

BENCHMARKING AV MASSABRUK GENOM EXERGIBASERADE NYCKELTAL

RAPPORT 2021:769



Benchmarking av massabruk genom exergibaserade nyckeltal

ARVID ANDERSSON & OSCAR SPINOS

ISBN 978-91-7673-769-9 | © Energiforsk april 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt KVVU45111 Benchmarking av massabruk genom exergianalys inom Energiforsks skogsindustriella program.

Programmets handlar i första hand om energieffektivisering, att kunna nyttiggöra sidoströmmar och restvärme samt effektiv användning och återvinning av kemikalier. Projekt som genomförs inom programmet ska ge lösningar på upplevda problem på bruken och vara så generaliserbara så att flera har möjlighet att implementera forskningsresultaten inom en överskådlig tid.

Detta projekt har sitt ursprung i den utmaning som finns att jämföra olika pappers- och massabruks prestanda oberoende av deras olika produkter. Exergibegreppet har använts för att få en modell som ska kunna leda till insikt om möjlig kostnads- och resurseffektivisering.

Arbetet har genomförts av Arvid Andersson och Oscar Spinos vid Nordic Energy Audit. Projektets referensgrupp har varit Håkan Yderling (BillerudKorsnäs), Kristian Elvemo (SCA) och Henric Dernegård (Södra).

Forskningen har möjliggjorts ekonomiskt genom medel från ÅForsk, Valmet samt bruken:

Ahlstrom-Munksjö Aspa
Billerud Korsnäs, Frövi
Billerud Korsnäs Gävle
Billerud Korsnäs Gruvön
Billerud Korsnäs Karlsborg
Billerud Korsnäs Skärblacka
Holmen Iggesund
Metsä Board, Husum
SCA Munksund
SCA Obbola
SCA Östrand
Södra Cell Mönsterås
Södra Cell Mörrum
Södra Cell Värö

Samtliga har representanter i programstyrelsen.

Helena Sellerholm
Områdesansvarig
Termisk energiomvandling, Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Detta forskningsprojekt har utvärderat nya exergibaserade nyckeltal för massaindustrin i syfte att bidra till ökad resurs- och energieffektivitet. Slutsatserna visar att de nya nyckeltalen, den exergimässiga kostnaden (k^*) samt den termoeconomiska kostnaden (c), har potential att bidra till nya insikter om både resurs- och kostnadseffektivitet för industrin.

I projektet har fysisk och produktiv struktur för två verkliga massabruk definierats samt populerats med driftdata för året 2019 i syfte att analysera bruken ur ett exergimässigt perspektiv. Brukens huvudsakliga material- och energiströmmar har kartlagts, varpå en kostnadsallokering i form av exergimässiga och termoeconomiska kostnader utförts. Som komplement till analysen har även exergiverkningsgrader för varje enhetsprocess, och bruket i stort, beräknats.

Metoden, den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden, möjliggör att kostnadsbestämma varje kartlagt flöde i sett system utifrån uppströms genererade kostnader. Resultatet, i form av nyckeltalen k^* och c , ger en god indikation på ett systems prestanda, besitter hög spårbarhet och kan med fördel kompletteras med redan befintliga analysmetoder och nyckeltal.

Utvecklingsmöjligheter för metoden är bland annat att ett standardförfarande behöver utvecklas, då detta projekt primärt utvärderat metodens styrkor och svagheter. Även ytterligare arbeten med att vidareutveckla metoden är lämpliga.

Slutsatserna från projektet visar att de nya nyckeltalen är oberoende av produkttyper och kan indikera prestandan hos olika typer av systemlösningar, vilket medför att en databas innehållande normvärden (k^* och c) för olika produkter i branschen skulle kunna etableras.

Rekommendationerna utifrån projektet är att ytterligare bruks prestanda och produkter bör utvärderas i syfte att påbörja etableringen av en databas samt öka förståelsen för vad som påverkar faktorerna k^* och c .

Summary

This research project has evaluated new, exergy-based, Key Performance Indexes (KPI:s) for the pulp industry in order to contribute to an increased resource and energy efficiency. The conclusions shows that the new KPI:s, the exergetic cost (k^*) and the thermoeconomic costs (c), possess potential to contribute to new insights of both resource and cost efficiency for the industry.

In the project, physical and productive structures for one pulp mill and one integrated pulp and paper mill have been defined and populated with operating data for the year 2019 in purpose to analyse the mills from an exergy-based perspective. The main material and energy flows for each mill has been mapped, followed by an allocation of exergetic and thermoeconomic costs. As a complement to the analysis, evaluations of exergy effectiveness for each unit-process in the mill and as for the mills as whole has been calculated.

The method, the exergetic and thermoeconomic cost, enables determination of costs for every given flow in a system, based on upstream generated costs. The result, in form of the KPI:s k^* and c , gives a good indication on the performance of a system, possess a high traceability and can with advantage be complemented with already existing analyse methods and KPI:s.

Possible areas for development for the method is e.g that a standard approach for implementation of the method is needed, since this project primarily has evaluated the pros and cons of the method. Also, other work for developing the method is appropriate.

The conclusions from the project shows that the new KPI:s are independent of product types and can indicate the performance for different types of system solutions, which entails that a database containing normative values (k^* and c) for different product in the industry could be established.

The recommendations from the project is that the performance and products of additional mills should be evaluated in purpose to initiate the establishment of a database and also increase the understanding of which factors that has an impact of the new KPI:s k^* and c .

Extended English Summary

Introduction

The pulp and paper industry are one of the most energy intensive in Sweden, but maybe also one of the most innovative. Nevertheless, the sector faces multiple challenges. One example is how to increase the resource and energy efficiency, and in connection to this how to determine the overall performance of a mill. Traditional measurements and KPI:s, which often are related to energy, makes it difficult to draw conclusions on a mill's performance. In order to face this challenge and enabling a comparison between different mills, new benchmarking methods and KPI:s are needed. By using the concept of exergy, new KPI:s has been evaluated in this project.

The concept of exergy is based on the second law of thermodynamics and expresses the available amount of energy that can be used to achieve mechanical work. The concept uses a reference environment to declare exergy amounts, which in this study has been set to each mill's surrounding environment and monthly average temperatures.

Purpose and aim

The purpose of the project is therefore to investigate if new, exergy-based, KPI:s for the pulp industry can be useful for identifying potential to increased efficiency in the scope of resource and energy usage.

The aim of the project is to develop new benchmarking KPI:s for the pulp industry which consist of exergy calculations. Furthermore, the report aims to those who are active in the field of resource and energy efficiency and as well for those who works with decision making in the process industry.

Method and workflow

The project was initiated by describing the unit processes within a pulp mill, followed by identifying the most significant energy and material flows. To describe the unit processes, the taxonomy suggested by (1) were used and adjusted.

The taxonomy, and project, where implemented on two real Swedish mills, one pulp Mill operated by Södra Cell in Mörrum and one integrated pulp and paper mill operated by SCA in Munksund. This resulted in a mapping of processes (boxes in the figure) and flows (lines in the figure), shown in Figure 1 below.

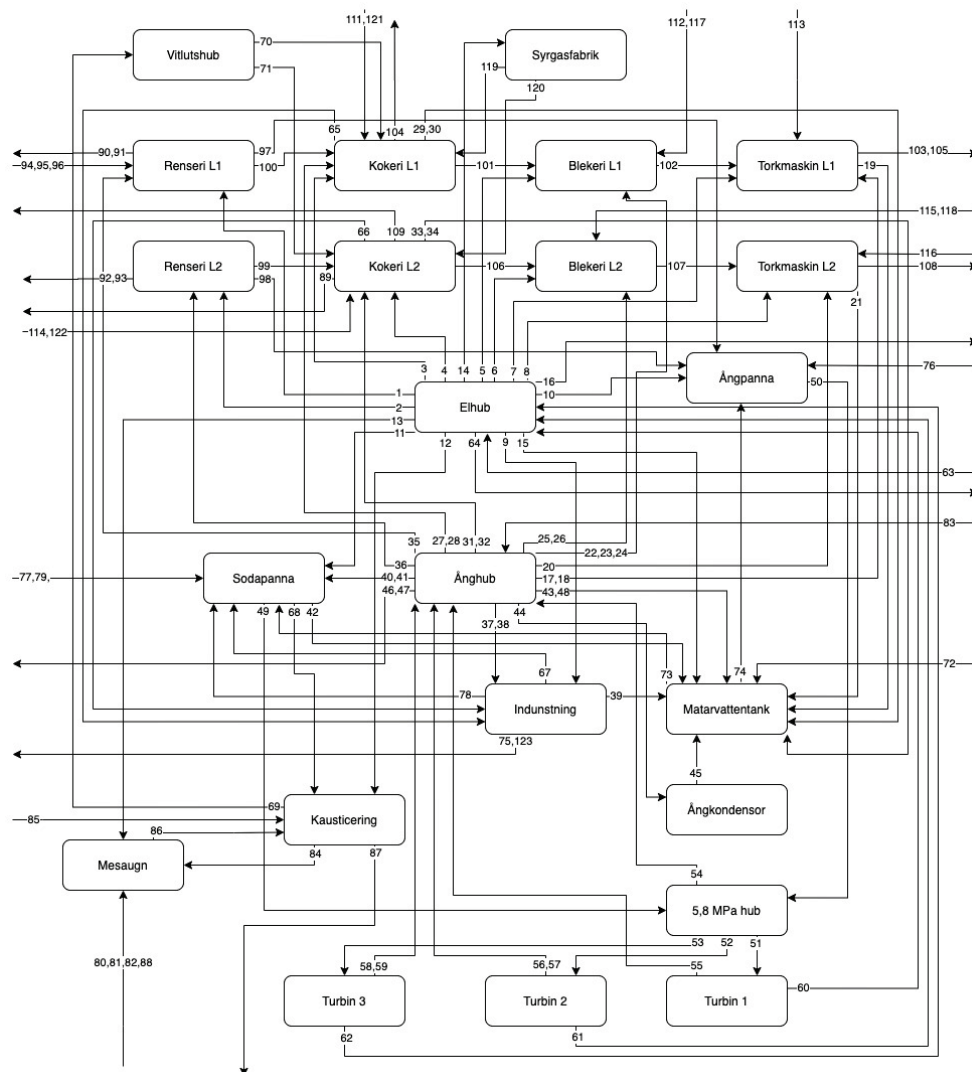


Figure 1, mapping of the processes and flows in the Mörrum Mill.

The flows and processes in the mapping were mainly focused on the so called “line of fibers” (the process of fibers going from wooden logs to pulp/paper), the chemical recovery process, steam and power systems and added external resources.

When the mapping was completed, the flows were populated with real data from respectively mill on a monthly basis for the year 2019 in order to calculate exergy content in each flow. When exergy content had been quantified, the method of “exergetic and thermoeconomic cost” which was introduced by (2), was implemented.

The method of “exergetic and thermoeconomic cost” answers the question of “Given a system whose boundaries has been defined and an aggregation level which specifies the subsystems, how can the costs of each flow within the system be defined?”. I.e the method allocates costs to each given flow in a system, based on upstream inefficiencies. The exergetic cost, indexed k^* , describes how resource efficient a flow has been produced, seen from an exergy-based perspective, while the thermoeconomic cost, indexed c , answer the same question but from an

economic perspective¹. Furthermore, the method uses a physical and production structure of the system, in order to achieve determine k^* and c . This structure is based on partly how the physical connections in the system look, and partly on the so called “RPI-classification” (Resource, Product, Residue (I)) (3), where an assessment is made on which classification each flow is accounted as.

As a complement to the analysis, and since all flows had quantified exergy content, exergy efficiencies for the mills as a whole and as for their unit processes were calculated.

Results and discussion

The results show that the method of exergetic and thermoeconomic cost can be used to evaluate the performance of different mills which has different system solutions and produces different types of products.

In Figure 2 below shows the exergetic cost-increase for the hardwood pulp produced in Munksund.

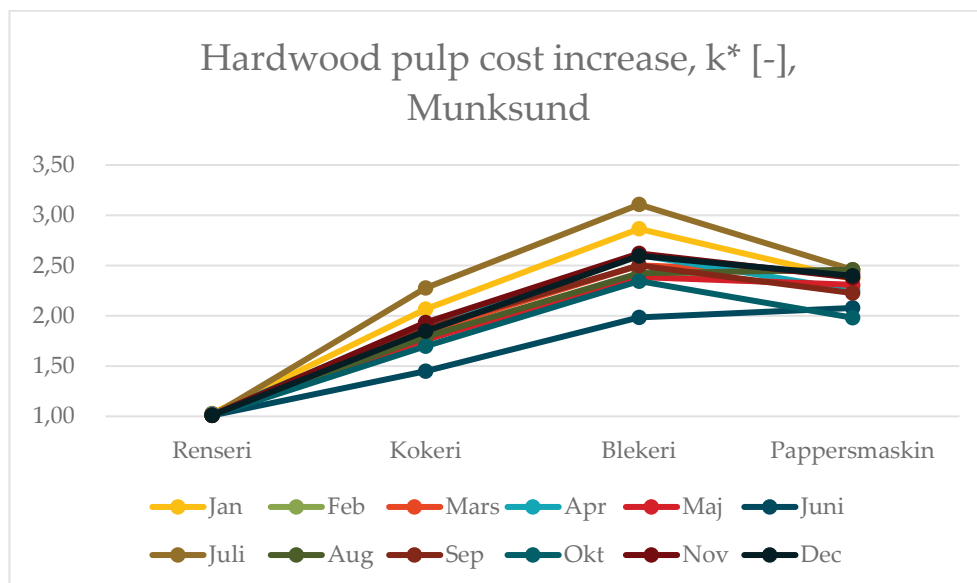


Figure 2, Hardwood pulp cost increase through the processes in Munksund.

The graph shows the exergetic cost-buildup from each processing step, until the step of bleachery- paper machine (blekeri-pappersmaskin). The reason to the results can partly be explained by analyzing the processes exergy efficiency, but further and deeper analyses are needed. Nevertheless, this is an example of a system solution where resources are invested at the early process stages in order to produce a product, which is then “blended” with less cost intensive products. In the real case of Munksund the hardwood pulp, which possess a relatively high production cost, is blended with softwood pulp and recovered cardboard, which both possesses a lower production cost. This is not the case for Mörrum, where the final production step is the pulp drying machines (torkmaskiner), see Figure 3 below.

¹ Please advise that only costs for resource usage are included, since data for fixed costs (e.g costs for maintenance, personnel etc.) not where available. However, fixed costs can be included in further work if desired.

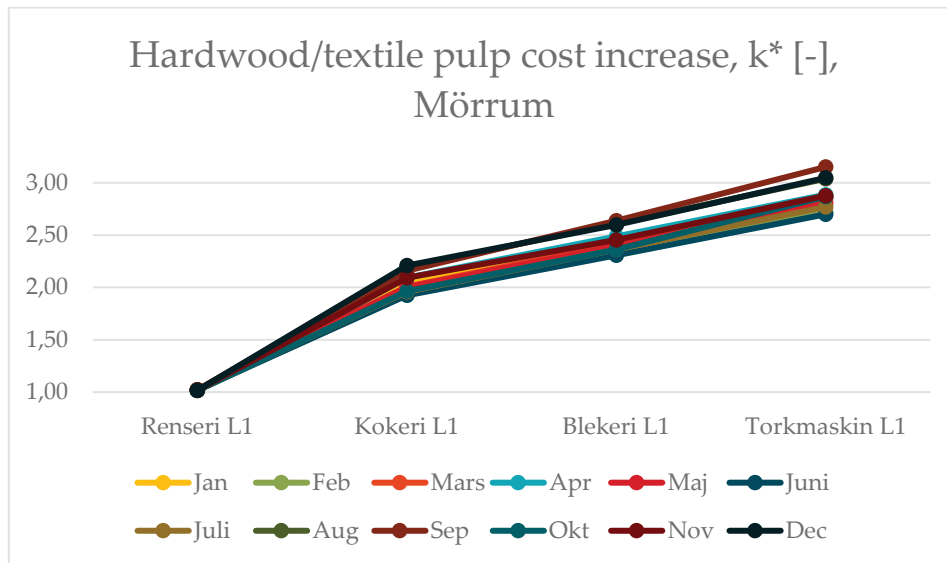


Figure 3, Hardwood/textile pulp exergetic cost increase through the processes in Mörrum.

In relation to the exergetic cost, the economic cost increase can be defined in a similar way, which is illustrated in Figure 4 below.

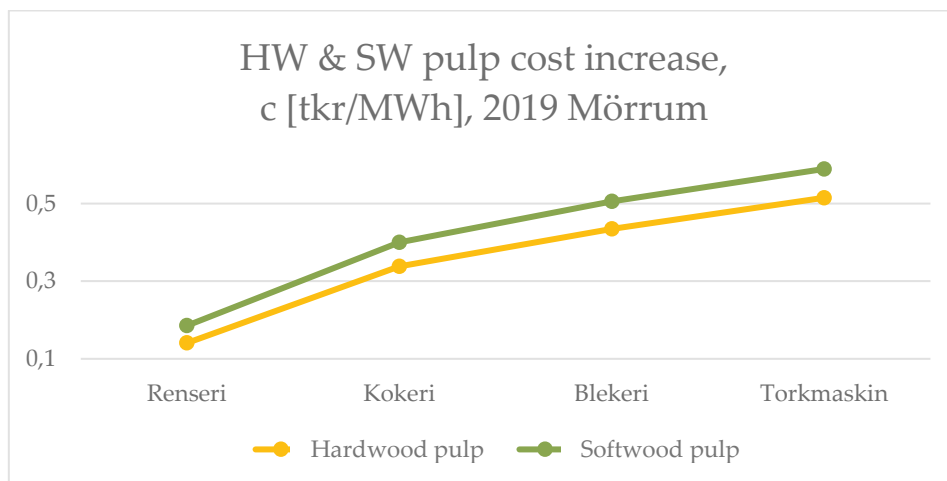


Figure 4, pulp thermoeconomic cost increase through the process in Mörrum

The relation between the exergetic cost increase, k^* , and the thermoeconomic cost increase, c , is interesting since the results indicates that the most resource-efficient solutions may not be the cheapest. For example, for mill managers a cost analysis for operating conditions is relevant. In the figure below is a cost assessment of internal resource usage.

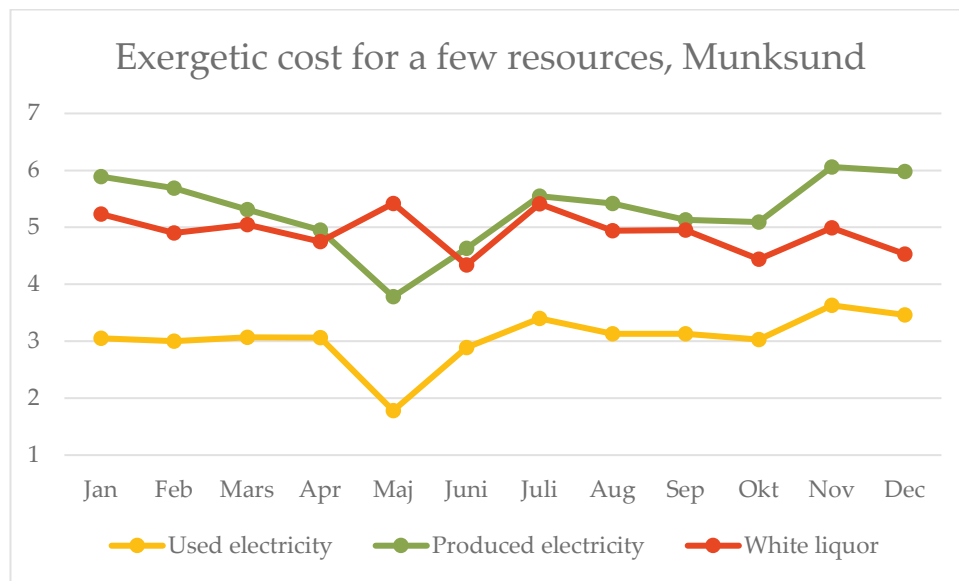


Figure 5, exergetic costs for internal resources, 2019 Munksund.

Here, it can be shown that the costs for the produced electricity from the turbine is larger than the usage of electricity in the processes. This is possible since both electricity production occurs at the mill, that electricity from the grid is being bought.

Furthermore, with access to data for internal costs (c), these can be compared with estimated market values of the products and be illustrated by marginals, costs vs. market value, shown in the figure below.

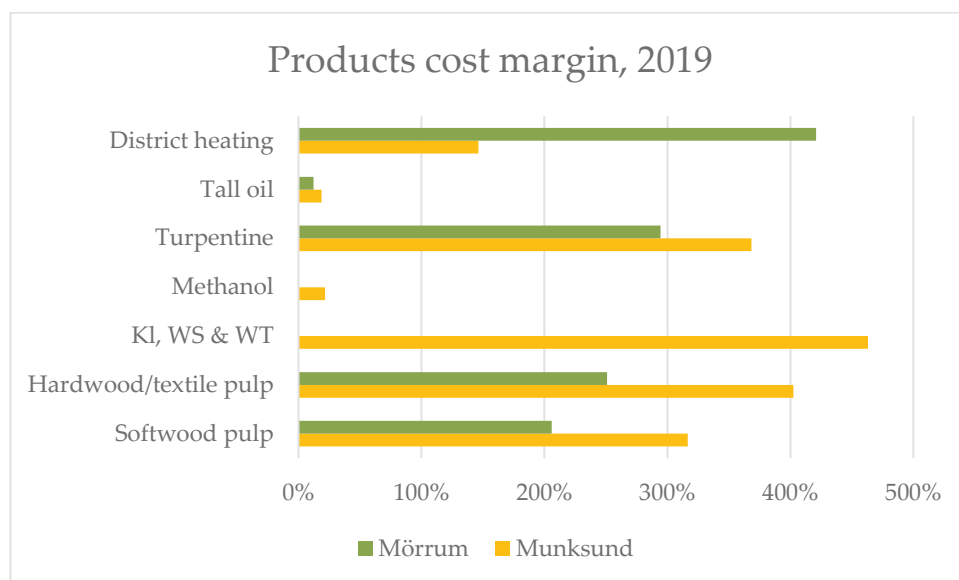


Figure 6, products cost margin for the year of 2019.

As for any method, several pros and cons exist. What has been identified in this project as major challenges are the lack of weighting factors for incoming resources, which as for the time being is regarded as “free”. In relation to this, a standard approach when implementing the method needs to be defined, since this project has focused on evaluate its potential rather than defining a working method. Another topic for discussion is the question of a products exergy content in relation to its quality. The concept of exergy is based on natural laws, and has nothing to

do with market mechanisms, where a high-quality product should have a high market value. The missing connection between exergy content and quality/market value aspects should be considered if the method of exergetic and thermoeconomic costs is used in the future for decision making.

Conclusions

The major conclusion from this project is as follows:

- The exergetic and thermoeconomic cost is suitable for the establishment of new KPI:s for benchmarking within the pulp and paper industry, since it can be implemented on all types of flows and systems.
- A combination of exergetic cost, thermoeconomic cost and exergy efficiency may contribute to new analyzing tools for the pulp and paper sector when evaluation resource, cost and energy efficiency.
- Additional mills should be evaluated by the exergetic and thermoeconomic cost in purpose to:
 1. Contribute to establish a KPI database where normative values (k^* and c) for different product types is defined.
 2. Contribute to an increased knowledge on which factors that are impacting the KPI:s and how they can be minimized.

