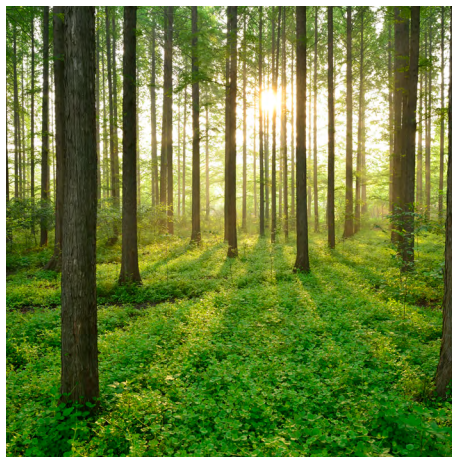
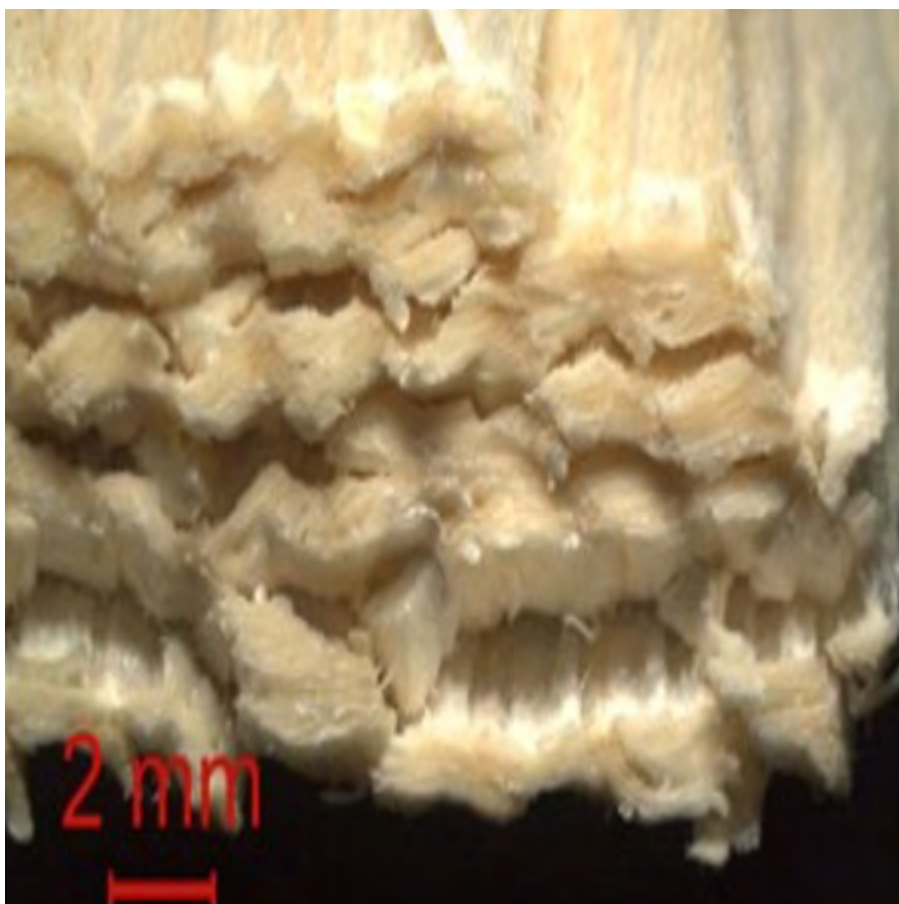


ENERGIEFFEKTIVARE RAFFINERING MED HJÄLP AV MODIFIERAD FLISNINGSPROCESS

RAPPORT 2026:1191



SKOGSINDUSTRIELLA
PROGRAMMET



Energieffektivare raffinering med hjälp av modifierad flisningsprocess

TORBJÖRN CARLBERG, PER ENGSTRAND, PER GRADIN OCH GUNILLA PETERSSON
HOLMEN: PATRIK JANSSON, NIKLAS KLINGA, SHIRIN NASERIFAR OCH CHRISTER SANDBERG

ISBN 978-91-89917-34-7 | © Energiforsk juni 2026

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

Förord

Raffineringen i TMP- och CTMP-processer står för en stor del av energianvändningen i massaindustrin. I projektet har en metod utvecklats där huggvinkeln justeras för att öka kraften i fiberriktningen, vilket påverkar flisens egenskaper och de efterföljande processtegen.

Arbetet bygger på studier vid Mittuniversitetet samt pilot- och fullskaleförsök i samverkan med industriella aktörer.

Resultaten visar att modifierad flisning förbättrar impregnerings-egenskaperna och kan minska energibehovet vid raffinering med upp till 100–200 kWh per ton vid bibehållen massakvalitet. Samtidigt ställer metoden högre krav på utrustningen, då den ökade belastningen vid flisning kräver robustare flishuggar för industriell tillämpning. Sammanfattningsvis visar projektet en teknisk potential för både energieffektivisering och kvalitetsförbättring.

Stockholm Juni 2026

Marie Kofod-Hansen

Programansvarig för Skogsindustriella programmet

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

Sammanfattning

Grundforskning vid Mittuniversitetet (MIUN) 2006–2016 i en noggrant designad pilothugg visade att ökad kraft i fiberriktningen vid flisning ger två viktiga effekter:

- Bättre kemikalieimpregnering av flisen
- Lägre elenergiförbrukning vid efterföljande flisraffinering i både TMP- och CTMP-processer

Kraften i fiberriktningen kan ökas genom att justera huggvinkeln, antingen via inmatnings-vinkeln eller knivvinkeln på huggstålen.

Elenergieffektivisering i TMP/CTMP: Försök genomfördes först vid Valmet/MIUNs pilotanläggning i Sundsvall, därefter med modifierad flis framställd vid Utansjö bruk, följt av fullskaletester vid SCA Ortviken. Resultaten visade en potential att sänka elenergi-förbrukningen med 100–200 kWh/ton vid raffinering i Valmet RGP68DD-rafförer. Den ökade belastningen på flishuggen bedömdes dock vara för hög för långtidskörning i industriell drift.

Kemisk massa: Labförsök med sulfatmassa (MoRe Research och Mondi) visade endast små skillnader i dragindex (± 5 kNm/kg) jämfört med konventionell flis, vilket var oväntat med tanke på äldre studier som visat försämrade styrkeegenskaper vid stukskador. Fullskalekorgförsök i Domsjö sulfitprocess visade däremot att rejektmängden (spethalten) halverades (från 1,1 % till 0,6 %), medan övriga parametrar (kappatal, viskositet m.m.) låg inom felmarginalen.

Impregnering: Omfattande impregneringsförsök vid MoRe Research på gran- och björkflis, tillverkad med olika knivvinklar i Multichannel Chippings pilothugg, visade tydliga positiva effekter. För granflis ökade vätskeupptaget från 120 g till 195 g när knivvinkeln höjdes från 30° till 54°. Även impregneringshastigheten förbättrades markant.

Industriella tester vid Holmen Hallstavik 2018–2024: Tester med Andritz flishugg (år 2000) och AIT-stål med knivvinkel 54°, jämfört med normala 34°, visade minskad elenergiförbrukning vid givet dragindex. Nackdelar var viss fiberförkortning, särskilt i RTS-raffinörer, och ökade vibrationer. Vibrationsproblemet kan lösas genom att använda tyngre huggskiva och kraftigare lagerpaket – samma konstruktion som används vid flisning av hårda vedslag som eukalyptus och akacia.

Slutsats och potential: Modifierad flisning med högre huggvinkel ger bättre impregnering och lägre raffinörenergi, men kräver robustare

huggutrustning för att hantera den ökade belastningen. För tryckpapper (som vid Hallsta) är kombinationen av modifierad flisning med optimerad raffinering (högre temperatur, längre uppehållstid i förvärmarskruv) lovande, eftersom högre medelfiberlängd och dragindex gynnar viktiga pappersegenskaper som töjning.

Sammanfattningsvis visar projekten en teknisk potential för både energieffektivisering och kvalitetsförbättring, men den praktiska implementeringen kräver förstärkning av flishuggsutrustningen för att klara den högre mekaniska belastningen i kontinuerlig drift.

Nyckelord

Energieffektivitet, flisning, fliskvalitet, knivvinklar, flis-impregnering, flisraffinering, mekanisk massa, TMP, CTMP, kemisk massa, sulfatmassa, sulfitmassa.

Summary

Research conducted at Mid Sweden University (MIUN) between 2006 and 2016, using a carefully designed pilot chipper, showed that increased force in the fibre direction during chipping produces two important effects:

- Better chemical impregnation of the chips
- Lower electrical energy consumption in subsequent chip refining in both TMP and CTMP processes

The force in the fibre direction can be increased by adjusting the chipping angle, either via the infeed angle or the knife angle on the chipping knives.

Electrical energy efficiency in TMP/CTMP: Trials were first carried out at the Valmet/MIUN pilot plant in Sundsvall, then with modified chips produced at Utansjö mill's chipper, followed by full-scale tests at SCA Ortviken's TMP plant. The results indicated a potential to reduce electrical energy consumption by 100–200 kWh/tonne when refining in Valmet RGP68DD refiners. However, the increased load on the chipper was judged to be too high for safe long-term continuous industrial operation.

Chemical pulp: Laboratory trials with sulphate pulp (at MoRe Research and Mondi) showed only small differences in tensile index (± 5 kNm/kg) compared with conventional chips. This was somewhat surprising in light of older studies that had shown reduced strength properties when chips suffered compression damage. Basket cooking trials in Domsjö mill's sulphite digester, using both modified and conventional chips, showed that the reject content (shive content) was halved – from 1.1 % to 0.6 % – while other parameters (kappa number, viscosity, etc.) varied within the margin of error.

Impregnation: Extensive tests at MoRe Research's impregnation equipment were performed using spruce and birch chips produced with different knife angles in the Multichannel Chippings pilot chipper. The results showed clear positive effects. For spruce chips, liquid uptake (weight increase) rose from 120 g to 195 g when the knife angle was increased from 30° to 54°. The impregnation rate also improved markedly.

Industrial trials at Holmen Hallstadvik 2018–2024: Tests were carried out in an Andritz disc chipper from the year 2000 using AIT knives with knife angles of 54° and conventional 34°. The trials showed reduced electrical energy consumption in the TMP process at a given tensile index. The drawbacks were some fibre shortening, particularly in RTS refiners, and increased vibrations in the chipper. The vibration problem can be solved by using a heavier disc and a more robust bearing package – the same design used when chipping hardwoods such as eucalyptus and acacia.

Conclusion and potential: Modified chipping with a higher knife angle provides better impregnation and lower refiner energy, but requires a more robust chipper to handle the increased mechanical load. For printing paper grades (such as those produced at Hallsta), the combination of modified chipping and optimised refining (higher temperature and longer retention time in the preheater screw) is promising, since higher average fibre length and tensile index favour important paper properties such as stretch.

In summary, the projects demonstrate a clear technical potential for both energy efficiency improvements and quality enhancements. However, practical implementation requires reinforcement of the chipper equipment to manage the higher mechanical stresses in continuous operation.

Innehåll

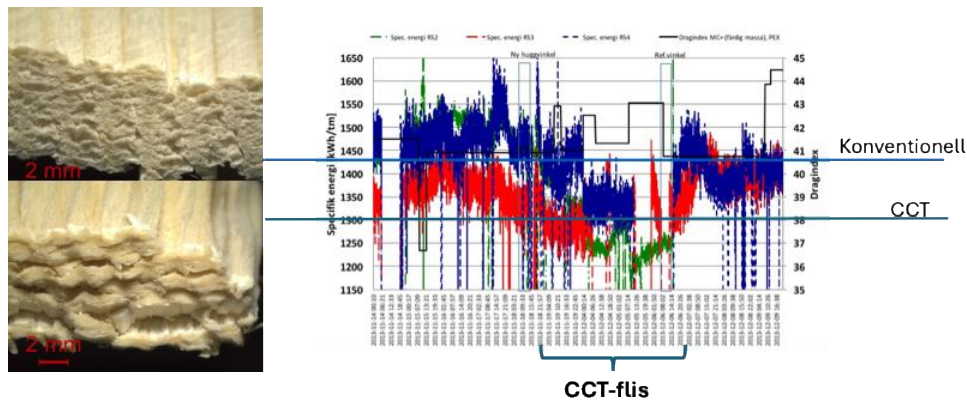
Introduktion	7
1 Modifierad flisning – sulfatmassa	11
2 Modifierad flisning – sulfitmassa	13
3 Modifierad flisning - impregnering	15
4 Modifierad flisning - TMP fabriksförsök 2018 -2024	20
5 Förbättrad styrka genom ökat tryck och temperatur vid RTS-TMP.....	23
5.1 Tidplan	23
5.2 Genomförande	24
6 Slutsatser.....	27
7 Referenslista	29
8 Appendix	31

Introduktion

Vid flisning av massaved har man traditionellt valt att minimera knivvinkeln eftersom omfattande studier under 50–60-talet, framför allt under ledning av Prof Nils Hartler vid CCT (Cellulosaindustrins Central-laboratorium) och senare vid KTH Cellulosemekanik visat sig att man med ökande knivvinkel kan få sämre styrkeegenskaper framför allt hos kemiska massor, framför allt hos sulfitkokade massor. Här användes begreppet stukskadad flis om flis tillverkad vid större knivvinkel. Man kom fram till att detta orsakades av ökade fiberskador som tillsammans med kemin vid kokningen. En nackdel är också att elenergi-förbrukningen i flishuggen ökar något då kraften i fiberriktningen ökar, totala elenergiförbrukningen vid flishuggning är dock relativt andra enhetsoperationer låg, ca 20 kWh/t.

Grundläggande forskning rörande flisningens mekanismer vid Mittuniversitetets noggrant designade pilothugg perioden 2006 - 2016 visade det sig att flisning med ökad kraft i fiberriktningen dels förbättrar kemikalie-impregneringen väsentligt, dels minskar elenergiförbrukningen vid flisraffineringen i TMP- och CTMP-processer. Huggvinkeln kan i MIUNs flishugg ändras genom att inmatningsvinkeln kan ställas in alternativt att man ändrar knivvinkeln på huggstålen. Genom större delen av projektet har MIUN samarbetat med AIT, (Andritz Iggesund Tools) som är dominerande leverantör av knivsystem med vändbara huggstål och som numera har MIUN's labflis-hugg monterad i en container som kan flyttas till den plats man vill göra tester.

Elenergieffektivisering studerades först vid Valmet/MIUNs pilotanläggning i Sundsvall med flis från MIUN's flishugg, validerades först med modifierad flisning vid Utansjöes flishugg följt av fullskaletester vid SCA Ortvikens TMP samt därefter med Ortvikens flishugg och TMP-fabrik, se Figur 1.



Figur 1: Energireduktion vid visst dragindex. Energibehovet kan troligen minskas vid samoptimering av flisflöde, massakonc och last för att optimera ett nytt körfönster. Detta kräver längre försökskörningar och mer omfattande flis och massa-egenskapsanalyser med den modifierade flistypen.

Fullskaleresultaten visade god potential att sänka elenergi-förbrukningen 100 – 200 kWh/t vid flisraffinering med Valmet RGP68DD-rafförer, dock visade det sig att fabriken ganska ålderstigna flishugg för höga påfrestningar för att man skulle våga köra vidare.

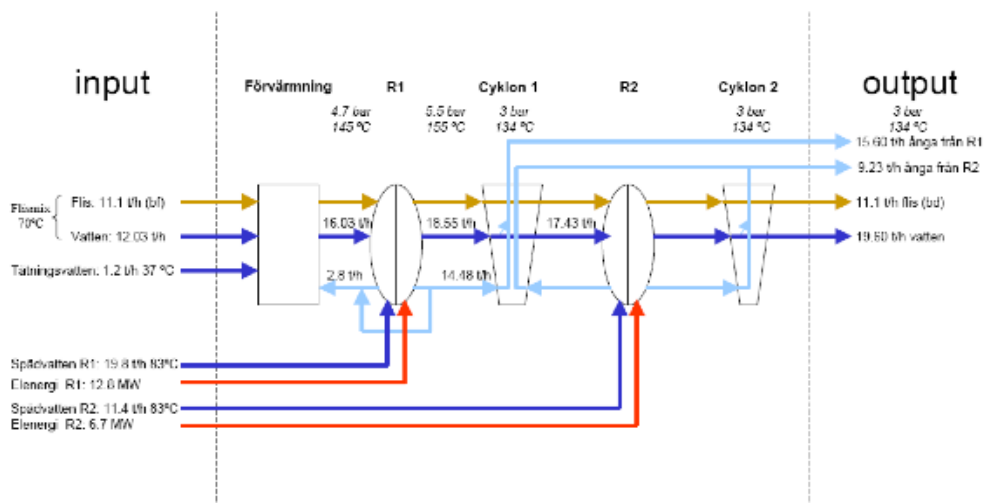
Parallellt med TMP- och CTMP-försök utfördes försök vid MoRe Research, Domsjö och Mondi i labbskala med kemiska massor dels för att studera om intressanta impregnerings-förbättringar kunde åstadkommas, dels för att se om tidiga försök med s.k. stukskadad flis skulle kunna valideras. I denna delrapport redovisas resultat som jämför impregnering och kokningsförsök med konventionellt huggen flis och modifierat huggen flis. De impregneringsförsök som genomförts i störst skala utfördes vid MoRe Research's specialbyggda impregneringspilot på både gran- och björk-flis som tillverkats med olika kniv-vinklar vid Multichannel Chippings pilothugg vid Domsjö.

Labförsöken med sulfatkokning vid MoRe och Mondi (i Österrike) visade skillnader i dragindex som funktion av PFI-malvarv mindre än +/-5 i området 50–120 kNm/kg, vilket var något förvånande då man baserat på de troligen ganska noggrant utförda studierna från 60–70-talet betraktade det som självklart att kemiska massor erhöll sämre styrkeegenskaper pga. av stukskador vid större huggvinklar. Rejekt mängden (spethalten) minskar till ungefär hälften (1,1 till 0,6%) enligt korgkokningsförsök i Domsjös sulfatkokningsprocess. Skillnader i övriga egenskaper som kappatal, viskositet, mm låg inom felmarginalen.

Impregneringsdata från MoRe Research visar att vätskeupptaget för granflis (viktökningen) går från 120 till 195 g när knivvinkeln ökar från 30° till 54° vid försök med Multichannel Chippings trumhugg (Domsjös fabriksområde). Även hastigheten med vilken impregneringsvätskan upptas ökar.

Ytterligare fullskaleförsök med effektivisering av TMP-processen genom modifierad flisning genomfördes 2018 - 2024 vid Holmens TMP-fabrik i Hallstavik där man har en relativt modern flishugg från Andritz (installerad år 2000). Försöken kördes med huggstål från AIT med knivvinkel 54° mot konventionella 34°. Här kunde också minskad elenergiförbrukning konstateras vid viss dragindex, men samtidigt erhöles en viss fiberförkortning speciellt vid RTS-raffinörer. Även vid dessa försök ökade vibrationsnivån vid ökad huggvinkel och därmed ökad kraft i fiberriktningen. För denna typ av flishugg löser man problemet med att byta till en tyngre huggskiva och kraftigare lagerpaket, dvs samma utrustning som används när man hugger tätare vedtyper som Eukalyptus och Akacia med samma typ av hugg. Detta kräver dock en investering på drygt 5 MSEK.

Hallstas TMP-fabrik har bland annat 2 TMP-linjer med vardera en RTS Andritz 68" primärstegsraffinör och en Jylhä SD65 sekundärstegsraffinör. RTS-typen av raffineringsprocess körs vid högt varvtal 2300 rpm (i st f 1500) och högt tryck 5,5 – 7 bar vilket sammantaget normalt ger ca 300 kWh/t lägre energiförbrukning än konventionell TMP-teknik (2, 3), se Figur 2. Såväl förvärmarskruv och raffinörhus är designade för att kunna trycksättas upp till 8 bar, men har genom åren körts vid 5,5 bar. Ur nedanstående beskrivning från David Siktors Licentiatarbete vid Holmen Hallsta 2005 – 2008 framgår typiska betingelser från denna tidsperiod (4).

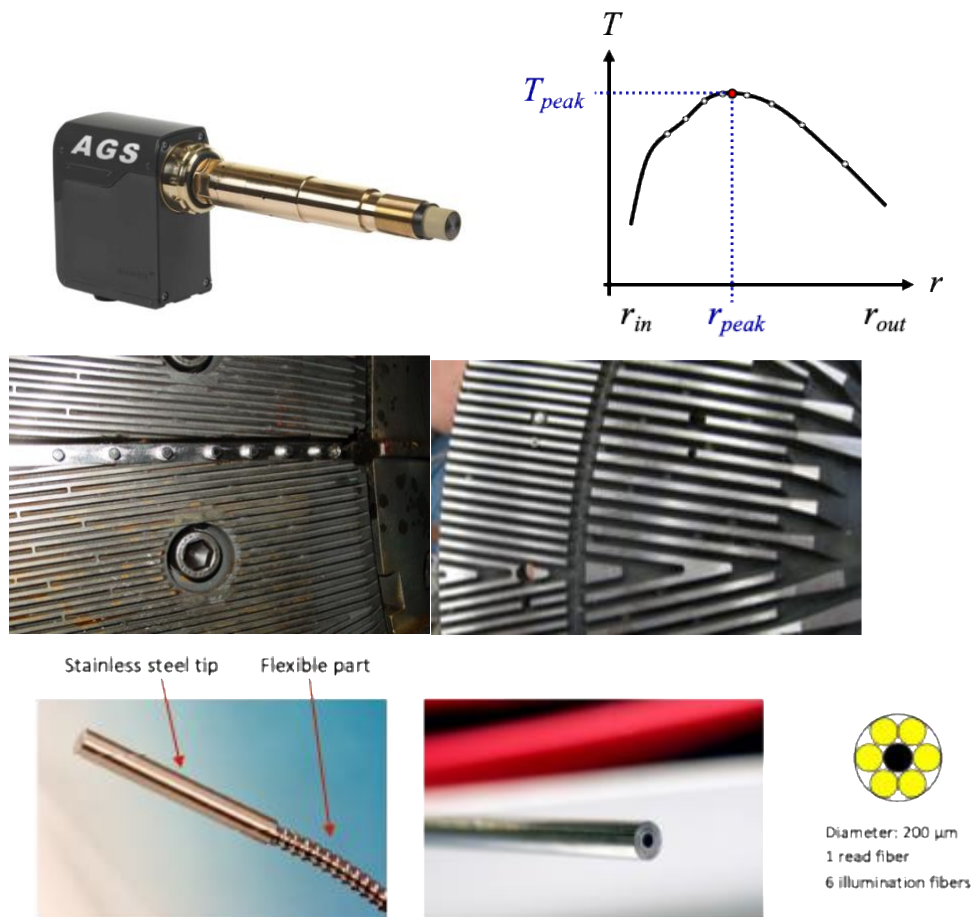


Figur 2 Processbeskrivning över en TMP-linje med Andritz RTS i primärsteg och Jylhä SD65 i sekundärsteg. Här med 12,8 MW effekt, 5,5 bar och 155°C i primär och 6,7 MW, 3 bar och 134°C i sekundär.

Det finns relativt omfattande energieffektiviserings- och optimeringspotential förutom att justera temperatur och tryckförhållanden vilket görs inom detta projektet kan man optimera spädvattenflöde och spädvattenfördelning, undersöka olika styr- och reglerstrategier och givetvis successivt

utveckla malsegment tillsammans med leverantörsföretagen. Utöver David Siktors Licarbete gjordes omfattande studier i det omfattande projektet "Filling the gap" finansierat av Energimyndigheten och Vinnova där Mittuniversitetet och Chalmers Industriteknik var akademiska utförare och företagen; Dametric, Holmen, Metso (Valmet), Norske Skog, Poyry (AFRY), SCA och Stora Enso medverkade (5). Inom detta projekt genomfördes omfattande arbeten i syfte att förstå grundläggande fenomen malspaletter med hjälp av mättekniker och modelleringstekniker.

I Figur 3 framgår några exempel på mättekniker som används för mätning i malspaletter vanligast och mest använt är Dametrics spaltavståndsmätare (AGS) även temperaturprofilmätning förekommer i driftförhållanden sedan användes i projektet t ex laserteknik för att få koll på lokal fiberdistribution i spalten.



Figur 3: Exempel mättekniker använda i rafförers malspalter, som Dametrics AGS mätare för spaltavstånd (vanligast förekommande), temperaturprofilmätning som också används för styrning samt F&U-inriktade mätare för lokalt tryck lokal massakoncentration.

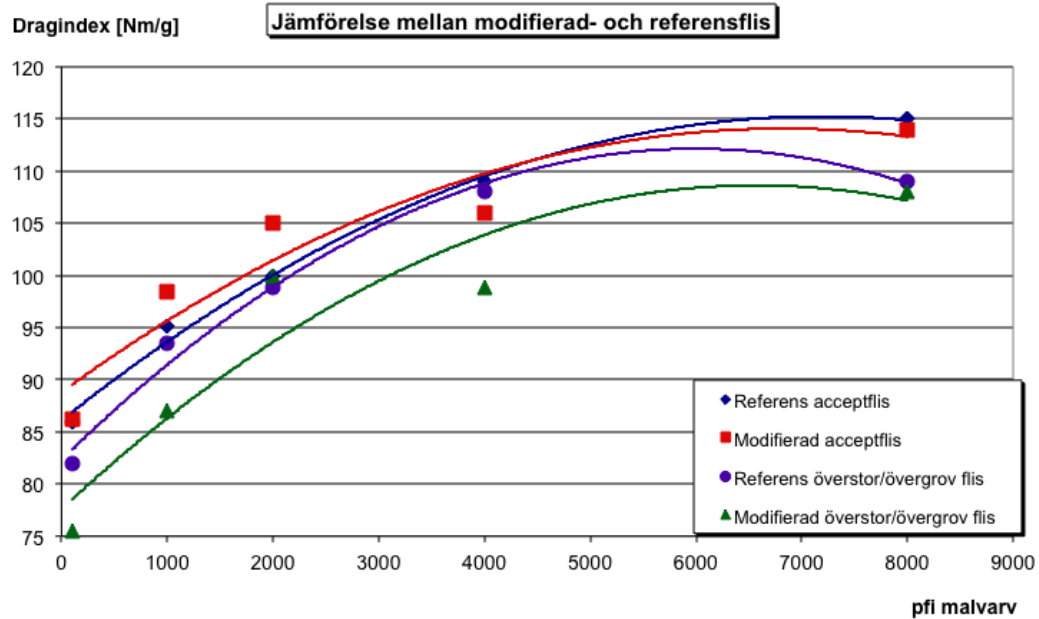
De tryckpappersprodukter Hallsta tillverkar vid PM11 skulle gynnas av att man tar fram en TMP med högre dragindex och högre medelfiberlängd

som i sin tur gynnar bättre töjning är det av stort intresse att studera hur man kan optimera RTS-raffineringen. Tidigare forskning om vedens mjuknings-egenskaper och även praktiska försök i pilot och fabriksskala visar potential till ökad energieffektivitet vid viss styrka. Inom projektet har vi därför prioriterat optimering av RTS-raffineringen genom att testa högre temperatur i förvärmarskruv och i raffinör samt att maximera uppehållstid i förvärmarskruv. Ökad medelfiberlängd förbättrar förutsättningarna att samoptimera modifierad flisning med flisraffineringen.

1 Modifierad flisning – sulfatmassa

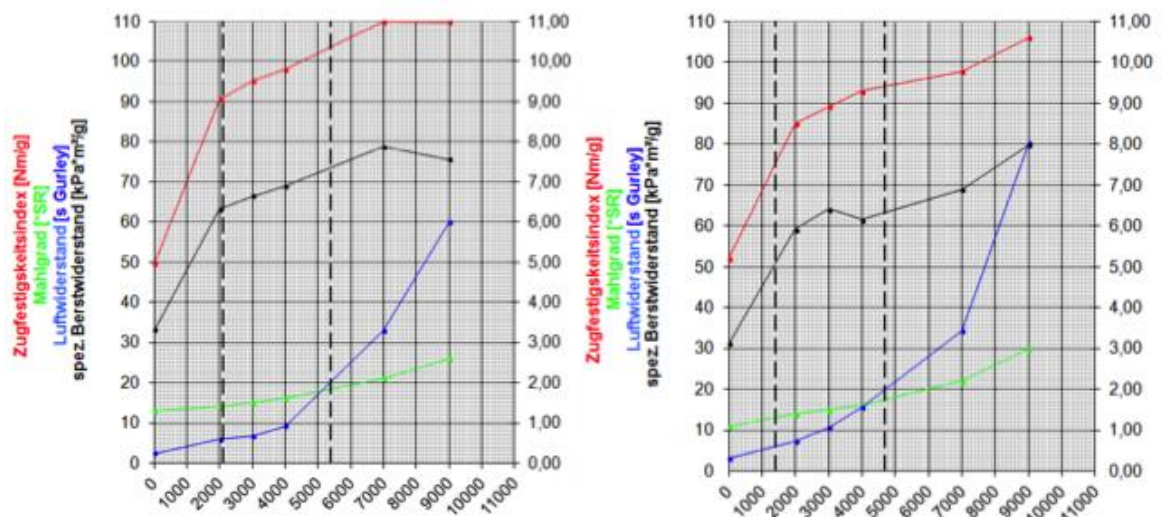
Modifierad flis, här tillverkad vid FSCN, Mittuniversitetets laboratoriehugg med knivvinkel 50° jämfört med "konventionell" flis här tillverkad med knivvinkel 30° har provkokats enligt sulfatmetoden dels vid MoRe Research (Torbjörn Sjölund), dels vid Mondis utvecklingslab i Österrike (Johannes Leitner).

Mycket kortfattat visar det sig att skillnaden mellan konventionellt och modifierat huggen flis är mkt liten både för acceptfraktion och för överstor fraktion enligt samband mellan dragindex och antal PFI-malvarv enligt studien vid MoRe Research, se Figur 4. Med på gränsen till övertolkning av resultaten vad gäller dragindex som funktion av malvarv i PFI-kvarn kan man säga att modifierad acceptflis ge lite bättre resultat än konventionell medan modifierad överstor flis ger lite sämre resultat än motsvarande överstora konventionella flis.



Figur 4: Labförsök vid MoRe Research med sulfatkokning av konventionellt huggen och modifierat huggen flis. Acceptfraktion och överstor fraktion från respektive flisfraktionering kokades var för sig i samma kokare dvs vid samma kokningsbetingelser.

Vad gäller studien vid Mondi framgick det inte helt tydligt om man kokat all flis eller enbart L13-fraktionen, men sannolikt användes enbart accept-fraktionen vilket gör att man missar en stor del av flismaterialet då konventionell flis har L13 = 79% / överstor ST8 = 10% och mod flis har L13 = 62% / överstor ST8 = 26%, se Figur 5 och Tabell 1.



Figur 5: Sulfatkokningsförsök vid Mondis lab troligen utförda på respektive acceptfraktion. Konventionellt huggen flis i figuren till vänster och modifierat huggen flis i figuren till höger.

Tabell 1: Sulfatmassor framtagna från konventionell flis huggen med knivvinkel 30 för minimering av stukskador respekt modifierad flis huggen med knivvinkel 50 för maxmierung av stukskador. Datasetet är från acceptflis från respektive flistyp, fraktionerat vid Mondi respektive MoRe´s lab.

Lab / flistyp	0	2000	4000	8000	9000	PFI-kvarn, malvarv
Mondi/konv	50	90	98		110	Dragindex, Nm/g
Mondi/mod	50	85	93		106	Dragindex, Nm/g
MoRe/konv	85,9	100	108	115		Dragindex, Nm/g
MoRe/mod	86,2	105	106	114		Dragindex, Nm/g

Vad man kan se av dessa data skiljer sig inget prov vad gäller dragindex mer än +/-5 Nm/g uppåt (MoRe) respektive neråt (Mondi). Dvs det går inte att finna någon statistiskt säkerställd skillnad mellan flis-kvalitéerna vad gäller dragindex som funktion av PFI-malvarv. Detta är något förvånande då man baserat på ganska noggrant utförda studier under 60–70-talet betraktade det som självklart att kemiska massor erhöll sämre styrkeegenskaper pga. av de stukskador som uppstår om man flisar vid större huggvinklar.

Resultaten visar också att andelen acceptflis är lägre för modifierat huggen flis, vilket är naturligt när man väljer att öka kraften i fiberriktningen.

Tidigare försök vid Mittuniversitetet visade att modifierat huggen flis har både snabbare och högre vätskeupptag än konventionellt huggen flis. Denna aspekt studerades inte i dessa försök eftersom kokförsöken utfördes med trycksatt impregnering under lång tid före kokningen. Denna typ av försök har utförts inom ett separat projekt och redovisat i nästa kapitel.

2 Modifierad flisning – sulfitmassa

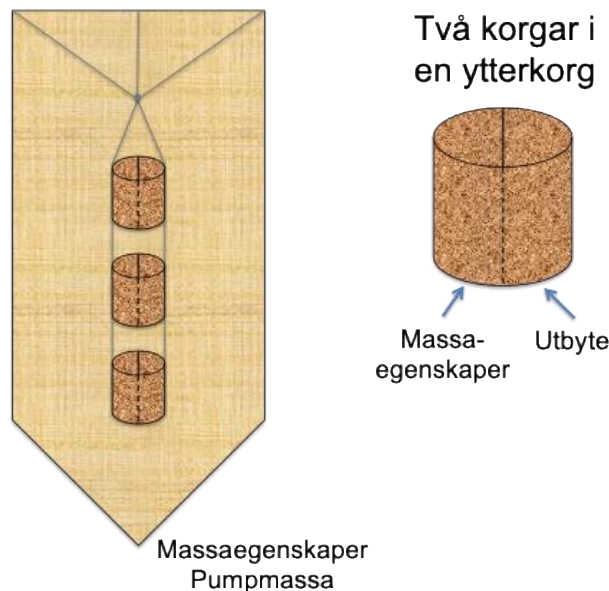
Korgkokningsförsök har genomförts av Torbjörn Sjölund vid MoRe Research tillsammans med Domsjö-fabriken med konventionellt huggen och modifierat huggen flis från FSCN-MIUN´s laboratoriehugg samt med Domsjös egen flis. Även pumpmassa från Domsjös kokare togs ut och analyserades. I Tabell 2 nedan redovisas flisdata uppmätt vid MoRe Research

Tabell 2: Flismätdata uppmätta vid MoRe Research för Domsjö referensflis (fullskalehugg), Mittuniversitetets labhugg med referensflis, knivvinkel 30° och modifierad flis, knivvinkel 50°.

	Torr-rådensitet	Bulkdensitet
Domsjö referensflis	402 kg/m ³	141 kg/m ³
Mittuniv. Referensflis	362 kg/m ³	117 kg/m ³
Mittuniv. modifierad flis	364 kg/m ³	126 kg/m ³

Man kan konstatera att torr-rådensiteten inte skiljer sig mellan Mittuniversitetets referensflis (30°) och modifierad flis (50°) vilket är förväntat eftersom samma granbaserade 2"4 från Tunadals sågverk användes. Domsjö's flis utgörs av en mix mellan gran- och tallflis varför man kan förvänta sig något högre densitet. Dock är densitetsvärden generellt förhållandevis låga. Vad gäller bulkdensitet kan man förvänta sig något högre värde (packningsgrad) för modifierat huggen flis då andelen acceptflis går ner något.

Det finns gradienter i Domsjö's kokare, vilket medför att korgkok med enbart referensflis i alla korgar kan visa på skillnader i kokutbyte, se Figur 6. Högsta utbytet erhålls normalt högt upp i kokaren och lägsta i de nedersta korgarna.



Figur 6: Korgkokning vid Domsjö i samarbete med MoRe Research. Korgar med försöksflis hängs inne i en fullstor batchkokare varför flisen i korgen utsätts för samma betingelser som omgivande flis.

I tabell

Tabell 3: nedan redovisas resultat från korgkokningsförsöken.

Tabell 3: Viskositet, kappatal, utbyte, rejektmängd, ljushet, R10 och R18.

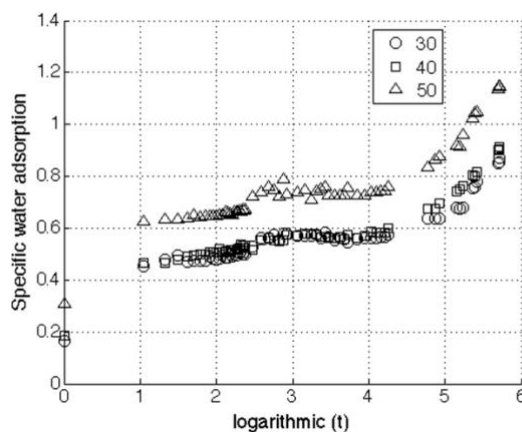
		Korg 1A överst Domsjö referensflis	Korg 1B överst för utbyte Domsjö referensflis	Korg 2A mitten för utbyte Mittuniv. referensflis	Korg 2B mitten för utbyte Mittuniv. modifierad flis	Korg 3A nederst Mittuniv. referensflis	Korg 3B nederst Mittuniv. modifierad flis	Pumpmassa 2015-11-11 09:35	Pumpmassa 2015-11-11 09:45	Pumpmassa 2015-11-11 09:53
Viskositet	ml/g	521				488	473	496	502	486
Kappatal		7,9				6,2	6,3	8,5	8,2	8,3
Invägd torr flis	gram	800	800	771	733	751	740			
Torrhalt flis	%	48,9	48,9	71,9	74,2	71,9	74,2			
Utbyte	%		46,0	45,4	44,6					
Rejekt	%	0,8				1,1	0,6			
Ljushet	% ISO	57,9				60,6	61,4	62,0	61,5	60,3
R10	%	86,9				86,8	85,7	85,5	85,4	86,1
R18	%	92,3				92,2	91,8	91,7	91,9	91,8

Resultaten visade att massan framställd av referensflis från Domsjö och pumpmassa från kokaren låg på en normal nivå med avseende på utbyte, rejekt, kappatal, viskositet, ljushet, R10 och R18.

Den generella slutsatsen är att flis framställd vid Domsjö, referensflis och modifierad flis från Mittuniversitet är likvärdiga vid sulfitkokning enligt Domsjös betingelser och med avseende på analyserna listade ovan utom vad gäller rejektmängd (dvs spethalt), som sannolikt är signifikant lägre för modifierad flis, dvs sänkt från 1,1 till 0,6%. För att bekräfta denna trend skulle helst ytterligare korgkokningsförsök genomföras.

3 Modifierad flisning - impregnering

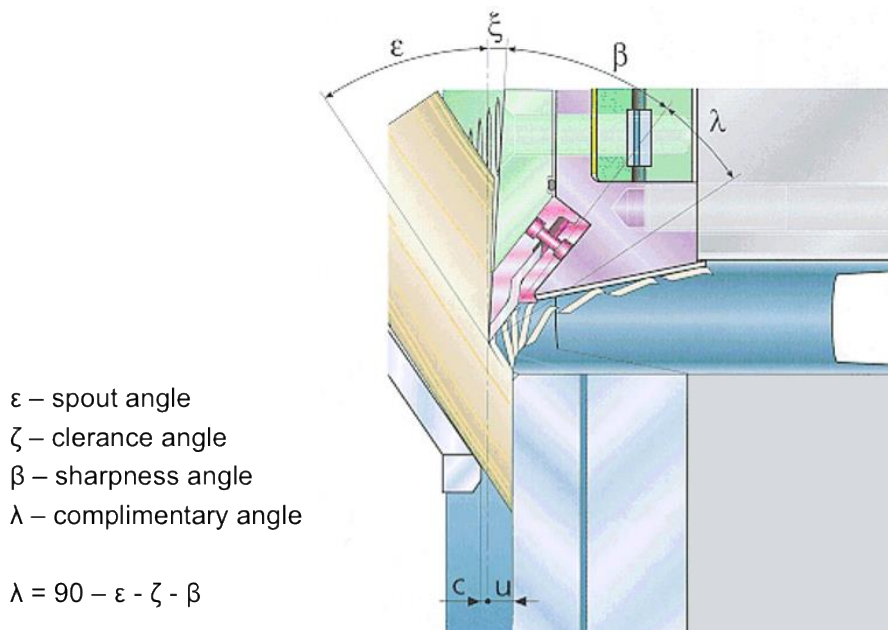
I Lisbeth Hellströms doktorsavhandling: "On the Wood Chipping Process" visades att man genom att frångå det traditionella sättet att tillverka flis så kan betydande strukturförändringar åstadkommas i veden vid en mycket liten ökning av energiförbrukningen vid flisningen (6, 7 och 8). Dessa strukturförändringar består till exempel i att sprickor som löper parallellt med fiberriktningen, åstadkoms, vilket ökar den inre fria volymen i flisen som gör att vätske-upptagningsförmågan ökar markant, 20 – 40%, se Figur 7 nedan, samtidigt som den för kemikalier tillgängliga ytan ökar väsentligt mer än så.



Figur 7 : Specifikt vätskeupptag hos granflis som funktion av tid vid flislängden 24 mm och kniv-vinklarna 50°(övre sambandet) respektive 30° och 40° (nedre sambandet). Mätningarna utfördes genom att korgar med flis doppades olika lång tid i vätska och därefter vägdes.

Vid FSCN på Mittuniversitetet designades en forskningsflishugg i pilotskala (1 m i diameter, 3 ton), vilken är byggd så att man under mycket exakta betingelser ska kunna studera flishuggning. Flishuggen finns idag

vid AIT (Andritz Iggesund Tools) monterad i en kontainer så att den enkelt kan transporteras till olika delar av världen där man vill göra flisningsstudier med lokala vedslag. Det ursprungliga syftet med huggen var bl.a att finna sätt att optimera flisstorleksfördelningen, så att andelen acceptflis skulle kunna maximeras och vidare att utvärdera huggknivsystem för skivhuggar med avseende på design och metallurgi. Utrustningen som installerades 2008 kom också, baserat på idéer från forskare vid MIUN och NTNU, att användas för att studera om en ökning av flisens stukskador skulle kunna effektivisera TMP- och CTMP-processer, kemiska kokningsprocesser och bioraffinaderisystem där risk för sprickor i fiberväggar inte riskerar att minska massans styrkepotential, se Figur 8.



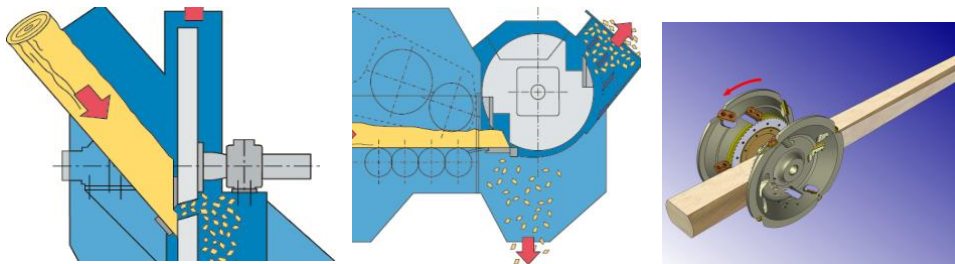
Figur 8: Här definieras viktiga vinklar i en flishugg; epsilon - spout angle (inmatningsvinkel), zeta - clearance angle (släpp-vinkel), beta - sharpness angle (eggvinkel / kniv-vinkel) och lambda - complimentary angle (komplementvinkel).

Om man vill öka kompressionskraften i flisens fiberriktning i syfte att förbättra flisens vätskeupptagnings-förmåga (och/eller för att underlätta defibrering i TMP- och CTMP-processer) så kan inmatningsvinkeln ökas så att komplementvinkeln minskas, se Tabell 4 nedan.

Tabell 4: Beskrivning av vinklar och förhållandet mellan lyftkraft och kompressionskraft.

Inmatnings-vinkel, ε	Komplement-vinkel, λ	Förhållande mellan lyftkraft och kompressionskraft
30	23	2.4
40	13	4.3
50	3	19

Att öka inmatningsvinkeln är enkelt i en laboreriehugg, men innebär ombyggnad vid implementering i en fullskalehugg. Det går dock att i stället för att öka inmatningsvinkeln, att öka eggvinkeln. Dvs. man får samma resultat vad gäller komplementvinkeln λ och därigenom också vad gäller förhållandet mellan lyftkraft och kompressionskraft. Principen är inte begränsad till skivhuggar utan går lika bra att tillämpa i trumhuggar och i samband med reducerflisning vid sågverk, se Figur 9 nedan. Det sistnämnda är dock ännu inte testat i praktiken, däremot finns ett liceniat-arbete från Mittuniversitetet som beskriver möjligheterna (9 och 10).



Figur 9: Principbilder som beskriver skivhugg, trumhugg och utrustning för reducerflisning.

Modifierad flisningsteknologi kan väsentligt effektivisera de impregneringsprocesser som används i samband med framställning av kemiska (sulfat och sulfat), halvkemiska (NSSC) och kemitermomekaniska (CTMP) massaprocesser. Jämnare impregnering medför att kemikaliehalten varierar mindre tvärs och längs flisbitarna, vilket i sin tur innebär att skillnaden i egenskaper varierar mindre och att man får lägre spethalt. Uppehållstiden i den typ av impregneringssystem som används vid tillverkning av CTMP är mycket kort (några minuter) vilket innebär att flisens egenskaper har stor inverkan på impregneringsresultatet. CCT har patent på en teknik som innebär att man vid flishuggning väsentligt kan öka flisens vätskeupptagningsförmåga genom att introducera sprickor mellan fibrerna så att vätskan tas upp genom kapillärverkan. Tekniken innebär att man måste öka kraften i flishuggen ca 2,5 ggr i fiberriktningen vilket ställer höga krav på flishuggens konstruktion. Den nya variant av trumflishugg som Multichannel Sweden AB har designat finns både som pilotutrustning vid Domsjö och har testats i fullskala vad Aspa bruks

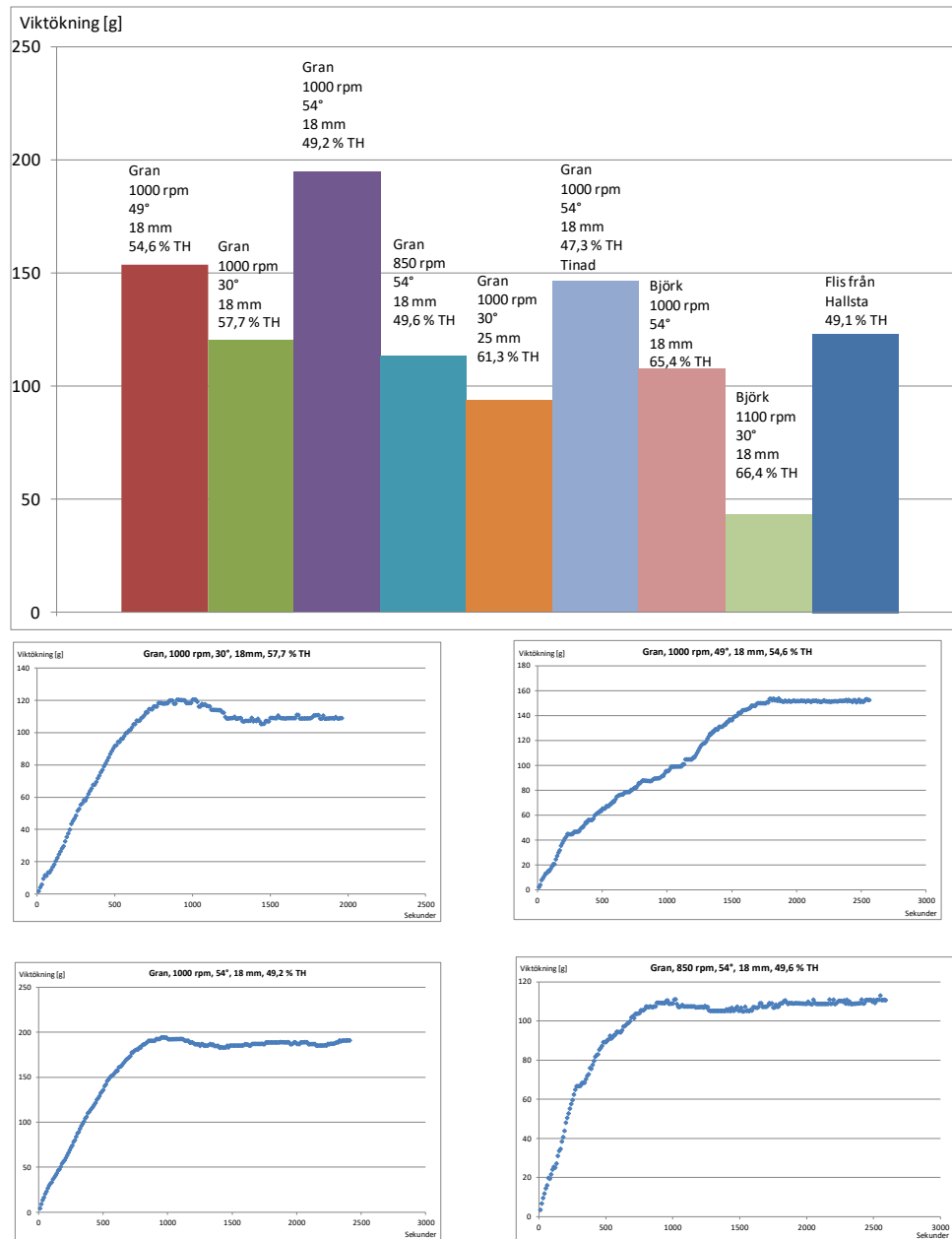
sulfatfabrik med utmärkta resultat i form av väsentligt ökad andel acceptflis jämfört med konventionella skivhuggar. Denna typ av trumhugg har pga av sin konstruktion bättre potential än konventionella skivhuggar när kraften i fiberriktningen ökas eftersom flisen huggs i periferin vid konstant hastighet och genom att stockarnas inmatning är betydligt jämnare.

De knivvinklar som använts vid fullskaleförsök vid Holmens bruk i Hallstavik var för referens 34° och för CCT-typen av flis 54°. Vid pilotförsöken med Multichannels hugg användes som referens 30° vinkel och för CCT-typen av flis 54° eggvinkel. Vidare har vi vid pilotförsöken nyttjat möjligheten att justera huggens varvtal som ju påverkar periferihastigheten och därmed ökad belastningshastighet. Därutöver har vi även studerat effekten av minskad flislängd och därmed flistjocklek för att ytterligare förbättra impregnerbarhet. Impregneringsstudier utförda vid MoRe Research redovisas i Tabell 5, nedan tillsammans med de försöksbetingelser som användes i trumhuggen. Ur tabellen framgår viktökning och tid till maxvikt för granflis tillverkad vid Multichannels pilothugg vid eggvinklar 30°, 49° och 54°. Flislängd 25 och 18 mm, varvtal 1000 rpm och 850 rpm. Industriflis från en försökskörning AIT-s knivar med eggvinkel 54° installerade i Holmen Hallstas Andritz-skivhugg är med som referens.

Tabell 5

Chip type wood - rpm - angle - length	Weight increase, g	Time to max	Knife angle
Spruce - 1000 - 30 - 25	91	700	30
Spruce - 1000 - 30 - 18	120	900	30
Spruce - 1000 - 49 - 18	155	1700	49
Spruce - 1000 - 54 - 18	195	900	54
Spruce warm - 1000 - 54 - 18	145	1000	54
Spruce - 850 - 54 - 18	115	900	54
Spruce - from Hallsta	122	800	

Sju olika typer av granflis togs fram vid Multichannels pilothugg för impregneringsmätning. Referensflis tillverkad vid 30° eggvinkel med 25 mm flislängd uppvisar som förväntat lägst vätskeupptag (91 g) medan den mest extrema CCT-flisen tillverkat med 54° eggvinkel och 18 mm flislängd uppvisar högst vätskeupptag (195g) dessa flispartier tillverkades vid samma utomhustemperatur. Ökad eggvinkel i området 30° - 54° vid i övrigt lika betingelser leder till ökat vätskeupptag (120 – 155 – 195 g). Ökat varvtal från 850 till 1000 rpm ökar vätskeupptaget från 115 till 195 g. Minskad flislängd från 25 till 18 mm vid 30° eggvinkel ökar vätskeupptaget från 91 till 120 g. Flisning med "varm" ved ger lägre vätskeupptag än flisning med frusen ved, 145 g respektive 195 g, se Figur 10.

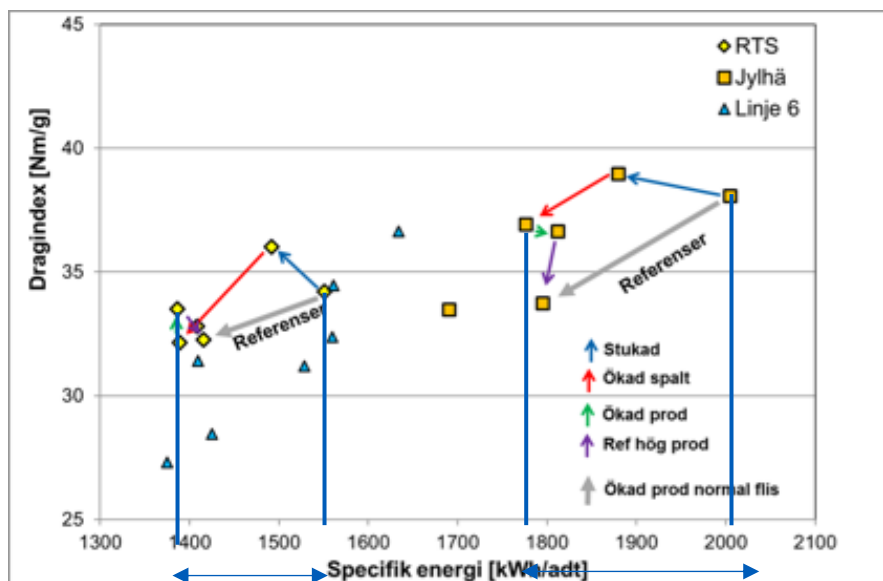


Figur 10: Impregneringsdata och exempel på impregneringskurvor.

Data är genomgående logiska då man kan förvänta sig att kortare flis som då också blir tunnare har större tillgänglig yta. Kompressionskraften i fiberriktningen ökar ca 2,5 ggr området 30° till 54° och vid 49° är kraften ökat ca 1,8 ggr. Varvtalet påverkar belastningshastigheten vilket i princip bör innebära att veden betar sig mjukare vid lägre varvtal och sprödare vid högre. Detta skulle kunna förklara varför man vid i övrigt lika betingelser får granflis högre vätskupptagningsförmåga om man ökar varvtalet från 850 till 1000 rpm. Frusen ved betar sig på förväntat sätt sprödare än varm ved.

4 Modifierad flisning - TMP fabriksförsök 2018 - 2024

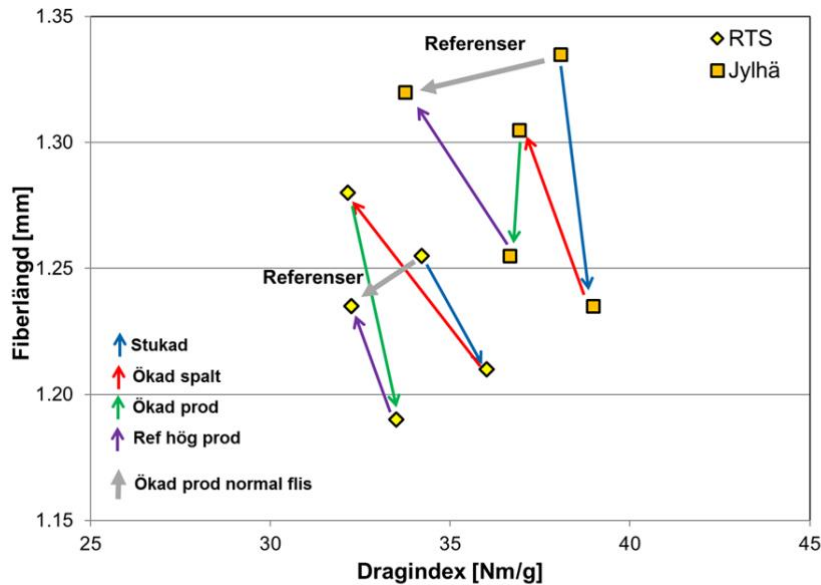
Underlag för utvärdering av specifik elenergi-förbrukning och massakvalitet har tagits fram av Christer Sandberg vid Holmen i form av summeringar av de viktigaste delarna från processvariabler och massaanalyser. I figur-texterna finns förklaringar till hur man tolkar diagrammen. I Figur 11 beskrivs dragindex som funktion av specifik elenergiförbrukning baserat på mätningar utförda av labbet vid Hallsta Pappersbruk samt mätningar i processen med avseende på flöden, massa-koncentrationer i pulper och motoreffekt. Varje TMP-linje består av primär- och sekundär-stegsraffinörer och efter varje sekundärstegsraffinör finns en pulper varifrån prover går till online PulpEye-mätare vilka mäter freeness (ml CSF), fiberlängdsfördelning (här redovisad som medelfiberlängd) och spethalt. Man kan uppskatta reduktionen i specifik elenergiförbrukning till visst dragindex till ca 150 kWh/t₉₀ för RTS-linjen och till ca 200 kWh/t för Jylhä-linjen.



Figur 11: Dragindex som funktion av specifik elenergiförbrukning per ton (airdry/t₉₀) dels för RTS-linjen, dels för Jylhä-linjen. Diagrammet läses på följande sätt: RTS-linjen är de diamantformade gula symbolerna och Jylhälinjen är de kvadratformade symbolerna (med ca 300 kWh/adt högre energiförbrukning. Försöket börjar med referensflis varefter man följer den blå pilen uppåt vänster vid övergång från konventionell till stukad flis, här ökar dragindex 1-2 Nm/g samtidigt som SEC minskar 50-100 kWh/adt. Därefter ökar vi spalten för att hamna på ungefär samma freenessnivå som vid referensflis varvid vi följer röda pilen. Nu minskar SEC så att vi totalt hamnar 200-250 kWh/adt lägre samtidigt som dragindex blir ca 1 Nm/g lägre än vid försöksstarten. De gröna pilarna beskriver när vi ökar produktionen och är ngt svåra att uttolka. Vid återgången till referensflis följer vi de violetta pilarna här låg produktionen kvar på den högre nivån. Man ser att dragindex då sjunker vid viss SEC. De blå trianglarna representerar data från linje 6 (RTS-linjen) uttagna tidigare som ett slags referens till referensen, vilket ju visar att startnivån verkar ha varit normal.

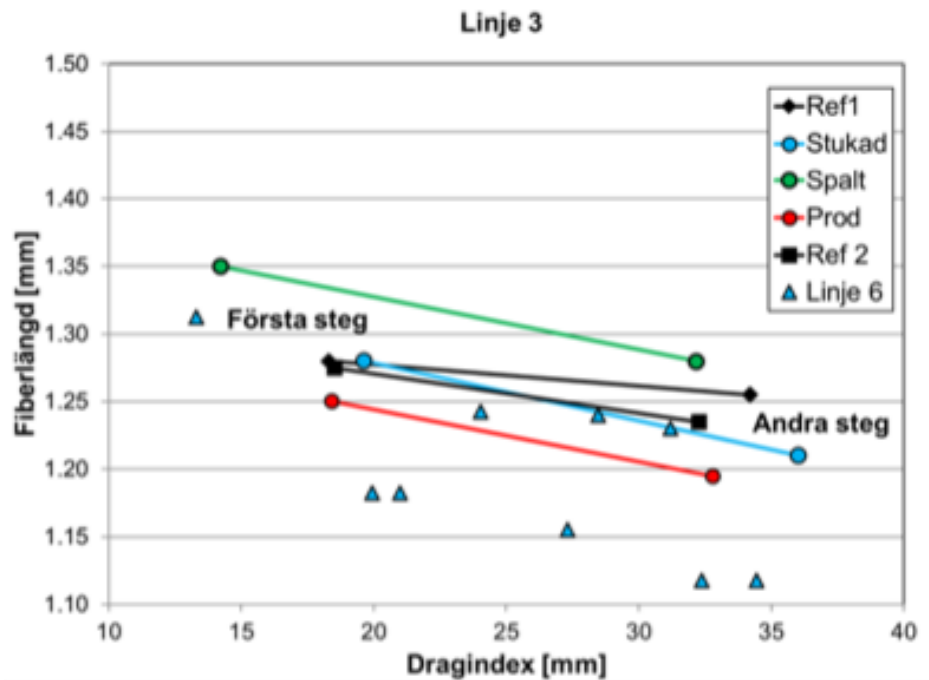
I Figur 12 nedan beskrivs hur medelfiberlängd påverkas under försökets gång. Här vill ju gärna Hallsta försöka hitta ett sätt att uppnå ngt högre

medelfiberlängd utan att förlora dragindex samtidigt som man minskar specifik elenergiförbrukning. Detta tycks vara möjligt åtminstone med RTS-linjen där det också är viktigast, men kräver ytterligare försök.



Figur 12: Medelfiberlängd som funktion av dragindex dels för RTS-linjen, dels för Jylhä-linjen. Diagrammet läses på följande sätt: RTS-linjen är de diamantformade gula symbolerna och Jylhälinjen är de kvadratformade symbolerna. Försöket börjar med referensflis varefter man följer den blå pilen neråt höger vid övergång från konventionell till stukad flis, här ökar dragindex 1-2 Nm/g samtidigt som medelfiberlängden minskar 0,04 – 0,09 mm. Därefter ökas spalten för att hamna på ungefär samma freenessnivå som vid referensflis varvid vi följer röda pilen. Nu minskar dragindex 1 – 3 Nm/g samtidigt som medelfiberlängden ökar till högre nivå än referens för RTS och ngt lägre för Jylhä. De gröna pilarna beskriver när vi ökar produktionen varvid medelfiberlängden sjunker något igen. Vid återgången till referensflis följer vi de violetta pilarna ökar medelfiberlängden åter något samtidigt som dragindex minskar.

Eftersom TMP-linjerna i Hallsta är tvåstegslinjer så är det intressant att studera processen efter vardera raffinör. I detta test fanns inte tid att samoptimera mellan förstastegs- och andrastegsraffinör. Troligen är det en fördel att i stället för att bara öka spalten i förstasteget öka spalterna parallellt i första- och andrastegsraffinör, se Figur 13. Man kan se att lutningen på referenskurvorna är lägre än på kurvorna med den stukade flisen. Vid kommande försök kan just denna samoptimering visa sig vara viktig i syfte att uppnå något högre medelfiberlängd vid visst dragindex och en viss reduktion i specifik energiförbrukning.



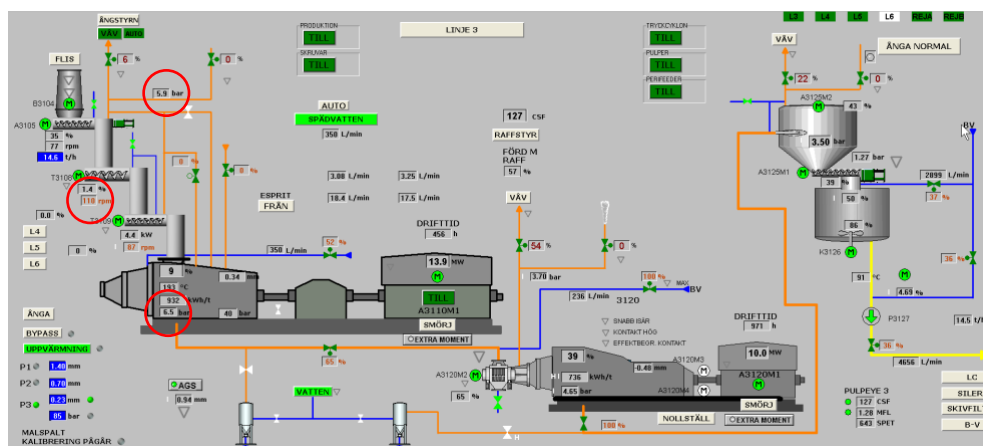
Figur 13: Medelfiberlängden jämförs här som funktion av dragindex för massaprover uttagna från blåsledning dels för RTS-linjens första- och andra-stegsraffinörer. Diagrammet läses på följande sätt: Ref1 är referensprover uttagna före övergången. Stukad är prover uttagna efter övergången till stukad flis. Spalt är prover uttagna då man ökar spalten i i primärsteg för att CSF ska hamna på samma nivå som referens 1. Prod är prover uttagna efter att man ökat produktionen i stället för att minska spalten i syfte att nå ungefär samma CSF som referens. Ref 2 är referenskörning vid hög produktion. De blå trianglarna är data från tidigare tillfälle.

5 Förbättrad styrka genom ökat tryck och temperatur vid RTS-TMP

Optimering av TMP-RTS-raffinering görs med syfte att nå förbättrad energieffektivitet och massakvalitet i form av dragindex och töjning genom att studera följande input-variabler; uppehållstid i RT-skruv (före RTS-raffinör), tryck och temperatur i RT-skruv och raffinör (malhus), produktion/flisflöde och specifik energiinsats. Alla dessa förändringar gör också att motoreffekten ändras eftersom den är en outputvariabel. Detta försök genomförs med 70 % konventionellt huggen massavedsflis och 30 % sågverksflis.

5.1 Tidplan

Fabriksförsöket genomfördes 24:e februari 2026 efter omfattande förberedelser i form av modifiering av säkerhetsinställningar, byten av reglerventiler, kontakter med leverantören Andritz om mer detaljerade processbeskrivningar. Både RTS-linje 3 och 6 förbereddes för försöken, men försöket genomfördes på RTS-linje 3. I Figur 14 nedan visar en utskrift från RTS-linje 3 i styrsystemet, här med nya inställningar efter genomfört försök – 6,5 bar(g) i malhustryck, 5,9 bar(g) i RT-skruv och något förlängd uppehållstid i RT-skruv. Den förlängda uppehållstiden i RT-skruv kan ses som ett lägre varvtal, 110 rpm istället för tidigare 186 rpm.



Figur 14: Processbeskrivning över RTS-linje 3 vid Hallstas TMP-fabrik som den presenteras i styrsystemet.

5.2 Genomförande

Inför försöket sattes en försöksmatris upp med utgångspunkten att variera fyra olika inställningar med en hög respektive låg nivå. Inställningarna som skulle ändras var; produktion, malhustryck, uppehållstid i RT-skruv och specifik energiinsats i RTS-raffinören. Utöver detta skulle tre st "mitt"-punkter tas ut före försöket, mitt i försöket och efter försöket.

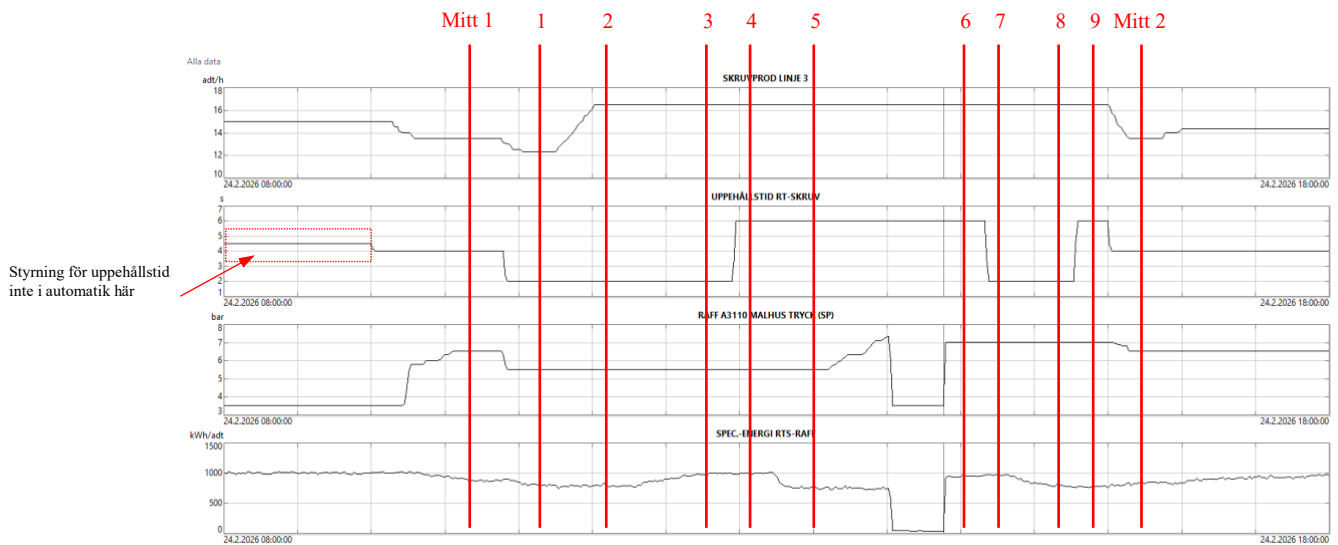
Det visade sig i början av försöket att den låga produktionsnivån tillsammans med en låg specifik energiinsats var en dålig driftpunkt för raffinören med stora effektvariationer. Efter att provpunkt nr 1 genomförts togs därför beslut om att koncentrera försöket till en hög produktionsnivå istället. De tre "mitt"-punkterna ersattes av två, en före och en efter försöket. Den slutgiltiga försöksmatrisen visas i Tabell 6 nedan.

Tabell 6: Slutgiltig försöksplan för tester med ökat tryck och uppehållstid vid RTS-raffinering.

Prov	Tidpunkt	Produktion (adt/h)	Upphållstid (s)	Malhustryck (barg)	Spec.-energi (kWh/ton)
Mitt 1	09:40-09:50	13,5	4	6,5	850
1	10:10-10:20	12,3	2	5,5	700
2	10:45-10:55	16,5	2	5,5	700
3	11:20-11:30	16,5	2	5,5	1000
4	11:40-11:50	16,5	6	5,5	1000
5	12:00-12:10	16,5	6	5,5	700
6	15:30-15:40	16,5	6	7,0	1000
7	15:45-15:50	16,5	2	7,0	1000
8	16:10-16:15	16,5	2	7,0	700
9	16:20-16:30	16,5	6	7,0	700
Mitt 2	16:35-16:45	13,5	4	6,5	850

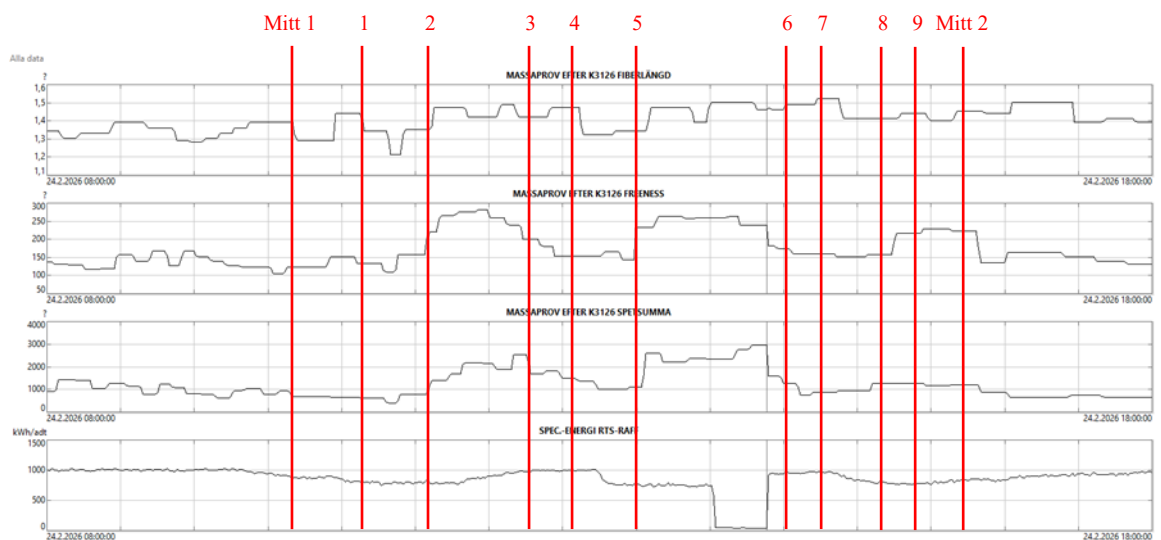
För var och en av provpunkterna varierades produktion, uppehållstid RT-skruv, malhustryck och specifik energiinsats se Figur 15. De röda linjerna markerat uttag av de olika proven enligt matrisen i tabell 6 ovan. Den höga nivån för malhustryck var från början tänkt att vara 7,5 bar(g), men vid försöket nåddes inte denna nivå, raffinörens säkerhetssystem förreglade produktionen (se trend mellan prov 5 och prov 6), vilket medförde ett längre stopp innan försöket kunde återupptas. Hög nivå för malhustryck fick därefter vara 7 bar(g). Efter att försöket avslutats fick RTS-raffinören gå

med nya inställningar med högre malhstryck (6,5 bar istället för 5,5 bar) och en längre uppehållstid i RT-skruben (4 sekunder istället för tidigare ca 2,4 sekunder).



Figur 15: Processdata från provkörningsperioden med produktion t/h, uppehållstid i RT-skruv s, malhstryck bar och energiförbrukning kWh/t.

11 prover togs ut från RTS-raffinörens blåsledning och 4 prover från pulperen som är placerad direkt efter sekundärstegsraffineringen. I pulpern späds massan från ca 40 % till ca 5 % koncentration på 1-2 minuter. Efter pulpern tas automatiskt prover ut som skickas till en PulpEye som bland annat mäter freeness och fiberlängdsfördelning och spetsumma, se Figur 16.



Figur 16: PulpEye-data från provkörningsperioden i form av medelfiberlängd mm, freeness, ml CSF och spetsumma antal samt energiförbrukning kWh/t.

Freeness och spetssumma varierar med insatt specifik energiförbrukning, även om det är en viss fördröjning i mätvärdena. Efter att försöket avslutats fick RTS-raffinören gå med nya inställningar med högre malhustryck (6,5 bar istället för 5,5 bar) och en längre uppehållstid i RT-skraven (4 sekunder istället för tidigare ca 2,4 sekunder), se Figur 14. En liten ökning av medelfiberlängd kunde skönjas tillsammans med något lägre spetssumma vid viss freeness och energiförbrukning.

Massaproverna togs med till Mittuniversitetet och analyserades i ABB Fibertester och ark tillverkades med Rapid Köthen-arkform. För varje massaprov gjordes åtta ark med en ytvikt om 65 g/m². Överbliven massa sparades i frys Mittuniversitetet.

Provning av arken genomfördes vid Hallstas lab under vecka 11 och 12. Där mättes ytvikt, densitet, optiska egenskaper samt styrkeegenskaper (som drag- och rivstyrka). Resultatet av arkprovningen visar att specifik energiförbrukning är den faktor som har absolut störst inverkan på Rapid Köthen-arkens egenskaper. Tyvärr är det svårt att utifrån dessa tester dra några slutsatser om uppehålltidens respektive malhustryckets inverkan på styrkeegenskaperna på massan från RTS-raffinören. Proverna från RTS-raffinören innehöll en hel del spet, vilket medöfr att arkegenskaperna blir svårare att utvärdera jämfört med till exempel ark från en andrastegsmassa. Möjligheten att variera uppehålltiden i RT-skraven är liten, det rör sig om sekunder och troligen har den korta uppehålltiden om 2 sekunder räckt till för att värma upp och mjukgöra flisen. Att öka den till 6 sekunder gav ingen signifikant skillnad i arkens styrkeegenskaper. Inte heller malhustrycket ser ut att ge någon signifikant skillnad i arkens styrkeegenskaper. Analyser och utvärdering av resultat från Fibertester kvarstår.

Optimering av RTS-raffinering görs med syfte att nå förbättrad energieffektivitet och massakvalitet i form av dragindex och töjning genom att studera följande input-variabler; uppehållstid i RT-skrav (före RTS-raffinör), tryck och temperatur i RT-skrav och raffinör (malhus), produktion/flisflöde och malspalt. Alla dessa förändringar gör också att motoreffekten ändras eftersom den är en outputvariabel. Detta försök genomförs med 70% konventionellt huggen massavedsflis och 30% sågverksflis.

6 Slutsatser

Grundläggande forskning rörande flisningens mekanismer vid Mittuniversitetets noggrant designade pilothugg 2006 - 2016 visade att flisning med ökad kraft i fiberriktningen dels förbättrar kemikalieimpregnering, dels minskar elenergi-förbrukning vid flisraffineringen i TMP- och CTMP-processer. Kraften i fiberriktningen ökas genom att man ändrar huggvinkeln genom justering av inmatningsvinkeln eller genom modifiering av knivvinkeln på huggstålen, vilket gjorts i samarbete med AIT (Andritz Iggesund Tools), som är leverantör av knivsystem som det som använts i MIUN's laboratorieflishugg.

Elenergieffektivisering av TMP- och CTMP-processer studerades först vid Valmet/MIUNs pilotanläggning i Sundsvall med flis från MIUN's flishugg. Därefter validerades dessa resultat med modifierad flis tillverkad vid Utansjö bruks flishugg följt av fullskaletester vid SCA Ortvikens TMP-linjer följt av försök med Ortvikens egen flishugg. Fullskaleresultaten visade potential att sänka elenergiförbrukningen 100 – 200 kWh/t vid flisraffinering med Valmet RGP68DD-rafförer. Dock bedömdes den ökade belastningen i flishuggen resultera i för höga påfrestningar för att man skulle våga köra vidare i kontinuerlig drift.

Försök med sulfatmassa i labskala vid MoRe Research och Mondi samt med sulfitmassa med korgförsök i fullskalekokare vid Domsjö kemiska massor. Labförsöken med sulfatkokning visade skillnader i dragindex som funktion av PFI-malvarv mindre än +/-5 i området 50–120 kNm/kg, vilket var något förvånande då tidigare forskning baserat på för 60–70-talet noggrant utförda studierna visat att kemiska massor erhöll sämre styrkeegenskaper om flisen hade stukskador. Rejektmängden (spethalten) minskar till ungefär hälften (1,1 till 0,6%) enligt korgkokningsförsök i en sulfitkokare vid Domsjö fabriker. Skillnader i övriga egenskaper som kappatal, viskositet, mm låg inom felmarginalen.

Omfattande impregneringsförsök genomfördes vid MoRe Research's impregneringspilot på både gran- och björk-flis som tillverkats med olika knivvinklar, flislängder och rotations-hastigheter vid Multichannel Chippings pilothugg vid Domsjö. Impregneringsdata visade att vätskeupptaget för granflis (viktökningen) går från 120 till 195 g när knivvinkeln ökar från 30° till 54° vid försök med Multichannel Chippings trumhugg (Domsjö's fabriks-område).

2018 – 2024 genomfördes tester vid Holmens TMP-fabrik i Hallstavik som har en relativt modern flishugg från Andritz (år 2000). Här användes AIT-stål med knivvinklarna 54° respektive 34°. Elenergiförbrukning minskade vid viss dragindex samtidigt som viss fiberförkortning erhöles speciellt vid RTS-linjerna. Vibrationsnivån ökar som förväntat när belastningen ökar när

knivvinkel ändras från 34° till 54°. Detta problem kan lösas genom att använda tyngre huggskiva och kraftigare lagerpaket, dvs samma utrustning som används när man flisar vedslag som Eukalyptus och Akacia med samma typ av hugg.

Hallstas RTS-raffinörer som körs vid högt varvtal, 2300 rpm i st f 1500 rpm, är designade för att kunna trycksättas upp till 8 bar, men har normalt körts vid 5,5 bar. Tryckpapper av den typ som Hallsta tillverkar gynnas av högre dragindex och medelfiberlängd. Forskning om vedens mjuknings-egenskaper samt försök i pilot och fabriksskala har visat god potential att förbättra styrkeegenskaper och energieffektivitet ökat tryck och temperatur i RTS-processer. Försöksresultaten i Hallsta tydde också på att ökat tryck och temperatur i förvärmarskruv och i raffinör medförde något minskad spetmängd och ökad medel-fiberlängd och man har efter försöken fortsatt att köra processen vid 6,5 i st f 5,5 bar.

Det finns stora möjligheter till energieffektivisering genom ytterligare forskning och utveckling inriktad mot optimering av process-betingelserna så att man kan maximera energieffektivitet och styrkeegenskaper. Längre försökskörningar och mer omfattande provning behövs för att kunna få fram förbättrade statistiska underlag. Studier om hur man kan förbättra styr och reglerstrategierna har tidigare också visat sig ha stor potential. Förhoppningsvis kan även dessa studier ingå i projekt vid Energiforsk.

7 Referenslista

1. Engstrand, P., Gradin, P., Hellström, L., Carlberg, T., Sandström, P., Liden, J., ... & Mats, E. (2016). Improved refining energy efficiency in thermo-mechanical pulping by means of collimated wood chipping—from solid mechanics to full scale evaluation. In *PaperWeek Canada 2016 Conference, Montreal, February 1-5, 2016*.
2. Sabourin, M., Xu, E., Cort, B., Boileau, I., Waller, A. (1997) Optimizing residence time, temperature and speed to improve TMP pulp properties and reduce energy. *Pulp Pap. Can.* 98:111 – 118.
3. Sabourin M, Vaughn J, Wiseman N & Welungoda B (2003) Industrial Scale Evaluation of Low Retention, High Temperature, High Speed (RTS) TMP Pulping of Southern Pine. Proceedings of 57th Appita annual conference, Melbourne, Australia, 119–125.
4. Sikter, D., Karlström, A., Engstrand, P., & Czmaidalka, J. (2007). Using the refining zone temperature profile for quality control. International Mechanical Pulping Conference, IMPC 2007 Minneapolis USA <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-the-refining-zone-temperature-profile-for-Sikter-Karlström/fc69fc07bc32ef415ec1d0f6773d9448ce237266>
5. Engstrand, P., Engberg B., & Eriksson, K. Filling the Gap – Final Report, Rapportserie FSCN – ISSN 1650-5387 2014:57, FSCN-rapport R-14-85, Sundsvall 2014 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:928612/FULLTEXT01.pdf>
6. Hellström, L. M., Gradin, P. A., Gulliksson, M., & Carlberg, T. (2011). A laboratory wood chipper for chipping under realistic conditions. *Experimental mechanics*, 51(8), 1309-1316.
7. Hellström, L., Gradin, P., Engstrand, P., & Gregersen, Ø. (2011). Properties of wood chips for thermomechanical pulp (TMP) production as a function of spout angle. *Holzforschung*, 65(6), 805-809.
8. Hellström, L., Carlberg, T., Engstrand, P., Gradin, P., & Gregersen, Ø. (2012). Evaluation of collimated chipping technology for reducing energy consumption in mechanical pulping. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Proc*
9. Lusth, H., Gradin, P. A., & Hellström, L. M. (2012). The dependency of energy consumption on cutting angles in the canter chipping process. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 27(5), 886-889. *esses*, 2(3), 6-9.

10. Lusth, H., Gradin, P. A., & Hellström, L. M. (2013). A theoretical model for the prediction of energy consumption during the chipper canter process. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 28(2), 211-215.

8 Appendix

Här bifogas en forskningsartikel som är tänkt att publiceras i någon av dessa vetenskapliga tidskrifter;

<https://www.sciencedirect.com/journal/mechanism-and-machine-theory>

eller <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign>.

Kontentan av detta modelleringsarbete är att om man vill minska energiförbrukningen vid raffinering genom att fördubbla kraften i fiberriktningen vid flishuggning via ökad knivvinkeln så kan man bibehålla samma vibrationsnivå i huggen som före förändringen genom att öka massa/vikt i huggskivan. Vibrationer är egentligen den uppbromsning man får när knivarna skär genom en stock och denna uppbromsning ökar om man ökar knivvinkeln.

1 **Mathematical modelling of the influence of the mass moment of inertia**
2 **of a chipper disc, on the vibration levels in a woodchipper.**

3 **Lundman L.^a, Gradin. P. A.^b, Carlberg T.^b, Engstrand P.^c**

4 ^a Sunds Fibertech, Machine and plant engineering, lukas.lundman@sundsfibertech.com

5 ^b Collimated Chipping Technology, per.gradin@miun.se – corresponding author

6 ^b Collimated Chipping Technology, torbjörn.carlberg@miun.se

7 ^c Mid Sweden University, pereng@miun.se

8

9 **1. Abstract**

10
11 It has been shown that by performing wood chipping so that forces parallel to the grain are increased, TMP-refining energy
12 can be reduced by 10%. Our hypothesis is that the induced cracks serve as fracture initiation sites in chip-refining. It is
13 possible to increase the compressive forces by adjusting the edge angle of the chipping tool. However, this comes with a
14 price, due to that increases vibrations affects e.g. the gear box in a negative way. A solution to this problem could be to
15 increase the rotary moment of inertia of the chipper-disc, by increasing its weight, to reduce the variations in the angular
16 velocity. To predict the outcome of this idea, a mathematical model was developed where it is assumed that asynchronous
17 motors with known moment vs angular velocity relation are used and that the chipper operates in a region close to the
18 synchronous angular velocity. In reality, the loads are stochastic and there are not any statistical data available regarding
19 this. Due to lack of load data, a well-defined loading case was considered which renders this analysis qualitative i.e. the
20 analysis should be able to predict trends.

21 **2. Introduction**

22
23 The influence of an increased cutting angle in the chipping process on the energy consumption in a subsequent mechanical
24 pulp refining, has not only been investigated in a number of large-scale mill trials, but has also been the subject of a number
25 of publications [1 - 8]. For example, in [1] an experimental study is where the micro-mechanics of chip formation is studied.
26 In [2] the development of a laboratory woodchipper and analytical/numerical tools for evaluating the experimental data is
27 presented. Also worth mentioning is [5] where a damage parameter for the impact on the wood chips from increasing
28 cutting angles, is defined and a numerical tool is presented, used to optimize the cutting angle. The compressive force in
29 the fibre direction of the wood is increased to about the double when using 54° instead of the conventionally used edge
30 angle 34° of the chipping tool. This force increase creates more cracks between the fibres in the wood-chips which is
31 probably the cause to reduced energy demand in the following chip-refining to achieve certain pulp properties. Demonstration
32 scale studies were performed in cooperation with SCA Ortvikens TMP-mill in Sweden already 2014 and the conclusions
33 drawn, based on a two-month test period was that the specific refining energy reduction was ranging from 100 to 200
34 kWh/adt on three refiner lines normally using about 1400 kWh/adt in the double disc refiners [6]. The energy reduction
35 potential was thus confirmed to be about 10% as would be expected based on the earlier laboratory and pilot scale trials
36 [4]. The obstacle against industrial implementation of this technology is that the increased force due to increased cutting
37 angle leads to increases vibrations that affects e.g. the gear box in a negative way thus the demands on the wood chipper
38 machine construction is increased.

39 To investigate how an increased cutting angle can be utilized without causing unwanted disturbance to the wood chipper
40 machines, a mathematical model describing the dynamics of a system consisting of a coupled number of (in this case four)
41 asynchronous motors that, through a gear box, drives a chipper disc having a specific rotary inertia. It has been assumed
42 that everything happens in a region close to the synchronous rotational speed. In that region there is (luckily) a linear
43 dependence of the motor moment on the rotational speed. As such, the problem is linear and then lends itself to a linear
44 analysis. So far everything is nothing but an ordinary linear differential equation. One thing that is troubling is that the
45 input i.e. the load from the chipping of the logs is stochastic and not known. To that end some "worst case loading" has
46 been assumed and the hope is that the solution for this case can be indicative of how the rotary inertia affects the variation
47 in the moment from the asynchronous motors also in a more general case of loading.

48

91

$$J \frac{d\omega_f}{dt} = M_{in} - M_f \quad (4)$$

92

93 where J is the rotary inertia of the chipper disc and M_f and M_{in} are defined in figure 1. Further on from figure 1, with g
94 being the gear ratio:

95

$$\omega_{f0} - \omega_f = (\omega_0 - \omega_m) \frac{1}{g} \quad (5)$$

96

97 where ω_{f0} is the angular frequency of the chipper disc with no external moment acting on it i.e. $\omega_{f0} = \frac{\omega_0}{g}$.

98

99 Defining $\Delta\omega_f = \omega_{f0} - \omega_f$ and thereby

100

101 $\frac{d\Delta\omega_f}{dt} = -\frac{d(\Delta\omega_f)}{dt}$ one will with

102

$$M_{in} = gM_m \quad (6)$$

103

104 and with equation (3) and (5) arrive at:

105

$$\frac{d(\Delta\omega_f)}{dt} + \frac{\alpha g^2}{J} \Delta\omega_f = \frac{M_f}{J} \quad (7)$$

106

107 i.e. a linear non-homogenous differential equation of the first order.

108

109 Going back to figure 3, M_f over one period is defined by:

110

$$M_f = M_0 ; \quad t \in [kT, kT + \tau^*] \quad (8)$$

111

$$M_f = 0 ; \quad t \in [kT + \tau^*, (k+1)T] \quad (8')$$

112

113 It now is easy to show that a particular solution to (7) with $\beta = \alpha g^2/J$ is:

114

$$\Delta\omega_f = \frac{e^{-\beta t}}{J} \int_0^t M_f(\tau) e^{\beta \tau} d\tau \quad (9)$$

Specializing equation (9) to the loading in figure 3 will give:

$$\Delta\omega_f = \frac{M_0 e^{-\beta t}}{J\beta} \left([e^{\beta \tau}]_0^{\tau^*} + \dots + [e^{\beta \tau}]_{(n-2)T}^{(n-1)T - \tau^*} + [e^{\beta \tau}]_{(n-1)T}^t \right) ; \quad t \in [(n-1)T, nT + \tau^*] \quad (10)$$

115

116 In the interval $t \in [nT - \tau^*, (n+1)T]$ $\Delta\omega_f$ is given by putting t in the last bracket equal to $nT - \tau^*$.

117

After some algebraic manipulations and utilizing that $1 + e^{\beta T} + \dots + e^{\beta(n-2)T} = \frac{1 - e^{\beta(n-1)T}}{1 - e^{\beta T}}$ one will arrive at:

$$\Delta\omega_f = \frac{M_0 e^{-\beta t}}{J\beta} \left((e^{\beta(\tau^* - \tau^*)} - 1) \left(\frac{1 - e^{\beta(n-1)T}}{1 - e^{\beta T}} \right) + e^{\beta t} - e^{\beta(n-1)T} \right) ; \quad t \in [(n-1)T, nT + \tau^*] \quad (11)$$

118

For $t \in [nT - \tau^*, nT]$ one will have:

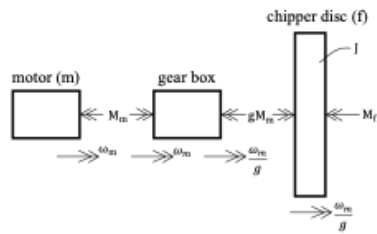
$$\Delta\omega_f = \frac{M_0 e^{-\beta t}}{J\beta} \left((e^{\beta(\tau^* - \tau^*)} - 1) \left(\frac{1 - e^{\beta(n-1)T}}{1 - e^{\beta T}} \right) + e^{\beta(nT - \tau^*)} - e^{\beta(n-1)T} \right) \quad (12)$$

119

Under steady state conditions i.e. when n is large, $1 - e^{\beta(n-1)T} \rightarrow -e^{\beta(n-1)T}$ so that:

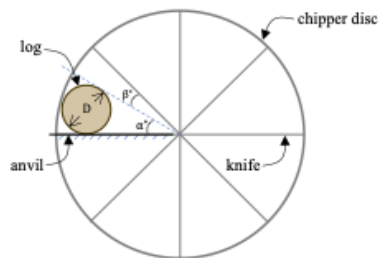
49 **The model**

50
51 The dynamical system that the model is trying to resemble is shown in figure 1.



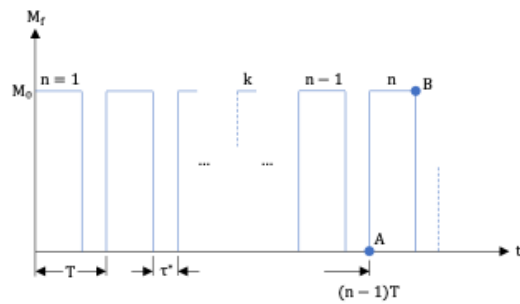
52
53 Figure 1. A simplified model of a wood chipper. M_m is the torsion moment from the motors, ω_m the angular
54 frequency and g the gear ratio. M_f is the moment from the chipping.

55
56 The assumed load case is shown in figure 2



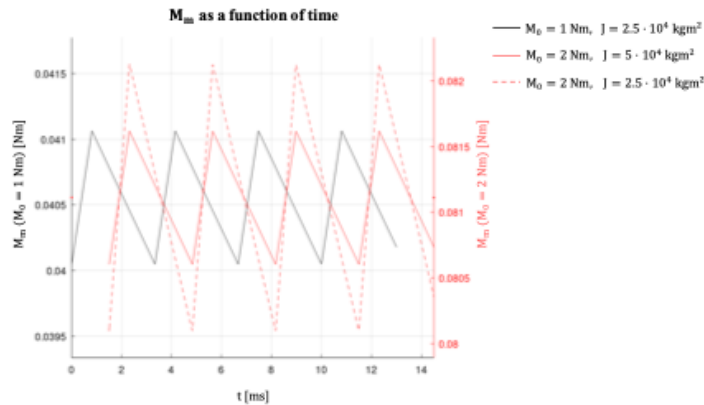
57
58 Figure 2. The geometry of the chipping process

59
60 To keep things simple, the external loading, that is, the periodic external moment caused by the chipping of the log shown
61 in figure 2, is assumed to look like the moment variation shown in figure 3:



62
63 Figure 3. This loading is motivated by the geometry shown in figure 2

188 This resulted in that a value of $J = 5 \cdot 10^4 \text{ kgm}^2$ was sufficient to achieve this. The effect of increasing the value of J can
189 be seen in figure 8, where the motor torque, M_m , has been calculated for the different values on M_0 and J .
190
191



192 Figure 8. Motor moment, M_m , as a function of time for different values of M_0 and J . Curves with $M_0 = 2 \text{ Nm}$ has
193 been shifted along the time-axis to make the plot easier to analyze
194

195 4. Discussion

196 Through a quite simple analysis it has been shown that it is possible to decrease the variations in the torsion moment, variations
197 that are detrimental to e.g. the gear box in a wood chipper. To increase the mass moment of inertia of the chipper
198 disc and possibly also upgrade the bearings, should be a simple and cheap way to be able to benefit from the energy savings
199 potential in mechanical pulp refining by performing the chipping with chipping tools having a larger edge angle.
200 This way of solving the problem is discussed with suppliers of wood chipping machines and during 2026 there are plans
201 to validate this modeling work by means of full scale tests in a wood-chipper at a mill producing thermomechanical pulp.
202

203 5. References

- 204
205 [1] A Method for Experimental Investigation of the Wood Chipping Process. Hellström L., Gradin P. A., Carlberg T.
206 Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol 23, Issue 3, 2008
207 [2] A Laboratory Wood Chipper for Chipping Under Realistic Conditions. Hellström L. M., Gradin P. A., Gulliksson M.,
208 Carlberg T. Experimental Mechanics (2011) 51:1309 - 1316
209 [3] Properties of wood chips for thermomechanical pulp (TMP) production as function of spout angle. Hellström L. M.,
210 Gradin P. A., Engstrand P., Gregersen Ø. *Holzforschung*, Vol. 65, pp 805 – 809 (2011)
211 [4] Evaluation of Collimated Chipping Technology for Reducing Energy Consumption in Mechanical Pulping. Hellström
212 L.M, Carlberg T., Engstrand P., Gradin P.A., Gregersen Ø.W. *J-FOR*, Vol. 2, No. 3, 2012
213 [5] A Numerical and Experimental Study Regarding the Influence of Some Different Process Parameters on the Damage
214 State in Wood Chips. Isaksson P., Gradin P. A., Hellström L. M. *Holzforschung*, DOI: 10.1515/hf-2012-0142, (2013)
215 [6] Improved refining energy efficiency in thermo-mechanical pulping by means of collimated wood chipping from solid
216 mechanics to full scale evaluation. Engstrand, P., Gradin, P., Hellström, L., Carlberg, T., Sandström, P., Liden, J.,
217 Söderberg, M. & Egnell, M. In *PaperWeek Canada 2016 Conference, Montreal, February 1-5, 2016*.
218 <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Amin%3Adiva-29474>
219 [7] An Experimental Study of the Chipping Process with Focus on Energy Consumption and Chipping Angles. Nyström
220 J.L., Gradin P.A., Thörnberg B. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. DOI.org/10.1515/npprj-2018-3055
221 [8] Matlab The MathWorks Inc., Natick, MA, USA

ENERGIEFFEKTIVARE RAFFINERING MED HJÄLP AV MODIFIERAD FLISNINGSPROCESS

Denna rapport sammanfattar resultat från ett forsknings- och utvecklingsarbete kring modifierad flisning för energieffektivisering inom massa- och pappersindustrin, med fokus på mekanisk massatillverkning. Arbetet bygger på studier vid Mittuniversitetet samt pilot- och fullskaleförsök i samverkan med industriella aktörer.

Bakgrunden är att raffineringen i TMP- och CTMP-processer står för en stor del av energianvändningen i massaindustrin. I projektet har en metod utvecklats där huggvinkeln justeras för att öka kraften i fiberriktningen, vilket påverkar flisens egenskaper och de efterföljande processtegen.

Resultaten visar att modifierad flisning förbättrar impregneringsegenskaperna och kan minska energibehovet vid raffinering med upp till 100–200 kWh per ton vid bibehållen massakvalitet. Samtidigt ställer metoden högre krav på utrustningen, då den ökade belastningen vid flisning kräver robustare flishuggar för industriell tillämpning.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

