



Ammunitions- och energilagringssäkerhet

Sammanfattande projektredovisning 2021

CARINA ELDSÄTER, HANNA ELLIS, MAHABUBA JAHAN,
ELIAS LALLO, ANDREAS LINDBORG, EMMA LUNDELL,
DAN MARTELIN, MARKUS PASTUHOFF, WILHELM SAHLÉN,
MARITA SJÖBLOM, RASMUS WEDBERG OCH NIKLAS WINGBORG

Carina Eldsäter, Hanna Ellis, Mahabuba Jahan,
Elias Lallo, Andreas Lindborg, Emma Lundell,
Dan Martelin, Markus Pastuhoff, Wilhelm Sahlén,
Marita Sjöblom, Rasmus Wedberg och Niklas
Wingborg

Ammunitions- och energilagringssäkerhet

Sammanfattande projektredovisning 2021

Titel	Ammunitions- och energilagringssäkerhet – Sammanfattande projektredovisning 2021
Title	Ammunition and energy systems safety. Progress report 2021.
Rapportnr/Report no	FOI-R--5255--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2021
Antal sidor/Pages	25
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E20909
Godkänd av/Approved by	Henric Östmark
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet

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

Inom ramen för Försvarmaktens FoT-program har projektet Ammunitions- och energilagringssäkerhet bedrivits under två år. Projektet är kunskapsuppbyggande och vidmakthåller också kunskap inom områdena ammunitionssäkerhet och energilagringssäkerhet. Projektet har flera olika aktiviteter där alla syftar till att undersöka, förstå och värdera säkerhetsaspekter hos ammunition, enskilda energetiska material samt energetiska processer.

Rapporten redovisar huvuddelen av de verksamheter som bedrivits inom projektet under 2021.

Nyckelord: ammunitionssäkerhet, energetiska material, energetiska processer, termisk initiering, mekanisk provning, setback, sprängämnen, krut, litium-jonbatterier, termisk rusning, gasutveckling.

Summary

The project Ammunition and energy systems safety, funded by the Swedish Armed Forces, has performed safety related research in the area of energetic materials and energetic systems, such as batteries during two years. The overall aim of the project is to investigate, understand and to evaluate safety aspects of ammunition, energetic materials and energetic processes in order to maintain and develop knowledge.

This report presents the research and development performed during 2021.

Keywords: ammunition safety, energetic materials, energetic processes, thermal initiation, mechanical testing, setback, explosives, propellants, lithium ion batteries, thermal runaway, gas evolution.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Genomförd verksamhet.....	8
2.1	Ammunitionssäkerhet	8
2.1.1	Modellering av termisk initiering hos nitrocellulosakrut	8
2.1.2	Metod för bestämning av kruts känslighet för varma splitter...	10
2.1.3	Mekaniska egenskaper hos kompositmaterial	12
2.1.4	Kemisk prov- och analysteknik	14
2.2	Energilagringssäkerhet.....	15
2.2.1	Gasanalys vid termisk rusning av litium-jonbatterier	16
2.2.2	Fluorfria elektrolyter	17
2.2.3	Åldring av litium-jonbatterier	18
3	Deltagande i möten, kurser och konferenser	19
3.1	Workshop om ammunitionssäkerhet	19
3.2	Batteriworkshop	19
4	Internationella samarbeten	20
4.1	EDA PREMIUM.....	20
4.2	AC/326 Gun Launch Setback Ignition Study Working Group	20
4.3	AVT-ET-209 Munition Health Management	20
5	Samverkan med andra FoT-projekt.....	22
6	Slutkommentar	23
7	Dokumentation	24
8	Referenser.....	25

1 Inledning

Ammunition och energilagringssystem innehåller mycket energi, nödvändig för funktionen i vapensystem, plattformar och soldatsystem av olika slag. Energin kan vara lagrad i såväl energetiska material som batterier och andra lagringssystem.

Kunskap om energetiska material och processer i båda dessa fall är därför viktig för att kunna bedöma transport-, hanterings- och lagringssäkerhet både i ett kort men även i längre perspektiv.

Forskningen i projektet har inriktats mot att utveckla förmågan att analysera, undersöka och bedöma ammunition och energilagringssystem på såväl delkomponentnivå (krut, sprängämnen och kritiska delar hos exempelvis ett batteri) som på aggregerad systemnivå (säkerhets- och funktionsprovningsteknik). Metoder och modeller för att bedöma åldringsegenskaper hos ammunitions- och framdrivningssystem utvecklas för att på sikt kunna stötta livslängdsanalyser avseende vapen och ammunition.

Målet med den utvecklade kunskapen är att den ska vara tillämplig i säkerhetsanalyser och kravställning på system som innehåller energetiska material såsom stridsdelar, raketmotorer och kaliberbunden ammunition, samt energilagringssystem som batterier i säkerhetskritiska tillämpningar.

Forskningsverksamheten har bidragit till Försvarmaktens ammunitionssäkerhetsarbete genom kunskapsstöd till enskilda provningsuppdrag (från FMV) och genom rådgivning.

Projektet hade 2021 följande frågeställningar att beakta:

- Hur kan man bedöma åldringsegenskaper hos nya och befintliga ammunitions- och framdrivningssystem?
- Vilka krav (t.ex. avseende defekter, mekanisk hållfasthet och kemisk stabilitet) ska ställas på gammal och ny ammunition?
- Hur kan säkerhet hos energilagringssystem bedömas för Försvarmaktens behov?
- Hur kan ammunitionssäkerhet förbättras genom konstruktionslösningar för ammunition? (denna frågeställning har inte behandlats under 2021)

Denna rapport beskriver kortfattat de aktiviteter som genomförts inom ramen för projektet under året.

2 Genomförd verksamhet

2.1 Ammunitionssäkerhet

Under året har projektet fokuserat på ammunitionssäkerhetsfrågor kopplat till oavsiktlig termisk initiering av ammunition med syfte att bedöma säkerhetsrisker med nitrocellulosakrut (avsnitt 2.1.1). Arbetet syftar till att öka förståelsen för initieringsförloppet för att i förlängningen kunna ta fram tillförlitliga och kostnadseffektiva metoder för ammunitionsovervakning och bedöma riskerna för t.ex. självantändning.

Projektet har också studerat hur de mekaniska egenskaperna hos kompositmaterial, såsom kompositkrut eller plastbundna sprängämnen, påverkas av åldring (avsnitt 2.1.3). Denna typ av material består av en polymerbaserad matris och hållfastheten hos denna kommer att förändras med ålder. Beroende på användningsområde kan försämrade mekaniska egenskaper påverka både säkerhet och funktion. Även här syftar arbetet till att öka förståelsen för hur de mekaniska egenskaperna hos kompositmaterial förändras under olika betingelser och hur denna information kan användas till att bedöma kvarvarande livslängd hos ammunition. Arbetet sker inom ramen för ett EDA-samarbete (avsnitt 4.1) där även svensk industri ingår.

Projektet har även ett fokusområde som heter *prov- och analysteknik*. Under året har projektet därför studerat metoder för kvantitativ kemisk analys av kompositkrut med syfte att kunna bestämma halterna av de ingående komponenterna med sådan noggrannhet att prestanda kan beräknas (avsnitt 2.1.4).