Innehåll

1	Inledning	14
1.1	Bakgrund	14
1.2	Beskrivning av forskningsområdet	14
1.2.1	Exergibegreppet	14
1.2.2	Nyckeltal	16
1.3	Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet	17
1.4	Mål och målgrupp	17
1.5	Avgränsningar	17
1.6	Referensgrupp	18
2	Beskrivning av anläggningarna	19
2.1	SCA Munksund	19
2.2	Södra Cell Mörrum	19
3	Teori	20
3.1	Massabrukets enhetsprocesser	20
3.2	Exergi	22
3.3	Taxonomi och systembeskrivningar	22
3.4	Den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden	23
4	Metod	27
4.1	Arbetsgång	27
4.2	Metod för flödesberäkningar	27
4.2.1	Fiberlinjen	27
4.2.2	Lutcykeln och kemikalieåtervinningen	28
4.2.3	Bränslen	29
4.2.4	Kraft, ånga och övriga vattenflöden	29
4.2.5	Kompletterande flöden och processer	29
4.2.6	Referensomgivningens egenskaper	29
4.2.7	Ekonomiska beräkningar	29
4.3	RPI-klassifikation	30
5	Resultat och analys	31
5.1	Reviderad taxonomi	31
5.2	Kartläggning av Material och Energiflöden	32
5.3	Exergiverkningsgrader	34
5.3.1	Brukens totala exergiverkningsgrad	34
5.3.2	Exergiverkningsgrader för Munksunds processer	35
5.3.3	Exergiverkningsgrader för Mörrums processer	37
5.4	Exergimässig och termoeconomisk kostnad	40
5.4.1	Massans kostnadsökning genom processen, Munksund	40
5.4.2	Massans kostnadsökning genom processen, Mörrum	42
5.4.3	Kostnader för ett antal flöden, Munksund	44

5.4.4	Kostnader för ett antal flöden, Mörrum	46
5.5	Jämförelse mellan bruken	47
5.5.1	Skillnader i verkningsgrad	48
5.5.2	Jämförelse mellan exergimässig och termoeconomisk kostnad	50
5.5.3	Produktionskostnad för produkter och marginaler	53
5.6	Känslighetsanalys	55
6	Diskussion	57
6.1	Antaganden och Dataunderlagets påverkan	57
6.1.1	Generellt om antaganden	57
6.1.2	Fysiskt och kemiskt exergiinnehåll	57
6.1.3	Fördelning av tillsatskemikalier	57
6.1.4	Vit- och tunnlutens användning i systemet	58
6.1.5	Fiberlinjens innehåll av cellulosa, hemicellulosa och lignin	58
6.1.6	Brännlutens exergivärde	58
6.1.7	Grönlut	58
6.1.8	Avsaknaden av sekundärvarmeflöden i studien	59
6.1.9	Trädråvarans egenskaper	59
6.2	Metodikens styrkor och svagheter	60
6.2.1	Ingående resursflödets exergimässiga och ekonomiska kostnader	60
6.2.2	Produkters exergiinnehåll vs kvalitet	60
6.2.3	RPI – klassificering	61
6.3	Metodens Potential att utgöra nytt benchmarkingmått	61
6.3.1	Jämförelse mot andra etablerade nyckeltal	61
6.3.2	Lämplighet	62
6.3.3	Standardiseringsbehov för ökad repeterbarhet	63
7	Slutsatser	64
8	Framtida arbeten	65
9	Litteraturförteckning	67
10	Bilagor	70

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Massa- och pappersindustrin är en av de mest energiintensiva industrierna i Sverige, men också kanske den mest teknikintensiva. Detta till trots finns det flera utmaningar för industrin, bland annat hur man kan fortsätta förbättra resurs- och energieffektiviteten, och i samband med detta avgöra enskilda bruks övergripande effektivitet. Med traditionella mått, som ofta är energirelaterade, är det svårt att avgöra om ett bruk är mer eller mindre energieffektivt än ett annat, vilket försvårar beslutsfattande. En utmaning med dessa metoder är att de oftast antar att all utrustning och samtliga enhetsprocesser arbetar effektivt eller som avsett, vilket inte alltid är fallet (4).

För att möta dessa utmaningar är nya metoder för att utvärdera massa- och pappersbrukens effektivitet nödvändig. Genom användandet av exergibegreppet utvärderas processer och flöden inte enbart kvantitativt, utan även ur ett kvalitetsmässigt perspektiv (4). Detta medför att resurseffektiviteten kan utvärderas på andra sätt än tidigare och kan påvisa var stora besparingsmöjligheter existerar, exempelvis genom att utvärdera förluster och de interna material- och energiflödena utifrån potential till ökad värdeförädling (3).

För att kunna besvara frågan gällande ett bruks energieffektivitet samt kunna erbjuda en jämförelse mellan olika bruks effektivitet behövs ett eller flera nya benchmarkingmått. Genom användning av exergibegreppet kan energikvaliteten hos förlustflöden samt exergidestruktion ligga till grund för sådana mått.

1.2 BESKRIVNING AV FORSKNINGSOMRÅDET

1.2.1 Exergibegreppet

Exergibegreppet grundar sig på konceptet gällande termodynamisk jämvikt och termodynamikens andra huvudsats. Om ett system exempelvis har en temperatur- eller tryckdifferens, en annan kemisk sammansättning etc. jämfört en viss referensmiljö, kan arbete uträttas om systemet tillåts utbyta värme eller materia med referensmiljön. Vidare är exergimängden i ett system som genomgår en process endast oförändrad om processen är reversibel, vilket i praktiken är omöjligt. I verkliga processer är fullständig reversibilitet omöjligt på grund av spontana processer och reaktioner, vilket betyder att exergi alltid förstörs när en process sker². Därmed kan exergi anses vara ett idealitetsmått, dvs. en process är ideal om exergimängden innan en process är densamma som exergimängden efter en process. Nedan följer ett antal karaktäriserande drag för exergi (5):

- Exergin i ett system ökar ju mer det avviker från omgivningen.

² Notera att detta inte är fallet för energi, där man oftast talar om balanser när en process ska utvärderas. Om inflödet av energi = utflödet av energi råder en balans, eftersom energi inte kan förstöras, endast omvandlas.

- Exergi är den användbara/tillgängliga delen av energi, och besitter därmed ett värde.
- Exergiverkningsgraden är ett mått på graden av idealitet.

Kemiska massabruk har tidigare varit föremål för exergianalyser. Bland annat har Munksunds bruk tidigare studerats där det konstaterades att processer med någon form av uppvärmning ofta har en låg exergiverkningsgrad, i detta fall främst i sodapannan och vid ångproduktion (6). Andra arbeten har genomförts på kemiska massabruk i Kanada där man har undersökt processspecifika nyckeltal, där exergibegreppet använts (7). Kausticeringsmetoder har utvärderats med hjälp av exergianalyser där resultaten bidragit till att påvisa möjliga fördelar med tekniksiften (8). Ytterligare, mer holistiska, analyser över massaprocessen har påvisat att värme- och entropibalanser ger olika resultat, och därmed kan ge olika typer av effektiviseringsrekommendationer (9). Andra studier som fokuserat på entropigeneration i massabruk har gjort ansatser till att härleda vart effektiviseringspotential kontra oundvikliga förluster uppstår (10).

En annan metod, mer vanligt förekommande inom industrin och som också är sprungen ur termodynamiska samband, är pinchanalys. Det är en enkel, visuell och systematisk metod som syftar till att minska den totala värmeanvändningen i ett system genom att påvisa vart växlingar av flöden med behov eller överskott av värme bör ske (11). Metoden har visat sig vara användbar inom massa- och pappersindustrin, även om den har en del bister. Ett problem är att den föreslagna växlingen kan vara mellan två strömmar som är placerade med stora fysiska avstånd, vilket gör värmeväxlingen omöjlig att genomföra i praktiken. Ett annat problem är att pinchanalysen är begränsad till termiska flöden och temperaturparametrar, vilket gör att metoden enbart hanterar värmeväxlarnätverk och inte kan integreras med övriga delar av systemet som består av andra typer av processer (11). Det medför att pinchanalysen enbart är en metod för att förbättra strukturen i ett värmeväxlarnätverk under specifika förutsättningar, snarare än en optimeringsmetod eftersom en målfunktion för hela processen saknas (12).

Till skillnad mot pinchmetodiken, tar exergibegreppet hänsyn till samtliga processparametrar (inkluderat parametrar gällande temperatur, tryck och kemisk sammansättning). Metoden utvärderar industriella processer utifrån sin exergibalans och möjliggör kvantifiering och uppföljning av ineffektivitet i processer i syftet att förbättra dessa. Exergianalysen kan indikera förbättringspotentialen i en process, men den kan inte avgöra om en förbättring är genomförbar i praktiken eller vad som krävs för att genomföra den. (11)

Förbättringspotentialen, ofta uttryckt som exergiverkningsgraden över en process, är det måttet som är mest vanligt förekommande inom ämnet. Viss kritik har dock riktats mot att den konventionella exergianalysen snarare är ett utvärderingsmått än ett förbättringsmått (11). Svårigheter att tolka resultatet från en exergianalys är vanligt förekommande, vilket gör att nya sätt är nödvändiga för att kunna dra nytta av detta kraftfulla verktyg. Genom mer avancerade tillämpningar kan nyttan ytterligare ökas (11).

Ett exempel på en mer avancerad tillämpning är när exergidestruktionen, förstörelse av exergi över en process eller ett system, analyseras utifrån undvikbara

och oundvikliga delar. Genom att identifiera vilka parametrar som påverkar den undvikbara exergidestruktionen, kan den realiserbara potentialen bestämmas. En mer avancerad exergianalys ger ytterligare och mer exakt information kring utformning och drift av energiomvandlingssystem. (11)

Exergiverkningsgraden, som ovan nämnt, är ett sätt att utvärdera potentialen till ökad förbättring i en enskild process eller system. Ett problem, som kan uppstå, är att den aktuella prestandan jämförs med en ideal. Ideala processer eller system existerar inte verkligheten, där vissa exergiförluster är oundvikliga och ingen förbättring kan minska dem (11). Andra metoder för att finna hur stor förbättringspotential som finns är att göra simuleringar, vilket kan användas för att prediktera utfall från en viss åtgärd eller förändring. En annan metod kan vara att jämföra empiriska resultat från olika system och processer med varandra vilket kan bidra till mer praktiska tillämpningar, till skillnad från om jämförelser sker mot ideala processer eller avancerade simuleringsmodeller.

1.2.2 Nyckeltal

Ett nyckeltal är en form av indikator. Beroende på område skiljer sig definitionen av vad som är en indikator, men generellt sett är en indikator ett värde som ger en indikation (13). Vad som indikeras beror på vad som beaktas, men generellt sett ger det en indikation på hur antingen en funktion eller företeelse fungerar. Vilken form en indikator har varierar. Vissa menar att en indikator är ett absolut värde medan andra menar att en indikator är ett förhållande eller andra sammansättningar av värden (13). Indikatorer har flera användningsområden, bland annat kan de vara hjälpsamma vid analys och beslutsfattande (14). Inom industrin används flera olika typer av nyckeltal som indikatorer. Energirelaterade nyckeltal används i stor utsträckning och tjänar ofta syftet att övervaka, analysera och jämföra (benchmarking) energiprestandan (14).

Pappers- och massaindustrin har tidigare varit föremål för studier gällande utvärdering av processers prestanda. Oftast har processerna utvärderats genom att normalisera indikatorer gentemot produktionstakten (4). I en studie framgår det att pappers- och massaindustrin uttryckt utmaningar med att utvärdera processers faktiska prestanda och att det saknas förklarande indikatorer till låg prestanda och förbättringsmöjligheter (14). Största problemet till framtagandet av nya nyckeltal är bland annat brist på resurser och att varje bruk anses vara unikt och behöver behandlas därefter. I en annan studie togs ett flertal dimensionslösa indikatorer fram med syftet att beskriva fysikaliska och kemiska fenomen som sker i enhetsprocesser och hur kan dessa formuleras till dimensionslösa nyckeltal som bäst beskriver enhetsprocessers prestanda (4). För varje bruk och för varje nyckeltal behöver sedan ett optimalt spann identifieras, för att kunna övervaka prestandan över dom individuella enhetsprocesserna över tid.

1. Exergibaserade nyckeltal förekommer i andra studier, om än inte i någon större utsträckning. I en studie undersöks hur exergianalyser kan utgöra ett benchmarkingmått för avloppsreningsverk (15). Exergiverkningsgraderna skiljde sig kraftigt åt, trots att avloppsreningsverken processmässigt var lika. Trots detta ansågs metoden

vara användbar för att utvärdera den övergripande prestandan hos avloppsreningsverk.

Exergibaserade nyckeltal har även varit föremål inom massaindustrin tidigare, bland annat i en studie genomförd vid ett kemiskt massabruk i Kanada där fokusområdet var uppvärmning av vatten (16). I studien konstaterades att användandet av exergi möjliggör övervakning av energidegradation i en process samt påvisar var möjliga besparingar kan göras.

1.3 FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSMOMÅDET

Detta projekt utgör ett första steg i visionen att etablera nya nyckeltal som kan utgöra ett oberoende mått på kvalitetsförbrukning (exergianvändning) inom tillverkande industri. Vid ett lyckat införande av de nya nyckeltalen på bred front skulle exempelvis normvärden för resurseffektiv produktion kunna presenteras samt att industrin skulle kunna erhålla en ökad kunskap kring varför vissa systemlösningar är att föredra framför andra.

I projektet utvärderas främst huruvida de nya nyckeltalen i praktiken är möjliga att implementera på verkliga bruk, snarare än att fokusera på analyser över brukens prestanda och förbättringsmöjligheter.

Projektets syfte är därav att undersöka om nya, exergibaserad, nyckeltal för sulfatmassabruk kan vara användbara för att identifiera effektiviseringspotential gällande resurs- och energianvändning.

En stor del av detta arbete har grundat sig i att kartlägga och exergimässigt kvantifiera de huvudsakliga material- och energiflöden som strömmar mellan de enhetsprocesser som definierats i taxonomin på anläggningarna.

1.4 MÅL OCH MÅLGRUPP

Projektets mål är att ta fram benchmarkingmått för sulfatmassabruk som utgörs av exergiberäkningar. Måtten ska utvärderas för att avgöra om det kan bli en branschstandard, som baseras på exergidestruktion och förlustflöden.

Rapporten riktar sig främst till den som idag arbetar med eller kan komma att arbeta med energi- och processfrågor inom massaindustrin, samt till de som arbetar med beslutsunderlag i olika former. Studien har även en praktisk inriktning, vilket innebär att metodiken relativt enkelt ska kunna tillämpas på andra massabruk

1.5 AVGRÄNSNINGAR

Massaprocessen är komplex och med tillhörande stödprocesser kan en kartläggning av flöden bli omfattande och mycket resurskrävande. För att göra detta projekt hanterbart har ett antal avgränsningar varit nödvändiga:

1. Fokus för kartläggningen av flöden som utgör massaprocessen har bestått av:

- a. Fiberlinjen
 - b. Kemikalieåtervinningen
 - c. Ång- och kraftsystem
 - d. Tillförda externa resurser (bränslen, diverse kemikalier, etc.)
2. Systemgränsen är satt kring massaproduktionen och dess processer samt, i Munksunds fall, även linerproduktionen. Sågverk och liknande som kan ligga i anslutning till bruken redogörs för som externa flöden som inkommer/utgår från systemet.
 3. All använd data har på förhand existerat. Underlaget som används har utgått från månadsenergirapporter (eller motsvarande) och kompletterats med specifika driftdata.

1.6 REFERENSGRUPP

Referensgruppen för arbetet som är utsedd av Energiforsk består utav:

- Håkan Yderling, Billerud Korsnäs Gävle
- Kristian Elvemo, SCA Munksund
- Henric Dernegård, Södra Skogsägarna

Utöver referensgruppen har ett antal personer bistått i arbetet:

- Tobias Richards, professor inom resursåtervinning på Högskolan i Borås, bistått som områdesexpertis inom exergiområdet och massaindustrins komplexa processer.
- Mikael Wigermo, energisamordnare på Södra Cell Mörrum
- Drifttekniker och ingenjörer på SCA Munksund och Södra Cell Mörrum som bidragit med framtagande av dataunderlag.

2 Beskrivning av anläggningarna

2.1 SCA MUNKSUND

SCA Munksund AB driver en anläggning för skogsindustriell verksamhet i Skuthamn, Piteå Kommun, Norrbottens län. Anläggningen omfattar produktion av sulfatmassa, returfibermassa och kraftliner med tillhörande hjälpavdelningar samt en hamnanläggning. Den årliga produktionen uppgår till cirka 400 000 ton och bruket sysselsätter för närvarande 290 personer.

Bolaget har under 2000-talet arbetat med att öka förädlingsgraden, göra processen mer effektiv och samtidigt minska inverkan på miljön. Ett flertal större investeringar i ny processutrustning har genomförts samtidigt som äldre utrustning tagits ur drift. Exempel på nyinvesteringar under 2000-talet är:

- Ny bioeldad mesaugn
- Modernisering av Sodapannan
- En modern fastbränslepanna
- Ombyggnation och förbättring av pappersmaskinen
- Nytt vitlutsfilter och ny slampress för grönlut

I övrigt har bruket ett kraftunderskott, vilket gör att man köper in elektricitet från elnätet i varierande omfattning.

2.2 SÖDRA CELL MÖRRUM

Södra Cell Mörrum tillverkar pappers- och dissolvingmassa till olika pappers- och textiltillverkare. Det kemiska massabruket ligger i Mörrums kommun i Blekinge och sysselsätter ca. 335 personer. År 2019 producerades omkring 434 000 ton massa, fördelat på ca. en tredjedel dissolvingmassa och två tredjedelar pappersmassa.

Bruket har tre mottrycksturbiner vars elproduktion täcker det interna elbehovet och överskottet säljs. Ångan på bruket härstammar främst från sodapannan, men en barkpanna används vid behov. Bruket har ett ångöverskott, vilket gör att en viss mängd ånga släpps ut. Kokningsprocessen sker batchvis i två olika linjer för barrvedsmassa och textilmassa.

Sedan brukets start 1962 har flertalet modifieringar av fabriken skett. Senaste genomförda modifieringar är:

- Ny flisfabrik
- Ny indunstning
- Ny brännare i mesaugn

3 Teori

3.1 MASSABRUKETS ENHETSPROCESSER

I följande kapitel ges en mycket kort beskrivning över de enhetsprocesser ett massabruk utgörs av.

Vedgård

Vedgården agerar samlingsupplag och lager för den inkommande träråvaran, massaved. Förutom lagring, kan i vissa fall föruppvärmning av massaveden innan det når renseriet ske.

Renseri

Renseriets syfte är att avbarka den inkommande vedråvaran och sönderdela denna för att få en mer lättbearbetad råvara i form av lagom stora flisbitar. Detta sker genom att rundved avbarkas i stora roterande trummor varpå den flisas i en huggmaskin. Barken som avlägsnas används antingen internt på bruken, exempelvis till ångproduktion, eller säljs vidare.

Kokeri

Kokeriets huvudsyfte är att skilja ligninet från cellulosan genom en kokprocess där vitlut tillsätts. Vitluten innehåller natriumhydroxid (NaOH) och natriumsulfid (Na_2S) som behövs för ligninutlösningen men även andra, företrädesvis icke-verksamma, kemikalier kan förekomma. Efter att vitluten har reagerat med och löst upp ligninet i kokeriet har den "omvandlats" till svartlut, som består utav de använda kokkemikalierna och organisk substans, i form av det utlösta ligninet och diverse orenheter som kommer med vedråvaran. Den kokta massan går vidare till försileri och tvätt medan svartluten går vidare till indunstningen.

Försileri och tvätt

Efter kokeriet innehåller massan fortfarande orenheter såsom sand, grus och kvistar, som avskiljs med hjälp utav diverse utrustning, exempelvis tvättutrustning, silplåtar och hydrocykloner. Det organiska materialet kokas om i kokeriet, varpå det återförs till massan och icke-organiska material rensas bort.

Syrgasblekeri

När massan når blekeriet har den en brun färg vilken oftast måste blekas till en viss ljushetsgrad som baseras på slutprodukten användningsområde. Blekningen kan ske på en mängd olika sätt med hjälp utav olika tekniker och detta processavsnitt tillsätts primärt syrgas för att åstadkomma deligninfieringen som medför ljushetsökningen.

Blekeri

Syftet med blekeriet är densamma som för syrgasblekeriet, men utförs med andra insatskemikalier.

Torkmaskiner

Torkmaskinerna syftar till att torka massan till en bestämd torrhalt. Massan matas ut på en duk och genomgår termisk och mekanisk torkning och urvattnings.

Indunstning

Indunstningen syftar till att öka torrhalten på svartluten för en effektiv förbränning i sodapannan. En del restprodukter avskiljs från vätskefasen, exempelvis tallolja.

Sodapanna

Sodapannan har två huvudsyften. Dels är det att möjliggöra återvinning av kemikalier men även agera som en förbränningsanläggning för att generera ånga och el. Genom förbränning av svartlut återvinns de använda kokkemikalierna för vidare behandling i den smälta som löper längst med pannans botten. Förbränningen möjliggör att stora mängder högtrycksånga kan produceras, vilket används för att möta brukets ång- och elbehov.

Kausticering

Kausticeringen syftar till att regenerera vitluten utifrån sodapannans renade smälta, s.k. grönlut, tillsammans med kalk. I flertalet kausticeringskärl reagerar natriumkarbonat med kalciumhydroxid och omvandlas till natriumhydroxid och kalciumkarbonat (mesa).

Mesaombränning

Mesaombränningens syfte är att återvinna mesan och producera (bränd) kalk. Ombränningen sker i en ugn där mesa matas in, hettas upp och omvandlas till bränd kalk.

Turbiner

Turbiner används för att dels för att kontrollera färskångans egenskaper (i huvudsak mottrycksturbiner), som distribueras ut till brukets andra processer, samt för kraftgeneration (i huvudsak kondenssturbiner).

Ångpanna

Enhetsprocessen "Ångpanna" är ett samlingsnamn för diverse pannor vars syfte är att förse samtliga övriga processer med färskånga. I det ingående matarvattnet som ska förångas tillförs behandlat råvatten för make-up av förlorat kondensat och samlas i en s.k. matarvattentank, varpå det matas in i pannans värmeväxelsystem. Som bränsle till pannorna används bland annat bark, olja och spillprodukter från produktionen (exempelvis wellpapprejekt och metanol). Även elpannor är en typ av ångpanna.

3.2 EXERGI

Exergi anges som en summa utav de fem olika typerna av exergi, se nedan:

$$b = b_{po} + b_{ki} + b_{ph} + b_{ch} + b_{nu}$$

Där, b_{po} är potentiell exergi, b_{ki} är kinetisk exergi, b_{ph} är fysisk exergi, b_{ch} är kemisk exergi, b_{nu} är nukleär exergi, samtliga angivna i Joule [J]. I denna studie används enbart den fysiska och kemiska exergimängden. (17)

Den fysiska exergin definieras som:

$$b_{ph} = h_{ph} - T_0 s_{ph}$$

Där h_{ph} är entalpi [J], T_0 är initial temperatur [K] och s_{ph} är entropi [kJ/K]. (17)

För gasblandningar och ideala vätskeformiga blandningar kan den kemiska beräknas enligt nedan (17). I fallet av andra typer av flöden kan högertermen ignoreras (3).

$$b_{ch} = \sum_i y_i b_{chi} + RT_0 \sum_i y_i \ln(y_i)$$

Där y_i är andelen av ett specifikt ämne i en substans [-] och b_{chi} är det aktuella ämnets kemiska exergistandardvärde [J/mol] och R är den allmänna gaskonstanten.

För bränslen kan en förenkling göras och den kemiska exergin kan beräknas enligt ekvationen nedan:

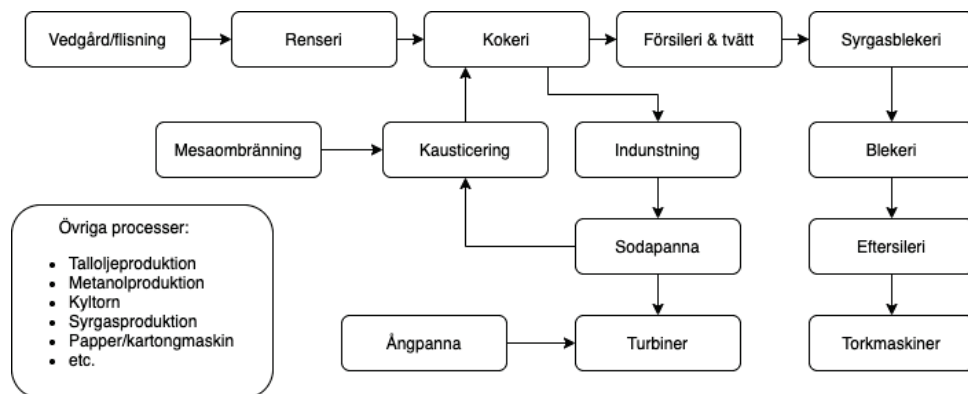
$$b_{ch} = f_h \cdot H_{H,L}$$

Där f_h är den empiriska koefficienten och är nära 1 och $H_{H,L}$ det högre (för solida och vätskeformiga bränslen) alternativt lägre värmevärdet (för gasformiga bränslen) [J/kg]. (17)

3.3 TAXONOMI OCH SYSTEMBESKRIVNINGAR

Taxonomi definieras enligt Nationalencyklopedin (18) som "vetenskapen om organismernas klassificering, dvs. beskrivning, namngivning" och används i detta arbete för att beskriva de huvudsakliga enhetsprocesserna i ett pappers- och massabruk. Vanligtvis refererar "taxonomi" till att namnge organismer i ett naturvetenskapligt sammanhang, men används i denna studie för industriell tillämpning i syfte att beskriva de huvudsakliga enhetsprocesserna i ett massabruk.

Den ursprungliga taxonomin som används i detta projekt baseras på resultat från forskningsprojektet Carbonstruct (1), där en ansats till att kategorisera olika branschens huvudsakliga enhetsprocesser har formulerats. I Figur 1 nedan visas den ursprungliga taxonomin för projektet, kompletterad med kategorin "övriga processer", med tillhörande huvudflöden.



