

Jämförelse av befintliga återvinningsprocesser för kompositmaterial – en förstudie gällande mikrovågspyrolys

Carina Pettersson

Sune Andreasson

Mikael Skrifvars

Dan Åkesson

**Jämförelse av befintliga återvinningsprocesser för
kompositmaterial – en förstudie gällande
mikrovågspyrolys**

**Comparison between existing recycle processes for
composite materials – a study regarding
microwave pyrolysis**

Carina Pettersson, Sune Andreasson
Stena Metall AB
Mikael Skrifvars, Dan Åkesson
Högskolan i Borås

Projektnummer WR-22
År: 2009

WASTE REFINERY
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
www.wasterefinery.se
wasterefinery@sp.se
ISSN 1654-4706

Sammanfattning

Målsättningen med detta projekt har varit att undersöka möjligheterna att använda återvunnen komposit för energiåtervinning genom mikrovågspyrolys, samt att utvärdera mikrovågspyrolysens potential för återvinning av sammansatta material, däribland komposit.

Komposit kan materialåtervinnas genom mekanisk sönderdelning till ett material som kan användas som fyllmedel i jungfruliga kompositprodukter. Flera tidigare studier har dock visat att detta ger kvalitetsmässigt sämre egenskaper, och en ekonomiskt lönsam avsättning av det återvunna materialet finns inte idag. Komposit kan förbrännas tillsammans med annat avfall men den höga halten av oorganiskt material medför att energiinnehållet är lågt. Komposit innehåller typiskt 40 – 50 vikt-% glasfiber, och i vissa produkter kan innehållet vara så högt som 60 – 75 vikt-%. Därför deponeras uttjänta produkter i stor utsträckning och processer för att återvinna komposit saknas. Det tillverkas stora mängder komposit i Europa och dessa produkter kommer till stor del att deponeras då återvinning saknas. Dessa komposit representerar en stor mängd energi som i dagsläget inte utnyttjas. Processer och material för att tillverka komposit utvecklas hela tiden. Detta i kombination med flygplans-, vindkrafts- och fordonsindustrins behov av lätta material gör att användning av komposit väntas öka i framtiden. Att utveckla processer för att återvinna komposit är därför av stor vikt.

I detta projekt har användandet av mikrovågspyrolys studerats för att återvinna komposit. Mikrovågspyrolys är en process där materialet värms upp med mikrovågor i en inert miljö. Projektet har fokuserat på att återvinna glasfiberarmerad plast då detta utgör den stora volymen av komposit. Efter pyrolys av glasfiberarmerad plast uppstår två fraktioner – en oljefraktion och en oorganisk fraktion. Oljefraktionen analyserades med kalorimetri och GC-MS. Oljan består huvudsakligen av olika aromatiska föreningar, såsom styren och toluen. Energiinnehållet i oljan är relativt högt och är ungefär jämförbart med petroleumbaserade oljor. Oljan kan användas för att generera energi eller som ett startämne för att generera syntesgas (syngas) vilket utgör ett nytt alternativ och/eller komplement till att använda oljan för raffinering och nyttjande i små oljeraffinaderier. Efter pyrolysen uppstår också en oorganisk fraktion bestående av återvunna glasfibrer. En möjlig avsättning för fibrerna är att använda dessa för att tillverka nya komposit, vilket har undersökts i detta projekt. Komposit tillverkades och utvärderades termomekaniskt. De mekaniska egenskaperna av dessa komposit är relativt låga. Detta beror troligtvis på avsaknaden av adhesion mellan fiber och matris. Fibrernas ytegenskaper studerades därför med termogravimetrisk analys (TGA) och svepelektronmikroskop. Fibrerna har en beläggning av partiklar som inte är pyrolyserade. Detta är troligtvis rester av fibrernas sizing, dvs. fibrernas ytbehandling, som brutits ned efter pyrolysen.

Nyckelord: återvinning, komposit, mikrovågspyrolys, glasfiber

Summary

The purpose of this project has been to investigate the possibilities to use recycled composites as energy recycling based on microwave pyrolysis and also to evaluate the microwave pyrolysis technique for the recycling of combined materials, such as composites.

Composites can be recycled by mechanically grinding into a material which can be used as a filler in virgin composites. However, several earlier studies have showed that this will give a material with inferior quality, and there is presently no economical viable use of the recycled material. Composites can be incinerated together with other waste materials but the high content of inorganic material results in a material with low energy content. Composites typically contain 40-50 weight-% glass fibres, and in some cases be as high as 60-75 weight-%. Consequently, composites often end up at landfill sites and processes to recycle composites do not exist. Large volumes of composites are produced in Europe and these products will largely end up on landfill site after end-of-life as systems to recycle these products do not exist. These composites represent a large amount of energy which presently is not utilized. Processes and materials to produce composites are being developed continuously. This in addition to the need for light weight materials in the aerospace, windmills and automotive industry spurs the use of composites. It is therefore of outmost importance to develop processes to recycle of composites.

Recycling of composites by the use of microwave pyrolysis has been studied in this project. Microwave pyrolysis is a process where the material is heated by microwave in an inert environment. The project has been focusing on the recycling of glass fibre reinforced composites as this type of composite makes the large volume of composites. Pyrolysis of glass fibre reinforced composites will result in two fractions – one oil fraction and one inorganic fraction. The oil fraction was analyzed with calorimetry and by GC-MS. The oil largely consists of aromatic compounds, such as styrene and toluene. The energy content of the oil is relatively high and is comparable to petroleum based oils. The oil can be used to generate energy or as a starting material to produce synthesis gas. This will imply a new alternative and/or complement in order to use the oil in small refineries. After the pyrolysis, an inorganic fraction will also be formed, consisting of recycled glass fibres. A possible use of these fibres is to use them to produce new composites. Composites were produced by and evaluated thermomechanically. The mechanical properties of these composites were relatively low. The low mechanical properties are probably caused by a low adhesion between the fibres and the matrix. The surface properties were therefore studied by TGA and scanning electron microscopy. The fibres were coated with particles which were not pyrolysed. This is probably the fibre sizing which was partly degraded after the pyrolysis.

Key words: recycling, composites, microwave pyrolysis, glass fibre

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	PROBLEMDISKUSSION	1
1.2	PROBLEMFÖRMULERING OCH MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR	1
2	BAKGRUND	2
3	MATERIAL OCH METODER	3
3.1	MATERIAL	3
3.2	FRAGMENTERING OCH PYROLYS	3
3.3	TILLVERKNING AV GLASFIBERMATTOR	3
3.4	TILLVERKNING AV KOMPOSITER	4
3.5	KARAKTÄRISERING	4
4	RESULTATREDOVISNING	5
4.1	ANALYS AV AVFALLSKEDJAN	5
4.2	EXPERIMENTELLA RESULTAT	7
5	RESULTATANALYS	14
6	SLUTSATSER	16
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	18
8	LITTERATURREFERENSER	19

1 Inledning

1.1 Problemdiskussion

Kompositer är sammansatta material bestående av en armerande komponent (armeringen) och en sammanbindande komponent (matrisen). Återvinning av kompositer kan göras genom materialåtervinning, varvid materialet används på nytt utan separation av matris och armering. En annan möjlighet är att förbränna kompositerna. Hårdplastkompositer är dock ofta förstärkta med glasfibrer och på grund av den höga halten av oorganiskt material är energiinnehållet lågt i dessa kompositer. Återvinning av kompositer försvåras också av att det finns en rad olika sorters kompositer - allt från sportartiklar, militära applikationer till vindkraftvingar. Olika sorters armering används i olika sorters kompositer. På grund av kompositernas komplexa sammansättning är återvinning av dessa problematisk både ur teknisk såväl som ekonomisk synvinkel. Samtidigt som användningen av komposit i samhället ökar, ställer EU:s deponeringsdirektiv ökade krav på att återvinna kompositer. Detta medför att det finns ett behov av nya metoder för återvinning av komposit, vilket har studerats i detta projekt.

