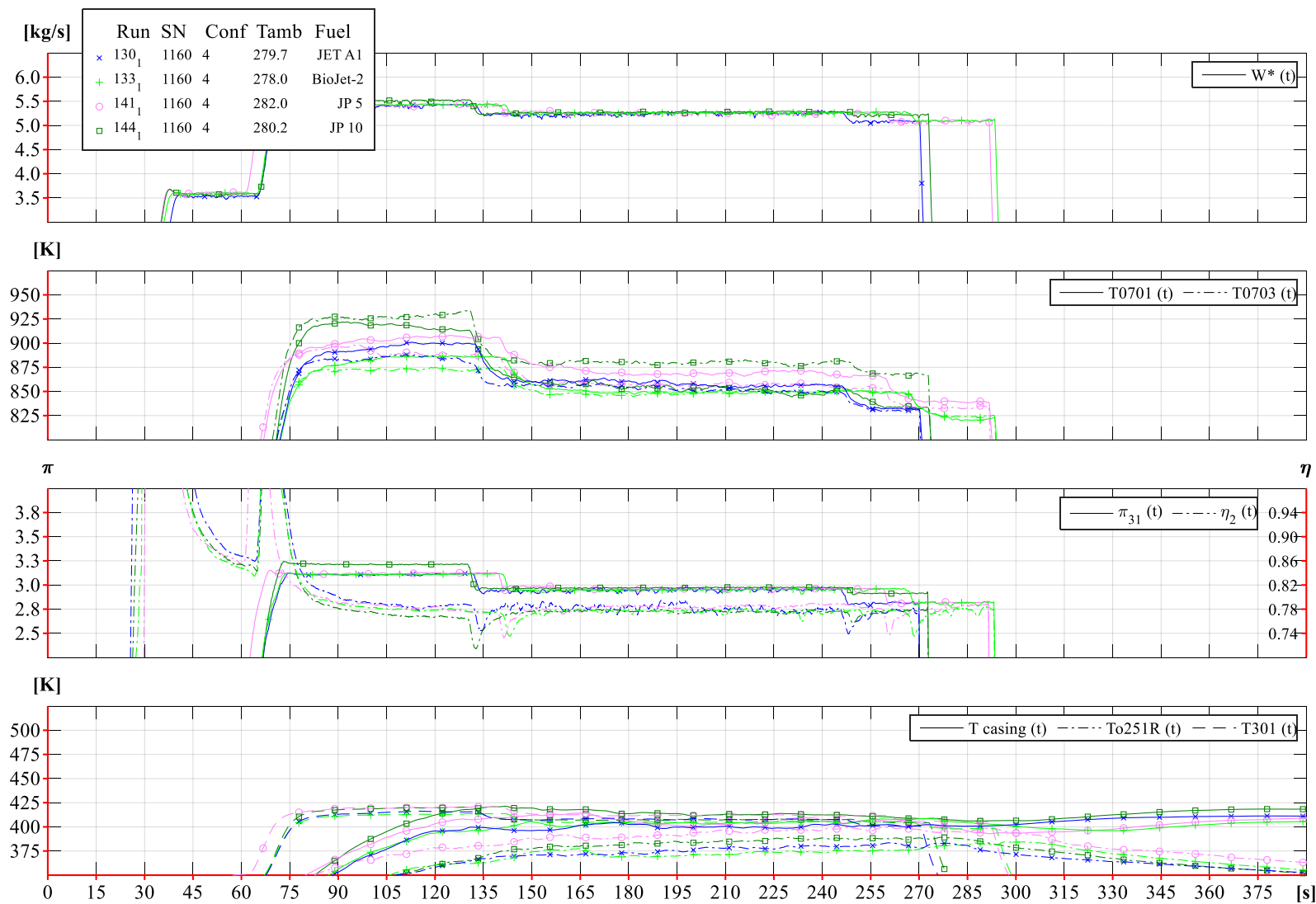
⁹ Jämförs med värden för Jet A1



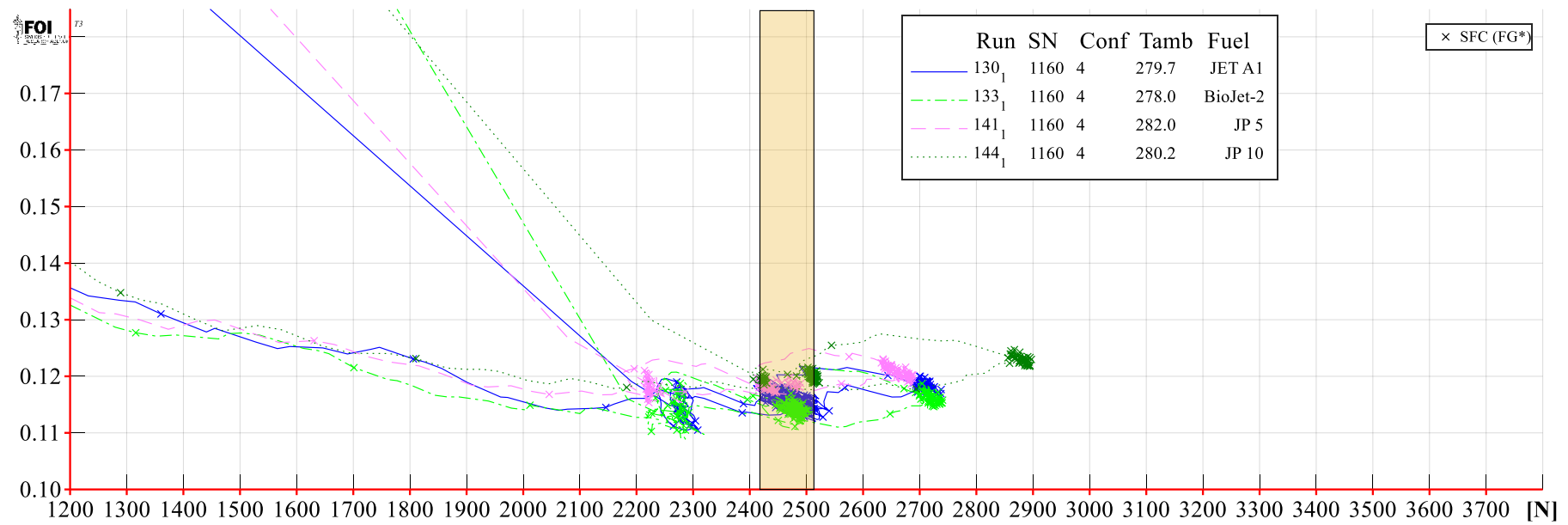
Figur 7. SFC som funktion av korrigerad dragkraft, driftstillståndet för $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$ är markerat med en orange rektangel.



Figur 8. Driftstillstånd som funktion av tid för prov vid $W^*_2 = 5,25$. Graferna i turordning ovanifrån: korrekterat massflöde, W^* , korrekterad dragkraft FG^* , kompressortryckförhållande π_{31} , globalt ekvivalenstal ϕ .



Figur 9. Driftstillstånd som funktion av tid för prov vid $W^*_2 = 5,25$. Graferna i turordning ovanifrån: korrekterat massflöde, W^* , utloppstemperaturer T07, kompressortryckförhållande π_{31} och isentropisk kompressorverkningsgrad η_2 , totaltemperaturen nedströms kompressorn, T_{03} , brännkammarens yterhöljestemperatur T_{casing} . Värdena för returoljans temperatur, T_{025R} understiger grafens område.



Figur 10. SFC som funktion av korrigerad dragkraft, driftstillståndet för $W^*_2 = 5,25$ kg/s är markerat med en orange rektangel

Tabell 6. Medelvärden på driftstillstånd och dess skillnader.

