



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Uppvärmning av Almunge brandstation med pyrolyys

Heating of Almunge fire station based on pyrolysis

Felix Eriksson, Erik Gustafsson, Karl Malmberg, Simon Martelius,
Simon Johansson, Patrick Johansson, Michael Stanowski

Kandidatuppsats i teknik

Uppvärmning av Almunge brandstation med pyrolys

Heating of Almunge fire station based on pyrolysis

*Felix Eriksson, Erik Gustafsson, Karl Malmberg, Simon Martelius,
Simon Johansson, Patrick Johansson, Michael Stanowski*

Handledare: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: David Ljungberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 15 hp
Nivå, fördjupning och ämne: Grundnivå, G2E, teknik
Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem
Kurskod: EX0759
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp
Kursansvarig institution: energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2019
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2019:11
ISSN: 1654-9392
Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Biokol, trädgårdsavfall, brandstation, värmeförsörjning, jordförbättringsmedel, pyrolyreaktor

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

This project has been carried out on the behalf of Ihus in collaboration with Stuns Energi. The goal was to find and model a solution based on the process of pyrolysis that can deliver enough heat to Almunge fire station while storing maximum amount of CO₂ in the form of biochar. Two systems that primarily used waste heat from a pyrolysis reactor were studied. In one case a wood pellet boiler was used to cover peak load and the second system used a coal boiler that uses some of the coal produced in the reactor. The result shows that both solutions can theoretically deliver the required amount of heat and have lower emissions of carbon dioxide than the current method of heat generation used on the property, a wood pellet boiler. A model of the system that uses a coal boiler shows that it, under a period of one year, releases 5 % more CO₂, has a 60 % higher amount of unused waste heat, and consumes 22 % more substrate per month than the system that uses a wood pellet burner. However, the coal boiler resulted in 18 % higher in biochar production, potentially 33 % more coal bound if the produced biochar is used as a carbon sink, and 18 % higher economical value after 20 years.

Sammanfattning

Detta projekt har genomförts på beställning av Ihus i samarbete med Stuns Energi. Det gick ut på att hitta och modellera en energilösning, baserad på en pyrolysisprocess, som förser en brandstation i Almunge med den värme stationen kräver på månadsbasis samtidigt som maximal mängd CO₂ binds i form av biokol. Två system som primärt använder spillvärme från en pyrolysisreaktor i uppvärmningssyftet togs fram. I ena fallet används en pelletspanna för att täcka de effekttopparna som kan uppstå och det andra systemet använder sig av en kolpanna som matas med kolet från pyrolysisprocessen. Resultatet visar att båda lösningar kan teoretiskt leverera den mängden värme fastigheten kräver och har lägre utsläpp av koldioxid än den nuvarande där fastigheten endast värms upp av en pelletspanna. Systemet som använder sig av kolpannan visade sig under ett års period släppa ut 5 % mer CO₂, har 60 % större andel av ej utnyttjad spillvärme och konsumerar 22 % mer substrat per månad än systemet med pelletspannan men kompenserade det med 18 % högre produktion av biokol, potentiellt 33 % större mängd kol som binds om biokolet används som kolsänka och 18 % högre ekonomiskt värde efter 20 år.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Genomförande	2
2	Litteraturstudie	2
2.1	Pyrolyprocessen	2
2.2	Bränslet och dess påverkan på processen	2
2.3	Bioolja	3
2.4	Produktion av biokol genom pyrolys	3
2.5	Pyrolyreaktorer	4
2.6	Kolpannor	5
2.7	Agenda 2030	6
3	Modellering	6
3.1	Värmebehov	6
3.2	Definiering av systemet och dess gränser	7
3.3	Ekonomisk analys	9
4	Resultat	9
4.1	Befintlig pelletspanna	10
4.2	Analys	11
4.2.1	Felanalys	11
4.2.2	Känslighetsanalys	11
4.3	Jämförelse mellan det befintliga systemet och de framtagna systemen	12
5	Diskussion	12
5.1	Felkällor och antaganden	12
5.2	Bedömning av projektets rimlighet	13
5.3	Rekommendationer	14
6	Slutsatser	15
7	Referenser	16

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Som projekt i kursen *Självständigt arbete i energisystem* arbetar vi i samarbete med Stuns Energi med att undersöka möjligheten att värma en brandstation i Almunge med en pyrolysisprocess och dess produkter.

I sitt arbete mot målen i Agenda 2030 vill Uppsala kommun och det kommunala fastighetsbolaget Ihus minska sin klimatpåverkan. Då Ihus fattat intresse för pyrolysisprocessen som värmekälla samt kolsänka, önskar de se över om installation av ett pyrolyssystem är rimligt. Utgångspunkten var att använda trädgårdsavfall som råvara och förbränna bioolja som produceras under processen för att värma fastigheten. Klimatpåverkan från detta system ska jämföras med brandstationens befintliga uppvärmningssystem som består av en panna som förbränner pellets.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka möjligheten att använda en pyrolysisprocess för att möta Almunge brandstations uppvärmningsbehov. Systemet skall skapa tillräckligt mycket värme från pyrolysisprocessen för att möta värmebehovet hos fastigheten på månadsbasis, samtidigt som mängden producerat biokol maximeras.

Det framtagna systemets klimat- och miljöpåverkan skall jämföras med befintlig uppvärmningsmetod. Det eventuella bidraget till uppfyllande av hållbarhetsmålen i Agenda 2030 skall undersökas.

Efter utfört projekt ska följande frågeställningar kunna besvaras:

- Är det möjligt att värma brandstationen i Almunge med pyrolysisprocessen samt en eventuell kol- eller pelletspanna?
- Vilka utsläpp genererar de undersökta systemen?
- Är det rimligt att använda trädgårdsavfall som bränsle i modellen samt i praktiken?
- Hur påverkar fukthalten i bränslet resultatet?
- Vilka av hållbarhetsmålen i Agenda 2030 kan uppvärmning med pyrolysis och produktion av biokol bidra till att uppnå?

1.3 Genomförande

En modell med två alternativa uppvärmningsmetoder konstruerades med utgångspunkt från pyrolysisprocessen, dess produkter och uppvärmningssystem. Modellens resultat jämfördes med uppgifter från kommersiella reaktorer och befintlig litteratur. De två framtagna modellalternativen, där den ena använder en pelletspanna och den andra en kolpanna, jämfördes.

Slutligen jämfördes modellen med det befintliga uppvärmningssystemet ur klimat- och ekonomiperspektiv.

2 Litteraturstudie

2.1 Pyrolysisprocessen

Pyrolysis är en termokemisk process för att omvandla biomassa till energi, biokol, bioolja och pyrolysisgas. Processen kan sammanfattas som nedbrytning av biomassans struktur med hjälp av värme i en syrefattig eller syrefri miljö. Beroende på uppehållstid, uppvärmningstemperatur och hur snabbt biomassan värms upp kan pyrolysis delas in i tre olika huvudkategorier; långsam pyrolysis, snabb pyrolysis och blixtpyrolysis. De olika kategorierna ställer olika krav på biomassan som behandlas, utöver det så skiljer sig slutprodukternas fysiska och/eller kemiska egenskaper åt samt hur stora andelarna av slutprodukterna som erhålls. Snabb pyrolysis och blixtpyrolysis resulterar generellt sett i stor andel bioolja som slutprodukt, medan långsam pyrolysis genererar i regel större andel biokol (Bilaga J).

Då uppgiftsbeskrivningen (Bilaga P) nämnde ett system där bioolja används för uppvärmning samtidigt som maximal mängd infångat kol eftersträvas, utgick arbetet utifrån dessa premisser. Emellertid insågs att ett system med bioolja som värmekälla inte var rimligt och en alternativ lösning togs fram.

2.2 Bränslet och dess påverkan på processen

Ihuvud är intresserade av att använda trädgårdsavfall från hela Uppsala Kommun som bränsle i en pyrolysisprocess då detta material ej utnyttjas i dagsläget. Det innebär dock problem då egenskaper av trädgårdsavfall varierar kraftigt och innehåller många variabler som är svåra att förutse och kvantifiera. På grund av detta valdes grenar och toppar (GROT, dvs. restprodukter från skogsindustrin) som en lämplig approximation på grund av dess liknande sammansättning. Själva pyrolysisprocessen ger olika resultat beroende på diverse faktorer i bränslet, bland annat dess kemiska sammansättning och energiinnehåll (Bilaga A). Vidare undersöktes vilka krav pyrolysisprocessen ställer på bränslet. Pyrolysis som sker vid lägre temperatur, 500 °C, kräver en lägre fukthalt, cirka 10 %. Olika metoder för att få ner fukthalten undersöktes och torkning var den mest praktiska och säkra (Bilaga A).

2.3 Bioolja

Bioolja är den vätska som fås från kondensation i pyrolysreaktionen. Den karakteriseras som en brun och viskös vätska som kan påminna om fossil råolja. Till skillnad från fossil råolja är bioolja en komplex oxygenerad förening innehållande vatten. Det innefattar vattenlösliga ämnen såsom syror och estrar samt icke vattenlösliga ämnen, ofta kallat pyrolytisk lignin. Biooljans sammansättning liknar råvaran vilket gör att den ibland kallas för "liquid plant matter", det gör att egenskaperna kan variera mellan olika biooljor (Bilaga E).

Bioolja är ett komplext bränsle att hantera då den innehåller flera olika typer av föreningar och är instabilt. Det gör den till en ej tillförlitlig produkt när det kommer till egenskaper såsom värmevärde, densitet och pH. Då dessa parametrar varierar är det svårt att optimera systemet för att fungera så effektivt som möjligt. Oljans låga pH utövar ett kontinuerligt slitage på systemet, vilket blir kostsamt på sikt. Trots dessa svårigheter med bioolja skulle systemet teoretiskt kunna använda detta bränsle för energilagring inför vintern när det finns ett större värmebehov. Då den initiala infallsvinkeln innefattade bioolja studerades dess egenskaper och produktionsmetoder. Denna studie ledde till omprövning av systemet och bioolja uteslöts ur lösningsalternativet (Bilaga E).

2.4 Produktion av biokol genom pyrolys

Reglering av utbytet mellan de olika produkter som fås ur pyrolysprocessen sågs till en början som ett möjligt sätt att kunna styra produktionen efter behov, då fastighetens värmebehov varierar under året. Denna lösning visade sig efter litteraturstudier inte vara rimlig då en sådan reglering är komplex och mycket svår att beskriva i en modell. Dessutom påverkar den typen av reglering även produkternas sammansättning vilket komplicerar systemet ytterligare. Se Bilaga D för vidare läsning.

Då variation i pyrolysprocessens driftparametrar för att reglera produktionen ansågs orimlig söktes den inställning som kan tillgodose värmebehovet samt generera mest mängd biokol. Hur pyrolysprocessen påverkade både mängden biokol och dess egenskaper studerades.

Slutsats av studien till kommande modell är att biomassan bör värmas till 500 °C samt att uppehållstiden skall vara runt 15 minuter. Tekniken anses ha stor potential att bli en bidragande lösning på dagens och framtidens klimat- och jordbruksproblem.