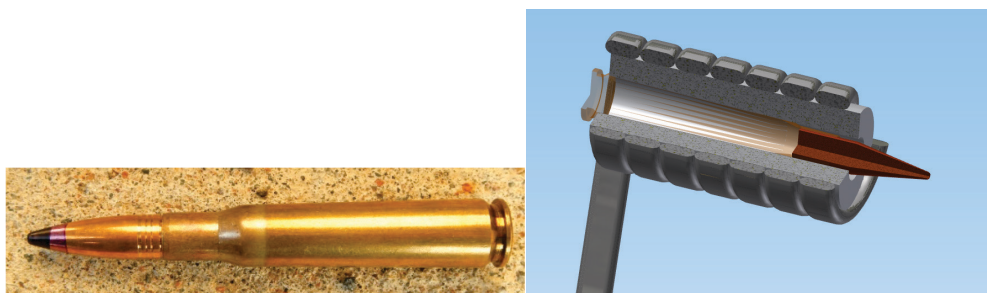
Kopplat till kunskapsutveckling inom termisk initiering har det även pågått en vidareutveckling av en metod, *Hot Fragment Conductive Initiation Test*, för att bestämma kanonkruts känslighet för varma splitter (avsnitt 2.1.2).

2.1.1 Modellering av termisk initiering hos nitrocellulosakrut

Nitrocellulosa sönderfaller spontant med tiden varvid så kallade autokatalysatorer, bland annat nitrosa gaser, bildas. Dessa accelererar sönderfallet vilket leder till att krutet efter en viss tid kan självantända. För att förhindra detta tillsätts stabilisatorer till krutet som binder autokatalysatorerna efterhand som de bildas. Halten av stabilisatorer sjunker dock allteftersom de konsumeras, och när halten är tillräckligt låg ökar åter risken för självantändning. För ammunition av grövre kalibrar genomförs regelbundet ammunitionsovervakning där bland annat halten av kvarvarande stabilisatorer mäts. Ammunition med mindre kaliber, t.ex. 12,7 mm är dock undantagen övervakning eftersom den inte anses kunna självantända. Detta har motiverats med antagandet att kalibern är så liten att utvecklad värme alltid kan absorberas av omgivningen. Detta antagande gör det därför intressant att modellera denna typ av konfiguration.

Sedan ett antal år tillbaka bedriver FOI ett kunskapsutvecklande arbete med experiment och modellering för att studera termiska initieringsförlopp. Hittills har arbetet fokuserat på slow cook-off där provobjektet värms långsamt enligt en föreskriven temperaturkurva till dess att laddningen initieras. Detta är inte samma förlopp som äger rum då ammunitionen spontanantänds vid långvarig förvaring och viktiga skillnader finns, t.ex. att initieringen vid slow cook-off sker vid högre temperatur. Det finns dock många likheter mellan förloppen, och en modell som beskriver initiering vid slow cook-off bör med viss anpassning även kunna beskriva självantändning vid förvaring.

Under 2019 genomfördes ett antal termiska initieringsprov, dels på hela 12,7 mm-patroner och dels på extraherat krut från 12,7-patroner. Med det extraherade krutet genomfördes Accelerating rate calorimetry (ARC) och instrumenterade termiska initieringsförsök (ICOT). Resultaten från ICOT-försöken finns dokumenterade i [1]. För försöken med hela patroner placerades dessa i en specialtillverkad patronhållare av stål som omlindades med värmeband och värmdes tills krutet initierades. Detta illustreras i Figur 1.



Figur 1. Till vänster Eurometaal 12,7x99 AP (Hard Core) från FOI:s förråd, som provats i termiska initieringsförsök (Foto: Stefan Olsson). Till höger ritning av patron i patronhållare av stål med omlindat värmeband.

Under 2021 har resultaten från dessa försök analyserats och nyttjats för att utveckla en modell för termisk initiering av nitrocellulosakrut. Modellen beskriver värmeledning i krutet kopplat till sönderfallskinetik som i sin tur genererar värme. Olika tillvägagångssätt för att kalibrera modellen har utforskats. Det som förefaller ha fungerat bäst är en metod där sönderfallsmodellen kalibreras mot ICOT-försöken. Resultaten från ARC och slow cook-off på hela patroner har sedan använts för att validera den kalibrerade modellen.

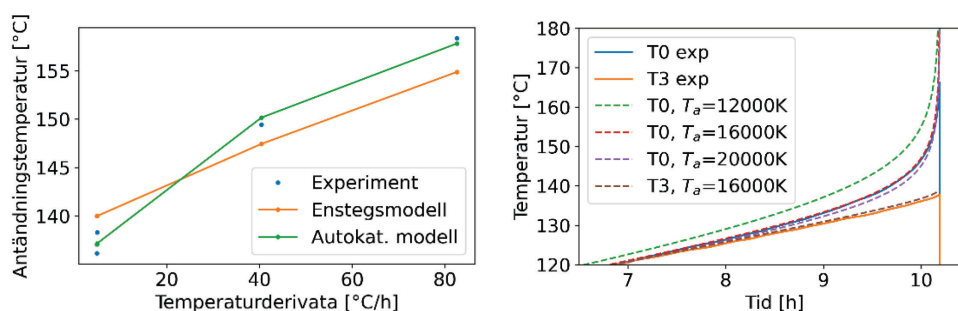
ICOT-försöken är baserade på testet Sandia Instrumented Thermal Ignition (SITI) och har beskrivits i en tidigare teknisk rapport [2]. I försöket fylls en cylindrisk kavitet (25,4x25,4 mm) i ett stålhölje med krut. Fyra termoelement monteras på olika positioner på kevlarrådar uppspända i cylinderns mittplan. Höljet omlindas med värmeband, vilket visas i Figur 2, och värms enligt en föreskriven temperaturkurva tills laddningen initieras. Med termoelementen registreras temperaturen som funktion av tid på de olika positionerna, vilket ger en indikation på vilka temperaturgradienter som förekommer under initieringsförloppet. Några av de aktuella försöken har genomförts utan termoelement. Försöket ger då endast information om vid vilken temperatur som initiering sker givet föreskriven uppvärmning, men är å andra sidan mindre kostsam och minskar risken för att mätningen påverkas av läckande nitrösa gaser.



Figur 2. Stålhölje omlindat med värmeband som används i ICOT-försöken (Foto: Dan Martelin).

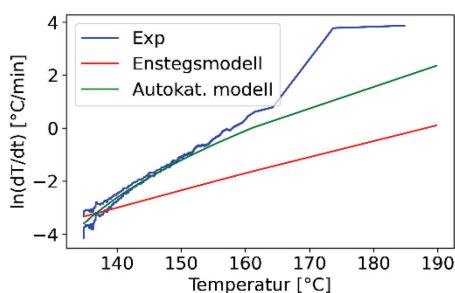
I det aktuella arbetet har två olika modeller för sönderfallskinetik provats. Den ena modellen beskriver sönderfallet i ett enda steg (enstegsmodell) medan den andra tar hänsyn till den autokatalytiska effekten. Modellerna har kalibrerats efter resultaten från ICOT-försöken, vilket inkluderar initieringstemperaturen som funktion av temperaturderivatan hos uppvärmningskurvan och termoelementsignalerna från ett försök där inbäddade termoelement nyttjades. Delar av resultaten från kalibreringen visas i Figur

3. Den autokatalytiska modellen kan anpassas till försöken med god noggrannhet, medan resultaten från enstegsmodellen inte är helt tillfredsställande.



Figur 3. Till vänster visas antändningstemperatur i ICOT-försöken som funktion av temperaturderivatan hos uppvärmningskurvan. Simulering med enstegs- eller autokatalytisk sönderfallsmodell jämförs med experiment. Till höger visas temperaturutveckling för två positioner i laddningen, T0 i centrum och T3 cirka 1 mm från höljet. Simulering med den autokatalytiska modellen (streckade linjer) och olika aktiveringstemperaturer jämförs med termoelementsignaler från experiment (solida linjer).