Figur 1. Huvudsaklig taxonomi för ett massabruk. Reviderad från forskningsprojektet Carbonstruct (1).

Observera att taxonomin har reviderats under arbetets gång, vilket redogörs för i kapitel 5.1.

3.4 DEN EXERGIMÄSSIGA OCH TERMOEKONOMISKA KOSTNADEN

Exergibalanser över ett system möjliggör allokering och beräkning av irreversibiliteter i produktionsprocesser samt identifiering av uppkomster till ineffektivitet. Vid betraktelse av enbart exergiverkningsgrader fås information kring irreversibiliteter vid produktionsprocesser eller totalt för systemet, vilket har visats vara värdefull information, men dock otillräcklig. (2)

Genom att beskriva det betraktade systemets fysiska och produktiva struktur, kan systemets exergimässiga och termoeconomiska kostnad beräknas. Metoden för kostnadsbestämelse besvarar följande fråga:

”Givet ett system vars gränser har definierats och en aggregationsnivå som specificerar subsystemen inuti systemet, hur fås kostnaden av samtliga flöden inom systemen?” (2)

I denna studie tas ett helhetsgrepp på ett massabruks huvudsakliga energi- och materialströmmar. Av denna anledning används benämningen *system* för att referera till bruket i sin helhet, och *flöden*, som refererar till de fysiska material- och energiflödena i bruket, exempelvis massa- eller ångflöden.

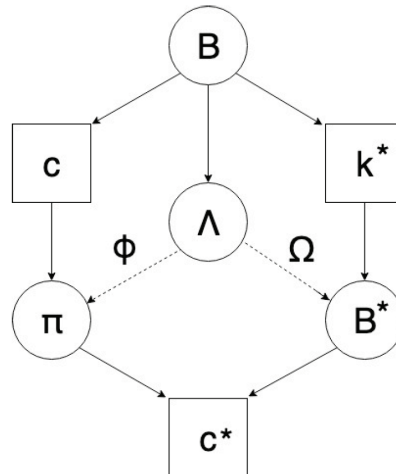
För att etablera nya nyckeltal undersöks i denna studie två storheter:

1. Exergimässig kostnad, k^* [-]
2. Termoeconomiska kostnad, c [tkr/MWh]

Den exergimässiga kostnaden, k^* , beskriver hur pass resurseffektivt, sett utifrån ett exergimässigt perspektiv, ett flöde har producerats. Detta uttrycks i termer av exergimängd investerat uppströms, dividerat med exergimängd i det aktuella flödet. Dvs. MWh investerat/MWh framställt flöde, vilket resulterar i en enhetslös storhet.

Den termoeconomiska kostnaden, c , beskriver även den hur pass resurseffektivt ett flöde har producerats, men utifrån ett ekonomiskt perspektiv. Termerna som används är tusen kr investerat/MWh framställt flöde, vilket resulterar i en storhet vars enhet definieras som tkr/MWh.

Metoden uttrycker ytterst hur mycket resurser som investerats i ett system för att framställa ett givet flöde. I Figur 2 nedan ges en schematisk beskrivning över metodens ingående delar.



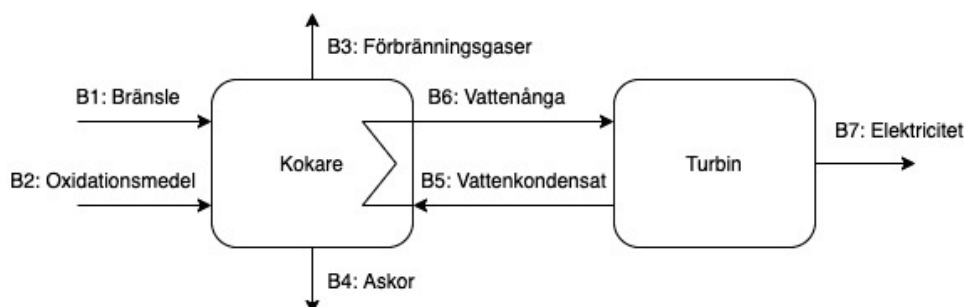
Figur 2. Metodiken för beräkning av exergimässig och termoeconomisk kostnad (2) (3) där Λ -matrisen beskriver den fysiska och produktiva strukturen enligt RPI-klassifikationen. B är en vektor innehållande betraktade flödens exergimängder. B^* är den exergimässiga kostnadsvektorn och π den termoeconomiska. Φ är den tilldelade kostnadsvektorn och Ω den tilldelade exergikostnadsvektorn. Faktorerna c , k^* samt c^* fås genom att dividera de angränsande matriserna i figuren.

Som Figur 2 visar bestäms k^* och c (samt även c^* , som inte beaktas i detta arbete) utifrån ett antal komponenter.

- Exergimängder som flöden inom systemgränsen besitter (B)
- Den fysiska och produktiva strukturen som definieras enligt RPI-metodiken (se nedan) för det betraktade systemet, (Λ).
- Ingående exergivärden respektive ekonomiskt värde på flöden, per enhet, som passerar systemgränsen (Ω resp. Φ)
- De tilldelade exergimässiga respektive termoeconomiska kostnadsvektorerna (B^* resp. π)

Observera att B , B^* och π är kostnadsvektorer ($n \times 1$) medan Λ är en ($n \times n$) matris som baseras på RPI-klassificeringen.

Den s.k. RPI-klassifikationen är en bedömning av vilka flöden i systemet som anses vara en resurs (R), produkt (P) alternativt förlust (I). I Figur 3 nedan visas ett exempel på en ångpannas och turbiners respektive in- och utgående flöden samt systemets RPI-klassifikation.



	Resurs R	Produkt P	Förlust I
Kokare	B1 + B2	B6 - B5	B3 + B4
Turbin	B6 - B5	B7	-

Figur 3. Exempel på RPI-klassificering

För det givna systemet i Figur 3, resulterar matrisuppställningen Λ i Tabell 1 nedan:

Tabell 1, definition av Λ baserat på kokaren och turbinen i Figur 3

			Flödesindex, n antal kolumner						
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Allokering, n antal rader	P1	Kokare	1	1	-1	-1	1	-1	0
		Turbin	0	0	0	0	-1	1	-1
	P2	Resurs, B1	1	0	0	0	0	0	0
		Resurs, B2	0	1	0	0	0	0	0
	P3	Förlust, B3	0	0	1	0	0	0	0
		Förlust, B4	0	0	0	1	0	0	0
	P4	Resurs B6 - B5	0	0	0	0	1	$-\frac{B5}{B6}$	0

Λ -matrisen består enligt ovan av en ekvation för varje flöde, vilket resulterar i en $n * n$ matris. Kolumnerna B1-B7 indikerar det aktuella flödet, medan respektive rad har olika syften enligt P1-P4:

P1: En fysisk beskrivning, där varje process får en egen rad. Flöde indexeras med

- 1, för inkommande flöde till processen
- -1, för utgående flöde från processen
- 0, då flödet inte associeras med processen.

P2: Beskriver vilka resurser som inkommer till systemet

- 1, för inkommande systemresurs
- 0, om inte ovan är uppfyllt

P3: Beskriver vilka förluster som lämnar systemet

- 1, för utgående systemförlust
- 0, om inte ovan är uppfyllt

P4: Beskriver kostnadsallokering mellan två produkt- och/eller resursflöden

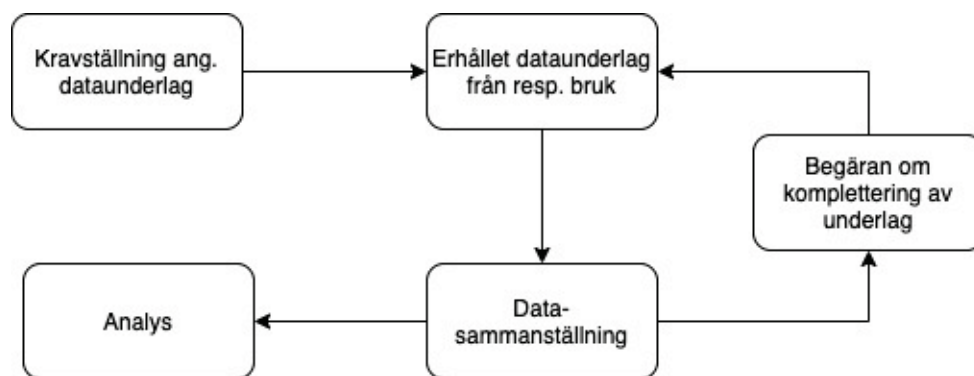
- 1, För det flöde som ska kostnadsallokeras
- $-\frac{\text{exergimängd flöde 1}}{\text{exergimängd flöde 2}}$, för det flöde som kostnaden ska associeras med
- 0, om flödet inte ska associeras med en kostnadsallokering.

I detta arbete har varje beaktat flöde definierats enligt denna metodik. För en mer ingående beskrivning av den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden samt RPI- klassificering hänvisas läsaren till (2) samt (3).

4 Metod

4.1 ARBETSGÅNG

Utgångspunkten för arbetet var att använda så mycket som möjligt av det existerande underlag som respektive bruk kontinuerligt arbetar med, exempelvis månadsenergirapporter, för att kartlägga energi- och materialströmmar. För detta skickades en kravställning ut som specificerade vilken typ av data som var av intresse för studien. Under arbetets gång har avstämningsmöten kontinuerligt hållits för att dels kontrollera arbetets progress, dels för att ha en öppen dialog över vilket dataunderlag som varit möjligt att tillhandahålla. Se Figur 4 för en förenklad bild över projektets arbetsgång.



Figur 4. Förenklad bild över arbetsprocessen

Metoden för nyckeltalsgenerering, den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden som introducerades i kapitel 3.4, var på förhand utvecklad (se (2)), vilket innebar att endast dataunderlag krävdes tas fram.

4.2 METOD FÖR FLÖDESBERÄKNINGAR

Vid beräkningar har främst värden från bruken använts. Vid avsaknad av underlag har värden från andra källor använts, vilka kan ses i bilaga 1.

4.2.1 Fiberlinjen

Fiberlinjen syftar till att beskriva vedfibers väg genom massabrukets processer, där den genomgår följande processer:

Renseri – Kokeri – Blekeri – Torkmaskin/Pappersbruk (TM/PB)

Exergimängder i renseriet beräknats utifrån summan av ingående m³ rundved och flis samt mängd bark som antingen säljs eller används internt på bruket. Värmevärden för bark var känt och således kunde dess exergivärde beräknas. Ingående rundved och flis beräknades genom att ta hänsyn till torr-rådensiteten samt tillhörande värmevärde. Då rundved, bark, flis och spån antogs ha samma

temperatur som referensomgivningen, är den temperaturberoende exergimängden försumbar. Använda konstanter återfinns i bilaga 1.

Massan efter kokerierna antogs bestå av enbart cellulosa och lignin. I varje processteg beräknades massans exergimängd utifrån förändringar av kappatalet, med känd mängd slutprodukt som ursprungsvärde.

4.2.2 Lutcykeln och kemikalieåtervinningen

Lutcykeln refererar till de verksamma kokkemikaliernas kretslopp i massabruket och definieras enligt följande:

Kokeri – Indunstning – Sodapanna – Kausticering

Lutens nomenklatur och omvandlingssteg visas nedan:

Vitlut – Tunnlut – Brännlut – Grönlut

Kemikalieåtervinningen är en utvidgning av lutcykeln och innefattar utöver lutcykelns processer även mesaombränningen.

Beräkningsmetodiskt baserades exergiinnehållet i vitluten på driftdata i form av kända mängder av NaOH, Na₂S och Na₂CO₃ per liter, volymflöde samt konstanter gällande exergiinnehåll per mol/kg.

Det kemiska exergiinnehållet i tunnluten antogs vara detsamma som det kemiska exergiinnehållet i brännluten samt exergiinnehållet i övriga flöden som härstammar från tunnluten men utvinns i indunstningen. Det kemiska exergiinnehållet i tunnluten motsvarar således summan av det kemiska exergiinnehållet i brännlut, metanol samt tallolja. Exergiinnehållet i tunnluten från respektive kokare antogs vara linjärt proportionellt med satsad vitlut i kokeriet, vilket gör att exergiinnehållet per kg tunnlut är detsamma för respektive kokare. Antagandet diskuteras vidare i kapitel 6.1.4.

Det kemiska exergiinnehållet i brännluten har antagits till samma som dess bränsleenergi som redovisas för respektive bruk. Mängden bränsleenergi som brännluten besitter har tidigare beräknats utifrån antagen verkningsgrad hos pannan samt kända mängder producerad högtrycksånga samt fossil bränsleförbrukning. Indataparametrar gällande flödesmängder ansågs innehålla för stora osäkerheter, vilket är anledningen till denna förenkling. Antagandets påverkan diskuteras vidare i kapitel 6.1.6.

Grönlutens beståndsdelar beräknades utifrån vitlutens beståndsdelar, i den bemärkelse att substansmängden Na₂S antogs vara densamma för båda lutarna. Utifrån kausticeringsgrad samt känd substansmängd NaOH i vitluten beräknades substansmängden Na₂CO₃ i grönluten som krävdes för att få angiven mängd NaOH i vitluten. Således antogs grönluten bestå av enbart Na₂CO₃ och Na₂S och dess kemiska exergiinnehåll beräknades per mol.

4.2.3 Bränslen

Vid beräkning av det kemiska exergiinnehållet i bränslen har tillgängliga värmevärden använts. Flöden som betraktats som bränslen är exempelvis rundved, oljor, terpentin, bark och spån.

4.2.4 Kraft, ånga och övriga vattenflöden

Underlag för el, ånga, kondensat och spädvattenanvändning fanns tillgängligt för båda bruken. Underlaget för Munksunds elanvändning var dock på hög aggregationsgrad, vilket medförde att schabloner fick användas för att fördela elanvändningen av respektive process under året.

För el motsvarar exergimängden energimängden. Det termiska och tryckberoende exergiinnehållet i vätskeflöden har beräknats utifrån entalpi- och entropivärden, då god kännedom kring respektive flödes temperatur och tryck återfanns.

4.2.5 Kompletterande flöden och processer

Exergiinnehållet i tillsatskemikalier, exempelvis blekkemikalier, kalk och make-up-kemikalier, har beräknats utifrån konstanter gällande exergiinnehåll per mol/kg.

Vidare har ett antal ytterligare processer/noder använts av praktiska skäl. Följande har använts:

- Pappersbruk. I fallet Munksund, som utöver massaproduktion producerar kraftliner, har processen "pappersbruk" inkluderats och ersatt enhetsprocessen torkmaskin, då den har stor betydelse för helhetsbilden av bruket.
- Matarvattentank. Syftet med Matarvattentanken är att trycksätta utgående processvatten. I denna studie agerar noden även uppsamlingsnod för ång- och vattenflöden. För processen beaktas i huvudsak vatten, ånga och kraft.
- Diverse "hubbar". På liknande sätt som matarvattentanken agerar uppsamlingsnod för vätskeflöden agerar el- och ånghubbar som en central uppsamlingsnod mellan produktion och användarsidan på anläggningarna. I huvudsak beaktas ånga och kraft.
- Övrigt-nod. Noden agerar som en sänka för flöden som inte konsekvent kan härledas till de andra processerna. Exempelvis elanvändningen för avloppshantering hänvisas till denna nod.

4.2.6 Referensomgivningens egenskaper

Månatliga genomsnittlig temperatur för respektive ort har använts som referenstemperatur. I övrigt har ett antagande om att normala atmosfäriska förhållande råder.

4.2.7 Ekonomiska beräkningar

Vid beräkning av priser för inkommande flöden till systemen har priserna som uppges i bilaga 2 använts. Dessa är antagna från ett flertal olika källor, med anledningen till att brukens egna priser ej kan användas är p.g.a. att det anses vara av känslig karaktär och ej får spridas.

4.3 RPI-KLASSIFIKATION

Då RPI – klassifikationen är en subjektiv bedömning som definierar vilka flöden som kan anses bära kostnader genom en process, återfinns en kortfattad redogörelse av hur denna klassificering har utförts nedan.

Generellt sett har inkommande flöden till ett processavsnitt klassificerats som en resurs och utgående flöden som en produkt. Exempelvis har utgående massa och tunnlut ur kokeriet klassificerats som produkter och inkommande vitlut och flis som resurser.

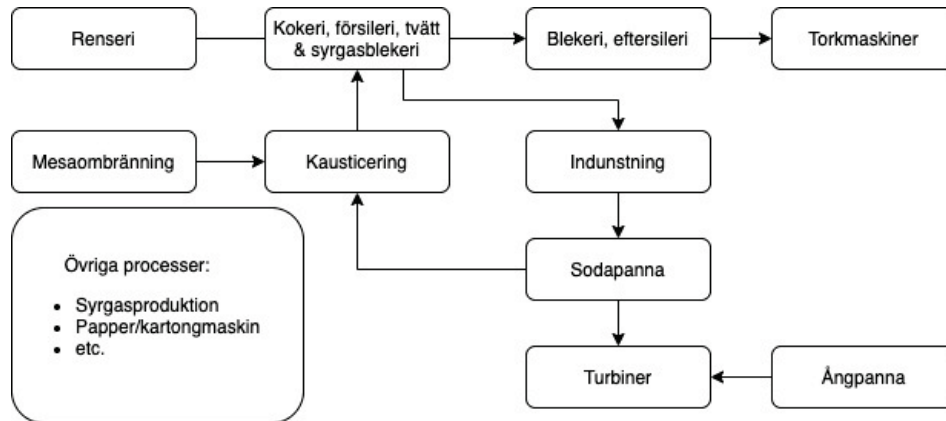
Endast vid vissa fall har flöden klassificerats annorlunda, dessa är:

- I de fall utgående kondensat kan härledas till inkommande färskånga har det utgående kondensatflödet klassats som en resurs, vilket innebär att det bär samma kostnad som inkommande färskångflöde.
- I de fall då ånga tappats av i en turbin, har utgående ångflöde klassats som en resurs, eftersom den avtappade ångan kan härledas till inkommande högtrycksånga.

5 Resultat och analys

5.1 REVIDERAD TAXONOMI

Den ursprungliga taxonomin visade sig vara allt för detaljerad vid en verklig kartläggning av brukens flöden. Efter diskussioner med energisamordnare på bruken reviderades taxonomin till den form som visas i Figur 5.



Figur 5. Reviderad taxonomi

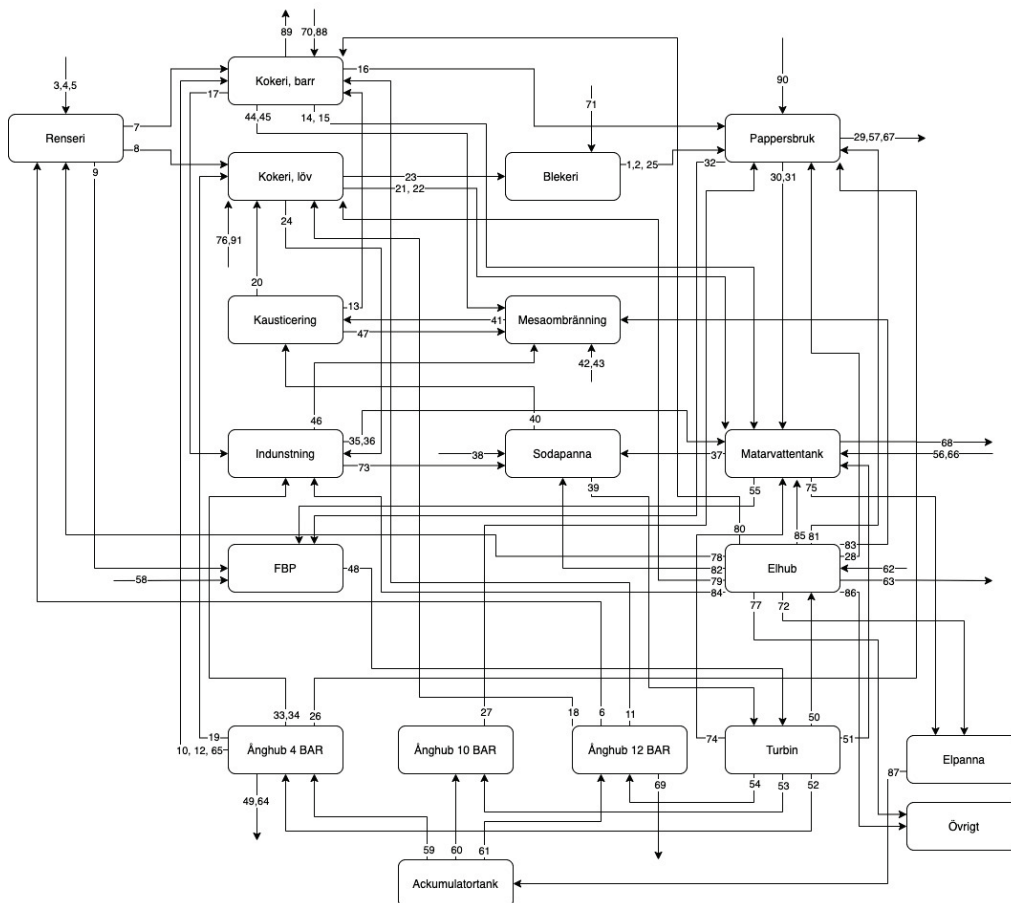
Anledningen till att gruppera processerna som kokeri, försileri, tvätt samt syrgasblekeri, som ursprungligen redogjordes för separat, är att dessa processers restflöden används som resurser i andra processer. Exempelvis syftar kokeriet till att urskilja lignin från cellulosa, varpå ligninet i nästa steg används som resurs att mata sodapanna med. På liknande sätt ska insatskemikalierna, till största delen vitlut, återanvändas i ett slutet kretslopp.

I fallet med blekeriavsnittet, som i denna studie grupperas med eftersileriet, tillsätts insatskemikalier i syfte att förbrukas för att sedan renas ur avlopps- och slamflöden. Dvs. en återvinning av dessa organiska och icke organiska ämnen sker inte på samma sätt som i kokeriavsnittet.

Enligt ovan resonemang kan därmed restflödena från avsnittet "kokeri, försileri, tvätt och syrgasblekeri" benämnas som resursåtervinning, medan restflödena från avsnittet "blekeri och eftersileri" snarare kan benämnas som förlustflöden, vilket medfört att taxonomin har reviderats.

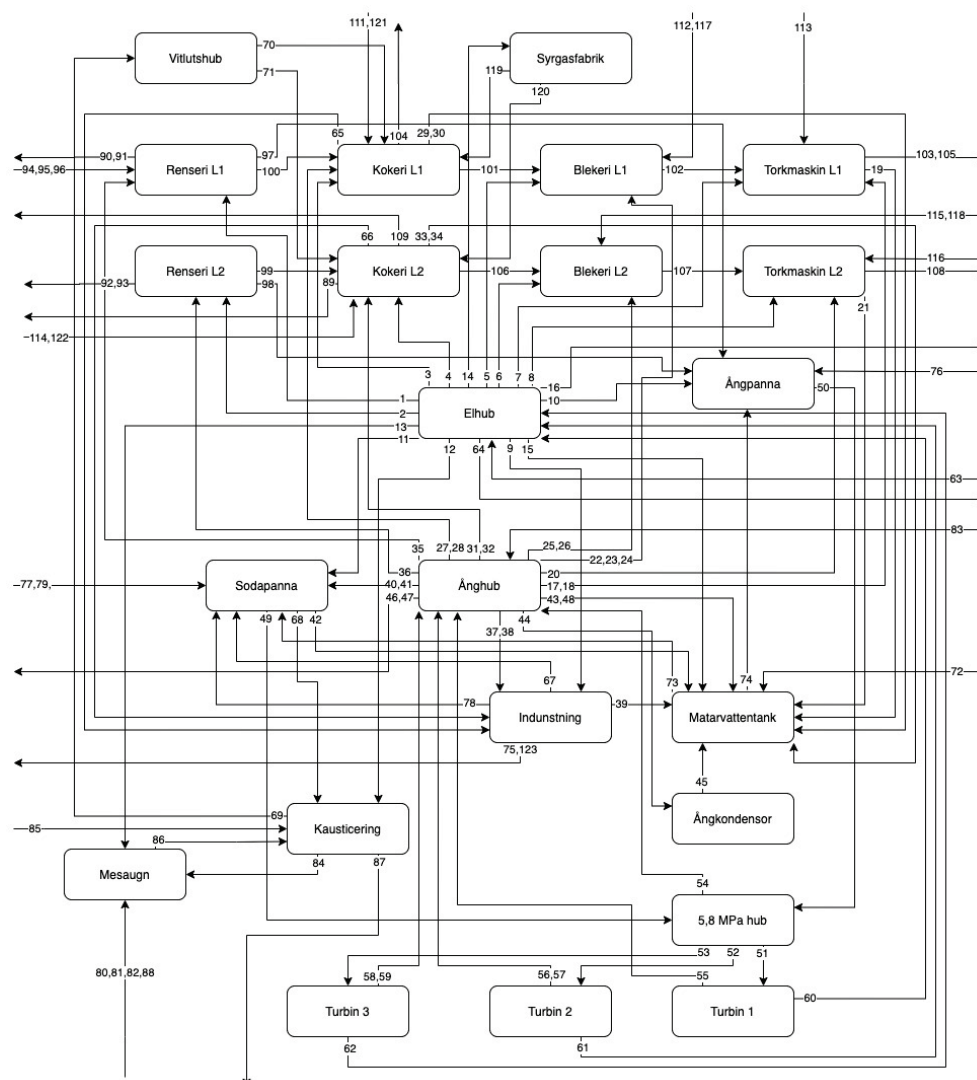
5.2 KARTLÄGGNING AV MATERIAL OCH ENERGIFLÖDEN

Kartläggningen över materialflöden och processer för respektive bruk visas i Figur 6 nedan.