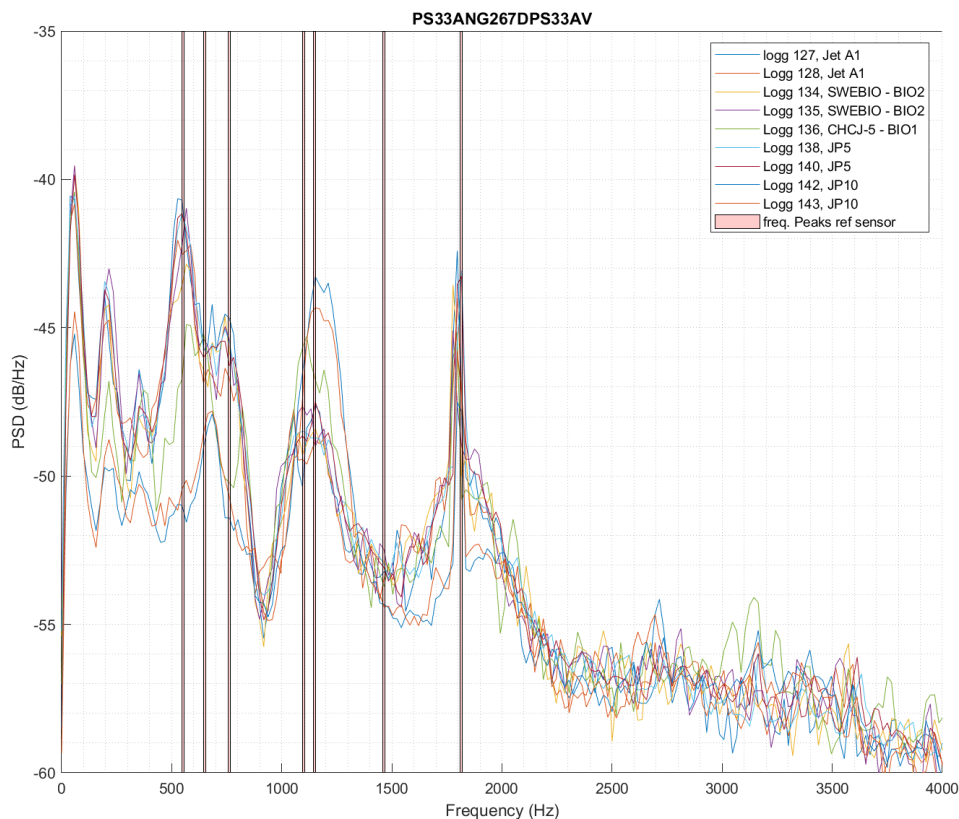
Logg	Bränsle	W^* [kg/s]	ΔW^* (5,85)	$\%W^*_{nom}$	FG^* [kN]	π_{31}	$N1^*$ [rpm $\times$ 1000]	$PINJ$ [kPa]	ϕ	SFC [kg/(Nh)]	ΔSFC^{10} [%]
130	JET A1	5,258	0,008	0,14	2,49	3,00	24,91	621	0,220	0,115	0,00
133	BioJet-2	5,261	0,011	0,19	2,48	3,00	24,95	619	0,215	0,114	-0,88
141	JP5	5,253	0,003	0,05	2,43	3,01	24,94	620	0,222	0,118	2,78
144	JP10	5,276	0,026	0,44	2,51	3,02	25,05	545	0,227	0,120	4,07

3.3 Termoakustik, moder och tryckfluktuationer i brännkammaren

På grund av att det inte kunde ses några termoakustiska instabiliteter och att ingen stor skillnad mellan bränslena kunde identifieras kommer ingen djupare presentation av analysen att göras, endast en kortare diskussion kring resultaten.

De identifierade moderna är stabila och visar små variationer utan drift mellan de olika bränslena. Modfrekvenserna är centrerade kring: $f \approx 580, 690, 1100, 1800, 3070, 3350, 3500, 5750, \text{ och } 7000 \text{ Hz}$. I Figur 11, visas frekvensspektra upp till 4 kHz för driftsfall $W^*_1 = 5,85 \text{ kg/s}$, tryckmätningarna är tagna med sensor PS33ANG267DPS33AV, identifierade frekvenstoppar tagna med sensor PS32ANG100 visas som rosa staplar. Det kan ses att frekvenserna sammanfaller sinsemellan för de olika bränslena vilket tyder på att dynamiken i brännkammaren inte nämnvärt påverkas av olika bränslen. Att genomföra samma analys på bilddata från höghastighetsvideoupptagningarna fanns det inte tid för i projektet varför det prioriterades bort med motivationen att inga instabiliteter kunde identifieras i de aktuella driftsfallen.