Validering av den autokatalytiska modellen mot resultat från ARC och slow cook-off på hela patroner ger en god överensstämmelse, dock med vissa diskrepanser. Som exempel visar Figur 4 en jämförelse mellan simulering av en ARC-körning med motsvarande försök.



Figur 4. Simulering av ARC-körning med enstegsmodellen (röd) eller den autokatalytiska modellen (grön) jämförs med försöksresultat (blå). För försöket inkluderas två kurvor som indikerar osäkerheten i mätvärdet på grund av instrumentets drift.

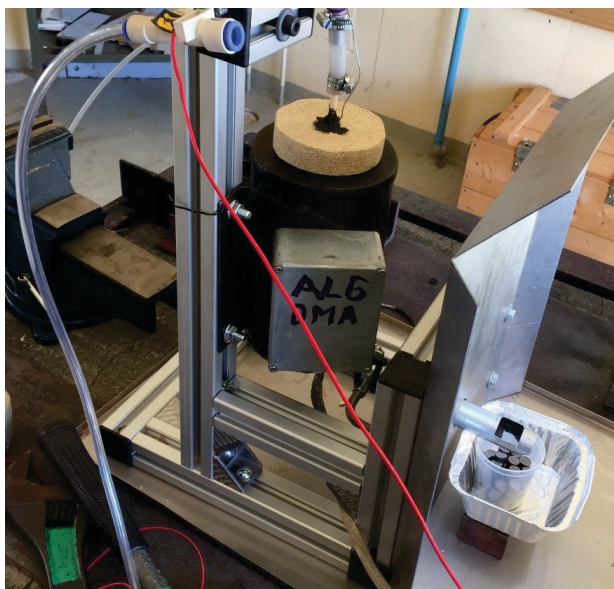
Resultaten visar hur modellering och försök kan nyttjas för att karaktärisera termiska initieringsförlopp för att kunna göra kvantitativa förutsägelser. Arbetet dokumenteras i rapporten [3]. Vidare arbete krävs dock för att behandla frågeställningen om drivladdningen i 12,7 mm-ammunition kan självantända vid långvarig förvaring. Bland annat behöver modellen utökas för att kunna relatera krutets känslighet till stabilisatornivån.

2.1.2 Metod för bestämning av kruts känslighet för varma splitter

Direkt eller indirekt beskjutning av en plattform kan leda till oavsiktlig initiering av ammunitionen och kan i sämsta fall leda till att plattformen slås ut. För att bedöma hur känslig ammunition är för indirekt beskjutning från varma splitter har en provmetod, Hot Fragment Conductive Ignition (HFCI), togs fram år 2020 och använts till att karaktärisera ett antal kommersiella kanonkrut [4]. Metoden går ut på att man låter upphettade stålkulor agera splitter. Storleken och temperaturen av dessa ”splitter” varieras och får sedan falla

ned i en bägare innehållande krutet man vill undersöka. Försöksuppställningen kan ses i Figur 5.

Syftet med detta arbete är att ta fram underlag till verktyget för bedömning av verkans- och sårbarhet, Aval¹, för att på så sätt kunna utveckla utslagskriterier för plattformar. Arbetet sker därför i samarbete med FoT-projektet *Beräkningsmodeller och underlag för verkans- och sårbarhetsvärdering och PV-verkan och skydd*.



Figur 5. Försöksuppställningen till HFCI (Foto: Dan Martelin).

Årets arbete [5] har bestått i att modifiera utrustningen då det tidigare upplevt finnas problem med den tryckluftsdrevna utlösningmekanismen av stålkulorna. Nu har en mekanisk utlösningmekanism konstruerats, se Figur 6.

¹ Aval = Assessment of Vulnerability and Lethality. Aval är verktyg för att simulera verkan och sårbarhet hos olika plattformar.



Figur 6. Mekanisk utlösare laddad med 11,1 mm kula (Foto: Dan Martelin).

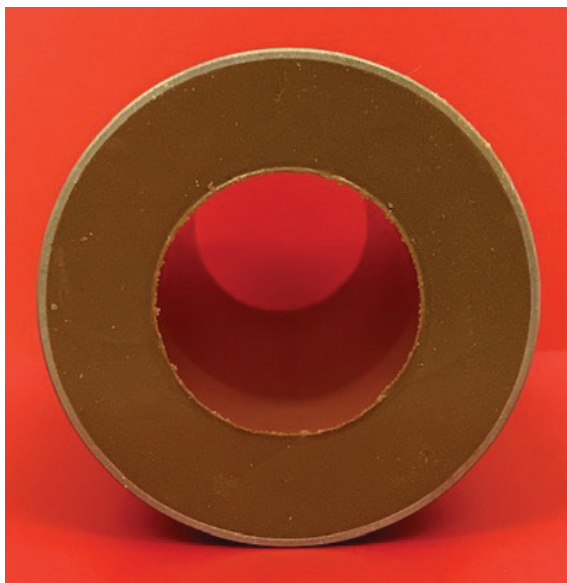
Projektet har levererat data i form av relationen mellan stålkulans vikt och antändningstemperatur hos olika krut. Inom FoT-projektet *Beräkningsmodeller och underlag för verkans- och sårbarhetsvärdering* har det skapats en förenklad modell för att beskriva sekundärsplitters antal, massa och hastighet (med riktning). Nästa steg i arbetet är att ta reda på typiska temperaturer för fragment/sekundärsplitter, och om det saknas relevanta data, ev. genomföra experiment för bestämning av temperatur. Detta arbete görs i FoT-projektet *PV-verkan och skydd*.

2.1.3 Mekaniska egenskaper hos kompositmaterial

I stort sätt alla robotar som används av Försvarsmakten drivs med krutraketmotor. Raketkrut är polymerbaserade material och liksom andra polymerer åldras materialen med tiden, något som särskilt påverkar de mekaniska egenskaperna. För en krutraketmotor är det av avgörande betydelse att laddningen har tillräckligt bra mekaniska egenskaper. Om laddningen spricker kan detta leda till att motorn exploderar. Kunskap om krutladdningars mekaniska egenskaper, och hur dessa förändras med tiden, är därför mycket viktigt.

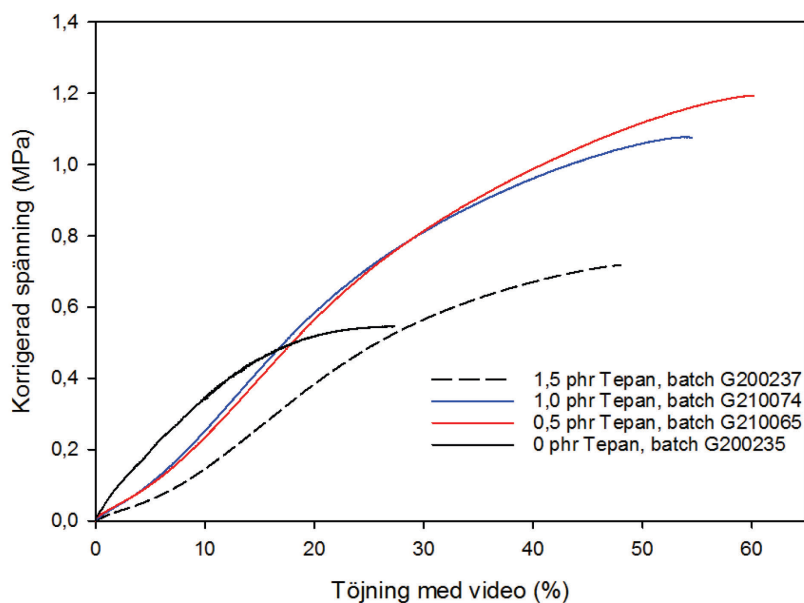
Under 2020 genomfördes en studie för att bygga upp både praktisk och teoretisk kunskap om mekanisk karaktärisering av kompositkrut [6]. För att få bättre förståelse behövs tillgång till en större mängd provmaterial, samt detaljerad information om dess tillverkning och sammansättning. Bland annat för detta ändamål har man under 2021, i samarbete med FoT-projekten *Energetiska system* och *Utskjutning och framdrivning*, tagit fram ett typiskt kompositkrut med egenskaper som i stort motsvarar det som används i många moderna robotmotorer.