Figur 6. Processchema och materialflödesbeskrivning av SCA:s anläggning i Munksund. Varje flöde har indexerats med en (i fallet endast ett flöde har identifierats) eller flera (i fallet då flertalet flöden identifierats) siffror. Förteckning över index visas bilaga 3.

Totalt har 92 material och energiströmmar kartlagts i Munksund och generellt har en tillfredsställande aggregationsnivå erhållits för att kunna utföra vidare analyser.



Figur 7. Processchema och materialflödesbeskrivning av Södra Cells anläggning i Mörrum. Varje flöde har indexerats med en (i fallet endast ett flöde har identifierats) eller flera (i fallet då flertalet flöden identifierats) siffror. Förteckning över index visas bilaga 4.

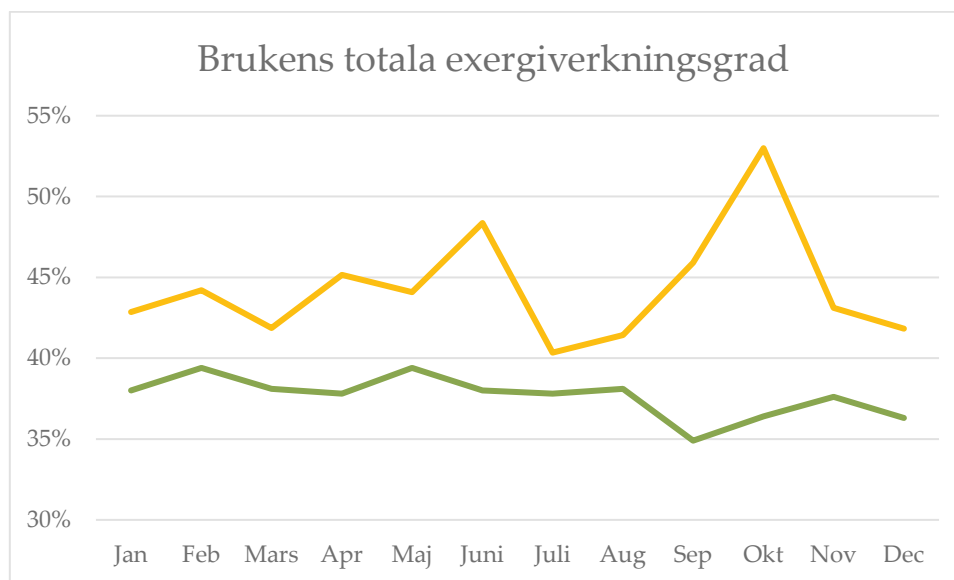
I Mörrum har totalt 123 flöden kartlagts, vilket även här har resulterat en tillfredsställande aggregationsnivå för att kunna utföra vidare analyser.

Den största märkbara skillnaden mellan kartläggningarna är antalet redogjorda flöden i respektive bruk. Anledningen till detta är främsta att en högre upplösning på dataunderlag gällande elektricitet och ångor har funnits tillgängligt i Mörrum jämfört mot Munksund. Detta anses dock inte påverka slutresultatet i någon större omfattning eftersom övergripande trender är relativt oförändrade, trots ett fåtal fler kartlagda strömmar. Annars är fördelen med ett ökat antal kartlagda strömmar att kostnadsbilder för enskilda strömmar blir mer precisa.

5.3 EXERGIVERKNINGSGRADER

5.3.1 Brukens totala exergiverkningsgrad

Brukens verkningsgrader har på månatligt basis utvärderats både totalt sett samt för de ingående processavsnitten. I Figur 8 nedan visas de totala exergiverkningsgraderna för respektive bruk.

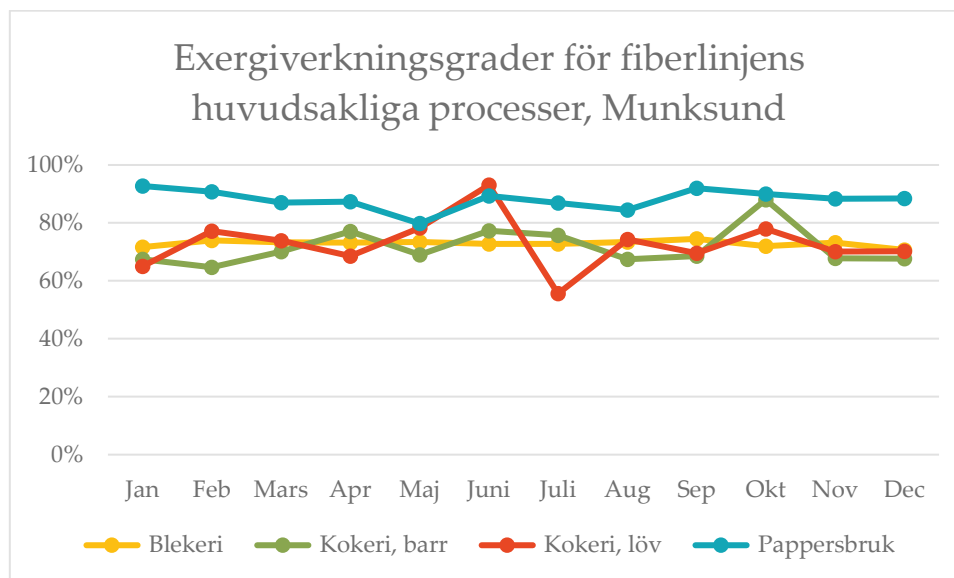


Figur 8. Brukens totala exergiverkningsgrader över helåret 2019

För samtliga månader över året har Munksund en högre exergiverkningsgrad än Mörrum. Detta har en mängd olika anledningar som var för sig diskuteras i de efterföljande kapitlen. För att göra en analys kring exempelvis varför exergiverkningsgraderna mellan bruken i juli endast skiljer sig med ca. 2 procentenheter, medan skillnaden i oktober är 16 procentenheter, krävs djupare analyser än på övergripande bruksnivå. Faktorer som enskilda processers prestanda, indata, lokala förutsättningar etc. måste vägas in, något som följande kapitel gör en ansats till.

5.3.2 Exergiverkningsgrader för Munksunds processer

I Figur 9 visas exergiverkningsgraderna för enhetsprocesserna i fiberlinjen i Munksund.



Figur 9. Exergiverkningsgrader för fiberlinjens huvudsakliga processer över året 2019, Munksund

I figuren framgår att kokeriernas exergiverkningsgrader varierar mellan 56–93 %, vilket är ett påtagligt volatilt beteende, något som inte i lika stor omfattning kan iakttas hos blekeriet eller pappersbruket. Av särskilt intresse är att undersöka djupare anledningarna till både höga och låga verkningsgrader och om dessa antingen beror på bristande dataunderlag och metodikmässiga brister, eller snarare på hur produktionen har gått under dessa perioder.

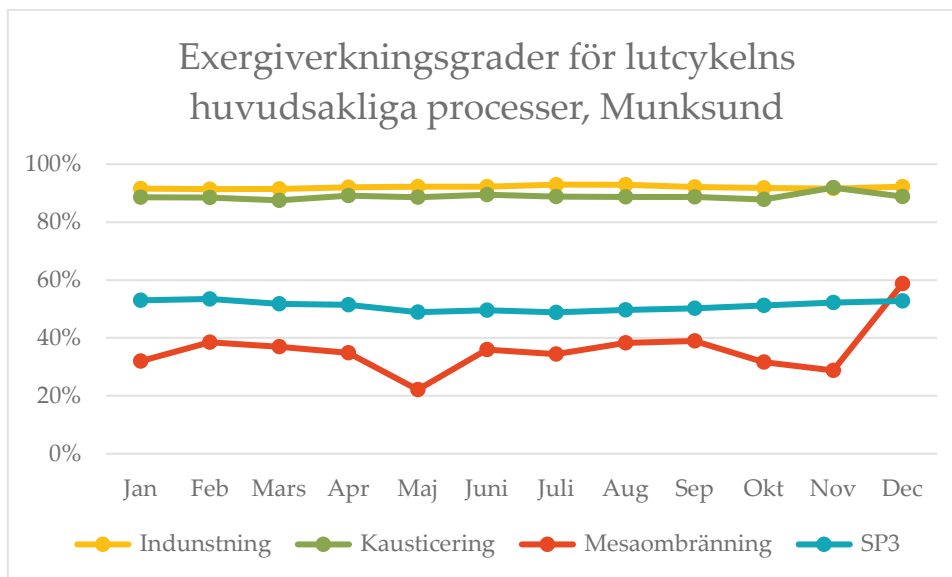
En förklaring till variationerna i verkningsgrad på kokeriet för både barr och löv kan vara ett varierande utbyte till följd av olika utgående kappatal på massan genom året, i kombination med naturliga variationer i vedens torr-rådensitet.

Pappersbrukets verkningsgrad är generellt sett både stabil och hög, antagligen eftersom relativt små fiberförluster sker (antingen passerar den mesta fibern processens systemgräns som ingående massa och utgående produkt eller återcirkuleras inom systemgränsen för att på nytt inblandas i processen). Undantaget är maj månad, då verkningsgraden sjunker. Anledningen till detta kan bero på ett produktionsstopp. Samma trend kan även ses för blekeriet under månaden.

Blekeriet, som enbart behandlar lövmassan, är den process i fiberlinjen som har minst avvikelser i verkningsgrad och ligger jämnt över året på runt 73 %.

Blekeriets jämna verkningsgrad kan ställas i relation mot lövkokeriets mycket volatila beteende, i och med att endast lövmassa bleks i Munksund. Dessa faktum kan vara av intresse att undersöka djupare, där framförallt volatiliteten i lövkokeriet bör undersökas och varför detta inte påverkar blekeriet i någon större omfattning.

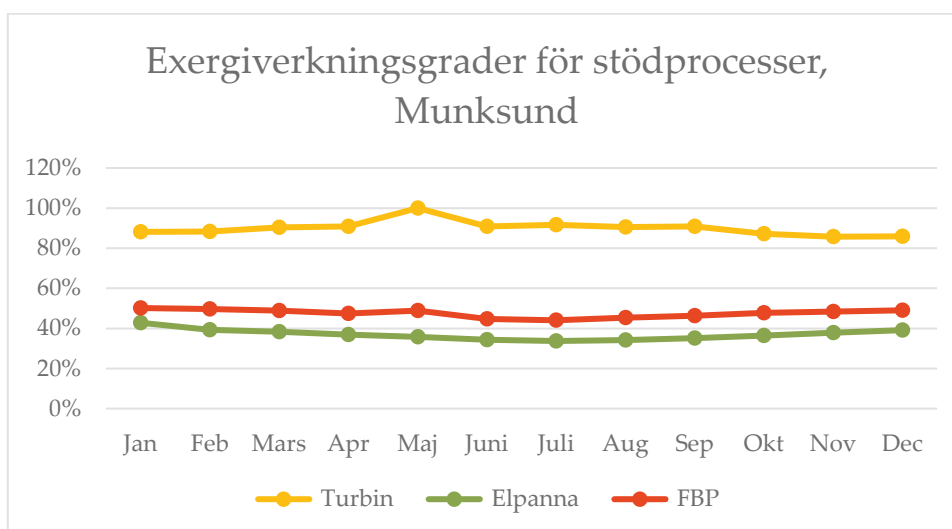
Fortsättningsvis visas exergiverkningsgraderna för lutcykelns enhetsprocesser i Figur 10 nedan.



Figur 10. Exergiverkningsgrader för lutcykelns huvudsakliga processer över helåret 2019, Munksund

För lutcykelns enhetsprocesser kan mer stabila trender i exergiverkningsgrad ses i jämförelse mot den mer volatila fiberlinjen. Undantaget är mesaombränningen, vars verkningsgrad varierar mellan 22–59 %. Detta behöver i sig inte betyda att några större irregulariteter sker i de månaderna som har lägre verkningsgrad eftersom dataunderlaget för mängden producerad kalk påvisar stor variation. Verkningsgraden på mesaombränningen är direkt beroende av kalkproduktionen som i sin tur är beräknad utifrån flödet på den utspädda mesa-suspensionen till mesafiltret. Vidare kan resultatet påvisa att det är fördelaktigt med en jämn produktion över året, snarare än att reaktivt driftsätta produktionen.

Till sist visas de övriga systemens verkningsgrader för bruket i Munksund i Figur 11.

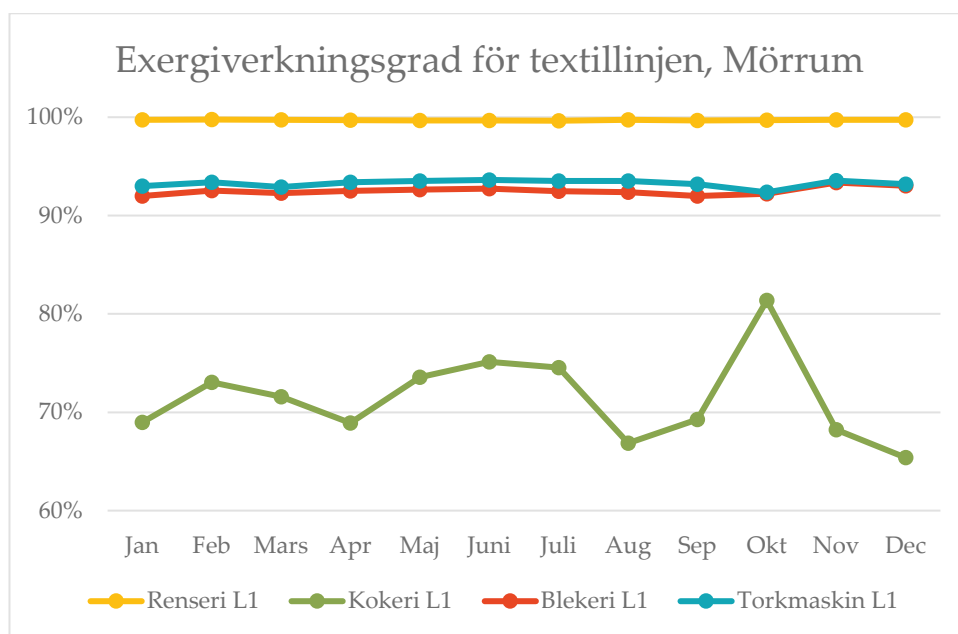


Figur 11. Exergiverkningsgrader för övriga system (Turbinen, elpanna, Fastbränslepanna (FBP)) över helåret 2019, Munksund

Även hos de övriga systemen i Munksund kan stabila trender för exergiverkningsgrader visas. Noterbart är att i Maj månad sker en tillfällig ökning av verkningsgrader i samtliga processer, om än mindre tydligt för elpannan och fastbränslepannan. Vad detta beror på är svårt att avgöra, men i och med att turbinens verkningsgrad i princip uppgår till 100 % kan detta bero på indata, eftersom en 100 % verkningsgrad är teoretiskt omöjlig. Här kan faktorer som exempelvis icke kartlagda flöden påverka till viss del, men slutsatser kring orsaker är svåra att dra utan djupare analyser.

5.3.3 Exergiverkningsgrader för Mörrums processer

I Figur 12 nedan kan exergiverkningsgraden för ingående processavsnitt i textillinjen för Mörrums bruk ses.



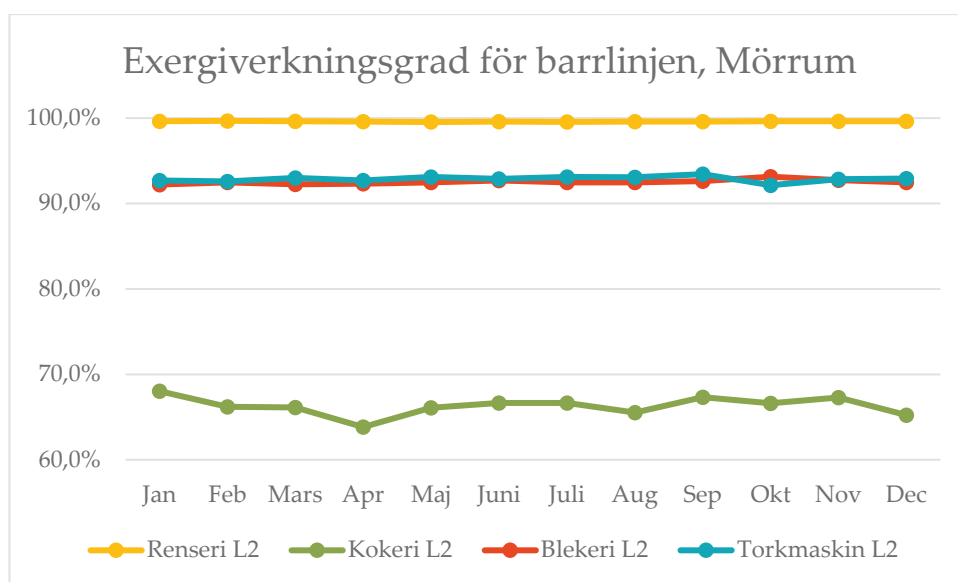
Figur 12. Exergiverkningsgrader för textillinjens huvudsakliga processer över året 2019, Mörrum

Variationer som uppstår i september och oktober bör tas med en viss försiktighet. Dels p.g.a. effekter från långsam uppstart av produktionen i textillinjen under september, driftstopp i bruket under oktober samt att en revision av turbin 3 ägde rum under september och oktober. Revisionen innebar att en ökad mängd el köptes in för att möta det interna elbehovet.

I textillinjen är exergiverkningsgraderna nästan konstanta över året för renseriet, blekeriet och torkmaskinen. I renseriet ligger verkningsgraden på nästan 100 % och den exergidestruktion som förekommer är användandet av el för att avbarka rundveden samt hugga den till önskvärd flisstorlek. Blekeriet har en hög exergiverkningsgrad, som även den nästan är konstant över året. Variationerna av kokeriets exergiverkningsgrad är mer påtagliga. Dels kan de bero på antaganden gällande inkommande rundveds egenskaper, satsad vitlut och mängd utgående tunnlut. En faktor som dock är gemensamt med samtliga månader med hög respektive låg verkningsgrad är förhållandet mellan m^3 rundved och produktionen för linjen. För månaderna med högst verkningsgrad (feb, maj, juni, juli, okt) är förhållandet (åtgångstalet) mellan m^3 träråvara och adt under 5 och för

övriga månader över 5, vilket indikerar att antingen rundvedens egenskaper och/eller driften varierar över året. Dessa variationer kan påverka processens exergiverkningsgrad.

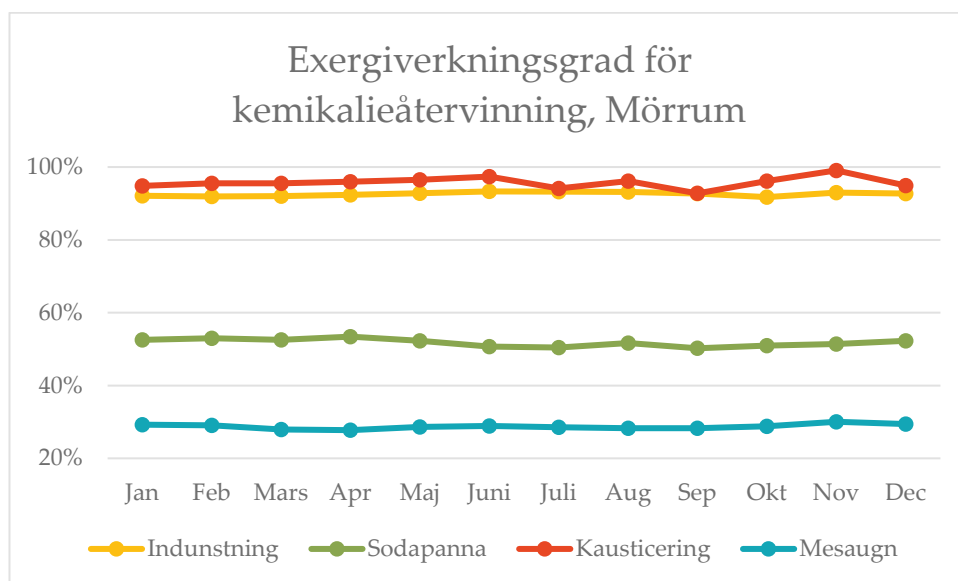
I barrlinjen är exergiverkningsgraderna nästan konstanta över året för samtliga processer, mindre variationer uppkommer dock i kokeriet, se Figur 13.



Figur 13. Exergiverkningsgrader för barrlinjens huvudsakliga processer över helåret 2019, Mörrum

Åtgångstalet för linjen är nästan konstant över året och variationerna beror förmodligen på gjorda antaganden samt på processens drift.

I även i kemikalieåtervinningen är exergiverkningsgraderna relativt konstanta för samtliga processer, se Figur 14 nedan.

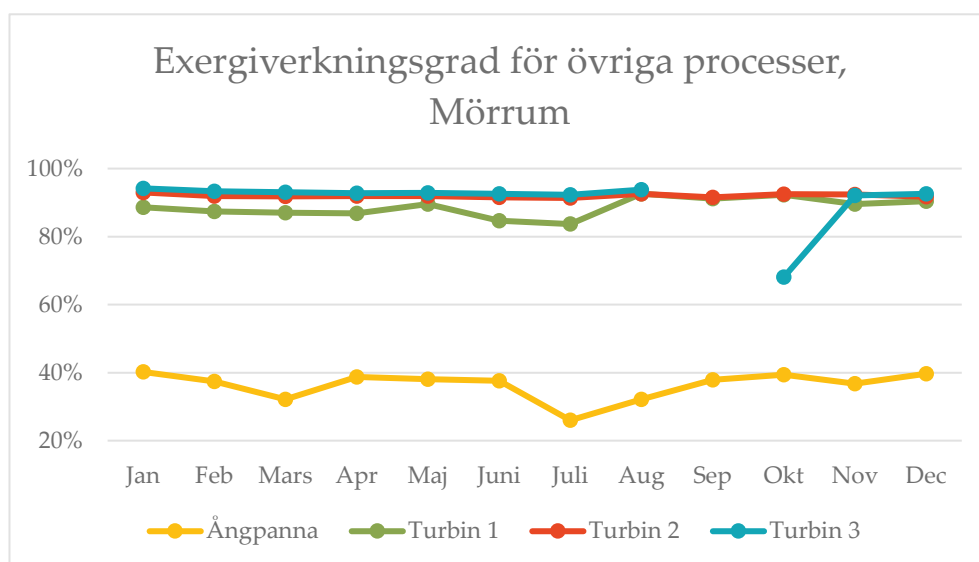


Figur 14. Exergiverkningsgrader för kemikalieåtervinningens huvudsakliga processer över helåret 2019, Mörrum

I indunstningen ökar verkningsgraden något under sommarmånaderna, vilket kan bero på att en högre utomhustemperatur leder till en minskad mängd kvalitet i

form av färskånga för att öka svartlutens torrhalt. Dessutom är fjärrvärmeleveranserna under sommarmånaderna låga p.g.a. ett lägre avsättningsbehov. Vid betraktelse utan fjärrvärmeleveranserna skulle således verkningsgraden under sommarmånaderna kunna vara ännu högre relativt vintermånaderna. Sodapannans exergiverkningsgrad sjunker något under sommarmånaderna, vilket kan bero en minskad kvalitet i producerad högtrycksånga. I mesaugnen är exergiverkningsgraden nästan konstant under hela året och inga tydliga variationer kan utläsas. Vad som eventuellt kan sägas om mesaugnen är att den är okänslig för variationerna av utomhustemperatur, utan driften ser likartad ut under hela året. Variationerna i kausticeringen antas främst bero på valda antaganden samt dataunderlag, snarare än faktiska exergimässiga förändringar i processen över året.

Slutligen visas de övriga processer för bruket i Mörrum i Figur 15 nedan.



