



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Utformning av en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner

- *System design of a standardized and replaceable battery module for working machines*

Martin Ericson

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

Utformning av en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner

System design of a standardized and replaceable battery module for working machines

Martin Ericson

Handledare: Ola Pettersson, RISE

Ämnesgranskare: Gunnar Larsson, institutionen för energi och teknik, SLU

Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A2E, teknik

Kurstitel: Examensarbete i energisystem

Kurskod: EX0724

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Kurskoordinerande institution: Institutionen för energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2019

Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)

Delnummer i serien: 2019:14

ISSN: 1654-9392

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Elektrifiering av arbetsmaskiner, Litiumbatteriets komponenter och system, Modulsystem, Framtidens lantbruk, skogsbruk och entreprenad

Sveriges lantbruksuniversitet

Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

The purpose of this master thesis was to clarify how a standardized and replaceable battery module for working machines can be constructed together with the necessary components and systems. For example were battery technology, cell format, charge and discharge intervals, working temperature, the need of cooling etc. investigated. The purpose has also been to investigate which energy content and characteristics that are required of a battery module to meet the needs in the studied industries. The industries that were investigated were agriculture, forestry, military and construction.

In order to find out what was required of the battery, semi-instructed interviews were held with people in the different industries. From the interviews it emerged that user-friendliness, safety, reliability and long battery life were important characteristics of the battery module. Other important features that emerged was that the battery module need a protective encapsulation material, that does not chemically react with the battery chemistry and resists external effects such as dirt, water, varying temperature and ultraviolet light from the sun. The battery module should also be protected against fire, explosion, vibration, collision, penetration and theft. What limited the design of the battery module was mainly the space in smaller working machines.

The calculation models in Excel showed that a battery module of about 200 kWh would be enough for all studied working machines in the different industries, provided that the battery worked between 10–60 % of its total capacity and that replacement batteries were used if needed. The result also showed that an amount of maximal three battery replacements were enough to work throughout the day with a heavier machine. The battery module designed in this thesis had an energy content of 221 kWh, a module voltage of 601 V, a module capacity of 368 Ah and a physical size of 1.2x0.6x0.9 m³ without a cooling system. The price based on the price per energy content and BMS was estimated to 469 000 SEK and the mass based only on the number of battery cells was estimated to 832 kg.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Syftet med examensarbetet var att klargöra för hur en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner kan utformas tillsammans med nödvändiga komponenter och system. Exempelvis undersöktes batteriteknik, cellformat, laddnings- och urladdningsintervall, arbetstemperaturintervall samt kylningsbehov m.fl. Syftet har också varit att ta reda på vilket energiinnehåll och vilka egenskaper som krävs av en batterimodul för att tillgodose behoven i studerade branscher. De branscher som undersöktes var lantbruk, skogsbruk, militär och entreprenad.

För att ta reda på vilka begränsningar och egenskaper som krävdes av batteriet hölls bland annat semistrukturerade intervjuer med insatta personer. Från intervjuerna framkom att användarvänlighet, pålitlighet, säkerhet samt lång livslängd efterfrågas från batteriet. Andra viktiga egenskaper på batterimodulen var att batteriet behöver ett skyddande inkapslingsmaterial som inte kemiskt reagerar med batterikemin och som står emot yttre påverkan, så som smuts, vatten, varierande temperatur och ultraviolett ljus från solen. Batterimodulen bör också skyddas mot brand, explosion, vibrationer, kollision och penetration samt stöld. Det som begränsade batteriets utformning var främst utrymmet i mindre arbetsmaskiner.

Från beräkningsmodellerna i Excel visades att energin från batteriet som används i en elmotor är mindre än hälften av energin från dieselbränslet som förbrukas i en dieselmotor. Det visades också att ett batteri med ett energiinnehåll på cirka 200 kWh skulle vara tillräckligt för alla arbetsmaskiner i de studerade branscherna, förutsatt att batteriet arbetade i intervallet 10–60 % av dess totala kapacitet samt att reservbatterier användes vid behov. Från resultatet visades också att maximalt tre batteribyten skulle räcka för en tyngre maskin att arbeta en hel arbetsdag på åtta timmar. Den batterimodul som utformades i examensarbetet hade ett energiinnehåll på 221 kWh, en modulspänning på 601 V och en modulkapacitet på 368 Ah samt en fysisk storlek på 1,2x0,6x0,9 m³ utan kylsystem. Priset som baserades på priset per energiinnehåll och BMS uppskattades till 469 000 SEK och vikten som endast baserades på antalet battericeller uppskattades till 832 kg.

Exekutiv sammanfattning

Detta examensarbete har syftat till att klargöra hur en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner kan utformas tillsammans med nödvändiga komponenter och system. Syftet har också varit att ta reda på vilket energiinnehåll och vilka egenskaper som krävs av en batterimodul för att tillgodose behoven i studerade branscher.

De slutsatser som kan dras ifrån examensarbetet är att battericeller som cyklas mellan 10–60 % av sin totala kapacitet och som regleras mellan temperaturintervallet 15–35 °C ger en längre livslängd på battericellerna. Ett inkapslingsmaterial av svart polypropenplast med flamskyddande och UV-stabiliserade additiv har de krav som ställs på en produkt som behöver skyddas under utomhusförhållanden i Sverige. Cylindriska battericeller med cellformatet: 21700 kräver färre antal celler per energiinnehåll och är fördelaktigt för batteriets BMS, eftersom färre celler behöver övervakas.

En batterimodul med ett energiinnehåll på 200 kWh som cyklas mellan 10–60 % av dess totala kapacitet, är ett tillräckligt stort energiinnehåll för att klara av den uppskattade arbetstid som krävdes för att utföra olika arbetsmoment i olika branscher, förutsatt att reservbatterier användes vid behov. Maximalt tre batteribyten krävdes per dag för de mest energikrävande arbetsuppgifterna. Den batterimodul som utformades i examensarbetet hade ett energiinnehåll på 221 kWh, en modulspänning på 601 V och en modulkapacitet på 368 Ah samt en fysisk storlek på 1,2x0,6x0,9 m³ utan kylsystem. Med det energiinnehållet innehöll batterimodulen ca 1600 battericeller per cellvåning med totalt åtta cellvåningar och kopplades enligt 167S76P. Battericellerna var av cylindrisk karaktär och hade cellformatet: 21700 med NCA som katodmaterial och grafit som anodmaterial. Kylningsbehovet vid upp- och urladdning för batteriet uppskattades till 448 W per cellvåning om batteriet laddas upp på ca tre timmar. Priset som baserades på priset per energiinnehåll och BMS uppskattades till 469 000 SEK och vikten som endast baserades på antalet battericeller uppskattades till 832 kg. I verkligheten behöver fler komponenter tas hänsyn till för att ge en bättre vikt- och prisbild på batterimodulen.

Förord

Detta examensarbete har varit det avslutande momentet på det femåriga civilingenjörsprogrammet i energisystem vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbetet har utförts på Research Institute of Sweden, RISE i Uppsala och är en del av ett större projekt, där syftet är att utveckla en större energilagringseenhet i storleken 1 000 kWh som ska försörja arbetsmaskiner med energi på avlägsna platser.

Jag vill rikta ett extra stort tack till Gunnar Larsson på SLU samt Ola Pettersson och Jonas Engström på RISE som under examensarbetet har bistått med värdefulla tips och väglett mig genom arbetet. Jag vill också passa på att tacka Wilhelm Bertilsson för hans engagemang, där flertalet diskussioner lett till ett bättre innehåll och givit mig en ökad kunskap om lantbruket.

Uppsala, juni 2019

Innehållsförteckning

1	Inledning	11
1.1	Mål och syfte	12
1.2	Frågeställningar	12
1.3	Avgränsningar och osäkerheter med studien	12
2	Bakgrund	14
2.1	Identifiering av batterimodulens förutsättningar	14
2.1.1	Väderförhållanden	14
2.1.2	Dagens arbetsmaskiner	15
2.1.3	Elektriska arbetsmaskiner	16
2.2	Fysiska begränsningar	17
2.2.1	Batterityper	17
2.2.2	Litiumjonbatterier	18
2.2.3	Katodmaterial	19
2.2.4	Anodmaterial	20
2.2.5	Cellformat	21
2.2.6	Arbetsmaskiners huvdimensioner	22
2.2.7	Cellavstånd och mellanrum per cellvåning	23
2.2.8	Övriga begränsningar	23
2.3	Driftbegränsningar	23
2.3.1	Batterisystem	23
2.3.2	Batteriets övervakningssystem, BMS	24
2.3.3	Upp- och urladdningsintervall	24
2.3.4	Arbetstemperatur	25
2.3.5	Termiskt övervakningssystem	25
2.4	Säkerhet	27
2.4.1	Elsäkerhet	27
2.4.2	Överladdning av en battericell	27
2.4.3	Överhettning av en battericell	28
2.4.4	Kortslutning mellan battericeller	28
2.4.5	Gasbildning från battericeller	28
2.5	Lagar och regler	28
2.5.1	Allmänna lagar och regler för litiumjonbatterier	29
2.5.2	Regler vid transport av litiumjonbatteri	29
3	Metod	31
3.1	Identifiera behov och lämplig teknik	31
3.2	Fysiska begränsningar	32

3.2.1	Battericellens format	32
3.2.2	Begränsningar i arbetsmaskinen	33
3.2.3	Batterimodulens dimensioner	33
3.3	Energibehov i olika branscher	34
3.3.1	Allmänna energiförbrukningsberäkningar för arbetsmaskiner	34
3.3.2	Scenarion	35
3.4	Batterimodulens spänning och kapacitet	41
3.5	Storlek, vikt och kostnad	42
3.5.1	Storlek	42
3.5.2	Vikt	43
3.5.3	Kostnad	43
3.6	Kylbehov	43
4	Resultat	45
4.1	Identifiering av begränsningar, egenskaper och lämplig teknik	45
4.1.1	Resultat från intervjuer	45
4.2	Fysiska begränsningar och materialval	48
4.2.1	Cellformat	48
4.2.2	Val av katodmaterial	48
4.2.3	Val av anodmaterial	49
4.2.4	Inkapslingsmaterial av batterimodulen	49
4.2.5	BMS	50
4.3	Energibehov i olika branscher	50
4.3.1	Scenario baserat på lantbruksmodellen	52
4.3.2	Scenario baserat på skogs- och entreprenadmodellen	53
4.4	Batterimodulens specifikationer	55
4.5	Kylbehov	56
4.6	Sammanfattat resultat	57
5	Diskussion	58
5.1.1	Antaganden och begränsningar i modellen	59
5.1.2	Energiinnehåll och antalet batteribyten per arbetsdag (8h)	60
5.1.3	Storlek vikt och kostnad	60
5.1.4	Katodmaterial	61
5.1.5	Säkerhet	61
5.1.6	Kylning	61
5.2	Framtida studier	62
6	Slutsats	63
	Referenslista	65
	Publicerat material	65
	Icke publicerat material	69

Muntliga källor: Intervjuade personer	70
Bilaga A	71

1 Inledning

Elektrifiering av fordon börjar bli mer och mer aktuellt för att minska utsläppen vid transporter. Flera biltillverkare har idag flera modeller med elektrisk drivlina på marknaden och intresset hos kunderna är stort. Idag sitter exempelvis ett batteri integrerat i varje elektrisk bil och med fler bilar krävs också fler batterier. Detta är i längden inte hållbart, speciellt när bilen används som transportmedel och står still större delen av dagen. Genom att använda ett uthyrningssystem av batterier i fordon skulle färre batterier behöva användas för samma ändamål.

Batteriutvecklingen till arbetsmaskiner är inte lika välutvecklad som inom bilindustrin, därför finns det utrymme till förändring. För arbetsmaskiner som exempelvis traktorer samt gräv- och skogsmaskiner finns få elektrifierade maskiner till försäljning på den kommersiella marknaden. Däremot pågår flera helelektriska projekt, till exempel traktorn SESAM från företaget John Deere.

Med en affärsmodell som bygger på cirkulär ekonomi skulle standardiserade och utbytbara batterimoduler som fungerar till olika arbetsmaskiner och maskinmodeller, kunna hyras ut till användare i olika branscher under olika delar av året. Batteriet skulle inte ägas av den enskilda användaren, utan av ett företag som ansvarar för service och eventuell reparation. Fördelen med affärsmodellen är att batteriet då används kontinuerligt under hela året, istället för att användas periodvis vilket kan ses inom lantbruket då fältbearbetningen främst sker i några månader under vår, sommar och höst. Affärsmodellen med ett uthyrningssystem skulle resultera i att användandet per batterimodul ökar och att de materiella naturresurserna per arbetsmaskin minskar, eftersom arbetsmaskinen inte levereras med ett eget inbyggt batteri.

1.1 Mål och syfte

Målet med examensarbetet var att teoretiskt utforma en standardiserad och utbytbar batterimodul som ska kunna användas till att driva olika elektriska arbetsmaskiner. Syftet med examensarbetet var att klargöra för hur en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner bör utformas för att tillgodose behoven från användare tillsammans med nödvändiga komponenter och system. Syftet har också varit att ta reda på vilket energiinnehåll och vilka egenskaper som krävs av en batterimodul i studerade branscher.

1.2 Frågeställningar

- Hur ska batterimodulen utformas för att tillgodose behoven från användare samt utstå olika utomhusförhållanden under längre perioder?
- Vilka egenskaper med avseende på batterimodulen efterfrågas i olika branscher? Vilka begränsningar finns och vilka lagar och regler gäller allmänt för en batterimodul?
- Hur mycket energi uppskattas arbetsfordon i olika branscher använda? Och hur mycket energi behöver lagras i batterimodulen och till vilken storlek, vikt och kostnad uppskattas batteriet då till?

1.3 Avgränsningar och osäkerheter med studien

En batterimodul till arbetsmaskiner innehåller väldigt många komponenter och system. Därför var det viktigt att begränsa examensarbetet för att minimera arbetstiden efter den förväntade tidsplanen. Fokus har därför legat på att undersöka de mest essentiella delarna av batterimodulen som exempelvis batteriets energiinnehåll, cellteknik, cellformat, inkapslingsmaterial, arbetstemperatur och arbetsintervall med mera. Arbetet har också begränsats genom att anta att batterimodulen ska placeras i redan befintliga arbetsmaskiner där bränsletank och dieselmotor bytts ut mot batteri,

växelriktare och elmotor (AC). Energiberäkningarna för respektive arbetsmaskin har också förenklats genom att endast beräkna energibehovet direkt efter respektive motor. Verkningsgraden på respektive motor är således enda faktorn tillsammans med arbetsmomentets krävda effekt som påverkar energiförbrukningen från batteriet i modellen.

Kylsystemet som också är en viktig del i batterisystemet har inte undersökts eftersom detta skulle kräva mer noggranna modeller och tidsmässigt relatera till ett eget examensarbete. Istället har olika kyltekniker undersökts och kylbehovet beräknats utifrån antalet battericeller på en viss yta. Det är också viktigt att understryka att den batterimodul som presenteras i det här examensarbetet är ett förslag på hur en batterimodul till arbetsmaskiner kan se ut. Det har inte lagts ner tid på att hitta den optimala utformningen eller sammankopplingen av battericeller. Istället presenteras här ett förslag på hur battericeller kan kopplas ihop och vilka betydande delar och egenskaper som batterimodulen bör ha för att motivera användandet i olika branscher.

2 Bakgrund

Idag använder företag oftast en affärsmodell som bygger på linjär ekonomi, vilken bygger på att konsumenten ska köpa och använda varor som sedan förbränns eller läggs på deponi. Den här affärsmodellen ger enligt Ionascu & Ionascu (2018) stora värdeförluster både för miljö och ekonomi eftersom modellen reducerar materiella och viktiga naturresurser. Motsatsen till linjär ekonomi är cirkulär ekonomi och används för att beskriva en mer hållbar resurshantering i samhället. I en cirkulär ekonomi produceras hållbara produkter från naturen, vilka efter användning antingen återförs till naturens kretslopp som nedbrytbart material eller återinförs till en ny ekonomisk cykel där produkten lagas, återanvänds, reoveras eller återvinns, skriver Ionascu & Ionascu (2018). Enligt studien är uthyrning av produkter dessutom miljömässigt och finansiellt motiverande och korrelerar med efterfrågan och uthyrningsintensiteten av en produkt.

2.1 Identifiering av batterimodulens förutsättningar

I nedanstående avsnitt identifieras batterimodulens förutsättningar i ett svenskt klimat och hur energieffektiva dagens dieseldrivna arbetsmaskiner är jämfört med elektriska arbetsmaskiner samt vilka arbetsuppgifter dessa karakteriseras av.

2.1.1 Väderförhållanden

I Sverige är temperaturen oftast inte lika extrem som vid andra breddgrader, exempelvis vid polerna eller vid ekvatorn. Men trots det har det ändå uppkommit extremvärden. Den lägsta temperaturen som har uppmätts i Sverige var $-52,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ i mellersta Lapplandsfjällen 1966. Landets högsta temperatur har uppmätts till $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Uppland 1933. I Sverige beskrivs

sommar och vinter som den period på året där dygnsmedeltemperaturen varaktigt håller sig över 10 °C respektive under eller lika med 0 °C. Medeltemperaturen i Sverige har enligt SMHI (2019) varit -4 °C under vintern och 15 °C under sommaren sedan 1950.

Förutom väderförhållanden som varierande temperaturer och nederbörd är den ultraviolettera strålningen (UV-ljus) från solen också ett hot mot material som ska behålla sin form i naturen. Enligt Naturvårdsverket (2014) bryter UV-ljuset tillsammans med syre och värme ner material på kemisk väg, vilket bland annat minskar materialets hållfasthet. Genom att tillföra additiv till plasten, exempelvis carbon black för svart färg eller titaniumoxid för vit färg, kan ett plastmaterial i utomhusmiljö skyddas mot UV-ljus skriver Naturvårdsverket (2014).

2.1.2 Dagens arbetsmaskiner

Dieseldrivna arbetsmaskiner används idag i majoritet inom exempelvis skog, lantbruk och byggsektorn. Diesel är ett relativt billigt bränsle och används i stor omfattning inom dessa branscher. Då bränslet förbränns i en dieselmotor omvandlas den kemiska energin till mekanisk energi. Enligt Cengel och Boles (2011) är verkningsgraden för en dieselmotor cirka 35 %. En Dieselmotor är inte utsläppsfri. I en rapport av Naturvårdsverket (2018) släpper dieselmotorer ut flera skadliga ämnen ut i naturen, dessa är bland annat kväveoxider och sotpartiklar. Utsläppen från arbetsmaskiner stod 2016 för cirka 6 % av de totala växthusgasutsläppen i Sverige och sedan 1990 har utsläppen från dessa maskiner ökat med 13 %. I rapporten anses minskningen av dagens dieseldrivna arbetsmaskiners utsläpp fram till 2045 ge ett otillräckligt bidrag för att nå den svenska klimatpolitikens mål om minskade nettoutsläpp av växthusgaser. En stegvis effektivisering av befintlig teknik (dieselmotorn) är enligt rapporten inte tillräcklig för att nå målet. De bedömer också att det finns skäl till skärpt styrning mot minskade klimat- och luftutsläpp för arbetsmaskiner. Med andra ord är rapporten positiv till elektrifiering av arbetsmaskiner där utnyttjandet av energi är högre.

Traktorer är en vanligt förekommande maskin inom jordbruket där samma maskin kan användas till att dra flera olika redskap på ett fält. Skogsmaskiner används inom skogsbruket och utgörs främst av skördare och skotare. Skördaren används vid skogsavverkning och skotaren för uppsamling av

timmer och ris. Inom industrin eller entreprenad används ofta hjullastare och grävmaskiner för exempelvis lastning respektive grävning.

2.1.3 Elektriska arbetsmaskiner

Några fördelar med elektrisk drivning är kraftigt minskade utsläpp och högre energieffektivitet under körning. I jämförelse med en dieselmotor är verkningsgraden för en elmotor högre. ABB (2017) har exempelvis utvecklat en synkron permanentmagnetmotor med en verkningsgrad på över 98 %, vilket kan jämföras med dieselmotorns verkningsgrad på ca 35 %. I Pettersson et. al (2016) ses också en tydlig skillnad i energianvändningen mellan en helelektrisk och en dieseldriven kompaktlastare. I studien ses att den batteridrivna traktorn använde 75 % mindre energi vid samma typ av arbete. Detta beror framförallt på den dieseldrivna maskinens låga verkningsgrad i motor och drivlina.

I studien Engström et. al (2017) jämfördes olika lantbrukstraktorer och deras uppmätta energibehov för olika arbetsmoment. Verkningsgraden för elva olika traktorer studerades och medelvärdet av andelen dieselbränsle som blev till mekanisk dragenergi var 33 % för både motor och drivlina. Även för dieseldrivna grävmaskiner är verkningsgraden låg. I en studie av Kagoshima et. al (2007) visar författarna att grävmaskiner i viktclassen 6 ton har stora energiförluster i drivlinan. Hydrauliska pumpen, hydrauliska systemet och det mekaniska systemet i en grävmaskin har verkningsgrader på respektive 75 %, 30 % och 90 %. Detta ger drivlinan en total verkningsgrad på 20 %.

I artikeln av Kristensson (2018) ses några exempel på helelektriska arbetsmaskiner. Dessa är bland annat John Deere's SESAM traktor med en total motoreffekt på 300 kW och ett batteripaket med ett energiinnehåll på 130 kWh. Även det tyska företaget Fendt har utformat en helelektrisk traktor. I Fendt (2017) ses traktorn e100 Vario med en motoreffekt på 50 kW, ett batteri med en batterispänning på 650 V och ett energiinnehåll på 100 kWh. Det finns även exempel på helelektriska bussar. I Kim et. al (2015) har den beskrivna bussen en motoreffekt på 67 kW, ett batteripaket med en batterispänning på 607 V och ett energiinnehåll på 48 kWh. Enligt Kurz Industrial solutions (2018) krävs en högre spänning för att en elmotor ska kunna arbeta med låg ström och hög verkningsgrad.

2.2 Fysiska begränsningar

De fysiska begränsningar som kännetecknas av batterimodulen är valet av batterikemi, cellformat samt hur dagens arbetsmaskiner ser ut och hur stor plats som möjligen kan utnyttjas i dessa av en batterimodul. I nedanstående avsnitt identifieras olika batterityper, batterikemier, cellformat med mera.

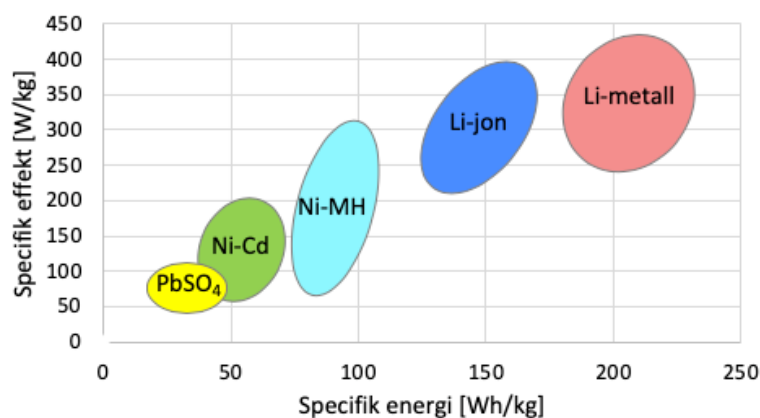
2.2.1 Batterityper

Det finns flera olika batterityper på marknaden exempelvis: blybatterier (PbSO_4), Litiumjonbatterier (Li-jon), nickel-metall-hydrid batterier (NiMH) eller nickel-kadmium batterier (NiCd). I studien Zubi et. al (2018) listas olika styrkor och svagheter för respektive batterityp. Dessa presenteras i tabell 1 nedan.

Tabell 1 – Styrkor och svagheter för respektive batterityp Zubi et.al (2018).

Batterityp	Styrkor	Svagheter
PbSO ₄	+Låg initialkostnad +Mogen teknologi +Låg materialkostnad +Ingen minneseffekt +Låg självurladdningshastighet +Godtagbar verkningsgrad	– Låg specifik energi och effekt – Kort cykelliv – Sämre prestanda vid onormal arbetstemperatur – Begränsad pålitlighet – Lång laddningstid – Innehåller miljöfarligt bly
Li-jon	+Enastående specifik energi och effekt +Långt kalender- och cykelliv +Hög verkningsgrad +Godtagbar arbetstemperatur +Hög pålitlighet +Resonabel självurladdningshastighet +Relativ kort laddningstid	– Hög initialkostnad – Kräver avancerat övervakningssystem – Använder sällsynta metaller: litium, kobolt – Säkerhetsrisker: värme- och gasbildning – För närvarande dåliga återvinningsmöjligheter
NiMH	+Initialkostnad: Medel +Godtagbar specifik energi och effekt +Godtagbar verkningsgrad +Hög pålitlighet +Använder miljövänliga material +God säkerhet +Relativt kort laddningstid	– Hög självurladdning – Liten minneseffekt – Relativt kort cykelliv – För närvarande dåliga återvinningsmöjligheter
NiCd	+ Relativt låg initialkostnad +Långt kalender och cykelliv +Mogen teknologi +Hög pålitlighet +Godtagbar självurladdningshastighet +God säkerhet +Hög arbetstemperatur +Relativt kort laddningstid	– Godtagbar specifik energi och effekt – Minneseffekt – Låg verkningsgrad – Innehåller miljöfarligt kadmium

Hur de olika batterityperna förhåller sig till varandra beträffande specifik effekt och specifik energi ses i figur 1.



Figur 1 – Specifik effekt och specifik energi för de olika batterityperna med inspiration av Meesala et. al (2017).

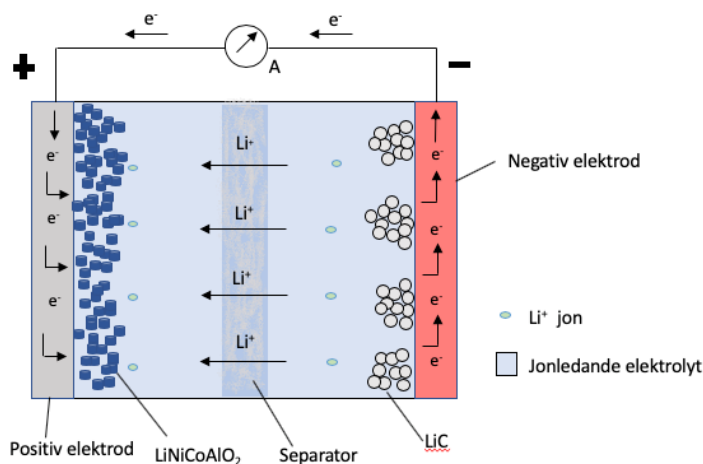
I det här examensarbetet har batteritekniker med litium studerats eftersom litium redan är en dominerande kemi till elektriska fordon. Det är också en mogen teknik med hög specifik energi vilket är viktigt när utrymmet är begränsat exempelvis i en arbetsmaskin.

2.2.2 Litiumjonbatterier

För att ta reda på vilken sammansättning mellan katod och anod som är mest lämplig för utformningen av ett standardiserat utbytbart batteri till arbetsmaskiner, jämförs bland annat kostnad på sikt och den specifika energin mellan olika batterikemier.

I studien av Linden & Reddy (2011) beskrivs en battericell huvudsakligen av fyra komponenter; anod, katod, elektrolyt samt en separator. Anoden är minuspolen i battericellen och har oftast den kemiska sammansättningen litium-grafit (LiC) och har till uppgift att vid urladdning leda elektroner från den negativa elektroden genom kretsen till lasten och slutligen mot katoden. Katoden är pluspolen i battericellen och har till uppgift att vid urladdning ta emot de strömmande elektronerna och leda dem mot katodmaterialet som i figur 2 representeras av litium-nickel-kobolt-aluminium-oxid (NCA). Elektrolyten är en jonledande vattenlösning som har till uppgift att leda litiumjoner (Li⁺) mellan katoden och anoden. Separatoren används för att mekaniskt separera katoden från anoden och förhindra kortslutning av battericellen.

I Leuthner (2013) beskrivs hur en battericell fungerar genom att omvandla kemisk energi till elektrisk energi. Reaktionen sker genom elektrokemisk reduktion-oxidation (redox reaktion) och innebär att värdmaterialet antingen upptar eller ger ifrån sig elektroner. När battericellen urladdas sker en kemisk reaktion vilket får anodmaterialet (LiC) att oxideras och avge elektroner till den yttre kretsen. Ensamma litiumjoner förflyttas nu genom den jonledande lösningen (elektrolyten) och genom separatorn mot katodmaterialet (NCA). När litiumjonen och elektronen återförenas vid katoden sker reduktion, vilket innebär att elektronen återigen binder till litiumjonen, men nu tillsammans med katodmaterialet vid katoden. Vid laddning sker samma process fast tvärtom. Hur elektronerna rör sig vid urladdning kan ses i figur 2.



Figur 2 – En enkel illustration av ett urladdande litiumjonbatteri med inspiration från boken Leuthner (2013) med katodmaterialet NCA och anodmaterialet LiC. Det blå och grå området i mitten representeras av elektrolyten respektive separatorn.

2.2.3 Katodmaterial

I studien Zubi et. al (2018) anses litium-metallen vara en av de mest lovande metallerna för batterier. Metallen är både lätt och elektropositiv och innehar en högre spänningspotential för energilagring jämfört med andra metaller. Litium-metall är dock mycket reaktiv vilket gör det svårt att tillverka säkra battericeller med endast litium-metall. Därför används istället litium tillsammans med andra grundämnen så som nickel, kobolt, mangan med mera, för att öka stabiliteten och säkerheten i battericellerna. Ett litiumjonbatteri kan ha olika egenskaper så som exempelvis olika hög specifik energi, inre resistens, livslängd etc. Skillnaderna mellan batteriteknikerna beror på vilka

grundämnen som används i batteriet samt hur stor andel material av respektive grundämne som batterierna konstrueras med.

Några kommersiella laddningsbara katodmaterial med olika kemiska sammansättningar av litium visas i tabell 2 nedan. Dessa är litium-mangan-oxid (LMO), litium-mangan-nickel-kobolt-oxid (NMC), litium-nickel-kobolt-aluminium-oxid (NCA) och litium-järn-fosfat (LFP). HEV och EV står för elektrisk (hybrid) respektive elektriskt fordon.

Tabell 2 – Egenskaper för katodmaterial Lyu et. al (2015).

	LMO	NMC	NCA	LFP
Spänning [V]	3,8	3,6	3,6	3,4
Specifik kapacitet ¹ [Ah/kg]	100	160	200	165
Livslängd [cykler]	500-3000	500-3000	500-2000	1000-20 000
Pris 2016 ² [\$/kWh]	420	420	352	578
Pris 2030 ² [\$/kWh]	167	167	145	224
Säkerhet	God	God	God	Mycket bra
Applikation	HEV, EV, Stationära energilagring	HEV, EV	EV	HEV, EV, Stationära energilagring

2.2.4 Anodmaterial

Grafit (C)

I studien *Anode Materials for Lithium Ion Batteries* av Wurm et. al (2013) är det vanligaste anodmaterialet grafit tillsammans med amorft kol, dvs. kol där kolatomer inte ligger i någon speciell ordning. Under battericellens första uppladdning reagerar grafit med elektrolyten och bildar ett skyddande lager, ett så kallat "Solid Electrolyte Interface" (SEI) på anodmaterialets yta för att förhindra sekundära reaktioner i battericellen. Trots det uppstår en del sekundära reaktioner ändå, vilka sänker antalet laddningscykler och batteriets livslängd.

Litium-titanat-oxid (LTO)

LTO är ett anodmaterial som kan ersätta det vanliga anodmaterialet grafit. Sims & Crase (2017) skriver i en rapport att LTO bland annat kan användas tillsammans med katodmaterialen litium-mangan-oxid (LMO) eller NMC

¹ Graf (2013)

² Ungefärliga installationspriser (referenspriser) baserat på studier, intervjuer och beräkningar i IRENA (2017)

och har många fördelar jämfört med grafit. Några fördelar med LTO-teknik är exempelvis en ökad säkerhet och längre livslängd till följd av termisk stabilitet, vilket minskar risken för termiska förluster i battericellen.

På grund av anodmaterialet LTO:s överlägsna egenskaper jämfört med grafit har marknaden riktat ett tydligt fokus mot att använda LTO som anodmaterial i battericeller, exempelvis för att öka livslängden på battericellerna. I studien av Rodriguez et. al (2018) har det dock visat sig att impedansen i battericellen ökar snabbare under batteriets livslängd om anodmaterialet består av LTO istället för grafit. Detta beror på att de gaser som bildas vid cyklandet av litiumjoncellen med en anod av LTO, inte kan ta sig ut ur cellen. I grafitanoden kan gaserna gradvis uttömmas genom reaktioner vid grafitelektroden, men för LTO finns inte samma möjlighet. Detta leder till svårigheter för elektronerna att transporteras genom kretsen, vilket leder till ökad impedans i battericellen.

Enligt Sims & Crase (2017) är nackdelarna med LTO att anodmaterialet tillsammans med exempelvis katodmaterialet NMC ger en lägre nominell spänning, energidensitet och specifik energi jämfört med om samma katodmaterial hade valts med grafit. I tabell 3 ses de två ovannämnda anodmaterialen.

Tabell 3 – Egenskaper för anodmaterial Lyu et. al (2015) och IRENA (2017)

	C	LTO
Spänning [V]	0,25	1,5
Pris 2016 ² [\$/kWh]	Lågt	1050*
Pris 2030 ² [\$/kWh]		478*
Säkerhet	God	Mycket bra
Kompatibel	LMO, NMC, NCA, LFP	LMO, NMC, NCA

2.2.5 Cellformat

Det finns olika typer av cellformat för litiumceller. I Schönemann (2017) beskrivs cellformatets utformning som avgörande för hur hög specifik energi och effekt som battericellen innehåller. Den specifika energi i cellen ökar med mängden aktivt material det vill säga katod- och anodmaterial som kan

paketeras inuti cellen. Battericellens egenskaper beror alltså inte bara av en viss typ av aktivt material utan också hur cellen paketeras.

Tre av de vanligaste cellpaketeringarna är cylindriska celler, prismatiska celler eller prismatiska pouchceller. Skillnaden mellan dessa är enligt Schönemann (2017) att cylindriska och prismatiska celler har ett hårt hölje, vilket ger dessa celler en högre mekanisk stabilitet. Pouchceller har en sämre mekanisk stabilitet eftersom de är uppbyggda av ett tunnare material vilket kan få cellen att expandera och öka i volym.

Enligt Schönemann (2017) är värmeöverföringsförmågan vid kylning sämre för cylindriska celler på grund av cellens geometriska design. Prismatiska celler som är rektangulära i formen har större kontaktyta mot ett kylmedium vilket ger fördelaktig kylning. Dessa celler har också möjlighet att packas tätare. Prismatiska pouchceller tenderar att vara mer flexibla, har låg vikt och har bra kylningsegenskaper. Däremot överträffar den cylindriska cellen alla celltyper genom att ha hög specifik energi och är enklare att tillverka vilket minskar tillverkningskostnaden.

I tabell 4 hämtad från dnkpower (u.å), ses skillnaden mellan två olika cylindriska cellformat: 18650 och 21700.

Tabell 4 – Specifikationer för cellformaten 18650 samt 21700 litiumjonceller. Dnkpower (u.å)

Celltyp	Diameter [mm]	Höjd [mm]	Nominell spänning [V]	Kapacitet [Ah]	Pris [SEK/kWh]	Vikt [g]
18650	18	65	3,6	2,2–3,6	1 767	45–48
21700	21	70	3,6	3–4,8	1 623	60–65

2.2.6 Arbetsmaskiners huvdimensioner

Det som framförallt begränsar dimensionen på batterimodulen är utrymmet i dagens arbetsmaskiner. Enligt Bertilsson (2019) är huven på traktorer oftast triangelformat med smalare huvbredd mot hytten och bredare huv mot traktorns framände, detta för att bland annat maximera sikten närmast traktorn. Andra arbetsmaskiner så som grävmaskiner eller hjullastare har inte samma begränsning då huven är placerad bakom föraren och är därmed något större.

2.2.7 Cellavstånd och mellanrum per cellvåning

Enligt Wang, Fan & Liu (2017) används 3 mm mellanrum för 18650-celler för luftkylning. Enligt studien minskar också behovet av kyla med ett ökat avstånd mellan cellerna, därför är ett större avstånd fördelaktigt. Den interna resistensen enligt Quinn et. al (2018) visade sig vara lägre för 21700-celler jämfört med 18650-celler. Det betyder bland annat att mindre värme genereras av 21700-cellerna. Enligt Rickard (2019) är tjockleken på Teslas batteripaket 90 mm till Modell 3 med cylindriska 21700-celler.

2.2.8 Övriga begränsningar

Genom att tillåta batterimodulen att lyftas med pallgafflar höjs cellvåningens lägsta höjd till 100 mm från marken. Standardavståndet för Europapallar är enligt Expowera (2019) 100 mm.

2.3 Driftbegränsningar

För att batterimodulens livslängd inte ska förkortas samt för att erhålla god säkerhet krävs vissa restriktioner för battericellerna. De system som beskrivs nedan är viktiga begränsningar för driften av batterimodulen. Dessa är: batteriets övervakningssystem, laddningsintervall, arbetstemperatur samt kyl- och uppvärmningssystem.

2.3.1 Batterisystem

När större batterisystem produceras, kopplas enligt Koehler (2013) flera battericeller ihop genom serie- och parallellkoppling för att uppnå den spänning och kapacitet som efterfrågas. Genom att seriekoppla likartade battericeller ökar spänningen på systemet. På samma sätt ökar kapaciteten med antalet parallellkopplade battericeller. Enligt Schönemann (2017) karaktäriseras en batterimodul av sin sämsta battericell, därför är det viktigt att säkerställa att alla battericeller uppfyller samma krav och specifikationer innan batteriet tas i bruk, exempelvis samma spänning och kapacitet.

I större batteripaket där battericeller är sammankopplade behövs säkerhetsfunktioner och övervakningssystem. Enligt Schönemann (2017) är detta viktigt för batteriets prestanda. Ett kylsystem är oftast integrerat i större batterisystem för att hålla temperaturen inom det rekommenderade temperaturintervallet. För att underlätta för kylningen placeras battericellerna med ett

visst avstånd ifrån varandra. I studien av Wang, Fan & Liu (2017) är avståndet mellan cylinderformade battericeller med cellformatet 18650, 3 mm för luftkylning för att minska värmebildningen i batteripaketen under upp- och urladdning. I studien skrivs också att kyleffekten i ett batteri ökar med cellavståndet.

En annan viktig säkerhetsaspekt att ta hänsyn till vid utformningen av en batterimodul är de gaser som kan uppstå vid cykling av litiumjonbatterier. Enligt Kritzer & Nahrwold (2013) kan dessa gaser vädras ut genom speciella tryckutjämnande ventiler i batteripaketet för att förhindra övertryck och i värsta fall explosion.

2.3.2 Batteriets övervakningssystem, BMS

Batteriets övervakningssystem (Battery Management System, BMS) är ett övervakningssystem för litiumjonbatterier och består av en masterenhet och flera slavenheter. Enligt Kilic et. al (2018) samlar slavenheterna in information ifrån battericellerna (ström, spänning, temperatur) och skickar dessa till masterenheten. Masterenheten utvärderar sedan informationen och utför därefter olika operationer för att säkerställa att varje battericell beter sig som förväntat. Enheten räknar exempelvis ut medeltemperaturer i olika delar av batterimodulen samt beräknar den kvarvarande kapaciteten i batteriet som kan visas på en display. Masterenhetens huvuduppgift är att skydda battericellerna från överladdning och överurladdning. Detta sker genom att exempelvis koppla ifrån laddningen då temperaturen överstiger godkända nivåer, eller då batteriet har nått sitt högsta tillåtna laddningstillstånd (State of Charge, SOC). Masterenheten kan också koppla ifrån lasten (elmotorn) vid behov. Säkerhetskomponenter så som reläskydd och brytare för last och laddning, kan också användas för att hjälpa masterenheten att skydda battericellerna från för djup urladdning eller överladdning.

2.3.3 Upp- och urladdningsintervall

Livslängden på battericellen påverkas inte enbart av arbetstemperaturen utan också av hur batteriet upp- och urladdas. I en studie av Wikner & Thiringer (2018) fastställs att det är fördelaktigt att cykla batteriet i kortare och vid lägre laddningsintervall för att minska degraderingshastigheten i battericellerna. Om laddningen av batteriet uppgår till endast 50 % SOC skulle batteriet enligt studien kunna användas en längre tid. Studien visar också att

mindre laddningsintervall är positivt för en längre livslängd. Ett liknande resultat visas också i studien Xu et. al (2016) där höga SOC mellan 25–100 % vid en arbetstemperatur på 20 °C och med högre urladdningshastighet, gav ett snabbare degraderingsförhållande jämfört med batterier som cyklades mellan exempelvis 25–75 % SOC.

2.3.4 Arbetstemperatur

Den optimala temperaturen för en battericell med litium kan variera beroende på batteriets uppbyggnadsmaterial och kemiska sammansättning. Enligt Chen et.al (2015) rekommenderas en arbetstemperatur på 15–35 °C för battericeller med litium.

Arbetstemperaturen för litiumceller har visat sig vara extremt viktig för att förhindra degradering och kapacitetsförlust. Enligt Wiebelt & Guenther-Zeyen (2013) ökar degraderingshastigheten av litiumcellen vid temperaturer över 40 °C. Vid ännu högre temperaturer finns risk att elektrolyten i cellen termiskt degraderar och tar eld. En temperatur mindre än 15 °C ökar den inre resistensen i battericellen vilket minskar batteriets möjlighet att leverera full effekt till en last. Om batteriet används vid celltemperaturer mellan -20 °C och 0 °C kan effektuttaget bli begränsat till mindre än 70 %. Cykling av batteriet vid dessa temperaturer kan också ge irreversibla skador på battericellen och förkorta livslängden.

2.3.5 Termiskt övervakningssystem

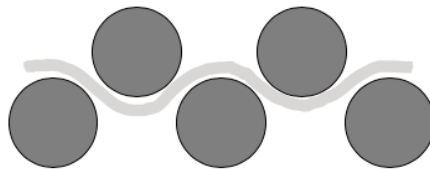
Battericeller av litium har visat sig vara extremt känsliga mot höga och låga temperaturer. Därför krävs att batterimodulen arbetar inom det rekommenderade temperaturintervallet, 15–35 °C.

Ett termiskt övervakningssystem (Battery Thermal Management System, BTMS) består av både ett kylsystem och ett uppvärmningssystem och beskrivs enligt Wiebelt & Guenther-Zeyen (2013) som en viktig del i batterisystemet för att hålla alla cellers arbetstemperaturer så homogena som möjligt, vilket är en utmaning i större batterisystem. Ojämna celltemperaturer ökar risken att cellerna åldras olika och kan i sin tur leda till kapacitetförluster i hela batteriet. Temperaturen på battericellerna bör enligt författarna inte skilja mer än 5 °C mellan olika delar i batterimodulen.

Kylning

För att enklare kunna styra celltemperaturen hos litiumceller kan ett aktivt kylsystem användas. Enligt Chen et. al (2015) innebär aktiv kyla att fluiden aktivt rör sig mellan battericellerna med hjälp av en fläkt (luftkylning) eller en pump (vätskekylning). Aktiv kyla ökar också möjligheten att enkelt styra och justera battericellernas temperatur med precision. Batteriets celltemperatur kan exempelvis justeras med hjälp av olika flödeshastigheter, vilket är positivt vid varierande celltemperaturer. En annan fördel med aktiv kylning är att det också är lättare att hålla en homogen temperatur över alla battericellerna i systemet. I studien av Kim & Pesaran (2007) föredras ett indirekt kylsystem med vatten och glykol (50/50) till litiumceller i elektriska fordon. Indirekt kylsystem innebär att kylmediet flödar i kanaler mellan battericellerna och har alltså ingen direktkontakt med kylmediet, vilket sker vid direktkylning. Den indirekta kylningen har därför något sämre värmeöverföringsförmåga.

Elbilsföretaget Tesla använder ett patenterat indirekt kylsystem där så kallade mikrokanaler leder kylmediet mellan cellerna. Bredden på kanalerna är enligt Mohammadzadeh et. al (2013) 0,22 mm. Enligt Rickard (2018) utgörs varje batteripaket i Tesla Modell 3 av ca 1 000 battericeller av cellformatet 21700. I figur 3 ses ett exempel på hur mikrokanalen är placerad tillsammans med cellerna.



Figur 3 – Teslas patenterade lösning med indirekt kylning.

Uppvärmning

Uppvärmningen av battericellerna är minst lika viktig som kylning. I studien av Ji & Wang (2013) visades att battericeller med cellformatet 18650 av litium kunde värmas upp med hjälp av pulsuppvärmning (Mutual Pulse heating, MPH) från -20 till 20 °C för endast 5 % av batterikapaciteten. Fördelarna med detta system är bland annat hög pålitlighet och lågt servicebehov, eftersom systemet inte kräver några rörliga delar.

I Salehi (2014) tydliggörs pulsuppvärmningens funktion och beskrivs som ett sätt att utnyttja battericellernas ökade interna resistens, vilken har visat sig öka vid låga temperaturer under 0 °C. Med MPH utförs korta laddnings- och urladdningspulser mellan olika batterigrupperingar i batterisystemet. Detta leder till att cellerna genererar värme och temperaturen inuti batteriet stiger.

2.4 Säkerhet

I detta avsnitt beskrivs de elsäkerhetskrav som ställs på ett litiumjonbatteri enligt Elsäkerhetsverket samt vilka säkerhetsrisker som kan orsakas av missbruk.

2.4.1 Elsäkerhet

Enligt Elsäkerhetsverket (2016) räknas elektriska produkter vars märkspänning ligger mellan 50–1 000 V AC eller 75–1 500 V DC till lågspänningsdirektivet. Syftet med direktivet är att skydda människor, egendom och husdjur mot skada orsakad av elektriska produkter. Detta gäller bland annat skydd mot elchock, brand och elektromagnetiska fält. Ett annat krav som beskrivs av Elsäkerhetsverket (2016) och som gäller för elektriska produkter är elektromagnetisk kompatibilitet (EMC). Det betyder att elektriska produkter ska ha en tillräckligt inbyggd tålighet mot elektromagnetisk strålning att de ska fungera utan att störas av annan elektronik.

Elsäkerhetsverket (2016) skriver även att det finns vissa standarder inom fordonsindustrin som har till uppgift att öka säkerheten på batterisystem till fordon så att det inte uppstår haverier under normalt användande. Ett exempel på en standard för elektriska fordon är ISO 26262 som är en internationell standard för säkerhet av elektriska och/eller elektriska system i fordon.

2.4.2 Överladdning av en battericell

Överladdning uppstår per definition då elektriskt flöde tvingas igenom en battericell, trots att maximal kapacitet är uppnådd. Enligt studien Wen et. al (2012) beror överladdning oftast på ett funktionsfel i laddaren vilket leder till att battericellen laddas med för hög spänning. Den höga spänningen leder till oönskade beteenden som uppkommer i cellen. Bland annat

ökar battericellens: temperatur, tryck och ström, vilket i sin tur ökar risken för brand eller explosion i batteriet. Den här risken kan minimeras genom att alltid upprätthålla den rekommenderade spänningsnivån över varje battericell. Detta ska kontrolleras av batteriets BMS.

2.4.3 Överhettning av en battericell

Överhettning sker främst genom intern eller extern värmegeneration då batteriet utsätts för förhållanden som inte är rekommenderade skriver Wen et. al (2012). Den interna värmebildningen är oftast kopplad till överladdningen av batteriet, men uppstår också vid interna kortslutningar mellan battericeller eller mellan anod och katod inuti battericellen.

2.4.4 Kortslutning mellan battericeller

Intern kortslutning av battericeller är en viktig aspekt att ha i åtanke då detta medför hög ström och snabbt stigande celltemperatur. Enligt Wen et. al (2012) kan en kortslutning inuti battericellen uppstå när så kallade dendriter bildas i litiumcellens anod och får kontakt med katoden. Enligt studien kan mindre strömtäthet (dvs. lägre urladdningshastighet, C) leda till minskad risk för kortslutning från dendriter.

2.4.5 Gasbildning från battericeller

Enligt Wen et. al (2012) bildas gas i litiumjonbatterier framförallt mellan elektrolyten och elektroderna. De gaser som bildas i litiumcellen är främst CO_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 och C_3H_8 . Mängden gas är under normal användning liten. Men under snabbbladdning, snabb urladdning eller annan form av användning då batteriet har en temperatur över den normala, bildas mer gas. Mer gasbildning bidrar till ett ökat tryck i battericellen och kan orsaka explosion. Enligt Wen et. al (2012) är tryckutjämnande säkerhetsventiler en effektiv metod för att förhindra att trycket i battericellen når en kritisk nivå. I vissa ovanliga fall kan ett 40 Ah batteri enligt Kritzer & Nahrwold (2013) släppa ut ca 100 liter gas genom elektrolytisk nedbrytning.

2.5 Lager och regler

Nedan presenteras de lager och regler som gäller för hantering, användning och transport av litiumjonbatterier.

2.5.1 Allmänna lagar och regler för litiumjonbatterier

Det finns lagar och regler som styr bland annat transport och produktion av litiumjonbatterier. Aktuella lagstiftningar har sammanställts av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), Naturvårdsverket och Elsäkerhetsverket.

Enligt MSB (2019a), finns det inga specifika brandskyddskrav för litiumjonbatterier, utan brandskyddskraven är av allmän karaktär. Brandskyddskraven säger bland annat att ”ägare eller nyttjandehavare till byggnader eller andra anläggningar i skäligen omfattning ska hålla utrustning för släckning av brand och för livräddning vid brand eller annan olycka och i övrigt vidta de åtgärder som behövs för att förebygga brand och för att hindra eller begränsa skador till följd av brand.”

Enligt Storm (2019) är det viktigt att förstå att batterier i utomhusmiljöer medför risker exempelvis om brand skulle uppstå på avlägsna platser i naturen. Det är därför betydelsefullt att dessa risker identifieras och förebyggs för att öka säkerheten kring batterier.

2.5.2 Regler vid transport av litiumjonbatteri

Innan litiumjonbatterier är godkända för transport ska batterierna testas och uppfylla vissa krav enligt Testhandboken del III, delavsnitt 38.3 från FN (2015). Testerna utgörs av åtta prov där battericellerna utvärderas efter varje test. Testerna och deras syfte kan ses i tabell 5.

Tabell 5 – Test och dess syfte som ska uppfyllas för att litiumjonbatterier ska kunna transporteras på allmän väg FN (2015).

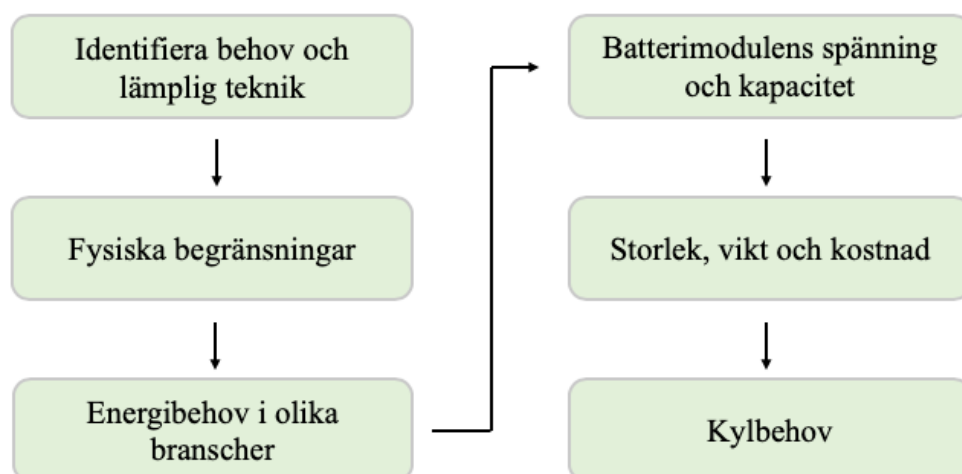
Test	Syfte
Höjdsimulering	Utvärderar batteriet vid lufttransport och låga tryckförhållanden
Värmetest	Utvärderar batteriets tätning och interna elektriska anslutningar. Testet utförs genom snabba och extrema temperaturförändringar.
Vibration	Utvärderar batteriets vibration under transport
Chock	Utvärderar batteriets robusthet mot tilltagande chocker.
Extern kortslutning	Utvärderar hur batteriet påverkas vid extern kortslutning
Kollision	Utvärderar mekaniskt missbruk eller kollision som kan leda till en intern kortslutning i batteriet.
Överladdning	Utvärderar tillståndet för ett batteri att utstå överladdning.
Tvingad urladdning	Utvärderar tillståndet för ett batteri att utstå en tvingad urladdning.

Litiumjonbatterier klassas som farligt gods och vid transport ska vissa bestämmelser uppfyllas. Från dokumentet: ”Utdrag ur ADR:2.2.9.1.7 (a) och (e) samt 4.1.1.1, 4.1.1.2 och 4.1.1.5” hämtat från MSB (2019b) anges bland annat hur litiumjonbatterier ska förpackas för att tåla stötar samt klassificeras, märkas och deklarerar vid transport på väg. Enligt MSB (2019b) ska farligt gods förpackas i förpackningar av god kvalitet. Förpackningarna ska vara tillräckligt hållfasta för att motstå stötar och belastningar som kan uppkomma under normala transportförhållanden och vid omlastning. Förpackningarna ska även vara förslutna så att fraktgods i transportfärdigt skick inte läcker vid normala transportförhållanden särskilt inte på grund av vibrationer, temperatur- eller tryckvariationer.

De delar av förpackningen som är i direkt kontakt med det farliga godset får enligt dokumentet från MSB (2019b) inte angripas eller påtagligt kunna försvagas av det farliga godset. Det får heller inte uppstå några kemiska reaktioner eller penetration mellan förpackningsmaterialet och det farliga godset, vilket kan utgöra fara under normala transportförhållanden. Om så sker bör det inneslutande materialet behandlas för att motverka påverkan.

3 Metod

I examensarbetet har intervjuer, litterära studier och modeller i Microsoft Excel använts för att ta reda på vad som krävdes av batteriet i olika branscher. Här undersöktes också olika batteritekniker, cellformat och kylningsbehov. I figur 4 ses hur arbetet har lagts upp för att komma fram till resultatet.



Figur 4 - Modell av hur examensarbetet har genomförts.

3.1 Identifiera behov och lämplig teknik

För att ta reda på de behov, begränsningar och lämplig teknik som krävs av en batterimodul i olika branscher har semistrukturerade intervjuer genomförts med användare och insatta personer i de olika branscherna. Enligt Hedin (1996) innebär semistrukturerade intervjuer att den intervjuade personen får svara fritt på en större allmän fråga. Genom följdfrågor kan intervjun naturligt föras vidare och den intervjuade personen kan ge sin syn på branschen. De frågor som ställdes handlade om batteriets begränsningar i

och utanför arbetsmaskinen, efterfrågade egenskaper och vilka förväntningar som finns på batteriet. Intervjuerna hölls via telefon, epost samt genom personliga besök med branschinsatta personer och genom ett besök på maskinmässan: MaskinExpo den 24 maj 2019. De intervjuade personerna var: Jonas Engström (senior projektledare inom elektrifiering och digitalisering inom jordbruk, RISE, traktorer), Fredrik Lorenc (teknisk chef, ELforest Technologies AB, skogsmaskiner), Olle Gelin (civilingenjör i driftsystem, SkogForsk, skogsmaskiner), Jan Sundström (produktledare inom strömförsörjning, Försvarsmaktens materielverk, (FMV), militära fordon), Jonas Gadolin (teknisk chef, AB Kranlyft, kranar), Rikard Ängered och Erik Wirhester (försäljning, Strengbohm eneby AB, grävmaskiner och hjullastare), Erik Petersson (Traktor Nord AB, hjullastare, traktorer och grävmaskiner), Kristjan Kõljalg (försäljning, Humus, trailers & vagnar) samt Wilhelm Bertilsson (Lantbrukare i Västmanland, traktorer).

3.2 Fysiska begränsningar

I det här avsnittet beskrivs batterimodulens fysiska begränsningar gällande cellformat på battericellerna samt dimensioner på batterimodulen.

3.2.1 Battericellens format

Genom att jämföra olika cellformat kan man bestämma vilken typ av battericell som är lämplig till batterimodulen. Då utrymmet är begränsat och högt energiinnehåll krävs till låg kostnad och vikt väljs det cylindriska cellformatet då den enligt kapitel 2.2.5 innehar högst specifik energi och låg tillverkningskostnad jämfört med de andra cellformaten. Med ekvation (1) kan andelen krävda celler med respektive cellformat: 18650 och 21700 beräknas för ett givet energiinnehåll. Detta utfördes med data från tabell 4 i avsnitt 2.2.5.

$$X_{18650/21700} = \frac{E}{U_{cell} * C_{cell}} \quad (1)$$

Där $X_{18650/21700}$ är antalet celler som krävs för ett givet energiinnehåll, E . U_{cell} är battericellens spänning och C_{cell} är battericellens kapacitet för respektive cellformat.

Den krävda arean, A för de cylindriska cellformaten jämfördes med hjälp av ekvation (2) för att visa hur mycket yta olika cellformat använder baserat på cellformat och energiinnehållet från ekvation (1).

$$A = X_{18650/21700} * \frac{D^2}{4} * \pi \quad (2)$$

Där $X_{18650/21700}$ är antalet celler från ekvation (1) som behövs för ett givet energiinnehåll och D är diametern på respektive cylindriskt cellformat.

3.2.2 Begränsningar i arbetsmaskinen

För att ta reda på hur mycket plats som kan utnyttjas i en arbetsmaskin mättes några utvalda arbetsmaskiners huvutrymmen upp. Huvdimensionerna för några traktormodeller, en skördare och en grävmaskin har mätts med talmeter.

3.2.3 Batterimodulens dimensioner

Genom att ta reda på hur många celler som får plats i höjdlängd på batterimodulen kan bottenarean (längden och bredden) på batterimodulen beräknas när energibehovet för modulen har beräknats.

Enligt Rickard (2018) används ett cellavstånd på 90 mm i höjdlängd för Teslas batteripaket för cellformatet: 21700, varför samma distans har valts till utformningen i höjdlängd. Från dimensionerna i bilaga A, tabell A2 är höjden på arbetsmaskinernas huv maximalt 900 mm. Höjden på batterimodulen beräknas med ekvation (3).

$$H_{modul} = H_{max} - H_{botten} \quad (3)$$

Där H_{max} är den maximala dimensionen som fås från de uppmätta huvdimensionerna på arbetsmaskinerna. H_{botten} är det avstånd på 100 mm som krävs för att tillåta lyft med pallgafflar ifrån avsnitt 2.2.8.

Med ekvation (4) kan antalet celler i höjdlängd beräknas då cellhöjden är 90 mm.

$$X_{celler \ i \ höjdlängd} = \frac{H_{modul}}{h_{cellhöjd}} \quad (4)$$

3.3 Energibehov i olika branscher

Energiinnehållet i batteriet har utretts genom att undersöka olika arbetsmaskiners bränsleförbrukning vid olika arbetsuppgifter. Effektbehovet för varje arbetsmoment har uppskattats och därefter har den behövda energin från batteriet kunnat beräknats med hjälp av data insamlade från Lindgren et. al (2002) samt Löfgren & Brunberg (1997). I modellen som har byggts i Microsoft Excel har energiförbrukningen jämförts teoretiskt mellan en arbetsmaskin som drivs på diesel och en arbetsmaskin som drivs på el. Varje eldriven arbetsmaskin har antagits vara en konventionell dieseldriven arbetsmaskin med hytt där dieselmotor och bränsletank bytts ut mot batteri, växelriktare och elmotor (AC).

I energiberäkningarna, där energianvändningen med dieselmotor kontra elmotor studerats, har inte drivlinan efter motorn tagits hänsyn till. Den energi som dieselmotorn använder har jämförts med energiförbrukningen för elmotorn. Samma drivlina efter dieselmotorn har alltså använts i beräkningarna för arbetsmaskiner med elmotor för att förenkla jämförelsen.

3.3.1 Allmänna energiförbrukningsberäkningar för arbetsmaskiner

För att ta reda på den energi som batteriet behöver leverera till elmotorn för att kunna utföra samma arbetsmoment som arbetsmaskinen med dieselmotor, användes ekvation (5), (6) och (7). För att konvertera de uppmätta värdena i bilaga A, tabell A3 från liter diesel per timme till energi per timme, det vill säga effekt, har energiinnehållet per liter diesel från Trafikverket (2012) samt densiteten för bränslet från Sweaenergi (u.å) hämtats. De numeriska värdena för dessa kan ses i bilaga A, tabell A1.

Ekvation (5) representerar den effekt som dieselmotorn per arbetsmaskin använder för att kunna utföra olika arbetsmoment.

$$P_{arbetsmoment} = B * E_{diesel} \quad (5)$$

Där $P_{arbetsmoment}$ är den effekt som krävs för att utföra olika arbetsmoment i kW. B är bränsleförbrukningen i liter/h och E_{diesel} är energiinnehållet i diesel i kWh/liter.

Ekvation (6) representerar den mekaniska energi som används för att driva maskinen framåt, alltså den energi som krävs för arbetsmomentet. Det är alltså den nyttiga energin där dieselmotorns verkningsgrad är medräknad.

$$E_{nyttig,ut} = \eta_{diesel} * P_{arbetsmoment} * t \quad (6)$$

Där $E_{nyttig,ut}$ är energin som krävs i kWh per arbetsmoment för att utföra arbetet. η_{diesel} är dieselmotorns verkningsgrad och t är tiden för arbetsmomentet. I de fall då bränsleförbrukningen angivits i kg/h har densiteten, ρ för diesel använts. Värdena för de antagna verkningsgraderna och densiteten kan ses i tabell A1. $E_{nyttig,ut}$ kan senare användas i ekvation (7) för att beräkna den energimängd som behöver levereras ifrån batteriet i form av elektrisk energi.

$$E_{in,el} = \frac{E_{nyttig,ut}}{\eta_{el}} \quad (7)$$

Där $E_{in,el}$ representeras av den energi i kWh som batteriet behöver leverera till elmotorn för att kunna utföra samma arbetsmoment, eftersom effektbehovet antas var detsamma på motoraxeln. η_{el} är elmotorns och väx-
elriktarens antagna verkningsgrad.

3.3.2 Scenarion

Olika scenarion studerades för att visa hur mycket energi olika arbetsmaskiner kräver vid olika arbetsmoment. Nedanstående beräkningar krävdes för att kunna uppskatta energiinnehållet i den standardiserade och utbytbara batterimodulen.

Lantbruksmodell

Arbetsmaskiner inom lantbruket representeras främst av traktorer därför har dessa använts i energiberäkningsmodellen för lantbruket. Data för traktorn Valtra 6600, 75 kW har hämtats från Lindgren et. al (2002) och visas i tabell A3.

Det uppskattade energiinnehållet i batterimodulen för en traktor inom lantbruket har uppskattats med hjälp av en modell byggd i verktyget Excel. Lantbruksmodellen användes för att ta reda på hur stort energiinnehåll som

krävs av batteriet för att utföra olika arbetsmomentet samt hur antalet batterier kan påverka körningstiden på en gård. Modellen för traktorn har utvecklats med hjälp av flera antaganden vilka visas i tabell 6 nedan.

Tabell 6 – Antaganden för lantbruksmodellen.

Antagande	Värde	Källor
Sträcka till bytestation, S	500 m	Google kartor
Tid för batteribyte, t_{byte}	5 min	de Afonseca (2018)
Transporthastighet till bytestation, v	20 km/h	Bertilsson (2019)
Effektbehov vid transport, $P_{\text{transport}}$	30 kW	Lindgren et.al (2002)
Batteriets SOC-intervall, SOC	50 % (10–60 %)	Wikner & Thiringer (2018)
Gårdsstorlek	200 ha	
Arbetsdag	8 h	
Fulladdat batteri vid start	1 st	

Från distansverktyget i Google kartor har flera fält mätts upp i Mellansverige. Det visade sig att ett fält för spannmål sällan sträcker sig längre än 1 km från kant till kant. Därför sattes medelavståndet till batteribytet till 500 m. Från Kim et. al (2015) sker ett automatiskt batteribyte för bussar på 60 sekunder och i de Afonseca (2018) beskrivs en bytestid på 1,5–5 min för en traktor. I Lindgren et. al (2002) uppmättes transporteffekten för en traktor med vagn på väg till 30 kW. SOC-intervallet har satts till 50 % mellan 10–60 %, det vill säga hälften av den totala kapaciteten i batterimodulen. Intervallet baseras på studien Wikner & Thiringer (2018) som beskrev ett lägre och kortare SOC-intervall som gynnsamt för batteriets livslängd. Gårdsstorleken har satts till 200 hektar då detta är en medelstor gård i Sverige och skulle ekonomiskt ha möjlighet att investera i ny teknik. Arbetstiden per dag antogs till åtta timmar och traktorn antogs alltid starta dagen med ett fulladdat batteri.

Arbets hastigheten på fält för traktorns olika arbetsmoment har hämtats från Lindgren et. al (2002). Bland annat uppmättes effektbehov och arbets hastighet för en traktor på fält med olika redskap. För spannmålsodling i Mälardalen vid vårbruk följer olika arbetsmoment som utförs av traktorn. Dessa är enligt Bertilsson (2019): harvning (två gånger), kombisådd (både sådd och konstgödselspridning), vältning, besprutning och till sist plöjning efter skörd. Då olika grödor kan kräva lite olika arbetsmoment har endast de

mest essentiella arbetsmomenten använts i modellen. Dessa visas i tabell 7 nedan, tillsammans med arbetsperioderna när arbetsmomentet bör utföras. Tidsperioderna är tagna från de Toro (2004) som beskriver arbetsperioden när ett fält i Mellansverige (Uppsala) kan bearbetas. Arbetsmomentet besprutning fanns inte med i Lindgren et al (2002), därför har ett arbetsmoment från studien med den energiförbrukning som var mest lik detta arbetsmoment använts i beräkningarna. Enligt Bertilsson (2019) var detta arbetsmoment konstgödselspridning.

Tabell 7 – Tidsperiod för respektive arbetsmoment på en gård i Uppsala.

Fältoperation	Tidsperiod
Harvning	15 april–31 maj
Harvning	15 april–31 maj
Sådd (kombination: sådd + konstgödsel)	15 april–31 maj
Vältning	15 april–31 maj
Besprutning	15 april–31 maj
Plöjning	1 aug–30 sep

Energiberäkningar i modellen

Följande ekvationer användes för att ta reda på hur många brukningsdagar som krävs för en traktor med elektrisk drivning att utföra sina arbetsmoment på en gård.

I modellen varierades både batterimodulens energiinnehåll och antal tillgängliga batterier för att ta reda på vilka faktorer som påverkade brukningstiden.

$E_{transport}$ är energin som går åt för att byta batteri vid batteribytesstationen och ges i ekvation (8).

$$E_{transport} = \frac{2S}{v} * P_{transport} \quad (8)$$

Där $2S$ representerar sträckan till och från batteribytesstationen, v är hastigheten under transport och $P_{transport}$ är effekten som traktorn antas kräva vid transport på fält. Dessa värden kan ses i tabell 6 för antaganden.

Genom att variera olika energiinnehåll i batterimodulen med ett givet SOC-intervall kan batteriets möjliga energiinnehåll, $E_{cykling}$ beräknas genom ekvation (9). Eftersom transporten till och från batteribytesstationen också

kräver energi har det totala energiinnehållet också reducerats med den energi som förbrukas vid varje batteribyte.

$$E_{cykling} = E_{batteri} * SOC - X_{batteribyte} * E_{transport} \quad (9)$$

Där $E_{cykling}$ är batteriets energiinnehåll i kWh som kan cyklas. $E_{batteri}$ är batteriets energiinnehåll i kWh multiplicerat med tillåtna SOC-intervallet. $X_{batteribyte}$ är antal batterier som byts ut under en arbetsdag och $E_{transport}$ är energin som förbrukas då arbetsmaskinen kör till och från bytestationen.

Tidsberäkningar i modellen

I ekvation (10) beräknas tiden för att åka till och från batteribytestationen.

$$t_{körningstid\ t/f\ bytestation} = \frac{2S}{v} \quad (10)$$

Tiden som förbrukas av att arbetsmaskinen byter batteri beräknas i ekvation (11).

$$t_{batteribyte} = X_{batteribyte} * (t_{byte} + t_{körningstid\ t/f\ bytestation}) \quad (11)$$

Där $X_{batteribyte}$ är antalet batteribyten per dag, t_{byte} är tiden för batteribytet vilken ses i tabell 6 och $t_{körningstid\ t/f\ bytestation}$ är körningstiden till och från bytestationen.

Arbetstiden, $t_{Arbete\ m\ batteri}$ i h/dag, för varje arbetsmoment med eldrift kan ses i ekvation (12).

$$t_{Arbete\ m\ batteri} = \frac{X_{batterier} * E_{cykling}}{P_{arbetsmoment}} \quad (12)$$

Där $X_{batterier}$ är antalet batterier med ett givet energiinnehåll och förutsatt att ett fulladdat batteri redan sitter i arbetsmaskinen. $E_{cykling}$ som beräknats i ekvation (9). $P_{arbetsmoment}$ fås från ekvation (5) och representerar den krävda effekten i kW som krävs för att utföra arbetsmomentet. I de fall då tiden översteg 8 h justerades tiden manuellt till 8 h minus tiden för antalet batteri-byten per dag.

Den effektiva körningstiden i timmar per dag, $t_{\text{effektiv körningstid}}$ beräknades med hjälp av ekvation (13). Arbetstiden med batteri subtraheras med tiden för varje batteribyte.

$$t_{\text{effektiv körningstid}} = t_{\text{Arbete m batteri}} - t_{\text{batteribyte}} \quad (13)$$

Brukningstid för gården

Tiden för att utföra ett arbetsmoment på en 200 hektar (ha) stor gård har beräknats med ekvation (14). Där gårdsarealen har dividerats med arbetsmomentets arbetshastighet ha/h.

$$t_{\text{arbete}} = \frac{A_{\text{gårdsstorlek}}}{v_{\text{arbete}}} \quad (14)$$

Där $A_{\text{gårdsstorlek}}$ är gårdens totala storlek i hektar (ha) och v_{arbete} är arbetshastigheten ha/h per arbetsmoment för traktorn.

Genom att dividera ekvation (14) och (13) fås antalet dagar, t_{dagar} för att bruka gården med respektive arbetsmoment med avseende på antalet batteri-byten och batterier med olika stora energiinnehåll. Detta ses i ekvation (15).

$$t_{\text{dagar}} = \frac{t_{\text{arbete}}}{t_{\text{effektiv körningstid}}} \quad (15)$$

Arbetsdagarna för respektive arbetsmoment summerades sedan och jämfördes med referenstiden som sträckte sig i 107 arbetsdagar (15 apr–31 maj samt 1 aug–30 sep) för en 200 hektar stor gård i Mellansverige.

Modell för skogsbruk och entreprenad

För att ta reda på ett ungefärligt energibehov i modellen har bränsleförbrukningen för hjullastarna Volvo L-50C, 75 kW och Volvo L-70C, 96 kW samt grävmaskinen Volvo EW 150, 96 kW hämtats från Lindgren et. al (2002). Skotaren Valmet 890:s bränsleförbrukning har hämtats från studien Löfgren & Brunberg (1997). På grund av svårigheterna med batteridrift för en skördare har denna uteslutits från modellen. En skördare återvänder inte till uppsamlingsplatsen lika ofta som en skotare, därför kan det uppstå problem med energiförsörjningen. Arbetsmaskinernas arbetsuppgifter som användes i modellen kan ses i tabell A3.

Till skillnad från lantbruksmodellen fanns ingen uppmätt arbetshastighet per hektar eller yta för de resterande arbetsmaskinerna, varför en ny modell i Excel utformades. I modellen för skogsbruk och entreprenad antogs arbetsmaskinerna utföra varje arbetsmoment i 8 timmar per dag. Då samma arbetsmoment utfördes hela dagen antogs reservbatterierna också stå intill arbetsmaskinen, vilket innebar att batteribytet kunde ske på samma plats. Tiden för batteribytet sattes likt lantbruksmodellen till 5 min och upp- och urladdningsintervallet, SOC till 50 %. Arbetstiden per dag antogs till åtta timmar och arbetsmaskinerna antogs alltid starta dagen med ett fulladdat batteri. Antagandena sammanfattas i tabell 8.

Tabell 8 – Antaganden för modellen för skogsbruk och entreprenad.

Antagande	Värde	Källor
Tid för batteribyte, t_{byte}	5 min	de Afonseca (2018)
Batteriets SOC-intervall, SOC	50 % (10–60 %)	Wikner & Thiringer (2018)
Arbetsdag	8 h	
Fulladdat batteri vid start	1 st	

Modellen för skogsbruk och entreprenad användes för att beräkna antalet körningstimmar som funktion av antalet batterier och energiinnehåll under en arbetsdag. Detta för att se hur eldrift med batterier olika stora energiinnehåll och antalet batteribytten skiljer sig mot arbetsmaskiner som körs på diesel. Med diesel är det möjligt att effektivt arbeta i åtta timmar per dag och arbetsmoment bortsett från eventuell tankning. Med ekvation (16) kunde batteriets möjliga energiinnehåll beräknas.

$$E_{cyklning} = E_{batteri} * SOC \quad (16)$$

Med ekvation (17) kunde tiden för batteribytet beräknas beroende på antalet batterier som användes under arbetsdagen.

$$t_{batteribyte} = X_{batteribyte} * t_{byte} \quad (17)$$

Därefter användes ekvation (12) och (13) för att beräkna den effektiva tiden att utföra arbetsmomentet för respektive arbetsmaskin. Den effektiva körningstiden dividerades sedan med den totala möjliga tiden. Detta ses i ekvation (18).

$$t_{snitt} = \frac{t_{effektiv\ körningstid}}{t_{möjlig\ arbetstid}} \quad (18)$$

Där t_{snitt} är snitt-tiden i procent för arbetsmaskinen och jämförs med den absolut möjliga arbetstiden. Antalet arbetsmoment för en enskild arbetsmaskin multiplicerades med arbetstimmarerna för en dag. Exempelvis gav fem arbetsmoment á 8 timmar en möjlig arbetstid på 40 timmar. Arbetsmaskinernas arbetsmoment ses i tabell A3.

3.4 Batterimodulens spänning och kapacitet

Nedan beskrivs ett förslag på hur battericellerna kan kopplas ihop. Inget fokus har legat på att ta fram den optimala sammankopplingen av battericellerna. Istället har ett förslag tagits fram baserat på de krav som ställts på batteriet samt liknande utformningar.

Spänningen i batteriet, U_{modul} beskrivs av ekvation (19) där S är antalet seriekopplade celler och U_{cell} är spänningen per cell.

$$U_{modul} = S * U_{cell} \quad (19)$$

Batterimodulens kapacitet, C_{modul} med enheten Ah, beskrivs av ekvation (20) där P är antalet parallellkopplade battericeller och C_{cell} är kapaciteten i respektive cell.

$$C_{modul} = P * C_{cell} \quad (20)$$

I studien Kim et. al (2015) bestod ett batteripaket av 162 seriekopplade respektive 4 parallellkopplade battericeller, detta kan skrivas som 162S4P. De 162 cellerna seriekopplas med vardera 3,7 V vilket ger drygt 600 V. Därefter parallellkopplas 4 batterier för att öka kapaciteten i batteriet. Totalt gav batteriet i studien 48 kWh, då varje battericell hade en kapacitet på 20 Ah. I den här utformningen seriekopplas 167 battericeller, enligt 167S för att uppnå 600 V. Därefter väljs en så hög kapacitet som möjligt, vilken begränsas av batterimodulens dimensioner.

I ekvation (21) varierades antalet celler per våning, $X_{celler\ per\ våning}$ som funktion av batterimodulens energiinnehåll, E_{modul} . Detta görs för att ta reda

på hur många battericeller som krävdes för att åstadkomma det energiinnehåll som arbetsmaskinerna efterfrågar i de tidigare modellerna i avsnitt 3.3.2.

$$E_{modul} = \frac{X_{celler \text{ per våning}} * X_{celler \text{ i höjded}}}{XS} * C_{cell} * U_{modul} \quad (21)$$

$X_{celler \text{ i höjded}}$ beräknades tidigare i ekvation (2) och representerar antalet våningar med battericeller som får plats i batterimodulen. XS representerar de antal seriekopplade celler i serie som krävs för att uppnå en vald batterispänning.

3.5 Storlek, vikt och kostnad

I följande avsnitt beskrivs hur storleken, vikt och kostnad har beräknats.

3.5.1 Storlek

När energibehovet i batterimodulen har uppskattats kan antalet battericeller per våning beräknas. Ekvation (22) användes för att beräkna bottenarean på batterimodulen baserat på antalet celler som får plats på varje våning. Avståndet mellan cellerna baserades på avsnitt 2.2.7, där 3 mm avstånd används vid luftkylning av battericeller med cellformatet 18650. Eftersom litiumjonceller med cellformatet: 21700 har en lägre intern resistens och därmed lägre värmeöverföring till omgivningen, kan samma cellavstånd användas som för cellformatet: 18650.

$$A_{modul} = X_{celler \text{ per våning}} * (D + d)^2 / 4 * \pi \quad (22)$$

$A_{våning}$ är ytan för batterimodulen, $X_{celler \text{ per våning}}$ är antalet celler som får plats per cellvåning. D är diametern på battericellen vilken ses i tabell 4 under avsnitt 2.2.5 och d är avståndet mellan cellerna.

Längden på batterimodulen bestämdes genom att undersöka hur mycket energi varje batterimodul bör innehålla för att tillgodose energibehovet för de olika arbetsmaskinerna, vilket bestäms i avsnitt 3.3. Bredden på modulen antogs till 0,6 m för att ha viss marginal innanför en större traktors motorhuv, vilka kan ses i tabell A2. Längden beräknades i ekvation (23) och beror

således på antalet battericeller som krävdes för att uppnå godtyckligt energiinnehåll i batterimodulen.

$$L_{modul} = \frac{A_{modul}}{B_{modul}} \quad (23)$$

3.5.2 Vikt

Batterimodulens vikt har beräknats av antalet celler i batterimodulen vilket också är den mest betydande delen. Vikten beräknas av ekvation (24).

$$m_{celler} = X_{celler \text{ per våning}} * X_{celler \text{ i höjded}} * m_{cell} \quad (24)$$

m_{celler} är vikten för alla celler i batterimodulen. Vikten per battericell, m_{cell} ses i tabell 4.

3.5.3 Kostnad

Kostnaden för de studerade battericellerna och batteriets BMS beskrivs i ekvation (25). Priset för respektive cellformat är en uppskattning och beskriver inte vilket katod- eller anodmaterial som använts. Det uppskattade värdet för cellformaten ses i tabell 4 och har räknats om till svenska kronor från växelkursen 30 maj 2019: 9,549 SEK/USD. Kostnaden för ELforest BMS har enligt Lorenc (2019) antagits till 100 000 SEK.

$$K_{batterimodul} = E_{modul} * K_{per \text{ energiinnehåll}} + K_{BMS} \quad (25)$$

$K_{batterimodul}$ är kostnaden för hela batterimodulen, K_{cell} är kostnaden per energiinnehåll [SEK/kWh] och K_{BMS} är kostnaden för BMS.

3.6 Kylbehov

I Bergman (2018) har fem cylinderformade 21700 battericeller med batterikemin NMC modellerats med indirekt kylning i modelleringsprogrammet COMSOL Multiphysics 5.3a. Battericellerna har i modellen antagits ge ifrån sig uniform värmefördelning. Från resultatet i Bergman (2018) visas att höga C dvs snabb laddning och urladdning ger högre värmeutveckling från cellerna, jämfört med långsammare urladdning och laddning. Upp- och urladdningshastigheten, C är ett mått på hur snabbt ett batteri laddas eller urladdas.

Ett batteri med en urladdningshastighet på 1 C betyder att batteriet laddas ur på en timme och 0,5 C innebär att batteriet laddas ur på två timmar.

I tabell 9 hämtad från Bergman (2018) ses hur värmeproduktionen i Watt per cell beror på urladdningshastighet och laddningshastighet, C.

Tabell 9 – Värmegenerering per cell för olika ladd- och urladdningshastigheter (Bergman, 2018).

Test		Maximal värmeproduktion, q [W]
0,1 C	Laddning	0,1
	Urladdning	0,03
0,3 C	Laddning	0,28
	Urladdning	0,14
0,5 C	Laddning	0,56
	Urladdning	0,29
1 C	Laddning	1,3
	Urladdning	1,2

För att ta reda på hur mycket värme som behöver kylas i batteriet har värmeproduktionen per battericell för olika ur- och laddningshastigheter hämtats från Bergman (2018). I ekvation (26) ses hur mycket värme som produceras per cellvåning i batterimodulen.

$$Q = q_{cell} * X_{celler \text{ per våning}} \quad (26)$$

Q är värmealstringen i modulen i W, q_{cell} är värmealstringen per cell i W och X_{celler} är antalet celler i modulen per våning.

4 Resultat

I resultatet ses vilka behov, begränsningar och teknik som efterfrågas i olika branscher. Här ses också batteriets energiinnehåll, storlek, vikt och kostnad samt kylbehov.

4.1 Identifiering av begränsningar, egenskaper och lämplig teknik

Resultatet från intervjuer med användare och insatta personer i de olika branscherna presenteras nedan.

4.1.1 Resultat från intervjuer

I nedanstående avsnitt presenteras branschinsatta personers syn på eldrift av arbetsmaskiner och vilka begränsningar som finns på en standardiserad och utbytbar batterimodul i respektive bransch. Intervjuerna har sammanställts i respektive bransch för att ge en tydligare bild av vilka begränsningar som finns. De efterfrågade egenskaperna från batterimodulen har sammanställts i slutet av avsnittet.

Lantbruket

Enligt de intervjuer som har sammanställts visade det sig att det främst var utrymmet i traktorn som begränsade batterimodulens storlek i dagens traktorer. Den extra vikt som batteriet medförde var inget betydande problem eftersom denna kunde användas som motvikt vid tyngre arbeten på fält. Några av de intervjuade personerna ansåg också att batterimodulen kunde placeras på traktorns främre gafflar för att tillåta att ett större utrymme kunde utnyttjas. Det högre priset för batterimodulen jämfört med diesel kunde motiveras av att det innebar minskade utsläpp. Det ansågs också positivt att

batterierna kunde hyras ut eftersom lantbrukarna då kunde fokusera på arbetet och inte energiförsörjningen till deras maskiner.

Skogsbruket

Inom skogsbruket utgjorde varken batterimodulens vikt eller storlek någon större begränsning på arbetsmaskinen. Enligt de intervjuade personerna inom skogsbranschen är skotare producerade för att klara av mycket vikt och volym, därför finns det möjlighet att ha reservbatterier på arbetsmaskinen under arbete. Skotaren är också mer lämplig för eldrift med utbytbara batterimoduler till skillnad mot skördare. Detta eftersom skotaren återvänder till samma plats för att lasta av det timmer som skördaren tidigare fält i skogen. Inom skogsbranschen används främst vinterhalvåret för avverkning då markpackning och risken för skogsbrand är liten.

Entreprenad (hjullastare, grävmaskiner, kranar)

Enligt intervjuerna från entreprenadsidan ansågs större hjullastare, grävmaskiner och kranar ha få begränsningar vad gäller storlek och vikt. Däremot skulle mindre modeller av arbetsmaskiner kräva ett mer begränsat utrymme i arbetsmaskinen. Framförallt för att uppnå samma smidighet som en konventionell maskin. Vikten ansågs inte ha någon begränsning då den likt andra arbetsmaskiner kunde användas som motvikt vid tunga lyft. Majoriteten av de intervjuade personerna inom entreprenadbranschen ansåg att ett batterimodulsystem där mindre batterimoduler kopplas ihop kunde öka användarmöjligheten ännu mer.

Svårigheterna med utbytbara batterier till arbetsmaskinerna är enligt entreprenadbranschen batteribyttena. Maskinförare vill helst inte kliva ur arbetsmaskinen för att byta batteri. Istället önskas ett system där batteribytet är helautomatiserat eller där maskinföraren inifrån hytten kan utföra bytet.

Utbytbara batterier ansågs som en bra energikälla inom entreprenadbranschen då maskinerna också kunde användas inomhus eller i gruvor, utan högre krav på ventilation. Utbytbara batterier ansågs också fördelaktigt vid arbete tillsammans med andra arbetsmaskiner, eftersom batterier kunde medföra ökad frihet till skillnad från energiförsörjning med elkabel. Det ansågs också som positivt att större batterimoduler kunde fungera som stationära energilagrar vid större arbetsplatser utan anslutning till elnätet.

Försvarsmakten

Inom försvarsmakten är det främst storlek och vikt på batteriet som begränsar batteriets utformning, även mobilitet och säkerhet vid transport ansågs som extra viktiga parametrar. Flexibiliteten att kunna använda ett batteri till fordon och även som energilagringseenhet i fält, ansågs som mycket positivt. För försvarsmakten skulle ett system där batterier hyrs ut fungera under icke krigstid.

Efterfrågade egenskaper

Från de intervjuer som hållits under examensarbetets gång ges en bild av vad användarna efterfrågar. Användarna vill framförallt att arbetet ska kunna utföras på liknande tid som vid konventionell drift och med så få byten som möjligt.

Det som var gemensamt för alla branscher var efterfrågan på säkerhet, tillförlitlighet samt användarvänlighet och lång livslängd. Det ska vara enkelt att använda batterierna och de ska fungera. Något som också var gemensamt för alla branscher är de förhållanden som batterimodulen utsätts för i respektive bransch. Dessa var enligt de intervjuade personerna; vibrationer vid körning, damm, vattenstänk och regn samt temperaturförändringar. Batteriet ansågs också behöva säkerhetsskydd så som skydd mot kollisioner, brand och explosion samt stöldskydd.

När frågan om specifika funktioner på batteriet ställdes var det i samtliga fall en svår fråga som inte gav några specifika förslag. Däremot tyckte flera av de intervjuade personerna att GPS, display på batteriets utsida som visar batteriets data och kvarvarande kapacitet, vattentät design samt att batteriet skulle vara uppkopplat till nätet (för att kunna kontrollera batteriets status på distans) var bra idéer, när dessa gavs som förslag. De egenskaper som framkom av intervjuerna sammanfattas i tabell 10.

Tabell 10 – Sammanfattning av efterfrågade egenskaper på den standardiserade utbytbara batterimodulen.

Efterfrågade egenskaper
Få batteribyten
Användarvänlighet, pålitlighet och säkerhet samt lång livslängd
Skydd mot vibration
Skydd mot utomhusförhållanden så som temperaturförändringar, damm, vatten och fukt.
Skydd mot brand
Skydd mot kollision och penetration
Skydd mot explosion
Skydd mot stöld

4.2 Fysiska begränsningar och materialval

I det här avsnittet presenteras de materialval som valts till batterimodulen.

4.2.1 Cellformat

Från tabell 11 som beräknats med ekvation (1) och (2), ses att cellformatet 21700 med cylindriska litiumjonceller kräver färre celler men utgör något större yta per kWh jämfört med cellformatet 18650.

Tabell 11 – Jämförelse mellan de cylindriska cellformaten: 18650 och 21700 och hur dess yta och antal celler påverkas av olika energiinnehåll.

Energiinnehåll [kWh]	1	2	3	4	5
Antal celler för cellformat: 18650	77	154	231	309	386
Krävd yta [dm ²]	2,0	3,9	5,9	7,9	9,8
Antal celler för cellformat: 21700	58	116	174	231	289
Krävd yta [dm ²]	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0

4.2.2 Val av katodmaterial

Då dimensionen på batterimodulen är begränsad krävs ett katodmaterial med hög spänning och hög specifik kapacitet för att tillåta ett högre energiinnehåll på mindre yta. Från tabell 2 i ses att NCA har högst specifik kapacitet samt bättre prisreducering fram till 2030 jämfört med andra katodmaterial.

4.2.3 Val av anodmaterial

På grund av det höga priset och att impedansen ökar vid cykling av litiumjonceller med anodmaterial av LTO, väljs grafit som anodmaterial till utformningen. Grafit är också vanligt förekommande i naturen och betydligt billigare än LTO vilket kan ses i tabell 3.

4.2.4 Inkapslingsmaterial av batterimodulen

I en intervju med Karl Banke på företaget Polykemi och Christer Karlsson på divisionen för säkerhet och transport av litiumbatterier inom RISE kunde inkapslingsmaterialet till batterimodulen bestämmas.

Av de förutsättningar som ställs på batteriet krävs ett material som tål att stå utomhus under längre tid samt skydda mot vatten, UV-ljus, varierande temperaturer samt förhindra att batterikemin reagerar med inkapslingsmaterialet. Dessa krav på materialet ställs även för att uppfylla de lagar och regler som gäller vid transport av litiumjonbatterier och beskrivs i avsnitt 2.5.2. Enligt Karlsson (2019) kan det finnas svårigheter i att få inkapslingen helt tät och samtidigt ha möjlighet släppa ut de gaser som bildas i batteriet. Dessutom föredras ett inkapslingsmaterial som klarar av en kollision eller penetration av vassa föremål.

Enligt Banke (2019) är polypropen (PP) ett lämpligt material som inkapsling till batterier i utomhusmiljö. Detta då plastmaterialet polykarbonat/akrylonitril-styren-akrylat (PC/ASA) som vanligtvis används till utomhusapplikationer är känsligt mot kemiska syror och det finns svårigheter med att få plastmaterialet att både bli skyddat mot UV-ljus och flamskyddat. Detta gäller inte för PP som normalt inte är så känslig för kemikalier. PP går dessutom att både flamskydda och UV-stabilisera.

Svårigheterna med PP som material sker vid formgjutningen skriver Banke (2019). Formsprutade, delkristallina material har en tendens att skeva när det handlar om plana detaljer. Istället kan skivor extruderas och svetsas ihop för att få en tät batteriinkapsling som kan spolas av med vatten.

Enligt Banke (2019) är svart färg fördelaktigt utomhus då mindre UV-ljus absorberas i plasten och mer återvunnet material kan användas utan att det påverkar utseendet på plasten. Med ett vitt plastmaterial ökar däremot

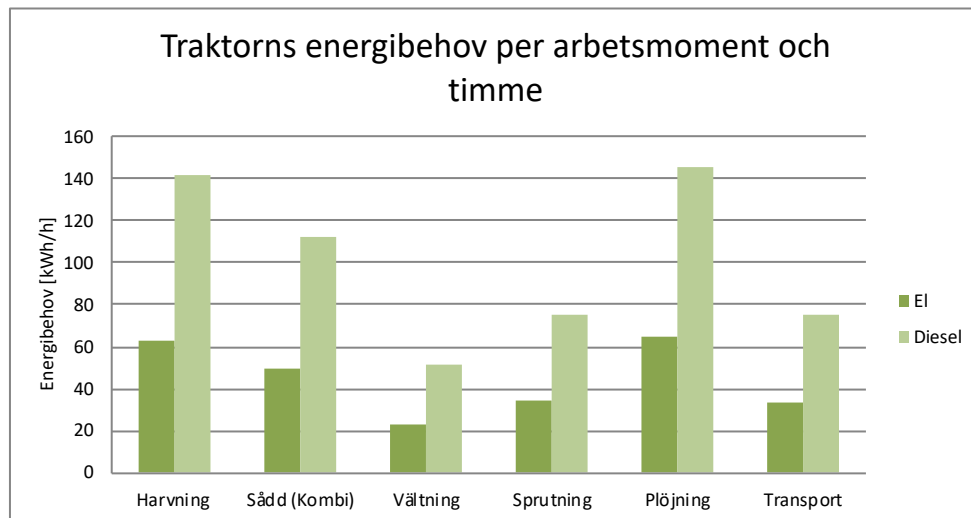
känsligheten mot missfärgning och prickar därför kan återvunnet material med vit färg bli svårare att använda utseendemässigt.

4.2.5 BMS

I en intervju med Fredrik Lorenc på företaget ELforest Technologies AB kunde batterimodulens BMS bestämmas. Enligt Lorenc (2019) på företaget ELforest skulle en hopkoppling av battericellerna enligt 167SXP (där X är antalet parallellkopplade celler) fungera för deras trådlösa BMS som har fördelen att på distans visa hur battericellerna mår och om ett problem uppstått. Priset för deras trådlösa BMS uppgick enligt Lorenc (2019) till cirka 100 000 SEK för en batterimodul på 200 kWh.

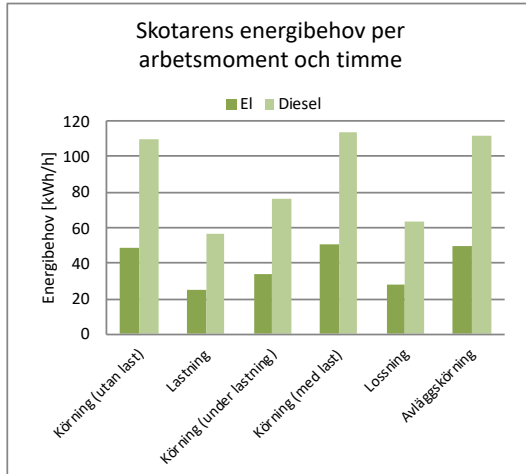
4.3 Energibehov i olika branscher

För att ta reda på hur mycket energi som krävs för att utföra olika arbetsmoment med olika arbetsmaskiner används ekvation (5)–(7). Detta för att se hur medelenergibehovet förändras med olika typer av motorer. Resultaten från ekvation (5)–(7) ses i figur 5-9. I figur 5 ses bland annat att plöjning och harvning är de mest energikrävande arbetsmomenten under vårbruket för en traktor. Dessa kräver ca 65 kWh/h respektive 63 kWh/h med eldrift och 145 kWh/h respektive 140 kWh/h med dieseldrift. Energibehovet för elmotorn är därmed mindre än hälften av energibehovet från dieselmotorn.

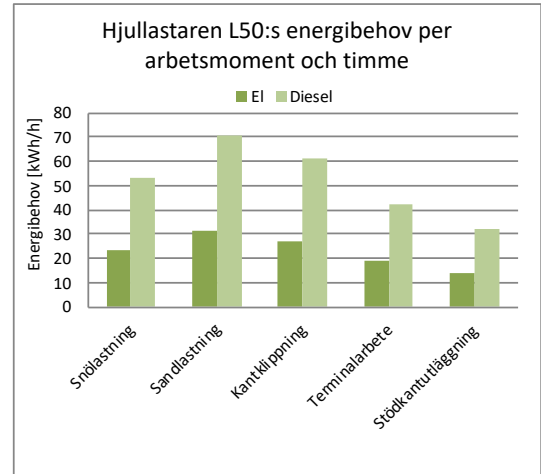


Figur 5 - Traktorns medelenergibehov för el- och dieseldrift per arbetsmoment.

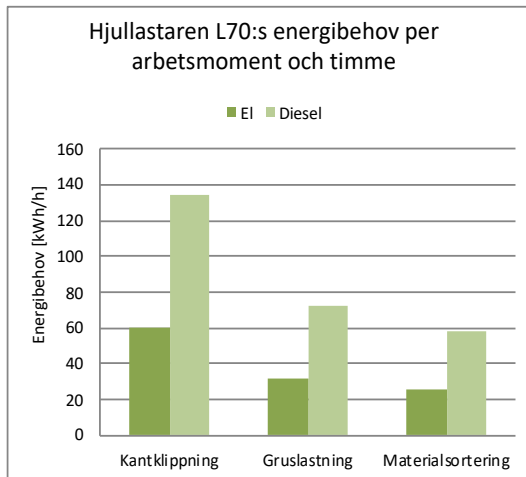
I figur 6, 7, 8 och 9 nedan ses skotarens, hjullastaren L-50C och L-70C samt grävmaskinens energibehov per arbetsmoment. I nedanstående figurer ses att energibehovet för dieselmotorn är högre än energibehovet för elmotorn för alla arbetsmoment.



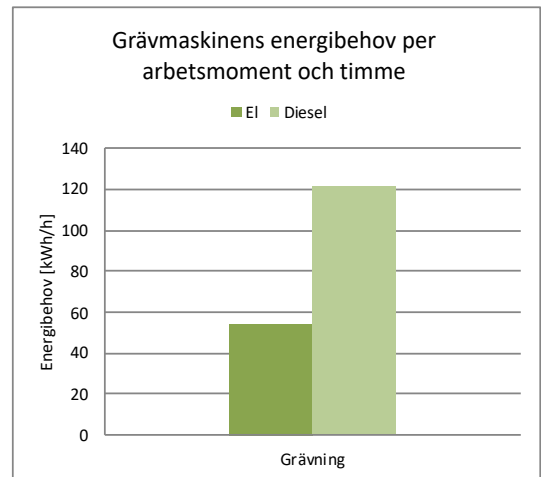
Figur 6 - Skotarens energibehov av el och diesel



Figur 7 - Hjullastaren L-50C energibehov av el och diesel



Figur 8 – Hjullastarens L70-C energibehov av el och diesel

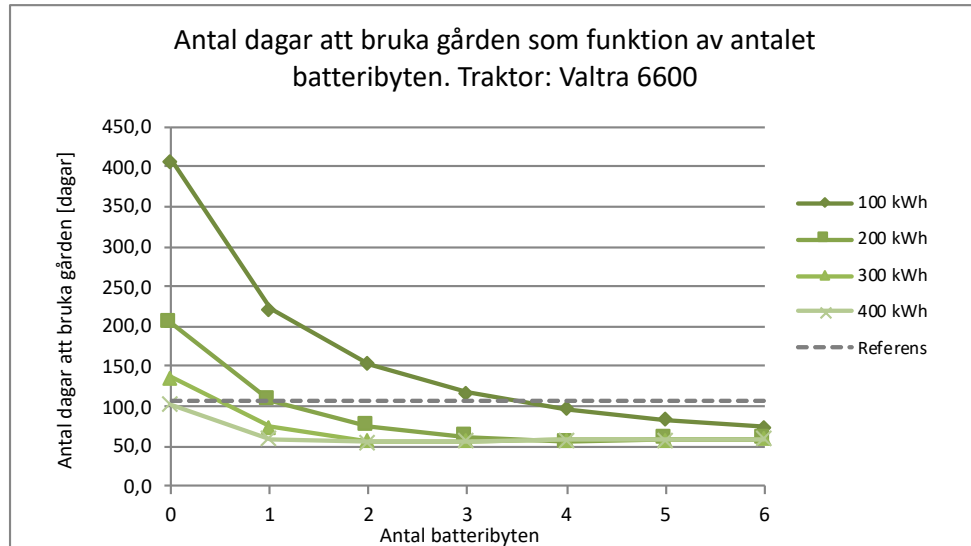


Figur 9 – Grävmaskinens energibehov av el och diesel

4.3.1 Scenario baserat på lantbruksmodellen

För att ta reda på hur stort energiinnehåll som krävs för en eldriven traktor användes lantbruksmodellen. Modellen som baserades på olika arbetsmoment och arbetshastigheter för en traktor på en gård, undersökte hur energiinnehållet i batteriet och antalet batteribyten stod sig jämfört med konventionell körning med diesel. Med ekvationerna (7) – (15) kunde antalet dagar som traktorn krävde för att bruka en 200 hektar gård beräknas. I figur 10 ses hur antalet batteribyten och batterier med olika energiinnehåll påverkar körningstiden.

I figur 10 nedan ses att en traktor med en utbyttbar batterimodul med ett energiinnehåll på 400 kWh och ett upp- och urladdningsintervall på mellan 10-60 %, skulle vara tillräckligt för att bruka gården på 107 dagar som angetts som referens. Referenslinjen representeras av den tidsperiod då alla arbetsmoment på gården måste vara utförda. En batterimodul med ett energiinnehåll på 200 kWh och två batteribyten (tre batterier) skulle också vara tillräckligt för att bruka gården i tid. I figur 10 ses att kurvan jämnas ut efter tre batteribyten med ett batteri på 200 kWh. Det beror på att mängden energi är tillräcklig och fler batteribyten minskar endast arbetstiden per dag, inte arbetstiden per säsong eftersom batteriets totala energi då inte används.

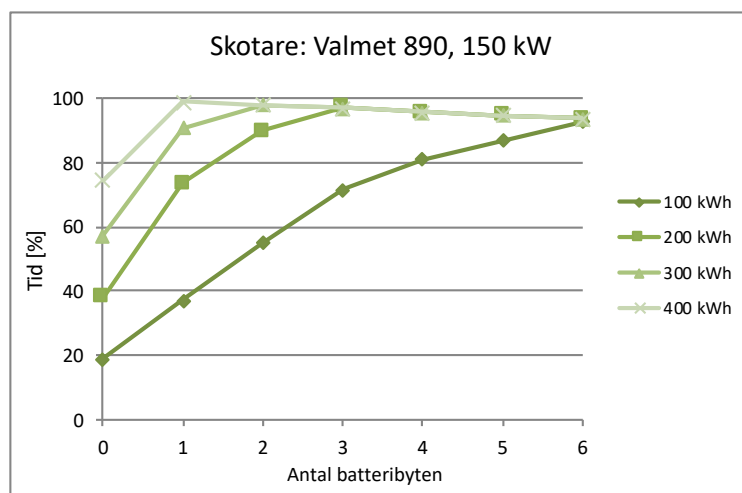


Figur 10 – Antalet dagar som krävs för att bruka en 200 ha stor gård med olika många batteribyten och med batterimoduler med olika stora energiinnehåll.

4.3.2 Scenario baserat på skogs- och entreprenadmodellen

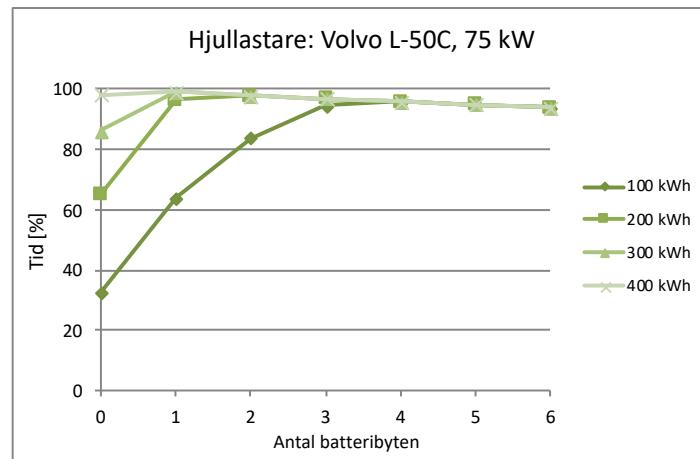
I nedanstående figurer beräknade med ekvationerna (12), (13) samt (16), (17) och (18) ses hur olika batteriers energiinnehåll och antalet batteribyten påverkar körningstiden för olika arbetsmaskiner och arbetsmoment, jämfört med konventionellt arbete med diesel. Ju närmare 100 %-sträcket linjen kommer, desto mer lik är körningstiden med konventionellt arbete. Arbetsmaskiner med diesel behöver också tanka, därför är ett energiinnehåll nära linjen en godkänd utformning.

I figur 11 ses att totalt två batterier med ett energiinnehåll på 400 kWh skulle bidra till samma arbetstid som vid konventionell drift, dvs. 100 %. Det ses också att tre batteribyten (fyra batterier) med ett energiinnehåll på 200 kWh skulle räcka för skotarens energibehov. I figuren ses att körningstiden sjunker med antalet byten. Det beror på att tiden för att byta batteriet också påverkar den möjliga körningstiden.



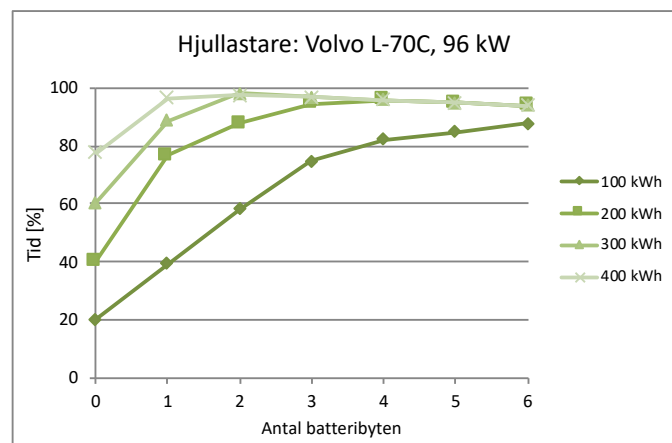
Figur 11 – Skotarens körningstid i procent med avseende på olika batteristorlekar och batteribyten.

I figur 12 ses att ett batteribyte (två batterier) med ett energiinnehåll på vardera 200 kWh, skulle vara tillräckligt för att bidra till samma arbetstid som vid konventionell drift.

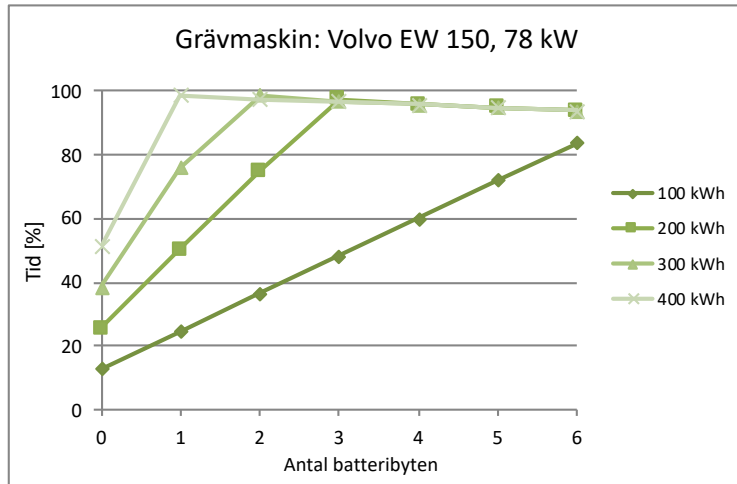


Figur 12 - Hjullastarens körningstid i procent med avseende på olika batteristorlekar och batteribyten.

I figur 13 och 14 krävs ett större energiinnehåll per batteri för att nå upp till arbetstiden för konventionell körning. För hjullastaren L-70C och grävmaskinen EW 150 krävs minst tre batteribyten (fyra batterier) med ett energiinnehåll på 200 kWh eller en batterimodul med ett större energiinnehåll.



Figur 13 - Hjullastarens körningstid i procent med avseende på olika batteristorlekar och batteribyten.



Figur 14 – Grävmaskinens körningstid i procent med avseende på olika batteristorlekar och batteribyten.

4.4 Batterimodulens specifikationer

Från ekvation (19) kunde batteriets spänning beräknas till 601,2 V av de 167 battericeller som seriekopplades. Med ekvation (20) och (21) kunde batterimodulens kapacitet respektive energiinnehåll beräknas genom att variera antalet battericeller med det cylindriska cellformatet: 21700. Detta för att se hur många celler som krävdes för att uppnå ett tillräckligt energiinnehåll till arbetsmaskinerna.

Från resultatet i 4.3 skulle en batterimodul på 200 kWh som cyklas mellan 10–60 % ha ett tillräckligt stort energiinnehåll för att klara av den uppskattade arbetstid som krävdes för att utföra olika arbetsmoment i olika branscher, förutsatt att reservbatterier används vid tyngre arbeten.

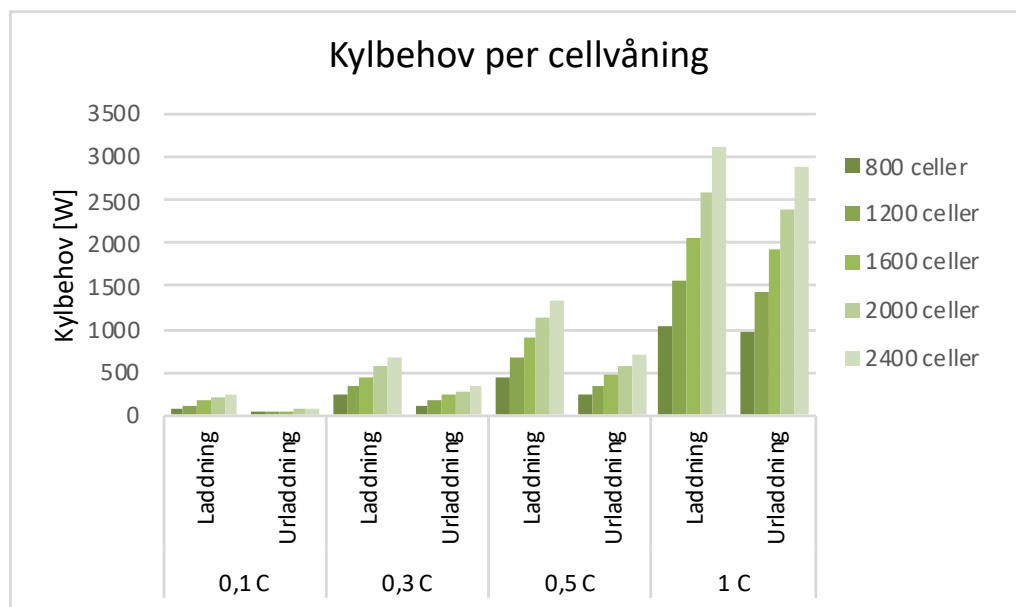
Ekvation (22) och (23) användes för att beräkna batterimodulens bottenarea och längd då bredden bestämts till 0,6 m och energiinnehållet till drygt 200 kWh. Batterimodulens vikt och kostnad baserat på antalet battericeller beräknades med ekvation (24) och (25). Resultatet från beräkningarna visas i tabell 12.

Tabell 12 – Batterimodulens olika utformningar baserat på antalet battericeller.

Celler per våning	800	1 200	1 600	2 000	2 400
Energiinnehåll [kWh]	110,6	165,9	221,2	276,5	331,8
Kapacitet [Ah]	184,0	275,9	367,9	459,9	551,9
Yta [m ²]	0,36	0,54	0,72	0,90	1,09
Längd [m]	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
Vikt [kg]	416	624	832	1 040	1 248
Kostnad [SEK]	280 000	369 000	459 000	549 000	638 000

4.5 Kylbehov

Från ekvation (26) har kylbehovet beräknats per cellvåning i batterimodulen. I figur 15 ses att antalet celler per våning samt att högre laddnings- och urladdningshastighet, C kraftigt ökar kylbehovet. Det är också tydligt att laddning kräver mer kylning än urladdning för battericellerna. Då samma batteri laddas på 1 timme (1 C) krävs 2 048 W i kylbehov, vid 2 timmars laddning krävs 896 W och vid 3 timmars laddning (0,3 C) krävs endast 448 W.



Figur 15 - Kylbehov som funktion av olika laddnings- och urladdningshastigheter, C samt antalet celler per våning.

4.6 Sammanfattat resultat

Den teoretiska batterimodul som utformats i examensarbetet ses i tabell 13 med dess komponenter, materialval, system och specifikationer. Nedan ses ett exempel på hur batterimodulen har utformats.

Tabell 13 – Batterimodulens komponenter, materialval, system och specifikationer.

Studerad komponent	Beskrivning
Cellformat	Cylindrisk cell: 21700
Katodmaterial	Litium-nickel-kobolt-aluminium-oxid (NCA)
Anodmaterial	Grafit (C)
Inkapslingsmaterial	Svart polypropenplast med additiven flamskydd och UV-stabilisering
Rekommenderad arbetstemperatur	15–35 °C
Upp- och urladdningsintervall, SOC	10–60 %
BMS	ELforest: BMS
Antal celler per cellvåning	1600 st
Antal cellvåningar	8 st
Uppskattat energiinnehåll som cyklas mellan (25 – 75 %)	221 kWh
Uppskattad modulkapacitet	368 Ah
Uppskattad modulspänning	601 V
Cellernas hopkoppling (baserat på ca 1600 celler per cellvåning)	167S76P
Modulens vikt (baserat på battericellerna)	832 kg
Modulens kostnad (baserat på battericellerna + BMS)	459 000 SEK
Batterimodulens dimensioner: LxBxH	1,2x0,6x0,9 m ³
Kylbehov per cellvåning vid laddning på drygt 3 h med 0,3 C	448 W

5 Diskussion

Syftet med examensarbetet var att klargöra för hur en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner bör utformas, för att tillgodose behoven från användare tillsammans med nödvändiga komponenter och system. Syftet har också varit att ta reda på vilket energiinnehåll och vilka egenskaper som krävs av en batterimodul i studerade branscher. För att komma fram till resultatet har beräkningsmodeller i Microsoft Excel byggts upp, baserat på flertalet litterära studier. Personliga samtal har också hållits med personer i de olika studerade branscherna genom semistrukturerade intervjuer.

För att uppfylla de efterfrågade behov som de verksamma personerna i de olika branscherna krävde, bör batterimodulen utformas för att använda ett katod- och anodmaterial som tillsammans ger en låg kostnad och har ett högt energiinnehåll, för att maximera den specifika energin på en begränsad yta. Cellformatet bör vara av cylindrisk karaktär för att tillåta att mer aktivt material kan byggas in i cellerna och underlätta för batteriets övervakningssystem, genom att erbjuda färre celler per kWh. Batteriets övervakningssystem bör hålla upp- och urladdningsintervallet mellan 10–60 % SOC och battericellernas arbetstemperatur mellan 15–35 °C, för att vara gynnsam för battericellernas förväntade livslängd. Förutom system som BMS bör batterimodulen ha kyl- och uppvärmningssystem. Kylningssystemet bör vara av aktiv karaktär eftersom battericellerna då har möjlighet att uppnå en mer homogen temperatur per cellvåning. Ett omslutande inkapslingsmaterial behövs för att batterimodulen ska skyddas mot svenska utomhusförhållanden samt klara de säkerhetskrav som gäller vid transport. Utöver detta bör batterimodulen vara uppkopplad till nätet för att öka användarvänligheten och för att se dess position och status på distans.

Fördelarna med ett standardiserat och utbytbart batteri till arbetsmaskiner är att en arbetsmaskin kan köpas in till en lägre kostnad, jämfört med om varje batteri redan var integrerat i fordonet. Fördelarna med detta är också att samma batteri kan användas till olika arbetsmaskiner, vilket ökar utnyttjandet per batteri. Om ett företag skulle ansvara för uthyrningen av batterimoduler till olika branscher skulle antalet krävda batterier per bransch bli färre, då batterierna bland annat kan användas under olika perioder under året, exempelvis till skogsbruket under vintern och till lantbruket under våren, sommaren och hösten. Uthyrningsföretaget skulle ansvara för batterimodulernas reparation, service samt utkörning och upphämtning av batteriet. Den här formen av uthyrning är ett exempel på hur cirkulär ekonomi kan implementeras för att öka användandet per batteri och minska resursslöseriet av naturresurser. Svårigheterna med ett uthyrningssystem är dock att få alla fordonstillverkare att gå ihop under en gemensam standard.

Eftersom snabbbladning med höga effekter har visat sig öka påfrestningen och värmealstringen från battericellerna, är det säkrare att göra ett batteribyte. Med ett batteribyte har battericellerna möjlighet att laddas under optimala förhållanden, det vill säga med en rekommenderad laddningseffekt, om de inte behöver användas direkt.

5.1.1 Antaganden och begränsningar i modellen

Det är viktigt att poängtera att den data som visas i tabell A3 från Lindgren et. al (2002) är medelvärden, där dieselförbrukningen hos den studerade arbetsmaskinen inte alltid varit i arbete. Effektbehovet från dieselmotorn har exempelvis ökat kraftigt vid hårdare arbeten, vilket inte kan urskiljas i de uppmätta värdena. Därför kan effektbehovet per arbetsmoment vara missvisande. Årtalet då studien publicerades kan också diskuteras då tekniken i arbetsmaskinerna troligtvis blivit effektivare. Däremot är dessa data uppskattningar vilket också tas hänsyn till i examensarbetet. För en mer noggrann energiförbrukning av arbetsmaskiner bör nya mätningar göras på modernare maskiner.

I modellen för skogsbruk och entreprenad antogs reservbatterierna stå intill arbetsmaskinen vid arbete. Det antagandet ansågs som rimligt då skotare

återvänder till samma plats för att lasta av timmer hämtat från skogen. Grävmaskiner rör sig heller inte så långa sträckor under arbete. Om arbetsmaskinen däremot skulle behöva köra en viss sträcka för att byta batteri skulle resultatet se annorlunda ut. Speciellt då batteribytena blev fler. Fler batteribyten skulle minska den effektiva körningstiden. Detta innebär att större maskiner som kräver mer energi per arbetsmoment, skulle kräva en större batterimodul med större energiinnehåll för att minska antalet krävda batteribyten per dag.

5.1.2 Energiinnehåll och antalet batteribyten per arbetsdag (8h)

Från resultatet i 4.3.1 ses att en elektrifierad arbetsmaskin förbrukar mindre än hälften av den energi som förbrukas i en dieseldriven arbetsmaskin. Det ses också i 4.3.2 att en arbetsmaskin med ett batteri på 200 kWh är tillräckligt för att kunna användas i en arbetsmaskin under en arbetsdag, förutsatt att batteriet cyklas mellan 10–60 % av batteriets totala kapacitet och byts ut vid behov.

Färre batteribyten resulterar i en högre effektiv körningstid. Hur många batteribyten som är accepterat inom de studerade branscherna är svårt att definiera. Men med tre eller färre byten kan maskinföraren i samband med naturliga pauser i arbetet byta batteri. Fler än tre batteribyten per arbetsdag resulterar högst sannolikt i ineffektivitet, då arbetet behöver avbrytas vid behov av batteribyte. Batteribytena blir därmed inte lika naturliga och skulle kunna resultera i att elektrifierade arbetsmaskiner väljs bort på grund av opålitlig drift.

5.1.3 Storlek vikt och kostnad

I resultatet från intervjuerna beskrevs den största begränsningen i dagens arbetsmaskiner som utrymmet i arbetsmaskinen, framförallt i mindre maskinmodeller. Dimensioneringen av batterimodulen är således baserad på motorhuvdimensionen för traktorer. Med andra begränsningar kan dimensioneringen av batterimodulen bli annorlunda.

För att öka användarmöjligheten och flexibiliteten ännu mer är det fördelaktigt att utforma ett modulsystem, där mindre batterimoduler kan sättas ihop till större moduler med större energiinnehåll. Detta kan utföras genom att parallellkoppla batterimoduler med samma spänning för att öka kapaciteten och

därmed energiinnehållet. På så sätt kan större arbetsmaskiner använda samma typ av batterimodul som de mindre arbetsmaskinerna. Detta ökar flexibiliteten hos batterimodulen och gör den eftertraktad i många olika branscher och till flertalet användningsområden.

Vikten och kostnaden på batterimodulen har endast baserats på antalet battericeller samt batteriets övervakningssystem. Det är därför viktigt att understryka att vikten och kostnaden är minimibelopp och kommer att öka till följd av att fler komponenter tas med i beräkningarna. I verkligheten behöver fler komponenter tas hänsyn till för att ge en bättre vikt- och prisbild på batterimodulen.

5.1.4 Katodmaterial

Det kan kanske anses besynnerligt att katodmaterialet NCA valdes till utformningen trots att ett katodmaterial av LFP kan cyklas fler gånger och är liksom NCA en mogen teknik. Problemet med LFP är dess lägre specifika kapacitet och spänning vilket ger en lägre specifik energi jämfört med NCA. Från resultatet i 4.1.1 sågs att mindre arbetsmaskiner har storleksbegränsningar, exempelvis traktorer. Syftet med den standardiserade batterimodulen är att fungera till många olika arbetsmaskiner och modeller, därför ansågs det viktigt att utforma batterimodulen där mest energimängd fick plats på minst yta.

5.1.5 Säkerhet

Genom att använda ett så pass tåligt inkapslingsmaterial som polypropen och dess additiv kan batterimodulen transporteras utan någon extra förslutning enligt de transportlagar i avsnitt 2.5.2 som gäller för litiumjonbatterier. Med den utformning som presenteras i tabell 13 är batteriet också med i lågspänningsdirektivet vilket är gynnsamt för den personliga säkerheten.

5.1.6 Kylning

Från resultatet i 4.5 ses att värmegenereringen från cylindriska litiumjonceller med cellformatet: 21700 är stort vid höga upp- och urladdningshastigheter, C. Eftersom batteriet ska kunna bytas ut krävs ett system där kylningskomponenter så som värmeväxlare och pump är insatta i batterimodulen. För den här utformningen är så inte fallet, detta utgör ett problem. I elektriska

bilar där batteriet inte byts ut, kan slangar kopplas ihop med ett kylsystem som finns utanför batteriet exempelvis i bilens motorhuv. Detta betyder att batteripaketet i elektriska bilar kan göras mindre.

Från resultatet sågs att laddningen av ett batteri kräver ett högre kylningsbehov jämfört med urladdning. Därför skulle olika stora kylsystem kunna användas. Mindre kylningskomponenter kan kopplas ihop med batterimodulen i arbetsmaskinen då batteriet urladdas. Samma sak gäller då batterimodulen används som extern energilagringssenheter. Då kan ett mindre kylningssystem kopplas till batterimodulen som en fristående modul under urladdning. På så sätt kan batterimodulen fortfarande behålla sin mindre storlek i samband med urladdning, trots att större kylningskomponenter senare behöver anslutas då batterimodulen ska laddas upp.

5.2 Framtida studier

Det vore intressant att ta reda på mer om kylsystemet till batterimodulen. Kylsystemet är en viktig komponent för att batteriet ska fungera optimalt och krävs för att batterimodulen ska kunna användas i praktiken. Det skulle därför vara intressant att veta vilka komponenter som bör användas och hur stort utrymme dessa tar i arbetsmaskinen baserat på det kylbehov som beräknats i detta examensarbete.

6 Slutsats

Syftet med examensarbetet var att klargöra för hur en standardiserad och utbytbar batterimodul till arbetsmaskiner bör utformas, för att tillgodose behoven från användare tillsammans med nödvändiga komponenter och system. Syftet har också varit att ta reda på vilket energiinnehåll och vilka egenskaper som krävs av en batterimodul i studerade branscher.

Resultatet från examensarbetet visar att de främsta begränsningarna inom de studerade branscherna var utrymmet i den minsta arbetsmaskinen som studerades. De egenskaper som efterfrågades av batterimodulen är ett skyddande inkapslingsmaterial som inte reagerar med batterikemin och står emot yttre påverkan så som smuts, vatten, varierande temperatur och UV-ljus. Batterimodulen måste också kunna skyddas mot brand, explosion, vibrationer, kollision och penetration samt stöld. Användarna efterfrågar också användarvänlighet, pålitlighet, säkerhet och lång livslängd från batteriet.

De slutsatser som kan dras från examensarbetet är att en standardiserad och utbytbar batterimodul med ett energiinnehåll på 200 kWh och som cyklas mellan 10–60 % av dess totala kapacitet, är tillräckligt högt för att utföra olika arbetsmoment i olika branscher, utan att kräva för många batteribyten per dag. Maximalt tre batteribyten skulle krävas för de studerade arbetsmaskinerna, vilket anses okej eftersom bytena då kan ske under naturliga pauser under arbetsdagen.

Den batterimodul som teoretiskt utformades i examensarbetet hade ett energiinnehåll på 221 kWh och en fysisk storlek på 1,2x0,6x0,9 m³ utan kylsystem. Med det energiinnehållet innehöll batterimodulen ca 1 600 battericeller per cellvåning med det cylindriska cellformatet 21700. Battericellerna

innehöll katodmaterialet NCA och anodmaterial grafit. Batterimodulen innehöll totalt åtta cellvåningar och kopplades enligt 167S76P, vilket gav en modulspänning på 601 V och en modulkapacitet på 368 Ah.

Kylningsbehovet för att hålla temperaturen mellan 15–35°C vid upp- och urladdning mellan 10–60 % SOC i batterimodulen uppskattades till 448 W per cellvåning, om batteriet laddades upp på ca tre timmar. Priset som baserades på priset per energiinnehåll och BMS uppskattades till 469 000 SEK och vikten som endast baserades på antalet battericeller uppskattades till 832 kg.

Referenslista

Publicerat material

de Afonseca. A. 2018. *Simulering av system för laddning av eldrivna autonoma jordbruksfordon*. Uppsala. Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbete.

Bergman. E. 2018. *Designing Thermal Management Systems For Lithium-Ion Battery Modules Using COMSOL*. Examensarbete.

Cengel. Y och Boles. M. 2011. *Thermodynamics An Engineering Approach*. New York. 7:e upplagan

Chen. D, Jiang. J, Kim. G, Yang. C, Pesaran. A. 2015. *Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells*. Applied Thermal Engineering. 94. Sid. 846-854

Elsäkerhetsverket. 2016. *Informationsbehov och elsäkerhetskrav rörande små- och storskalig energilagring av el*. Kristinehamn. Dnr :16EV600

Engström. J & Lagnelöv. O. 2017. *Batteridrivna autonoma jordbruksmaskin – Simulering av maskinaktiviteter på en svensk gård*. Uppsala. (Rapport 2017:27. Version: 2017-10-23)

FN. 2015. *Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria*” 6. Uppl. Del III, Delavsnitt 38.3. Sid. 424-436. New York, Geneve.
http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/ST_SG_AC.10_11_Rev6_E_WEB_With_corrections_from_Corr.1.pdf

Graf. C. 2013. *Cathode materials for lithium-ion batteries*.
Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.

Ionascu. I & Ionascu. M. 2018. *Business models for circular economy and sustainable development: The case of lease transactions*. Amfiteatru Economic

- IRENA, International Renewable Energy Agency. 2017. *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. Abu Dhabi
ISBN 978-92-9260-038-9
- Ji. Y & Wang. C. Y. 2013. *Heating Strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures*. *Electrochimica Acta*. sid. 664-674.
- Kagoshima. M, Komiyama. M, Nanjo. T och Tsutsui. A. 2007. *Development of New Hybrid Excavator*. *Kobelco technology Review*. No. 27/11
- Kim. G & Pesaran. A. 2007. *Battery Thermal Management Design Modeling*
- Kim. J, Song. I & Choi. W. 2015. *An electric buss with a battery exchange system*. *energies* 2015, 8. ISSN 1976-1073
- Kilic. A, Koroglu. S, Demircali. A, Kesler. S, Oner. Y, Karakas. E och Sergeant. P. 2017. *Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles*.
- Koehler. U. 2013. *Lithium-ion battery system design*.
Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.
- Kritzer. P, Nahrwold. O. 2013. *Sealing and elastomer components for lithium battery systems*.
Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.
- Leuthner. S. 2013. *Lithium Ion Overview*.
Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.
- Linden. D, Reddy. T. 2011. *Handbook of Batteries*.
3. uppl. ISBN 0-07-135978-8
- Lindgren. M, Pettersson. O, Hansson. P-A. och Norén. O. 2002. *Jordbruks- och anläggningsmaskinernas motorbelastning och avgasemissioner – samt metoder att minska bränsleförbrukning och avgasemissioner*. Uppsala. JTI Institutet för jordbruks- och miljöteknik. JTI Rapport 308
- Liu. K, Yang. Z, Li. K och Zhang. C. 2017. *An advanced lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric model*. *Electrochimica Acta*. 225. pp. 330-344. ISSN 0013-4686
- Lyu. Y. C, Huang. J och Li. H. 2015. *Layered and Spinel Structural Cathodes*
Del av den elektroniska boken: Z. Zhang & S. Zhang. 2015. *Rechargeable Batteries – Materials, Technologies and New Trends*. Schweiz. Green Energy and Technology. Sid 67-88

Löfgren. B & Brunberg. T.1997. *Åtgärder för att minska bränsleförbrukningen vid kranarbete*. Skogforsk, Nr 381

Mohammadzadeh. K, Shirani. E, Kolahdouz. E och Behshad Shafii. M. 2013. *Numerical study on the performance of Tesla type in microvalve in valveless micropump in the range of low frequencies*. Journal of Micro-Bio Robotics. Vol 8.

Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB. 2019b. *Utdrag ur ADR: 2.2.9.1.7 (a) och (e) samt 4.1.1.1, 4.1.1.2 och 4.1.1.5*
https://www.msb.se/Upload/Forebyggande/farligt_gods/Utdrag-ADR-2.2.9.1.7%20_4.1.pdf (Hämtad 2019-03-25)

Naturvårdsverket. 2018. *Arbetsmaskiners klimat- och luftutsläpp*. Stockholm. Rapport: 6826.

Pettersson. O, Malmsten. J, Welinder. J, Lagnelöv. O, Jobacker. U, Wennerberg-Fåhraeus. M och Kauhanen. H. 2016. *Demonstration av fälttest av batteridrivna kompaklastare avsedda för inomgårdsarbeten på jordbruk*. Uppsala. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.

Quinn. J, Waldmann. T, Richter. K, Kasper. M och Wohlfahrt-Mehrens. M. 2018. *Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells*

Rodrigues. M, Kalaga. K, Trask. S, Shkrob. I och Abraham. D. 2018. *Anode-Dependent Impedance Rise in Layered-Oxide Cathodes of Lithium-Ion Cells*

Salehi. K. 2014. *Improving Low Temperature Performance of Lithium ion Batteries Through Mutual Pulse Heating*.
https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/10405

Schönemann. M.2017. *Multiscale Simulation Approach for Battery Production Systems*. Institute of Machine Tools and Production. Braunschweig. Tyskland

Sims. B & Crase. S. 2017. *Review of Battery technologies for Military Land Vehicle*. Scotland, Edinburg. Defense Science and Technology Group. AR-016-790.

de Toro, A. (2004). *Assessment of Field Machinery Performance in Variable Weather Conditions Using Discrete Event Simulation*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet.

Wang. Z, Fan. W, Liu. P. 2017. *Simulation of Temperature Field of Lithium Battery pack based on computational fluid dynamics*.

Wiebelt. A och Guenther-Zeyen. M. 2013. *Battery thermal management*
Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018

Wikner, E, Thiringer, T. 2018. *Extending battery lifetime by avoiding high SOC*

Wurm, C, Oettinger, O, Wittkaemper, S, Zauter, R och Vuorilehto, K. 2013. *Anode materials for lithium-ion batteries*

Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.

Wen, J, Yu, Y & Chen, C. 2012. A Review on Lithium-Ion Batteries Safety Issues: Existing Problems and Possible Solutions

Xia, G, Cao, L & Bi, G. 2017. *A review on battery thermal management in electric vehicle application*. Journal of Power sources.

Xu, B, Oudalov, A, Ulbig, A & Andersson, G. 2016. *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*.

Zubi, G, Dufo-López, R, Carvalho, M och Pasaoglu, G. 2018. *The lithium-ion battery: State of the art an future perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 89. 292-308

Bildförteckning

Meesala, Y, Jena, A, Chang, H & Liu, R. 2017. *Recent Advancements in Li-Ion Conductors for All-Solid-State Li-Ion Batteries*. ACS Energy Letters. 2.

Sid. 2734-2751

Leuthner, S. 2013. *Lithium Ion Overview*.

Del av boken; R. Kortauer. 2013. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin. Springer. Översättning M. Wuerst. 2018.

Icke publicerat material

Här presenteras de källor som inte har publicerats.

ABB. 2017. *ABB motor sets world record in energy efficiency – saves half a million dollars.* <https://new.abb.com/news/detail/1789/ABB-motor-sets-world-record-in-energy-efficiency-saves-half-a-million-dollars>. (Hämtad: 2019-03-01)

Dnkpowers

<https://www.dnkpowers.com/teslas-mass-production-21700-battery/>
(Hämtad 2019-06-17)

Expowers. *Europapall.*

<https://www.expowers.se/att-kunna/europapall>
(Hämtad 2019-06-10)

Fendt. 2017. *Fendt e100 Vario: The battery-powered compact tractor* <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario.html>. (Hämtad 2019-03-15)

Hedin. A. 1996. *En liten lathund om kvalitativ metod med tonvikt på intervju.*

Kristensson. J. 2018. *Fem utmanare i dieseltung bransch.*

Ny Teknik. <https://www.nyteknik.se/fordon/fem-utmanare-i-dieseltung-bransch-6901386>
(Hämtad 2019-09-12)

Kurz Industrial Solutions. 2018. *Low or high voltage? Breaking down the basics of electrical motors.* <https://kurz.com/electrical-motor-basics/>
(Hämtad 2019-06-07)

Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB. 2019a. *Lagstiftning av litiumjonbatterier.*

<https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/farligt-gods/litiumbatterier/lagstiftning-av-litiumbatterier/>
(Hämtad 2019-02-20)

Rickard. J. 2018. *Battery Expert: Tesla Model3 has most advanced large scale lithium battery ever produced.* Evannex

<https://evannex.com/blogs/news/tesla-s-battery-pack-is-both-mysterious-and-alluring-work-in-progress> (Hämtad 2019-06-07)

SMHI. 2019. *Svenska Temperaturrekord.*

<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/svenska-temperaturrekord-1.5792>.
(Hämtad 2019-04-10)

Sweaenergi. *Produktdata för diesel.*

<http://www.sweaenergi.se/wp-content/uploads/2016/09/Product-data-sheet-Diesel-B30.pdf>
(Hämtad 2019-02-25)

Trafikverket. 2012. *Energiinnehållet i diesel*.
https://www.trafikverket.se/contentassets/313891e85fa0488ca3f9e136e0fe5a6f/9-12/12_branslen_for_tunga_fordon.pdf (Hämtad 2019-02-25)

Valutaomvandlare
<http://www.valutaomvandlare.com> (Hämtad 2019-05-30)

Muntliga källor: Intervjuade personer

Banke, Karl. Polykemi, epost, april 2019
Bertilsson, Wilhelm. Västmanländsk lantbrukare med erfarenhet inom spannmål- och köttproduktion, 2019
Engström, Jonas. RISE, personlig intervju, maj 2019
Gadolin, Jonas. AB Kranlyft, MaskinExpo, maj 2019
Gelin, Olle. SkogForsk, telefon, maj 2019
Karlsson, Christer. RISE divisionen för säkerhet och transport av elektronik, epost, april 2019
Köljalg, Kristjan. Humus, MaskinExpo, maj 2019
Lorenc, Fredrik. El-Forest Technologies AB, epost, maj 2019
Petersson, Erik. Traktor Nord AB, MaskinExpo, maj 2019
Storm, Emelie. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, feb 2019
Sundström, Jan. FMV, telefon, maj 2019
Wirhester, Erik. Strengbohm eneby AB, MaskinExpo, maj 2019
Ångered, Rickard. Strengbohm eneby AB, MaskinExpo, maj 2019

Bilaga A

Tabell A1 – Konstanter till beräkningarna för arbetsmaskinernas energiförbrukning.

Konstanter	
Energiinnehåll diesel, E_{diesel}	9,96 kWh/liter
Densitet diesel, ρ	0,83 kg/dm ³
Verkningsgrad dieselmotor, η_{diesel}	40 %
Verkningsgrad elmotor och växelriktare, η_{el}	90 %

Tabell A2 – Uppmätta dimensioner av motorhuvar på några utvalda traktormodeller, en skördare till skogsbruk samt en grävmaskin.

Traktorer	Bredd [m]	Längd [m]	Höjd [m]
John Deere 6630	0,65	1,8	1,1
John Deere 7280R	0,6	2,4	1,4
Valtra 6650	0,4	1,5	0,8
Skördare	Bredd [m]	Längd [m]	Höjd [m]
Komatsu 901 TX1	0,9	2,8	0,9
Grävmaskin			
Volvo EC 210	2,8	2,0	0,9

Tabell A3 – Arbetsmaskinernas bränsleförbrukning och medeleffektbehov för respektive arbetsmoment, bränsleförbrukning och arbetstid för traktor, hjullastare och grävmaskin tagna från (Lindgren et. al 2002), bränsleförbrukning för skotare tagna från (Löfgren och Brunberg, 1997).

	Arbetsmoment	Dieselförbrukning [l/h]	Effektbehov [kW]	Arbets hastighet [ha/h]
Traktor Valtra 6600	Harvning vårbruk (70 pinnar)	14	57	4,3
	Sådd	11	45	2,3
	Vältning	5	21	3,7
	Konstgödselspridning	4,4	21	11
	Plöjning 4 skär växel	15	58	1,4
	Transport	8	30	
Skotare Valmet 890	Tomkörning	11,2	44	
	Lastning	5,8	23	
	Körning under lastning	7,8	31	
	Lastkörning	11,6	45	
	Lossning	6,5	25	
	Avläggskörning	11,4	45	
Hjullastare Volvo L-50C	Snölastning	5,4	21	
	Sandlastning	7,2	28	
	Kantklippning	6,3	25	
	Terminalarbete	4,3	17	
	Stödkantutläggning	3,3	13	
Hjullastare Volvo L-70C	Kantklippning	13,7	54	
	Gruslastning	7,3	29	
	Materialsortering	5,9	23	
Grävmaskin Volvo EW150	Grävning	12,4	49	

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energioghteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000