¹⁰ Jämförs med värden för Jet-A1

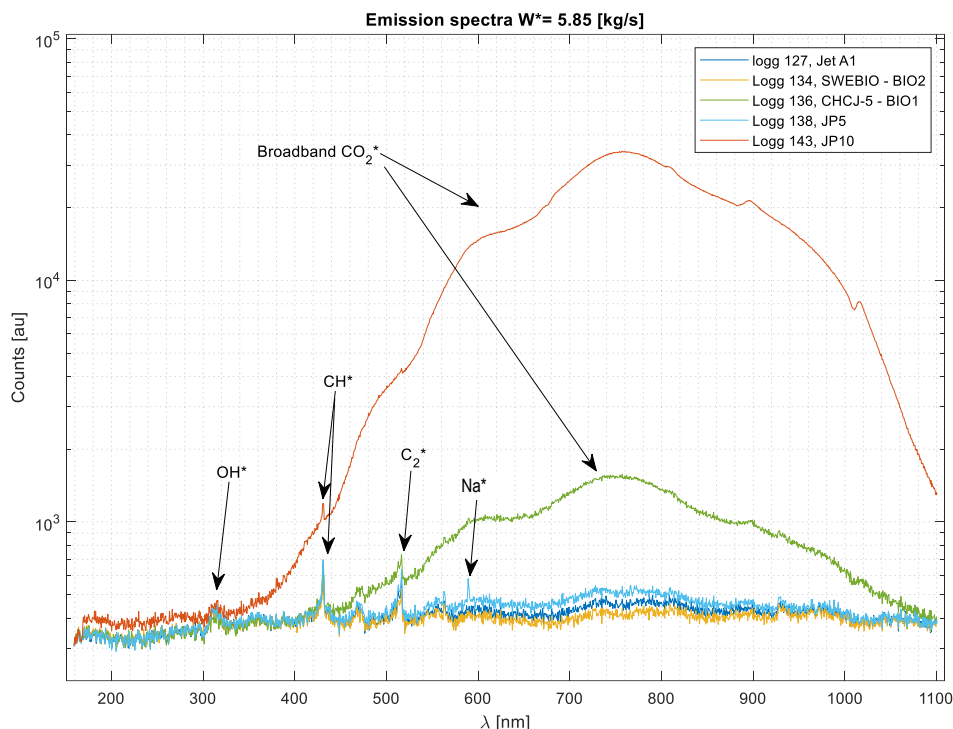


Figur 11. Modfrekvenser hos brännkammtrycket brännkammaren tagna från sensor PS33ANG267DPS33AV för driftsfallet $W^*_1 = 5,85$ kg/s. De rosa staplarna visar frekvenstoppar baserat på tryckmätningar från sensor PS32ANG100.

3.4 Emissionsspektra

I Figur 12 visas emissionsspektrat för de fem bränslena vid driftstillståndet $W^*_1 = 5,85$ kg/s. Spektrat baseras på de mätningar som gjorts av förbränningsprocessen inuti brännkammaren.

Pilarna förtydligar topparna i spektrat vilka förknippas med specifika radikaler och processer. JP10 utmärker sig genom att ha en mycket kraftigare intensitet vid våglängder längre än 350 nm. Dess stora och breda topp finns i det synliga området men sträcker sig även långt in i IR området. CHCJ-5 (BioJet-1) har en liknande form som JP10 men en klart lägre intensitetsnivå. Lägst intensitet uppvisade BioJet-2, orange kurva. JetA1 visade, som enda bränsle, en topp vid 585 nm vilket härleds till Natrium-radikalen.