Figur 15. Exergiverkningsgrader för övriga processer över helåret 2019, Mörrum

Ångpannans exergiverkningsgrad varierar mellan månaderna. En anledning till att verkningsgraden varierar kan bero på hur mycket driftsatt pannan är under månaden. Under mars och juli produceras minst högtrycksånga, uppemot en faktor 10 mindre än övriga månader. I januari och oktober körs pannan som mest, vilka också har högst verkningsgrad. Vid en lägre drift påverkas således verkningsgraden negativt, eftersom förluster som uppstår vid uppstart av pannan blir mer påtagliga relativt producerad mängd ånga. Ytterligare en faktor som påverkar verkningsgraden är att under sommarmånaderna är exerginnehållet lägre per enhet färskånga lägre relativt vintermånaderna.

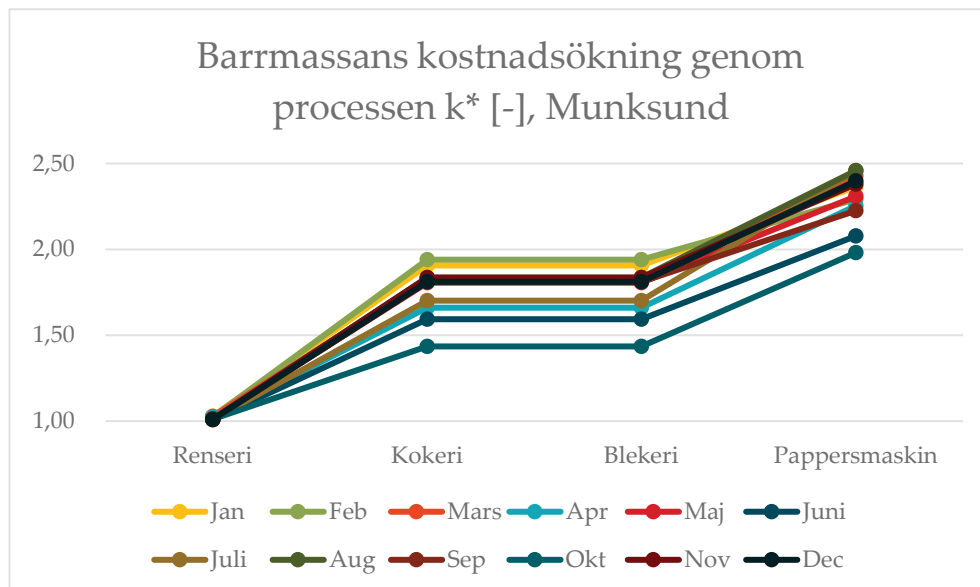
Turbinernas exergiverkningsgrad korrelerar med dess ålder, där Turbin 1 är äldst och Turbin 3 nyast. Turbin 2 har nästan lika hög exergiverkningsgrad som Turbin 3, vilket kan bero på att det, förutom lågtrycksånga, även tappas av mellantrycksånga. Mellantrycksångan har högre exergimängd per kg än lågtrycksångan. Vilken ångtyp som avtappas bör dock vägas gentemot producerad mängd elektricitet, vilken är turbinernas huvudsakliga uppgift, samt ångbehov. Under augusti och september månad låg driften av Turbin 3 nere, vilket är

anledningen till att grafen bryts under dessa månader. Gemensamt med samtliga turbiner är att verkningsgraden är lite lägre under sommarmånaderna gentemot vintermånaderna, vilket beror på referenstemperaturens inverkan.

5.4 EXERGIMÄSSIG OCH TERMOEKONOMISK KOSTNAD

5.4.1 Massans kostnadsökning genom processen, Munksund

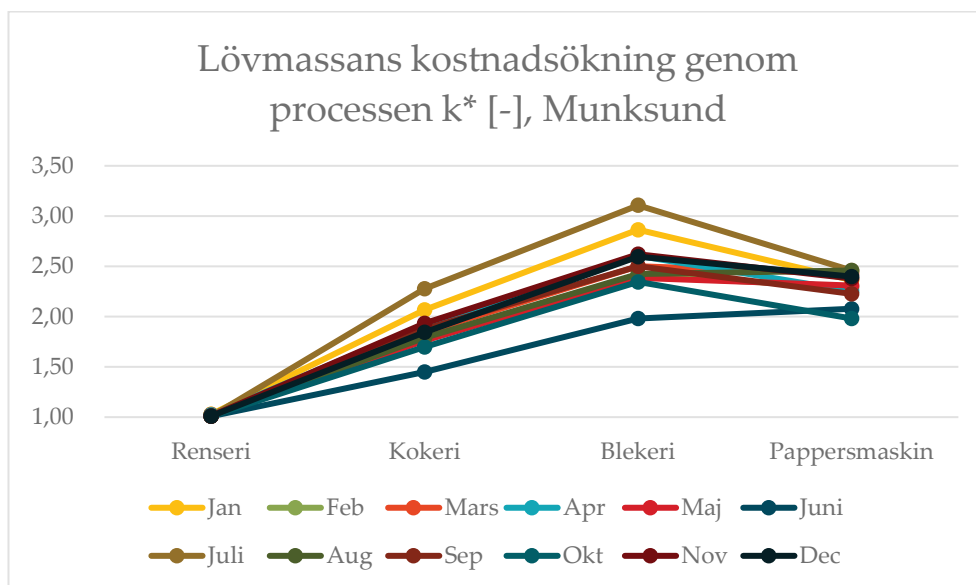
I Figur 16 nedan illustreras hur kostnadsbilden för respektive fiberlinje, i den mån det är möjligt att separera dessa åt, varierar genom huvudprocesserna för årets 12 månader. Observera att kostnaden i sista steget, slutprodukten, är densamma för båda linjerna, då de två fiberlinjernas massor bildar slutprodukterna (kraftliner, WS, WT).



Figur 16. Barrmassans exergimässiga kostnadsökning (k^*) genom processen, Munksund

I figuren syns en tydlig kostnadspåbyggnad för stegen i förädlingsprocessen. Observera att kostnaden är konstant i steget kokeri – blekeri, eftersom barrmassan inte genomgår blekeristeget enligt definitionerna i detta projekt. Ingående kostnad är strax över 1 inledningsvis, då enbart en mindre mängd resurser har satsats för att avbarka veden. I kokeriet ökar kostnaden till mellan 1,94 (februari) och 1,43 (oktober). Slutprodukten har en exergimässig kostnad på mellan 1,98 i oktober och 2,46 i augusti.

I Figur 17 ses lövmassans kostnadsökning genom fiberlinjen



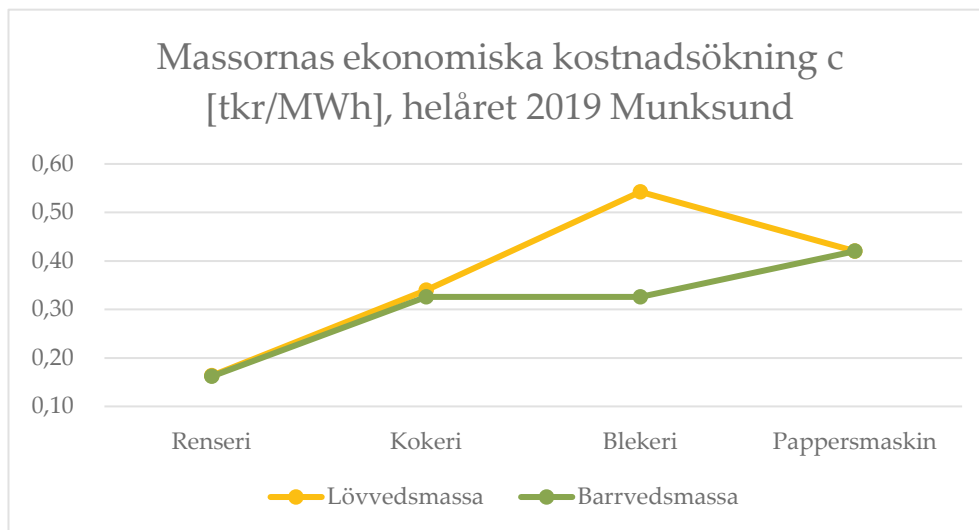
Figur 17. Lövmassans exergimässiga kostnadsökning (k^*) genom processen, Munksund

I grafen iakttas en liknande kostnadsökning för lövmassan som för barrmassan i steget renseri – kokeri. I och med att lövmassan även genomgår ett tydligt blekeristeg ökar kostnaden, vilket den inte gör för barrmassan. Den dyraste massan som produceras på bruket är den blekta lövmassan i juli månad, vars kostnad uppgår till 3,11. En avsevärt lägre kostnad för massan erhålls under juni månad, där exempelvis kostnaden för massan efter blekeriet uppgår till 1,98, vilket är en minskning med 36 % baserat på juli månads kostnad.

Notera att kostnaden för lövmassan minskar i steget pappersmaskin (förutom under juni månad). Detta beror på att den relativt sett dyra produkten lövmassa blandas med produkter som har en lägre kostnad, kraftliner och barrmassa. Effekten av detta blir att kostnaden för slutprodukten (kraftliner), som utgörs av barr- och lövmassa samt returwellpapp, kan bli lägre än kostnaden för en specifik massatyp. Vidare kan det diskuteras ifall en illustration av kostnadsbilden ska inkludera pappersmaskinen eller ej, då produkten i steget blekeri – pappersmaskin går från "lövmassa" till "kraftliner".

Värt att notera är att både barrmassan och slutprodukterna är som billigast att producera i oktober, medan lövmassan är billigast i juni. Observera även att juni är den enda månaden där en konstant kostnadsökning sker i lövmassans fiberlinje. Anledningen till detta är svåra att avgöra utan djupare analyser, men att skillnader mellan respektive linjers kostnadseffektivitet är icke-linjära indikerar att det kan finnas möjligheter att påverka kostnadsbilderna.

Vad gäller de ekonomiska kostnaderna för respektive linje illustreras dessa i Figur 18. Observera att analysen baseras på årsdata och inte per månad.

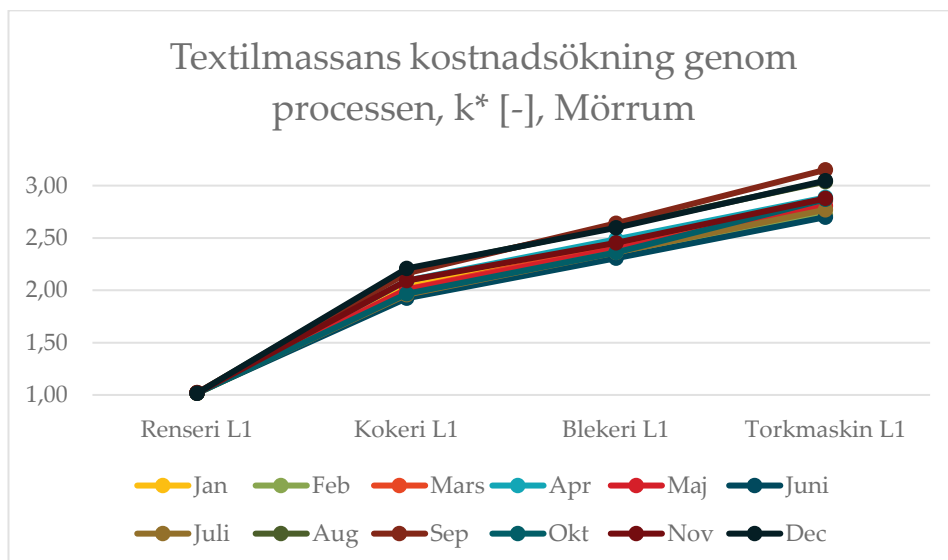


Figur 18. Löv- respektive barrmassans ekonomiska kostnadsökning (c) genom processen baserat på helåret 2019

Generellt återspeglar grafen de trender som visas för de exergimässiga kostnaderna. Däremot är inte ökningen av faktorn c proportionell mot ökningen av faktorn k^* . Exempelvis i steget mellan renseri – blekeri ökar faktorn c med en faktor 3,4, medan faktorn k^* ökat med en faktor 2,9 för lövmassan. I samma steg har barrmassans c-faktor ökat med en faktor 2,6, medan k^* ökat med en faktor 2,5. Detta exempel påvisar att det finns scenarion där exergimässiga besparingar inte nödvändigtvis måste innebära proportionerligt stor kostnadsbesparing. Det är till och med tänkbart att i vissa scenarion är exergimässiga besparingar inte lönsamma ekonomiskt, även om det i de flesta fall bör vara ekonomiskt lönsamt med exergimässiga besparingar.

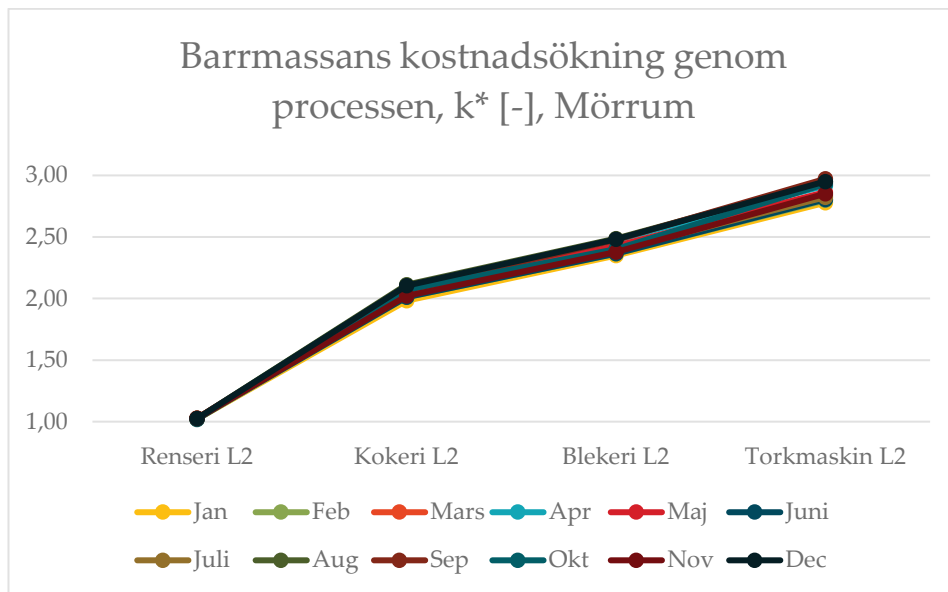
5.4.2 Massans kostnadsökning genom processen, Mörrum

Figur 19 och Figur 20 nedan illustrerar kostnadsökningen för massan genom fiberlinjen.



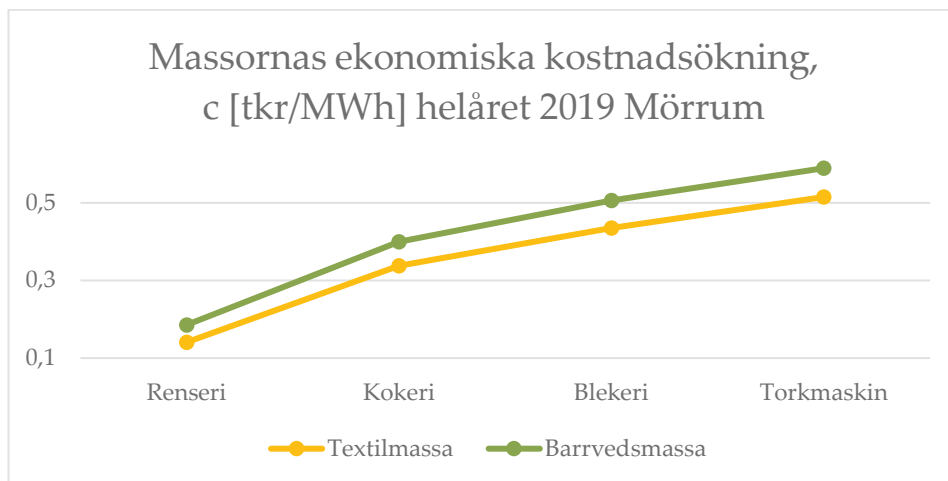
Figur 19. Textilmassans exergimässiga kostnadsökning (k^*) genom processen över året 2019 i Mörrum

I Figur 19 kan textilmassans kostnadsökning k^* för respektive månad ses. Generellt är kostnaden ungefär lika över året förutom för månaderna augusti, september och december där kostnaden är som högst. Kostnadsökningen under dessa månader inträffar främst i kokeriet, vilket kan ses på den brantare lutningen eller verkningsgraden i Figur 12. Efter kokeriet är kostnadsökningen relativt lika för resterande månader i blekeriet och torkmaskinen.



Figur 20. Barrmassans exergimässiga kostnadsökning (k^*) genom processen över året 2019 i Mörrum

I Figur 20 kan barrmassans kostnadsökning k^* ses för respektive månad. Generellt är kostnaden ungefär lika över året, där den största kostnadsökningen sker i kokeriet.



Figur 21. Textil- respektive barrmassans ekonomiska kostnadsökning (c) genom processen baserat på helåret 2019, Mörrum

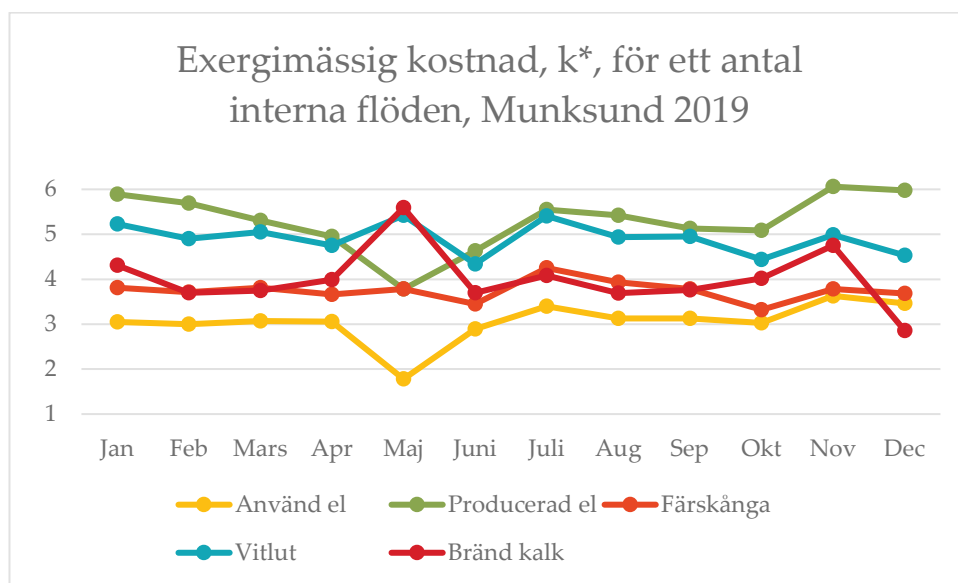
I Figur 21 kan massans kostnadsökning c ses för respektive produkttyp. Noterbart är att bägge massornas ekonomiska kostnadsökning c^* mellan renseri och kokeri, se Figur 19 och Figur 20, var procentuellt högre än den exergimässiga kostnadsökningen k , vilket indikerar att kokeriet är mer exergimässigt effektivt än ekonomiskt effektivt. I blekeriet och torkmaskinen ökar kostnaden c något mer än

k^* , procentuellt sett, vilket betyder de material som krävs i blekeriet och torkmaskinen bär en högre monetär kostnad än en exergimässig. Således är blekeriet och torkmaskinen mer exergimässigt effektiva än ekonomiskt effektiva.

5.4.3 Kostnader för ett antal flöden, Munksund

I detta avsnitt samt i avsnitt 5.4.4 listas de exergimässiga kostnaderna k^* för ett antal utvalda flöden per månad under 2019 samt den ekonomiska kostnaden c för helåret 2019. Flödena delas upp i interna, dvs. flöden som främst används internt på bruket, och produktflöden, dvs. produkter som ska säljas på marknaden. Observera att en distinktion görs mellan egenproducerad el och använd el, där producerad el motsvarar elen som produceras internt i turbinerna och använd el är elen som används på anläggningen (vilket består av både egenproducerad och inköpt el). Detta görs för att illustrera skillnaden mellan kostnaden för el som produceras på bruket kontra kostnaden för att köpa in el.

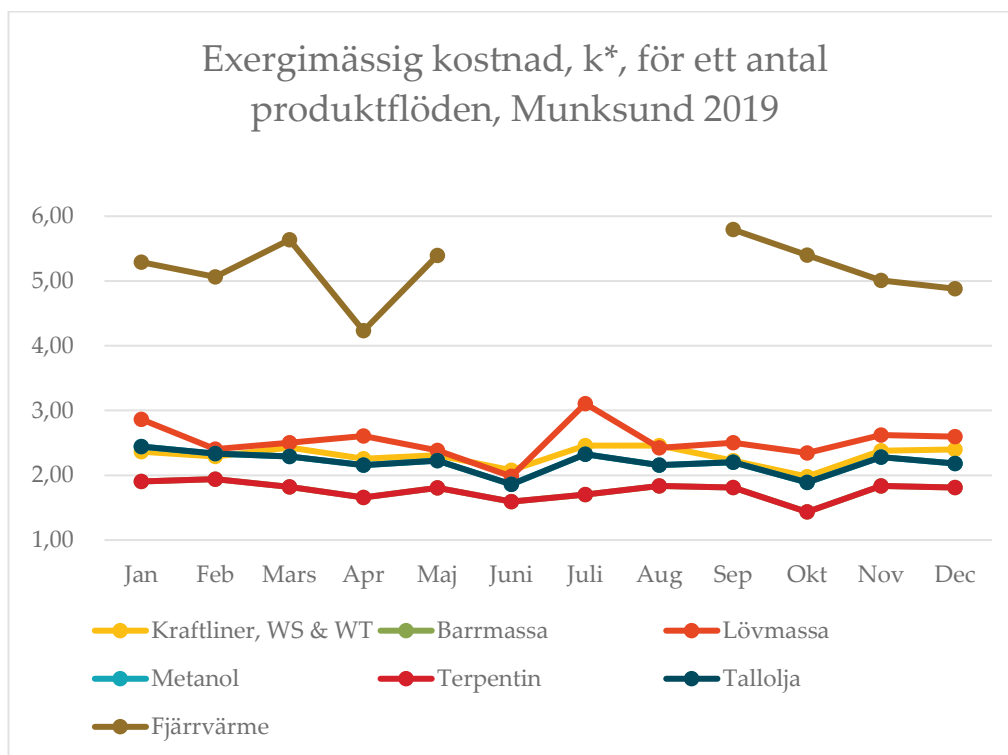
I Figur 22 visas exergimässig kostnad för ett antal interna flöden över helåret 2019 i Munksund.



Figur 22. k^* [-] för ett antal interna flöden, Munksund

En generell trend som kan uttydas är en högre kostnad i början och slutet av året. I maj månad ses en relativ kraftig kostnadsavvikelse för samtliga flöden. Observera att kostnaden för kalk och vitlut kraftigt ökar, medan den för både använd och producerad el kraftigt minskar. En möjlig orsak till trendavvikelsen kan vara att ett produktionsstopp ägde rum i maj, men detta förklarar inte anledningen till att vissa produkters kostnadsbild ökar, medan andra minskar. Orsaker till att kostnadsbildens påverkas olika för olika typer av flöden är både svåra att avgöra och intressanta att undersöka djupare.

Denna avvikelse syns däremot inte för de olika produkterna i Figur 23 nedan. Orsaken till detta är har inte undersökts kräver djupare analyser.

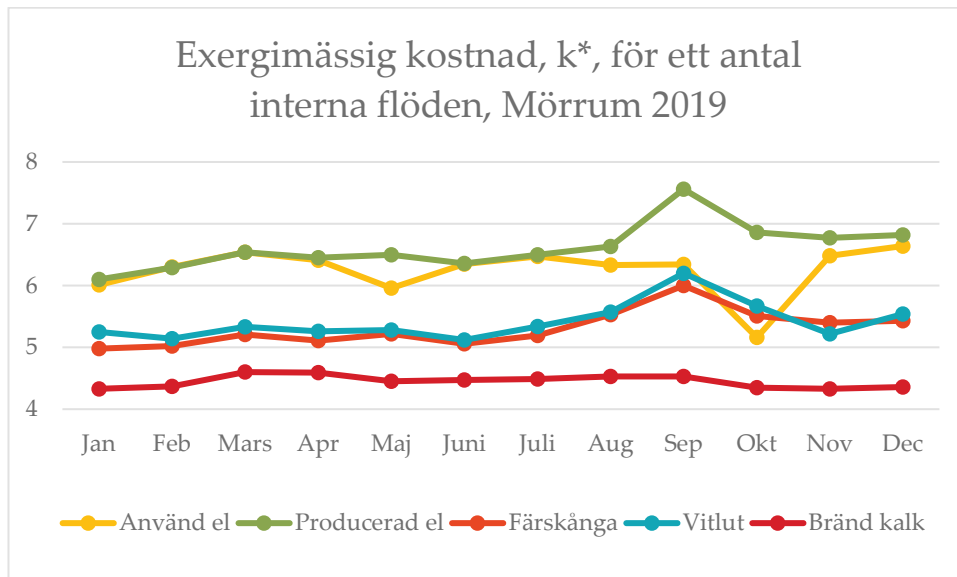


Figur 23. k^* [-] för ett antal produktflöden, Munksund. Observera att fjärrvärmens kostnad anges i sekundäraxeln

Vidare har fjärrvärmen en relativt volatil kostnadsbild som antas bero på den sporadiska leveransen till nätet, vilken under juni, juli och augusti är noll. Kostnaden i oktober och juni för samtliga produkter är lägre än övriga månader. Orsaken till detta har inte undersökts och kräver djupare analyser.