Värmekapacitiveteten hos biokol som värmts till 500 °C ligger runt 1000 J/(kgK). Energiinnehållet hos trädgårdsavfall är cirka 4000 MJ per ton. Vid pyrolys, då trädgårdsavfallet värms till 450 °C, var den överflödiga värmen vid förbränning av syngas 3507 MJ per ton. En stor del av energiinnehållet lagras i biokol, vilket leder till att verkningsgraden från biomassa till tillgänglig värme är runt 37 % (Bilaga J).

Densiteten hos biomassa som värmts till 500 °C beräknades till 300 kg per kubikmeter. Porositeten leder till att partikelytan hos biokol blir större. Detta är kopplat till katjonbyteskapaciteten och förmågan att lagra vatten, således är detta en avgörande parameter för många av tillämpningarna av biokol (Bilaga J).

Det har genom praktiskt genomförd forskning samt observationer av historisk användning konstaterats att då biokol används som jordförbättringsmedel ökar växternas tillväxt. Biokol förbättrar tillgängligheten av näringsämnen samt markens fysiska struktur. Det resulterar i ökade skördar i både lågintensivt och högintensivt jordbruk, samt ökar skörden jämfört per enhet konstgödsel. I mätningar har biokol reducerat markens utsläpp av lustgas med runt 50 % och helt tagit bort utsläppen av metangaser. Minskad avrinning, urläkning och erosion har också visats vid användning av biokol som jordförbättringsmedel (Bilaga J).

En livscykelanalys av klimatpåverkan från pyrolys av trädgårdsavfall visar lovande resultat för projektet. Om värmen från pyrolysisprocessen ersätter fossila bränslen, samt att biokolen som produceras appliceras som jordförbättringsmedel, beräknades att nettoeffekten på klimatet var -885 kg CO₂-eq per ton torr biomassa. Minskningen av koldioxid var mellan 7.4 - 12.5 ton CO₂-eq per ton biokol (Bilaga J).

2.5 Pyrolysisreaktorer

Närvaron av pyrolysisreaktor-tillverkare i Europa undersöktes och de utfrågades om deras reaktors egenskaper. Av dessa reaktorer valdes ett antal ut som uppfyllde de kriterier som behövde uppnås i termer av värmeeffekt och kolproduktion. Det maximala behovet av energi till byggnaden antas vara ca 30 MWh på en månad enligt Bilaga C vilket kan översättas till en viss mängd värme som produceras i pyrolysisprocessen, samt en viss mängd biokol som förbränns för att klara toppar i effektbehovet. Biokolet antas sedan enligt Bilaga C förbrännas i en panna i fastigheten med en effektivitet på 80 %. Sambandet mellan hur mycket energi biokolet utvecklar vid förbränning och hur mycket energi byggnaden behöver blev då:

$$\text{Energi i kol per kg} \cdot \text{antal kg kol} \cdot \text{effektivitet} = \text{Byggnadens energibehov} \quad (1)$$

Med ovanstående samband kan mängden biokol som behövs för att garantera byggnadens energibehov beräknas. Detta resultat användes som förfrågningsunderlag till reaktor-tillverkare. Om den eventuella kolpannan i fastigheten är effektivare än vad undersökts i Bilaga H minskar dock behovet av biokol för att nå samma energitillskott till fastigheten.

Pyrolysisreaktorer tillverkas runtom i Europa av flera olika tillverkare i många olika storlekar med syfte att förädla fram bioolja och biokol. Av dessa tillverkare har vissa valts ut och undersökts för att se ifall det går att finna reaktorer som uppfyller kraven på spilleffekt och biokolsproduktion.

Antalet kg biokol som behövdes för att tillgodose byggnadens energibehov under det kallaste snittdygnet räknades fram i bilaga C och är det underlag som använts vid förfrågningar till tillverkare av reaktorer.

I Tabell 1 kan det utläsas att det finns reaktorer som bör täcka energibehovet hos fastigheten samtidigt som de producerar biokol. Vissa av tillverkarna har flera reaktorer som kan vara aktuella för den angivna fastigheten, dock har reaktorer som bäst motsvarar energibehovet valts ut. Om fastigheten enbart värms med biokolet som produceras och inget tillskott kommer från spillvärmens i pyrolysisreaktionen skulle det krävas ca 159 kg biokol

Tabell 1: Resultat av förfrågan om reaktorer från olika tillverkare

Reaktormodell (Tillverkare)	Maximal produktion av biokol per dag	Användbar värmeeffekt
CM600 (Biogreen)	4800 kg	450 kW
P500 Biomass (Pyreg)	630 kg	150 kW
C60-F (Biomacon)	230 kg	35-63 kW
C100-F (Biomacon)	330 kg	50-100 kW

per dag för att möta det förmodade dagsbehovet under den månad mellan 2013 och 2019 (januari 2017) som var kallast. Detta kan vara aktuellt vid revision av pyrolysreaktorn eller vid haveri.

2.6 Kolpannor

För att eventuellt kunna ersätta pellets pannan i den angivna fastigheten behövdes det undersökas om det fanns kolpannor med tillräcklig effektivitet och effekt som motsvarar pellets pannan. Detta gjordes med en genomgång av tillverkare och återförsäljare runt om i Europa i Bilaga H men kan inte anses vara fullständig då koleldad uppvärmning är mycket vanligt och antalet pannor på marknaden är mycket stort.

Förbränningen av kol för fastighetens uppvärmning kräver eventuellt att en ny panna installeras i fastigheten. Den effekt som pannan skall kunna leverera till fastigheten antogs i Bilaga H, efter epostkonversation med Ihus, vara 50 kW då pannan ska kunna leverera all värmeeffekt som fastigheten behöver även om spillvärme från pyrolysprocessen inte kan levereras.

Ett antal pannor valdes ut för att undersöka hur väl de uppfyllde de krav som ställts. Dessa sammanfattas i Tabell 2 nedan:

Tabell 2: Resultat av förfrågan om reaktorer från olika tillverkare

Pannmodell (Tillverkare)	Max effekt	Angiven energieffektivitet
C50S (Atmos)	48 kW	90 %
SEG50 kW (Metal-Fach)	50 kW	90 %
KSR beta 50 kW (Pereko)	50 kW	78 %
CTBi (Okänd)	50 kW	91 %
DPBi (Okänd)	50 kW	92 %
PBi (Okänd)	52 kW	(Okänt)

I Bilaga H räknades det fram att en minskning av effektivitet hos pannan från 90 % till 78 % ökade behovet av kol med 15 % för att pannan ska kunna leverera samma effekt till fastigheten.

2.7 Agenda 2030

En del av arbetet var en koppling av pyrolyprocessen med målen i Agenda 2030 för att se hur och om denna metod av uppvärmning kan bidra till uppfyllandet av dessa mål.

En förutsättning är att biokolet i efterhand ska användas som jordförbättringsmedel, något som kan kopplas till två av målen. Delmål 2.4 som står för en hållbar livsmedelproduktion och motståndskraftiga jordbruksmetoder får bidrag då tillförseln av biokol till odlingsmarken leder till lägre behov av konstgödsel, minskad försurning, en ökad mängd näringsämnen och fler mikroorganismer. Dessutom kan biokolet ge struktur och förbättrad vattenhållning till marken. Detta tillsammans med en minskad urlakning bidrar till uppfyllandet av mål 6: rent vatten.

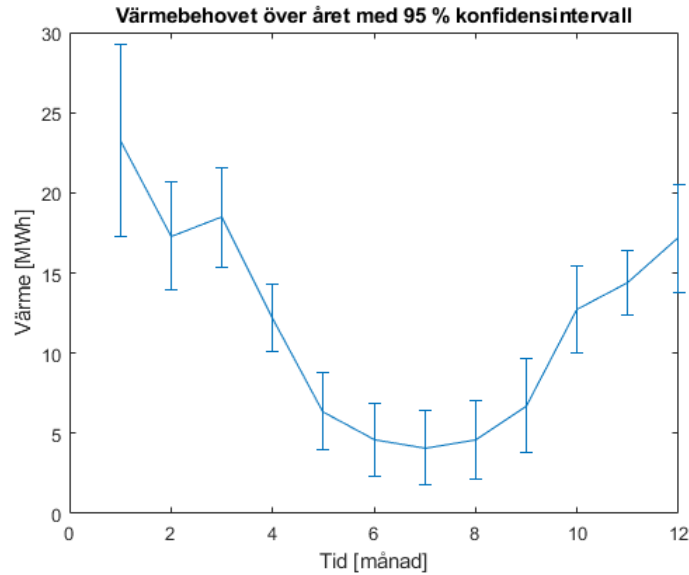
Pyrolysis som uppvärmningsmetod kan sänka utsläppen, särskilt när det används som jordförbättring, vilket binder en hel del av kolet i marken och tar ur det ur kolkretsloppet under en längre period. Detta kan kopplas till mål 7: hållbar energi, mål 9: hållbar industri, mål 11: hållbara städer och mål 13: bekämpning av klimatförändringen (Bilaga L).

3 Modellering

Syftet med modellen är att generera värden på mängden substrat till pyrolyreaktorn och eventuell kompletterande pellets- eller biokolspanna, systemets avgasutsläpp, samt uttaget av biokol. Med hjälp av modellen görs även en ekonomisk analys där kostnader mellan det tänkta systemet jämförs med det befintliga. Detta för att ge underlag för eventuell investering (Bilaga I).

3.1 Värmebehov

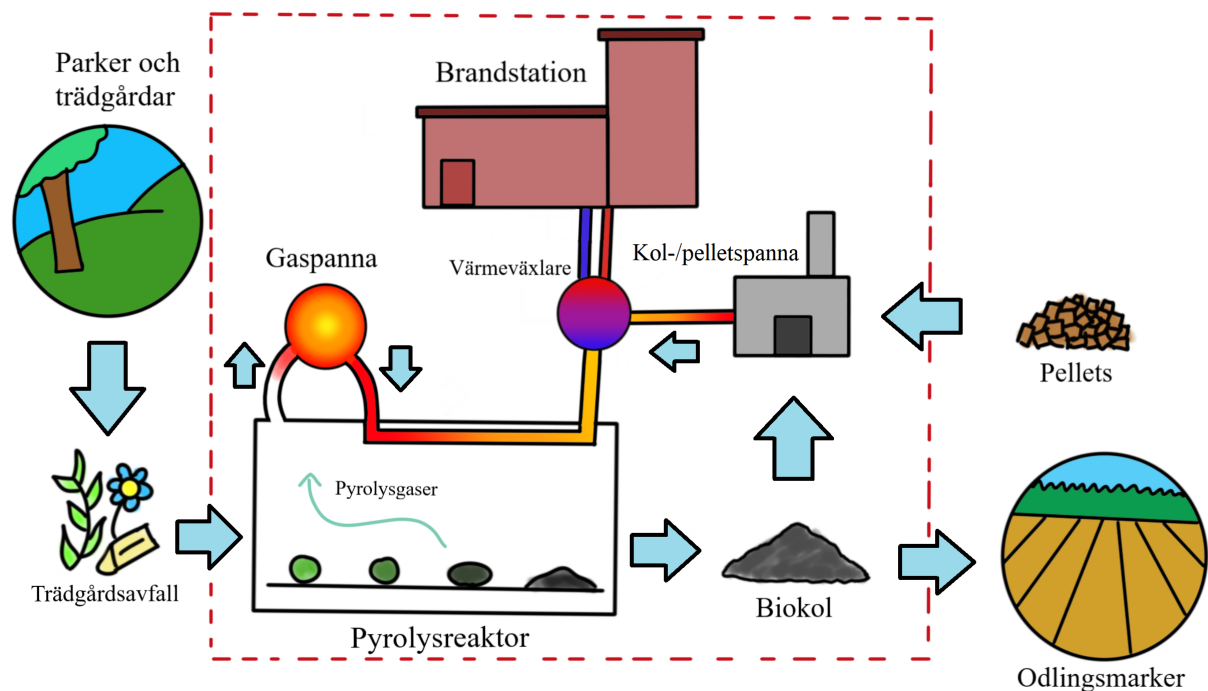
För att undersöka om pyrolysis för uppvärmning av brandstationen i Almunge är genomförbart gjordes en numerisk modell över systemet. Värmebehovsdata för fastigheten från år 2013-2018 på månadsbasis (Bilaga B) användes som grund till modellen. Ett 95 % konfidensintervall togs fram för varje månad, och den övre gränsen av intervallet sattes som det värmebehov modellen skulle täcka, se Figur 1. För ytterligare information om beräkningen, se Bilaga M.4. Två versioner av systemet konstruerades; ett för systemet med kolpanna, och ett för systemet med pelletspanna (Bilaga I).



Figur 1: Värmebehovet över året med ett 95 % konfidensintervall

3.2 Definition av systemet och dess gränser

Systemet utgörs av en pyrolysreaktor, Almunge brandstation, samt en kompletterande bränslepanna för effekttoppar (se figur 2). Ursprunget till det bränsle som går in i reaktorn tas inte hänsyn till. Vad som händer med det utgående producerade biokolet är även det utanför systemets gränser. Systemet tar med andra ord inte hänsyn till om råvaran, i detta fall trädgårdsavfall, är koldioxid neutralt eller inte. Det koldioxid som blivit bundet av trädgårdsavfallet under dess tillväxt, samt det biokol som lämnar systemet till att bli kolsänka, hamnar därmed utanför systemet. Detta för att biokolets koldioxidbindande egenskaper följer med produkten (biokol), och räknas inte in i systemet. Användaren av biokolet är alltså den som får räkna bort koldioxidutsläpp, inte producenten. Detta minimerar risken för dubbelräkning av koldioxidbindningen hos producenten och användaren (Bilaga I).



Figur 2: Figur som visar systemet och dess avgränsningar.

Två system modellerades:

- **System 1** täcker effekttoppar med hjälp av en kolpanna dit en del av det producerade biokolet går.
- **System 2** täcker effekttoppar med hjälp av en pelletsanna där pellets behöver köpas in men all producerad biokol kan lämna systemet.

Båda systemen har samma reaktor, gaspanna och värmeväxlare. Det som skiljer är endast biokol-/pelletsannan. Figur 2 visar båda systemen i en och samma bild. Mer ingående förklaringar för antaganden och modellens delar finns i Bilaga I.

I pyrolysreaktorn spjälkas materialet upp till biokol och syngas när det hettas upp under syrefria förhållanden. Syngasen förbränns i en gaspanna, där en del av energin går tillbaka till pyrolysreaktorn för att driva pyrolysisprocessen. Resterande värme går till värmeväxlaren som är sammankopplad med fastighetens värmesystem. Värmeväxlaren är antagen att ha en verkningsgrad på 85 %, och är inte modellerad utöver detta antagande. Med andra ord multipliceras energin systemet genererar med 0.85 för att få mängden energi levererad till huset. Denna förenkling är gjord eftersom det inte finns information om husets nuvarande värmesystem (Bilaga I).

Då modellen måste möta värmebehovet som finns i fastigheten kommer det kvarvarande energibehovet täckas av en biokol- eller pelletsanna. Den biokol som ej behöver gå in i systemets kolpanna blir en nyttoprodukt som kan säljas eller användas direkt som jordförbättring (Bilaga I).

3.3 Ekonomisk analys

Då de som lägger offert på installation av pyrolys-system inte kan göra uttalande om pris utan en påbörjad upphandlingsprocess kan exakt installations- och driftkostnad inte ges. Ska installation av föreslaget system vara ekonomiskt gångbart gjordes därför beräkningar (se Tabell 5) om hur mycket systemet får kosta för att betala tillbaka investeringskostnaden på 20 år (Bilaga C). Tabell 15 i Bilaga I, visar de olika materialkostnader som antagits. Inkomsterna från biokolförsäljning adderas med besparingen som görs genom att inte köpa in pellets till den nuvarande pannan. Detta subtraheras därefter med kostnaden för de eventuella pellets som köpts in till pelletspannan i det nya systemet för att få investeringstaket för ett år. Detta värde multipliceras därefter med 20 för att få investeringstaket efter 20 år. Sättet att räkna i detta fall förutsätter att biokolet, samt dess koldioxidbindande effekt säljs (Bilaga I).

4 Resultat

I Tabell 3 och 4 nedan presenteras resultaten från de två modellerna numeriskt. I dessa tabeller är modellerna optimerade för att orsaka så små CO_2 -utsläpp från systemet som möjligt. Nyckelvärdena är de resultat från simuleringen som anses vara relevanta. Här följer en förklaring av dem (Bilaga I).

CO_2 är systemets sammanlagda utsläpp från förbränningen av pyrolysgas samt kol eller pellets.

Biokol/pellets till förbränning är den totala massan av det kompletterande bränslet som används under ett år.

Biokol ut är det biokol som lämnar systemet under ett år, dvs. det biokol som kan användas eller säljas av Ihus.

Minsta lagerstorlek är det minsta lagret biokol brandstationen behöver ha för att klara de månader då kolförbränningen är större än biokolsproduktionen. Detta gäller endast system 1.

Ej utnyttjad spillvärme är den totala värme under ett år som systemet skulle kunna använda om det fanns behov för den, men som istället släpps ut i luften.

Effektiv kolbindning är den mängd koldioxidekvivalenter som binds om biokolet används som kolsänka. Här tar vi hänsyn till utsläppen från systemet samt det instabila kolet som grävs ned. Detta sätt att räkna gör att egenskapen ”effektiv kolbindning” är kopplat till biokolet som produkt. Skulle biokolet säljas skulle även klimatnyttan säljas.

Investeringsstak, se rubrik 3.3.

Tabell 3: Tabellen visar värden för de utparametrar som fås ur system 1 vid ett års drift, med ett konstant massflöde på 12.701 ton trädgårdsavfall/månad.

Nyckelvärden	Enhet	Värde
CO ₂ -utsläpp	kg	34 836
Biokol till förbränning	kg	1 611
Biokol ut	kg	42 588
Minsta lagerstorlek	kg	0
Ej utnyttjad spillvärme	kWh	77 875
Effektiv kolbindning	kg CO ₂ -ekv	86 889

Tabell 4: Tabellen visar värden för de utparametrar som fås ur system 2 vid ett års drift, med ett konstant massflöde på 10.368 ton trädgårdsavfall/månad.

Nyckelvärden	Enhet	Värde
CO ₂ -utsläpp	kg	33 109
Pellets till förbränning	kg	4 556
Biokol ut	kg	36 081
Ej utnyttjad spillvärme	kWh	47 986
Effektiv kolbindning	kg CO ₂ -ekv	65 107

Tabell 5: Tabellen visar investeringstaket för de två olika systemen där kostnader och intäkter under en 20 års period summeras. Massflödena är för de olika fallen samma som i Tabell 3 och 4

	Enhet	Värde
System 1	SEK	6 462 700
System 2	SEK	5 461 000

4.1 Befintlig pelletspanna

Den befintliga pelletspannan förbrukar 27.74 ton pellets per år vilket ger ett utsläpp på 51.79 ton CO₂ per år (se Bilaga O och P).

4.2 Analys

4.2.1 Felanalys

Datan för fastigheten är baserad på månadsstatistik och tar därmed inte hänsyn till dags-, tim- och minutvariationer av värmebehovet. Det gör att man via modellen inte kan säkerställa att pyrolysreaktorn kan producera tillräckligt med värme för alla årets dagar. Datan för GROT- och biokolsammansättningen är ytterligare felkällor. Utöver detta är den antagna elementarsammansättningen hos biokol baserat på pyrolysförhållanden som skiljer sig från de som är antagna i systemet (Bilaga I).

Beräkningar på energiutbytet i pannorna är baserad på ideal förbränning, vilket inte är möjligt i praktiken. Genom detta antagande kommer avgaserna endast att bestå av koldioxid, vattenånga och kvävgas. I praktiken består avgaserna av flera föreningar (Bilaga I).

Eneriåtgången för uppvärmning av trädgårdsavfall i pyrolysreaktorn baseras på antagandet att substratet endast består av trä och vatten, samt att det råder konstant tryck i reaktorn (Bilaga I). Det specificeras inte hur mycket värme som finns i gaserna som lämnar reaktorn, dvs hur mycket energi som går till uppvärmning av fukt. Detta eftersom gaserna antas vara energibärare ur vilken värmen till fastigheten hämtas.

4.2.2 Känslighetsanalys

Den mest oförutsägbara parametern i modellen är trädgårdsavfallets sammansättning och i synnerhet dess fukthalt. Därför har en känslighetsanalys gjorts på just fukthalten. I Tabell 5 presenteras bara känslighetsanalys för systemet som kompletteras med pelletspanna. Se bilaga I för fullständig känslighetsanalys.

Tabell 6: Känslighetsanalys på systemet som använder pelletspanna med avseende på trädgårdsavfallets fukthalt

Fukthaltens påverkan på systemet som använder pelletspanna				
Nyckelvärden	Enhet	Fukt 38.3 %	Fukt 47.9 % (verkligt värde)	Fukt 57.5 %
CO ₂ -utsläpp	kg	50 659	33 109	16 700
Pellets till förbränning	kg	2 872	4 556	6 851
Biokol ut	kg	36 081	36 081	36 081
Ej utnyttjad spillvärme	kWh	66 895	47 986	32 504
Effektiv kolbindning	kg CO ₂ -eq	68 250	65 107	60 822
Investeringskostnad efter 20 år	SEK	5 519 500	5 461 000	5 381 300

En förändring av fukthalten på 20 % resulterar i de flesta fallen i en förändring på över 20 % hos de olika parametrarna. Utifrån detta kan vi konstatera att systemet är känsligt

för variationer av fukthalten. Det noteras att värdet för *Biokol ut* inte förändras under känslighetsanalysen.

4.3 Jämförelse mellan det befintliga systemet och de framtagna systemen

Som resultatet i Tabell 7 nedan visar ger båda de föreslagna systemen lägre CO₂-utsläpp än det befintliga. De föreslagna systemen konsumerar mer bränsle än det befintliga, dock konsumerar de föreslagna systemen det mindre ädla bränslet trädgårdsavfall som i detta sammanhang antas vara gratis.

Tabell 7: Jämförelse av nyckelvärden från befintlig panna med de två alternativen från modellen.

Nyckelvärden	CO ₂ - utsläpp kg/år	Pellets- förbrukning kg/år	Trädgårdsavfalls- förbrukning kg/år
Befintlig panna	51 787	27 741	0
Pyrolysreaktor + pelletspanna	33 109	4 556	124 416
Pyrolysreaktor + biokolspanna	34 836	0	152 412

De föreslagna systemen kommer även att producera biokol som Ihus antingen kan använda för att räkna sina koldioxidutsläpp som negativa eller sälja, se hur mycket i tabell 3 och 4.

5 Diskussion

5.1 Felkällor och antaganden

Samtidigt som modellens resultat ser lovande ut är det viktigt att vara aktsam om de förenklingar som gjorts så att modellens begränsningar inte glöms bort.

Det substrat som beställaren av projektet, Ihus, önskar använda är trädgårdsavfall. Det har varit svårt att kvantifiera innehållet i detta substrat då det är ett heterogent material vars sammansättning inte har återfunnits i litteraturen. Därför bygger rapporten på substratet GROT som antas ha en liknande sammansättning som trädgårdsavfallet.

Datan för GROT- samt biokolsammansättningen är två ytterligare felkällor hos indatan. Begränsad tillgång till data för elementarsammansättning från pyrolysisprocesser gör att våra antaganden är baserade på pyrolysförhållanden som inte stämmer överens med de vi antagit till systemet. Exempelvis var fukthalten på GROT:et till en början 8 % (se Tabell 13 i Bilaga I), men har i modellen räknats om till 47.9 %. Detta riskerar att ge oväntade resultat hos modellen, vilket minskar modellens pålitlighet.

Det kan konstateras att det finns brister i modellen då parametern *Biokol ut* inte förändras vid känslighetsanalys av substratets fukthalt. Massflödet är konstant vilket gör att andelen kol per kilo är mindre vid ökad fukthalt. Det bör resultera i lägre produktion av biokol då vi får mindre kol som passerar systemet men så är inte fallet i denna modell. Detta skapar fortplantningsfel hos alla nyckelvärden som bygger på detta nyckelvärde. Det betyder även att andelen pyrolysgas som genereras i reaktorn kan vara fel, vilket indirekt innebär att beräkningen av biokolsflödet ökar osäkerheten på alla delar av systemet eftersom substratets fukthalt har ändrats.

Tillverkare av pyrolyreaktorer publicerar egna siffror över hur mycket biokol och användbar termisk effekt som deras reaktorer producerar. Dessa siffror har dock inte kunnat bekräftas av oberoende part.

De värden som förekommit i rapporten om kolpannornas effektivitet och effekt har uppgivits av tillverkare. Det är oklart om dessa har kontrollerats/verifierats av oberoende part.

Beräkning av utsläpp från förbränningen av pellets/biokol innehåller en del antaganden. Biokolet approximerades i det här fallet till träkol för att kunna ta fram den kemiska sammansättningen och energiinnehållet. Fukthalten i kolet varierar beroende på lagringssättet. Det nyproducerade kolet innehåller i princip ingen fukt men detta material har starka hydrofila tendenser. Det går att förvara kolet i en helt vattenfri miljö men detta är inte praktiskt i en större skala. Fukthalten som användes i beräkningen var ett snittvärde. Ideal förbränning antogs både för pellets och biokol, vilket gör att resultatet avviker från verkligheten dock handlade denna beräkning om en jämförelse så detta anses tillräckligt representativt för den verkliga processen.

Den metod som användes för att beräkna energin som pyrolyprocessen kräver tog inte hänsyn till fasövergången då substratet spjälkas, utan endast uppvärmningen av substratet. Reaktanternas bildningsentalpier har potential att få inverkan på resultaten, och kan innebära att modellens verkningsgrad blir högre än det skulle vara i verkligheten.

I modellen specificeras inte hur mycket värme som krävs för att överhettas ångorna i reaktorn. Detta riskerar att ha påverkan i praktiken då det krävs en icke försumbar mängd energi för att värma ånga från 100 °C till 500 °C. Hur stor påverkan detta har på energiutvinningen från gasen beror på vilken värmeväxlare som väljs till fastigheten.

Den ekonomiska kalkylen för att beskriva investeringstaket i rapporten baseras på uppgifter av förväntat pris på biokol från en pyrolyreaktor-tillverkare. Priset har inte kunnat verifieras och förväntas också variera över tid. Det kan finnas en risk för marknadsmättnad i närområdet om biokolet säljs som jordförbättring då nedbrytningstiden för biokol är lång.

5.2 Bedömning av projektets rimlighet

En validering gjordes där modellens verkningsgrad jämfördes med en verklig pyrolyreaktor från PYREG, verkningsgraden på modellen är 43 % vilket är 13 procentenheter högre än reaktorn från PYREG (Bilaga I). I en annan studie där trädgårdsavfall används

som bränsle har det systemet en verkningsgrad på 37 % (Bilaga J). Då beräkningarna i detta projekt grundas på antaganden som till exempel ideal förbränning och den andra studien gjordes under vetenskapligt kontrollerade förhållanden kan det argumenteras för att verkningsgraden blir lägre i praktiken.

Priset samt tillgången på trädgårdsavfall är avgörande för projektets rimlighetsgrad. Den beräknade förbrukningen av trädgårdsavfall är ca 150 ton per år, vilket måste kunna tillgodoses för att projektet skall vara genomförbart. Transport av avfallet påverkar uppvärmningssystemets totala klimatpåverkan. Det krävs även förmåga att lagra trädgårdsavfall i anslutning till pyrolysreaktorn då denna kräver ett kontinuerligt flöde av bränsle.

Genomförd undersökning visar att det finns system som kan producera mer värme än vad fastigheten förbrukar.

Enligt resultatet fås en återbetalningstid på 20 år utrymme för investerings- och driftskostnader på 5.5 till 6.5 miljoner SEK.

Då trädgårdsavfall har varierande andelar av hemicellulosa, cellulosa och lignin är en exakt beräkning av mängden energi och biokol som produceras inte möjlig att genomföra. Resultaten från modellen tyder dock på att projektets mål är genomförbart. Valideringar av modellens resultat har utförts och de förenklingar som gjorts har inte påverkat slutresultaten tillräckligt mycket för att göra dem oanvändbara.

5.3 Rekommendationer

Förhanteringen av bränslet har inte berörts i detta projekt. Logistiken som krävs för att ansamla en tillräcklig mängd bränsle med en godtagbar fukthalt kräver en djupgående analys. Denna analys behöver göras innan en investering i pyrolysreaktor sker. Stickprover av bränslet rekommenderas.

En mer djupgående ekonomisk analys bör göras för att säkerställa att systemet är värt att investera i. De enkla ekonomiska uträkningar som gjorts till den här rapporten tyder på att investeringstaket är högt. Dock har faktorer som inflation och värdeförändringar på materialen inte tagits hänsyn till i detta projekt, vilket gör resultaten osäkra.

Modellen som gjorts är framtagen för att nå värmebehovet på månadsbasis. Hur värmebehovet ser ut över kortare tidsintervall har inte undersökts. Detta måste göras innan det med säkerhet kan sägas att de föreslagna systemen löser fastighetens och beställarens krav. En ackumulatortank kan användas för att göra systemet mindre känsligt för effektoppar över dygnet, samtidigt som mängden spillvärme över året minskar. På grund av den begränsade mängd data modellen är baserad på har ackumulatortanken inte kunnat modellerats.

Då tekniken för pyrolys har begränsade möjligheter till reglering kräver modellen ett komplement för uppvärmning. Genom att koppla samman systemet med fjärrvärmenätet i Uppsala går spillvärmen under sommarmånaderna ej förlorad samt att systemet inte kräver ett komplement i form av en panna. Reaktorn kan då leverera konstant effekt till

nätet och andra källor kan stå för regleringen. Detta är ett förslag till ett alternativt och kanske mer lämpligt sammanhang att applicera tekniken.

6 Slutsatser

Slutsatsen som kan dras från resultatet är att de föreslagna systemen lever upp till de satta målen. De föreslagna systemen är därmed lämpliga till det tänkta användningsområdet. Givet de antaganden som är definierade i denna rapport kan följande fastslås:

- Uppvärmning av brandstationen i Almunge genom pyrolys är genomförbart.
- De föreslagna systemen resulterar i lägre CO₂-utsläpp jämfört med det befintliga.
- Det finns stora utmaningar med att använda ett heterogent bränsle som trädgårdsavfall. Dels ur ett modelleringsperspektiv, men även i praktiken. Det kommer framför allt bli viktigt att se till att bränslet har en så stabil fukthalt som möjligt.
- Modellen är framtagen för att nå värmebehovet på månadsbasis. Hur värmebehovet ser ut över dagen har inte undersökts, vilket måste göras innan det går att säga med säkerhet att systemet fungerar.
- Nyttoeffekterna av biokolet följer med produkten. Vill Ihus ha ett koldioxidnegativt system behöver de behålla det producerade biokolet själva. Säljer de biokolet hamnar klimatnyttan hos köparen.
- Uppvärmning med pyrolys och produktion av biokol kan bidra till uppfyllandet av Agenda 2030-målen: 2.4 - Hållbar livsmedelsproduktion, 6 - Rent vatten, 7 - Hållbar energi, 9 - Hållbar industri, 11 - Hållbara städer, 13 - Bekämpning av klimatförändringen.

Sammantaget finns det goda grunder för att Ihus går vidare med projektet.

7 Referenser

Bilaga A. Stanowski, M. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P1-1a - Data om energinnehåll och fukthalt.*

Bilaga B. Erikson, F. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P1-2 - Tidigare energiåtgång i fastigheten.*

Bilaga C. Johansson, P. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P1-2a - Befintliga pyrolysanläggningar, kommersiellt tillgängliga.*

Bilaga D. Gustafsson, E. Malmberg, K. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P1-2c - Reglering av kolproduktion vid pyrolysis.*

Bilaga E. Johansson, S. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P1-3 - Bioljja, Egenskaper och lagringsmöjligheter.*

Bilaga H. Johansson, P. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P2-6 - Kommersiellt tillgängliga pannor som kan hantera biokol.*

Bilaga I. Johansson, S. Gustafsson, E. Martelius, S. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P3-7 - Modellering av pyrolysisreaktor.*

Bilaga J. Malmberg, K. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P2-8 - Pyrolysisprocessen och dess produkter.*

Bilaga L. Erikson, F. (2019). *Delrapport ES3-2019-3-P3-12 - Koppling till agenda 2030.*

Bilaga M. Martelius, S. Johansson, S. Gustafsson, E. (2019). *Matlabkod*

Bilaga O. *Kostnadsdata för pellets från Ihus*

Bilaga P. *Broschyr från Ihus*

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

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