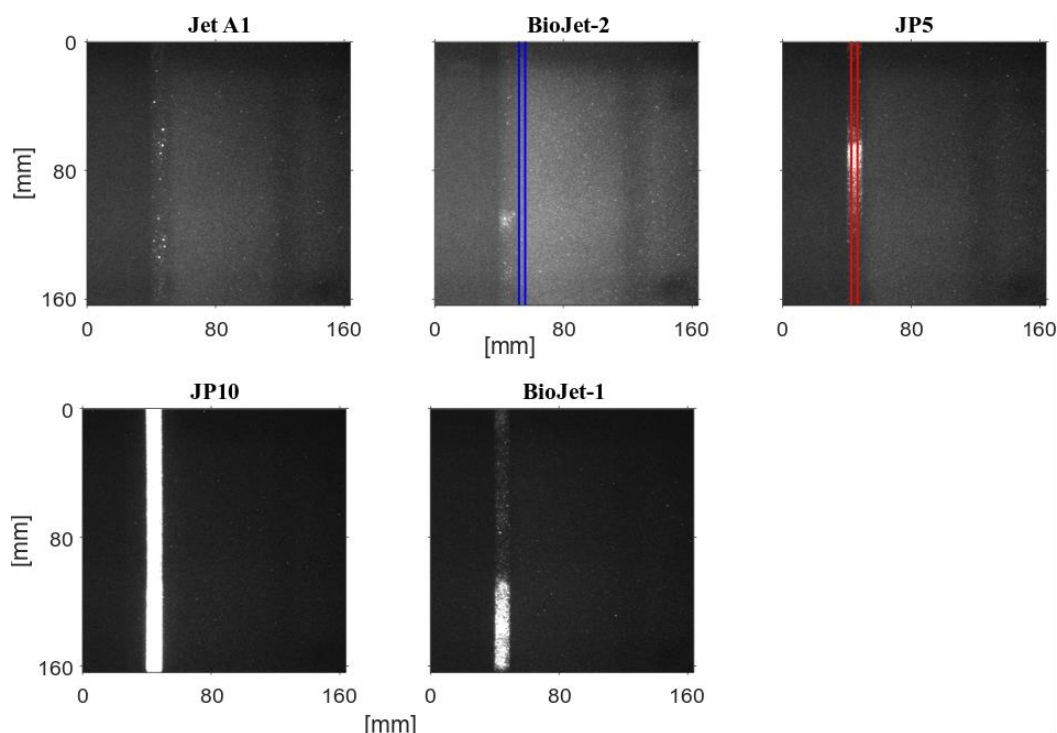


Figur 12. Emissionsspektra för de fem bränslena testade vid $W^*_1 = 5,85$ kg/s.

3.5 LII

Resultat från mätningar av LII presenteras p.g.a. bränslebrist endast för driftsfallet $W^*_1 = 5,85$ kg/s. För varje provtillfälle togs 100 bilder under mätningarna av LII, varifrån information om andelen sotpartiklar och dess intensitet sedan extraheras. Figur 13 visar en representativ bild för varje bränsle som analyserades. Då försöken gjordes vid olika tillfällen och under begränsade möjligheter att stänga ute störande naturligt ljus (som i några fall gav högre intensitet för bakgrunden men som inte påverkade själva sotpartiklarnas intensitet) så har ett tröskelvärde subtraherats från samtliga bilder före analysen. Värdet baserades på det högsta medelvärdet av intensiteten i ett område nedströms om laserstrålens strålgång, vilket inträffade vid prov med BioJet-2 och driftsfall $W^*_1 = 5,85$ kg/s. Medelvärdet på bakgrundsintensiteten uppgick här till 3743. Därefter har alla bildpunkter inom ett 4 mm brett område längs mitten av laserstrålens strålgång som har en intensitet högre än 1024 definierats som sot.

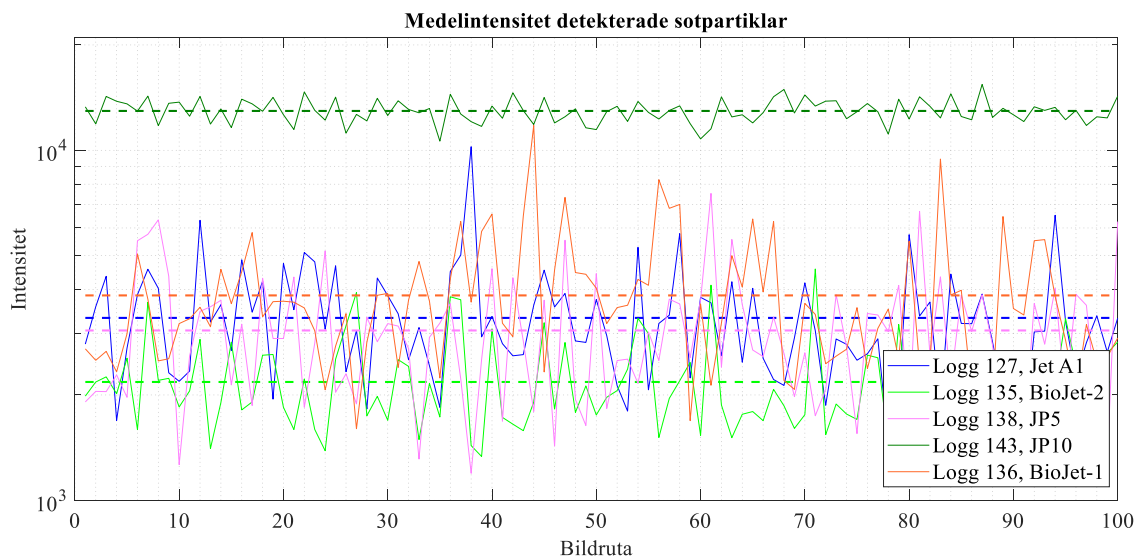
Sotpartiklarna kommer antingen som enskilda välavgränsade partiklar, vilket kan urskiljas på bilden med fallet Jet A1, eller så kommer de i kluster, som exemplifieras i fallen JP5 och BioJet-1. För att synliggöra partiklarna för samtliga fall har bilderna i Figur 13 begränsats till en intensitet på 8192, allt högre än det visas som vitt.



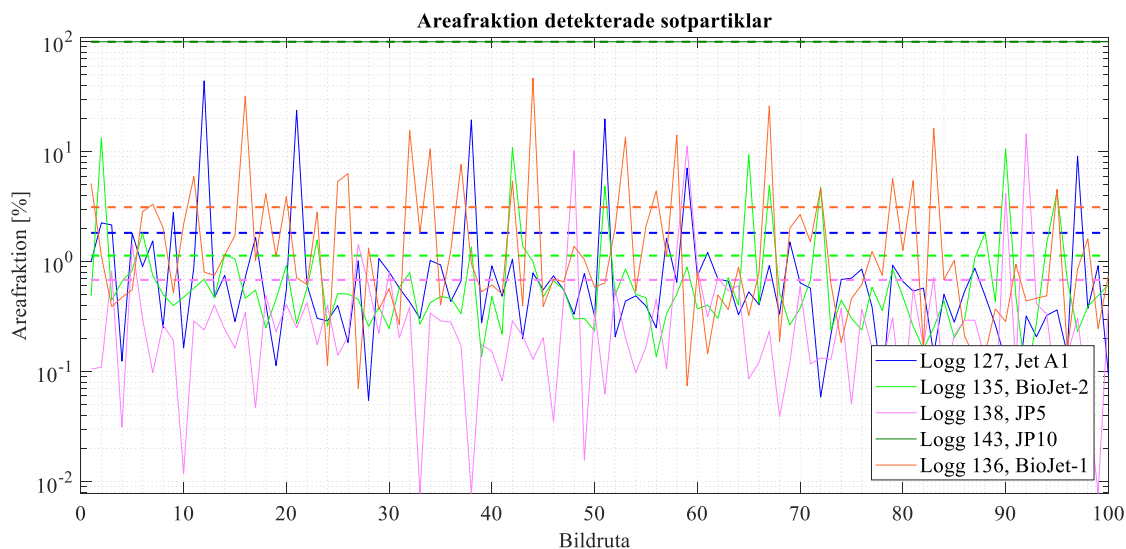
Figur 13. Exempelbilder från LII-mätningar för de jämförda bränslena. Jetströmmen är från vänster till höger. Det röda fältet i mittenfallet med JP5 illustrerar området som har utvärderats, och det blå fältet i fallet med BioJet-2 motsvarar det område vars högsta medelvärde användes för subtraktion av bakgrunden i samtliga fall.

Figur 14 visar medelintensiteten för partiklar detekterade på varje enskild bildruta för bränslena som ingick i jämförelsen. JP10 visar på klart högre intensitet än övriga bränslen, vilket även kan konstateras från Figur 13. Biojet-2 ligger på motsvarande sätt på en lägre nivå än övriga, om än ej med samma stora avvikelse. Övriga bränslen uppvisar relativt samstämmiga nivåer. Intensiteten kan kopplas till storleken på de individuella sotpartiklarna, vilket innebär att enstaka större partiklar kan ge ett högt medelvärde medan ett lågt värde kan innebära små men många partiklar. Därför bör man titta på fler parametrar i mätområdet.

Figur 15 visar areafractionen i procent av det analyserade området som sotpartiklarna upptar för varje bildruta. I fallet med JP10 så är området mättat för hela bildserien, medan övriga ligger i lägre storleksordningar. Medelvärdet som visas skall betraktas med försiktighet då det påverkas mycket av de kluster med partiklar som kommer i jetströmmen och vars periodicitet kan variera, något som topparna på de enskilda bilderna säger något om.

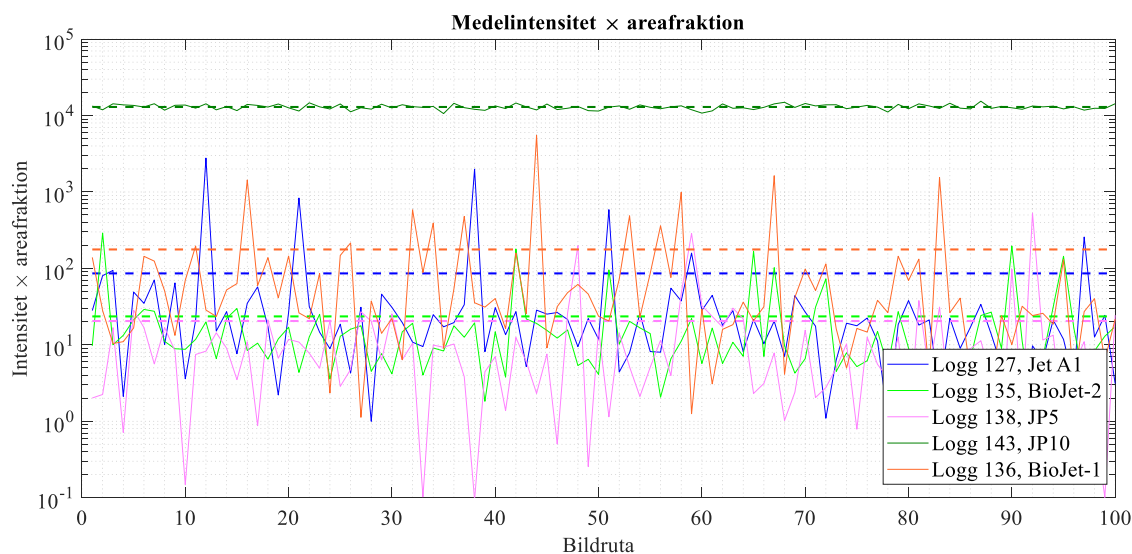


Figur 14. Medelintensitet för sotpartiklar som registrerats på varje individuell bildruta, streckade linjer är medelvärden för hela bildserien.



Figur 15. Areafraction av detekterade sotpartiklar. Kurvorna visar andel av det analyserade området, i procent, som upptas av sotpartiklar enligt tröskelvärde 1024 efter att bakgrundsvärdet subtraherats. Streckade linjer är medelvärden.

För att få ett bättre jämförelsetal mellan de olika bränslena multipliceras sotpartiklarnas medelintensitet med dess areafraction vilket jämnar ut inverkan mellan enskilda partiklars intensitet och större diffusa kluster med mindre partiklar. Resultatet av detta visas i Figur 16 där JP10 fortfarande avviker från övriga bränslen vilka inbördes följer ungefär samma fördelning som visats tidigare, med JP5 och BioJet-2 samlat i de lägre intervallen, medan Jet A1 och BioJet-1 ligger högre.



Figur 16. Medelintensiteten på detekterade sotpartiklar multiplicerat med areafractionen.

I Tabell 7 redovisas ett antal mått på LII-intensitet. Dels ges intensitet och areafraction som medelvärden över samtliga bilder; dels ges produkten av intensitet och areafraction, även den som medelvärde över samtliga bilder. Den sistnämnda produkten har sedan normerats med avseende på referensbränslet Jet A1. Detta värde är ett relativt värde bränslena emellan som ger en kvalitativ bild av mängden sot som genereras av respektive bränsle i motorkonfigurationen som använts i denna studie.

Tabell 7. Medelvärde över bildserien av intensitet, areafraction, produkten av dessa, samt sistnämnda normerad med referensen Jet A1.

Logg	Bränsle	I_{medel}	A_{medel}	$(I \times A)_{medel}$	$(I \times A)_{medel,norm}$
127	JET A1	3320	0,018	86	1,000
135	BioJet-2	2178	0,011	24	0,273
138	JP5	3057	0,007	20	0,238
143	JP10	12954	1,000	12954	150,63
136	BioJet-1	3849	0,031	177	2,058

4 Slutsatser

Studien visar att samtliga fem bränslen, JP5, JetA1, JP10, ARA - CHCJ-5 och Swedish Biofuels - BIOJET 100 ATJ-SKA, fungerar väl i Microturbo TRI60-2-motorn.

Sett till prestanda så visar BIOJET 100 ATJ-SKA på en 2,7 % lägre specifik bränsleförbrukning (eng. Specific Fuel Consumption, SFC) än referensen Jet A1, medan JP10 har 2,8 % högre SFC. Även ARA - CHCJ-5 visar något lägre, 0,5 %, medan JP5 har 2,6 % högre SFC än referensen Jet A1.

Inget av de i studien ingående bränslena visar på termoakustiska instabiliteter utan samtliga har stabila toppar i frekvensområdena som motsvarar tryckmoderna i brännkammaren.

Signaturmässigt är låg turbinutloppstemperatur, ett emissions-spektra som har låg intensitet i IR-området samt minimala sotutsläpp önskvärt. I denna jämförelse ligger BIOJET 100 ATJ-SKA lägst för dessa parametrar förutom för mängden sot, där JP5 ligger något lägre. ARA - CHCJ-5 är något högre än JET A1, men de ligger inte i samma storleksordning som JP10, som utmärker sig åt andra hållet. Det skall dock åter nämnas att munstyckena i motorn är anpassade för JP5 vilket kan ha inverkan på dessa resultat liksom övriga.

Huruvida en optimering av munstyckena ytterligare kan öka prestandan och minska signaturen för ett givet biobränsle, liksom hur det påverkar storleken på sotpartiklar och klusterbildning därav samt förbränningsdynamik i övrigt, lockar till fler och djupare studier. Vidare behöver inverkan på signaturen från större sotpartiklar, respektive kluster med mindre partiklar studeras för att kunna dra kvantitativa slutsatser om detta.

Slutligen kan det tilläggas att förutom ökad prestanda och lägre signatur kan biobränslen uppfylla framtida krav på neutrala utsläpp samt att möjligheten för inhemsk produktion av bränsle ges, då råvarorna finns i goda mängder inom landet.

5 Referenser

- [1] Försvarmakten, "www.forsvarsmakten.se," 25 11 2020. [Online]. Available: <https://www.forsvarsmakten.se/siteassets/4-om-myndigheten/vart-arbetsatt1/vart-miljoarbete/forsvarssektorns-inriktningsdokument-inom-miljoomradet.pdf>.
- [2] J.-F. Rideau, G. Guyader och A. Clo, "MICROTURBO Families of Turbojet Engine for Missiles and Uav's From the TR60 to the New Bypass Turbojet Engine Generation," i *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Hartford, 2008.
- [3] Coordinating Research Council., "Handbook of aviation fuel properties," Coordinating Research Council, Inc, Alpharetta, GA, 2014.
- [4] SAE, "Aircraft Propulsion System Performance Station Designation and Nomenclature ARP755," SAE, 2011.
- [5] AGARD, "AD-A226 378 Recommended Practises for Measurment of Gas Pressures and Temperatures for Performance Assesment of Aircraft Turbine Engines and Components," AGARD, Essex, 1990.
- [6] AGARD, "Air intakes for high speed vechicles," AGARD, nr AR -270, pp. 417-442, 1991.
- [7] ASME, "ASME-MFC26-2011 Measurement of Gas Flow by Bellmouth Inlet Flowmeters," ASME, New York, 2011.
- [8] C. Tropea, A. L. Yarin och J. Foss, Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Berlin: Springer, 2007.
- [9] SAE, "SAE-ARP1420, Gas Turbine Engine Inlet Flow Distorion Guidlines," SAE, Warrendale, 1994.
- [10] P. P. Walsh och P. Fletcher, Gas Turbine Performance, Bristol: Blackwell Publishing, 2004.
- [11] H. Bladh, "On the Use of Laser-Induced Incandescence for Soot Diagnostics," Lund University, Lund, 2007.
- [12] J. H. Lienhard, A Heat Transfer Textbook, 5th ed, Massachusetts : Phlogiston Press, 2008.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se