5.4.4 Kostnader för ett antal flöden, Mörrum

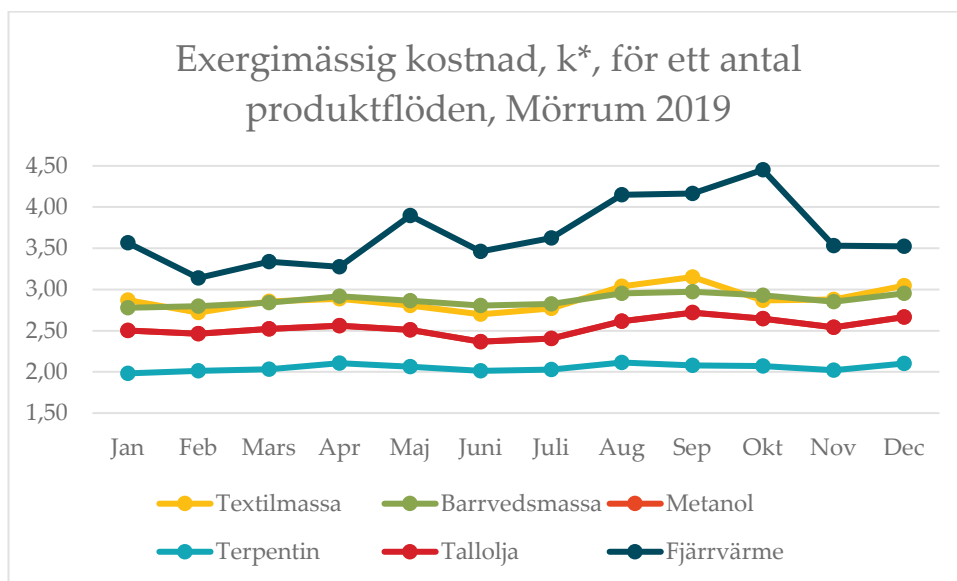
I Figur 24 nedan visas kostnaden för ett antal interna flöden på bruket i Mörrum.



Figur 24. k^* [-] för ett antal interna flöden, Mörrum

Då majoriteten av elbehovet täcks av egenproducerad el, är skillnaden mellan använd el och producera el marginell. Skillnaden uppstår då en större andel el köps in, då den exergimässiga kostnaden för denna är 1. Kostnaden för färskånga, vitlut och den brända kalken ligger relativt stabilt över året, men minskar under det fjärde kvartalet. Samma trend ses för elektriciteten.

Vad gällande produktflöden för Mörrum, som visas i Figur 25, är kostnaderna relativt konstanta.



Figur 25. k^* [-] för ett antal produktflöden, Mörrum

Det kan bero på att dessa flöden härstammar från flöden med högt exergiinnehåll och variationer i mindre flöden inte blir lika påtagliga för dessa större flöden,

förutom fjärrvärmeproduktionens kostnad som varierar avsevärt mer. Det kan exempelvis ses för kostnadsökningen som sker feb-mars, där ökningen för dom interna flöden i Figur 24 är större än för produktflödena i Figur 25.

5.5 JÄMFÖRELSE MELLAN BRUKEN

Ovan är ett exempel på att olika bruk har olika utformning och tillverkar olika typer av produkter som dessutom skiljer sig i produktförädlingsstegen. Mörrum tillverkar avsalumassa medan Munksund tillverkar kraftliner, vilket är närmare konsumentmarknaden än avsalumassa.

Vidare är kraftförsörjningssystemen på bruken radikalt olika, där Mörrum är självförsörjande på elektricitet med tre turbiner medan Munksund har ett generellt kraftunderskott på över 50 % och endast en turbin i drift. Denna skillnad visar sig på olika sätt, exempelvis genom att förhållandevis mer råvara används i Mörrum i proportion mot den marginellt större massaproduktionen. Gällande resurseffektivitet indikerar resultaten att Munksund generellt sett har mer effektiva systemlösningar, sett ur ett exergimässigt kostnadsperspektiv och med bruket som systemgräns.

Ytterligare en aspekt på den övergripande effektiviteten är att slutprodukternas kvalitet inte nödvändigtvis återspeglas i dess exergiinnehåll, dvs en slutsats om att en högkvalitativ produkt generellt sett har högre exergiinnehåll än en lågkvalitativ kan inte tillämpas³. Det är dock fördelaktigt att kombinera kostnadsbilderna (k^* och c) samt exergiverkningsgrad för att på så sätt bedöma den övergripande effektiviteten.

Vad som även vore intressant är att undersöka vissa processer mer ingående. Typexemplet är indunstningen, där Mörrum har installerat en ny med 7 effektsteg medan Munksund använder en äldre med 6 effektsteg. Detta borde innebära att sodapannan kan producera en ånga med högre exergiinnehåll då brännluten har ett högre värmevärde till en marginellt ökad värmeförbrukning i indunstningen. I de fall där enskilda processer ska utvärderas kan exergiverkningsgrader kombinerat med exergimässiga kostnader leda till nya insikter om huruvida det är den faktiska processen som är effektiv eller om det är andra processer som ger dyra flöden.

Rent geografiskt är bruken åtskilda med stora avstånd då Munksund ligger 100 mil längre norrut än Mörrum, vilket medför stora temperaturskillnader över året. Eftersom exergi är ett relativt mått tas omgivningens temperatur i beaktning. Störst påverkan fås för flöden med lägre temperatur eller tryck. Exempelvis har högtrycksångan och kondensat vid 120°C ca. 6 % respektive 19% högre exergiinnehåll per kg i Munksund än i Mörrum. Notera att temperaturen och trycket hos högtrycksångan är något högre i fallet Munksund än i fallet Mörrum. Att det således påverkar resultatet är säkert, men i vilken omfattning är svårt att avgöra. Här rekommenderas känslighetsanalyser för att avgöra omfattningen av referenstemperaturens påverkan.

³ I detta sammanhang anses exempelvis textilmassa, som Mörrum tillverkar, vara en mer högkvalitativ produkt än lågt processad barrmassa, som är en stor ingående del i Munksunds kraftliner.

5.5.1 Skillnader i verkningsgrad

I detta avsnitt analyseras exergiverkningsgraden för relevanta processavsnitt samt dess huvudsakliga skillnader.

Övergripande

Sett till den brukens övergripande exergiverkningsgrad i Figur 8, har bruken ett årsgenomsnitt på ca. 37 % och ca. 44 % i fallet Mörrum respektive fallet Munksund. Det är dock svårt att dra några slutsatser kring vilket bruk som är mest effektivt ur detta perspektiv, eftersom det ena brukat enbart tillverkar avsalumassa och det andra bruket pappersprodukter. Största anledningen till att den totala verkningsgraden blir svårtolkad är att en stor mängd returfibrer blandas in i det sista processteget i Munksund, vilket inte sker i Mörrum. Returfibern höjer produktionsmängden samtidigt som den kräver mindre arbete jämfört med om den istället skulle ha producerats från rundved. En annan orsak som försvårar jämförelsen är att ångbehovet och elbehovet är betydligt högre i pappersbruket än i torkmaskinerna, på grund av att det är olika typer av processavsnitt som tjänar olika syften.

Kokeri

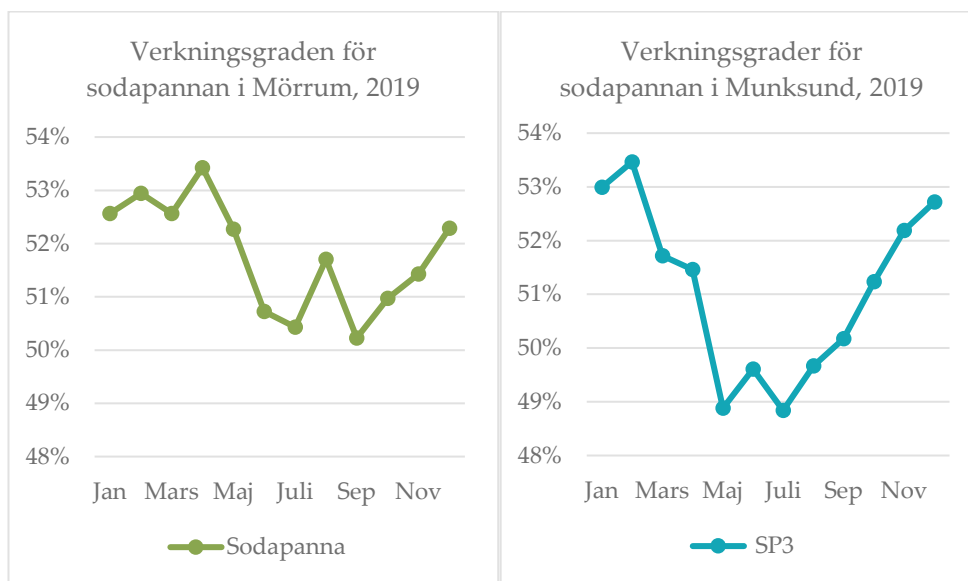
I kokerierna varierar exergiverkningsgraderna mellan brukens respektive kokare över året, se Figur 9, Figur 12 och Figur 13. Generellt sett är verkningsgraderna något högre i fallet Munksund än i fallet Mörrum. Anledningen till skillnaden mellan bruken är svår att avgöra då många faktorer och antaganden påverkar resultatet i kokeriavsnittet, främst exergiinnehållet i inkommande flis och utgående tunnlut. En faktor som skiljer bruken tydligt åt är att massans kappatal efter kokeriavsnittet. I fallet Mörrum är kappatalet betydligt lägre än i fallet Munksund, vilket kan vara en anledning av anledningarna till den lägre verkningsgraden.

Indunstning

Exergiverkningsgraden över indunstningen är hög för bägge bruken, om något lite högre i fallet Mörrum än i Munksund sett över ett år, se Figur 10 och Figur 14. Detta trots att tunnluten har en lägre torrhalt och brännluten en högre torrhalt än i fallet Munksund. En anledning till detta kan vara att Mörrum nyligen investerat i en ny indunstningsanläggning med 7 effektsteg, Munksunds indunstningsanläggning består av 6. En annan bidragande faktor är att exergiinnehållet per kg färskånga till processen är ca. 10 % lägre i Mörrum än i Munksund.

Sodapanna

Under vinterhalvåret har Munksund högre verkningsgrad, vilket kan bero på att exergiinnehållet per kg producerad högtrycksånga är högre på grund av geografiska förhållanden samt högre temperatur och tryck på högtrycksångan, se Figur 26.



Figur 26, exergiverkningsgrader för respektive bruks sodapanna under året 2019

Mesaugn

Exergiverkningsgraden i mesaugnen skiljer sig åt mellan bruket, se Figur 10 och Figur 14. I fallet Mörrum ligger verkningsgraden på ca. 29 % sett över ett år, med mindre variationer mellan månaderna. I fallet Munksund varierar verkningsgraden mer över året, sett över ett år ligger verkningsgraden på ca. 35 %. Skillnaden mellan bruken antas främst bero på mätdata snarare än antaganden, då gjorda antaganden för processen har en liten påverkan på resultatet. En tydlig skillnad mellan bruken är dock att förbränningen i fallet Munksund primärt sker med pellets, medan förbränningen i fallet Mörrum primärt sker med tallbecksolja eller bioolja.

Turbiner

Exergiverkningsgraden för turbinerna är relativt lika för båda bruken, se Figur 11 och Figur 15. I fallet Mörrum är verkningsgraden nästan konstant över året, medan den sjunker något under vinterhalvåret i fallet Munksund. En anledning till den nedåtgående trenden under vinterhalvåret kan bero på referensomgivningens temperaturpåverkan, vilket betyder att en ökad kvalitet på högtrycksångan ej medför en ökad elproduktionen.

Pannor för ångproduktion

Exergiverkningsgraden för stödjande ångproduktionssystemet, ångpanna eller fastbränslepanna, är högre i fallet Munksund än i fallet Mörrum vilket kan ses Figur 11 och Figur 15. Den huvudsakliga anledningen till detta beror antagligen på hur mycket pannan har varit i drift. I fallet Mörrum framgick det att verkningsgraden ökade i takt med en ökad ångproduktion. Pannan i Munksund körs mer kontinuerligt över året, med färre start och stopp, än i fallet Mörrum. Detta antas vara den främsta anledningen till en skillnad mellan bruken. En ytterligare skillnad, precis som för sodapannan, är att den producerade högtrycksångan har ett högre exergiinnehåll per kg i fallet Munksund, vilket kan vara ett bidrag till en högre verkningsgrad.

5.5.2 Jämförelse mellan exergimässig och termoeconomisk kostnad

I Munksund uppgår kostnaden för barrmassan efter kokeriet i intervallet 1,43 (oktober) – 1,93 (februari), medan barrmassan i Mörrum mellan 1,98 (januari) – 2,11 (augusti). I fallet Munksund genomgår inte barrmassan ytterligare blekeristeg (enligt detta projekts definierade taxonomi), vilket den gör i Mörrum. Här uppgår kostnaden till mellan 2,35 (januari) - 2,48 (december). I slutsteget, torkmaskinen i Mörrum och pappersbruket i Munksund, uppgår slutkostnaden till 2,78 (januari) - 2,97 (september) och i Mörrum 1,98 (oktober) - 2,46 (augusti), se Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Jämförelse av k^* för massan genom fiberlinjen i respektive bruk

k^*		Renseri		Kokeri		Blekeri		PM/TM	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Barrmassa	Munksund	1,01	1,03	1,43	1,93	1,43	1,93	1,98	2,46
	Mörrum	1,02	1,03	1,98	2,11	2,35	2,48	2,78	2,97
Löv/textilmassa	Munksund	1,01	1,02	1,45	2,28	1,98	3,11	1,98	2,46
	Mörrum	1,02	1,02	1,92	2,21	2,31	2,64	2,70	3,15

Generellt sett är de exergimässiga kostnaderna för Mörrum högre, än för Munksund. Resultatet är väntat, eftersom man i Mörrum generellt har en mer omfattande förädlingsprocess av råvaran än i Munksund. Resultatet påverkas ytterligare, i form av en ökad kostnadsbild i Mörrum, av att en mer omfattande elproduktion äger rum i Mörrum samt att en stor inblandning av returwellpapper sker i Munksund.

I Tabell 3 nedan redogörs den ekonomiska kostnaden för massorna i respektive bruk.

Tabell 3. Jämförelse av c för massan genom fiberlinjen i respektive bruk

		Renseri	Kokeri	Blekeri	PM/TM
Barrmassa	Munksund	0,16	0,33	0,33	0,42
	Mörrum	0,19	0,40	0,51	0,59
Löv/textilmassa	Munksund	0,16	0,34	0,54	0,42
	Mörrum	0,14	0,34	0,44	0,52

För den termoeconomiska kostnaden ses liknande trender som för den exergimässiga och vad gäller hur långt en jämförelse mellan slutprodukterna kan göras kan detta diskuteras. En rimligt ansats är att för att kunna jämföra kostnadsbilderna, bör en gräns dras efter kokeriet alternativt blekeriet. Detta eftersom slutprodukterna, kraftliner respektive avsalumassa, skiljer sig så pass mycket åt och för att kunna dra lärdomar av andra bruk och olika typer av systemlösningar och driftsätt, bör produkterna vara något så när likartade.

Med detta sagt, är det fortfarande av intresse att undersöka hur kostnadsbilderna förändras genom hela processen. Exempelvis kan detta bidra till beslutsfattande i hur en produktportfölj kan utvecklas. Som i fallet Munksund kan en kostnadsminskning ses för lövmassan mellan blekeriet och pappersmaskinen. I detta fall har man alltså lyckats minska kostnadsbilden, utan att göra avkall på

slutprodukterns kvalitet. Vad som dock måste vägas in är hur marknadsvärdet påverkas av denna inblandning – hade man kunnat få en mer värdefull produkt, och även ökad marginal, om man hade fortsatt förädlingsprocessen som i fallet Mörrum? Detta kräver en analys som omfattar fler aspekter än vad som är möjligt i denna studie, exempelvis marknadsundersökningar och brukens förutsättningar för förändring o.dyl., men kan vara av intresse för framtiden.

För den ekonomiska kostnadsbilden skulle en mer dynamisk kostnadsmodell på inkommande resurser vara av intresse att implementera.

Vidare kan den exergimässiga kostnadsbilden jämföras mot den termoeconomiska, vilket visas i Tabell 4.

Tabell 4. k^* och c för interna flöden för helåret 2019

	Munksund		Mörrum	
	k^*	c	k^*	c
Använd el	3,05	0,72	6,29	1,17
Producerad el	5,29	0,94	6,60	1,21
Färsånga	3,75	0,66	5,29	0,97
Vitlut	4,91	1,02	5,39	1,18
Bränd kalk	4,02	1,35	4,46	1,82

I tabellen visas att sett över helåret 2019, är inte k^* och c proportionerliga mot varandra. Sett över helåret har den använda elen och bränd kalk en exergimässig kostnad (k^*) på 6,29 respektive 4,46 samtidigt som den termoeconomiska kostnaden (c) är 1,17 respektive 1,82, vilket påvisar en oproportionalitet. Detta är ytterligare ett exempel på att den resurseffektivaste produktionen inte nödvändigtvis är det mest ekonomiska.

Denna studies syfte är att "undersöka om nya, exergibaserad, benchmarkingmått för sulfatmassabruk kan vara användbara för att identifiera effektiviseringspotential gällande resurs- och energianvändning". Detta har till stor del behandlats i tidigare resultatredovisning, men kan kondenseras ned i Tabell 5 nedan.

Tabell 5. k^* och c för produktflöden för helåret 2019

	Munksund		Mörrum	
	k^*	c	k^*	c
Barrmassa (efter kokeriet)	1,76	0,32	2,05	0,40
Löv/textilmassa (efter blekeriet)	2,53	0,54	2,45	0,43
KL, WS & WT	2,30	0,42	-	-
Barrmassa	-	-	2,87	0,59
Textilmassa	-	-	2,88	0,52
Metanol	2,20	0,40	2,54	0,46
Terpentin	1,76	0,32	2,05	0,40

	Munksund		Mörrum	
Tallolja	2,20	0,40	2,54	0,46
Fjärrvärme	5,18	1,15	3,59	0,65

Brukens slutgiltiga massor och pappersprodukter som säljs till kund skiljer sig mycket åt. Av anledning till detta är det svårt att dra några slutsatser gällande deras kostnader sinsemellan. Istället analyseras kostnaderna där bruken är mer lika. För samtliga produktflöden, förutom fjärrvärme och löv/textilmassa (efter blekeriet), är kostnaderna mindre i fallet Munksund än i fallet Mörrum. Dels beror det på de ingående processernas exergiverkningsgrader, vilket diskuteras i avsnitt 5.5.1, där ineffektiviteten ackumuleras och belastar slutprodukterna. Med bruken som systemgräns, är det mer kostnadseffektivt att köpa in el än att producera den själv (med samma resonemang hade det varit ännu bättre för Munksund att köpa in massa för att göra liner istället för att göra den själv). För bruk med en hög självförsörjandegrad gällande el, bidrar det till större ökning av kostnaderna för slutprodukterna än om en större andel el köps in. Pannor för stödjande ångproduktion ger upphov till likande kostnadsökning som för fallet inköpt el. Detta då använt bränsle bär på lägre exergimässig och termoeconomisk kostnad än brännlut som förbränns i sodapannan, vilket minskar färskångans kostnader.

För att få en mer rättvis jämförelse av exergimässiga kostnaden behöver antingen samtliga flöden allokeras till dom delar av de beaktade systemen som är lika, vilket i praktiken är omöjligt, eller utöka systemgränsen. Hur en ökning av systemgränsen skulle kunna ske diskuteras i avsnitt 6.2.1. Ett tydligt exempel med problematiken kring huruvida belastning av inkommande flöden ska ske eller ej kan ses genom att jämföra Figur 8 med Figur 24 för fallet Mörrum. Under oktober månad är den totala exergiverkningsgraderna en av de lägsta för hela året, samtidigt som den exergimässiga kostnaden för den använda el är som lägst eftersom en stor mängd el köpts in. Anledningen till den totalt minskade verkningsgraden kan bero på att en större andel el köptes in, istället för att producera den från inkommande träråvara. Dvs. utan att vidga systemgränsen för den exergimässiga kostnaden försvåras jämförelsen, både internt och externt, om ett enskilt flöde beaktas.

Jämförelsen av brukens olika termoeconomiska kostnader har dock inte samma problem som den exergimässiga. Detta då inkommande resurser till bruken är belastade med en monetär kostnad som återspeglas i slutprodukterna, baserat på exergiverkningsgrader genom processen. Exempelvis kan de olika termoeconomiska kostnaderna för barrmassa härledas till barrkokerierna verkningsgrader, där verkningsgraden är högre i Munksund tack vare det högre utbytet som följer av att man producerar en oblekt massa.

Att kostnaderna för fjärrvärme är ungefär dubbelt så hög i Munksund jämfört med Mörrum. Detta beror främst på valet av avtappningsställe, vilket sker längre uppströms i Mörrum. Det innebär färre ackumulerade ineffektiveter och således en mindre tillskriven kostnad.

5.5.3 Produktionskostnad för produkter och marginaler

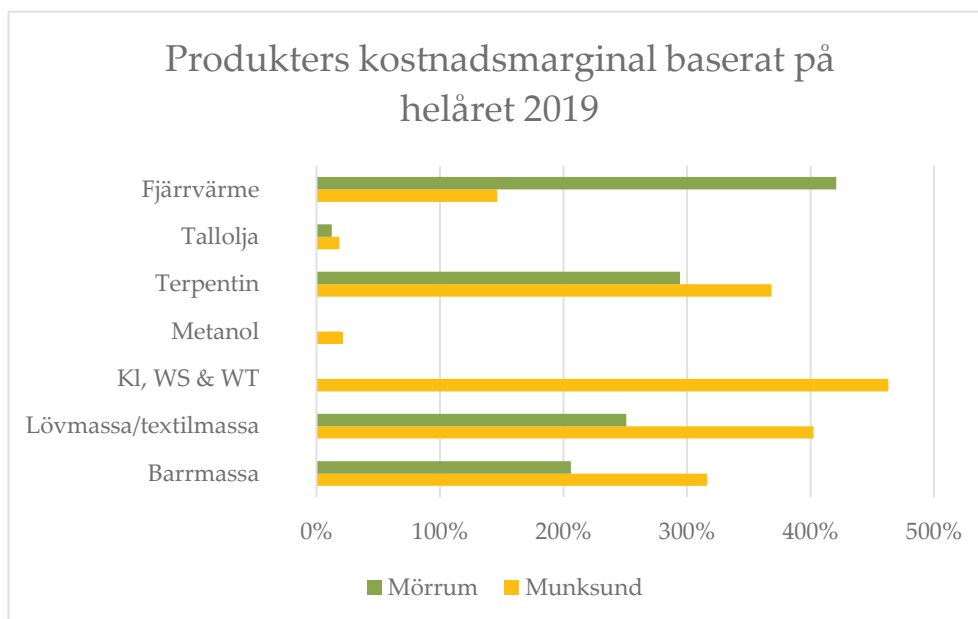
Kostnadsökningen motsvarar tillverkningskostnaden för utgående produktflöden. I Tabell 6 nedan kan de olika produktflödena från respektive bruk ses. Kostnaden är satt i relation till producerad mängd (MWh, ton, m³s, adt)

Tabell 6. Produkters ekonomiska produktionskostnad baserat på helåret 2019

	Munksund	Mörrum	Enhet
Fjärrvärme	203	96	kr/MWh
El	-	1175	kr/MWh
Mesa	-	17	kr/Ton
Lövbark	-	148	kr/m ³ s
Barrbark	-	139	kr/m ³ s
Bark	225	-	kr/m ³ s
Spån	-	97	kr/m ³ s
Rejektmassa	-	651	kr/Ton
Lövvedsmassa/Textilmassa	1692	2422	kr/adt
Barrvedsmassa	2041	2779	kr/adt
Kraftliner	2022	-	kr/adt
Wet strength	2033	-	kr/adt
White top	1984	-	kr/adt
Metanol	2350	-	kr/ton
Terpentin	3740	4443	kr/ton
Tallolja	4375	4620	kr/ton

För samma och likartade produkter är produktionskostnaden lägre för samtliga produkter som kommer ifrån Munksunds än Mörrums. Inköpskostnaden för ingående material- och energiflöden har antagits vara detsamma för bägge bruken och återfinns i bilaga 2.