1.2 Problemformulering och mål

Syftet med denna förstudie har varit att göra en helhetsbedömning av möjligheterna att använda återvunnen komposit för energiåtervinning genom mikrovågspyrolysning samt att identifiera tekniska och ekonomiska möjligheter för avsättning av de återvunna materialen. Avfallskedjan har analyserats med avseende på typ av avfall och volymer. En teknisk analys av de återvunna materialen har gjorts och en bedömning av hur de kan användas. Ett möjligt avsättningsområde för de fibrer som återfås efter mikrovågspyrolysen är att använda dessa för att tillverka nya kompositer. Tester har därför gjorts med att tillverka nya kompositer från de återvunna fibrerna. Dessa inledande försök har gjort för att kunna göra en preliminär bedömning av möjligheterna att använda de återvunna fibrerna i nya kompositer.

1.3 Avgränsningar

I denna studie har återvinning glasfiberarmerad hårdplast studerats. Glasfiberarmerad hårdplast är en vanligt förekommande typ av komposit som används inom till exempel båt-, fordons- och vindkraftindustri. Denna typ av komposit bedöms utgöra en stor andel av det totala kompositavfallet.

2 Bakgrund

Trots relativt omfattande ansträngningar saknas det idag möjligheter att på ett ekonomiskt lönsamt sätt återvinna komposit. Bidragande orsaker är kompositernas komplexa uppbyggnad och svårigheter att hitta avsättning för det återvunna materialet. Möjligheterna att mala komposit för att använda dessa som fyllmedel eller armering har tidigare utvärderats. Det finns dock både tekniska och ekonomiska hinder [1]. Till exempel har man funnit att det återvunna materialet kan vara dyrare än traditionella fyllmedel såsom kalciumkarbonat [2]. Vid malningen sker en sönderdelning av fibrerna i komposit, varvid den armerande effekten blir låg. Problem gällande adhesion mellan det malda materialet och matrisen i den nya kompositen kan uppkomma. Vid malningen måste det återvunna materialet fraktioneras enligt storlek, därtill måste det uppfylla krav på kvalitet och mekaniska egenskaper. Ekonomin påverkas stort av de små volymer återvinningsbar komposit som uppfyller kvalitetskraven.

Att återvinna matrisen genom pyrolys har utvärderats i flera studier. Pyrolys är en process där ett material hettas upp i en syrefri miljö varvid ett sönderfall sker till flyktiga komponenter som sedan kan kondenseras. Pyrolys används kommersiellt vid framställning av träkol [3]. Pyrolys har utvärderats för att återvinna gummi [4-6], plast [7-9] och komposit [10-12]. Mikrovågsteknik används för en rad tekniska applikationer, till exempel radar och telekommunikation. Mikrovågor kan penetrera material och avge energi. Därmed kan värme genereras tvärs igenom materialet. För polymerer och keramer, som är material med låg termisk konduktivitet, har mikrovågor fördelen att ge korta processtider då uppvärmningen inte behöver ske genom ledning [13]. Mikrovågsteknik har tidigare utvärderats för att tillverka komposit [14, 15].

Mikrovågspyrolys är en form av pyrolys där materialet exponeras för mikrovågor i en inert miljö. Mikrovågspyrolys har flera fördelar gentemot traditionella pyrolysprocesser. Då upphettning av materialet inte sker genom värmeledning fördelar sig värmeenergin jämnare över materialet och det är möjligt att använda väldigt moderata temperaturer vid pyrolysen. Den låga temperaturen är skonsammare mot glasfibrerna. Om fibrerna utsätts för höga temperaturer då kompositen återvinns kan glasfibers dragstyrka kraftigt reduceras [16] varvid dess tekniska användbarhet minskar. Mikrovågspyrolys är en relativt ny teknik med få forskningsstudier genomförda. Tekniken har utvärderats för att återvinna plastavfall av polyeten (PE) samt aluminium/PE förpackningar [17]. Resultaten visar att mikrovågspyrolys kan användas för att ta hand om ett blandat avfall.

För kompositmaterial är mikrovågspyrolys en process som i stort sett inte är studerad. Den enda hittills genomförda studien undersökte möjligheterna att återvinna kolfiberkomposit med hjälp av mikrovågspyrolys [18]. Man fann i denna studie att fibern separerades från matrisen och att fiberns yta var relativt ren men en viss förändring i ytans topologi noterades. Fiberns dragstyrka påverkades relativt lite av mikrovågspyrolysen. Denna initiala studie indikerar mikrovågspyrolysens potential.

Mikrovågspyrolysens största fördel gällande behandling av kompositavfall borde vara den att ett blandat avfall kan behandlas. Kontaminering med annat organiskmaterial bör ej påverka processen. Plaster, kontaminerade med till exempel pappers- och träavfall bör kunna pyrolyseras.

3 Material och metoder

3.1 Material

En vindkraftsvinge (LM Glasfiber, Danmark) användes som forskningsobjekt för studie av mikrovågspyrolys. En omättad polyester (ortoftalsyra-polyester, Reichhold, Norge) användes för tillverkningen av kompositprover. Ett emulsions-adhesiv (Mowilith TS, Celanese Emulsions, Sverige) användes vid tillverkningen av glasfiber mattor. Peroxid, metyletylketon levererades av Norac Andonox i Sverige.

3.2 Fragmentering och pyrolys

Inför pyrolyseringen sönderdelades glasfiber materialet till lämplig storlek. Pyrolysförsöken gjordes i liten testanläggningen av labbskala. Komposit från vindkraftvingar sågades till provstavar i storlek 1x1x10cm. Proverna var av storleksordningen 0,5 kg. Pyrolysen gjordes i batcher om ca 5 prover ståendes i en degel av glimmer.

Pyrolyseringen skedde genom att mikrovågor applicerades på proverna. En magnetroneffekt på 1 kW applicerades på provet. Styrningen av megatronens uteffekt styrdes av en PID-regulator. Uteffekten av magnetronen var dock 100 % under försöken. Temperaturen ökade gradvis från rumstemperatur upp till cirka 500°C. Därefter sjönk temperaturen och försöket avbröts. Det tog cirka 60 minuter att nå sluttemperaturen, och pyrolysen fick därefter fortgå 60 minuter vid denna temperatur. Efter pyrolysen kontrollerades att kompositproven var synbarligen helt pyrolyserade; dvs. alla kolväten hade depolymeriserats till mindre kolväten (gas/olja) eller elementärt kol. Vätskefasen som bildade efter pyrolysen samlades upp för vidare analyser.

3.3 Tillverkning av glasfibernmattor

Två olika metoder användes, airlaid och wetlaid. För airlaid metoden maldes glasfibrerna med en laboratorie-mixer (Ika, A11 basic). Efter detta steg hade fibrerna fiberlängder från ett par mm upp till cirka 5 cm. Glasfibrerna blandades med 15 vikts-% av en termoplastisk bikomponentfiber. Fibernmattor tillverkades sedan i en apparatur för air-laid tillverkning. Vakuüm sattes till en cylinder med ett filter i botten. Fibrerna matades från toppen av cylindern som sedan dalade ned mot filtret där de bildade en non-woven matta med slumpvis fiberorientering. Mattan överfördes till en hydraulisk formpress (10 cm x 10 cm, Rondol Technology, England) där mattorna pressades under 3 minuter vid 170°C. Därvid smälts bikomponentfibrern som därmed binder samman glasfibrerna.

För wetlaid-teknik mixades den malda fibern i vatten med hjälp av en hushållsmixer. Blandningen sugfiltrerades och ett emulsions-adhesiv (Mowilith TS) tillsattes. Fibernmattan torkades under ett par timmar i ugn (50°C) varvid emulsions-adhesivet binder samman glasfibrerna till en hanterbar matta.

3.4 Tillverkning av kompositer

En omättad polyester blandades med 1 vikt-% peroxid (metyletylketonperoxid). Hartset applicerades på ytan av glasfibermattan och fick sedan härda vid 25°C, 4 MPa under 1 timma i en formpress (Rondol Technology, England). Kompositerna efterhärdades vid 170°C i 5 minuter.

3.5 Karaktärisering

De pyrolyserade fibrerna analyserades med TGA (Q500, TA Instruments) i en atmosfär av syrgas. Proverna, cirka 20 mg, hettades upp med en hastighet av 10°C/minut. Oljefraktionen analyserades i en atmosfär av syrgas. Proverna hettades upp med en hastighet av 5°C/minuter.

Den organiska halten på glasfibers yta bestämdes också genom att förbränna den organiska delen i en högtemperatur ugn. Proverna torkades först i en ugn vid 110°C under 1 timma. Proverna fick svalna i en excikator och vägdes därefter. Proverna placerades i en högtemperatur ugn vid 550°C i en timma. Proverna fick svalna i en excikator och vägdes därefter på nytt.

Kompositernas termomekaniska egenskaper analyserades med hjälp av en dynamisk-mekanisk termisk analysator (DMTA) (DMA 800, TA Instruments). Proverna, cirka 1x10x50 mm, testades i dual cantilever mode och hettades upp från 30°C till 150°C med 3°C / minut vid 1 Hz.

Oljefraktionen analyserades med hjälp GC-MS. Kalorimetriskt värmevärde av oljefraktionen utfördes enligt ASTM D4809. Dessa tester utfördes av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Svepelektronmikroskopi av de pyrolyserade glasfibrerna utfördes av Poznan University i Polen.

3.6 Massflödesbalansberäkning

En massflödesbalansberäkning gjordes utgående från kända indata. Beräkningen gjordes med ett Exceldokument var indata kan varieras.

4 Resultatredovisning

4.1 Analys av avfallskedjan

4.1.1 Material

Den klart största andelen av fiberarmerad komposit utgörs av glasfiberarmerad plast. Glasfiber är ett material som ger en god kompromiss mellan egenskaper och pris. Glasfiber används därför till standardapplikationer där inte extrema mekaniska egenskaper behövs. Glasfibrer används inom till exempel båt- och fordonsindustri. Merparten av genererat kompositavfall utgörs därför av glasfiberinnehållande komposit. Glasfibrerna binds typiskt samman med en härdplast. I kompositerna används främst omättad polyester, vinyl ester och epoxi. Dessa plaster är tvärbundna och kan därför inte återvinnas genom att smälta polymeren. För kompositerna med krav på högre mekanisk prestanda används kolfibrer. Exempel på applikationer är flygplan och sportdetaljer. Kolfibrer är i dagsläget betydligt dyrare än glasfibrer vilket begränsar användningen. Kolfibrens högre prisläge samt mindre produktionsvolymerna gör att det finns en ekonomisk och teknisk drivkraft för att återvinna även dessa fibrer. Kolfibrer ingår som konstruktionsmaterial i flygplanskonstruktioner och utvecklingsarbete pågår till exempel för Boeing för att återvinna kolfibrerna [19, 20]. Företaget Firebird Advanced Materials har utvecklat utrustning i pilotskala för kontinuerlig mikrovågspyrolys av kolfiberkomposit [21]. Andra typer av fiberarmeringar som används kommersiellt är aramider och naturfiber. Aramider används för tekniska applikationer då extrema mekaniska och termiska egenskaper behövs. Naturfibrer används i mindre omfattning inom fordonsindustrin för interiöra kompositerna. Denna typ av komposit är lättare att återvinna då de inte innehåller någon oorganisk del. Naturfiberkompositerna analyseras inte vidare i detta projekt.

Återvinningen av glasfiberkompositerna försvåras av att olika kvaliteter av glasfiber används industriellt. Vid vissa tillverkningsmetoder, såsom pultrudering, används glasfiberoving (kontinuerliga fibrer). Användning av glasfibern mattor är också vanligt förekommande. Andra tillverkningstekniker såsom sheet moulding compound (SMC) och bulk moulding compound (BMC) använder korta, huggna glasfibrer. Detta gör att om glasfibern ska användas efter återvinningen för att tillverka nya kompositerna så måste tillverkningsmetoder användas som möjliggör att man kan hantera en variation av olika fibrer. Sannolikt måste de återvunna fibrerna malas före pyrolysen. Alternativt kan kompositerna sorteras innan pyrolysen. En sådan operation kan dock vara kostsam.

Idag har materialåtervinning av glasfiberkomposit genom mekanisk bearbetning en mycket låg lönsamhet, emedan priset för jungfrulig glasfiber och de vanligaste fyllmedlen är mycket lågt. Vid förbränning genereras stora mängder slagg och aska pga det höga innehållet i ickebrännbart glasfiber. Det finns därför ett behov av nya återvinningsmetoder, och då kan mikrovågspyrolys vara en möjlighet.

4.1.2 Typ av avfall och avfallsvolymer

Någon officiell statistik över hur mycket komposit som tillverkas i Sverige finns inte men mängden har uppskattats till 20 000 ton per år. Den totala användningen av komposit i Sverige kan dock antas vara betydligt större då produkter också importeras. I hela Europa

tillverkas cirka 1 miljon ton komposit per år [22] och globalt är siffran 6 miljoner ton per år [18]. På Plast- & Kemiföretagens hemsida finns 20 företag listade som tillverkar komposit inom vitt skilda applikationsområde, såsom båtar, behållare och militära produkter [23]. Antalet företag som på något sätt använder komposit är dock betydligt fler. Avfall uppstår dels som produktionsavfall men framförallt då produkterna kasseras efter användning. Mängden produktionsavfall som uppstår varierar beroende vilken typ av komposit som avses och hur denna komposit tillverkas. Den genomsnittliga mängden produktionsavfall för ett konventionellt komposittillverkande företag har uppskattats till 25 % av den använda materialmängden [24] men kan ibland uppgå till så mycket som 40 % [25]. En del av dessa produkter tas om hand genom deponi medan andra produkter förbränns. I en enkätundersökning som genomfördes på Högskolan i Borås under 2005 [24] framkom att företagets interna produktionsavfall till stor del (47 %) deponeras. Avfallet som uppkommer består både av harts, armering, bearbetningsrester, förpackningar och av kasserade produkter. En stor majoritet av företagen (87 %) ansåg att det inte var möjligt att använda återvunnet avfall i sina egna produkter. Om man antar att det bildas 25 % produktionsavfall i relation till produktionsvolymen vid tillverkning av komposit så skulle det bildas omkring 5 000 ton i Sverige per år.

Vindkraft är en växande sektor. Vindkraft anses vara ett för miljön fördelaktigt sätt att framställa energi. Vindkraftsindustrin är relativt ung och det finns en mycket begränsad erfarenhet av hur man ska återvinna vindkraftverken. Vingarna till vindkraftverk tillverkas av glasfiberkomposit och kan typiskt vara upp mot 50 meter långa. Det har uppskattats att det behövs 75 ton material i vingarna på ett vindkraftverk på 7.5 MW [26]. I Sverige finns det ca 1 100 vindkraftverk medan det i andra europeiska länder finns betydligt fler. Bara i Tyskland finns det mer än 23 000 vindkraftverk [27]. Dessa vindkraftverk har en relativt kort livslängd, cirka 20-25 år [26], och det saknas idag system för att återvinna dessa. Det är sannolikt att användningen av vindkraft i framtiden kommer att öka. Andersen et al. uppskattade att det år 2040 kommer att finnas ett globalt behov av att återvinna 380 000 ton komposit från vindkraftverk [28]. Detta visar klar behoven av att utveckla nya metoder för återvinning av detta material.

Båtindustrin är en annan sektor som använder mycket glasfiberarmerad plast. Cirka 600 000 privatpersoner beräknas äga båt och en stor del av dessa är tillverkade glasfiberarmerad plast [29]. Fullgott återvinningssystem för båtar saknas och många båtar överges istället i naturen. Någon officiell statistik över hur mycket komposit från båtindustrin som behöver återvinnas per år finns inte; det rör sig troligen om tusentals båtar. Det finns idag ett företag i Sverige, Båtskroten, som aktivt jobbar med återvinning av båtar. Båtarna demonteras och materialen separeras. Kompositmaterialen förbränns i dagsläget tillsammans med annat avfall och den resterande oorganiska delen deponeras; man letar dock aktivt efter alternativa metoder för att undervika deponi.

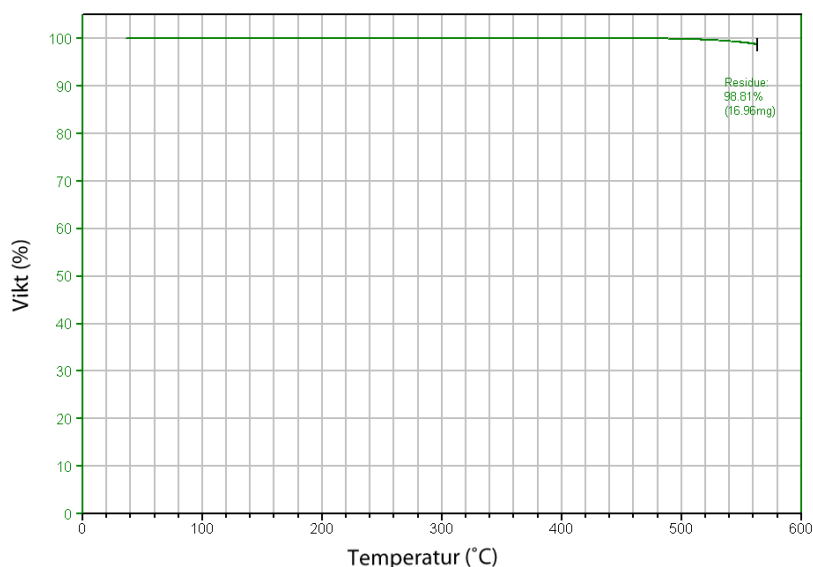
En annan stor sektor som använder komposit är fordonsindustrin. Att göra lättare konstruktioner för att därmed minska bränsleförbrukningen är en drivkraft som ökat användningen av lätta material inom fordonsindustrin. SMC och BMC används inom bilindustrin för att tillverka komposit. Dessa är kompositmaterial med en mycket hög andel glasfiber och fyllmedel, ca 60-75 vikt-%. Det har uppskattats att den globala användningen av SMC inom bilindustrin var 90 000 ton år 2001 medan BMC-användningen var 230 000 ton år 2001 [30]. SMC och BMC används dock även inom andra tillämpningar och den totala användningen är ännu större. I Sverige skrotas knappt

300 000 bilar varje år [31]. Cirka 85 vikt-% procent av en bil återvinns idag. Dock inte plast, som skickas på deponi. Därutöver tillkommer fordon såsom lastbilar och andra transportfordon. I Volvos lastbilar förekommer ganska lite komposit men mängden kan variera kraftigt mellan olika märken och årsmodeller. Det är därför väldigt svårt att uppskatta den totala mängden kompositavfall som generas från fordonsindustrin.

4.2 Experimentella resultat

4.2.1 Termisk analys

Fibrerna från de pyrolyserade vindkraftsvingarna karaktäriserades med termogravimetrisk analys (TGA) för att bestämma andelen organiskt material efter pyrolysen. Då fibern hettas upp i en atmosfär av syrgas förbränns de kvarvarande kolpartiklarna på fiberns yta. Analysen visar att pyrolysen mycket effektivt avlägsnar det organiska matris materialet. Endast cirka 1.2 vikt-% av den pyrolyserade fiberns totala vikt är organiskt, se Figur 1.



Figur 1. Termogravimetrisk analys av den pyrolyserade glasfiber i en atmosfär av syrgas.

Figure 1. Thermogravimetric analysis of the pyrolysed glass fibre in an atmosphere of oxygen gas.

Mängden material som används vid TGA-analyser är väldigt liten och resultatet blir i viss mån beroende av provberedningen. Som ett komplement till TGA-analyserna gjordes därför en analys av mängden organiskt material på fibern genom att bränna bort den organiska delen i en högttemperaturugn. Resultaten återges i Tabell 1. Denna testmetod använder en större mängd fibrer och är därför noggrannare än TGA. Enligt denna testmetod är mängden organiskt material på fibern cirka 2 vikt-%.

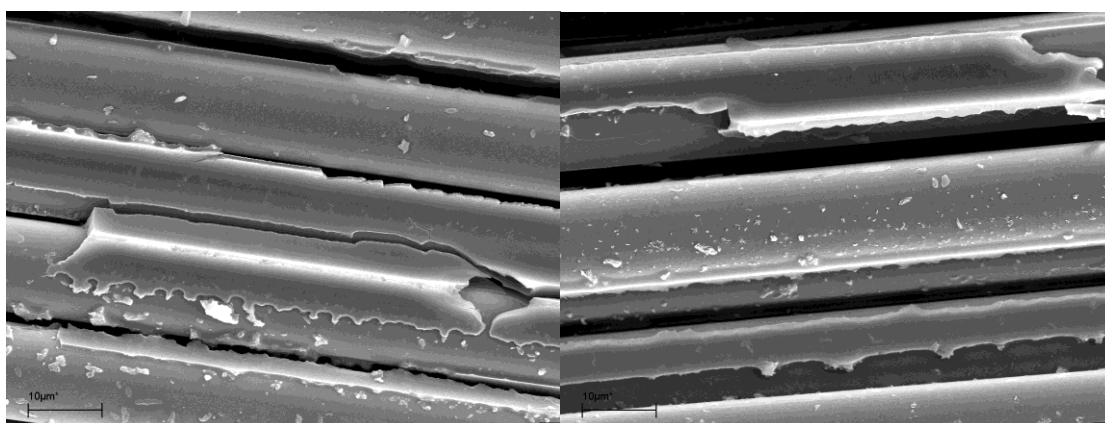
Tabell 1. Vikt-% organiskt material i den återvunna fibern

Table 1. Weight-% organic material in the recycled fibre

Prov	Vikt-% organiskt material
1	2.49
2	2.29
3	1.91
Medelvärde	2.2

4.2.2 Svepelektronmikroskopi

De pyrolyserade fibrernas ytegenskaper karakteriserade med svepelektronmikroskopi (SEM), se Figur 2. Fibern är belagd med ett ämne som är delvis nedbrutet. Detta är troligtvis fibrernas ytbehandling, dvs sizing som delvis brutits ned. Då glasfibern tillverkas beläggs den med en sizing. Detta är organiska föreningar, som kan förbättra adhesionen mellan fibern och matrisen genom en kemisk reaktion.

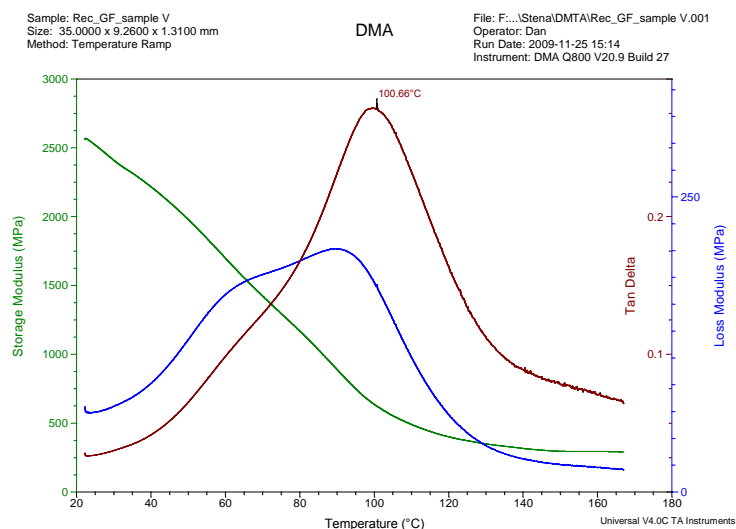


Figur 2. SEM-bilder av den återvunna fibern.

Figure 2. SEM images from the recycled fibre.

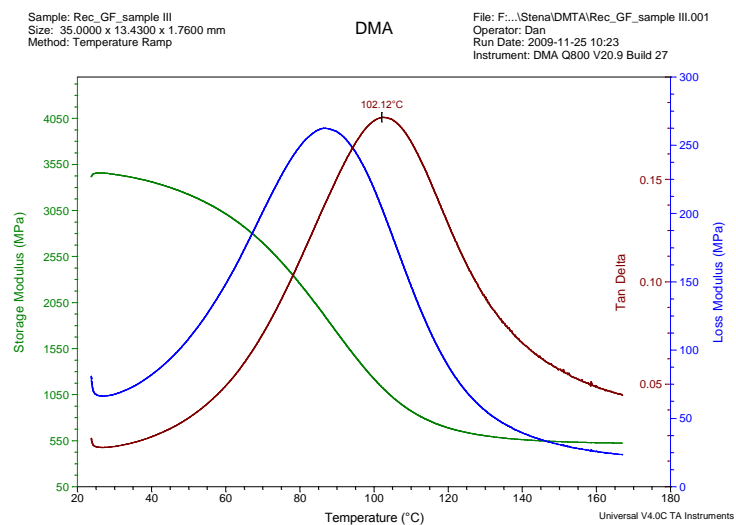
4.2.3 Mekanisk provning av tillverkade kompositer

Kommersiella kompositer tillverkas genom att glasfiber-mattor impregneras med en härdplast i en lamineringsprocess. För att kunna tillverka kompositer från de erhållna fibrerna tillverkades därför non-woven mattor av fibrerna med två olika tekniker. Laminat tillverkades sedan, varefter laminat utvärderades med DMTA analys. Resultaten av återges i Figur 3 och 4. Både wetlaid och airlaid fibrerna gav kompositlaminat med. För båda typerna av komposit var de mekaniska egenskaperna relativt låga och fibern har i stort sett ingen förstärkande effekt av plastmatrisen. De låga mekaniska egenskaperna beror med största sannolikhet på att fibrernas sizing är nedbruten och att adhesionen mellan matrisen och fibern därför är väldigt låg. Kompositen tillverkad av en airlaid gav ett något bättre resultat med en lagringsmodul på knappt 3.5 GPa vid rumstemperatur.



Figur 3. DMTA-analys av komposit framställd en fibermatta tillverkad med "wetlaid" teknik. Den gröna kurvan visar lagringsmodulen, den blå kurvan förlustmodulen och den bruna kurvan tan delta.

Figure 3. DMTA analysis of composite prepared from a fibre mat produced by wetlaid technique. The green curve shows the storage modulus, the blue curve the loss modulus, and the brown curve the tan delta.



Figur 4. DMTA-analys av komposit framställd en fibermatta tillverkad med "airlaid" teknik. Den gröna kurvan visar lagringsmodulen, den blå kurvan förlustmodulen och den bruna kurvan tan delta.

Figure 4. DMTA analysis of composite prepared from a fibre mat produced by airlaid technique. The green curve shows the storage modulus, the blue curve the loss modulus, and the brown curve the tan delta.

4.2.4 Analys av oljefraktionen

Oljefraktionen som bildas efter pyrolysen karaktäriserades med kalorimetri, GC-MS och med TGA. Energiinnehållet i oljefraktionen var 34 MJ/kg enligt kalorimetrianalysen. Detta är ungefär jämförbart med energiinnehållet i petroleumbaserade oljor, vars energiinnehåll ligger runt 40 MJ/kg. Det uppmätta kalorivärdet för oljefraktionen är ungefär i linje med vad man kan förvänta sig för de flesta plaster [1].

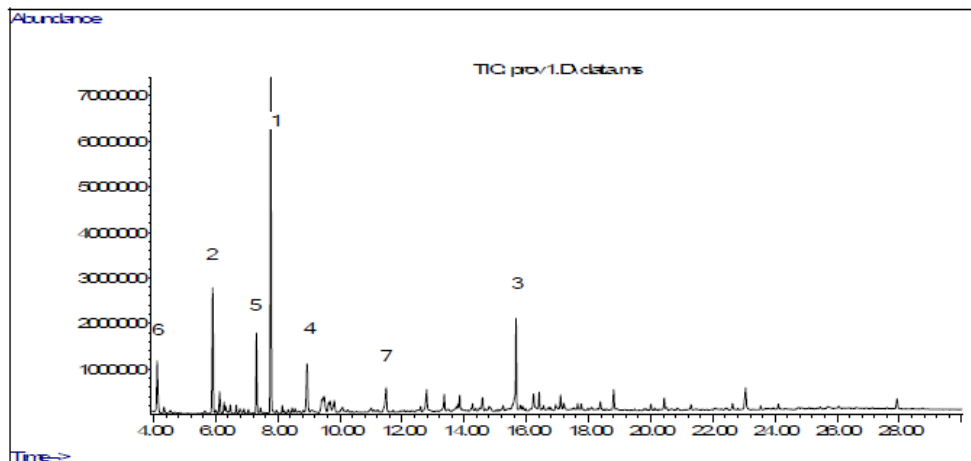
GS-MS analysen gjordes för att bestämma vilka organiska ämnen som ingår i oljan. Resultatet visar att oljan består av olika aromatiska föreningar, se Tabell 2.

Tabell 2. Tabell 2. Innehåll i oljefraktionen enligt GC-MS analysen.

Table 2. Table 2. Content in the oil fraction according to the GC-MS analysis.

Ämnen	Halt i mg/g	Nr på kromatogram
Styren	150	1
Toluen	70	2
Bensen, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	40	3
Alfa metylstyren	40	4
Etylbensen	35	5
Bensen	30	6
Naftalen	20	7
Oidentifierad	20	-
D-limonen	20	-
Phthalic anhydride	20	-
Oidentifierad	15	-
Inden	10	-
Etylmetyldioxolan	10	-
2-fenylnaftalen	10	-
Bifenyl	10	-
E-stilben	10	-
1,2-Difenylcyklopropan	10	-
Fenantren	10	-

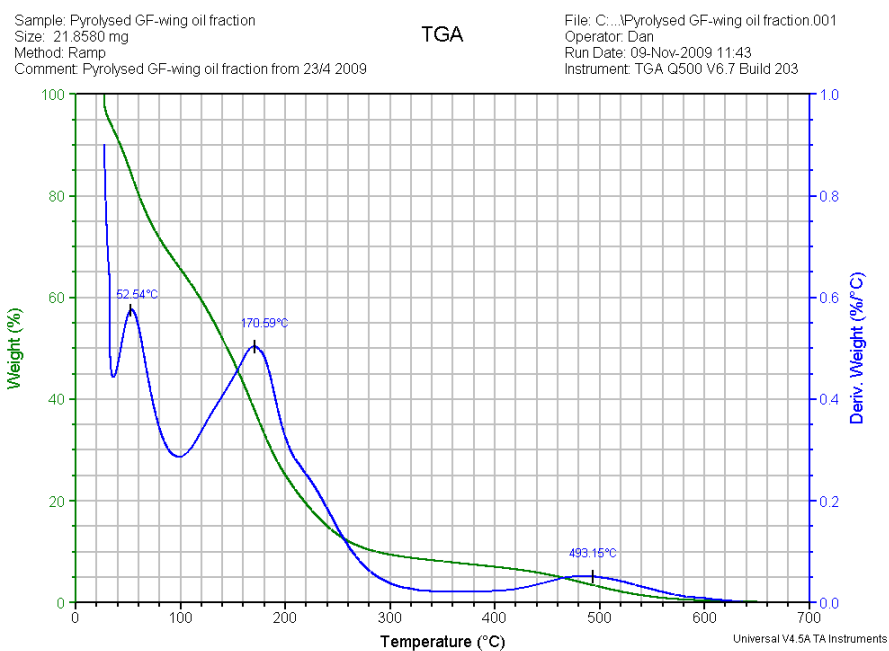
De största topparna i mass-spektrat (Nr 1 och 2), se Figur 5, kommer från styren och toluen. Förekomsten av aromatiska komponenter i oljan är väntad då kommersiella hårdplaster som används för kompositframställning typiskt är aromatiska föreningar lösta i styren.



Figur 5. GC-MS spektrogram av oljefractionen.

Figure 5. GC-MS spectrogram of the oil fraction

En TGA-analys av oljefractionen gjordes, se Figur 6. TGA-analysen visar att oljan förbränns relativt snabbt i syre. Hela oljan förbrändes utan att lämna någon torrsubstans. Viktminskningshastigheten har tre maxima vid cirka 52°C, 171°C och 493°C.



Figur 6. Termogravimetrisk analys av oljefractionen i en atmosfär av syrgas. Den gröna kurvan visar provets vikt och den blå kurvan visar derivatan av viktsförlusten.

Figure 6. Thermogravimetric analysis of the oil fraction in an environment of oxygen gas. The green curve shows the weight of the sample and the blue curve the derivative weight loss.

4.2.5 Massflödesbalansberäkning

Med massflödesbalansen kan olika scenarier beräknas. Beräkningen görs med ett Exceldokumentark, var olika indata kan införas. I kalkylen kan den procentuella sammansättningen gällande fastfas, organisk fas samt gasfas varieras. Därtill kan respektive fas sammansättning varieras. Energiinnehållet samt den producerade energin kan beräknas, på basen av verkningsrad samt processens energibehov. Den ekonomiska kalkylen beaktar pyrolysisprocessens kostnader samt intäkter. Deponikostnaden beaktas även, eftersom den utgör en besparing. Efterbehandling av den oorganiska fasen har även inkluderats, och eventuell intäkt beroende på dess värde kan beaktas. Slutligen fås en ekonomisk uppskattning. Följande resultat erhöles:

Scenario 1: Komposit med 40 % glasfiber, 40 % vätskefas och 20 % gasfas

Detta motsvarar en typisk komposit med 40 % glasfiberinnehåll och 60 % hårdplastinnehåll. Deponikostnaden har beräknats till 700 kr/ton, och den erhållna glasfiberfraktionen anses ha inget värde. Detta scenario ger en förlust, men förlusten blir mindre om deponikostnaden ökar.

Scenario 2: Komposit med 75 % glasfiber, 20 % vätskefas och 5 % gasfas

Detta motsvarar en vindkraftsvinge, bestående av endast 25 % hårdplast. Deponikostnaden var även 700 kr/ton, och glasfiberfraktionen anses ej ha ett värde. Detta scenario ger även en förlust, men mindre än scenario 1, eftersom den organiska andelen är mindre, varvid pyrolysen blir mindre energikrävande.

Genom att variera indata kan man hitta scenarier som ger en vinst. Ökad deponikostnad samt den oorganiska fasens värde påverkar beräkningen tydligt.

4.2.6 Jämförelse med befintliga återvinningssystem

Många tekniker för att återvinna kompositmaterial har tidigare utvärderats och finns beskrivna i litteraturen. Samtliga av dessa metoder har både för- och nackdelar och det finns ingen metod i dagsläget som är helt idealisk.

Idag omhändertas kompositmaterial i praktiken genom antingen deponi eller genom förbränning. Deponi är en enkel och billig metod att bli av med uttjänt komposit. Enligt EU:s deponeringsdirektiv råder dock förbud mot att deponera material som innehåller mer än 10 % organiskt material. Det finns därför en legislativ drivkraft att minska deponi. Deponi innebär också att det deponerade materialets energiinnehåll går förlorat, detta kunna tillvaratas med förbränning eller pyrolysis.

Ett alternativ till att deponera kompositerna är att återvinna dessa mekaniskt. Försök har gjorts att mala kompositerna och att använda de malda kompositerna som fyllmedel. Detta har undersökts i den så kallade ERCOM processen [32] där kompositerna mals med mobila kvarnar. De malda kompositerna har utvärderats för att ersätta kalciumkarbonat i SMC- och BMC-formuleringar. Det har dock visat sig att de malda kompositerna har delvis andra egenskaper än kalciumkarbonat. Vid höga inblandningar ger de malda kompositerna en högre viskositet och resulterar i kompositmaterial med lägre mekaniska egenskaper [1, 32]. Det har också visat sig vara svårt att hitta avsättning för mekaniskt behandlad återvunnen

komposit. Detta beror på de jungfruliga kompositernas mycket goda egenskaper, samt deras låga pris. De mekaniskt återvunna kompositernas egenskaper måste förbättras betydligt för att kunna användas i mer avancerade produkter därtill måste kostnaden för återvunnen komposit sjunka för att kunna konkurrera med jungfrulig komposit.

Alternativt kan kompositer energiåtervinnas. De flesta hårdplaster, med undantag av urea-formaldehyd, har ett relativt högt energiinnehåll, cirka 30 MJ/kg [1]. Kompositer är emellertid armerade med oorganiska glasfibrer som inte går att förbränna, varvid energiinnehållet är betydligt lägre. En komposit med 40-60 vikts-% glasfiber har ett energiinnehåll på ca. 12 – 18 MJ/kg. För en typisk SMC komposit som används inom till exempel bilindustrin kan innehållet av hårdplast vara lägre än 25 vikt-%. Även om det är fullt möjligt att samförbränna kompositer med annat material, så kommer det att bildas en stor mängd aska som måste deponeras. Mikrovågspyrolys har fördelen att glasfiberarmeringen även kan tas till vara och utnyttjas. Mikrovågspyrolys sker vid en lägre temperaturer, och då infinner sig den stora potentialen att ta tillvara hela kompositen.

Den olja som bildas efter mikrovågspyrolysen kan antingen användas som bränsle eller omvandlas till syntesgas. Om oljan används som bränsle är fördelen att man har kunnat ta tillvara den oorganiska glasfibern. Ett alternativ är att konvertera pyrolysoljan till syntesgas, som sedan kan konverteras till olika kemiska produkter. På detta sätt kan man ytterligare "skjuta upp" de koldioxidutsläpp som annars skulle genereras genom direkt förbränning. En ekonomiskt lönsam process för produktion av syntesgas är dock ännu väldigt långt borta, och kräver mycket arbete ännu. Att reda ut den ekonomiska potentialen ligger utanför denna förundersökning.

Mikrovågspyrolys är även en relativt ny teknik och det mesta som rapporterats i litteraturen om mikrovågspyrolys är baserat på laboratorieförsök. De experimentella försök som rapporterats i denna förstudie är också gjorda på en labb-skaleutrustning för mikrovågspyrolys. En större anläggning för mikrovågspyrolys är emellertid under uppbyggnad av Stena Metall. När den är i bruk kan energiaspekten av mikrovågspyrolys mer i detalj studeras. Detta kommer även att göras i andra pågående projekt.

Mikrovågspyrolys kan också i framtiden användas för att återvinna andra typer av avfall än glasfiberarmerade kompositer. Tekniken skulle till exempel kunna användas för att ta tillvara kompositer med dyrbarare armering än glasfiber, såsom kolfiber. De relativt låga temperaturer som används vid mikrovågspyrolys är skonsammare mot fibern som annars kan förlora stora delar av sina mekaniska egenskaper vid högre temperaturer. Tekniken kan också potentiellt användas för till exempel plast- och elektronikavfall.

5 Resultatanalys

De ingående komponenterna i ett kompositmaterial kan inte återvinnas separat, eftersom det är ett sammansatt material. Denna typ av komposit kan möjligen förbrännas men den höga halten av oorganiskt material gör att inte alla förbränningsanläggningar vill ta emot denna typ av material. Den oljefraktion som bildas efter pyrolysen har ett högt energiinnehåll. Tänkbara användningsområden för oljan är att använda oljan som bränsle eller att tillverka syntesgas för vidare användning som petrokemisk råvara. I princip kunde även oljan destilleras, varvid kemiska komponenter kunde tas tillvara. Detta är uppenbarligen tekniskt och ekonomiskt lönsamt. De komponenter som identifierats i oljan består huvudsakligen av styren och toluen vilka är av lågt ekonomiskt värde. Att energiåtervinna oljan är fullt möjligt då den har ett energivärde ungefär i klass med petroleumbaseerade oljor. Att förbränna oljan kommer emellertid att öka koldioxidutsläppen medan en konvertering av oljan till syntesgas kommer att skjuta upp koldioxidutsläppen.

Syntesgas består av kolmonoxid och vätgas och används inom kemisk industri för att tillverka bland annat diesel, metanol och andra kemiska föreningar [33]. Syntesgas kan framställas från flera olika startmaterial, såsom kol och naturgas. Att tillverka syntesgas från oljefraktionen skulle med andra ord kunna minska åtgången av icke-förnybara resurser, vilket kunde studeras i kommande projekt. Detta skulle också bana väg för återvinningsföretagen att energieffektivisera komposithantering.

Om man betänker att den totala produktionen av komposit är cirka 1 miljon ton i Europa kan man anta att det är stora mängder energi som går förlorade genom deponi. Om man antar plasten i kompositen har ett genomsnittligt energivärde på 30 MJ/kg och att en komposit i snitt innehåller 40 vikt-% harts så skulle detta motsvara ett energivärde på 3 TWh. Siffran får ses som en grov uppskattning men visar på att stora mängder energi går förlorad genom deponi. Därtill är glasfiber energikrävande då den tillverkas vilket också går förlorat vid deponi. Energiåtgången för att tillverka glasfiber är cirka 48 kJ/kg [34]. Det är med andra ord mycket stora mängder energi som går förlorade vid deponi.

De fibrer som erhålls genom mikrovågspyrolysen kan användas för att tillverka nya kompositer. En frågeställning är hur dessa kompositer ska tillverkas för att en rationell produktion ska erhållas. Ett tänkbart sätt är att tillverka fibermattor som sedan kan användas för att tillverka nya kompositer. Detta utvärderades i denna förstudie och är ett tänkbart sätt att processa fibrerna i framtiden. Framtida studier bör omfatta försök i industriell skala för att utvärdera processbarheten av de återvunna fibrerna samt metoder för att förbättra de återvunna fibrernas ytegenskaper. Jämförande studier med jungfruliga fibrer bör också göras.

En alternativ metod är att tillverka ett BMC-material. Den senare tekniken används industriellt för att tillverka kompositer i stora serier. Fiberlängden i BMC-formuleringar är typiskt ganska kort. Denna teknik har dock inte utvärderats i detta projekt. Geotextilier är ett annat möjligt avsättningsområde, varvid materialet används som förstärkning i vägar och markkonstruktioner.

En problemställning vid tillverkning av komposit från de pyrolyserade fibrerna är dessas ytegenskaper. De inledande studier som gjort visa att fibrerna är belagda med kolpartiklar samt att fibrernas sizing är nedbruten efter pyrolysen. Detta påverkar fibrernas adhesion till polymeren och därmed kompositens mekaniska egenskaper. Detta är något som måste studeras i mer detalj i framtiden. En tänkbar åtgärd är att värmebehandla fibrerna efter pyrolysen för att på så sätt förbränna kolpartiklarna på fibrernas yta. En sådan operation kan emellertid vara kostsam att utföra i industriell skala i kombination med att glasfiberkompositer är en relativt billig produkt. En annan tänkbar åtgärd är att istället blanda fibrerna med jungfruliga fibrer för att på så vis förbättra kompositernas mekaniska egenskaper.

Massflödesbalansräkningar ger en indikation om mikrovågspyrolysisprocessens ekonomi. Beräkningen är dock i högsta grad preliminär, och innehåller flera antaganden. Den visar dock att en vinst kan erhållas om deponikostnaderna ökar, samt om den oorganiska fasen kan konverteras till en värdefull sekundär råvara. Denna beräkning visar även att det är av största vikt att hitta ekonomiskt lönsamma avsättningar för den oorganiska fraktion som erhålls vid mikrovågspyrolysen. Därför är det viktigt att utveckla en tekniskt och ekonomiskt lönsam materialåtervinning för att möjliggöra en ekonomiskt lönsam mikrovågspyrolysis.

6 Slutsatser

Projektets initiala mål var att jämföra deponi, förbränning och mikrovågspyrolys gällande energisynpunkter samt resurshushållning. Därtill var avsikten att finna avsättningsmöjligheter för den erhållna oorganiska komponenten. I detta projekt har vi emellertid fokuserat på det sista målet, emedan det tidigt var uppenbart att detta kommer att vara den mest kritiska utmaningen. Utan en tekniskt och ekonomiskt lönsam avsättning så kan en mera sofistikerad teknik som mikrovågspyrolys ej att vara konkurrenskraftig jämfört med traditionell förbränning. Små volymer av kompositavfall gör att det kommer att försvinna i de mycket större avfallsvolymer av annat brännbart avfall. Mikrovågspyrolys är även en teknik under utveckling och det finns tex ej pilot eller fullskala utrustning för mikrovågspyrolys. Detta är under utveckling av Stena Metall tillsammans med andra företag. Då detta arbete fortgår kommer man att kunna mera närmare jämföra förbränning och mikrovågspyrolys. Gällande deponi bör det vara uppenbart att det är ett alternativ som ej är gångbart i framtiden.

Sammanfattningsvis kan förundersökningens resultat summeras enligt följande:

- Glasfiberarmerad plast har pyrolyserats med hjälp av mikrovågsteknik i labbskala. Pyrolysen resulterar i två fraktioner – en oljefraktion och en oorganisk fraktion.
- Oljefraktionen har ett högt energivärde som är ungefär jämförbart med petroleumbaserade oljor.
- Oljefraktionen kan användas för energiåtervinning eller för vidare syntes ifall den konverteras till syntesgas.
- Tillverkning av syntesgas från oljefraktionen är ekonomiskt intressant eftersom mikrovågspyrolys även kan användas för andra organiska avfallsfraktioner, varvid den ekonomiska lönsamheten blir betydligt bättre.
- En fördel med mikrovågspyrolysen är att glasfibrerna kan tas tillvara för användning i sekundära produkter. Glasfibrer är mycket energikrävande att tillverka och stora mängder energi därför går förlorade då kompositen i hög utsträckning deponeras. Potentiellt skulle därför mikrovågstekniken kunna användas för att ta tillvarata armeringen i kompositen. Glasfiberkompositen har studerats i denna förstudie men också andra mer dyrbara fibrer såsom kolfibrer skulle kunna tillvaratas med mikrovågspyrolys.
- En inledande studie gjordes därför av möjligheterna att använda den återvunna fibern för att tillverka nya kompositen. Syftet med studien av fibrerna var att kunna göra en preliminär bedömning av möjligheterna att återanvända fibrerna. En svårighet med detta är att den återvunna fibern har andra egenskaper än jungfruliga fibrer. Efter pyrolysen hade fibrerna cirka 2 vikt-% organiskt material som inte hade pyrolyserats. Vidare är fibrernas sizing förstörd efter pyrolysen. Detta inverkar negativt på kompositens egenskaper. De återvunna fibrerna kan troligtvis användas för att tillverka kompositen med lägre krav på mekanisk prestanda.

- Massflödesberäkningar visar att mikrovågspyrolys är ekonomiskt lönsam ifal deponikostnaderna ökar, och den oorganiska komponenten kan förädlas på så vis att dess värde ökar.

7 Rekommendationer

Mikrovågspyrolys har i detta projekt visat sig vara en teknik med potential att vidareutvecklas. Försöken har genomfört hos Gisip AB i en utrustning för batchvis pyrolys. En större anläggning för kontinuerlig mikrovågspyrolys är under utveckling av Stena Metall AB. Fortfarande återstår flera problemställningar att undersöka och vidareutveckla.

Den oljefraktion som bildas efter pyrolysen har ett högt energiinnehåll och kan energiåtervinnas eller användas som ett startämne för vidare syntes. Att energiåtervinna oljan skapar ny koldioxid vilket är negativt ur ett miljöperspektiv. Möjligheterna att konvertera olja till syntesgas har diskuterats under projektet. Detta kräver fortsatt forskning och utveckling.

Efter pyrolysen friläggs kompositens armering. För att mikrovågspyrolys ska kunna kommersialiseras måste avsättningsområde hittas för den återvunna fibern. Tänkbara sätt för att förbättra kompositernas mekaniska egenskaper är att belägga fibrerna med en ny sizing. Framtida forskningsprojekt bör också utreda hur olika sizingar påverkas av pyrolysen. Det är tänkbart att vissa sizingar påverkas mindre av mikrovågspyrolysen än andra. En annan möjlighet att förbättra de mekaniska egenskaperna är att bland återvunna fibrer med jungfruliga.

8 Litteraturreferenser

1. Pickering, S.J., *Recycling technologies for thermoset composite materials--current status*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(8): p. 1206-1215.
2. Huda, M.S., L.T. Drzal, M. Misra, A.K. Mohanty, K. Williams, and D.F. Mielewski, *Study on biocomposites from recycled newspaper fiber and poly(lactic acid)*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005. **44**(15): p. 5593-5601.
3. Meier, D. and O. Faix, *State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials -- a review*. Bioresource Technology, 1999. **68**(1): p. 71-77.
4. Merchant, A.A. and M.A. Petrich, *Pyrolysis of scrap tires and conversion of chars to activated carbon*. AIChE Journal, 1993. **39**(8): p. 1370-1376.
5. Miguel, G.S., G.D. Fowler, and C.J. Sollars, *Pyrolysis of Tire Rubber: Porosity and Adsorption Characteristics of the Pyrolytic Chars*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998. **37**(6): p. 2430-2435.
6. Roy, C., A. Chaala, and H. Darmstadt, *The vacuum pyrolysis of used tires: End-uses for oil and carbon black products*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999. **51**(1-2): p. 201-221.
7. Bockhorn, H., J. Hentschel, A. Hornung, and U. Hornung, *Environmental engineering: Stepwise pyrolysis of plastic waste*. Chemical Engineering Science, 1999. **54**(15-16): p. 3043-3051.
8. Pinto, F., P. Costa, I. Gulyurtlu, and I. Cabrita, *Pyrolysis of plastic wastes. 1. Effect of plastic waste composition on product yield*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999. **51**(1-2): p. 39-55.
9. Scott, D.S., S.R. Czernik, J. Piskorz, and D.S.A.G. Radlein, *Fast pyrolysis of plastic wastes*. Energy & Fuels, 2002. **4**(4): p. 407-411.
10. Cunliffe, A.M. and P.T. Williams, *Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis[small star, filled]*. Fuel, 2003. **82**(18): p. 2223-2230.
11. Marco, I.d., J.A. Legarreta, M.F. Laresgoiti, A. Torres, J.F. Cambra, M.J. Chomón, B. Caballero, and K. Gondra, *Recycling of the Products Obtained in the Pyrolysis of Fibre-Glass Polyester SMC*. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 1997. **69**(2): p. 187-192.
12. Torres, A., I. de Marco, B.M. Caballero, M.F. Laresgoiti, J.A. Legarreta, M.A. Cabrero, A. González, M.J. Chomón, and K. Gondra, *Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained*. Fuel, 2000. **79**(8): p. 897-902.
13. Thostenson, E.T. and T.W. Chou, *Microwave processing: fundamentals and applications*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. **30**(9): p. 1055-1071.
14. Nightingale, C. and R.J. Day, *Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(7): p. 1021-1030.
15. Woo Il Lee and G.S. Springer, *Microwave Curing of Composites*. Journal of Composite Materials, 1984. **18**(4): p. 387-409.
16. Pickering, S.J., R.M. Kelly, J.R. Kennerley, C.D. Rudd, and N.J. Fenwick, *A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites*. Composites Science and Technology, 2000. **60**(4): p. 509-523.

17. Ludlow-Palafox, C. and H.A. Chase, *Microwave-Induced Pyrolysis of Plastic Wastes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001. **40**(22): p. 4749-4756.
18. Lester, E., S. Kingman, K.H. Wong, C. Rudd, S. Pickering, and N. Hilal, *Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study*. Materials Research Bulletin, 2004. **39**(10): p. 1549-1556.
19. Carberry, B., Oral presentation at Carbon Fibre Recycling and Reuse 2009, Intertec Pira. , 2009.
20. *Composite Recycling and Disposal - An environmental R&D issue*. Boeing Environmental Technotes, 2003. **8**(4).
21. Hunter, T., Oral presentation at Carbon Fibre Recycling and Reuse 2009, Intertec Pira. , 2009.
22. Pickering, S.J., *Recycling technologies for thermoset composite materials--current status*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(8): p. 1206-1215, cites Bos G. EU waste legislation and the composite industry. Seminar on recycling of composite materials, IFP SICOMP, Mölndal, Sweden 14th-15th May 2002.
23. <http://www.plastkemiforetagen.se/Komposit/index.htm>.
24. Löfstedt, S. and S. Nilsson, *Återvinning av produktionsavfall från kompositindustrin*. Examensarbete vid Högskolan i Borås, 2005.
25. Lester, E., et al., *Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study*. Materials Research Bulletin, 2004. **39**(10): p. 1549-1556, cites J.F. Unser, T. Staley, in: Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium, Anaheim, CA, USA, March 1996, pp. 10–20.
26. Larsen, K., *Recycling wing*. Reinforced plastics, 2009. **January/February**.
27. <http://www.svensk-vindkraft.org/>.
28. Dannemand Andersen, P., M. Borup, and T. Krogh, *Managing long-term environmental aspects of wind turbines: a prospective case study*. Int. J. Technology, Policy and Management, 2007. **7**(4).
29. http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/miljo/article337530.ece.
30. DeRosa, R., E. Telfeyan, G. Gaustad, and S. Mayes, *Strength and microscopic investigation of unsaturated polyester bmc reinforced with smc-recyclate*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2005. **18**(4): p. 333-49.
31. <http://www.hsr.se/sa/node.asp?node=1030>.
32. Scheirs, J., *Polymer recycling. Science and technology applications*. London: Wiley. 1998.
33. Wender, I., *Reactions of synthesis gas*. Fuel Processing Technology, 1996. **48**(3): p. 189-297.
34. Joshi, S.V., L.T. Drzal, A.K. Mohanty, and S. Arora, *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004. **35A**(3): p. 371-6.



WASTE REFINERY
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se