Kompositkrutet är baserat på ammoniumperklorat (AP), aluminium och polybutadien (Figur 7). Valet av just detta krut motiveras av att de flesta större robotar använder denna typ av krut. AP är en oxidator med hög prestanda, hög densitet, låg känslighet och den fasomvandlar inte inom det temperaturområde där dessa robotar hanteras. Polybutadien är en polymer som också är mycket vanligt förekommande därför att den har goda mekaniska egenskaper, är naturligt elastisk vid låga temperaturer (den har låg glasomvandlingstemperatur) och är relativt tålig mot nedbrytning. Både AP och polybutadien är billiga och det bidrar också till deras popularitet.



Figur 7. Provmotor med krut av den sort som ska studeras i EDA PREMIUM.-samarbetet

Under året har effekten av olika mängd häftmedel (*eng.* bonding agent), ett ämne som binder ihop de kristallina AP-partiklarna med polybutadien, studerats för att se hur dessa påverkar de mekaniska egenskaperna. FOI deltar också i ett internationellt samarbete som studerar krut (se avsnitt 4.1). I detta projektsamarbete, PREMIUM, som kontrakteras via EDA är det föreslagna kompositkrutet en optimal komposition att studera. Figur 8 visar att hållfastheten (spänningen) är ungefär samma vid 0,5 och 1,0 phr (parts per hundred rubber) häftmedel (Tepan) men vid en halt på 1,5 phr sjunker spänningen. Resultatet vid 1,5 phr har inte reproducerats då man erhöill tillräckligt goda mekaniska egenskaper redan vid lägre mängder Tepan. Man vill minimera mängden Tepan eftersom det utvecklas ammoniak vid reaktionen mellan denna och de övriga krut ingredienserna vilken kan ge upphov till kaviteter i krutet.



Figur 8. Kompositkrut med olika mängd häftmedel (Tepan).

Det krut som innehåller 0,5 phr kommer av ovan nämnda skäl att användas i EDA-samarbetet PREMIUM, vars syfte är att undersöka hur energetiska material åldras och ta fram modeller för det. Ett provprogram har anpassats för att studera åldringen samt för att

ta fram så kallad failure envelope med vars hjälp man kan bedöma om brott sker vid belastning, eller efter vilken tid brott sker vid krypning eller relaxation. Resultatet från provprogrammet kommer också att användas till att validera modeller som tas fram av andra partners i samarbetet.

Det krut som behövs till studien kommer att gjas under hösten 2021 och karaktärisering av detta startar våren 2022 och åldringsprogrammet, med tillhörande karaktärisering, kommer sedan att fortgå hela 2022.

Inom denna del av projektet har det även genomförts ett examensarbete [7] med syfte att ta de första stegen mot att ta fram modeller för hållfasthet hos kompositkrut. Arbetet genomfördes som en åldringsstudie på bindemedlet till ovan nämnda krut. Målet med studien var att utarbeta en lämplig metodik för att mäta förändringar i mekaniska egenskaper under åldrandet och att omsätta dessa egenskaper till en modell. Metodik både för att åldra prov under pågående dynamisk mekanisk analys och metodik för att jämföra prover som åldrats i ugnar studerades.

2.1.4 Kemisk prov- och analysteknik

Projektet har sedan 2020 haft ansvar för ett fokusområde som kallas *Prov- och analysteknik*. Det är ett brett område och inkluderar allt från kemisk, termisk och mekanisk analys till specialiserade metoder såsom t.ex. instrumenterade cook-off test (som har utvecklats inom föregångaren till detta projekt, se exempelvis referens [8]) eller HFCI (se avsnitt 2.1.2). Projektet *Ammunitions- och energilagringssäkerhet* använder sig av flertalet av dessa metoder för att undersöka olika säkerhetsrelaterade frågeställningar men allt eftersom teknik utvecklas och förfinas finns det också anledning att utvärdera nya metoder.

Även under 2021 har fokus för detta arbete legat på kemisk analys. Kemisk analys används vid säkerhetsteknisk kontroll av krut och sprängämnen både i förebyggande syfte för att upptäcka säkerhetsmässiga risker med en fortsatt hantering eller vid problemutredningar då ammunition inte fungerar som den ska. Kemisk analys används också till att bestämma innehållet i ett krut eller sprängämne (både vad innehållet är och hur mycket det är) för att med hjälp av termokemiska beräkningar ta reda på prestanda.

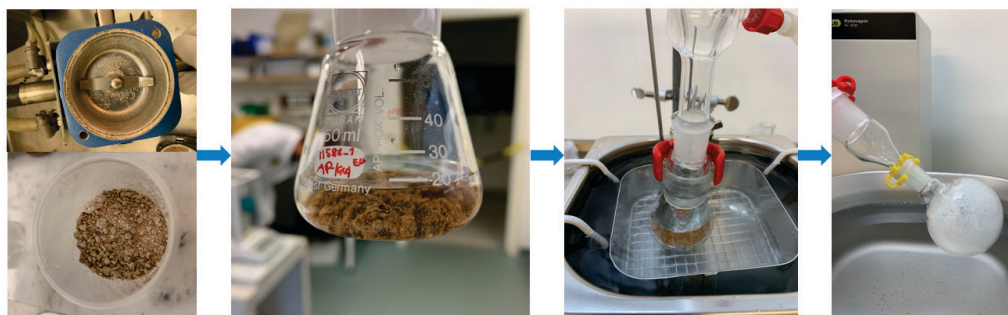
Att identifiera och kvantifiera energetiska material i en komplex matris, t.ex. ett kompositkrut, är något av det svåraste man kan göra när det kommer till kemisk analys eftersom upparbetningsmetoden har så stor betydelse för resultatet. Vi har därför valt att använda oss av kompositmaterial för att utveckla metodiken, både metodmässigt men även instrumentmässigt. Under året har därför arbetet fokuserat på att utveckla en effektiv upparbetningsmetod för kompositkrut.

Ett kompositkrut består av en polymerbaserad matris som binder in de ämnen som främst bidrar till krutets prestanda; oxidator(er), bränsle(n). Hydroxyl-terminerad polybutadien (HTPB) är vanlig som polymermatris i kompositkrut. De reaktiva grupperna i HTPB tvärbinds för att bilda ett elastiskt tredimensionellt material och häftmedel (*eng.* bonding agent) tillsätts för att öka vidhäftningen till den fasta kristallina oxidatorn. Under tillverkningen tillsätts även mjukgörare för att krutet ska uppnå önskade mekaniska egenskaper.

Ammoniumperklorat (AP) är den mest förekommande oxidatorn i kompositkrut idag. Då halten oxidator är avgörande för krutets prestanda är det viktigt att kunna bestämma halten av denna i ett krut med okänt innehåll. Vi valde därför att fokusera på att utveckla en metod för att extrahera AP ur ett HTPB-baserat kompositkrut, i syfte att kunna kvantifiera mängden AP i krutet. Grundmetoden baseras på en tidigare studie [9] och olika parametrar har sedan ändrats under arbetets gång för att förbättra metoden och öka utbytet; dvs. andelen extraherad AP jämfört med krutets totala AP-mängd.

Kompositkrut, med känt innehåll, skars i små bitar eller maldes i krutkvarn för att öka krutets yta inför extraktionen. För att extrahera AP ur krutmatrisen dränktes det

finfördelade krutet i vätska under minst sex timmar. Vatten, etanol och aceton testades som extraktionsmedel då AP har god löslighet i dessa vätskor. Omrörning, värme och ultraljud var andra parametrar som varierades för att optimera metoden.



Figur 9. Princip för extraktion av AP ur ett kompositkrut.

I bildserien ovan (Figur 9) visas det generella tillvägagångssättet, just i detta exempel maldes krutet och extraherades med vatten i ultraljudsbad vid 80 °C. Efter att krutet har extraherats i sex timmar filterades lösningsmedlet av för att få bort krutbitarna. Vätskan, som borde innehålla extraheradt AP, indunstades tills endast ett torrt, vitt pulver fanns kvar. Pulvret vägdes och analyserades med kromatografiska metoder för att kunna fastställa renheten och hur mycket som hade extraherats från krutet.

Tabell 1. Sammanställning av olika extraktionsförsök som gjorts där olika parametrar har varierats.

Extraktionsmedel	Temp.	Provberedning	Förhållanden	Utbyte
Vatten	80 °C	Skuret	Värme	51%
Vatten	80 °C	Malt	Värme	80%
Vatten	80 °C	Malt	Värme + ultraljud	83%
Vatten/etanol 1:1	80 °C	Malt	Värme + ultraljud	95%

Under utvärderingsarbetet har det kunnat konstateras att malning av krutet möjliggör extraktion av en större mängd AP jämfört med att krutet skärs i små bitar. Extraktion i ultraljudsbad med värme visade sig vara mer effektivt än endast värmebad. Bästa extraktionsmedlet har ännu inte kunnat fastställas då det är osäkert om etanol, som verkar vara mer effektivt än att använda endast vatten, även extraherar andra krutkomponenter. Ytterligare analyser kommer att genomföras för att avgöra detta.

2.2 Energilagringssäkerhet

Energilagringssäkerhet är ett område som blir allt viktigare allt eftersom elektrifieringen av samhället pågår. Elektrifiering påverkar även Försvarsmakten, både på plattform- och soldatnivå, och därför bedriver projektet mindre studier inom energilagringssäkerhet. Projektet har valt litium-jonbatterier som ett första energilagringssystem att studera då det finns en del erfarenhet från säkerhetstekniska undersökningar av dessa från andra projekt också har relevans för Försvarsmaktens system.

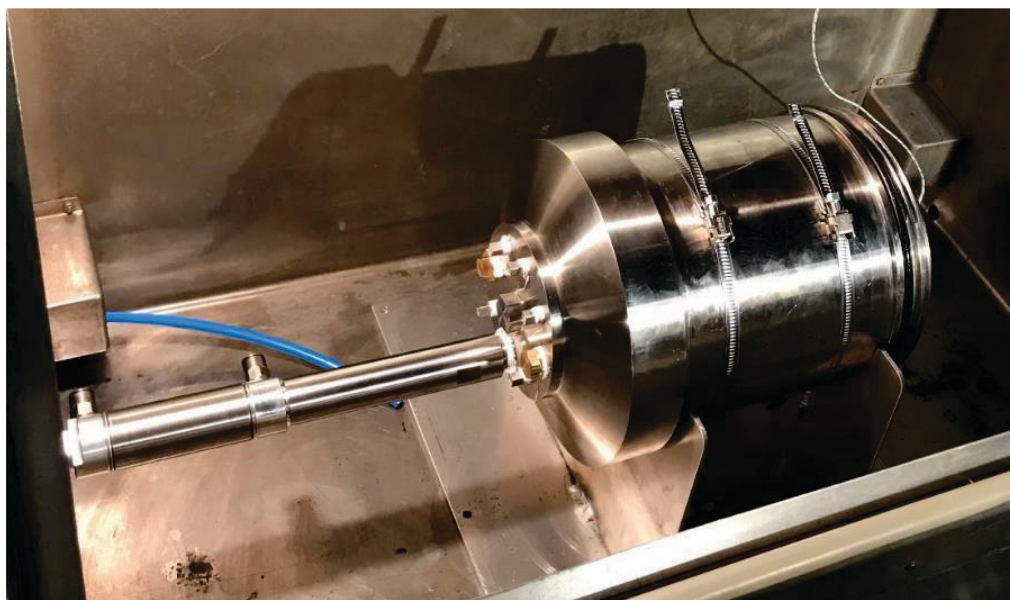
Under 2021 har arbetet med att analysera gasutveckling vid termisk rusning fortsatt. Syftet med detta arbete är att få en förståelse för hur stor mängd gas som utvecklas och hur giftiga dessa gaser är för att hitta metoder för att skydda både människor och materiel.

Projektet har också haft två examensarbeten, ett inom fluorfria elektrolyter och ett inom åldring av litium-jonbatterier. Båda exjobben belyser viktiga aspekter som kan förbättra säkerheten hos litium-jonbatterier.

2.2.1 Gasanalys vid termisk rusning av litium-jonbatterier

Vid olämplig hantering av Li-jonbatterier kan batterierna rusa termiskt, börja brinna och avge farliga gaser. Olämplig hantering kan exempelvis vara att utsätta dem för höga temperaturer, kortslutning, överladdning, fysisk påverkan (t.ex. klämning, stöt, chock, penetration) eller en för snabb urladdning. Tidigare har försök gjorts där man sett en relativt stor gasgenerering vid termisk rusning och kvantitativa resultat har tagits fram för hur mycket gas per cell som genererats [10]. Kvalitativ analys på dessa gaser har inte genomförts tidigare då rätt utrustning inte funnits. Projektet har utvecklat utrustning och metodik för att kunna analysera innehållet i de gaser som bildas vid termisk rusning.

År 2020 togs utrustning fram för att kunna utreda gasutvecklingen hos batterier. Denna utrustning kan initiera den termiska rusningen hos olika batterier på ett kontrollerat sätt samt stå emot den svetslåga och den korrosiva miljön som uppstår vid rusningen. Utrustningen består av ett cylindriskt tryckkärl med en keramisk beläggning på insidan för att stå emot svetslågan. Den är också gjord i rostfritt syrafast stål för att klara av den reaktiva och aggressiva miljön som uppstår vid termisk rusning av batterier. Själva initieringen av rusningen sker genom nålpenetration där nålen styrs fjärrmanövrerat med en tryckluftscylinder, se Figur 10. Nålen penetrerar batteriet vilket ger upphov till en intern kortslutning som i sin tur bidrar till den termiska rusningen.



Figur 10. Behållaren med ena locket monterat. I locket sitter en tryckluftscylinder med nål (Foto: Wilhelm Sahlén).

Behållaren är placerad inuti en så kallad tät handskbox. Från denna handskbox finns ett utlopp med en fläkt som suger ut gaserna, som är blandade med luft. De gaser, bl.a. vätefluorid, som bildas fångades upp med olika metoder och analyserades. Denna uppställning gör det även möjligt att blanda gaserna med en icke reaktiv gas som till exempel kväve för att simulera syrefattiga miljöer.

I år har arbetet fortsatt kring utformningen av utrustningen så att den på ett säkert och konsekvent sätt ska kunna initiera termisk rusning hos olika typer av battericeller. Olika battericeller har visat sig ha varierande styrka/hårdhet och olika typer av säkerhetsfunktioner varpå initiering av termisk rusning har varierat. Utrustningen har därmed blivit modifierad med fler storlekar av penetrationsnålar och tryckluftscylindrar för att kunna hantera ett större antal battericeller.

Nästa år fortsätter arbetet med att analysera gasutveckling vid termisk rusning på batterier med olika kemiska sammansättningar.

2.2.2 Fluorfria elektrolyter

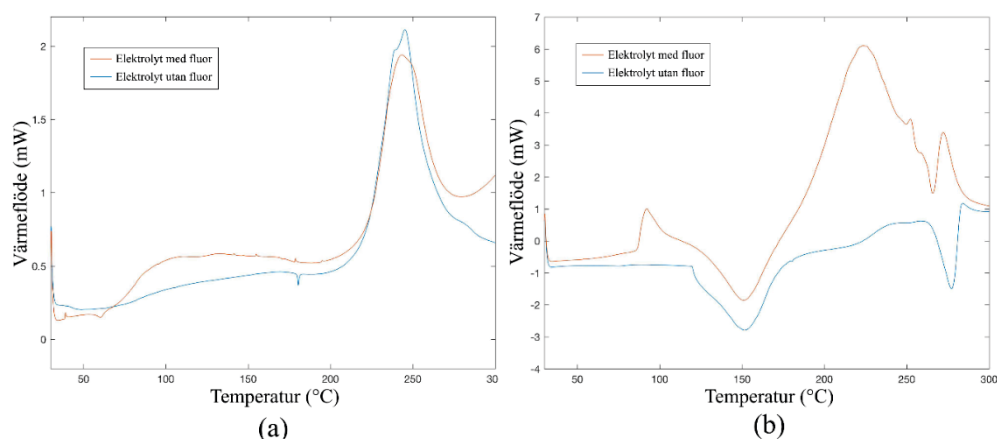
Li-jonbatterier kan, om de skulle termiskt rusa och då börja brinna, avge giftiga gaser vilket gör det utmanande att implementera dem i inneslutna system så som ubåtar, flygplan eller andra militära fordon som av olika anledningar kan vara svåra att utrymma.

En komponent i batteriet som har ett avgörande inflytande på det termiska rusningsförloppet är elektrolyten. Många kommersiella Li-jonbatterier använder idag fluorbaserade elektrolyter, främst för deras utmärkta elektrokemiska egenskaper. Ur säkerhetssynpunkt är de dock inte att föredra, då de generellt är instabila vid högre temperaturer och därmed bidrar till det termiska rusningsförloppet. Att de innehåller fluor gör även att det bildas giftig vätefluorid vid rusningen.

Som ett led i att utveckla säkrare Li-jonbatterier har FOI, tillsammans med Uppsala universitet undersökt den termiska stabiliteten för Li-jonbatterier innehållandes en fluorfri elektrolyt [11]. I studien utvärderades och jämfördes Li-jonbatterier med fluorfri elektrolyt med batterier med kommersiell, fluorbaserad elektrolyt.

Kalorimetriska tester genomfördes för att karakterisera skillnader i det termiska rusningsförloppet för fluorfria och fluorinnehållande batterier. Dock lyckades man inte uppmäta någon termisk rusning för någon av de egentillverkade Li-jonbatterierna, varken fluorfria eller fluorinnehållande. Som jämförelse testades även kommersiella, primära litiumknappceller av typen CR2450, i vilka termisk rusning kunde detekteras. Slutsatsen av de genomförda försöken var att i framtida försök behövs troligen större mängd aktivt material för att detektera termisk rusning, eller att man utvecklar mätmetoden.

För att utreda skillnaden i termisk stabilitet för fluorfria och fluorinnehållande Li-jonbatterier fortsatte studien men med en annan kalorimetrisk mätmetod, med vilken man istället mätte på enskilda cellkomponenter istället för hela batterier. Anod, katod och elektrolyt från cyklade² batterier undersöktes, där den fluorfria elektrolyten gav upphov till bättre termisk stabilitet med anodmaterialet jämfört med elektrolyten innehållandes fluor. Detta ses i Figur 11 (a), där anodmaterialet avger mindre värme i spannet 70-150 °C. När extra elektrolyt dessutom tillsätts för att bättre simulera anodens situation i en battericell, reduceras den värmeavgivande reaktionen mellan 175-250 °C markant för den icke fluorinnehållande jämfört med den innehållande fluor, vilket ses i Figur 11 (b). Ett lägre värmefflöde tyder på en termiskt mer stabil batterikomponent.



Figur 11. Hur anodmaterialets värmefflöde varierar som funktion av temperaturen: (a) utan extra tillsatt elektrolyt; (b) med extra tillsatt elektrolyt.

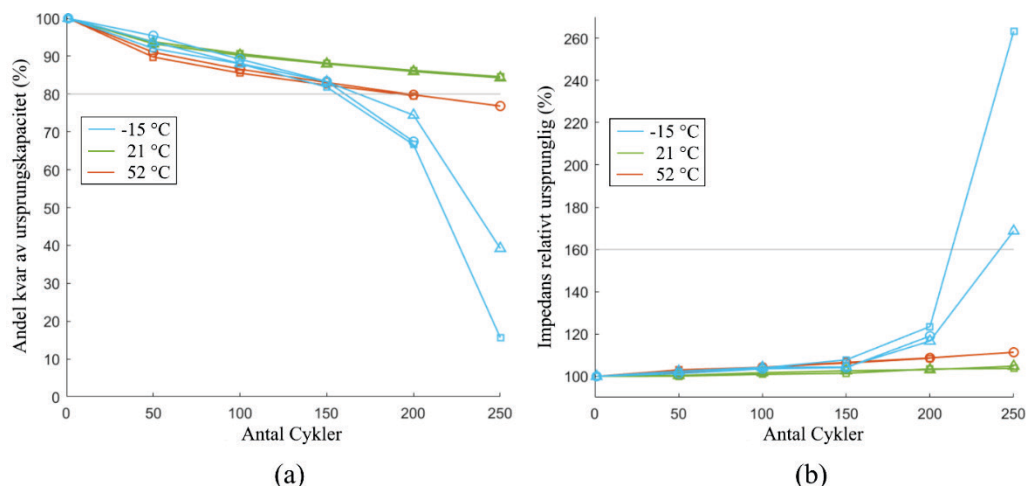
² Cykling innebär i detta fall att batteriet laddas upp för att sedan laddas ur ett definierat antal gånger.

Inledande mätningar på katodmaterialet indikerade emellertid sämre termisk stabilitet för den fluorfria elektrolyten jämfört med fluorinnehållande. Vid repeterade försök erhöles dock inga konsekventa resultat, vilket gör att ytterligare studier krävs för att verifiera detta.

Studien visar att det är möjligt att byta ut den idag kommersiellt använda fluorinnehållande elektrolyten. För försvarsapplikationer, vilka är brandkritiska, skulle det vara fördelaktigt med en alternativ elektrolyt som inte avger vätefluorid och är termiskt mer stabil. FOI anser att området har utvecklingspotential och är intressant för fortsatta studier.

2.2.3 Åldring av litium-jonbatterier

I Försvarsmaktens applikationer är det viktigt att energi finns att tillgå när den behövs. En drönare ska flyga, en torped ska nå sitt mål, ett hybridfordon ska ta sig undan beskjutning etc. Li-jonbatterier åldras och tappar viss kapacitet med tiden, och med antalet cykler. För att karakterisera detta genomförde FOI en studie i form av ett examensarbete där kommersiellt tillgängliga Samsung Li-jonbatterier (cylindriska Samsung SDI INR21700-40T batterier) cyklades vid tre olika temperaturer; $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ samt $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Tillverkare anger ofta hur kapaciteten avtar vid rumstemperatur, och för Försvarsmaktens applikationer är det viktigt att känna till hur kapaciteten avtar vid andra temperaturer än rumstemperatur. FOI karakteriserade även hur batteriets parametrar så som intern resistans, impedans, spänning etc. förändrades vid cykling. Ett urval av resultaten från studien [12] redovisas nedan i Figur 12.



Figur 12. (a) Hur kapaciteten minskar vid olika temperaturer som funktion av antalet cykler. (b) Hur impedans ökar vid olika temperaturer som funktion av antalet cykler.

Figur 12 (a) visar hur State of Health (SOH), dvs. hur mycket som är kvar av ursprungskapaciteten, varierar som en funktion av antalet cykler. Man ser en markant minskning vid $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och hur värdet efter 150 cykler har gått under vad som inom branschen används som ett brytvärde, 80%. Att mäta impedansen vid 980 Hz ansågs i studien vara den mest effektiva metoden för att kunna utvärdera batteriers SOH. I Figur 12 (b) visas hur impedansen mätt vid 980 Hz ökar med antalet cykler. Då impedansen är ett mått på resistans, är det ett negativt tecken att den ökar, då det tyder på att batteriet blir sämre på att avge energi. Då kapaciteten i Figur 12 (a) tar relativt lång tid att mäta jämfört med impedansen vid 980 Hz, bedömdes impedansen vid 980 Hz vara en bra metod att mäta SOH hos batterier [12], och en metod som kan vara lämplig att användas i ett batteri management system (BMS) som är ett system som ska övervaka och hantera oönskade reaktioner hos Li-jonbatterier.

3 Deltagande i möten, kurser och konferenser

3.1 Workshop om ammunitionssäkerhet

FOI genomförde en workshop med ett 20-tal deltagare från FOI, FMV och Försvarmakten den 14 september 2021 där syftet var att diskutera behov och i förlängningen kunna identifiera forskningsfrågor.

Workshopen kom att diskutera hur vi säkerställer kompetens inom ammunitionssäkerhetsområdet och hur FMV, Försvarmakten, industrin (som nu har tagit över en del ammunitionsovervakningsuppdrag) och FOI kan samarbeta kring detta. Det finns bl.a. behov av att förvalta det arbete som har gjorts men också att utbilda nya experter inom ammunitionssäkerhet.

Det påtalades att det är viktigt att beakta ammunitionssäkerhet i hela kedjan från förråd, via transport till operativ användning i fält. Det diskuterades att det i forsknings-sammanhang ofta läggs mycket fokus på säkerhet i förråd.

Rent tekniskt lyftes några frågeställningar:

- Vad händer med ammunition om förpackningen brutits? Går den att använda igen?
- Hur åldras pyroteknik - går det att förlänga livslängden?
- Hur åldras elektronik och vad innebär det för ammunitionssäkerheten?
- Hur åldras nyare ammunition som ofta innehåller nya energetiska material, såsom plastbundna explosivämnen?
- Vad innebär allt fler batterier i ammunition för säkerheten?
- Kan livslängden förlängas genom nya sätt att förvara ammunition?

3.2 Batteriworkshop

FOI har den 13 oktober 2021 genomfört en energilagringssworkshop [13], där man bjudit in flera samarbetspartners för att informera om pågående och framtida verksamhet inom energilagring. Deltagare under workshopen uppmanades till att bidra med relevanta frågor och tankar kring respektive ämne för att ge en bild av intresset inom de olika områdena. Representanter från flertalet myndigheter, däribland Försvarmakten, FMV, FOI och Fortifikationsverket deltog under workshopen. De huvudsakliga punkterna som avhandlades var:

- Introduktion till avdelningen Vapen, skydd och säkerhet och enheten för explosivämnen och ammunitionssäkerhet
- Termisk säkerhet för Li-jonbatterier med exempel på genomförda försök
- Designparametrar och modellering för batterimoduler
- Skillnaden mellan kommersiella och militära energilagringssbehov
- Battery management systems (BMS) och dess tillämpningar
- Metallförbränning som energilagringssmetod
- Flödesbatterier
- Presentation av årets examensarbeten kopplade till energilagring

4 Internationella samarbeten

FoT-projektet är knutet till tre internationella samarbeten och dessa presenteras kortfattat nedan.

4.1 EDA PREMIUM

I maj 2021 startade EDA-samarbetet *Prediction models for implementation of munition health management, PREMIUM*. Bakgrunden till projektet är att man idag använder sensorer till att samla in information om vilka miljöfaktorer som ammunitionen har utsatts för, t.ex värme, fukt, vibration. De insamlade mätvärdena används i princip bara vid utredningar av uppkomna problem. Projektet kommer därför att utveckla smartare sensorer, sk. Health Usage Monitoring Systems, HUMS, som kan nyttja mätvärdena till att prediktera, och varna, när ammunition nått sin kritiska livslängd.

I projektet ska FOI tillsammans med institut och industri från Sverige, Italien, Nederländerna, Tyskland, Portugal, Polen och Schweiz studera hur olika energetiska material åldras för att sedan kunna utveckla algoritmer till sensorerna. Målet är att demonstrera en prototyp i början av 2025.

Under året har fokus legat på att gå igenom litteratur på området och därefter planera för de studier som ska genomföras. FOI:s arbete beskrivs i avsnitt 2.1.3.

4.2 AC/326 Gun Launch Setback Ignition Study Working Group

Defekter i form av tunna luftspalter, sprickor eller andra kaviteter i en stridsdel kan utgöra en risk vid utskjutning då stridsdelen kan initieras oavsiktligt under accelerationen. Detta kallas för setback-initiering. Det har förekommit allvarliga olyckor i en rad olika länder såsom USA, Frankrike, Australien, Storbritannien och i Sverige. De flesta av olyckorna skedde på sent 60-tal men så sent som 2002 skedde en olycka i Australien och berodde då på en trolig spalt i en trotylbaserad laddning [14]. Den centrala frågan i detta sammanhang blir: *Vilka typer och storlekar av defekter är kritiska under utskjutning?* I syfte att öka förståelsen för denna typ av initieringsfenomen har NATO startat en arbetsgrupp sedan några år tillbaka: *NATO AC/326 SG/A Gun Launch Setback Ignition Study Working Group*. Arbetsgruppen har som mål att på sikt utarbeta en AOP (*Allied Ordnance Publication*) för sprängämnen med avseende på setback-problematiken men kommer att gå vägen via en STANREC som första steg då det inte finns några entydiga testmetoder att luta sig mot vid en kvalificering. FOI har deltagit sedan 2018. Under 2021 hölls två arbetsmöten där man jobbade vidare med dokumentet som bedöms vara klart för publicering i närtid.

4.3 AVT-ET-209 Munition Health Management

FOI har sedan juni 2021 deltagit i en tillfällig NATO-arbetsgrupp inom Applied Vehicle Technology, *AVT-ET-209 on MHM Technologies - Enabling Early Adopters*, vars arbete syftade till att synliggöra möjligheterna med MHM-teknik (ammunitionsövervaknings-sensorer) för slutanvändare men också att stötta NATO i hur MHM-teknik ska implementeras. Arbetet i gruppen knöt an till det arbete som görs i EDA-samarbetet PREMIUM och det är därför det är av intresse för projektet. Denna grupp var aktiv i ett år från januari 2021 och leddes av Peter Hooijmeijer, TNO, och Christelle Collet, MSIAC. Gruppen bestod av totalt 25 personer från tio olika länder och två internationella organisationer (MSIAC och NATO Support and Procurement Agency, NSPA). Resultatmässigt har det startats en arbetsgrupp inom AC/326 SGB som ska se över *STANAG 4844 NATO Handbook on health munition management* och man har även haft möten med

NSPA som är en viktig part inom MHM-området. Nästa år kommer gruppen att erbjuda en föreläsningsserie rörande MHM-teknik.

5 Samverkan med andra FoT-projekt

Projektet har kopplingar till andra FoT-projekt inom FoT Vapen och skydd och lämnar underlag i form av teoretiskt och experimentellt underlag avseende t.ex. egenskaper för oavsiktlig initiering samt hållfasthets- och åldringsegenskaper hos delkomponenter.

Projektet har ansvarat för ett fokusområde avseende prov- och analysteknik för ammunitionssäkerhet där FoT-projekten *Utskjutning och framdrivning* samt *Energetiska system* samverkar kring identifiering av åldring och hållfasthet hos krutrobotmotorer. Detta görs med hjälp av både kemiska och mekaniska analysmetoder.

Projektet har även bidragit till projektgemensamma studier av framtida stridsvagnar i form av kunskap kring känslighet hos stridsvagnskrut. Inom denna frågeställning samarbetar projektet även med FoT-projekten *PV-verkan och skydd* och *Beräkningsmodeller och underlag för verkans- och sårbarhetsvärdering*.

6 Slutkommentar

Projektet *Ammunitions och energilagringssäkerhet* fokuserar på att utveckla förmågan att analysera, undersöka och bedöma ammunition och energilagringssystem på dels delkomponentnivå (t.ex. undersökning av krut, sprängämnen, tändsystem eller delar av ett batteri) men även på systemnivå avseende utveckling av säkerhets- och funktions-provningsmetodik.

Målsättningen är att bygga kunskap avseende metodik och teknik med syfte att förhindra oavsiktlig initiering med ammunition och att effektivt kunna bedöma livslängd hos befintlig ammunition. Här har projektet under året fortsatt att utveckla modeller för oavsiktlig termisk initiering med syftet att kunna förstå säkerhetsrisker hos ammunition men också för att bättre kunna bistå vid utredningar av exempelvis ammunition som inte fungerar som den ska. Projektet har också förberett åldringsstudier av kompositkrut, genom litteraturstudier och provberedning, med syftet att få fram underlag till modeller för hur de mekaniska egenskaperna hos kompositkrut i t.ex. robotar förändras med tiden. Dessa modeller ska sedan utgöra kärnan i smarta sensorer som partners inom EDA-samarbetet PREMIUM ska utveckla.

Målsättningen för arbetet med energilagringssystem är bl.a. att bygga kunskap kring Li-jonbatterier, genom att studera deras svagheter ur ett brandkritiskt perspektiv och utreda hur man kan öka säkerheten vid användning. Här har projektet även detta år genomfört en workshop med Försvarsmakten, FMV m.fl. i syfte att identifiera fortsatt viktiga forskningsfrågor. Utrustningen för att analysera giftiga gaser från dessa batterier när de rusar termiskt har också förbättrats.

Den kunskap som genererats i de olika verksamheterna har haft bäring på de frågeställningar som definierat projektet. Projektets resultat har också omsatts i samarbetet mellan FoT-projekt inom Vapen och skydd, vilket kommer att fortsätta nästa år och då kommer att generera nya frågeställningar.

Forskningsverksamheten har också bidragit till ammunitionssäkerhetsarbete i stort genom att kunskapen använts i provnings- och utredningsuppdrag (från FMV). Vid några tillfällen har även kunskapsstöd till FMV:s rådgivningsgrupp för explosiv vara getts.

7 Dokumentation

Under 2021 har följande rapporter producerats inom ramen för detta projekt:

- L. Gediminas, A. Lindborg, D. Martelin, A. Nilsson. Hot fragment conductive ignition test. Fortsatt arbete. *FOI-DH-rapport under utgivning*.
- R. Wedberg, Modellering av termisk känslighet hos nitrocellulosabaserat krut i finkaliberammunition. FOI-R--5238--SE. December 2021.
- J. Bohlin. Lifetime prediction of a polymeric propellant binder using the Arrhenius approach. A thesis about polymer degradation. Uppsala Universitet. UPTEC F 21031. FOI--S-6406-SE. Juni 2021.
- T. Patranika. Investigations of the Thermal Runaway Process of a Fluorine-Free Electrolyte Li-Ion Battery Cell. KTH. FOI-S--6373--SE. Juni 2021.
- C. Söderhielm. Investigation of Battery Parameters for Li-ion Battery State of Health Estimation. KTH. FOI-S--6372--SE. Juni 2021.

8 Referenser

1. D. Martelin, A. Nilsson, S. Andersson, och R. Wedberg, Termisk initiering av NC-krut från 12,7 mm patroner. FOI-D--0986--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, 2020
2. D. Martelin, Metodutveckling inom termisk initiering på FOI 2015-2018, Teknisk rapport FOI-D--0886--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, 2019.
3. R. Wedberg, Modellering av termisk känslighet hos nitrocellulosabaserat krut i finkaliberammunition. FOI-R--5238--SE. December 2021.
4. A. Lindborg, D. Martelin, R. Wedberg. Termisk initiering av kanonkrut via varma splitter. Litteraturoversikt och inledande försök. FOI-DH--0250--SE. Oktober 2020.
5. L. Gediminas, A. Lindborg, D. Martelin, A. Nilsson. Hot fragment conductive ignition test. Fortsatt arbete. *FOI-DH-rapport under utgivning*.
6. N. Wingborg. Mekanisk karaktärisering av krut. FOI-D--1016--SE. December 2020.
7. J. Bohlin. Lifetime prediction of a polymeric propellant binder using the Arrhenius approach. A thesis about polymer degradation. Uppsala Univeritet. UPTec F 21031. FOI--S-6406-SE. Juni 2021.
8. M. Bergh et al., Energetiska material – prestanda och processer. Sammanfattande projektredovisning 2017-2019. FOI-R--4796--SE. December 2019.
9. M. Wang, S. Du, J. Yan, Study on the Extraction of AP Components in HTPB Solid Propellant by Water/Ethanol Recovery, AIP Conference Proceedings 1890, 2017
10. H. Ellis. Thermal Runaway (Cells). FOI MEMO 6665. February 2019
11. T. Patranika. Investigations of the Thermal Runaway Process of a Fluorine-Free Electrolyte Li-Ion Battery Cell. KTH. FOI-S--6373--SE. Juni 2021.
12. C. Söderhielm. Investigation of Battery Parameters for Li-ion Battery State of Health Estimation. KTH. FOI-S--6372--SE. Juni 2021.
13. E. Lallo. Sammanfattning från energilagringsworkshop 2021. FOI MEMO H2389. Oktober 2021.
14. E. L. Baker. Artillery Projectile Prematures. Historical Review. Report O-218. MSIAC. Juni 2020.

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