När en kostnadsbestämmelse är utförd, kan denna ställas mot marknadsvärdet för respektive produkt, vilket visas i Figur 27 nedan. Observera att endast råvarukostnader är inkluderade i figuren nedan. Fasta kostnader som relateras till varje enskild process, såsom underhållskostnader, personalkostnader o.dyl., är inte medräknade p.g.a. tillgängliga indata, men kan inkluderas i framtida arbeten.



Figur 27. Olika produkters kostnadsmarginal när produktionskostnad jämförs mot marknadsvärde, en positiv marginal innebär att produkten säljs med vinst. Observera att i beräkningarna har endast råvarukostnader inkluderats.

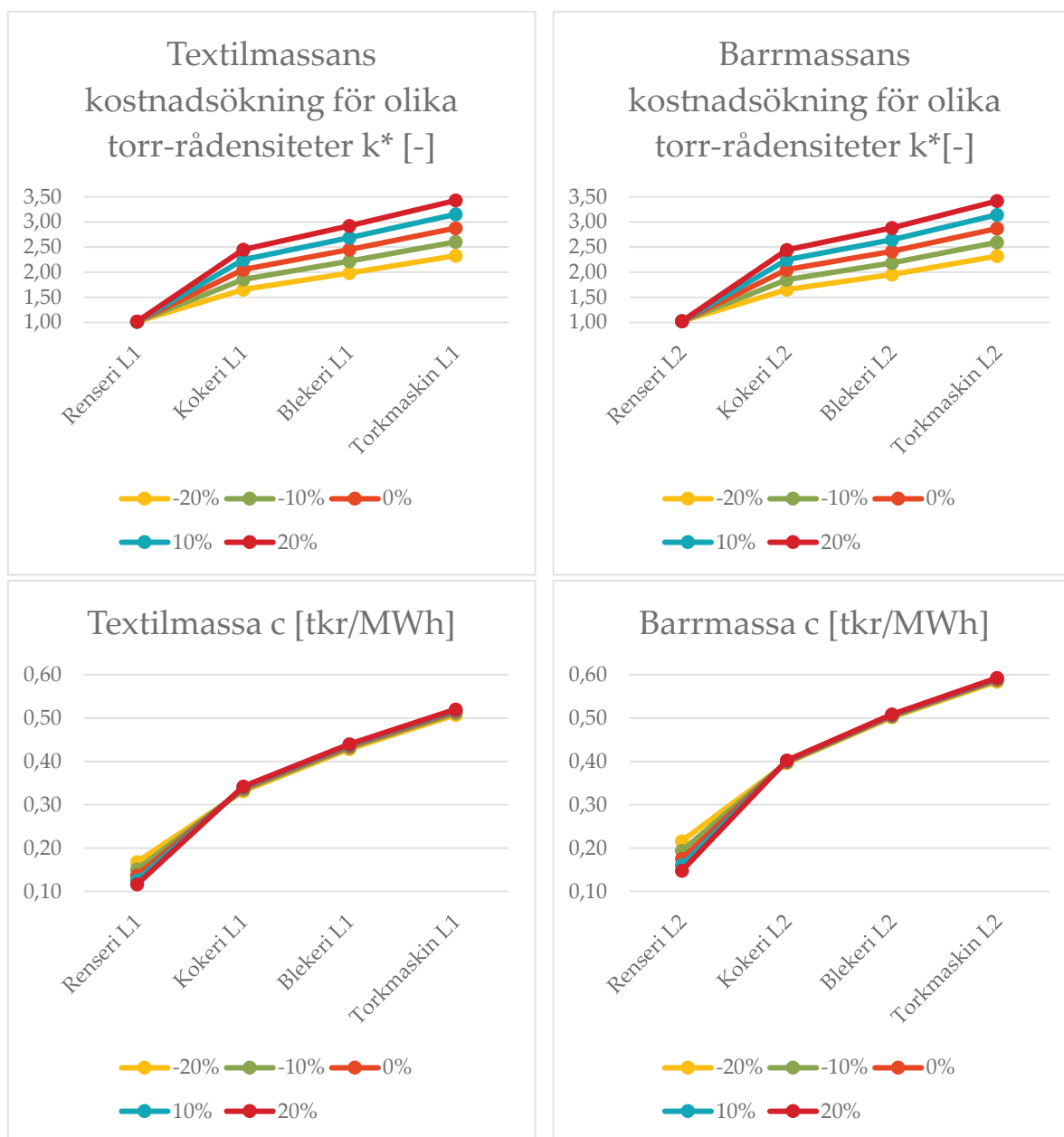
De huvudsakliga produkterna, massa och kraftliner, besitter samtliga en god marginal. Marginalen är dock lägre för Mörrum än Munksund, där lövmassan för Munksund har en marginal på 402 % medan textilmassan för Mörrum är 251 %. Samma tendens kan ses för barrmassan (316 % för Munksund och 206 % för Mörrum). Slutprodukterna i Munksund, kraftliner, wet strength och white top, besitter den högsta marginalen på 463 %. En stor skillnad i kostnadseffektivitet kan ses för "restprodukterna" tallolja, terpentin och metanol, där terpentin är överlägset mest kostnadseffektivt att producera. Marginalen för metanol och tallolja är knappt positiva, 21 % respektive 19 % för Munksund och 12 % för Mörrum.

Grafen återspeglar hur pass mycket differensen i c påverkar brukens övergripande lönsamhet. Exempelvis är differensen för faktorn c mellan brukens barrmassor är 25 % (0,32 för Munksund och 0,40 för Mörrum), medan skillnaden i marginal är 53 % (316 % för Munksund och 206 % för Mörrum). Dvs. små differenser i faktorn c har stor påverkan på den totala kostnadsbilden.

5.6 KÄNSLIGHETSANALYS

För att undersöka robustheten i resultaten har en känslighetsanalys utförts över hur torr-rådensiteten hos den exergimässigt största ingående resursens, rundved, påverkar k^* och c genom fiberlinjen i Mörrum.

Rundvedens kemiska exergiinnehåll beräknades, som tidigare nämnt, utifrån känd m^3f samt antagna värden för torr-rådensitet. I Figur 28 nedan motsvarar 0 % det ursprungliga värdet för torr-rådensiteten i arbetet och de övriga procentsatserna motsvarar en sänkning eller höjning av ursprungsvärdet.



Figur 28. Känslighetsanalyser över hur faktorerna k^* och c för massans kostnadsökning påverkas vid en procentuell förändring av ingående vedråvaras torr-rådensitet.

Vid en ändring av torr-rådensitet ändras exergiinnehållet i flisen som går till respektive kokare, vilket gör att verkningsgraden över kokerierna förändras. Vid en lägre torr-rådensitet ökar verkningsgraden i kokeriet. Detta motsvarar ett högre utbyte då samtliga övriga flöden inklusive massaproduktion konstanta.

Vid betraktelse av den termoeconomiska kostnaden ser det dock annorlunda ut. Priset för inkommande träråvara grundar sig i EUR/m³f och påverkas således inte av råvarans kvalitet. Det medför att den termoeconomiska kostnaden för utkommande flöden ur renserierna ökar, då exergiinnehållet i inkommande råvara minskar. Sett till absoluta värden, ger variationen av torr-rådensitet en liten påverkan i fiberlinjen, vilket kan ses på den termoeconomiska kostnaden från kokeri till torkmaskin i Figur 28 ovan. Vad som sker är att övriga utgående produkter ur renseriet belastas med en högre monetär kostnad i de fall då torr-rådensiteten är låg eftersom de utgör en större procentuell andel, vilket även illustreras i Tabell 7 nedan.

Tabell 7. Känslighetsanalys över hur faktorerna k* och c påverkas vid en procentuell förändring (mellan -20 % till +20 %) av ingående vedråvaras torr-rådensitet

	k*					c				
	-20 %	-10 %	0 %	10 %	20 %	-20 %	-10 %	0 %	10 %	20 %
Egenprod el	-19 %	-9 %	-	9 %	19 %	-1 %	0 %	-	0 %	1 %
Ånga från SP	-19 %	-10 %	-	10 %	19 %	-1 %	-1 %	-	0 %	1 %
Ånga från ÅP	-6 %	-3 %	-	3 %	6 %	12 %	5 %	-	-4 %	-8 %
Såld lövbark	0 %	0 %	-	0 %	0 %	22 %	10 %	-	-8 %	-15 %
Kalk	-5 %	-2 %	-	2 %	5 %	0 %	0 %	-	0 %	0 %

Enligt tabellen ovan kan en faktor som återspeglar kvaliteten i ett material- eller energiflöde ge en påverkan vid en utvärdering av effektiviteten. Det motsatta kan sägas om en faktor ej återspeglar kvaliteten, exempelvis priset för inkommande rundved. En ökad resurseffektivitet medför att en minskad exergimässig kostnad, då mindre exergidestruktion sker. Det gör att även om den termoeconomiska kostnaden i ett visst processavsnitt ökar, kommer en ökad resurseffektivitet i andra processavsnitt minska dess inverkan. Om priset för den inkommande råvaran hade berott på dess kvalitet hade resultatet för den termoeconomiska kostnaden c i följt samma trend som den exergimässiga kostnaden k*.

Sammantaget kan sägas att en enskild faktors påverkan på exergiinnehållet är stor och kan ha stor påverkan på hur resurseffektiviteten utvärderas. I analysen ovan framgår det att resultatet i stor utsträckning påverkas av hur dessa faktorer väljs och vad de representerar.

6 Diskussion

6.1 ANTAGANDEN OCH DATAUNDERLAGETS PÅVERKAN

6.1.1 Generellt om antaganden

I och med att detta arbetes indata har grundat sig på driftdata och energirapporter från respektive bruk, bör ett resonemang kring detta föras. Slutsatsen är att denna data har fungerat väl att använda och att det mesta finns tillgängligt. Tidsramen för detta arbete har varit relativt liten och en bedömning är det kan göras ytterligare förbättringar av beräkningar och kartläggningen.

6.1.2 Fysiskt och kemiskt exergiinnehåll

Exergibegreppet innehåller, som nämnt i teorikapitlet, 5 delar (fysisk, kemisk, potentiell, kinetisk samt nukleär exergi). I detta arbete har endast den fysiska och kemiska delen tagits med, eftersom det är dessa som har någon reell betydelse⁴ i med ett massabruk.

Med anledning av ett begränsat dataunderlag har dock de flesta flöden enbart beräknats utifrån antingen fysisk eller kemisk exergi. För exempelvis råvaror, bränslen och tillsatskemikalier har enbart kemisk exergi beräknats, då den fysiska exergin endast utgör en marginell del utav flödets totala exergiinnehåll.

För diverse lutar och massor har inte den termiska exergin inkluderats. Detta av anledning kring osäkerhet i hur pass representativt dataunderlaget har varit för de kartlagda strömmarna. Exempelvis finns temperaturloggar för en del av dessa flöden men oklarheter kring exakt var temperaturerna är uppmätta.

I fallet med ångor har däremot ett avsevärt mer utförligt dataunderlag funnits tillgängligt, vilket har medfört att ångflödens exergimängder har beräknats mer utförligt.

6.1.3 Fördelning av tillsatskemikalier

Fördelningen av vitlut och kemikalier baserat på produkt och linje är svår att göra med det erhållna dataunderlaget. Sett till totala exergimängder är dock tillsatskemikalier förhållandevis små.

Fördelningen av blekkemikalier och andra tillsatskemikalier har i viss mån grundats på dataunderlag, men i vissa fall på en antagen fördelning. Dess påverkan på processernas exergiverkningsgrad och exergimässiga kostnad bedöms som relativt liten, då dess exergiinnehåll är betydligt lägre än exempelvis massans eller lutarnas. Vad fördelning däremot påverkar desto mer är det ekonomiska utfallet. I jämförelse med inkommande rundved, har dessa kemikalier en faktor 20–40 gånger högre termekonomisk kostnad, eftersom de utgör uppemot 8 % av

⁴ Detta är generell praxis när exergianalyser tillämpas i en industriell kontext. Det kan diskuteras huruvida framförallt kinetisk och potentiell exergi (samma definition som potentiell och kinetisk energi) får en påverkan, då flödena som analyseras har både en hastighet och höjdskillnader. Detta anses dock vara utanför problembeskrivningen i detta (och liknande) projekt.

brukens totala inköpskostnader. Hur dessa fördelas påverkar i viss mån de flesta flöden, men främst den termoekonomiska kostnaden hos produkterna i fiberlinjen, där majoriteten av kemikalierna förbrukas.

6.1.4 Vit- och tunnlutens användning i systemet

Fördelning av vitlut gjordes utifrån kända flödesmätningar till respektive kokare och exergiinnehållet i tunnluten antogs till summan av motsvarande exergimängd i brännlut, tallolja och metanol. Vidare antogs exergimängden i tunnluten från respektive kokare vara linjärt proportionell mot vitlutssatsningen i respektive kokare. Detta antagande gjordes då underlag gällande mängd och egenskaper för tunnluten från respektive kokare saknades.

Vad gäller kokerierna påverkas dessa av antagandet gällande fördelningen av vitlut. Mängden tallolja som utvinns ur indunstningen härstammar främst från barrved (19), vilket bör innebära att exergiinnehållet per kg tunnlut är högre från barrved än lövved. Förutsatt att mängden tunnlut är oförändrad samt att fördelningen av den fortsatt baseras på satsad vitlut, skulle ett högre exergiinnehåll i tunnluten från barrkokeriet innebära en ökad exergiverkningsgrad i processen.

6.1.5 Fiberlinjens innehåll av cellulosa, hemicellulosa och lignin

Antagande att hemicellulosan, som finns i den ingående rundveden, försvinner i kokeriet och ersätts av cellulosa bedöms inte påverka resultatet nämnvärt. Detta eftersom standardexergivärdena för cellulosa och hemicellulosa är snarlika. Vad gäller utgående produkter består massan enbart av lignin och cellulosa, där förhållandet baseras på kappatal.

6.1.6 Brännlutens exergivärde

Brännlutens exergiinnehåll antogs till det som redovisades som bränsleförbrukning för respektive bruk, m.a.p. energiinnehåll. Exergiinnehållet för brännluten bör vara något högre än det valda eftersom exempelvis askåterföringen inte medräknas i den valda metodiken.

6.1.7 Grönlut

Energiinnehållet för grönluten beräknades via följande faktorer:

- Mätvärden på vitlutens beståndsdelar.
- Antagandet att mängden natriumsulfid är konstant genom kausticeringen.
- Att mängden natriumkarbonat baseras på känd mängd natriumhydroxid och aktuell kausticeringsgrad.

I verkligheten består grönluten av fler ämnen än vad som tagits hänsyn till i detta arbete. Ämnen som förekommer är exempelvis natriumsulfat och orenheter, och vid betraktelse av dessa skulle grönlutens exergiinnehåll öka (20). Den relativa ökningen skulle vara marginell och medföra att verkningsgraden i kausticeringen skulle minska något, men antagligen inte i någon större omfattning då de exergimässigt dominerande beståndsdelar i grönluten har beaktats.

6.1.8 Avsaknaden av sekundärvarmefflöden i studien

I detta arbete har matarvatten, färskånga och kondensat varit de huvudsakliga vattenflöden som beaktats. I bruken finns dock omfattande sekundärvarmesystem, med bland annat varmvattnet som används inom processavsnitten, vilket skulle ökat upplösningen på resultatet av studien om inkluderats. Anledningen till att sekundärvarmesystemet har bortsetts ifrån beror främst på att sekundärvarmesystem är komplexa och saknar generellt en tillfredställande nivå av mätdata.

Det totala exergiinnehållet i sekundärvarmesystem bedöms dock vara betydligt lägre än andra vattenflöden på ett bruk, då vattentemperaturen i regel ligger i intervallet 50–95°C. Under antagandet att allt råvatten som tas in, förutom matarvatten, motsvarar vattnet i sekundärvarmesystemet med en temperatur 95 °C en exergimängd motsvarande ca. 5 % av total inkommande exergimängd till bruken.

Med det sagt vore det naturligtvis önskvärt att även inkludera sekundärvarmesystemet för att öka precisionen i resultatet.

6.1.9 Trädråvarans egenskaper

Ingående rundved och flis är de största materialflödena i ett kemiskt massabruk. Beräkningar och antaganden gällande dessa flöden påverkar således resultatet i stor utsträckning, vilket exempelvis kan ses i kapitel 5.6., där det framgår hur vald torr-rådensitet påverkar resurseffektiviteten.

I Munksund utvinns en större mängd terpentin och ungefär lika mycket tallolja som i Mörrum, detta trots att inkommande mängd m³f barrved, lövved och flis är ca. 50 % lägre. Det kan bero på att utformningen av processerna är lämpligare för utvinning av dessa flöden. En mer trolig anledning är att en större del av aktuella ämnen återfinns i rundveds och flisflödet i fallet Munksund, än i fallet Mörrum.

Extraktivämnena, som främst utgörs av terpenener, fetter och fenoler, varierar mellan trädslag. Dessa ämnen har uppemot dubbelt så högt värmevärde gentemot ren cellulosa, vilket leder till att en hög andel extraktivämnena i rundveden eller flisen resulterar i ett högre värmevärde. Vid lagring avdunstar dessa ämnen succesivt, oavsett om materialet är rötat eller friskt. Röta kan dock påverka torr-rådensiteten, som annars främst påverkas av trädets växtplats, årstid och trädslag. (21)

Beroende på egenskaperna som rundveden och flisen besitter påverkas exergiinnehållet. I arbetet har kvantifiering av exergiinnehållet utgått från konstanter som ej återspeglar egenskaperna som råder för varje månad vid respektive bruk. För att exergiverkningsgrader, exergimässig kostnad samt termoeconomisk kostnad ska bli mer precisa är en ökad kännedom kring rundvedens och flisens egenskaper nödvändig. Det skulle även möjliggöra en mer proaktiv styrning på produktionen, där egenskapernas eventuella påverkan kan förutses.

6.2 METODIKENS STYRKOR OCH SVAGHETER

6.2.1 Ingående resursflödens exergimässiga och ekonomiska kostnader

I och med att metoden beskriver resurseffektivitet baserat på uppströms flöden i ett system, definieras systemets ingående flödens exergimässiga kostnad som 1. I praktiken innebär detta att ett flöde som når systemgränsen inte kräver någon uppströms insats, eftersom det utgör en startnod för nedströms kostnadsuppskattning. Detta medför att om en stor del resurser tillförs systemet, påverkar detta slutprodukternas kostnadsbild positivt (lägre kostnadsbild) och vice versa.

Ett tydligt exempel på detta återfinns för Munksunds elanvändning, där använd el (dvs. den el som används i exempelvis fiberlinjen) besitter en exergimässig kostnad på 3,05 medan den producerade elen (dvs. den el som produceras i turbinen) har en kostnad på 5,29. Här uppstår frågor om och hur man kvantifierar ingående resursernas kostnadsbild, något som även debatteras i andra forum⁵. Rimligt är dock att högkvalitativa resurser som exempelvis el på något sätt bör belastas, för att ge en mer rättvisande bild av systemets effektivitet vad gäller elproduktion.

För mindre kvalitativa resurser är frågan likartad, exempelvis för returwellpapp. Här uppstår dock en annan vinkling på problemet: ska denna belastas relativt tungt likt el, eller anses vara en "gratis" resurs som annars hade hamnat på deponi alternativt energiåtervunnits?

Oavsett om en viktningsfaktor används för inköpta resurser, bör den vara densamma (eller åtminstone i samma storleksordning) för alla bruk, vilket skulle ge en mer rättvisande totalbild.

Oavsett vad svaret på ovanstående frågeställning är, påverkas inte de ekonomiska kostnaderna på samma sätt som de exergimässiga, eftersom de baseras på resursernas verkliga inköpspris. Med andra ord blir den ekonomiska kostnaden mer rättvis än den exergimässiga, eftersom den baseras på faktiska prisbilder, snarare än uppskattade viktningsfaktorer.

Om syftet med metoden är att utvärdera ekonomiska kostnader för ett flöde, är kostnadsbildens på ingående resursflöden inte en källa till betydande osäkerheter. Ska däremot resurseffektiviteten utvärderas, då krävs en mer rättvisande bild på ingående resursernas exergimässiga kostnadsbild.

6.2.2 Produkters exergiinnehåll vs kvalitet

En begränsning med exergibegreppet när det tillämpas på produktflöden, är att exergiinnehållet inte återspeglar en produkts kvalitet. Dvs. en produkt som marknadsmässigt anses högvärdig (högre marknadsvärde per ton, exempelvis Mörrums textilmassa eller Munksunds White Top-produkt) inte besitter ett större exergiinnehåll än en lågvärdig (lägre marknadsvärde per ton, exempelvis Munksunds kraftliner). Detta beror på att ämnens kemiska exergistandardvärde bestäms utifrån naturvetenskapliga grundlagar och inte utifrån marknadsmässiga

⁵ Exempel på detta är frågan kring olika energislags primärenergital i boverkets byggregler

mekanismer. I det naturvetenskapliga, dvs. exergimässiga, perspektivet värdesätts lignin högre än cellulosa, men utifrån ett marknadsmässigt perspektiv är det mer sannolikt att cellulosa är högre värderat än lignin.

Detta faktum kan göra resultatet svårtolkat, då det kan anses vara rimligt att en dyr produkt ska besitta ett högt exergiinnehåll. Oavsett exergiinnehåll i en slutprodukt kommer en produkt som är processad i högre grad, exempelvis textilmassa, besitta högre kostnader än en mindre processad produkt, exempelvis kraftliner, eftersom mer resurser självfallet krävs ju mer en produkt processas. I detta ljus är det viktigt att inkludera marknadsvärde vid analyser av exergimässiga och termoeconomiska kostnader.

6.2.3 RPI – klassificering

I klassificeringen har i regel samtliga utgående flöden från en process definierats som produktflöden och därmed agerat kostnadsbärare av exergidestruktion och förluster. I vissa fall har däremot vissa utgående flöden definierats som utgående resurs. Detta har gjort då spårbarheten i ett flöde genom en process varit god, exempelvis i fallen då färskånga har omvandlats till kondensat.

Det vore önskvärt att kunna göra detta för fler olika typer av flöden, men ställer mycket höga krav på indata och upplösning på taxonomin. Fördelarna med en bättre RPI-klassificering, likt fallet med ånga och kondensat, är att en mer rättvis kostnadsfördelning sker, vilken kan baseras på en process huvudsakliga syfte. Ett exempel på när en mer rättvis RPI-klassificering är fördelaktig, är i fallet med utvinning av tallolja. Talloljan fås som en biprodukt utifrån massabrukets huvudsakliga processer och hur pass mycket kostnader som bör tilldelas denna kan diskuteras. Denna studie påvisade en låg lönsamhet för talloljeproduktion för båda bruken, men om RPI-klassificeringen görs annorlunda kan lönsamheten öka. Detta exempel understryker ytterligare vikten av ett standardiserat arbetssätt som bör gälla generellt inom en bransch.

6.3 METODENS POTENTIAL ATT UTGÖRA NYTT BENCHMARKINGMÅTT

6.3.1 Jämförelse mot andra etablerade nyckeltal

I arbetet har det undersökts om huruvida exergimässig och termoeconomisk kostnad kan utgöra ett nyckeltal för både intern och extern benchmarking, med avseende på resurs- och energieffektivitet. Även exergiverkningsgrader har behandlats.

Tidigare har det fastslagits att de konventionella nyckeltalen är otillräckliga, då återkoppling gällande orsak och förbättring saknas samt att de enbart speglar en enskild verksamhet (14). Metodiken som använts i detta arbete ger svar på många frågor gällande orsak och förbättring. Det går att härleda enskilda variationer till specifika flöden eller processavsnitt. Dessutom ges möjlighet till en extern benchmarking, antingen från ett resursmässigt eller ett ekonomiskt perspektiv, som kan bidra till förståelse kring hur vissa systemlösningar eller driftsätt påverkar den slutgiltiga effektiviteten.

Konventionella nyckeltal, likt ton ånga per adt, är svårare att jämföra mellan bruk. Detta då de nödvändigtvis inte återspeglar kvaliteten eller egenskaper hos de betraktade flödena. Om exempelvis trycket och temperaturen i ångan samt slutgiltig producerad vara skiljer sig kraftigt åt mellan de betraktade bruken är det svårt att dra några direkta slutsatser från en sådan jämförelse.

Exergibaserade nyckeltal beskriver ett systems resurseffektivitet där hänsyn tas till flödens och processers fysikaliska egenskaper. Det är ett objektiva mått som påvisar utnyttjandegraden av ingående råvarors potential. Men för att förstå enskilda parametrars påverkan på resurs- och energieffektiviteten behövs andra typer av nyckeltal som kan ge djupare förklaringar och utreda eventuella rotorsaker till variationer.

I fall där enskilda processparametrar ska utvärderas kan konventionella nyckeltal användas. Exempelvis likt analysen i avsnitt 5.3.3 där kokeriets exergiverkningsgrad visar sig korrelera med åtgångstalet. För en mer djupgående förståelse skulle andra typer av nyckeltal med fördel kunna användas, exempelvis dimensionslösa nyckeltal likt de som presenteras i studien gjord av (4). Dessa nyckeltal är skraddasydda för ett massabruks enhetsprocesser baserat på de parametrar som karaktäriserar processen. Genom att kombinera exergibaserade och exempelvis de ovan nämnda dimensionslösa nyckeltalen, skulle orsak och anledning till hög eller låg resurs- och energieffektivitet eventuellt kunna identifieras snabbare. Möjligheterna med en sådan analys anses vara stora.

Exempelvis skulle den exergimässiga eller termoeconomiska kostnaden kunna vara styrande i den mån att den ska minimeras, för att minska produktionskostnaderna likt resultatet i Tabell 6. De dimensionslösa nyckeltalen som påverkar kostnaderna skulle kunna identifieras och övervakas, för att över tid göra produktionen mer resurs- och kostnadseffektiv. Dessutom skulle resursmässiga eller ekonomiska konsekvenser vid förändringar av de dimensionslösa nyckeltalen kunna följas upp och antagligen även förutses.

6.3.2 Lämplighet

Den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden är ett sätt att bestämma nyckeltal för stora, komplexa, system. Metoden tar hänsyn till fysisk struktur och aktuella driftdata vilket medför en god spårbarhet i resultaten.

Utifrån resultaten i denna studie har följande identifierats:

1. Metoden möjliggör etablering av ett gemensamt nyckeltal för alla produkter och flöden i ett system.
2. Nyckeltalen möjliggör en härledning till orsakssamband, som kan bidra till nya analysmöjligheter.
3. Att använda exergi som koncept framför energi anses vara fördelaktigt, eftersom exergi speglar resursers värde på ett mer rättvisande sätt. Exempelvis illustreras vattenflödets (ånga, kondensat etc.) värde tydligare när exergibegreppet tillämpas framför energibegreppet.
4. Eventuella felaktigheter vid tillämpning av metodens är tydliga och relativt enkla att åtgärda.

Det bör nämnas är att den termoeconomiska faktorn, c , kan anses innehålla känslig information sett ur ett affärsmässigt perspektiv. Att ekonomiskt kunna bestämma enskilda flödens produktionskostnad anses vara värdefull kunskap, men kan också vara kunskap som företag ogärna delar externt.

Exergiverkningsgrader å sin sida är mer relevanta för att utvärdera enskilda processer snarare än flöden och bör användas som komplement till den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden. Detta beror på att exergiverkningsgrader inte återspeglar insatser för att producera ett flöde, utan visar skillnaden mellan in- och utgående flöden. Vid bestämning av processers exergiverkningsgrad är det viktigt att kvantifiera vad som är exergidestruktion (till exempel blandning av hetvatten vid olika temperaturer) och vad som är förlustflöde (till exempel heta rökgaser). Detta för att hitta möjliga effektiviseringar. Ett exempel på detta är när en exergianalys möjliggjorde en identifiering av en alternativ, mer effektiv, kausticeringsmetod i jämförelse med den konventionella metoden (8). Genom att arbeta med en god värmeintegration (med mindre exergiförluster) fås högre energi- och exergiverkningsgrader för den alternativa metoden.

Exemplet med den alternativa kausticeringsmetoden är ett bevis för att nya processinnovationer skulle kunna uppenbaras med andra analysmetoder, exempelvis exergianalysen, än de vanligt förekommande.

I denna studie har fokus lagts på att kvantifiera alla flöden där tillgängliga data funnits till hands. För vidare studier kan det vara av intresse att kvantifiera samtliga flöden som relaterar till en specifik process mer exakt.

6.3.3 Standardiseringsbehov för ökad repeterbarhet

Denna studie syftar till att utvärdera nya benchmarkingsmått som genereras enligt en viss metodik. Då metodiken i har utformats allt eftersom arbetet fortskridit, krävs en standardiserad metodik, där bland annat följande områden måste definierats:

- Vilka mätpunkter skall vara minimikrav för att ge ett representativt resultat. Exempelvis måste ett antal datapunkter för lutcyklen och fiberlinjen bestämmas för validering av resultat.
- Vilken är den högsta tillåtna aggregationsnivån på processer (till exempel en press i syrgasblekeriet där fibrer försvinner i filtratet, en avdelning som hela syrgasblekeriet eller flera avdelningar som sileri, syrgasblekeri och blekeri.
- Kostnadsfaktorer på ingående resurser. Exempelvis bör inköpt el, inköpt pappersmassa och biobränsle ha en exergimässig belastningsfaktor över 1 då det finns alternativa metoder att framställa dessa internt på bruken.
- Standardiserad RPI-klassificering.

Med en definierad standard skulle både jämförbarheten och repeterbarheten öka mellan genererade nyckeltal.

7 Slutsatser

- Den exergimässiga kostnaden, k^* [-], samt den termoeconomiska kostnaden, c [tkr/MWh] är lämpliga för att etablera nya benchmarkingmått inom pappers-och massaindustrin och kan tillämpas på alla typer av flöden och slutprodukter. Metoden har ett antal för- och nackdelar, men fördelarna anses i stor utsträckning överväga nackdelarna.
- Utvärderingen av processers effektivitet utförs lämpligast utifrån exergiverkningsgrad, där identifiering av förlustflöden och exergidestruktion kan bidra till en ökad processkänedom. k^* är bättre lämpat för att utvärdera flödens resurseffektivitet, där exergiverkningsgrader utgör ett efterföljande analysverktyg.
- Kombinationen av exergimässig kostnad, termoeconomisk kostnad och exergiverkningsgrader kan bidra till nya analysmöjligheter gällande pappers- och massabruks resurs-, kostnads-, och energieffektivitet.
- Det finns stora möjligheter att analysera det dataunderlag som redan finns i högre grad än vad som görs idag. Exergianalysen ger en ny infallsvinkel i detta analysarbete.
- Ytterligare bruk bör utvärderas enligt den exergimässiga och termoeconomiska kostnaden i syfte att:
 1. Bidra till uppbyggnad av en nyckeltalsdatabas där olika riktvärden för olika produktkategorier kan definieras
 2. Bidra till ökad kännedom kring vad som påverkar nyckeltalen samt hur förluster kan minimeras

8 Framtida arbeten

Om de nya benchmarkingmått ska etableras på bred front, krävs en standardisering av metodiken för att erhålla jämförbara resultat. Exempelvis definitioner av vilken (högsta) aggregationsnivå och vilka mätpunkter som (minimalt) ska användas krävs. Även definitioner kring belastningsfaktorer för inkommande resursflöden bör bestämmas.

Fler kartläggningar av bruk enligt den exergimässiga kostnaden bör utföras i syfte att etablera k^* , och eventuellt c , som nyckeltal.

Generellt är kunskapsnivån låg vad gäller egenskaper för den ingående rundveden. Minst två aspekter skulle gynnas av en ökad kunskapsnivå.

1. Mer rättvisande exergiverkningsgrad om ingående råvaras parametrar baseras på uppmätta värden/prover, snarare än rena schabloner.
2. Kvantifiering av värdedevalveringen som sker ju längre en trädråvara ligger på timmerupplaget. Exempelvis avdunstar terpenier i barrträd ju längre de ligger på upplag, vilket minskar den teoretiskt möjliga terpentinutvinningen.

Sökord

Benchmarking

Nyckeltal

Exergi

Massabruk

Energieffektivitet

Resurseffektivitet

Exergimässig kostnad

Termoekonomisk kostnad

Exergiverkningsgrad

Taxonomi

Resurser

Produkter

Förluster

9 Litteraturförteckning

1. **Andersson, E, o.a.** How to implement energy performance indicators for successful energy management practices in Kraft pulp mills: A bottom-up approach. (*Forthcoming*).
2. **Lozano, M och Valero, A.** Theory of exergetic cost. *Energy*. 1993, Vol. 18, 9.
3. **Querol, E, Gonzales-Regueral, B och Perez-Benedito, J.L.** *Practical Approach to Exergy and Thermo-economic Analyses of Industrial Processes*. London, Hiedelberg : Springer, 2013.
4. **Ammara, R, Fradette, L och Paris, J.** Equipment performance analysis of a Canadian Kraft mill. Part I: Development of new key performance indicators (KPI). *Chemical Engineering Research and Design*. 160-172, 2016, 115.
5. **Dincer, Ibrahim och Rosen, Mark.** *Exergy: Energy, Environment and Sustainable developmen*. Jordan Hill, Oxford : Elsevier, 2013.
6. **Wall, Göran.** *EXERGY FLOWS IN INDUSTRIAL PROCESSES*. Göteborg : Chalmers University of Technology and University of Göteborg, 1986.
7. **Ammara, Radia.** *SYSTEMATIC EQUIPMENT PERFORMANCE ANALYSIS OF A KRAFT PROCESS THROUGH NEW AND ADAPTED KEY PERFORMANCE INDICATORS*. Montréal : Université de Montréal, 2015.
8. **Richards, Tobias, Pavletic, Carlos och Pettersson, Johan.** Efficiencies of NaOH production methods in a Kraft pulp mill. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*. 2009, Vol. 33, 1341-1351.
9. **Richards, Tobias och Theliander, Hans.** Second-law analysis applied to a kraft pulp mill. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2005, Vol. 20, 1.
10. —. Process efficiency with entropy – The recovery cycle in the kraft pulp process. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2005, Vol. 20, 3.
11. **Bou Malham, Christelle, o.a.** Hybrid Optimization Methodology (Exergy/Pinch) and Application on a Simple Process. *Energies*. 2019, Vol. 12, 3324.
12. **Wall, Göran och Gong, Mei.** *EXERGY ANALYSIS VERSUS PINCH TECHNOLOGY*. [bokförf.] et al. P. Alvfors. *Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems*. Kristianstad : Department of Engineering, Kristianstad University, 1996.
13. **IEA.** *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*. Paris : International Energy Agency, 2014.
14. **Andersson, E och Thollander, P.** Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*. 229-235, 2019, 24.

15. **Clifford, L. Fitzsimons M. Horrigan G. McNamara E. Doherty T. Phelana B. Corcorana Y. Delauré E.** Assessing the thermodynamic performance of Irish municipal wastewater treatment plants using exergy analysis: a potential benchmarking approach. *Journal of Cleaner Production*. 2016, Vol. 131.
16. **Mateos-Espejel, Enrique, o.a.** Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulping mill. Part II: Benchmarking analysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011, Vol. 89.
17. **Szargut, Jan.** *Exergy method: technical and ecological applications*. Southampton : WIT Press, 2005.
18. **Nationalencyklopedin.** Taxonomi. *Nationalencyklopedin*. [Online] den 15 07 2020. [Citat: den 15 07 2020.] <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/taxonomi>.
19. **Kangas, Petteri, Kaijaluoto, Sakari och Määtänen, Marjo.** Evaluation of future pulp mill concepts – Reference model of a modern Nordic kraft pulp mill. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2014, Vol. 29, 4.
20. **van Walsum, Peter G och Um, Byung-Hwan.** *Acid Hydrolysis of Hemicellulose in Green Liquor Pre-Pulping Extract of Mixed Northern Hardwoods*. Orono : University of Maine, 2009. DOI 10.1007/s12010-009-8561-8.
21. **Lehtikangas, Päivi.** *LAGRINGSHANDBOK FÖR TRÄDBRÄNSLEN*. Uppsala : Sveriges lantbruksuniversitet, 1999. ISBN 91-576-5564-2 .
22. **Kotas, Tadeusz J.** *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. London : Exergon Publishing Company UK Ltd, 2012. ISBN 978-1-908341-89-1.
23. **Eboh, Francis Chinweuba, Ahlström, Peter och Richards, Tobias.** Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. *Energy Science & Engineering*. 217-231, 2016, Vol. 4, 3.
24. **Stougie, Lydia.** *Exergy and Sustainability - Insights into the Value of Exergy Analysis in Sustainability Assessment of Technological Systems*. 2014. ISBN 978-94-6186-365-2.
25. **Ayres, Robert U, Ayres, Leslie W och Martinás, Katalin.** *ECO-THERMODYNAMICS: EXERGY AND LIFE CYCLE ANALYSIS*. Fontainebleau cedex : INSEAD's Centre for the Management of Environmental Resources, 1996.
26. **Liu, Fang, o.a.** Exergy analysis of a new lignocellulosic biomass-based polygeneration system. *Energy*. 1087/1095, 2017, Vol. 140.
27. **Livsmedelsverket.** *Klimatpåverkan och energianvändning från livsmedelsförpackningar*. u.o. : Livsmedelsverket, 2011. ISSN 1104-7089.
28. **Alibaba.** Alibaba.com. *Bulk Coated Food Additive Calcium Carbonate Powder Caco3* . [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.alibaba.com/product-detail/Bulk-Coated-Food-Additive-Calcium->

Carbonate_60671011847.html?spm=a2700.7724857.normalList.79.16a028b9nKMWwj

29. —. Alibaba.com. *Sodium Formate With Best Price*. [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] https://www.alibaba.com/product-detail/Sodium-Formate-With-Best-Price_516511928.html?spm=a2700.7724857.normalList.8.5f817b09WYUsUn&s=p&fullFirstScreen=true.

30. **Preem AB**. Preem.se. *Listpriser Bulk*. [Online] den 26 Oktober 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.preem.se/foretag/kund-hos-preem/listpriser/listpriser-bulk/>.

31. **Paulrud, Susanne och Gustavsson, Lennart**. *Tekniska och ekonomiska förutsättningar för oljeersättning i industrin med pyrolysolja*. Borås : RISE Research Institutes of Sweden, 2017.

32. **Berg Mill Supply**. Bergmill.com. *HAS THE CARDBOARD RECYCLING INDUSTRY FALLEN FLAT?* [Online] den 8 Juli 2019. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://bergmill.com/2019/07/08/has-the-cardboard-recycling-industry-fallen-flat/>.

33. **Energimyndigheten**. *Läget på energimarknaderna Biodrivmedel och fasta biobränslen*. u.o. : Energimyndigheten, 2019.

34. **Methanex**. methanex.com. *Methanex posts regional contract methanol prices for North America, Europe and Asia*. [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.methanex.com/our-business/pricing>.

35. **Alibaba**. Alibaba.com. *Turpentine price*. [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.alibaba.com/showroom/turpentine-price.html>.

36. **Indexmundi**. indexmundi.com. *Wood Pulp Monthly Price - Swedish Krona per Metric Ton*. [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=wood-pulp&months=120¤cy=sek>.

37. **Alibaba**. Alibaba.com. *kraft liner paper price per ton*. [Online] 2020. [Citat: den 26 Oktober 2020.] <https://www.alibaba.com/showroom/kraft-liner-paper-price-per-ton.html>.

10 Bilagor

Bilaga 1 – Konstanter och antaganden

	Ex MJ/kg	Ex kJ/mol	Molmassa g/mol	Värmevärde (MJ/kg)	Torr- rädensitet [ton/m ³ f]	Källa/ antagande
Natriumkarbonat		53,13	105,9891			(22)
Natriumsulfid		930,34	78,044			(22)
Natriumhydroxid		84,49	39,9972			(22)
Bränd kalk		129,88	56,08			(23)
Väteperoxid	3,5					(24)
Magnesium		626,71	24,312			(22)
Syrgas		3,97	31,9988			(22)
Kalciumkarbonat		5,05	100,087			(22)
Klordioxid		186	67,452			(25)
Svavelsyra		161,01	98,077			(22)
Natriumformiat	14					(24)
Cellulosa	18,81					(26)
Hemicellulosa	14,60					(26)
Lignin	28,16					(26)
Träd, barr					0,5	Antagande
Träd, löv					0,65	Antagande
Returkartong				15		(27)

Bilaga 2 – Ekonomiska konstanter

Typ/faktor	Pris	Enhet	Källa/antaget
Omvandlingsfaktor EUR till SEK	10,38	SEK/EUR	Antaget
Omvandlingsfaktor USD till SEK	8,76	SEK/USD	Antaget
Rundved (HW/SW)	50,00	EUR/m ³	(19)
NaOH	0,37	EUR/kg	(19)
Klördioxid	0,38	EUR/kg	(19)
Väteperoxid	0,50	EUR/kg	(19)
Svavelsyra	0,05	EUR/kg	(19)
Syrgas	0,06	EUR/kg	(19)
Kalciumoxid	0,12	EUR/kg	(19)
Kalciumkarbonat	0,20	EUR/kg	(28)
Magnesium	0,30	EUR/kg	(19)
Natriumformiat	0,25	EUR/kg	(29)
El	50,00	EUR/MWh	(19)
Boilerwater	0,20	EUR/m ³	(19)
Olja	8500,00	SEK/m ³	(30)
Tallolja	0,50	EUR/kg	(19)
Tallbecksolja	0,50	EUR/kg	Antas samma som tallolja
Bioolja	5000,00	SEK/ton	(31)
Returwell	25,00	USD/ton	(32)
Pellets	403,00	SEK/MWh	(33)
Fjärrvärme	500	SEK/MWh	Antaget
Metanol	275	EUR/ton	(34)
Terpentin	2000	USD/ton	(35)
Barr-, löv- och textilmassa	8500	SEK/adt	(36)
KL, WS, WT	1300	USD/adt	(37)

Bilaga 3 – Indexering av Munksunds flöden

Index	Kategori	Typ
1	Massa	Lövmassa, ISO 60
2	Massa	Lövmassa, ISO 80
3	Övrigt	Massaved, barr
4	Övrigt	Massaved, löv
5	Övrigt	Flis
6	Vatten	Ånga
7	Massa	Barrflis
8	Massa	Lövflis
9	Bränsle	Bark
10	Vatten	Ånga
11	Vatten	Ånga
12	Vatten	Ånga
13	Lut	Vitlut
14	Vatten	Kondensat
15	Vatten	Kondensat
16	Massa	Barrmassa
17	Lut	Tunnlut
18	Vatten	Ånga
19	Vatten	Ånga
20	Lut	Vitlut
21	Vatten	Kondensat
22	Vatten	Kondensat
23	Massa	Lövmassa
24	Lut	Tunnlut
25	Massa	Lövmassa, oblekt
26	Vatten	Ånga
27	Vatten	Ånga
28	El	El
29	Produkt	Kraftliner (KL)
30	Vatten	Kondensat
31	Vatten	Kondensat
32	Bränsle	Wellrejekt
33	Vatten	Ånga
34	Vatten	Ånga
35	Vatten	Kondensat
36	Vatten	Kondensat
37	Vatten	Matarvatten
38	Bränsle	Olja (E01)
39	Vatten	Ånga
40	Lut	Grönlut
41	Övrigt	Kalk
42	Bränsle	Olja (E01)
43	Bränsle	Pellets
44	Bränsle	Metanol
45	Bränsle	Terpentin
46	Bränsle	Starkgas
47	Övrigt	Mesa

Index	Kategori	Typ
48	Vatten	Ånga
49	Vatten	Ånga
50	El	El
51	Vatten	Ånga
52	Vatten	Ånga
53	Vatten	Ånga
54	Vatten	Ånga
55	Vatten	Matarvatten
56	Vatten	Spädvatten
57	Produkt	Wet Strength (WS)
58	Bränsle	Olja (E01)
59	Vatten	Ånga
60	Vatten	Ånga
61	Vatten	Ånga
62	El	El
63	El	El
64	Vatten	Ånga
65	Vatten	Ånga
66	Vatten	Kondensat
67	Produkt	White Top (WT)
68	Produkt	Fjärrvärme
69	Vatten	Ånga
70	Övrigt	Makeup NaOH
71	Övrigt	Kemikalier, satsning
72	El	El
73	Lut	Brännlut
74	Vatten	Ånga
75	Vatten	Matarvatten
76	Övrigt	Kemikalier, syrgas
77	El	El
78	El	El
79	El	El
80	El	El
81	El	El
82	El	El
83	El	El
84	El	El
85	El	El
86	El	El
87	Vatten	Ånga
88	Övrigt	Kemikalier, syrgas
89	Produkt	Tallolja
90	Övrigt	Returwell
91	Övrigt	makeup NaOH
92	Bränsle	Ext. träbränsle + torv

Bilaga 4 – Indexering av Mörrums flöden

Index	Kategori	Typ
1	El	El
2	El	El
3	El	El
4	El	El
5	El	El
6	El	El
7	El	El
8	El	El
9	El	El
10	El	El
11	El	El
12	El	El
13	El	El
14	El	El
15	El	El
16	El	El (Övrigt)
17	Ånga	0,3 Mpa
18	Ånga	1,1 Mpa
19	Vatten	Kondensat
20	Ånga	0,3 Mpa
21	Vatten	Kondensat
22	Ånga	0,3 Mpa
23	Ånga	1,1 Mpa
24	Ånga	1,4 Mpa
25	Ånga	0,3 Mpa
26	Ånga	1,4 Mpa
27	Ånga	0,3 Mpa
28	Ånga	1,1 Mpa
29	Vatten	Kondensat 120
30	Vatten	Kondensat
31	Ånga	0,3 Mpa
32	Ånga	1,1 Mpa
33	Vatten	Kondensat 120
34	Vatten	Kondensat
35	Ånga	0,3 Mpa
36	Ånga	0,3 Mpa
37	Ånga	0,3 Mpa
38	Ånga	1,1 Mpa
39	Vatten	Kondensat
40	Ånga	0,3 Mpa
41	Ånga	1,1 Mpa
42	Vatten	Kondensat
43	Ånga	0,3 Mpa
44	Ånga	0,3 Mpa
45	Vatten	Kondensat
46	Ånga	0,3 Mpa
47	Ånga	Fjärrvärme

Index	Kategori	Typ
48	Vatten	Kondensat
49	Ånga	5,8 Mpa
50	Ånga	5,8 Mpa
51	Ånga	5,8 Mpa
52	Ånga	5,8 Mpa
53	Ånga	5,8 Mpa
54	Ånga	5,8 Mpa
55	Ånga	0,3 Mpa
56	Ånga	0,3 Mpa
57	Ånga	1,1 Mpa
58	Ånga	0,3 Mpa
59	Ånga	1,4 Mpa
60	El	El
61	El	El
62	El	El
63	El	El
64	El	El
65	Lut	Tunnlut
66	Lut	Tunnlut
67	Lut	Brännlut
68	Lut	Grönlut
69	Lut	Vitlut
70	Lut	Vitlut
71	Lut	Vitlut
72	Vatten	Spädvatten
73	Vatten	Vatten
74	Vatten	Vatten
75	Vatten	Fjärrvärme
76	Bränsle	Olja
77	Bränsle	Olja
78	Bränsle	Metanol
79	Kemikalier	Natriumformiat
80	Bränsle	Tallolja
81	Bränsle	Tallbecksolja
82	Bränsle	Bioolja
83	Ånga	Blandad ånga
84	Kemikalier	Mesa
85	Kemikalier	Kalk
86	Kemikalier	Kalk
87	Kemikalier	Mesa
88	Kemikalier	Kalkstenskärv
89	Bränsle	Terpentin
90	Trä	Lövbark
91	Trä	Spån
92	Trä	Barrbark
93	Trä	Spån
94	Trä	Rundved Löv
95	Trä	Rundved Barr
96	Trä	Sågverksflis Barr

Index	Kategori	Typ
97	Trä	Bark löv
98	Trä	Bark barr
99	Trä	Flis löv
100	Trä	Flis bark
101	Massa	Textilmassa
102	Massa	Textilmassa
103	Massa	Textilmassa
104	Massa	Rejektmassa
105	Massa	Rejektmassa
106	Massa	Barrvedsmassa
107	Massa	Barrvedsmassa
108	Massa	Barrvedsmassa
109	Massa	Rejektmassa
110	Massa	Rejektmassa
111	Kemikalier	Natriumhydroxid
112	Kemikalier	Natriumhydroxid
113	Kemikalier	Natriumhydroxid
114	Kemikalier	Natriumhydroxid
115	Kemikalier	Natriumhydroxid
116	Kemikalier	Natriumhydroxid
117	Kemikalier	Blekkemikalier
118	Kemikalier	Blekkemikalier
119	Kemikalier	Syrgas
120	Kemikalier	Syrgas
121	Kemikalier	Syrgas
122	Kemikalier	Syrgas
123	Bränsle	Tallolja

BENCHMARKING AV MASSABRUK GENOM EXERGIBASERADE NYCKELTAL

Att jämföra energi- och resursprestandan hos olika pappers- och massabruk, som ofta har helt skilda systemlösningar och som tillverkar olika typer av produkter, innebär en stor utmaning.

Här har nya exergibaserade nyckeltal utvärderats som underlättar jämförelser mellan bruken och som bidrar till nya analysmetoder för att förbättra energi- och resurseffektiviteten.

Resultaten visar att de nya nyckeltalen mycket väl kan användas för att etablera normativa värden för olika produkttyper, för att indikera ett systems prestanda och samtidigt bidra till nya möjligheter att analysera brukens resurs- och energi-effektivitet.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk