

Kartläggning och förbättringsförslag för en barrfiberlinjes bruntvätt

Oscar Jutila



Diplomarbete för process- och energiteknik

Handledare: Docent Frank Pettersson,

Handledare: DI MBA Niklas Keskinen

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi

April 2022

Förord

Jag vill rikta ett stort tack till UPM Kymmene Oy som gett mig möjligheten att göra mitt diplomarbete vid fabriken i Jakobstad. Trots den rådande strejksituationen har arbetet framskridit som planerat med lite modifieringar av den ursprungliga planen. Ämnet för diplomarbetet har varit intressant och då det finns möjligheter för energi-inbesparingar är område mycket viktigt i dagens läge. Jag uppskattar även att jag under arbetets gång har haft möjligheten att ta mig an andra uppgifter vid sidan om diplomarbetet, det här har gett möjlighet till att reflektera över vad som utfördes i diplomarbetet. Jag vill rikta ett stort tack till handledare Niklas Keskinen och handledare Frank Pettersson för att ha stöttat mig under arbetets gång. Samtidigt vill jag tacka UPM:s övriga personal som deltagit i arbetsprocessen och speciellt laboratoriepersonalen som analyserat alla prov från effektivitetstestet.

Jakobstad 8.4.2022

Oscar Jutila

Abstrakt

I diplomarbetet undersöks barrfiberlinjens bruntvättseffektivitet vid UPM Kymmene Oy:s cellulosafabrik i Jakobstad. I samband med effektivitetstestet har även enkla och linjära optimeringsmodeller konstruerats för att ge en bild av vad små förändringar i bruntvätten kan leda till för energi-inbesparingar vid indunstningen. I dagens läge är bruntvätten ett viktigt område på cellulosafabriken. Bruntvättens uppgift är att möjliggöra en så effektiv kemikalieåtervinning som möjligt samtidigt som miljön påverkas i en så liten utsträckning som möjligt. Bruntvättens effektivitet undersöktes med hjälp av Nordéns effektivitetsfaktor och tvättförluster mätta i COD. För att beräkna Nordéns effektivitetsfaktor behövs provtagningar från fibersuspensionerna och filtraten som kommer in och ut från tvättarna. Proven analyserades i fabriken laboratorium och analysresultaten användes sedan i effektivitetsberäkningarna. Effektivitetstestets resultat kunde även användas för att skapa en enkel modell där ett samband antas gälla mellan filtratens COD-nivå och torrhalt. Med modellen undersöktes hur färskvattentillförseln till bruntvätten påverkar filtratens torrhalt. Filtratens torrhalt påverkar även svartlutens torrhalt och det här möjliggör energi-inbesparingar vid indunstningsavdelningen eftersom om svartlutens torrhalt ökar så minskar den totala mängden vatten som ska indunstas. Slutsatsen från effektivitetsundersökningen är att bruntvätten fungerar relativt bra. På grund av mätfel är urvattnarnas resultat från tvätteffektivitetsberäkningarna svårtolkade. I den atmosfäriska diffusören ses indikationer på att något inte fungerar som det ska eftersom filtrat körs förbi samtidigt som torrhalten i den utgående massan är lägre än i den inkommande massan.

Sökord: bruntvätt, tvätteffektivitet, cellulosa, filtrat, barrved

Förkortningar

ADt	Lufttorkat ton, 90 procents torrhalt
AD-tvätt	Atmosfärisk diffusör
BOD	Biologiskt syrebehov
C	Massans torrhalt
COD	Kemiskt syrebehov (från engelska chemical oxygen demand)
DD-tvätt	Trycksatt trumfilter (från engelska drum displacer)
DF	Utspädningsfaktor
DR	Förträngningsförhållande
E	Nordéns effektivitetsfaktor
E ₁₀	Nordéns effektivitetsfaktor med 10 procents utkommande massatorrhalt
EA	Effektiv alkali
EDR	Ekvivalenta förträngningsförhållandet
E _{st}	Nordéns effektivitetsfaktor med st-procents utkommande massatorrhalt
ODt	Ugnstorkad ton, 100 procents torrhalt
TDS	Totala mängden upplöst fastmaterial
TIC	Totala mängden oorganiskt kol
TOC	Totala mängden organiskt kol
Y	Tvättutbyte

Innehåll

Förord	ii
Abstrakt	iii
Förkortningar	iv
1 Inledning	1
2 Träegenskaper och sulfatmassa	4
2.1 Råmaterial	4
2.1.1 Cellulosa	5
2.1.2 Lignin	5
2.1.3 Hemicellulosa	6
2.1.4 Extraktivämnen	6
2.2 Vedhantering	6
2.3 Sulfatmassaframställning	8
2.3.1 Sulfatkokets variabler	8
2.3.2 Sulfatmassakoket	9
2.3.3 Delignifierings faser	9
2.4 Kokmetoder	11
2.4.1 Förträgningskokning	11
2.4.2 SuperBatch®-K	12
3 Bruntvätt	14
3.1 Bruntvättens funktionsprinciper	14
3.1.1 Förträgningsvättning	15
3.1.2 Utspädnings- och extraktionstvättning	16
3.1.3 Diffusionstvättning	17
3.2 Balansräkningar och tvätteffektivitetsberäkningar för bruntvätten	17
3.2.1 Tvätteffektivitet	17
3.2.2 Tvättparametrar och variabler	20
3.3 Tvättar	23
3.3.1 Diffusionstvättssystem	23

3.3.2	Trycksatta tvättfilter.....	24
3.3.3	Urvattnare.....	26
3.3.4	Tvättpressar.....	28
3.4	Bruntvättens processtyrning och reglering	28
3.4.1	Mätning av tvätförluster.....	29
3.4.2	Reglering av massans torrhalt	29
3.4.3	Processoptimering.....	30
3.5	Skumbildning och skumdämpande medel.....	31
4	Massasilning.....	32
4.1	Silningsprincip.....	32
4.2	Uppbyggnad och placering	33
5	Syrgasblekning	33
5.1	Syrgasblekningsprocessen	34
5.2	Syrgasblekningens kemi	35
6	Återvinning och indunstning av svartlut.....	35
6.1	Återvinning.....	35
6.2	Indunstning.....	36
7	Experimentell del	36
7.1	UPM och UPM:s cellulosafabrik i Jakobstad	37
7.2	Barrfiberlinjen i Jakobstad.....	37
7.3	Björkfiberlinjens bruntvätt.....	38
7.4	Effektivitetsundersökning på bruntvättsavdelningen.....	38
7.4.1	Provtagningar	39
7.4.2	Flödes- och ämnesbalanser vid utspädning.....	41
7.4.3	Hantering av mätfel.....	42
7.4.4	COD-överföring.....	43
7.4.5	Beräkning av tvätfaktorn	43
7.5	Beräkning av tvättvätskebalans	44
7.6	Modell för filtratets torrhalt	45

7.6.1	Anpassande av modell för COD-nivå och torrsbstans i filtraten.....	46
7.6.2	Torrhaltsökning i filtraten för att minska indunstningens belastning.....	48
8	Resultat och diskussion	48
8.1	Bruntvättens effektivitet.....	48
8.1.1	Den första DD-tvättens effektivitet	49
8.1.2	AD 2-tvättens effektivitet.....	50
8.1.3	Urvattnarnas effektivitet	52
8.1.4	Syrgasblekningens DD-tvätts effektivitet.....	54
8.2	Balansräkning över bruntvättens vätskefas.....	56
8.3	Resultatet av modellen för torrsbstans i filtraten.....	58
8.4	Skillnader i barrlinjens och björklinjens tvätteffektiviteter	61
9	Sammanfattning och slutsatser	63
10	Referenser	65
	Bilagor	

1 Inledning

Över två tredjedelar av Finlands yta består av skog. Skogsbruksarealen är över 26 miljoner hektar. Det här gör Finland till ett lämpligt land för cellulosaförädling. De första produktionsanläggningarna inom skogsindustrin i Finland startades under 1860-talet (Seppälä, et al., 1999). I slutet av 1800-talet upptäckte Carl F. Dahl att kemikalieförlusterna som uppstår vid återvinningen för sodamassaframställning kunde kompenseras genom att lägga till natriumsulfat i förbränningsugnen. Genom detta möjliggjordes återvinning av sulfid vid alkalisk massaframställning. Metoden började kallas sulfatmetoden och blev snabbt en populär metod för massaframställning av barrved i Norden. För att den då nya metoden skulle vara ekonomiskt lönsam och konkurrenskraftig mot sulfitmetoden var en effektiv kemikalieåtervinning nödvändig eftersom sulfitkemikalierna var billiga. (Kleppe, 1970)

Bruntvätten är en viktig del av cellulosafabriken eftersom den både påverkar massans kvalitet och mängden kokkemikalier som kan återvinnas. Bruntvätten påverkar också utsläppsmängden. Det är därför viktigt att bruntvätten fungerar som önskat och tvättar massan effektivt. I sulfatkoket löses ligninet som är bundet i träcellerna i mindre delar. De lösta lignindelarna måste avlägsnas från fibersuspensionen efter koket. Med ökande miljökrav finns det både möjligheter och potential att förbättra och optimera bruntvättar. Det här för att bland annat öka dess effektivitet, minimera miljöpåverkan och öka kemikalieåtervinningen. I dagens läge används dessutom syrgasblekning i samband med bruntvätten. Syrgasblekningen minskar belastningen på blekeriet vilket i sin tur leder till att en mindre mängd blekkemikalier behövs.

För att känna till hur bra och effektivt en bruntvätt egentligen fungerar görs vanligtvis en undersökning. I undersökningen undersöks effektiviteten. Genom att använda beräkningsmetoder som är specifikt utvecklade för att bestämma effektiviteten av en bruntvätt kan resultaten användas för att jämföra tvättarna och allmänt avgöra om bruntvätten fungerar så effektivt som den borde. För att beräkna effektiviteten krävs provtagningar från både fibersuspensionen och filtraten från både inloppen och utloppen. För att få användbara resultat till effektivitetsberäkningarna analyseras proven. Effektivitetstestet används först och främst för att avgöra om bruntvätten fungerar effektivt men dessutom kan enklare teoretiska optimeringar utföras med hjälp av testet. I samband med effektivitetstestet är det nödvändigt att göra balansberäkningar över systemet för att kontrollera att resultaten i effektivitetsberäkningarna stämmer överens med verkligheten.

Vid UPM cellulosafabrik i Jakobstad uppgaderades björklinjens bruntvätt under 2020. I samband med uppgraderingen gjordes effektivitetsundersökningar både före och efter uppgraderingen. Fokuset låg då endast på björklinjen men det fanns även ett intresse för att utföra ett liknande effektivitetstest på barrlinjen, för att få information hur effektivt den bruntvätten fungerar. Samtidigt

finns även ett intresse för att öka effektiviteten av bruntvätten för att enklare nå produktionsmässiga, miljömässiga och kvalitetsmässiga mål.

Bruntvätten och de områden som påverkar bruntvätten mest kommer presenteras. I litteraturdelen behandlas först vedkemin och vedcellernas uppbyggnad kortfattat, för att ge en inblick i de mest relevanta veddelarna och vilka som påverkar bruntvätten. I korthet behandlas även vedhantering för att visa hur råvarobehandlingen redan i vedhanteringskedet kan påverka bruntvätten genom orenheter och ofördelaktiga flisstorlekar. Barrkokeriet vid UPM:s fabrik i Jakobstad är ett satskokeri av modellen SuperBatch-K. Kokprocessen behandlas i korthet och olika koktekniker presenteras kortfattat. Filosofin bakom K-modellens SuperBatch-kokeri presenteras eftersom den påverkar bruntvätten i större utsträckning samtidigt som även bruntvätten påverkar kokeriet då tvättluten återcirkuleras till kokeriet för energiåtervinning.

Bruntvätten och dess funktionsprinciper tas upp för att ge en bild av hur de olika tvättmetoderna fungerar. Tvättmetoderna som behandlas är förträngningstvättning, utspädnings- och extraktionstvättning samt diffusionstvättning. De vanligaste effektivitetsberäkningarna för en bruntvätt presenteras och relevanta balansberäkningar behandlas. De olika tvättarna som vanligtvis används inom bruntvätt presenteras. För att ge en inblick i de viktigaste parametrarna och variablerna för processreglering och mätning beskrivs dessa i ett delkapitel. Inom bruntvätt bildas skum vilket är ofördelaktigt då det gäller att uppnå en så effektiv tvätt som möjligt. Skumbildning och skumdämpande medel presenteras i sin korthet. Inom det balansområde som anses vara bruntvätten är även massasilningen placerad. I silningen silas oupplösta flisbitar och flockade fiberbitar bort från fibersuspensionen. Det här behandlas i korthet i ett eget kapitel. Syrgasblekningen är en viktig del av den moderna sulfatmassafabriken. Syrgasblekningens uppgift är att minimera miljöpåverkan samtidigt som blekningskostnaderna minskas. Det här behandlas i ett kapitel som är uppdelat i en processbeskrivning för syrgasblekning samt en del för syrgasblekningens kemi. Slutligen behandlas återvinningen av kokkemikalier och indunstning av svartlut. Bruntvätten är starkt sammankopplad till indunstning av svartlut. Bruntvättens effektivitet ger direkt utslag på torrhalten till indunstningen. För att återge en bild av vad som påverkas av bruntvätten och hur bruntvätten fungerar behandlas de uppräknade områdena och synvinklarna i den litteraturbaserade delen.

Själva arbetet presenteras i en experimentell del och resultats- och sammanfattande delar. I den experimentella delen presenteras först UPM:s cellulosafabrik i Jakobstad. Dessutom presenteras barrfiberlinjen mer omfattat i ett eget delkapitel. Ett effektivitetstest på barrlinjens bruntvätt utfördes för att evaluera bruntvättens effektivitet. Hur effektivitetstestet utfördes presenteras i sin helhet i den experimentella delen av avhandlingen medan resultatet presenteras i resultatsdelen. En beskrivning över hur provtagningarna till effektivitetstestet presenteras i ett underkapitel. I flera fall var det omöjligt att göra provtagningar på de rätta ställena och det här har medfört att en del

balansberäkningar har gjorts för att få användbara resultat till effektivitetsberäkningarna. I den experimentella delen beskrivs även hur andra beräkningar har utförts samt hur mätfel har hanterats. Som stöd till effektivitetstestet gjordes även en balansberäkning över vätskefaserna i bruntvätten. Hur balanserna är uppbyggda och vad som beaktats presenteras i den experimentella delen. För att enkelt beskriva hur torrhalten i filtraten påverkas av mängden färskvatten som används i bruntvätten har en modell byggts upp. Modellens uppbyggnad presenteras i den experimentella delen. I ett eget kapitel presenteras resultaten från effektivitetstestet, balansberäkningarna och modellen för filtratens torrhalt. I kapitlet diskuteras även resultatens trovärdighet och så diskuteras förslag och synvinklar om hur bruntvätten och dess effektivitet kunde förbättras med enkla metoder.

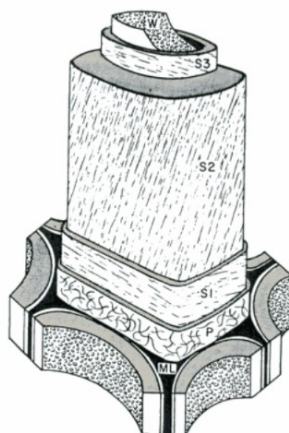
2 Träegenskaper och sulfatmassa

2.1 Råmaterial

Inte ens hälften av den mängd rundved som avverkas på årligbasis i världen används för industriella ändamål. År 2006 användes ungefär 520 miljoner kubikmeter rundved av cellulosaindustrin. Beroende på trädart är förbrukningen per ton producerad massa kring 3,7–5,6 kubikmeter. I Finland är taiga den dominerande biomen. (Willför, et al., 2011)

Den aktiva trädkronan växer genom fotosyntes. I trädkronan produceras olika näringsämnen som tillför energi till trädet. Kolhydrater bildas genom komplexa reaktioner av koldioxid, klorofyll och solljus. Själva veden växer dock inte direkt genom fotosyntes, utan veddelen växer i stället genom celledning i kambiumdelen, med hjälp av de produkter som bildats genom fotosyntes. Efter celledningen består vedcellens livscykel av celltillväxt, förtjockning av cellväggen, lignifiering och slutligen celledöd. (Willför, et al., 2011)

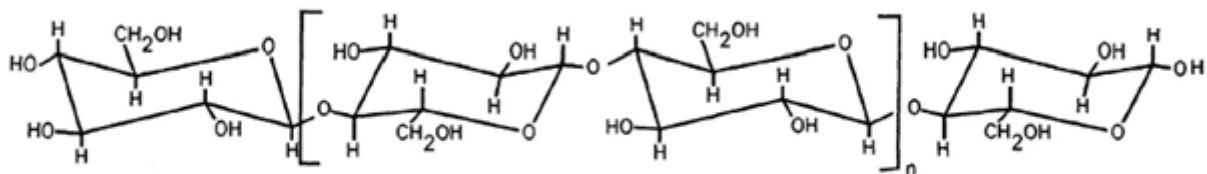
Vedcellens cellvägg kan delas in i två huvudsakliga lager: primärvägg även kallat P-lager och sekundärvägg även kallat S-lager. Ytterligare kan sekundärväggen delas in i delskikt. I figur 1 illustreras ett typiskt schema för cellväggsindelningen i ved. Skikten skiljer sig från varandra både strukturmässigt och i kemiskkomposition. Mellan vedcellerna finns mittlamellen (ML) vars uppgift är att binda ihop cellerna. I den yttre delen av tunna P-lagret bildar cellulosaibrillerna ett oregelbundet nätverk. I det inre skiktet är mikroibrillerna mer eller mindre vinkelräta mot cellaxeln. I S1-skiktet korsar mikroibrillerna varandra. S2-skiktet avgör till stor del cellväggens tjocklek, med andra ord beror cellväggens tjocklek på S2-skiktet medan S1 och S3-skiktet är konstanta. Det här betyder att S2 skiktet bestämmer fiberns fysiska egenskaper. I S3 skiktet sluttar fibrillerna ostrukturerat. (Sjöström, 1993)



Figur 1. Vedcellens uppbyggnad. (Sjöström, 1993)

2.1.1 Cellulosa

Cellulosa är en av de viktigaste polymererna som används och förädlas i dag. Cellulosans polymera delar är ännu inte förstådda till hundra procent. Cellulosa är en homopolysackarid från bland annat ved med en polymerisationsgrad på upp till 10 000 enheter. Cellulosan är uppbyggd av β -D-glukosenheter. I fysiskt format är cellulosa ett vitt fast material som kan uppträda både kristallint och amorph. Cellulosa från trä består 50–70 % av kristallin struktur, vilket ger stadga åt träfibern. Kristallin cellulosa är till viss del resistent mot kemikalieangrepp och nedbrytning. Vätebindningar mellan cellulosakedjor ger materialet dess goda styrka. I figur 2 illustreras cellulosabindningarnas uppbyggnad. (Bajpai, 2018)

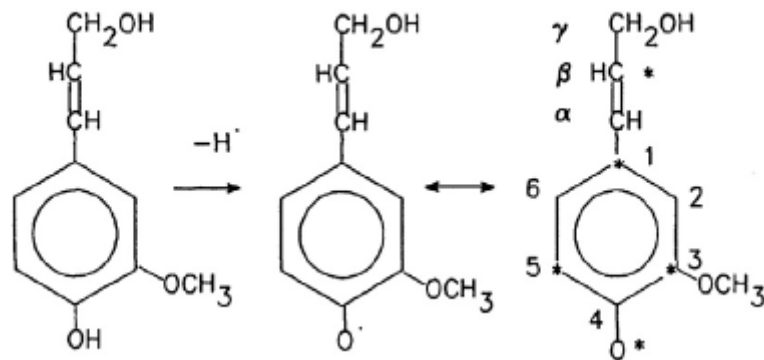


Figur 2. Cellulosakedjan kemiska struktur. (Bajpai, 2018)

2.1.2 Lignin

Lignin är en polymer med en amorf tredimensionell struktur. I trädstrukturen är det ligninet som har den bindande verkan mellan fibrerna. Ligninet finns i hög koncentration i den mittersta lamellen vilket gör att fibern lätt separeras vid massaframställning. Lignin mjuknar upp vid temperaturer kring 130–150 °C. Det finns tre vanliga ligninmonomerer av ligniner, varav två av dessa finns i lövträd medan endast en av de tre hittas i barrved. Lövved innehåller både ferylalkohol och sinapylalkohol medan

barrträd endast består av koniferylalkohol. I figur 3 illustreras hur koniferylalkohol polymeriseras i växtens cellvägg. (Bajpai, 2018)



Figur 3. Första steget av polymerisation av koniferylalkohol i cellväggen. (Bajpai, 2018)

2.1.3 Hemicellulosa

Hemicellulosa är ett samlingsnamn för flera material. Kemiskt är hemicelluloser polyamorösa sockerarter så som mannos, galaktos, glukos, 4-O-metyl-D-glukoronsyra, xylos och arabinos. Hemicelluloser bildas genom kondensationsreaktioner vid polymerisering. Polymerisationsgraden för hemicelluloser är kring 100–200 enheter per hemicellulosamolekyl. Hemicellulosa löses enklare i alkaliska förhållanden än vad cellulosa gör, lösligheten ökar då temperaturen ökar. Vid sulfatmassakok är hemicelluloser lösliga i viss mån. (Bajpai, 2018)

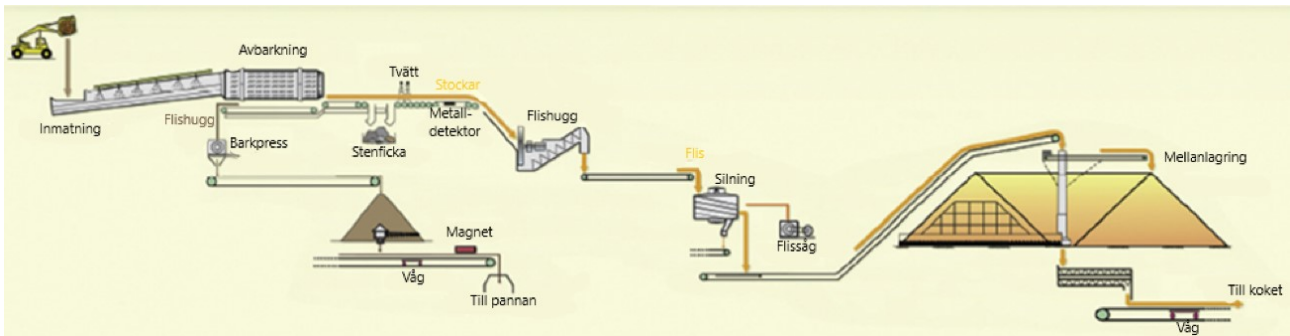
2.1.4 Extraktivämnen

Extraktivämnen är föreningar som är lösliga i vatten eller organiska lösningar. I vedfibrer finns det över 100 olika extraktivämnen. Extraktivämnen påverkar olika vedegenskaper som till exempel färg och odör. Vissa extraktivämnen spelar en större roll för cellulosaindustrin, ett exempel är terpentiner. Terpentiner finns i större mängder i barrträd som till exempel gran. Terpentinerna kan samlas upp vid fabriken och sedan säljas vidare som biprodukt. Terpentiner består av isoprenenheter bundna till fosfater. Ett annat viktigt extraktivämne är triglycerider som under sulfatkok förtvålas och frigör fria fettsyror. (Bajpai, 2018)

2.2 Vedhantering

Träd avverkas i skogen för att sedan transporteras till cellulosa fabriken för förädling. Till fabriken anländer ved både i rundvedsformat och som flis från sågar. Veden måste behandlas före den kan kokas medan flisen bara behöver sållas före kokning. Det första processteget vid en cellulosa fabrik är vedhanteringsavdelningen. I de skandinaviska länderna avbarkas veden vanligtvis i en avbarkningsstrumma. Barken måste avlägsnas från veden eftersom barken innehåller fel typ av fibrer för cellulosa massa. Vid koket löser sig materialet ur barken och transporteras vidare till återvinningen

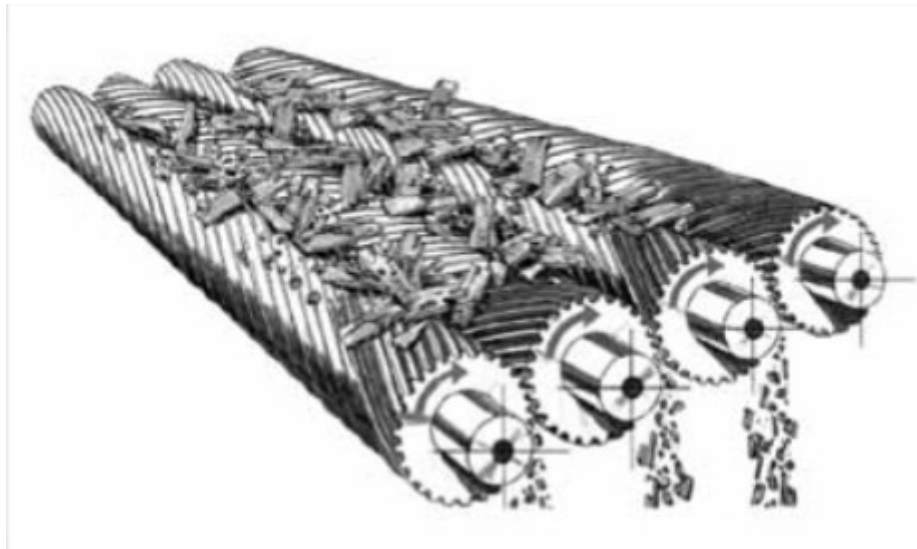
som i så fall belastas i onödan. Barken är en biprodukt som kan användas som bränsle i ett kraftverk. (Bajpai, 2018)



Figur 4. Ett förenklat schema av en vedhanteringslinje. (Bajpai, 2018)

Efter att veden har avbarkats körs den genom en flishugg som hugger veden till flis. För att uppnå ett jämnt kok är det viktigt att ha en jämn fliskvalité. Jämn penetration av vätska in i flisen uppnås med enhetlig flisstorlek. Tjockleken på flisen är den faktor som spelar störst roll vid penetration av kokkemikalier, av naturliga orsaker. Ett ojämnt kok innebär att delignifiering har skett i olika grad i flisen, vilket i sin tur påverkar kokutbytet negativt. För att uppnå önskade dimensioner på flisen matas veden in i huggen med en viss vinkel. Vid kemisk massaframställning med barrträd som råvara är den optimala flislängden 25 ± 3 mm och den optimala flistjockleken 4 mm. För lövträd är den optimala flislängden 20 ± 2 mm och flistjockleken 3 mm. (Willför, et al., 2011)

Flisen transporteras vanligtvis till flissållning efter att den huggits. Vid sållningen sållas oönskade flisbitar bort. Det vill säga överstora bitar, för långa flisbitar och flisbitar som är för små, det vill säga spån. Överstora och långa flisbitar kan leda till ökad mängd rejekt, vilket i sin tur minskar det totala utbytet. Överstora flisbitar blir även snabbt en kostnadsfråga eftersom de tar upp onödig volym i kokkärlet. Även spån gör att kokutbytet minskar när de kokas för snabbt i förhållande till resten av flisen. Sållningen möjliggör att de överstora flisbitarna kan bearbetas på nytt för att uppnå önskad storlek. Spånet som sållas bort kan användas i ett skilt kokeri som är specialbyggt för spån. I figur 5 illustreras ett exempel på en av flera typerns flissållningsapplikationer. (MacLeod, 2007)



Figur 5. Flis som silas genom spårrullar. (Willför, et al., 2011)

2.3 Sulfatmassaframställning

Sulfatmassaframställning även kallat kraftmassa, är den vanligaste metoden för att framställa cellulosamassa i dag. Kraftmassa framställs genom den så kallade sulfatmetoden. I sulfatmetoden används natriumhydroxid och natriumsulfid som kokkemikalier. Sulfatkoket sker i en basisk miljö med pH-värde över 12 och temperaturer mellan 150–180 °C (Gustafsson, et al., 2011). Sulfatprocessen fungerar på alla träsorter. Barkrester bryts ned i processen och metoden har även en effektiv återvinning av kemikalier och energi. Viktiga variabler vid sulfatmassaframställning är träslag och flisform, andelen effektivalkali i förhållande till flisvikt, koncentrationen av effektivalkali, vätske-vedförhållandet, sulfiditet och H-faktorn. (Biermann, 1996)

2.3.1 Sulfatkokets variabler

För att beskriva koken och mellanprodukten som transporteras vidare till efterföljande processteg behövs ett antal termer och variabler definieras. För att beskriva temperatur och tid med en enda variabel har H-faktorn uppkommit. H-faktorn indikerar hur långt kokreaktionen har framskridit vid olika temperaturer, beroende av tid. En förutsättning för H-faktorn är att aktiva alkaliteten, sulfiditeten och lut-flis förhållandet hålls konstant. (Biermann, 1996)

I sulfatmassaframställning används lut som kokkemikalie. Lut kan delas in i vitlut, svartlut och grönlut. Vitlut är den färska luten som används i koket. Vitluten består till största delen av NaOH och Na₂S, men även av mindre mängder Na₂CO₃ (en rest från återvinningsprocessen), oxiderade svavelprodukter och slutligen orenheter som härstammar från veden. Svartlut däremot, är en restprodukt efter massakoket. Svartlut innehåller oorganiska element samt nedbrutna och upplösta ämnen från veden. På ett ton producerad cellulosa produceras sju ton svartlut med en torrhalt på 15 % och med ett ungefärligt värmevärde på 13,5–14,5 MJ/kg. Svartluten förbränns i en återvinningspanna, men före svartluten förbränns måste den indunstas till en torrsubstans på minst

65–70 %. Nu för tiden indunstas svartluten till och med över 80 % (Parviainen, et al., 2008). Under återvinningsprocessen bildas en mellanprodukt av vatten och oorganiskt material som kallas grönlut. Grönluten bildas när smältan från återvinningspannan löses i vatten. Grönlut behandlas sedan för att återskapa vitlut. Dessutom finns även andra kemikalier som inte deltar aktivt i kokprocessen men som kan ackumuleras i systemet, som till exempel NaCl. (Bajpai, 2018)

Alkalidosen bestäms för att nå önskad kappa efter koket och dosen är beroende av trädsort (Gustafsson, et al., 2011). Totala alkaliteten beskriver summan av alla salter i luten som bidrar till det som kan konverteras till aktivt alkali. Totala alkaliteten består av NaOH, Na₂S, Na₂CO₃ och Na₂S_xO_y. Titrerbart alkali är summan av alla baser i vitluten som kan titreras med syra. Aktivt alkali är de aktiva kemikalierna i massakoket, det vill säga NaOH och Na₂S. Storleksordningen för aktivt alkali är kring 100 g/l, en mängd som varierar vid olika fabriker. Effektivt alkali är andelen kemikalier som faktiskt kommer att producera alkali i koket. Effektivt alkali (EA) beräknas med ekvation 1. I ekvation 1 står n för ämnesmängd. Sulfiditet beskriver förhållandet mellan Na₂S och aktivt alkali. Om sulfiditeten är för låg kan den relativa ligninandelen i massan bli för hög och då bryts kolhydrater ner, som i sin tur leder till en massa med sämre styrka. Kaustiseringseffektivitet är ett mått på hur effektivt återvinningspannan arbetar. Kaustiseringseffektivitet mäts som förhållandet av NaOH mot NaOH och Na₂CO₃. En sista term som beskriver koket är restalkali. Restalkali är andelen effektivalkali som ännu är kvar efter koket. Restalkalin avgör lutens pH-värde efter koket. (Bajpai, 2018)

$$EA = n_{\text{NaOH}} + 0,5n_{\text{Na}_2\text{S}} \quad (1)$$

2.3.2 Sulfatmassakoket

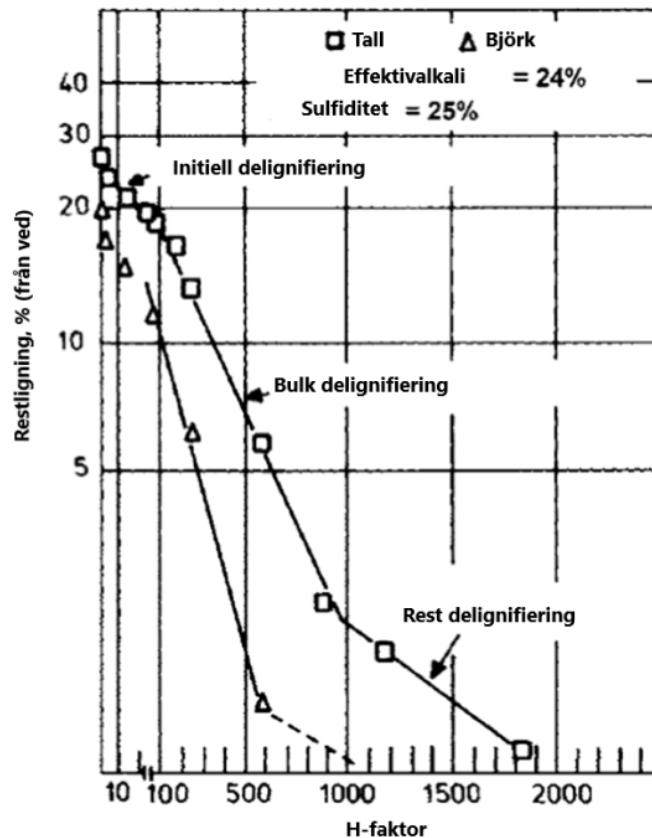
I det första steget i sulfatprocessen transporteras flis till endera en trycksatt kokreaktor eller ett impregneringskärl. För att avlägsna en så stor mängd luft som möjligt ur flisen behandlas den med ånga före kokning. Efter detta fylls kärlet med varmlut med en temperatur på ca 80–100 °C. Varmluten är en blandning av vitlut och återanvänt svartlut från tidigare kok. I detta skede värms innehållet vanligtvis upp till en temperatur mellan 150–170 °C, endera med hjälp av direkt ånga eller indirekt med en lut-ångvärmeväxlare. De aktiva komponenterna i kokkemikalierna är OH- och HS-joner. För att uppnå en mer homogen delignifiering cirkuleras luten i kokaren. Koktemperaturen hålls konstant tills önskad delignifieringsgrad uppnås. När önskad delignifieringsgrad har uppnåtts töms kokaren. Under koket bildas volatila komponenter som släpps ut från kokkärlet för att kontrollera koktrycket. Gaserna som släpps ut kondenseras och de volatila komponenterna återvinns, som till exempel terpentin. Cellulosamassan förs till en uppsamlingscistern var efter massan renas och lösta flisbitar och kvistnötter separeras. (Gustafsson, et al., 2011)

2.3.3 Delignifierings faser

I kraftkok utsätts ligninet för olika reaktioner, reaktionerna kan delas in i nedbrytningsreaktioner och kondensationsreaktioner. Nedbrytningsreaktionerna är fördelaktiga i processen, eftersom de bryter

ner ligninet genom frigöring av lignindelar. Den vanligaste typen av nedbrytning involverar nedbrytningsreaktioner av aryl-eter-bindningar där också närliggande grupper deltar. Det är antalet av en viss typ av bindning i ligninmolekylen och hur pass reaktiv den är med kokkemikalierna som avgör degrationsprocessens hastighet. I motsats till nedbrytningsreaktionerna är kondensationsreaktionerna ofördelaktiga i kraftmassaframställning. Kondensationsreaktioner av lignin skapar nya bindningar som är stabila mot alkali. I koket är huvudmålet att avlägsna ligninet ur flisen och av den orsaken mäts koket genom delignifieringshastighet, samt vilka typer av ligninreaktioner som inträffar. Inom sulfatprocessen kan ligninreaktionerna delas in i de treföljande faserna: initialdelignifiering, bulkdelignifiering och restdelignifiering. (Gustafsson, et al., 2011)

Den initiala delignifieringen äger rum före den egentliga koktemperaturen har uppnåtts, det vill säga vid en temperatur under 150 °C. Den här fasen är en process som sker genom diffusion. Endast 20–25 % av ligninet löses upp under den initiala delignifieringsfasen. Kolhydrater bryts ner i viss mån i processen eftersom fasen inte är selektiv. I den efterföljandefasen, d.v.s. bulkfasen, ökar delignifieringshastigheten avsevärt och då koktemperaturen överstiger 150 °C minskar också nedbrytningen av kolhydrater. Ungefär 70–80 % av ligninet bryts ner under bulkfasen. Nedbrytningen börjar i cellväggens S2-lager och fortsätter sedan mot mittlamellen. Bulkfasen är beroende av temperaturen men även av koncentrationen av OH⁻ och HS⁻ joner. Ju högre koncentrationerna är, desto högre är delignifieringshastigheten. Restfasen fortsätter efter bulkfasen, då är ungefär 3–5 % av ligninet kvar. Restfasen är den långsammaste fasen. För att ligninet inte ska utsättas för kondensationsreaktioner måste det ännu finnas kvar oanvänt alkali som kallas restalkali. Ungefär 5–15 g/l anses vara en bra nivå restalkali. Eftersom restdelignifieringsfasen sker långsamt, ökar risken för att kolhydrater bryts ner. Det kvarvarande ligninet efter restfasen avlägsnas sedan i syrgasdelignifieringsskedet och blekstegen. I figur 6 visas de olika delignifieringsfaserna mot H-faktorn för lövträd och barrträd. (Gustafsson, et al., 2011)



Figur 6. Restlignin som funktion av H-faktorn. (Gustafsson, et al., 2011)

2.4 Kokmetoder

För sulfatmassaframställning finns det tre olika kokmetoder, varav två är vanligare. De två vanligaste kokteknologierna är satskokning och kontinuerligkokning. Den tredje och mer ovanliga kokteknologin är bältkokare. Orsaken till att användningen av bältkokare inte är lika utbredd är deras begränsade kapacitet. Bältkokare används vanligen vid spånkokning. Satskokning kan dessutom delas in i vanlig satskokning och förträgnings-satskokning. Vanlig satskokning är mer ovanlig nu för tiden på grund av att metoden medför en hög energikonsumtion. Även den kontinuerliga kokmetoden har utvecklats under årens lopp och flera typer av modifikationer existerar. (Gustafsson, et al., 2011)

2.4.1 Förträgningskokning

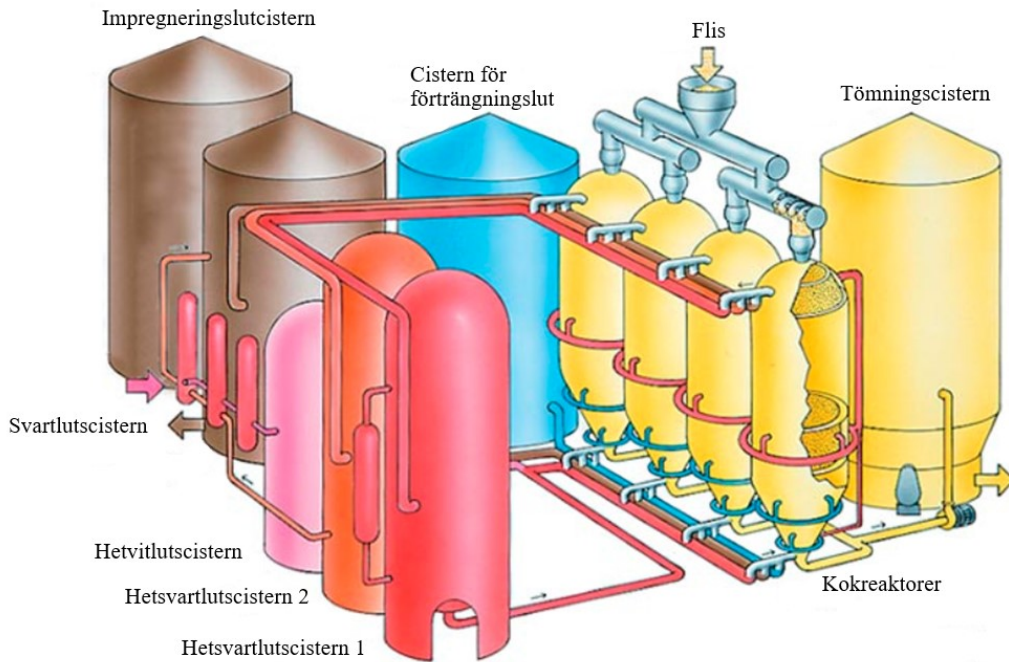
Satskokare används vanligtvis i en serie med flera enskilda kokreaktorer. Kokreaktorn är ett cylindriskt tryckkärl med en trycktålighet upp till ungefär 15 bar. I satskokarkärnen matas flis in från toppen och kokad massa töms från botten. Luten värms genom cirkulation genom en värmväxlare och på grund av den här orsaken finns det ofta en sikt installerat i kokarkärlets nedre del. Den uppvärmda luten pumpas sedan in i kokarkärlets övre del. Cirkulation av uppvärmd lut är nödvändig för att få ett så jämnt kok som möjligt. I kokarkärlets cirkulationssystem finns ett avgasningssystem där luft och volatila gaser avlägsnas under kokarfyllningen. För vanliga satskokarkärl är en volym på 60–300 m³ vanlig, medan förträgnings kokkärl kan ha en volym över 400 m³. Vanligtvis består ett

satskokeri av fyra eller flera kokarkär. Antalet kokarkär beror på fabriken produktionskapacitet. Trots att satskokning av naturliga orsaker inte har ett kontinuerligt flöde så uppnås ett kontinuerligt flöde från satskokeriet med hjälp av sekvenserade skeden av kokprocessen, så att alla kokarkär är i olika skeden vid given tidpunkt. Vid flisfyllningen används ånga för att packa flisen i kokarkäret till en högre bulkdensitet. Vid vanlig satskokning används ånga även till att förvärma flisen. I förträgningskok är det den första lutfyllningsfasen som förvärmer flisen. Det här skedet kallas för impregneringsfasen, varm svartlut med en temperatur på ungefär 100 °C pumpas in i kokarkäret som både värmer flisen och förtränger luften. (Gustafsson, et al., 2011)

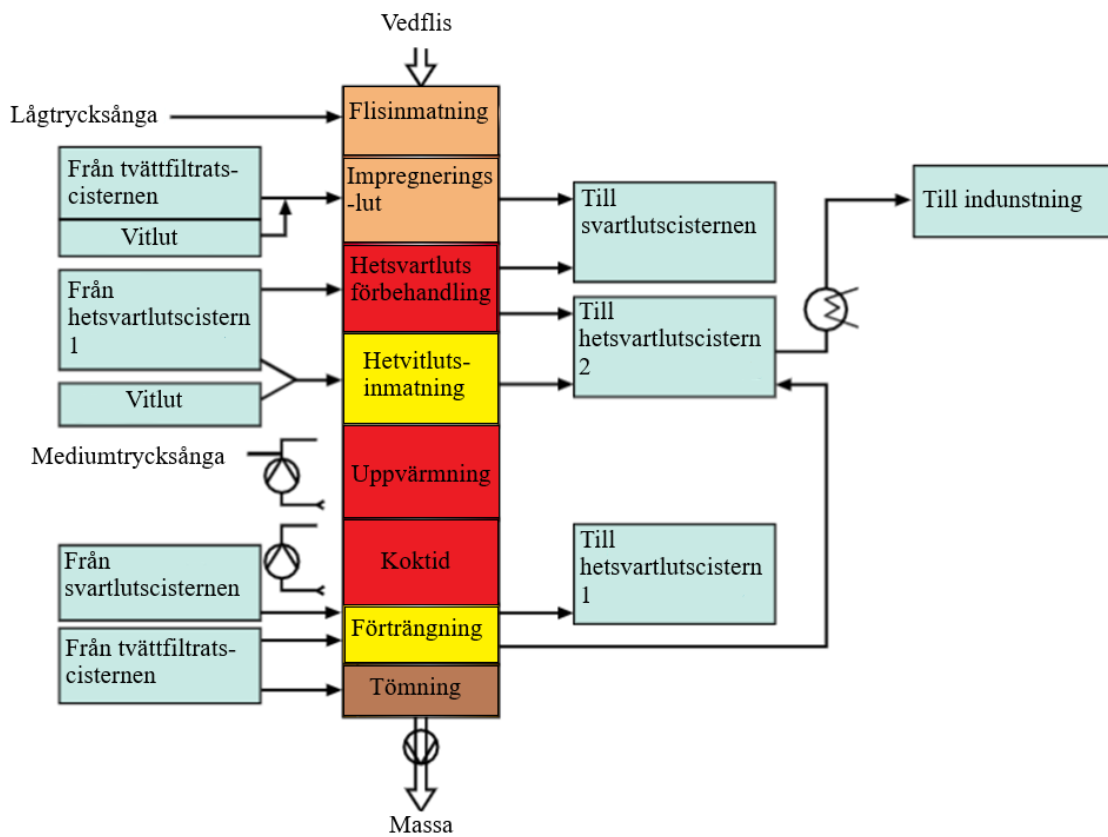
Efter impregneringsfasen påbörjas hetlutsfyllningen. Vid hetlutsfyllningen förträngs luten som använts i impregneringsfasen med het svartlut från tidigare kok. Den heta svartluten har en temperatur på ungefär 140–160 °C. Luten som förträngs av den heta svartluten tas till vara för användas i senare skede i K-modellens SuperBatch-förträgningsfas. Samtidigt som den heta svartluten pumpas in, pumpas även het vitlut in. Efter att kokarkäret fyllts med het lut påbörjas uppkörningsfasen. Vid uppkörningsfasen körs endera direkt ånga in i kokreaktorn eller så värms kokluten via en värmeväxlare. Då önskad koktemperatur uppnåtts påbörjas kokfasen. Kokfasen pågår ända tills önskad H-faktor uppnåtts. Då kokfasen är färdig påbörjas en förträgningsfas där den heta kokluten förträngs av förträgningslut till hetluts-cistern 1. Det här skedet kyler även massan, vilket betyder att då svalare lut kommer ut ur kokreaktorn leds luten till hetluts-ackumulator 2, varifrån lut transporteras till återvinningen i K-modellens SuperBatch-kokeri. Efter att förträgningsfasen har avslutats påbörjas tömningsfasen. Massa pumpas ut från kokarkäret. För att uppnå en kontrollerad tömning behöver massan ha en viss torrhalt. Massan späds ut i kokarkäret under tömning. I figur 7 visas en grafisk bild av ett satskokeri med fyra kokarkärsheter. (Gustafsson, et al., 2011)

2.4.2 SuperBatch®-K

I början av 2000-talet introducerades SuperBatch-K-modellen som är en teknisk lösning för att hantera kalciumproblem vid industningen. Under koket frigörs kalcium från flisen till luten vilket ledde till att den tidigare modellen av SuperBatch-kokeri överförde lut som innehöll kalcium till industningen. Kalciummolekylerna bildar kalciumkarbonater vid uppvärmning som sedan bildar ett skikt i induststareffekterna. I SuperBatch K-modellen hettas den svaga svartluten upp med hjälp av värme från koken vilket avaktiverar kalcium. I figur 8 visas ett flödesschema på ett SuperBatch-kokeri av K-modellen. (Gustafsson, et al., 2011)



Figur 7. Förträgnings satskokeriets uppbyggnad. (KnowPulp, 2021)



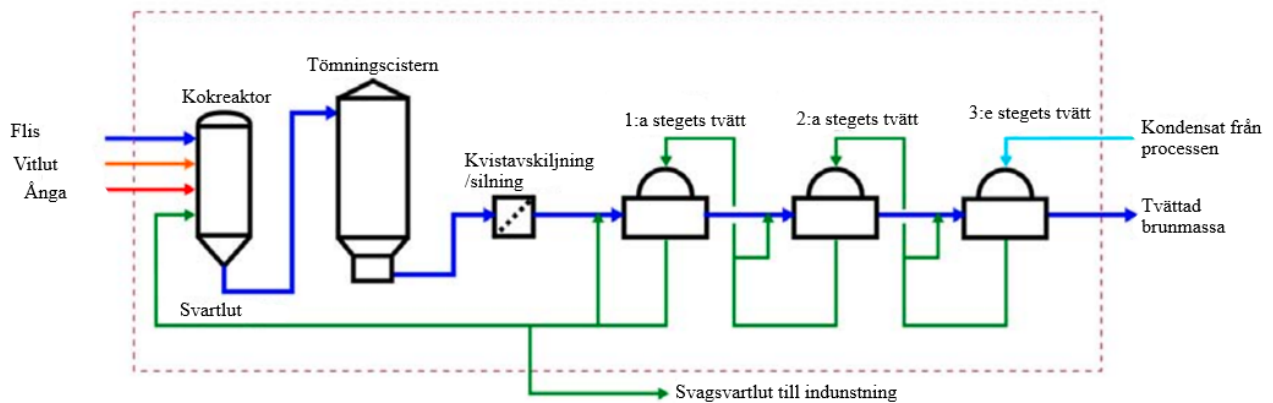
Figur 8. Flödesschema på ett K-modellens SuperBatch-kokeri. (Gustafsson, et al., 2011)

3 Bruntvätt

Bruntvätt inom sulfatmassaframställning fungerar i dagens läge mycket effektivt eftersom den av både ekonomiska och miljötekniska skäl har utvecklats till den nivå den är idag. Kemikalierna som används vid sulfatmassaframställning är avsevärt dyrare än kemikalierna som tidigare använts vid sulfatmassaframställning. En effektiv brunmassatvätt uppkom för att möjliggöra kemikalieåtervinning från tvättfiltraten, som även kallas tvättlut. Effektiv kemikalieåtervinning är en förutsättning för att sulfatmassaframställningen ska kunna vara ekonomiskt lönsamt. Tidigare var det främst de ekonomiska orsakerna som gjorde bruntvätten till ett intressant område men idag är det även miljötekniska frågor som intresserar. Bruntvätten påverkar även massablekningen. Vid en välfungerande bruntvätt behövs en mindre mängd blekkemikalier, vilket i sin tur minskar blekningskostnaderna. Med effektiv bruntvätt påverkas blekeriutsläppens kemiska syrebehov (COD) och biologiska syrebehov (BOD). Även cellulosaamassans kvalitet påverkas av bruntvätten, d.v.s. vid en väl fungerande bruntvätt är också massan av bättre kvalitet. Bruntvätten kan mer eller mindre sägas påverka hela fabriken. (Santos & Hart , 2014)

3.1 Bruntvättens funktionsprinciper

Bruntvätten är en komplex och dynamisk process. För att analysera och identifiera hur bruntvätten fungerar måste materialbalanser användas. Bruntvätten påverkar främst återvinning av organiskt och oorganiskt material samt avlägsnande av oönskade material. Vikten av att återvinna kemikalier baserade på oorganiska material stor. Ungefär 96–99 % av kokkemikalierna återvinns i en modern sulfatmassafabrik. Även avlägsnandet av organiska material är viktigt. Då upplöst organiskt material såsom lignin och kolhydrater tvättas bort i bruntvätten minskar driftkostnaderna i efterföljande processteg. Bland annat förbrukar lignin syre i syrgasblekningen. Ju mer lignin som avlägsnas från cellulosaamassan i bruntvätten, desto lägre är kemikaliekostnader för blekningen. Mindre lignin betyder också en minskad belastning på vattenrengöringen. Ytterligare är det viktigt att avlägsna oönskade material såsom vissa metaller, beck och träextraktivämen. Dessa komponenter kan ha stor inverkan på efterföljande processteg och även påverka slutprodukten negativt. I figur 9 visas ett exempel på en generell bruntvätt. (Santos & Hart , 2014)



Figur 9. Ett generellt och förenklat flödesschema av ett bruntvättssystem (Cantrell, 2019) egen modifiering och översättning.

3.1.1 Förträngningstvättning

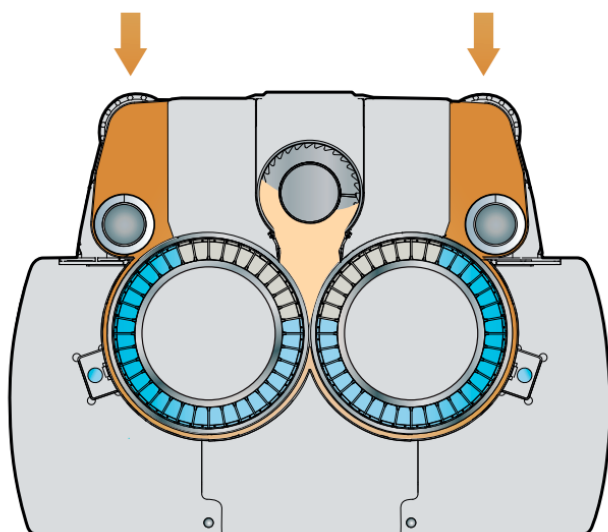
Cellulosamassan tvättas genom fyra mekanismer: förträngning, utspädning, extraktion och diffusion. Förträngningstvättning innebär att den renare vätskan förtränger den smutsigare vätskefasen i massan. Förträngningen baserar sig på tryckskillnader och den renare vätskan tränger bort ungefär lika stor volym smutsig vätska från massans vätskefas. I trycksatta tvättar och tvättar som drivs med vakuum uppstår tryckskillnaden genom högre tryck av tvättvattnet som sprutas på massan eller vakuemet under fibermattan. På grund av att ojämnheter i fibermattan som luftbubblor är förträngningstvättning ojämn. Av samma orsak krävs det flera tvättsteg vid förträngningstvättning för att komma upp till en tvätteffektivitet på 80 %. Förträngningstvättning minskar avsevärt upplösta material i massan utan att påverka massans torrhalt. I stort sett förträngs samma mängd vätska som tillsätts, men en avvikelse kan uppkomma om tvättvätskan kanaliseras genom fibermattan. Idealt skulle inget av tvättvattnet föras över till filtratet vid förträngning. (Santos & Hart , 2014)



Figur 10. Andritz DD-tvätt fungerar bland annat genom förträngningstvättning. (Andritz, 2021)

3.1.2 Utspädnings- och extraktionstvättning

Utspädning och extraktion är egentligen två olika typer av tvättmetoder. Trots det är de två tvättmetoderna tätt sammankopplade och följaktligen fungerar dessa mycket bra tillsammans. När utspädnings- och extraktionstvättning används samtidigt innebär det att massan först späds ut med en renare vätska och därefter sker en dränering av massan. Den här kombinationen av tvättning utgör den äldsta metoden. Den totala mängden upplöst material minskar inte i utspädningskedet, i själva verket kan utspädningen innebära att den totala mängden löst material ökar i systemet. Samtidigt ökar även den totala volymen av suspensionen som ska tvättas. Det väsentliga med utspädning är att koncentrationen av löst material minskar i systemet. I extraktionsskedet dräneras fibersuspensionen. Det här resulterar i att volymen minskar och massans torrhalt ökar, dock hålls koncentrationen av upplöstmaterial i vätskan konstant under extraktionen. Det som sker är att vätskan förs bort och suspensionens totala mängd upplöstmaterial minskar. Effektiviteten av extraktionen är beroende av massans ingående och utgående torrhalter. Ett exempel på extraktionstvättning är tvättpressar, de kan arbeta under förhållanden med låg torrhalt på massan och samtidigt åstadkomma en hög tvätteffektivitet. Tvättpressar fungerar bra i tidiga skeden i bruntvätten eftersom de kan avlägsna inkapslad luft från massan, vilket i sin tur leder till att efterföljande steg förbättras. I en traditionell urvattmare baseras det första steget på utspädnings- och extraktionstvättning. I figur 11 visas en bild av Valmets TwinRoll Evolution tvättpress. (Santos & Hart , 2014)



Figur 11. Tvärsnittsbild av Valmets TwinRoll Evolution tvättpress. (Valmet , 2014)

3.1.3 Diffusionstvättning

Diffusion är en tvättprincip som grundar sig på koncentrationsskillnader mellan det upplösta fasta materialet i fibern och bulkvätskan. Vid diffusionstvättning tränger renare tvättvätska in i fibern. Att uppnå diffusion och urlakning av upplöst material ur fibern är en tidskrävande process. Kamyrykokare var den första processenhet där diffusion användes som tvättmekanism. I Kamyrykokaren är förhållandena ideala, upp till fyra timmars uppehållstid i en temperatur på uppemot 140 °C. Utspädningsfaktorn är en variabel som också är viktig vid diffusionstvättning. Högre utspädningsfaktor leder till högre tvätteffektivitet eftersom koncentrationen av upplöst material minskar. (Santos & Hart , 2014)

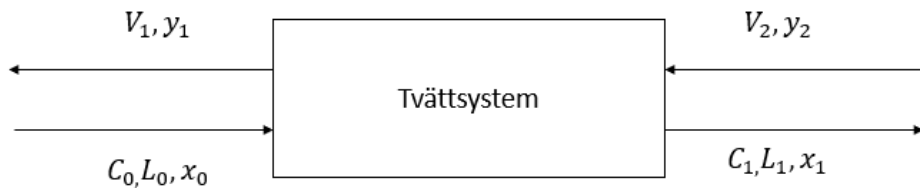
3.2 Balansräkningar och tvätteffektivitetsberäkningar för bruntvätten

Idealsituationen för ett bruntvättssystem är då överflödig svartlut inte blandas med i den tvättade massan och då filtratet från tvättavdelningen inte innehåller fibrer. Det här är så gott som omöjliga kriterier i industriell skala. Det betyder att den mest optimala situationen inom industrin är då så stor mängd som möjligt av svartlutlösningen avlägsnas från massan med en så liten mängd tvättvätska som möjligt. För att mäta och definiera bruntvättens drifttillstånd bör vissa faktorer, parametrar och materialbalanser kännas till. (Kukreja, et al., 1995)

3.2.1 Tvätteffektivitet

Det finns flera olika processmodeller som ofta används för att beskriva tvätteffektiviteten med hjälp av olika prestandaparametrar. Några ofta använda prestandaparametrar är bland annat förträngningsförhållandet (DR), det ekvivalenta förträngningsförhållandet (EDR), Nordéns effektivitetsfaktor (E-faktor), utbyte (Y), effektiviteten vid fixerad utloppstorhalt på massan (C_{st}) och

Nordéns effektivitetsfaktor vid fixerad utloppstorrihalt på massan (E_{st}). De mest använda av dessa är DR-, Y- och E-faktorn. (Tervola, et al., 2011)



V_1	Filtrat från systemet	L_0	Flöde till systemet
y_1	Lösta materialets massfraktion i V_1	x_0	Lösta materialets massfraktion i L_0
V_2	Tvättvätska till systemet	C_1	Utgående konsistens
y_2	Lösta materialets massfraktion i V_2	L_1	Flöde från systemet
C_0	Inkommande konsistens	x_1	Lösta materialets massfraktion i L_1

Figur 12. Schematiserad grundprincip av ett tvättsystem med väsentliga variabler.

De olika effektivitetsfaktorerna kan beräknas med hjälp av variablerna som presenteras i figur 12. Tvättsystemet kan beskrivas med följande flödesbalans som beskrivs i ekvation 2. Balansen kan vidareutvecklas till en massbalans som beskrivs i ekvation 4. Ibland är flödena V_1 och V_2 okända vilket betyder att utspädningsfaktorn DF från ekvation 6 måste användas för att eliminera termerna, enligt ekvation 6. (Tervola & Gullichsen, 2007)

$$L_0 + V_2 = L_1 + V_1. \quad (2)$$

Flödet till systemet kan allmänt beräknas enligt formel 3, endera som inkommande- eller utgåendeflöde. Flödet till systemet anges i effektivitetssammanhang vanligtvis som $[m^3/ODt]$.

$$L = \frac{100 - C_0}{C_0}, \quad (3)$$

$$L_0 x_0 + V_2 y_2 = L_1 x_1 + V_1 y_1. \quad (4)$$

Utspädningsfaktorn är också en term som ofta används för att beskriva ett tvättsystem. Utspädningsfaktorn (DF) beräknas enligt ekvation 5. Ifall tvättvätskeflödet till systemet är okänt kan ekvationen utvecklas till ekvation 7 från balansen i ekvation 6. (Tervola & Gullichsen, 2007)

$$DF = V_1 - L_0 = V_2 - L_1, \quad (5)$$

$$L_0 x_0 + (L_1 + DF) y_2 = L_1 x_1 + (L_0 + DF) y_1, \quad (6)$$

$$DF = \frac{L_1(x_1 - y_2) + L_0(y_1 - x_0)}{y_2 - y_1}. \quad (7)$$

Förträngningsförhållandet kan beräknas enligt ekvation 8. Förträngningsförhållandet påverkas av utspädningsfaktorn, den inkommande torrhalten och utgående torrhalten på massan. (Tervola, et al., 2011)

$$DR = \frac{x_0 - x_1}{x_0 - y_2}. \quad (8)$$

Ekvation 9 beskriver utbytet i ett allmänt tvättsystem.

$$Y = 1 - \frac{L_1(x_1 - y_2)}{L_0(x_0 - y_2)} = \frac{V_1(y - y_2)}{L_0(x_0 - y_2)}. \quad (9)$$

Utbytet påverkas av massan inlopps- och utloppstorhalter. Vid jämförelse av utbyte för olika tvättar måste det beaktas. EDR utvecklades för att enklare kunna jämföra olika tvättar. I EDR jämförs den aktuella tvätten med en hypotetisk tvätt som arbetar med 1 procents inkommande torrhalt på massan och en 12 procents utgående massatorrhalt. Ekvation 10 beskriver det ekvivalenta förträngningsförhållandet, DCF, ICF beräknas med ekvationerna 11a och 11b. (Kukreja, et al., 1995)

$$EDR = 1 - (1 - DR)(DCF)(ICF), \quad (10)$$

$$DCF = \frac{L_1}{7,333}, \quad (11a)$$

$$ICF = 99,0 \frac{L_0 + DF}{L_0(99,0 + DF) - L_1(99,0 - L_0)(1 - DR)}, \quad (11b)$$

Undantagsvis kan ICF för en tvätt fungera enligt utspädnings-avvattningsprincipen beräknas enligt ekvation 11c. (Kukreja, et al., 1995)

$$ICF = \frac{99,0}{99,0 + L_1 + DF}. \quad (11c)$$

Nordéns effektivitetsfaktor beskriver det ideala antalet motströms utspädningssteg i ett tvättsystem. Ett steg med utspädning innebär att fibersuspensionen blandas med tvättvätska och koncentrationen jämnas ut. Nordéns faktor ger en effektivitet för ett tvättsystem utan att beakta vilken typ av tvättning det handlar om, det här gäller även de andra uppräknade metoderna som beskriver tvätteffektiveten. Ekvation 12 beskriver Nordéns tvätteffektivitet (E). (Tervola & Gullichsen, 2007)

$$E = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{L_0(x_0 - y_1)}{L_1(x_1 - y_2)}\right)}{\ln\left(1 + \frac{DF}{L_1}\right)}, V_2 \neq L_1 \\ \frac{L_1(y_1 - y_2)}{L_0(x_0 - y_1)}, V_2 = L_1 \end{cases}. \quad (12)$$

I ekvation 12 är $1 + DF/L_1 = V_2/L_1$ och $E = \infty$ innebär pluggflöde medan $E = 1$ betyder idealomblandning (Tervola, et al., 2011). E-faktorn påverkas av fibertyp, tvättbelastning, systemets position i tvättlinjen, tvättens mekaniska skick, driftsläge, ingående och utgående temperaturer, luft i massan, såpa och andra faktorer som påverkar tvättegenskaperna. Då E-faktorn beräknas för ett

bruntvättssystem eller syrgastvättsteg används vanligtvis upplöst material eller salt för att representera det upplösta materialets massfraktioner, till exempel kan COD mätas. E-faktorn är känslig för massans inlopps- och utloppstorrhalt, vilket gör att även E-faktorn är svår att jämföra mellan olika system. Av den orsaken har E_{10} -faktorn och E_{st} -faktorn utvecklats. E_{st} -faktorn har en standardiserad utloppstorrhalt på massan från tvättssystemet, vilket betyder att E_{10} har en utloppstorrhalt på 10 %. E_{st} -faktorn beräknas enligt ekvation 13.

$$E_{st} = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{L_0(x_0-y_1)}{L_1(x_1-y_2)}\right)}{\ln\left(1+\frac{DF}{L_{st}}\right)}, DF \neq 0 \\ \frac{L_{st}(y_1-y_2)}{L_0(x_0-y_1)}, DF = 0 \end{cases} \quad (13)$$

I ekvation 13 används L_{st} som beräknas enligt ekvation 14. I Ekvation 14 används C_{st} , som är standard utloppstorrhalt på massan. C_{st} kan anta olika värden, till exempel $C_{12} = 12\%$, som i sin tur ger E_{12} -faktorn. (Tervola & Gullichsen, 2007)

$$L_{st} = \frac{100-C_{st}}{C_{st}} \quad (14)$$

3.2.2 Tvättparametrar och variabler

För att manövrera en tvättavdelning behövs parametrar och variabler som kan justeras för att uppnå resultat som ger en önskad mellanprodukt. Några viktiga variabler att beakta i ett tvättssystem är bland annat massans inloppstorrhalt, trummans rotationshastighet, inkapslad luft i massan eller tvättvätskan, utspädningsfaktor, distribuering av tvättvätska och dess temperatur samt massans utloppstorrhalt. (Santos & Hart, 2014)

I tvättar som arbetar enligt utspädnings- och extraktionsprincipen är massans inloppstorrhalt en viktig variabel. Inloppstorrhalten påverkar fibermattans egenskaper. Till exempel är en bra inloppstorrhalt för urvattnare ungefär 1–1,5 %. Massans torrhalt kan vara högre, men det leder till ett sämre tvättresultat. Den högsta tvätteffektiviteten uppnås kring en massatorrhalt på 1,5 %. En låg inloppstorrhalt på massan gör att massan fördelas enhetligt i tvätten vilket resulterar i att tvättvätskan förträngs jämnt genom massan. Vid lägre massatorrhalt avlägsnas också upplöst fast material ur massan mer effektivt. Massan bör spädas ut effektivt redan före inloppslådan. Vid T-koppling av massarörinjen och utspädningsrörinjen blandas massan och utspädningsvätskan effektivt eftersom ett turbulent flöde uppkommer. I motsats till T-kopplingar fungerar rör som Y-kopplings sämre för att uppnå bra blandning. Den negativa aspekten med låg inloppstorrhalt på massan är att produktionshastigheten är lägre, det vill säga om torrhalten ökar, ökar även produktionen på bekostnad av tvättkvaliteten. Massans utloppstorrhalt inverkar också på tvättssystemet. Högre utloppstorrhalt ger tvättssystemet ett bättre förträngningsförhållande, vilket även betyder bättre kvalitet på tvättningen. Utloppstorrhalten inverkan är högre då torrhalten är låg. Utloppstorrhaltens inverkan avtar vid högre torrhalter än 14 %. (Santos & Hart, 2014)

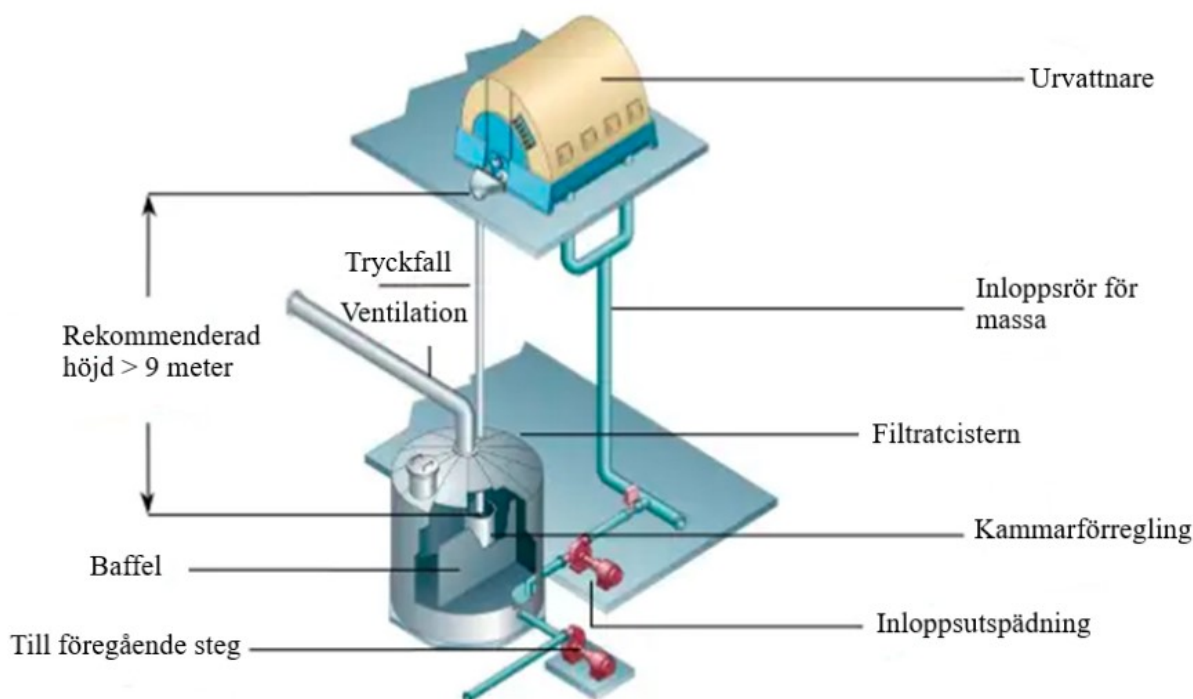
Vid optimering av tvätteffektivitet är trummans rotationshastighet en viktig variabel att beakta. Trummans hastighet borde styras som funktion av endera nivån i tvättens inloppslåda eller av hur fibermattan bildas. Det är fördelaktigt att fibermattan hålls konstant över tvättens tvärriktning för att få en jämnt tvättad massa. Ifall fibermattan är för tjock kommer tvättvätskan inte kunna förtränga all lut inne i fibermattan som uppstår i tvätten. I motsats till en övertjock fibermatta så blir tvätten svårmanövrerad ifall mattan är för tunn. I en tunn fibermatta är motståndet till luftinkapsling litet, vilket betyder att mattan blir så tät att tvättvätskan inte kan tränga in genom den. Om en tvätt använder inloppslådans nivå som styrparameter innebär det att en högre hastighet på trumman leder till lägre nivå i inloppslådan. För att öka produktionen bör tvättrummans rotationshastighet och nivån i inloppslådan ha bästa möjliga proportion. (Santos & Hart , 2014)

Då en högre produktionsnivå i bruntvätten ska uppnås bör inkapslad luft i både luten och massan undvikas. Inkapslad luft kan uppkomma i massan då ytnivån i cisternen före tvätten är låg. Det här leder till ett mer turbulent system. Även konstruktionen av filtrattanken och nivån i den påverkar uppkomsten av inträngd luft i tvättluten. Luftbubblor i fibermattan gör att dräneringsgraden försämras, vilket i sin tur leder till sämre luftförträngning. Luftbubblor i fibermattan beter sig som fast material och fungerar som en plugg, vilket leder till kanalisering av tvättvätska. (Santos & Hart , 2014)

En viktig variabel inom bruntvättning är utspädningsfaktorn (DF). Utspädningsfaktorn anger mängden överflödigt tvättvätska som tillsätts i tvättsystemet. Vid beräkning av materialbalanser och systemets prestanda används utspädningsfaktorn. För att minimera ångbehovet för indunstning av svartlut bör utspädningsfaktorn minimeras. Utspädningsfaktorn anges ofta som kubikmeter per lufttorkat ton massa eller per ugnstorkat ton massa, vanligtvis är intervallet för utspädningsfaktorn 2-4,5 m³/ODt. Idealsituationen för utspädningsfaktorn är att den hålls konstant genom hela tvättsystemet, detta lyckas dock sällan i verkligheten på grund av att rent vatten tillsätts i vissa processteg. Ett negativt värde på utspädningsfaktorn betyder att mer vätska kommer ut ur systemet än det som tillsatts. (Santos & Hart , 2014)

Tvättvätska ska tillsättas jämnt över hela tvättens tvärriktning. Konstruktionen och konfigureringen av duschmunstycket avgör fördelningen och flödes hastigheten av tvättvätska. Till exempel leder färre duschmunstycken till att ett större flöde av tvättlut måste gå genom dem för att uppnå önskad förträngning. Ett annat exempel är konfigureringen av duschmunstycken, fel konfiguration kan leda till att det uppkommer hål i fibermattan, som i sin tur leder till en lägre tvätteffektivitet. Tvättvätskans temperatur har även en betydande påverkan på processen. En högre temperatur på tvättvätskan leder till en lägre viskositet, en lägre viskositet resulterar i bättre diffusion i fibermattan, vilket betyder bättre tvättning. Om tvättluten har för hög temperatur finns det risk för flashing i tryckfallsröret från tvätten. Flashing innebär att partialånga uppkommer då trycket sänks för en vätska då temperaturen

är nära kokpunkten. Ifall flashing förekommer minskar effektiviteten och i värsta fall kan flashing bidra till att tvätten får mekaniska skador. (Santos & Hart , 2014)



Figur 13. Bild på en urvattnare till tryckfallsröret filtratcisternen (Bertini, 2012) översatt och modifierad av skribenten

I vanliga fall är pH-värdet i tvätten en parameter som inte används som styrvariabel. Tvättvätskan från efterföljande tvättsteg avgör pH-värdet. Under alkaliska förhållanden sväller fibern och det leder till sämre dräneringsförhållanden. I alkaliska förhållanden påverkas även tvätten av såpor. Skum bildas och luft kapslas in i fibersuspensionen. Om pH-värdet sänks observeras vanligtvis bättre dränering av massan. Ett antagande till observationen är att natriumfenoxid-såpor konverteras till en protonerad form och då beter sig såporna inte längre som surfaktanter. Förbättrad dränering kan observeras då pH-värdet underskrider 11 och dess påverkan jämnas ut vid ungefär pH 9,5. Om pH-värdet dessutom sjunker under 9,5 påverkas fibrernas dräneringsmotstånd. Vid lägre pH-värden krymper fibrerna som är svullna vid alkaliska förhållanden (Moynihan & Hart, 2017). För att motverka skumning har det visat sig att koldioxid och svavelsyra fungerar bra. Förbättrade dräneringsförhållanden innebär bättre förträngning, som i sin tur innebär en bättre tvätteffektivitet (Sixta, 2006). Som motvikt till bra dräneringsförhållanden vid lågt pH kan nämnas att vid lägre pH-förhållanden faller inte ligninet ur fibern lika lätt. Det har visat sig vara så att ett relativt högt pH-värde bör förekomma för att en signifikant mängd lignin ska urlakas ur fibern. Det vill säga med tanke på att avlägsna lignin är ett högre pH-värde önskvärt. (Smith, et al., 1993)

3.3 Tvättar

Tidigare var urvattnare den vanligaste typen av tvättsystem inom cellulosaindustrin på grund av att de klarar av stora tvättflöden. Nu för tiden existerar flera andra moderna lösningar som uppnår en lika hög effektivitet som urvattnarna har. Vetenskapen, forskningen och utvecklingen av processtyrning har lett till att nya tvättar utvecklats. Exempel på andra tvättsystemen är diffusionstvättar, roterande trycksatta tvättfilter och tvättpressar. Dessa moderna tvättsystem använder sig ofta av en tvättprincip i stor utsträckning samtidigt som de andra tvättprinciperna inte utnyttjas i lika hög grad, vilket leder till bättre tvätteffektivitet. (Ghosh & Hart, 2017)

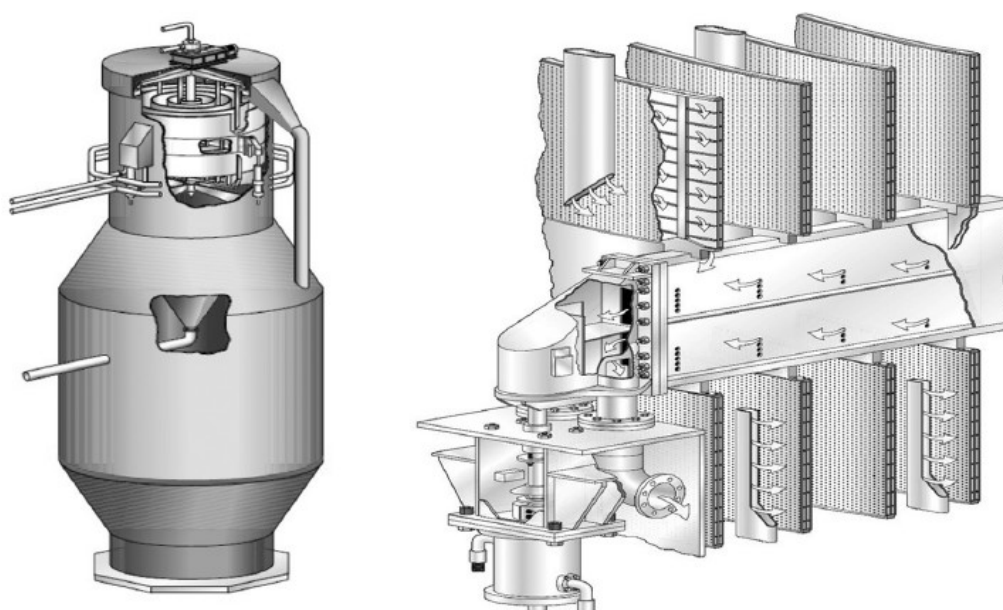
3.3.1 Diffusionstvättsystem

Diffusionstvättsystem utför egentligen den renaste formen av förträngningstvättning av industriella tvättsystem för cellulosa. Trots namnet diffusionstvätt sker diffusionstvättning i obetydlig utsträckning i dessa. Det är i stället förträngning som är den viktiga tvättmekanismen som ger en hög tvätteffektivitet. Diffusionstvättars inlopps- och utloppstorrhalter på massan är ungefär 10 %. Då massans torrhalt hålls konstant genom tvätten betyder det att effektiviteten beror av förträngning av smutsigt filtrat med renare tvättvätska. Diffusionstvättar använder massa med medium torrhalt och kan endera tvätta under atmosfäriska- eller trycksatta förhållanden. Metoden går ut på att en fibermatta bildas på ena sidan av en sikt och på andra sidan av fibermattan tillsätts tvättvätska. Tvättvätskan förträngs genom fibermattan och förtränger samtidigt fibersuspensionens smutsiga vätskefas. I ett motströmsfungerande tvättsystem samlas de smutsiga filtraten upp och förs vidare till föregående tvättsteg i kedjan. I en bruntvätt som fungerar med motströmsprincipen används den renaste tvättvätskan i det sista tvättsteget. Vid det första tvättsteget skickas filtraten vanligtvis till kokeriet för återanvändning och efter det leds svartluten till indunstning för återvinning. (Ghosh & Hart, 2017)

Atmosfäriska diffusörer (AD) är utvecklade för kontinuerliga flöden. Massan kan komma direkt från tömninglinjen till tvätten och sedan till en lagringstank för högdensitetsbrunmassa. Ofta är tvåstegs atmosfäriska diffusörer placerade ovanpå lagringstanken för högdensitetsbrunmassa. Tömningstrycket är tillräckligt högt för att flytta massan till den tvåstegade AD-tvätten och högdensitetscisternen utan att använda en matningspump. Eftersom ingen pump behövs är energiförbrukningen avsevärt mindre än för ett flerstegs trycksatt tvättfilter. Diffusionstvättar kan placeras efter kokaren, syrgasblekning eller blekning. Det är tack vare att tvätten använder medium torrhalt på massan som gör att själva tvätten är liten i storlek och kan placeras vid kokartömningen, vilket minimerar utrymmeskrav. (Ghosh & Hart, 2017)

I AD-tvätten förs massa mellan en sikt och tvättbaffeln. Tvättvätska tillförs från munstycken på tvättbaffeln. Tvättvätskan rör sig radiellt genom systemet och förtränger den smutsigare vätskefasen

i fibersuspensionen. Sikten rör sig hydrauliskt med en högre hastighet än mälden. Siktet rör sig ungefär 50 cm per cykel och 7 cyklar i minuten. Sikten har en konisk konstruktion som gör att vid bakslaget genereras vakuüm vilket leder till att en bakspolning uppkommer. Bakspolningen gör att sikten inte stockas. Bakspolning kan intensifieras med hjälp av en ackumulerande tank. Tvättfiltraten flyttas till tanken under diffusörens rörelse uppåt. Då siktet stannar i övre positionen tvingas filtratet tillbaka till siktet och resulterar i att siktet hålls rent. I diffusören finns också en roterande skavare. Skavaren flyttar tvättad massa till en ring runt siktet och därifrån leds massan till lagringstanken med hjälp av gravitationen. AD-tvättar kan bestå av ett eller två steg. I tvåstegade AD-tvättar har tvättstegen skilda tvättlutstankar och extraktionstankar. Det innebär att två stegs AD-tvättar kan fungera endera med motströmsprincip eller genom delad medströmsprincip. I AD-tvättar är sikten placerade som koncentriska cylindrar. Tvättmunstyckena rör sig roterande mellan cylindrarnas väggar och fördelar tvättluten i massan. Filtratet extraheras genom de koncentriska cylindriska sikten och leds vidare i cylindrarnas nedre del till armarna som håller upp konstruktionen. Armarna stöds i sin tur upp av cylindrarna som för sikten uppåt och neråt. I figur 14 visas en AD-tvätt. (Ghosh & Hart, 2017)



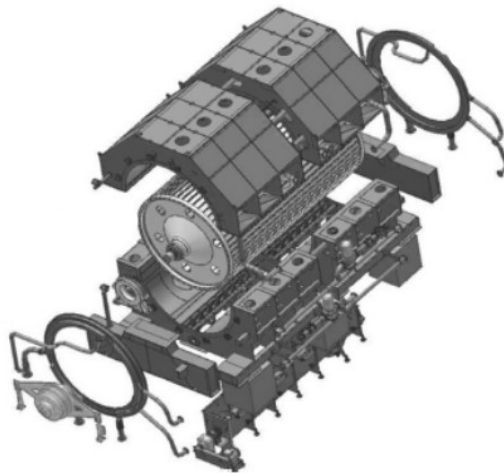
Figur 14. En tvåstegad atmosfärisk diffusör på en lagringstank. Till höger illustreras tvättfiltratens rörelse i sikten. (Ghosh & Hart, 2017)

3.3.2 Trycksatta tvättfilter

Trycksatta tvättfilter påminner om urvattnare. Skillnaden mellan dessa är att i trycksatta tvättfilter tillförs tvättluten trycksatt från munstycken och i en urvattnare sugs filtratet med hjälp av vakuüm i trummans inre delar. Det externa trycket används också för att bilda fibermattan på trumman genom

avvattning. För att tvätten ska vara ordentligt trycksatt är inloppslådan, tvättcyllindern och massatanken under en huva. (Ghosh & Hart, 2017)

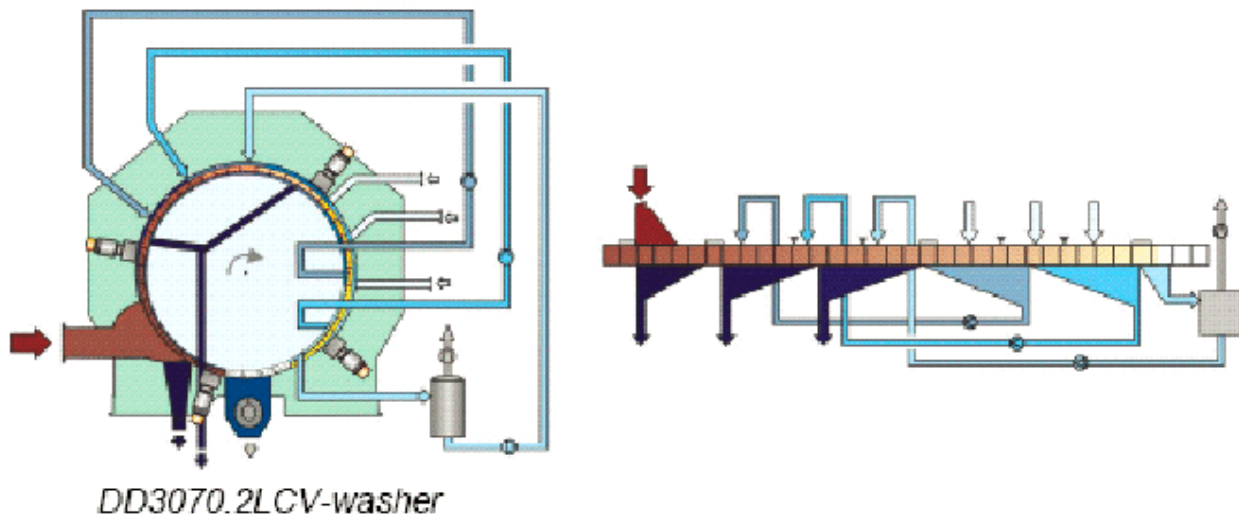
Andritz DD-tvättar är roterande trycksatta trumfilter. DD kommer från engelska drum displacer. DD-tvättar är en lösning för att öka tvätteffektiviteten, samtidigt som kapital-, höga underhålls- och driftskostnader minskar. En DD-tvätt består av ett eller flera tvättsteg i samma trumma. Massans inloppstorrhalt till en DD-tvätt kan vara mellan 5–12 % och samtidigt kan tvätten köras med temperaturer kring 85–95 °C. Det här ger en bättre förträngning då retentionstiden är längre. DD-tvättssystem är hydrauliskt fyllda med tvättvätska, vilket leder till att fibersuspensionen innehåller mindre mängd inkapslad luft jämfört med andra tvättar. I DD-tvättar sker den största delen av tvättningen enligt förträngningsprincipen. Eftersom tvättandet sker i flera steg i den roterande trumman inträffar ingen diffusionstvättning. Ett annat resultat då tvättningen sker i flera steg i DD-tvättar är att flera filtratflöden uppkommer från tvätten. De olika filtratflödena kan hanteras olika eftersom de möjligen har olika torrhaltsnivåer. Till exempel kan filtratet med den högsta torrhalten skickas direkt till indunstning medan filtrat med lägre torrhalt kan ledas till föregående tvätt i bruntvätten. (Ghosh & Hart, 2017)



Figur 15. En DD-tvätts uppbyggnad. (Ghosh & Hart, 2017)

En DD-tvätts konstruktion visas i figur 15. I tvättens inre delar finns trumman som består av stänger i längdriktningen. Massadelens botten består av perforerade plåtar och under dem är filtratutrymmen placerade som leder filtraten till filtratuppsamlingstanken i trummans ände. Massan leds in till en inloppslåda med en torrhalt på 3–11 % med ett övertryck på 0,1–0,6 bar. Från inloppslådan sprids fibersuspensionen jämnt till trummans massadelar. Förseglingsstänger är placerade så att inloppslådan är separerad från förträngningstvättzonen och tömningsdelen. Förseglingsstången på tvättsidan har också uppgiften att skrapa mälden över massafacken så massan alltid är lika fördelad

i facken. I inloppslådan dräneras massan till rätt torrhalt samtidigt som inloppstrycket stabiliseras, vilket är nödvändigt för en hög tvätteffektivitet. Massans torrhalt i tvättskedet ligger mellan 10–15 %. (Ghosh & Hart, 2017)



Figur 16. Flödesschema för tvättvätska i en DD-tvätt. (Wilks, 2010)

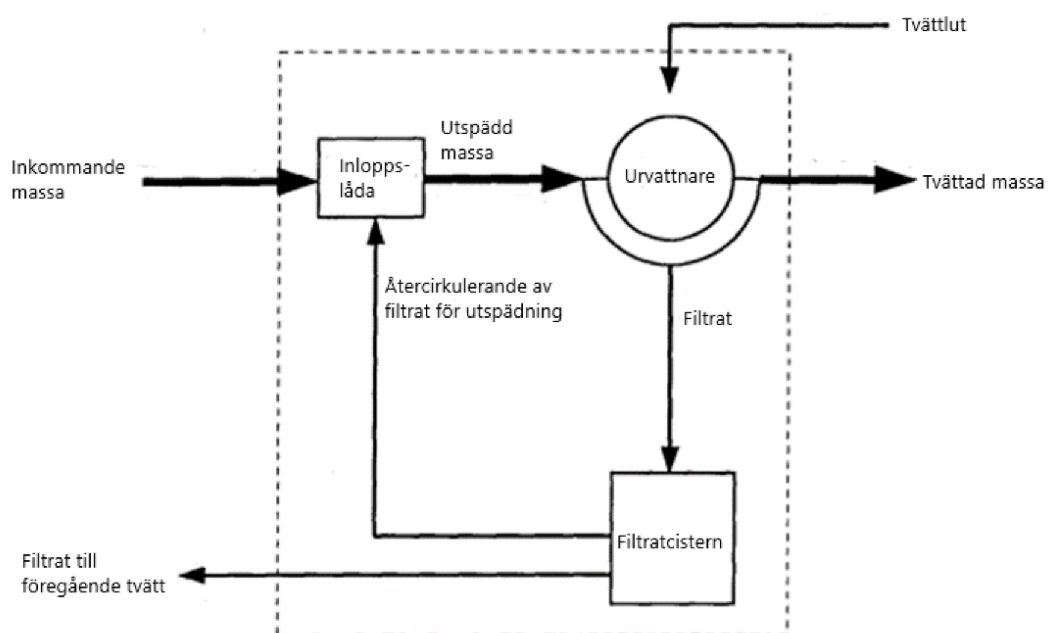
Flerstegs DD-tvättsystem använder sig av motströms tvättprincip. Detta innebär att renare massa tvättas med renare tvättvätska och massan som kommer in i tvätten tvättas med den smutsigaste tvättvätskan. Eftersom DD-tvättar ofta består av flera steg innebär det här att den tvättvätska som körs in i tvätten även återcirkuleras i samma tvätt. I figur 16 visas hur en DD-tvätt med flera steg återcirkulerar tvättvätska och filtrat. Tvättvätskan sprids jämt över tvättzonerna med ett övertryck kring 0,1–1 bar. I förträgningsstättzonerna är massafacken nedsänkta i vätskan. I förträgningskedet förträngs tvättvätskan genom fibermattan till en uppsamlingskammare och från uppsamlingskammaren pumpas vätskan vidare till föregående steg. Sammanfattningsvis påverkas DD-tvättars effektivitet av massans dräneringsegenskaper, inloppstorrhalt, inloppstryck, antalet tvättsteg, utspädningsfaktorn och trummans rotationshastighet. (Ghosh & Hart, 2017)

3.3.3 Urvattnare

Den vanligaste tvätten för cellulosamassa är urvattnare. Före 1960-talet då diffusörer uppfanns fanns egentligen inte många andra alternativ till urvattnarna. På grund av att urvattnarna är väldigt vanliga är det ofta utgående från dem som tvättkoncept beskrivs. I urvattnarna inträffar dessutom alla typer av tvättning. Eftersom fibersuspensionen har en hög temperatur, låg massatorrhalt och

längre residens-tid i den här tvätten förkommer också diffusionstvättning. Samtidigt späds massan ut vilket leder till utspädningstvättning. Då fibermatta bildas på trumman förekommer extraktionstvättning. Förträngningstvättning förekommer också eftersom tvättvätska spolats på fibermattan och förträngs genom mattan. (Hart, 2017)

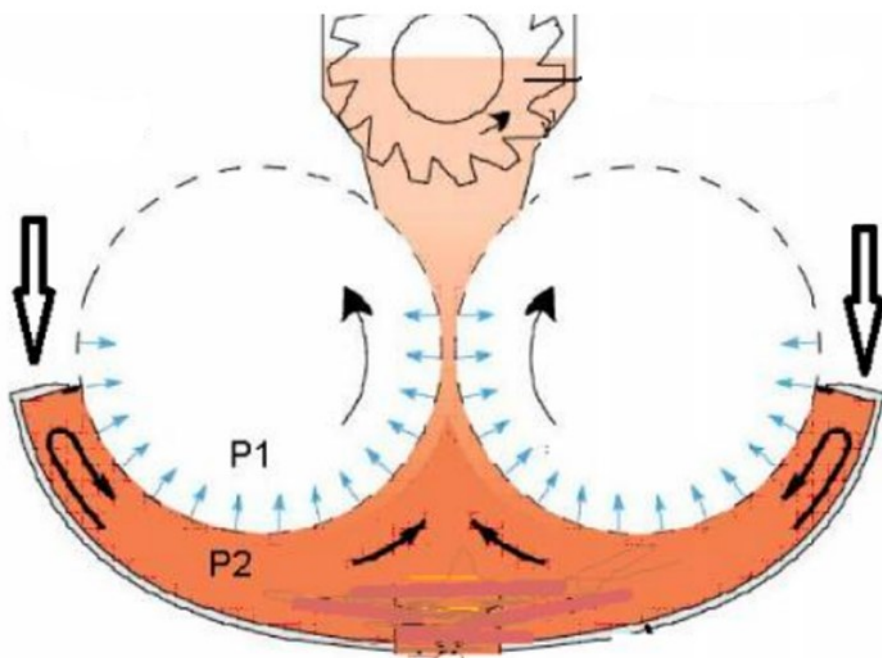
Urvattarna använder sig av ett tryckfall för att suga smutsig vätska från fibersuspensionen. Undertrycket härstammar från att en blandning av luft och vätska faller ner genom ett rör till filtrattanken. För att systemet ska fungera är det därför viktigt att systemet är rätt konstruerat. En annan viktig faktor är användningen av skumdämpande medel eftersom skum uppstår när luft blandas med filtratet. Filtrattanken är konstruerad så att tvättluten separeras från skummet och sjunker medan skummet flyter uppåt i tanken. Den bästa distributionen av massa i tvätten uppstår vid 1,00–1,25 procents massatorrhalt. Ett vanligt fenomen som inträffar vid högre produktionsnivåer är att urvattare körs med en högre massatorrhalt vilket även ger en sämre fibermatta. Distributionen till tvättrumman kommer från inloppslådan, vars uppgift är att ge en jämn massafördelning till tvätten. Efter inloppslådan leds mälden till vakuumtrumman. Vakuumtrumman är uppbyggd med dräneringskanaler som leder bort det smutsiga filtratet. Över dräneringskanalerna finns en vira vars uppgift är att hålla fibermattan på plats. Med hjälp av tryckfallet mellan trumman och filtrattanken sugas smutsigt filtrat från fibermattan via dräneringskanalerna. Samtidigt som trumman roterar sprutas tvättvätska på fibermattan, vilket resulterar i förträngningstvättning. Efter att mattan når den högsta positionen uppstår extraktionstvättning, eftersom luft sugas genom mattan samtidigt som massan torrhalt ökar. (Hart, 2017)



Figur 17. Flödesschema för en urvattare. (Wang, 1993)

3.3.4 Tvättpressar

Tvättpressar består i huvudsak av två roterande cylindrar med hålplåtsmantel som klämmer ut vätskan ur suspensionen. Massan pumpas till pressen genom ett rör från det föregående steget i processen. I pressen fördelas massaflödet i en fördelningsbox till flera utlopps rör. Utloppsrören är försedda med ventiler som kontrollerar att flödet är jämnt fördelat. Inne i tvätten pumpas tvättvätska till mälden genom munstycket. På grund av tryckskillnader mellan kärlet och trycket inne i cylindrarna förträngs massans vätskefas av den renare tvättvätskan. Detta betyder att även tvättpressar fungerar enligt förträngningstvättprincipen. Massan avvattnas då den passerar gången mellan cylindrarna som syns i figur 18. Ovanför de roterande cylindrarna är en skruv placerad. Skruvens uppgift är att transportera bort massan från tvätten. (Dandekar, et al., 2014)



Figur 18. Förenklad tvärsnittsbild av en tvättpress och flödesriktningar. P1 och P2 beskriver tryck och P2 är högre än P1. (Dandekar, et al., 2014)

3.4 Bruntvättens processtyrning och reglering

Processreglering av bruntvättssystem finns till för flera orsaker men huvuduppgiften är att skydda fabrikspersonalen mot faror. Processregleringen kan delas upp i tre uppgiftskategorier där skyddande av personalen är högst prioriterat. På andra plats är skyddandet av processutrustningen. Processutrustningen bör skyddas för att inte arbeta utanför deras fysiska begränsningar som till exempel vid för höga tryck. Processregleringen förhindrar även osäkra drifttillstånd. Den tredje kategorin för processregleringens uppgifter är att skydda miljön för exponering av farliga ämnen. (Brown, 2017)

3.4.1 Mätning av tvättförluster

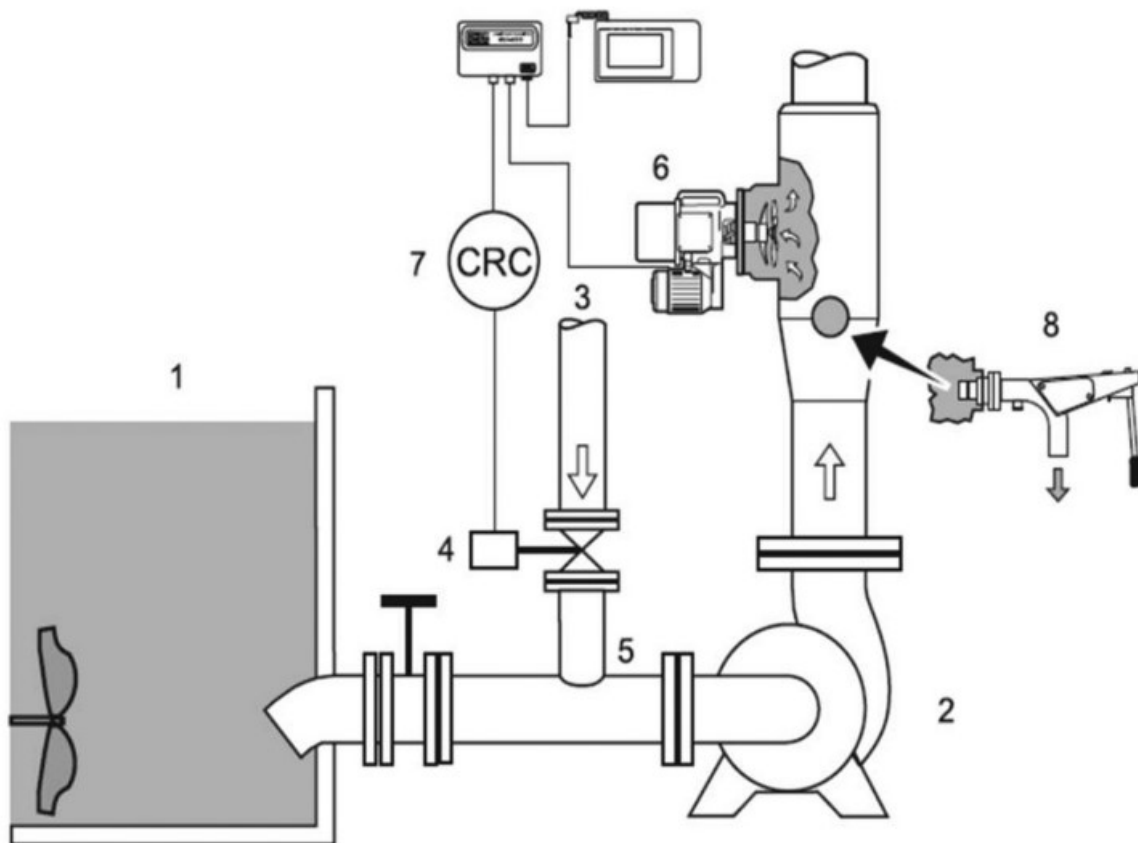
Tvättförlust är den del organiskt och oorganiskt material som fortfarande är kvar i massan efter tvätten som fortfarande kan tvättas bort. Tvättförlusten härstammar både från reaktionsprodukter i massan och från den använda tvättvätskan. Ursprungligen har tvättförluster mätts i laboratorier som saltandelen i utgående massan från tvätten. Nu för tiden mäts tvättförluster genom COD (kemiskt syrebehov), TOC (totalt organiskt kol), natriumtvättförlust eller konduktivitet. COD är den vanligaste metoden att mäta tvättförluster på grund av att den är fullständigt upplöst i vatten. De vanligaste delarna som orsakar COD är lignin, kolhydrater, metanol, låg molekylärviktiga organiska syror och extraktivämnen. (Kopra & Dahl, 2017)

3.4.2 Reglering av massans torrhalt

Det är viktigt att känna till massatorrhalten i alla steg av bruntvätten. Även vid kostandsoptimeringar är massans torrhalt en viktig variabel. Då en optimal torrhalten på massan uppnås, minimeras processvariationer, produktkvalitetsdefekter, processavfall och energikostnader samtidigt som produktionshastighet, processtillförlitlighet och vinst förbättras. (Pittman, 2017)

Massatorrhalten definieras som blandningens torr vikt delat med blandningens totala vikt. I processen mäts torrhalten kontinuerligt med direktuppkopplad mätutrustning. Mätutrustningen måste regelbundet kalibreras och kontrolleras så att mätresultaten motsvarar verkligheten. För att kontrollera mätutrustningen utförs provtagningar av massan. Provtagningen av massan för torrhaltsanalys är känslig och det är därför viktigt att själva utförandet görs korrekt. För de uppkopplade mätarna installeras vanligtvis specialgjorda ventiler för att möjliggöra representativa prov. Samtidigt är det också viktigt att analysen utförs på samma sätt varje gång så att resultaten ska vara så jämförbara som möjligt. Redan små avvikelser vid provtagningen kan inverka mycket på torrhaltsresultatet. Dessutom finns det även risk att torrhalten varierar i till exempel rör. För att bestämma massans torrhalt finns flera olika laboratoriestandarder. De här standarderna är dock komplicerade och tidskrävande. På fabrikena används förenklingar av de standardiserade metoderna. Förenklingarna är systematiserade och utförs på samma sätt varje gång. (Pittman, 2017)

I figur 19 visas en reglerslinga för ett tvättsystem. Massan flödar från ett lagringskärl eller lagringstorn till ett rör. Massan pumpas vidare i rörledningen och efter pumpen finns en torrhaltsmätare försedd med en sändare till en reglerenhet. Reglerenheten reglerar ett vätskeflöde anslutet före pumpen. Ett styrvärde anger ett börvärde för torrhalten och genom återkoppling uppnås den önskade torrhalten efter systemet. (Pittman, 2017)



Figur 19. Ett system som reglerar massans torrhalt. (Pittman, 2017)

3.4.3 Processoptimering

Det finns många tillstånd vid brunmassatvättning som kan ge upphov till sämre drifttillstånd eller driftsproblem. Problemen kan vara både kortsiktiga och långsiktiga. För att eliminera problemen eller åstadkomma ett bättre drifttillstånd behövs omfattande undersökningar och specifika felsökningar för att få fram orsakerna till problemen. I det skede som problemområdet har identifierats görs en mer specifik undersökning av det området med hjälp av balansberäkningar. Trots att problemet uppkommer på ett specifikt ställe bör hela tvättlinjen utvärderas, eftersom resultaten av problemen kan visa sig på andra ställen än där det ursprungliga problemet uppkommit. Det är vanligt att problem i början av tvättlinjen påvisar felfunktioner först längre fram i tvättlinjen. (Hart, 2017)

Ett vanligt fenomen som orsakar driftproblem i bruntvätten är varierande massatorrhalter från ett satskokeri. Orsaken till det beror ofta på att utblåsningstanken trycksätts vid varenda tömning, som i sin tur leder till att en tryckvåg med massa flödar ut. Problemet kan regleras till en viss mån med reglersystem. Allt som orsakar variationer i massans torrhalt till tvätten utgör en risk för driftsproblem. En annan variation som kan orsaka problem är temperaturvariationer i tvättvätskan. Temperaturförändringar i tvättluten kan åstadkomma en förändring av vätskans viskositet som ska förträngas genom mäldmattan. Till exempel kan mekaniska komponenter förstöras på grund av ånga

som bildas om filtratets temperatur överskrider kokpunkten i tryckfallsröret. Andra vanliga orsaker till driftsproblem är bland annat uppkomsten av beck vilket försämrar dränering av massan. Beck kan även orsaka variationer i produktionshastighet vilket kan ge upphov till kappvariationer som i sin tur leder till variationer av TDS (totala mängden upplösta fastmaterial). Byte av träslag eller blandning av olika träslag kan också ge upphov till driftsproblem. Mekaniska problem kan också ge upphov till driftsproblem och vanliga sådana är tvättmunstycken, rör och viror som stockats, felkalibrerade eller söndriga flödes- och torrhaltsmätare och problem med ventiler. (Hart, 2017)

Vid optimering av ett tvättsystem ska många provtagningar utföras och en undersökning av hela systemet göras. Den svagaste länken i systemet är den del som kommer att begränsa systemet. Det vill säga om den första tvätten fungerar dåligt kan det här inte kompenseras vid den sista tvätten. Före en tvättsystemsoptimering utförs, är det viktigt att se till att alla mekaniska delar i processen fungerar som de ska. En annan faktor som är viktig att undersöka före en optimering är att kontrollera att operatörernas rutiner utförs som de ska. Det är vanligt att missuppfattningar uppkommer och det kan leda till att felaktiga rutiner utförs, vilket i sin tur i värsta fall kan leda till att små driftsproblem uppkommer. Det första steget i en optimering är att undersöka systemets stabilitet och spara data från processmätarna. Det är vanligt att tvättsystem körs över den ursprungliga konstruktionskapaciteten. Det är därför viktigt att undersöka den specifika belastningen. Följande steg är att bestämma tvättsystemets och tvättarnas effektivitet. Effektiviteten beräknas med hjälp av provtagningsresultat av in- och utloppsmassa samt inkommande och utgående vätskeflöden. För att få en realistisk bild av effektiviteten är det viktigt att representativa prov fås vid provtagningarna. Till exempel kan variationer av torrhalten förekomma i olika delar av tvättens längdriktning. Då problemen har identifierats kan de åtgärdas med hjälp av balansräkningar och modellering av systemet. (Hart, 2017)

3.5 Skumbildning och skumdämpande medel

Skum är en nästan stabil dispersion av gasbubblor i en vätska, det vill säga ett koloidalt disperserat system. Semistabila skum kan inte bildas av rena vätskor. Då en bubbla uppkommer rör den sig mot ytan på grund av densitetsskillnaden mellan bubblan och vätskan. Vid ytan spricker bubblan eftersom inga surfaktanter är närvarande. Då en surfaktant tillsätts i vätskan eller vattnet möjliggörs skumbildning vid vätske-gasskiktet. Den största delen av skum som bildas vid kraftmassaframställning härstammar från svartluten som bildas i kokskeket. I luten som ska återvinnas är torrsubstanshalten ungefär 13–17 %. Vid de första tvättarna i bruntvätten är både torrhalten, jonstyrkan och temperaturen lägre, vilket betyder att olika krav ställs på de skumdämpande medel som ska användas. (Wilson & Brogdon, 2017)

Svartlut är en komplex blandning av upplösta och dispergerade ämnen i flytande fas. Få studier har gjorts gällande vilka ämnen eller kombinationer av ämnen i svartlut som bildar skum. Det antas att

fett- och resinsåpa samt steroler och terpineoler påverkar skumbildning. Skumbildning påverkar inte endast cellulosafabriken och bruntvätten utan även pappersmaskiner, avfallsvattenhantering och produktens slutanvändare. Skumbildning kan leda till att miljön påverkas negativt, säkerhetsrisker uppkommer, produktionsnivån sjunker, kemikalieanvändningen ökar, återvinningen försämras och energikostnaderna ökar. På grund av det här bör skumbildning regleras till en acceptabel nivå. För att motverka skumbildningen används bruntvättsskumdämpare och antiskummedel. Skumdämpare är ett ämne som reglerar eller eliminerar skum som redan uppkommit. Antiskummedel motverkar skumbildning. Eftersom tvättflödena är stora används vanligtvis skumdämpare i stället för antiskummedel i bruntvätten. (Wilson & Brogdon, 2017)

Skumdämpare för bruntvätten består ofta av två komponenter. Den ena komponenten är en hydrofobisk vätska och den andra består av hydrofobiska partiklar. Skumdämparens uppgift i bruntvätten är först och främst att minska de negativa effekterna skum ger. Skumdämpare påverkar också massans dräneringsförmåga, vilket betyder att skumdämpare kan höja tvätteffektiviteten. Bättre dränering betyder att tvätten kan rotera långsammare vilket leder till en tjockare fibermatta samt mindre tvättvätska till tvätten. (Wilson & Brogdon, 2017)

4 Massasilning

4.1 Silningsprincip

I kokskelet löses inte alla fibrer perfekt. Till exempel kan flisbitar fortfarande vara okokta vilket leder till att de inte kan defibreras till separata fibrer. En orsak till okokta flisbitar kan bland annat bero på ojämn fliskvalitet. Det kan även finnas andra material än flisbitar med i koket, till exempel bark, sand, stenar eller metall. För att undvika maskinhaveri i urvattnare och tvättpressar måste stora partiklar så som stenar, okokt flis och kvistar avskiljas före tvättning. Tanken med silningen är att avskilja orenheterna från massan, tvätta bort fibrer från rejektet och leda dessa tillbaka till huvudströmmen som en acceptmassa. Rejektet behandlas sedan vidare. Rejekt i form av okokad flis kan återanvändas medan sand, stenar och andra orenheter avlägsnas. (Tervola, et al., 2011)

Silning innebär att oönskat material i massan avlägsnas genom storleksgallring. Massan flödar genom endera hålplåt eller slitsad plåt där hålen är tillräckligt stora för att önskade fibrer ska rymmas igenom medan större oönskade partiklar inte rymms. Massan består också delvis av naturligt flockade fibrer, för att de inte ska behandlas som rejekt måste de separeras från varandra. För att inte hålen ska stockas måste rejektet avlägsnas effektivt från plåten. Massans to påverkar hur bra fibrerna kan röra sig utan att börja flockera. Vid ökande torrhalt ökar flockningsrisken. Rejektmaterial kan kapslas in i flockade fibrer och större energimängd måste då användas för att spjälka upp flockade fibrer. För att undvika dessa risker är massans torrhalt ungefär 1,5–2,5 % i silningssteget. Då rejektet samlas upp på silplåtarna avvattnas rejektmassan och massans torrhalt ökar. Det är därför viktigt att beakta förtjockning av rejekt vid balansräkningar. (Moynihan & Hart, 2017)

För att bryta upp de flockade fibrerna i massan används skjuvning. Den vanligaste källan till skjuvning inom silning är turbulens som åstadkommes från ett roterande sikt. Det är viktigt att det roterande siktet är konstruerat för den typ av cellulosamassa som ska behandlas. Det finns även andra sätt att utsätta massan för skjuvning, som till exempel i ett vibrerande sikt. Oavsett hur skjuvning uppstår är det viktigt att flödeskaraktären vid siktet är rätt så att fiberflockningarna bryts. För att inte sikten ska stockas måste någon typ av siktvättning utföras, endera kontinuerligt eller stötvis. I modern silustrustning är det roterande siktet konstruerat så att tvättandet sker kontinuerligt. Vanligtvis genereras ett pulserande flöde i systemet med hjälp av inbuktningar, utbuktningar eller paddlar på siktet. (Moynihan & Hart, 2017)

4.2 Uppbyggnad och placering

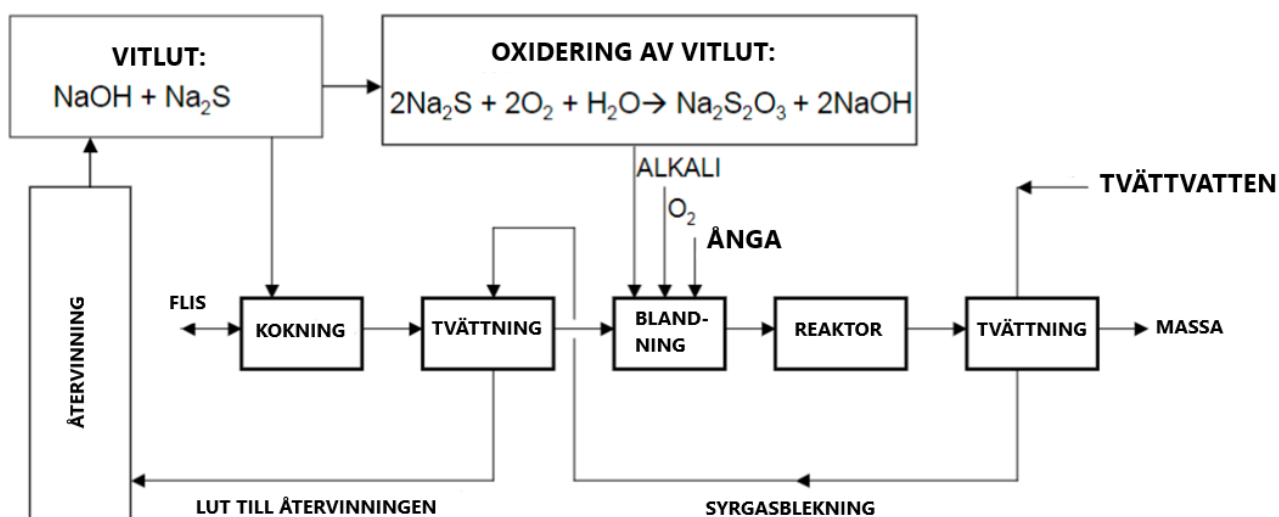
Vanligtvis avlägsnas större orenheter, okokt flis och kvistar före bruntvätten. Det är viktigt att avlägsna kvistar före den första tvätten eftersom de kan samlas i tvättens nedre del och förstöra viran. Kvistnötter ökar dessutom tvättförlusterna vilket gör det fördelaktigt att placera kvistavskiljningen i ett så tidigt skede som möjligt efter koket (Seppälä, et al., 1999). Fiberlinjer med en atmosfärisk- eller trycksatt diffusör avlägsnar vanligtvis kvistar först efter diffusörens högkonsistenslagringscisterner. Vid kvistavskiljning är det viktigt att en tillräckligt hög hastighet förekommer så att fibrerna på rejektdelen separeras. Kvistrejekten leds vanligtvis tillbaka till kokeriet för att återkokas, det är därför viktigt att inte fibrer följer med som kan stocka siktplåtarna i kokreaktorn. Kvistavskiljningen sker med en massatorrhalt mellan 2–4 %. Brunmassasilning sker vanligtvis före den sista tvätten varifrån massan leds till ett högkonsistens lagringstorn. Även vid brunmassasilning har massan en låg torrhalt, vilket leder till att massan bör avvattnas före lagring. Det sista förtjockningssteget är samtidigt det sista tvättsteget i bruntvätten. För att utbytet ska vara så högt som möjligt återcirkuleras rejekten genom ett eller flera silningssteg och koksteget. I moderna fabriker används ofta trycksatta silningsapparater med låga utsläpp. Silningssteget är vanligtvis lättmanövrerat så länge flödet hålls inom flödesgränserna och torrhalt är nära systemets optimala torrhalt. (Moynihan & Hart, 2017)

5 Syrgasblekning

Syrgasblekning används för att minska belastningen på blekeriet. Under 1980-talet uppstod en oro över hur kloranvändningen inom massablekning påverkar miljön. För att möta oron utvecklades metoder för att delignifiera cellulosa samtidigt som kloranvändningen minskades. På grund av att viskositeten påverkades för mycket vid allt för låga kappa-tal vid kraftkoken blev syrgasblekning en populär metod. Ett typiskt syrgas- eller dubbelsyrgassteg kan minska restligninet med 35–55 % (Yang, et al., 2003). Syrgas blekning utförs i alkaliska förhållanden för att ligninet ska lösas. (Esteves, et al., 2021)

5.1 Syrgasblekningsprocessen

Syrgasblekning används för att avlägsna en större mängd lignin från cellulosamassan efter koket. Processen sker i höga temperaturer i en eller flera reaktorer med massa med medium eller hög torrhalt. Vanligare är att massa med medium torrhalt används i syrgasblekningen. Selektiviteten är en begränsande faktor inom syrgasblekning. Efter en viss grad av delignifiering bryts även cellulosan ner, vilket leder till lägre viskositet och sämre styrka på massa (Ji, 2007). För att inte påverka Na/S-balansen i kokprocessen används oxiderad vitlut för att höja pH-värdet. I syrgasblekningen används inte vanlig vitlut utan den är oxiderad. Natriumsulfiden i vitluten reagerar med syre och ifall vitluten inte skulle oxideras före syrgasblekningen skulle vitluten förbruka syre i syrgassteget. Restprodukterna från syrgasblekningen återcirkuleras till koket vilket är en orsak till att syrgasblekning ofta ses om en del av kokeriet i stället för blekeriet. I figur 20 visas en processflödesbeskrivning av syrgasblekning. Vid syrgasblekningen tillsätts magnesiumsulfat för att motverka nedbrytning av cellulosa. Tack vare återvinningsprocessen är det inte nödvändigt att tillsätta stora mängder magnesiumsulfat. (Chirat, et al., 2011)



Figur 20. Ett flödesschema för syrgasblekning vid kraftmassaframställning. (Chirat, et al., 2011)

Viktiga processvariabler vid syrgasblekning är pH, temperatur, reaktionstid, partialtrycket för syre och inmatning, cellulosaamassans torrhalt och överföring av upplöst material. Syrgasblekning fungerar endast vid alkaliska förhållanden på grund av att syre är ett svagt oxiderande ämne. Ifall pH-värdet är för högt riskerar även cellulosa brytas ner. För att en bra delignifiering ska ske behöver temperaturen åtminstone vara 80 °C. Ju högre temperatur desto bättre delignifiering, däremot ökar också viskositetsförluster vid högre temperaturer. Vanligtvis används en temperatur kring 100 °C för syrgasblekning. Syrgas löser sig relativt dåligt i vätska vid normala tryckförhållanden. Eftersom de kemiska reaktionerna sker i fast-vätske-fasen måste syrgas lösa sig i vatten och därför är det viktigt att ha tillräckligt högt tryck. Vanligtvis ligger inloppstrycket för syrgasen mellan 400–900 kPa.

Syrgasinmatningen har ingen större inverkan på delignifieringen så länge det inte är en begränsande faktor. Räknat från massans torrsubstans är en 2–3 % syrgasmatning tillräcklig. Vid syrgasblekning används vanligtvis medium torrhalts massa, högre torrhalter på massan ökar delignifiering och nedbrytning av cellulosa till en viss del. Överföring av upplöst organiskt material påverkar också syrgasblekningen. Fibersuspensionen i syrgassteget innehåller filtratvatten både från föregående tvättskeden samt från tvättskedet efter syrgasblekningen. Överföring av upplöst material orsakar högre förbrukning av syrgas och alkali samtidigt som viskositeten minskar. (Chirat, et al., 2011)

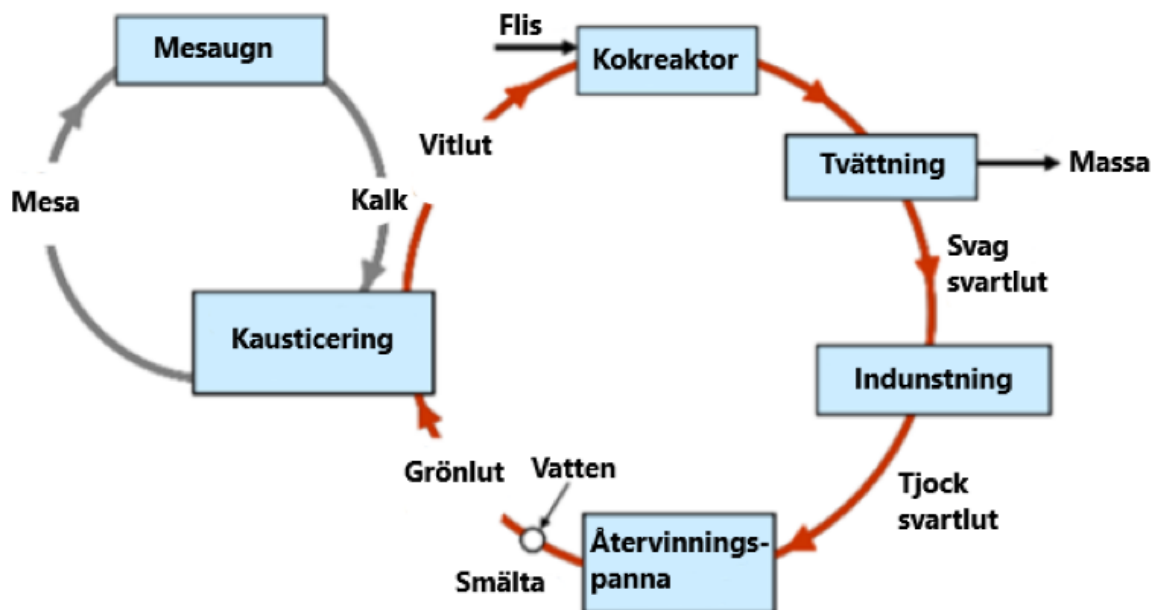
5.2 Syrgasblekningens kemi

Syrgas är en di-radikal som reagerar med lignin på liknande sätt som klor (Chirat, et al., 2011). Reaktionen startar genom att en fenolisk hydroxyl i ligninstrukturen reagerar med alkali och bildar en fenolatjon. Jonen reagerar sedan med syre och bildar en mellanprodukt som kallas hydroperoxid. Mellanprodukten utsätts sedan för olika fragmenteringar, bland annat kan reaktioner bryta upp den polymera strukturen och andra reaktioner bryter ner de återstående delarna så att ligninkomponenterna blir mer vattenlösliga. Samtidigt bildas också fria radikalerivater från lignin som kan reagera med varandra för att sedan återbilda större ligninkomponenter. Dessutom bildas väteperoxid från delreaktioner i delignifieringsprocessen. Väteperoxiden som bildas kan reagera med både lignin och kolhydrater. Inom syrgasblekningen är det nedbrytandet av kolhydrater som begränsar delignifieringen. Slumpmässig uppspjälkning av cellulosakedjan inträffar och det leder till en minskning i viskositet. Om uppspjälkningen av cellulosakedjan sker till en viss grad påverkas även massans styrke-egenskaper. Uppspjälkningen av cellulosakedjan inträffar då peroxider och metall-joner bildar radikaler som reagerar med kedjebidningarna. (McDonough, 1989)

6 Återvinning och indunstning av svartlut

6.1 Återvinning

Vid kraftmassaframställning löses ungefär hälften av veden upp och tillsammans med kokkemikalierna som använts bildas en vätska som kallas svartlut. Svartluten innehåller oorganiska ämnen som ska återvinnas i återvinningsprocessen. Svartluten innehåller även organiskt material som används som bränsle för energikonvertering och ångproduktion. Ett ton cellulosa massa ger ungefär 10 ton svag svartlut, som i sin tur består av ungefär 1,5 ton torrsubstans. I figur 21 visas en övergripande och förenklad beskrivning av koklutsåtervinning. Processens tre huvudsakliga uppgifter är att minimera miljöpåverkan, återvinna natriumhydroxid och natriumsulfid samt generera värme och elektricitet. (Tran & Vakkilainen, 2008)



Figur 21. Bild av återvinningsprocessen. (Tran & Vakkilainen, 2008)

6.2 Indunstning

Indunstning innebär att vatten avlägsnas från en lösning. Lösningen värms till en nivå som leder till förångning. En indunstningsavdelning för svartlut består ofta av flera seriekopplade värmeväxlare med ånga som värmemedium. Indunstningsavdelningen består vanligtvis av en eller flera effekter som är numrerade i ångflödets riktning. Svartluten flödar vanligtvis i motsatt riktning i förhållande till ångflödet. Svartluten som leds till indunstningen har en torrsubstans på ungefär 14–18 %, som beror på råmaterial och bruntvättens effektivitet. Svartluten indunstas till en torrsubstans på 70–80 % och i vissa fall över 80 %. (Parviainen, et al., 2008)

7 Experimentell del

Under de senaste åren har en del investeringar gjorts vid UPM:s cellulosafabrik i Jakobstad för att förbättra produktionen. Efter uppgraderingarna finns det ännu begränsningar och förbättringsmöjligheter på barrlinjens bruntvätt. För att kartlägga hur barrlinjens bruntvätt presterar utfördes ett effektivitetstest. Målet med effektivitetstestet var att jämföra tvättarnas prestanda med björklinjens bruntvätt där Valmet har utfört ett effektivitetstest senast år 2021. Effektivitetstestet på bruntvätten kan användas som bas för att utföra små optimeringar för att förbättra produktionen i

barrlinjens bruntvätt. I den experimentella delen presenteras UPM:s fabrik, ekvationerna som har använts vid beräkningar av bruntvättens effektivitet, balansberäkningar och en modell för torrhalten i filtraten samt hur provtagningarna utfördes. I den experimentella delen presenteras inga resultat utan de behandlas i delen resultat och delen för sammanfattning och slutsatser.

7.1 UPM och UPM:s cellulosaabrik i Jakobstad

UPM Kymmene Oy är ett företag verksam inom trä- och bioproduktindustrin. Företaget använder sig av vedbaserade råmaterial och energi med ett så litet koldioxidavtryck som möjligt. UPM består av sju affärsverksamhetsområden varav UPM Fibres är ett. Cellulosaabriken i Jakobstad hör till UPM Fibre affärsverksamheten. På global nivå har UPM 54 produktionsenheter och totalt 17 000 anställda i 46 länder (UPM Kymmene Oy, 2022). UPM:s cellulosaabrik i Jakobstad består av två vedhanteringslinjer, två fiberlinjer, två torkmaskiner och en återvinningsavdelning för svartlut. Fabriken produktionskapacitet är 800 000 ton per år (UPM Kymmene Oy, 2022). Fiberlinjerna består av en barrlinje med ett satskokeri av modellen SuperBatch-K och en linje med en kontinuerligkokare som i huvudsak kör björkflis med undantag då den kör barrkampanjer. Vid fabriksintegratet finns även en pappersmaskin ägd av BillerudKorsnäs som använder UPM:s cellulosa.

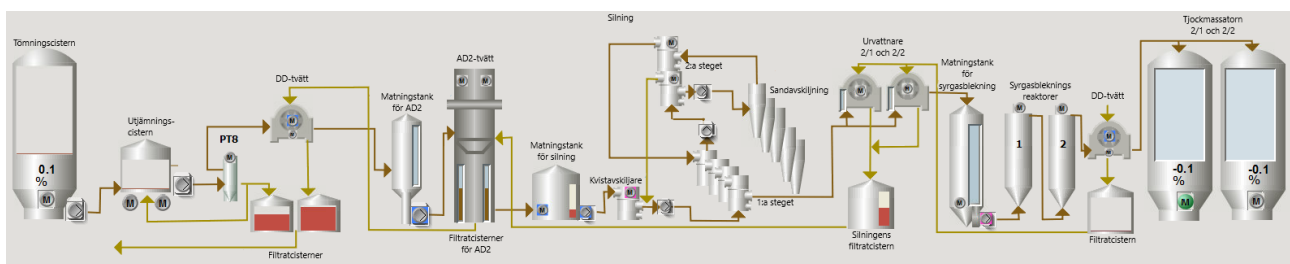
7.2 Barrfiberlinjen i Jakobstad

Barrfiberlinjen består av ett K-modellens SuperBatch-kokeri, en bruntvättavdelning, ett tvåstegs syrgasblekningssteg och ett fyra-stegsblekeri. SuperBatch-kokeriet består av 8 parallella satskokare i två linjer. Till SuperBatch-kokeriet hör också de typiska ackumuleringstankarna för svartlut. Det vill säga två hets svartlutscisterner (1 och 2), en hetvitlutscistern, två förträngningslutscisterner (1 och 2) och en impregneringslutscistern. Från kokeriets andra hets svartlutscistern pumpas den huvudsakliga mängden svartlut till indunstningen. Indunstningen togs i bruk 2004 och består av sju indunstareffekter och har en kapacitet på 1050 t_{vatten}/h . Indunstningens kapacitet är gjord för fiberlinjens produktionskapacitet på 800 000 ADt/år, vilket betyder att dagar då fiberlinjernas medelproduktionshastighet är över 800 000 ADt/år riskerar indunstningen begränsa produktionen.

Bruntvätten börjar redan i kokfasens slutskede. Då önskad H-faktor har uppnåtts förträngs den heta svartluten från kokaren med förträngningslut. Förträngningsluten består av återanvänt svartlut från impregneringsskedet, som i sin tur består av tvättlut. Efter luftförträngningen pumpas massan till en tömningscistern. Massan dräneras i en för-avvattare efter tömningscisternen, för att uppnå tillräckligt hög och jämn torrhalt på massan in till bruntvättens första tvätt. Bruntvättens första tvätt är en enstegs DD-tvätt. Filtratet från DD-tvätten pumpas till två filtratcisterner. Bruntvättens produktionskapacitet är 1350 ADt/d. Efter DD-tvätten regleras massans torrhalt till cirka 10 % för att sedan pumpas till en tvåstegs atmosfärisk diffusör. Största delen av filtratet från DD-tvätten pumpas till DD-tvätten som tvättvätska, förutom den andelen som går åt till att späda ut massan från DD-

tvätten. Efter den atmosfäriska diffusören är silningsavdelningen placerad. Först avskiljs kvistnötter från massan i kvistavskiljningen och acceptet transporteras vidare till 4 parallella primärsilar. Rejekten från kvistavskiljaren pumpas till en fiberavskiljare och efter den pumpas rejektet tillbaka till koket. Accepten från primärsilningen pumpas vidare till två parallella urvattnare medan rejektet pumpas till en sekundär silning. Från sekundärsilningen pumpas rejektet till en rejektvätt och sedan tillbaka till kokeriet.

Filtratet från urvattnarna leds till en filtratcistern. Från den cisternen pumpas filtratet till AD-tvätten som tvättvätska. Efter urvattnarna leds massan till en matningscistern för syrgasblekningen. Från syrgasstegets matningscistern pumpas massan till två-stegs syrgasblekningen. Massan från syrgasblekningen pumpas till en DD-tvätt (Syrgasblekningens DD-tvätt). Filtraten från syrgasblekningens DD-tvätt pumpas till en filtratcistern och filtratet i cisternen pumpas som tvättvätska till urvattnarna. Efter syrgasstegets DD-tvätt leds massan till två brunmassatorn. Från brunmassatornen fortsätter massarörledningen vidare till blekeriet eller till pappersmaskinen om brunpapper produceras. Efter blekeriet pumpas massan till barrlinjens torkmaskin. I figur 22 visas en översatt bild på bruntvätten från Valmets DNA-processtyrningssystem.



Figur 22. Modifierad bild över barrlinjens bruntvätt från Valmets DNA-processtyrningssystem.

7.3 Björkfiberlinjens bruntvätt

Björkfiberlinjens bruntvätt är uppbyggd annorlunda än barrfiberlinjens bruntvätt. Björkfiberlinjen består först av en impregneringsenhet och sedan en kontinuerlig Kamykokare. Efter kamykokaren är en atmosfäriskdiffusör placerad. Efter den atmosfäriska diffusören sker kvistavskiljningen. Efter kvistavskiljningen tvättas brunmassan i en DD-tvätt. Massasilningen sker efter den första DD-tvätten. Som alternativ till förtjockning av massa efter massasilningen används en tvättpress på björklinjen. Efter att massan har urvattnats delignifieras massan i en två-stegs syrgasblekningsavdelning. En DD-tvätt tvättar massan efter syrgasblekningen. Före tjockmassatornet både dräneras och tvättas massan i en tvättpress.

7.4 Effektivitetsundersökning på bruntvättsavdelningen

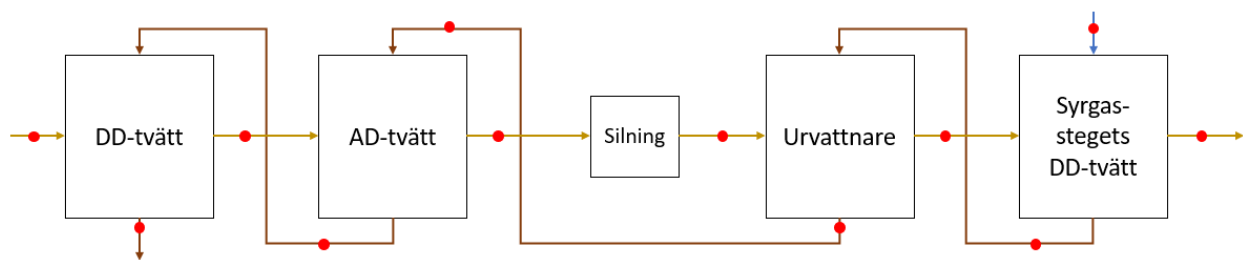
För att undersöka hur effektivt barrlinjens bruntvätt fungerar utfördes ett effektivitetstest. Under 2021 utförde Valmet ett effektivitetstest på björklinjen vilket kan jämföras med bruntvättseffektivitetstestet på barrlinjen. Effektivitetstestet kan dessutom användas som en startpunkt för en enklare optimering

eller modellering av bruntvätten. Analyserna och beräkningarna som användes vid effektivitetstestet baseras på samma litteratur som används i litteraturdelen för effektivitetsberäkningar. Dessutom användes vissa standarder och förenklingar av standarder för en del av analyserna. Analyserna utfördes i fabrikslaboratoriet.

7.4.1 Provtagningar

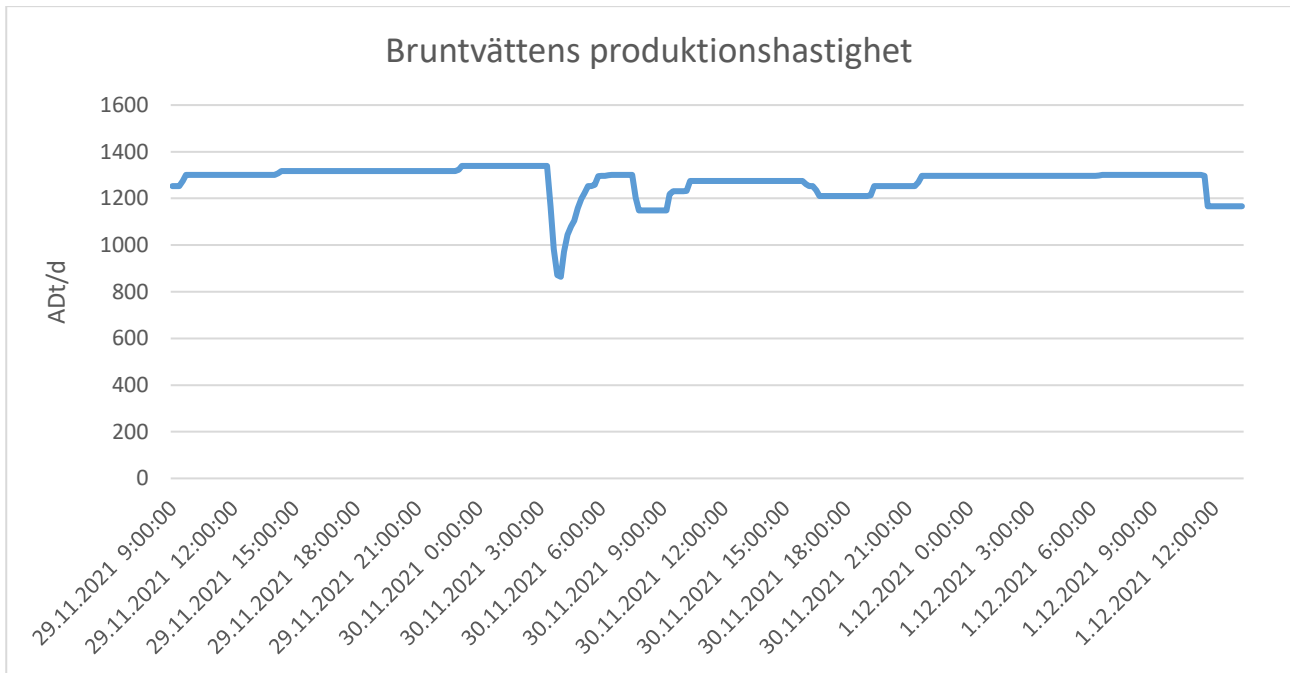
Provtagningen för testet utfördes i fyra omgångar under två dagar vid jämn produktion för att få så representativa prov och resultat vid beräkningarna som möjligt. Retentionstiden för bruntvätten och syrgasblekningen är ungefär fyra timmar vilket beaktades med att provtagningen vid de olika tvättarna gjordes med en timmes mellanrum. Följande provtagningar gjordes för effektivitetstestet: torrhalt på inkommande och utgående massa, COD-nivå i inkommande och utgående filtrat och COD-nivå i inkommande och utgående massa. Dessutom gjordes temperatur- och pH-mätningar på inkommande och utgående filtrat och massa från tvättarna med en portabel pH- och temperaturmätare. Temperatur och pH-mätningarna utfördes direkt på plats i fabriken med riktiga processtemperaturer. Temperatur- och pH-mätningarna från massaproven misslyckades under dag 1 vilket ledde till att temperatur- och pH-resultaten är från dag 2. Konduktivitetsmätningar, TIC och TOC mätningar utfördes på inkommande och utgående filtrat från tvättarna. Provtagningarna utfördes med den försiktighet och noggrannhet som krävs för att få representativa prov. Massaproven hanterades varsamt vid provtagningen så att inte torrhalten skulle ändras. För att få färsk filtrats- och tvättlutsprov tömdes rörledningarna innan proven togs, så att färsk provagningsvätska kunde tas.

I figur 23 är provtagningspunkterna för effektivitetstestet utritade. De röda punkterna representerar provtagningsplatserna. De bruna pilarna representerar tvättlutsflödet som fungerar enligt motströmsprincipen. De gula pilarna i figuren representerar massans flödesriktning. Provtagningsplatserna var inte alltid placerade på de mest optimala ställena på grund av säkerhetskrav och andra processtekniska utmaningar. På grund av det här är vissa prov tagna efter utspädningskeden vilket betyder att ämnes- och flödesbalanser har gjorts för att korrigera mätresultaten så att resultaten skulle bli användbara. Efter den första DD-tvätten togs prov efter AD-tvättens utspädningscistern vilket resulterade i en balansberäkning för att få ett användbart resultat. Balansberäkning kunde utföras eftersom produktionsflödet, torrhalten samt utspädningsflödet var kända variabler. Samma principer gjordes efter syrgasstegets DD-tvätt eftersom provtagningen gjordes efter skruvutspädningen, som också var ett känt flöde.



Figur 23. Förenklat flödesschema på bruntvätten med provtagningspunkterna från effektivitetstestet. De röda punkterna motsvarar provtagningsplatserna, gula pilar representerar massa, bruna pilar representerar filtrat och den blåa pilen representerar färskvatten.

Vid provtagningsstillfället för beräkning av tvätteffektivitet är det viktigt att produktionshastigheten är så jämn som möjlig. Det här kan ställa till med problem eftersom oförutsägbara situationer som påverkar produktionen kan uppkomma närsomhelst. För att kontrollera att produktionshastigheten är på en tillräckligt normal nivå kan den momentana hastigheten jämföras med ett årsmedelvärde. Vid provtagningsstillfällena för effektivitetstestet höll sig produktionshastigheten på en förhållandevis normal nivå då de första provtagningsserierna utfördes. Även under själva provtagningarna förhöll sig produktionen tillräckligt stabil för att slutföra provtagningarna. I figur 24 visas bruntvättens produktionshastighet med ett medelvärde på 10 minuter. Före den första provtagningsserien startade 30.11.2021 sjönk produktionshastigheten tillfälligt och det här kan påverka testresultaten i en mindre utsträckning. Vid den andra provtagningsserien som utfördes 1.12.2021 var produktionshastigheten betydligt mer jämn och även då förhöll sig värdet av produktionshastigheten tillräckligt jämnt. I figur 24 har data hämtats från fabrikenes processtyrningssystem.



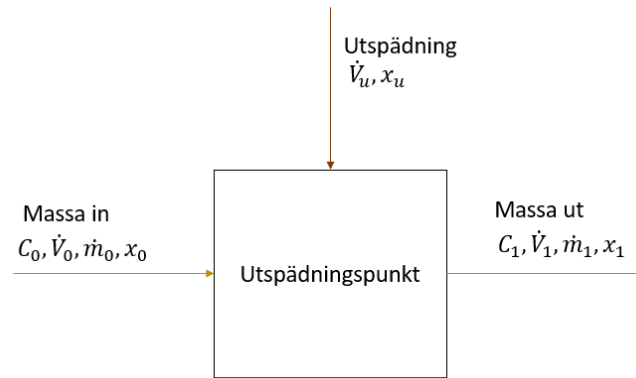
Figur 24. Bruntvättens produktionshastighet 29.11-1.12.2021 med ett 10 minuters medeltal.

7.4.2 Flödes- och ämnesbalanser vid utspädning

Flödesbalanser för utspädningar är relativt triviala om alla nödvändiga flöden för beräkningarna är kända. I figur 25 visas ett enkelt utspädningsflödesschema för en fibersuspension. Vid beräkning av den okända inkommande massatorrhalten C_0 kan ämnesflödena x_n negligeras. Underindexering 0 innebär inflöde, 1 utgåendeflöde och u är utspädningsflöde. \dot{V} står för volymflöde, \dot{m} för massflöde, C för koncentration och x för ämnesmängd (till exempel COD kan användas som ämnesmängd). C_0 kan beräknas enligt ekvation 16, som härstammar från flödesbalansen i ekvation 15.

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 + \dot{V}_u \quad (15)$$

$$C_0 = \frac{C_1(\dot{V}_0 + \dot{V}_u)}{\dot{V}_0} \quad (16)$$



Figur 25. Flödesschema för utspädning av cellulosamassa.

Även upplöst material i vätskefasen från massasuspensionen påverkas av utspädning, till exempel COD. Då mängden upplösta ämnen i utspädningsvätskan och i utgående vätskefasen är kända kan även mängden i den inkommande vätskefasen beräknas, givet att massatorrhalter och vätskeflöden är kända. Med ekvation 17a och 17b kan mängden upplöst material direkt efter tvätten beräknas.

$$\dot{V}_1 x_1 = \dot{V}_0 x_0 + \dot{V}_u x_u, \quad (17a)$$

$$x_0 = \frac{x_1(\dot{V}_u + \dot{V}_0) - \dot{V}_u x_u}{\dot{V}_0}. \quad (17b)$$

7.4.3 Hantering av mätfel

På grund av variationer i processen och svårigheter med att ta proven vid exakt rätt tidpunkt uppkommer mätfel. Mätfelen uppkommer också vid analyserna i laboratorier vilket gör att klart avvikande resultat från seriemätningarna har gallrats bort. Vid analys av tvätteffektivitet är det viktigt att andelen upplöst material i vätskefasen och filtraten stämmer. Det betyder att då tvätteffektiviteten ska beräknas måste den totala mängden upplöst material i inflödena vara den samma som i utflödena. Samtidigt kan koncentrationen av upplöst material i utgående filtraten inte vara större än koncentrationen av upplöst material i den inkommande massans vätskefas. På motsvarande sätt kan koncentrationen av upplöst material i den utgående massans vätskefas inte vara större än koncentrationen i den inkommande tvättvätskan. För att kringgå problematiken med mätvariationer som gör att de uppmätta resultaten inte stämmer kan en balans användas för att beräkna en koncentration som inte stämmer. I ekvationerna 18a och 18b beräknas koncentrationen upplöst material i utgående filtrat. Från tvättsystemets ämnesbalans från litteraturdelen kan y_1 härledas, då V_1 är okänd.

$$L_0 x_0 + V_2 y_2 = L_1 x_1 + V_1 y_1, \quad (18a)$$

$$y_1 = \frac{L_0 x_0 + V_2 y_2 - L_1 x_1}{L_0 + V_2 - L_1}. \quad (18b)$$

Vid effektivitetstest är det viktigt att kontrollera att de totala koncentrationerna av upplöst material i vätskefaserna stämmer. Det totala ämnesmängdsförhållandet (ÄF) kan kontrolleras med ekvation 19 så att de stämmer. Ju större resultatet i % från ekvation 19 är, desto sämre går det att lita på effektivitetstestet för den specifika tvätten.

$$\text{ÄF} = \left(1 - \frac{x_0 + y_2}{x_1 + y_1}\right) 100. \quad (19)$$

7.4.4 COD-överföring

För att beräkna COD-överföring från den första tvätten till den sista tvätten användes en förenklad metod som baserar sig på standarden SCAN-CM 45:00 för förberedning av massa och standarden ISO 15705 för själva COD-mätningen. Först bestäms massans torrhalt men på grund av det stora antalet prover och tidsbrist gjordes en systematiserad förenkling vid torrhaltsanalysen. Efter att massaprovtagningen hade gjorts togs ett nytt prov från kärlet. Provet vägdes först upp för att få suspensionens vikt och sedan torkades provet till den absoluta torrvikten. Genom ekvation 20 kan torrhalten beräknas. I ekvation 20 står C för massans torrhalt, m_t för torrsubstansens massa och m_s för suspensionens totala massa.

$$C = \frac{m_t}{m_s}. \quad (20)$$

Efter att massans torrhalt bestämts vägdes ett nytt prov från suspension upp så det innehöll ungefär 40 gram torrsubstans. Provet späddes ut till en total volym på 2000 ml med destillerat vatten. Av det utspädda provet togs 500 ml som sedan silades genom en Bühner-tratt och kakan som bildades på filterpapperet tvättades ytterligare med 300 ml destillerat vatten. Filtratets volym och kakans torrsvikt noterades. COD-nivån mättes sedan i filtratet. För att beräkna COD-överföringen användes ekvation 21. Dessutom späddes filtratproven ut med destillerat vatten så att COD-nivån skulle underskrida 1500 mg/l som är det maximala värdet som kan uppmätas med fabriken's mätutrustning. I ekvationen står COD_δ för COD-överföringen med enheten kg/t, COD_f för COD-nivån i filtraten i enheten mg/l, V är filtratets volym i liter och m är kakans torrsvikt i gram.

$$\text{COD}_\delta = \frac{\text{COD}_f V}{m}. \quad (21)$$

7.4.5 Beräkning av tvättfaktorn

Då utspädningsfaktorn och Nordéns tvätteffektivitet ska beräknas behöver tvättvätskeflödet vara känt. Tvättvätskeflödet är den samma som tvättfaktorn. Vanligtvis anges tvättfaktorn i m^3/ADt eller m^3/ODt där ifrågasättande kubikmeter handlar om tvättvätska. Ofta finns tvättfaktorn angiven i m^3/ADt i processtyrningssystemen. I vissa fall kan tvättfaktorn saknas eller vara beräknad med andra balansområden än området som används vid beräkning för en specifik tvätts effektivitet. På grund av det här måste tvättfaktorn ibland beräknas. I testet som utfördes för att bestämma bruntvättens effektivitet behövde tvättfaktorn beräknas både för AD-tvätten och urvattnarna. På grund av att det

inte finns lämpliga torrhaltsmätare direkt efter dessa tvättar måste tvätfaktorn beräknas från tvättflödena och bruntvättens beräknade produktionshastighet. Tvätfaktorn (V_2) kan beräknas enligt ekvation 22 om produktionshastigheten P och tvättvätskeflödet \dot{V} är kända.

$$V_2 = \frac{\dot{V}}{P}. \quad (22)$$

I effektivitetstestet som utfördes på bruntvätten användes medelvärden för produktionshastigheten och tvättvätskeflödet. Tidsspannet som användes till medeltalen är från tidpunkten när den första provtagningen utfördes till att den sista provtagningen utfördes på en specifik tvätt. Data som behövdes till beräkningarna kommer från fabrikenes processtyrningsprogram. I resultatdelen presenteras tvätfaktorer som har beräknats enligt de föregående principerna.

7.5 Beräkning av tvättvätskebalans

För att kontrollera flödena som använts i effektivitetstestet har en balansräkning på bruntvätten gjorts. Balansområdet börjar vid Superbatch-kokeriets utgående massaflöde och slutar vid syrgasblekningens DD-tvätt utgående massaflöde. I balansberäkningarna ingår även alla tvättvätskeflöden och svartlutsflödet från barrlinjen till indunstningen. Balansberäkningen baserar sig på samma provtagningar som i effektivitetstestet och dessutom används årsmedelvärdet från processtyrningsprogrammet för de punkter som inte analyserades i effektivitetstestet. Bland annat användes massatorrhaltens börvärde efter föravvattnaren i beräkningarna. För att beräkna andelen vätska per lufttorkat ton massa används ekvation 23 och ekvation 24. Först beräknas mängden vätska i en kubikmeter av fibersuspensionen vid en given punkt i systemet. För att bestämma vätskefasdelen per producerat ton lufttorkad massa beräknas den verkliga torrhalten om vilket i sin tur ger ett förhållande varifrån andelen vätska kan räknas ut. Beroende på om processteget dränerar eller späder ut suspensionen kan mängden filtrat per ADt beräknas. I ekvation 23 och 24 beskrivs den utgående torrhalten på massa med C_{ut} . I ekvationerna står V_s för volymen av suspensionens vätskefas. I ekvationerna står \dot{V}_s för suspensionens volymetriskavätskefas per ADt.

$$V_s = 1000 \frac{1}{\text{m}^3} - \frac{C_{ut}}{100} 1000 \frac{1}{\text{m}^3}, \quad (23)$$

$$\dot{V}_s = \frac{90V_s}{C_{ut}} / 1000 \text{ l/m}^3. \quad (24)$$

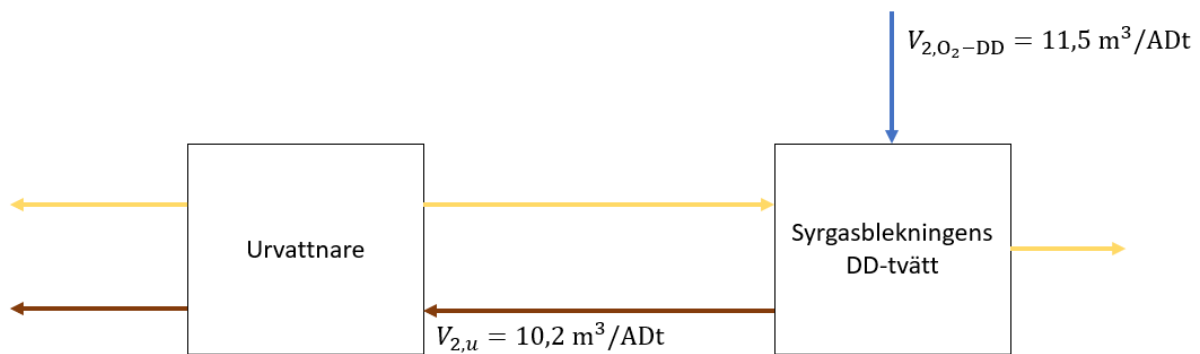
Efter att vätskefasen i fibersuspensionen per ADt har beräknats kan även filtraten beräknas per ADt. Vid optimal drift tillsätts färskvatten endast vid syrgasblekningens DD-tvätt och det här tillståndet antas förekomma vid balansberäkningarna. Vid beräkning i filtratets flödesriktning adderas vätska från suspensionen till ifall dränering av massan förekommer. Det vill säga om utgående torrhalten är

högre än inkommande torrhalten på massan. Ifall situationen är den motsatta subtraheras vätska bort från tvättvätskeflödet. Resultatet från balansräkningen presenteras i resultatdelen.

7.6 Modell för filtratets torrhalt

För att få en indikator på ifall filtratets torrhalt kunde höjas genom att sänka på tvättvätskeflödet till syrgasblekningens DD-tvätt gjordes en enkel modell för att beskriva bruntvättsavdelningen. Samma data som användes vid effektivitetstestet används också i den här modellen. För att beskriva tvättvätskeflödena beräknades ett förhållande mellan tvättfaktorn i syrgasblekningens DD-tvätt och tvättfaktorn i de övriga tvättarna. Förhållandet antas vara linjärt inom vissa gränser. Gränserna kan fås från att anpassa en skild modell som beskriver ett linjärt förhållande mellan filtratets COD-nivå och torrhalt. Principen för hur ett linjärt förhållande mellan tvättarnas tvättfaktorer är relativt enkel. I en idealsituation tillförs färskvatten endast till syrgasblekningens DD-tvätt vilket innebär att det finns matematiska förhållanden mellan den och de övriga tvättarnas tvättfaktorer. I figur 26 är syrgasblekningens DD-tvätt, urvattnarna och deras tvättfaktorer utritade. För att beskriva det linjära förhållandet mellan tvättfaktorerna kan ekvation 25 användas. Vid modellering kan förhållandet användas för att beskriva den optimala färskvattentillförseln till systemet. Eftersom förhållandet är konstant kan syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor multipliceras med det beräknade tvättvätskeförhållandena (TF) för att beräkna nya tvättfaktorer till de övriga tvättarna. I ekvation 25 beskrivs tvättfaktorerna för syrgasblekningens DD-tvätt och urvattnarna, samma ekvation gäller för alla tvättar i systemet. I ekvation 25 stå $V_{2,u}$ för urvattnarnas tvättfaktor och V_{2,O_2DD} står för syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor.

$$TF = \frac{V_{2,u}}{V_{2,O_2DD}}. \quad (25)$$



Figur 26. Tvättfaktorn V_2 för urvattnarna och syrgasblekningens DD-tvätt.

7.6.1 Anpassande av modell för COD-nivå och torrsubstans i filtraten

Vid effektivitetstestet analyserades både filtratens COD-nivå och torrsubstans. För att bestämma sambandet mellan filtratets COD-nivå och dess torrsubstans används linjär regression. Det har visat sig att torrsubstansen i filtrat korrelerar relativt bra med COD-nivån (Kopra, et al., 2010). Från varje filtratprov från effektivitetstestet kan COD-nivån ritas upp mot samma provs torrsubstans. Eftersom proven togs vid olika tvättskeden fås punkter utspridda över ett större område och en linje kan anpassas till dessa punkter. I figur 27 ses korrelationen mellan filtratens COD-nivå och torrsubstans. Korrelationen är specifik för barrlinjens bruntvätt.

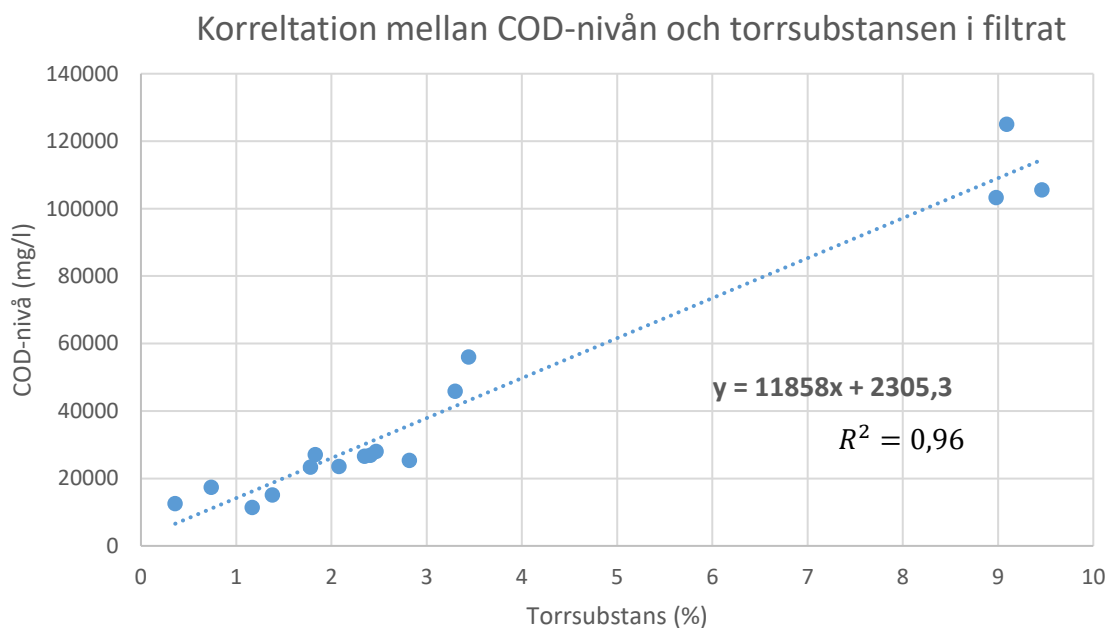
Vid en modell kan korrelationen mellan filtratets COD-nivå och torrhalten användas för att först och främst ange en teoretisk gräns för vad torrhalten maximalt kan vara. Eftersom COD-nivån och filtratens torrhalt korrelerar linjärt är det möjligt att beräkna hur mycket torrhalten i filtraten ökar då färskvatten till tvättavdelningen minskas. Man kan beräkna ut den totala mängden upplöst material som finns i filtraten om en förenkling antas där både torrsubstansen och vätskan har samma densitet. Vätskans densitet antas vara samma som vattnets. Filtratens COD-nivåer är kända från effektivitetstestet, vilket gör att torrsubstansen som viktprocent av filtraten kan beräknas med hjälp av korrelationen i figur 27. Från de flesta provtagningarna i effektivitetstestet analyserades även torrsubstansen i filtraten och resultaten kan användas direkt. Med ekvation 26 kan mängden torrsubstans per lufttorkat ton massa beräknas. I ekvation 26 står tds för ton torrsubstans, DS är torrsubstans i viktprocent i filtraten och V_2 är tvättfaktorn.

$$\text{tds}\left(\frac{\text{tds}}{\text{ODt}}\right) = \frac{\text{DS}(\%)}{100} V_2 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ODt}}\right). \quad (26)$$

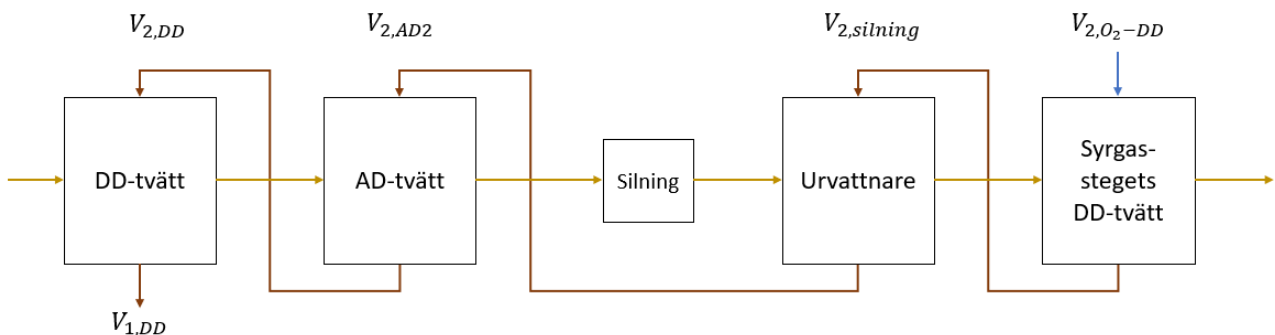
Då massan av torrs substans per absolut ton massa har beräknats kan resultatet användas för att bestämma vad den nya torrs substansen i viktprocent till filtraten blir vid ändring av tvättfaktorn. Ekvation 27 beskriver torrs substansen i viktprocent efter att tvättfaktorn har förändrats. I ekvation 27 står underindexeringen ny för den nya beräknade torrs substansen eller tvättfaktorn.

$$DS_{ny}(\%) = \frac{tds(\frac{tds}{ODt})}{V_{2,ny}(\frac{m^3}{ODt})} \quad (27)$$

Räkneoperationerna kan utföras på alla tvättar i systemet och slutligen kan de beräknade torrs substanserna adderas ihop, vilket resulterar i en total torrs substans i utgående filtrat från den första DD-tvätten. I Figur 28 är tvättarna och deras tvättfaktorer utritade.



Figur 27. Det linjära sambandet mellan filtratens COD-nivå och torrhalt.



Figur 28. Ett flödesschema över bruntvättens tvättfaktorer. Tvättfaktorn betecknas med V_2 .

7.6.2 Torrhaltsökning i filtraten för att minska indunstningens belastning

Filtratens torrhalt ökar från bruntvätten vilket också leder till att svartlutens torrhalt till indunstningen ökar. För att enkelt beskriva fenomenet som uppstår då filtraten från bruntvättens torrhalt ökar kan ett linjärt samband mellan filtratens torrhalt och svartlutens torrhalt antas förekomma. Från SuperBatch-kokeriet kan svartlutsflödet till indunstningen fås från ett årsmedelvärde från processtyrningssystemet. Svartlutens torrhalt mäts både med en uppkopplad torrhaltsmätare och vart annat dygn genom laboratorieanalys av ett svartlutsprov. För att sedan få det linjära sambandet mellan torrhaltsökningen i filtraten och svartluten måste förändringen beräknas procentuellt. Efter att den procentuella torrhaltsökningen har beräknats kan den samma procentuella förändringen beräknas för svartlutens torrhalt. Genom det här kan vätskefasens volymmässiga minskning beräknas, om ett antagande görs där samma totala volym svartlut flödar till indunstningen oberoende av torrhalten. Eftersom vattnets förångningsentalpi är ett känt värde kan även en energibesparing beräknas för svartlutens torrhaltsökning. Alla beräkningar för besparingarna på indunstningen vid en torrhaltsökning i filtraten är relativt enkla och linjära procentberäkningar. I verkligheten är även de här sambanden inte linjära, men vid endast små förändringar på ungefär 1 % håller modellen och riktgivande resultat kan observeras.

8 Resultat och diskussion

I kapitlet för resultat och diskussion kommer resultaten från effektivitetstestet, balansberäkningarna för bruntvätten och modellen för filtratens torrhalt att både presenteras och diskuteras.

8.1 Bruntvättens effektivitet

Effektivitetstestet utfördes på bruntvättens fyra tvättar, d.v.s. DD-tvätten efter kokeriet, AD 2-tvätten, urvattnarna efter silningen och syrgasblekningens DD-tvätt. Provtagningar från filtraten och massan utfördes under två dagar med två provtagningsserier per dag. En provtagningsserie består av prov från tvättvätskan, filtraten, inkommande och utgående massan för samtliga tvättar. Som redan tidigare diskuterats var produktionen relativt jämn under provtagningstillfällena. I tabell 1 visas en sammanfattning för COD-tvättförlusterna i bruntvätten. Som visas i tabellen minskas COD-nivån i bruntvättssystemet från 3300 kgO₂/ODt till ungefär 23 kgO₂/ODt i den utgående massan från syrgasblekningens DD-tvätt. En COD-överföring på 23 kgO₂/ODt till blekeriet är relativt bra. Eftersom datan som används vid beräkningarna för tvättförluster består av ett medeltal från fyra prov finns det risk att resultaten blir en aning missvisande. För att få mera pålitliga resultat borde flera provtagningar ha utförts. Resultaten kan i alla fall anses vara riktgivande.

Tabell 1. COD-tvättförluster i bruntvätten.

	Första DD-tvätten (kgO ₂ /ODt)	AD 2 (kgO ₂ /ODt)	Urvattnare 2/1 (kgO ₂ /ODt)	Urvattnare 2/2 (kgO ₂ /ODt)	Syrgasblekningens DD-tvätt (kgO ₂ /ODt)
COD-nivå i inkommande massa	3306	525	385	355	185
COD-nivå i utgående massa	641	460	80	75	23

8.1.1 Den första DD-tvättens effektivitet

Effektiviteten för den första DD-tvätten beräknades med data från tabell 2. Den utgående massatorrhalten beräknades om, eftersom provtagningen gjordes efter utspädningsskedet till AD-tvätten. Vid beräkning av massans torrhalt för den utgående massan användes produktionshastigheten från bruntvättens processtyrningssystem. Produktionshastigheten är ett medeltal som gör att tillförlitligheten av resultaten minskar. Även COD-nivån i den utgående massan korrigerades med balansberäkningar av samma orsak, som då massans torrhalt beräknades om. På grund av små variationer och provtagningsställets placering uppstår lätt resultat som inte kan användas. Vid den första DD-tvätten var COD-nivån i de utgående filtraten på en för hög nivå och därför beräknades y_1 om med hjälp av en balans eftersom de övriga COD-nivåerna, torrhalterna och tvätfaktorn var kända. För att avgöra om COD förhöll sig på logiska nivåer beräknades en totalbalans där den totala mängden inkommande COD jämförs mot den totala mängden utgående COD. Resultatet från COD-balansen är -1,7 % vilket innebär att COD-nivåerna i filtraten från provtagningarna förhåller sig bra och trovärdiga.

Tabell 2. Medeltal av provtagningsresultaten från den första DD-tvätten.

	Torrhalt på massan (%)	COD-nivå (mg/l)	Filtratens torrhalt (%)
Inkommande massa x_0	4,8	119 496	-
Utgående massa x_1	11,9	62 000	-
Inkommande filtrat y_2	-	50 950	3,45
Utgående filtrat y_1	-	107 718	9,13

Provtagningsresultaten i tabell 2 användes för att beräkna effektiviteten. Flödena för absolut torrmasa har beräknats från torrhalterna på massan. Tvättfaktorn kommer från fabriksens processtyrningssystem. Utspädningsfaktorn har beräknats. Med de just uppräknade variablerna har E-effektiviteten, E_{10} -effektiviteten, förträngningsförhållandet och det modifierade förträngningsförhållandet beräknats. I tabell 3 presenteras resultaten för den första DD-tvättens effektivitet. Resultaten från effektivitetstestet tyder på att DD-tvätten fungerar relativt bra. Ur fabrikssynvinkel anses en utspädningsfaktor mellan 1 – 3 m³/ODt vara normal. E_{10} -effektiviteten ligger på 4 ideala blandningssteg vilket också är ett realistiskt tal. Både förträngningsförhållandet och det modifierade förträngningsförhållandet ligger närmare 0,9 vilket tyder på att tvätten klarar av att dränera fibersuspensionen.

8.1.2 AD 2-tvättens effektivitet

Provtagningarnas resultat från AD-tvätten presenteras som medeltal i tabell 4. Provtagningarna av massatorrhalterna lyckades bra från AD-tvätten vilket betyder att resultaten från laboratorieanalyserna inte har behövts räknas om med balanser. Ett undantag är y_1 COD-nivån som beräknats genom en balans av samma skäl som för den första DD-tvätten. Vid AD 2-tvätten är det möjligt att köra förbi tvättvätska vilket även görs. Det här påverkar resultaten från analyserna i viss mån.

Tabell 3. Resultatet från effektivitetstestet på den första DD-tvätten.

Ingående massans flöde, L_0 (m^3/ODt)	20,0
Utgående massans flöde, L_1 (m^3/ODt)	7,4
Tvättfaktor, V_2 (m^3/ODt)	10,1
Utspädningsfaktor, DF (m^3/ODt)	2,7
E	1,2
E_{10}	4,0
Förträngningsförhållande	0,88
EDR	0,86
COD-balans (%)	-1,7

I tabell 5 presenteras resultaten från effektivitetsberäkningarna. I beräkningarna har medeltal från provtagningsserierna använts för att få ett så representativt resultat som möjligt. Tvättfaktorn har beräknats genom medeltal från tvättvåskans flödesmätare och produktionshastigheten från processtyrningssystemet under den tid som provtagningen genomfördes. Utspädningsfaktorn är relativt låg, vilket antas bero på att en viss del av filtraten från efterföljande tvätt körs förbi AD-tvätten och direkt till den första DD-tvätten. E_{10} -effektiviteten är på en acceptabel nivå för en atmosfärisk diffusör. Förträngningsförhållandet och det ekvivalenta förträngningsförhållandet är lite lägre för AD-tvätten jämfört med den första DD-tvätten. Eftersom massans utgående torrhalt är lägre än massans inkommande torrhalt samtidigt som förträngningsförhållandet är en aning lägre, kan det här vara en indikation på att sikten inne i AD-tvätten är stockade. COD-balansen ligger på 1,8 % vilket definitivt ligger inom rimliga gränser för att resultaten ska vara representativa.

Tabell 4. Tabell över medeltal av provtagningsresultaten från AD-tvätten.

	Torrhalt på massan (%)	COD-nivå (mg/l)	Filtratens torrhalt (%)
Inkommande massa x_0	10,3	55 336	-
Utgående massa x_1	8,1	30 491	-
Inkommande filtrat y_2	-	26 467	2,3
Utgående filtrat y_1	-	49 291	3,5

Tabell 5. Sammanfattning av resultaten för effektivitetsberäkningarna för AD-tvätten.

Ingående massans flöde, L_0 (m^3/ODt)	8,7
Utgående massans flöde, L_1 (m^3/ODt)	11,3
Tvättfaktor, V_2 (m^3/ODt)	11,6
Utspädningsfaktor, DF (m^3/ODt)	0,3
E	0,2
E_{10}	4,3
Förträngningsförhållande	0,86
EDR	0,73
COD-balans (%)	1,8

8.1.3 Urvattnarnas effektivitet

I tabell 6 presenteras de sammanfattade analysresultaten från urvattnare 2/2. På grund av mätfel eller provtagningsmisslyckande är urvattnare 2/1 analysresultat så opålitliga att de inte presenteras i detta kapitel. Resultaten från analyserna hittas i bilaga 9. Även i resultaten från laboratorieanalysen för proven från urvattnare 2/2 förekommer avvikelser som gör att representativa effektivitetsberäkningar är svåra att genomföra. Orsaken till att provsvaren från båda urvattnarna är opålitliga kan bero på hur provtagningen av inkommande massa till urvattnarna utfördes. Proven av

den inkommande massan togs direkt från inloppslådorna. I inloppslådorna är fibersuspensionen väldigt utspädd utan att vara fullständigt homogent blandad, det här betyder att lokala knippen av flockade fibrer kan förekomma till viss mån. Om så är fallet påverkar det COD-nivån. En annan faktor som påverkar proven från inloppslådorna är hur bra dränering som förekommer i fibermattan. Ifall dräneringen inte är perfekt innebär det att tvättvatten kan rinna av fibermattan mot inloppslådan. Eftersom tvättvattnet har en lägre COD-nivå än fibersuspensionen späder det ut COD-nivån i fibersuspensionen i inloppslådorna. På grund av ojämnheter i massan förekommer detta fenomen i varierande grad vilket betyder att COD-nivåerna kan variera en hel del vid olika tidpunkter. Från laboratorieanalysen ses att torrhalten på den utgående massan från urvattnare 2/1 är relativt hög, vilket innebär att förträngningen ändå fungerar relativt bra. På grund av stora variationer av COD-nivåer i inkommande filtraten y_2 har en balansberäkning använts för att beräkna den. Utgående filtratens prov togs från urvattnarnas filtratcistern. I filtratcisternen är båda urvattnarnas filtrat blandade som också påverkar resultaten negativt. Urvattnarna antas fungera relativt lika bra men variationer förekommer. Eftersom det antas finnas små variationer mellan urvattnarna så påverkar skillnaderna också COD-nivåerna i filtraten. Även det att filtratcisternen har en stor volym påverkar resultaten. Filtratproven från filtratcisternen antas därför vara missvisande.

Tabell 6. Laboratorieanalyserna av massa, tvättvätska och filtrat från urvattnare 2/2.

	Torrhalt på massan (%)	COD-nivå (mg/l)	Filtratens torrhalt (%)
Inkommande massa x_0	1,8	26 895	-
Utgående massa x_1	17,0	13 951	-
Inkommande filtrat y_2	-	11 923	0,97
Utgående filtrat y_1	-	25 395	2,17

I Tabell 7 presenteras resultaten från effektivitetsberäkningarna för urvattnare 2/2. Resultaten för urvattnarna är som tidigare nämnts missvisande till en okänd nivå. Utspädningsfaktorn verkar vara hög och på gränsen till orealistiskt hög. E-effektiviteten är på en mer eller mindre acceptabel nivå men när E_{10} -effektiviteten beaktas närmare observeras ett ovanligt högt värde för en urvattnare. E_{10} -effektiviteten för urvattnare 2/2 ser ut att vara högre än en DD-tvätts effektivitet och det är orealistiskt. Förträngningsförhållandet och det ekvivalenta förträngningsförhållandet är på en väldigt hög nivå.

Att förträngningsförhållandet och EDR är högt för en urvattanare är naturligt eftersom förträngningstvättning förekommer i hög grad i denna typ av tvätt. COD-balansräkningen är på en rimlig nivå trots att de övriga resultaten antas vara missvisande.

Tabell 7. Effektivitetsresultaten från urvattnare 2/2.

Ingående massans flöde, L_0 (m^3/ODt)	53,6
Utgående massans flöde, L_1 (m^3/ODt)	4,9
Tvättfaktor, V_2 (m^3/ODt)	10,1
Utspädningsfaktor, DF (m^3/ODt)	5,2
E	1,9
E_{10}	4,6
Förträngningsförhållande	0,93
EDR	0,95
COD-balans (%)	5,2

8.1.4 Syrgasblekningens DD-tvätts effektivitet

I tabell 8 presenteras laboratorieanalyserna av provtagningsserierna från syrgasblekningens DD-tvätt. Även i det här fallet användes en balansräkning för att beräkna COD-nivån i det utgående filtratet. Provtagningen av utgående massa från DD-tvätten togs vid provtagningsplatsen efter skruvutspädningen. Det här ledde till att en balansräkning användes för att först beräkna massans torrhalt före utspädningen. Även COD-nivån korrigerades med en balansräkning för att korrigera nivån till vad den var före utspädningen. COD-balansen mellan totalamängden COD in till tvätten mot totala mängden COD ut från tvätten är 24 % från analyserna. Det här betyder att det finns risk för att resultaten är missvisande. Det finns många olika faktorer som i detta fall har kunnat påverka resultatet. En orsak till att skillnaden mellan den totala inkommande COD-nivån och den totala utgående COD-nivån är väldigt stor kan bero på en eller flera misslyckade provtagningar. Eftersom provtagningen av utgående massa togs efter skruvutspädningen kan detta innebära att lokala variationer förekommer. Risken för att massans torrhalt förändras vid själva provtagningen av utgående massa är också stor.

I tabell 9 presenteras resultaten från effektivitetsberäkningarna av syrgasblekningens DD-tvätt. Tvättfaktorn är beräknad från bruntvättens produktionshastighet och tvättvätska till tvätten. Medeltalen som använts för att beräkna tvättfaktorn har använts från den tid provtagningsserierna utfördes. Tvättvätskan till syrgasblekningens DD-tvätt består av färskvatten och vid optimal drift är det endast här färskt vatten kommer in till bruntvätten. Tvättfaktorn ligger på 10,2 m³/ODt vilket är en acceptabel nivå. Den beräknade utspädningsfaktor är 4,3 m³/ODt, det här börjar vara i övre kant för utspädningsfaktor. E₁₀-effektiviteten för DD-tvätten är 3,6 vilket kan anses vara ganska låg jämfört med den första DD-tvätten. Förträngningsförhållandet och EDR är på en bra nivå för tvätten eftersom de båda värdena ligger nära 0,9. Som redan tidigare nämnts det totala COD-nivåförhållandet mellan inkommande och utgående flödena över 24 %. De här leder till att resultaten av effektivitetsberäkningarna för syrgasblekningens DD-tvätt kan vara missvisande och svåra att bedöma.

Tabell 8. Laboratorieanalyserna av massa, tvättvätska och filtrat från syrgasblekningens DD-tvätt.

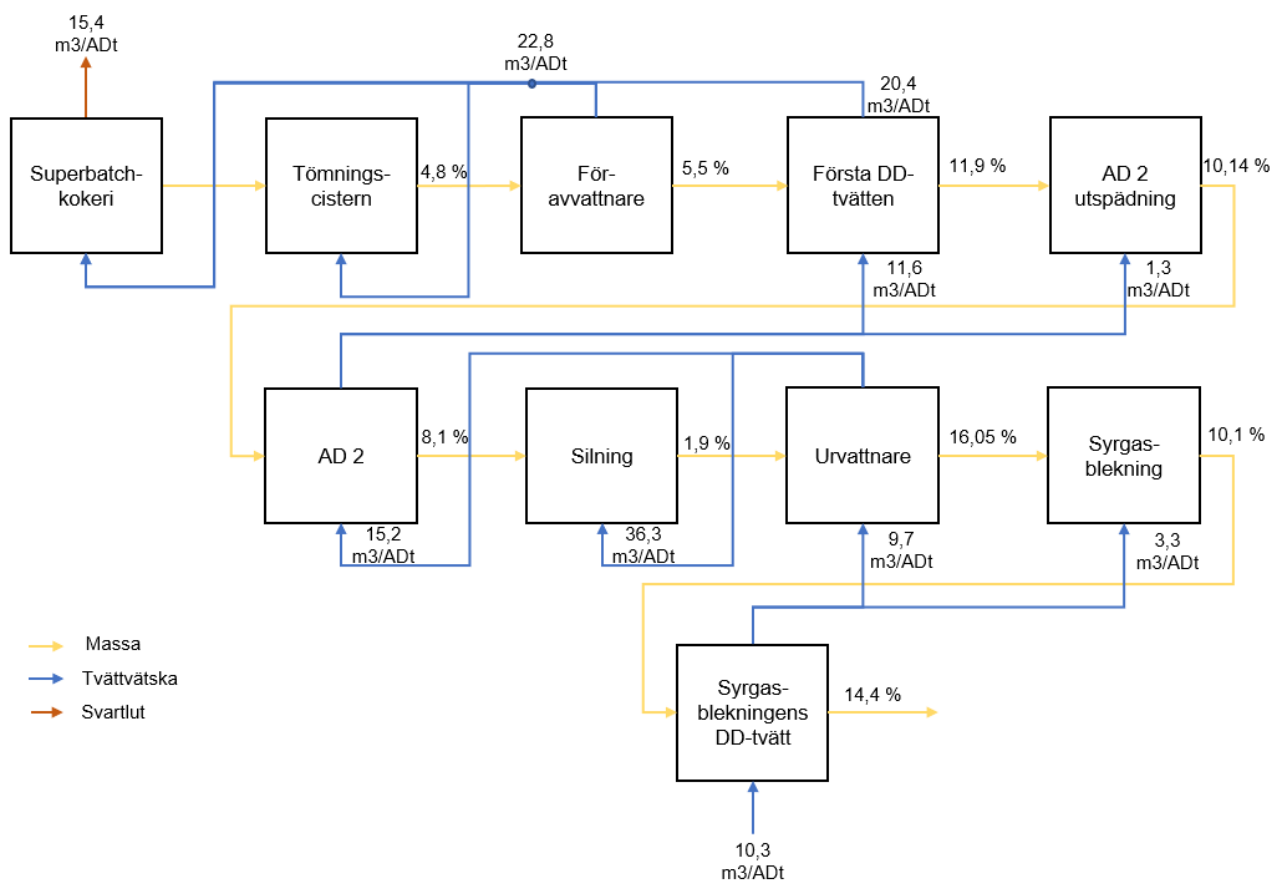
	Torrhalt på massan (%)	COD-nivå (mg/l)	Filtratens torrhalt (%)
Inkommande massa x_0	10,4	14 184	-
Utgående massa x_1	14,4	2278	-
Inkommande filtrat y_2	-	255	-
Utgående filtrat y_1	-	8641	0,78

Tabell 9. Resultaten från syrgasblekningens DD-tvätts effektivitetsberäkningar.

Ingående massans flöde, L_0 (m^3/ODt)	8,6
Utgående massans flöde, L_1 (m^3/ODt)	5,9
Tvättfaktor, V_2 (m^3/ODt)	10,2
Utspädningsfaktor, DF (m^3/ODt)	4,3
E	1,4
E_{10}	3,6
Förträngningsförhållande	0,89
EDR	0,86
COD-balans (%)	24,4

8.2 Balansräkning över bruntvättens vätskefas

En balansberäkning över bruntvättens vätskefas konstruerades. För att kontrollera att flödena i effektivitetstestet stämmer och för att visa hur mycket svag svartlut som pumpas vid en viss färskvattenmängd till bruntvätten gjordes en balansberäkning. Beräkningarna grundar sig till viss del på samma data som användes vid effektivitetsberäkningarna. Data används också från processtyrningssystemet och är till stor del från samma tidsperiod som provtagningsserierna för effektivitetstestet utfördes. I balansberäkningen användes processtyrningssystemets tvättfaktorer. Tvättfaktorerna från processtyrningsprogrammet avviker en aning jämfört med de beräknade tvättfaktorerna i effektivitetstestet. I figur 29 presenteras resultatet av balansräkningen som ett



Figur 29. Resultaten från balansräkningen av bruntvättens vätskefas presenterade i ett flödesschema.

förenklat flödesschema över bruntvätten och superbatcheskokeriet. De viktigaste observationerna från balansräkningen diskuteras i följande stycke.

Den utgående massans torrhalt från superbatcheskokeriet varierar mycket. Det här beror till stor del på fliskvalitet och leder till att det är svårt att räkna ut både massans torrhalt och vätskemängden i massan före tömningscisternen. Efter tömningscisternen finns en flödesmätare som har använts för att beräkna ett medeltal för massans torrhalt i det utgående massaflödet. I flödesschemat i figur 29 ses att tvättluten som dränerats från den första DD-tvätten är 22,8 m³/ADt. Förenklat kan sägas att tvättluten från den första DD-tvätten blandas med dränerad lut från föravvattnaren för att sedan pumpas till utspädningen i tömningscisternen eller tillbaka till kokeriet. Efter kokeriet återvinns luten samtidigt som energi genereras. Efter silningsavdelningen dräneras massan i urvattarna till en torrhalt på ungefär 16 %, baserat på provtagningarna från effektivitetstestet. Det här betyder att ungefär 36,6 m³/ADt återcirkuleras för att späda ut massan både i silningsavdelningen och före urvattarna. De återstående 15,2 m³/ADt pumpas till AD-tvätten. I effektivitetstestet beräknades att AD-tvättens tvätfaktor är 11,6 m³/ODt vilket är ungefär 10,4 m³/ADt. Det här indikerar att en ansevärd mängd filtrat pumpas förbi AD-tvätten. Som tidigare nämnts i avhandlingen är målet i en bruntvätt att återanvända filtraten i varje tvätt i bruntvätten för att uppnå så effektiv tvätt som möjligt. Med

andra ord finns det skäl att göra en förbättring av AD-tvättens drift, baserat på denna balansräkning. Vanligtvis ska skillnaden mellan den inkommande och utgående torrhalten på massan för en AD-tvätt vara liten. I detta fall är utgående torrhalten på massan nästan 2 % högre och det kan bero på att ett mekaniskt problem eller begränsning förekommer i AD-tvätten.

Vid den produktionshastighet som förekom vid effektivitetstestet var svartlutsflödet till återvinningen 15,4 m³/ADt. Svartlutsflödet beräknades från produktionshastigheten för bruntvätten och flödesmätaren till indunstningsanläggningen. I balansberäkningen användes en tvättfaktor på 10,3 m³/ADt till syrgasblekningens DD-tvätt. Detta är en stor skillnad från vad som användes i tvätteffektivitetsberäkningarna där tvättfaktorn är 10,2 m³/ODt vilket motsvara ungefär 9,2 m³/ADt. Skillnaden kommer från att produktionshastighetsmätarna visar olika i bruntvätten och syrgasblekningen. Det här resulterar i att då styrprogrammet beräknar tvättfaktorn, uppkommer ett avvikande värde. Produktionshastighetsmätarna baserar hastigheten på massans torrhalt och flödesmätare i massalinen. Det här kan bero på att någon av de uppkopplade flödesmätarna eller torrhaltsmätarna kan visa fel vilket leder till att styrprogrammet visar olika produktionshastigheter för bruntvätten och syrgasblekningen. Hur som helst inverkar inte de varierande produktionshastigheter på balansräkningens slutsatser i någon större utsträckning, eftersom felet är under 10 %. Vid andra typer av beräkningar är det viktigt att känna till variationen ifall till exempel något ska beräknas på årsbasis och jämföras mellan dessa två avdelningar. Beräkningarna finns i bilaga 7.

8.3 Resultatet av modellen för torrsustans i filtraten

För att få en uppfattning om hur torrhalten i filtraten påverkas av mängden färskvatten till bruntvätten utvecklades en förenklad modell för sambandet. Som tidigare nämnts antas ett linjärt samband existerar mellan COD-nivån och torrhalten i filtraten. Det här kan utnyttjas också om alla tvättfaktorer antas vara linjärt beroende av DD-tvätten efter syrgasblekningens tvättfaktor, det vill säga av mängden färskvatten till bruntvätten. För att modellen ska gälla har en del förenklingar och samband antagits, i verkligheten är processen mer komplex. Resultaten från beräkningarna är riktgivande. I tabell 10 presenteras resultaten från den optimerade modellen.

Den ursprungliga mängden färskvatten som förs till bruntvätten är 10,3 m³/ODt i modellen. I kolumnen "förhållanden till färskvattenmängd" i tabell 10 beskrivs förhållandet mellan syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor och de andra tvättfaktorerna i systemet. Förhållandet till urvattnarna är 0,99, AD-tvätten 1,13 och den första DD-tvätten 0,98. Det vill säga för att få AD-tvättens tvättfaktor från syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor multipliceras den med 1,13 vilket ger 11,6 m³/ODt. I kolumnen "torrhalt i utgående filtrat" beskrivs andelen torrsustans i den specifika tvättens utgående filtrat som procent av vikten. Utgående från torrsustansandelen i filtratet har mängden torrsustans per ton torr massa beräknats. I tabell 10 presenteras hur mycket torrsustans som adderas vid varje tvätt till filtratet per ton torr massa. I den sista spalten presenteras storlekarna

på tvättfaktorerna efter en optimering av mängden färskvatten till bruntvätten. I följande stycke beskrivs modellens optimeringssteg.

I den experimentella delen presenterades sambandet mellan COD-nivån och torrsubstansen i filtraten i figur 27. Eftersom COD-nivån från kokeriet är en känd parameter kan den användas för att beräkna vad den maximala torrhalten i filtraten kunde vara ifall en förenkling antas där COD-nivån i massan från kokeriet till bruntvätten inte påverkas av förändringar i mängden färskvatten. I effektivitetstestet uppmättes ett medeltal för COD-nivån i massan från kokeriet på ungefär 119 500 mgO₂/l. Ekvationen i figur 27 kan skrivas om till ekvation 28. Med ekvation 28 kan torrhalten beräknas utgående från COD-nivån. Med COD-nivån från kokeriet fås en torrhalt på 9,9 %. Torrhalten på 9,9 % är en gräns för vad som maximalt kan uppnås från ett idealt fungerande bruntvättssystem. Genom att iterera fram torrhalter i modellen med förändringar av syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor uppnås den maximala gränsen då tvättfaktorn är 9,7 m³/ODt. Det betyder att potentiellt kan färskvattenanvändningen minskas med 0,6 m³/ODt vilket redan är en betydande andel på årsbasis. En färskvattenminskning på 0,6 m³/ODt leder då till en torrhaltsökning från 9,3 % till 9,9 % i filtraten från den första DD-tvätten. Beräkningarna för torrhalten visas i bilaga 5. Det här leder till att även torrhalten till indunstningen ökar, vilket kan ge inbesparningar i energimängden som krävs för att indunsta svartlut. I ekvation 28 står ds för torrhalt och COD är COD-nivån i filtraten. Konstanterna i ekvation 28 kommer från det linjära sambandet mellan filtratens torrhalt och COD-nivå som visas i figur 27.

$$ds = \frac{\text{COD}}{11858} - 2305,3/11858. \quad (28)$$

I modellen för filtratens torrhalt i bruntvätten används flera förenklingar och antaganden. I verkligheten är processen betydligt mer komplex och de linjära sambanden som används i modellen gäller inte i lika hög grad. Avsikten med modellen är att ge en bild av en hur stor förbättring som kan uppnås redan genom enkla förändringar. I modellen beaktas inte skumbildning. Skumbildning tas upp i kapitlet för skumdämpare i litteraturdelen. Då torrhalten ökar finns det även risk för att skumbildningen ökar vilket kan orsaka problem i tvättarna. Mera skum kan i värsta fall resultera i en sämre tvätteffektivitet. En annan faktor som inte beaktas i modellen är tvättarnas mekaniska skick. Ifall det finns mekaniska brister och slitage som uppkommit med tiden finns det risk att en minskning av färskvatten leder till att en tvätt som redan fungerar dåligt börjar fungera ännu sämre. I verkligheten återkopplas även mängden torrhalt till bruntvätten från kokeriet eftersom svartluten återanvänds i koken. Det här gör att då COD-nivån i filtraten från den första DD-tvätten ökar kommer också COD-nivån i massans vätskefas från kokeriet också att öka. Arbetet omfattar inte hur torrhalten i suspensionens vätskefas från kokeriet påverkas av att torrhalten i filtraten från bruntvätten ökar.

Tabell 10. Resultaten från modellen för torrsubstans i filtraten från bruntvatten.

	Tvättfaktorer	Förhållande till färskvattenmängd	Uppmätt torrhalt i utgående filtrat före iteration	Torrsubstans per ton massa	Optimerade tvätt-faktorer
	m ³ /ODt		%	tds/ODt	m ³ /ODt
Syrgasblekningens DD-tvätt	10,3	1,00	1,0	0,11	9,7
Urvattnarna	10,2	0,99	2,2	0,12	9,6
AD-tvätten	11,6	1,13	3,5	0,14	10,9
Den första DD-tvätten	10,1	0,98	9,1	0,57	9,5

Svartlutsflödet är ungefär 666 m³/h från barrlinjen till indunstningen. Årsmedelvärde för torrhalten från den uppkopplade torrhaltsmätaren är ungefär 13,2 %. Den procentuella förändringen för torrhalten från filtratens torrhaltsmodell är en 6,5 procents ökning. Om ett linjärt samband antas gälla leder det här till att svartlutens torrhalt ökar till 14,1 %. Det här betyder samtidigt att på samma totala volymetriska svartlutsflöde till indunstningen består flödet av ungefär 43 m³/h mindre mängd vatten. Om de årliga driftstimmarna antas vara 8 000 timmar leder det här till en minskning på 347 000 m³ vatten att indunsta. Energimässigt är det här betydande mängder. Medelvärdet för energin att indunsta 1 kg vatten är 390 kJ/kg. Då det här värdet multipliceras med den inbesparade mängden vatten fås ett resultat på ungefär 37 500 MWh/år, vilket är energimängden som kan sparas in. I bilaga 8 visas beräkningarna för minskningen av indunstningens energiförbrukning. I tabell 11 visas resultaten från beräkningarna av energibesparingar vid indunstningen.

Tabell 11. Inbesparingar av energi vid indunstningen om filtratens torrhalt från bruntvätten ökar.

Flöde från barrlinjen	666	m3/h
Online torrhalt	13,2	%
Original torrhalt från bruntvätt	9,3	%
Optimerad torrhalt från BT	9,9	%
Torrhaltsökning i %	6,5	%
Svartluts torrhalt	14,1	
Minskning av vätskefas	43	m3/h
Årlig minskning (8000h)	346 507	m3/år
Förångningsenergi	390	MJ/m3
Energibesparing	135 137 808	MJ/år
Energibesparing	37 538	MWh/år

8.4 Skillnader i barrlinjens och björklinjens tvätteffektiviteter

Fiberlinjernas bruntvättar kan jämföras med varandra, men samtidigt är det svårt att jämföra specifika tvättar med varandra när det gäller E_{10} -faktorn och utspädningsfaktorn. Björklinjens bruntvätt uppgraderades under år 2020. I samband med uppgraderingen utförde Valmet en effektivitetsundersökning. Undersökningen som Valmet utförde beaktar inte hela bruntvättområdet. Eftersom björklinjens effektivitetsundersökning är sekretessbelagd är det inte möjligt att jämföra testen i större utsträckning. En indexering har gjorts av de viktigaste prestandaparametrarna från björklinjen i förhållande till samma prestandaparametrar på barrlinjen. De huvudsakliga prestandaparametrarna som jämförs med varandra är utspädningsfaktorn, Nordéns effektivitetsfaktor med 10 procents utgående massatorrhalt och COD-överföringen.

I effektivitetstestet från björklinjen är AD-tvätten inte inkluderad. Det här betyder att det är svårt att jämföra den första DD-tvätten på björklinjen med den första DD-tvätten på barrlinjen. Samtidigt är det också svårt att jämföra björklinjens första DD-tvätt med barrlinjens AD-tvätt. På björklinjen fungerar AD-tvätten och DD-tvätten som en helhet. För att i alla fall få en bild av hur bra tvättarna förhåller sig till varandra gjordes en procentuell jämförelse i hur bra björklinjens DD-tvätt fungerar både i förhållande till barrlinjens första DD-tvätt och AD-tvätt. I tabell 12 ses resultaten av jämförelsen. På samtliga jämförelsepunkter ses att den första DD-tvätten skulle fungera betydligt bättre än barrlinjens tvättar. Den mest intressanta jämförelsepunkten är COD-överföringen. Då björklinjens första DD-tvätt jämförs med barrlinjens AD-tvätt ses att COD-överföringen från DD-tvätten endast är 25 % av AD-tvätten. De här punkterna kunde tänkas vara relativt jämförbara. Det är därför möjligt att det finns förbättringsmöjligheter på barrlinjens AD-tvätt vilket redan tidigare har

konstaterats. I tabell 12 betyder ett COD-överföringstal under 100 % att björklinjen presterar bättre än barrlinjen och om förhållandet är över 100 % presterar barrlinjen bättre än björklinjen. För utspädningsfaktorn och E_{10} -faktorn gäller det motsatta. Det vill säga en DF eller E_{10} över 100 % betyder att björklinjen presterar bättre.

Den första tvättpressen på björklinjen kan jämföras med barrlinjens urvattnare. Massan avvattnas och tvättas efter massasilningen i de här tvättarna. Vid betraktande av utspädningsfaktorn och E_{10} -faktorn ses att björklinjens första tvättpress skulle vara mindre effektiv än barrlinjens två urvattnare. Samtidigt observeras än lägre COD-överföring från tvättpressen än från urvattnarna. Det här beror högst sannolikt på att de tidigare tvättarna i björklinjen avlägsnar COD effektivt från massan, vilket leder till COD-nivån är relativt låg efter tvättpressen. Även i detta fall finns det en hel del olikheter mellan en urvattnare och en tvättpress vilket leder till att jämförelsetalen är svåra att jämföra.

Tvättningen efter syrgasblekningen på björklinjen skiljer sig från barrlinjens motsvarande skede. Efter syrgasblekningen på björklinjen tvättas massan först i en DD-tvätt och sedan i en tvättpress efter DD-tvätten. Det här gör att en mindre belastning sätts på de enskilda tvättarna samtidigt som helheten ger ett bättre slutresultat. För att korrekt jämföra barrlinjens DD-tvätt efter syrgasblekningen med björklinjens tvättar efter syrgasblekningen borde helheten jämföras i stället för de specifika tvättarna. Det vill säga effektiviteten, utspädningsfaktorn och COD-överföringen för både björklinjens syrgasbleknings DD-tvätt och tvättpress som ett enda jämförelsetal. I tabell 12 jämförs DD-tvätten efter syrgasblekningen på barrlinjen först med björklinjens DD-tvätt efter syrgasblekningen och sedan med tvättpressen efter syrgasblekningen. I tabell 12 visas att effektiviteten är på samma nivå för alla tvättar efter syrgasblekningen på båda fiberlinjerna. Utspädningsfaktorerna är en aning lägre på björklinjen. På björklinjen observeras en bättre COD-överföring till blekeriet från den sista tvätten jämfört med barrlinjens sista tvätt.

Tabell 12. Jämförelse mellan barrlinjen och björklinjens bruntvättsresultat. I tabellen står O₂ för syrgasblekning, HWL för björklinjen och SWL för barrlinjen.

	DF (%)	E ₁₀ (%)	COD- överföring (%)
1:a DD-tvätten på HWL mot 1:a DD-tvätten på SWL	204	173	18
1:a HWL DD-tvätten mot SWL AD-tvätt	2750	160	25
1:a HWL tvättpressen mot SWL urvattnare	50	59	43
HWL O ₂ DD-tvätt mot SWL O ₂ DD-tvätt	91	108	170
HWL O ₂ tvättpress mot SWL O ₂ DD-tvätt	56	97	32

9 Sammanfattning och slutsatser

De områden som påverkas av bruntvätten och de områden som påverkar bruntvätten har behandlats. Samtidigt utfördes ett effektivitetstest över barrlinjens bruntvätt för att visa hur bra tvätten fungerar. Med hjälp av enkla beräkningar och matematiska modeller visas även hur enkla optimeringar kunde förbättra vissa tvättresultat från bruntvätten.

Vid UPM:s fabrik i Jakobstad utfördes ett effektivitetstest för att undersöka hur bra barrlinjens bruntvätt fungerar. Under två dagar utfördes serieprovtagningar för att analysera COD-nivåerna i filtraten och fibersuspensionerna. Även massans torrhalter analyserades. Resultaten från analyserna användes för att beräkna bruntvättens tvätteffektiviteter. I flera fall var det omöjligt att göra provtagningar på rätt ställen och på grund av detta har balansberäkningar gjorts för att få fram representativa resultat att använda i beräkningarna. Effektivitetsberäkningarna visade att tvättarna verkar fungera relativt bra. Från urvattnarna misslyckades provtagningarna vilket ledde till att de beräknade effektiviteterna inte stämmer för dem. I samband med effektivitetstestet noterades att det är en betydande skillnad på inkommande och utgående torrhalter på massan i AD 2-tvätten. Det här kan bero på att siktet är stockat och massan späds ut i stället för att tvättas.

Som stöd till effektivitetstestet gjordes en balansberäkning på bruntvättens vätskefas för att kontrollera att effektivitetstestet stämmer. Motströmsflödet beräknades från varje tvätt med hjälp av att utloppstorrhalterna på massan var kända. Vid balansberäkningen användes en färskvattentillförsel på 10,3 m³/ADt till bruntvätten. Vid den här färskvattentillförseln var svartlutsflödet till indunstningen 15,4 m³/ADt. I balansberäkningen var resultatet för tvättvätskeflöde till AD-tvätten 15,2 m³/ADt samtidigt som den beräknade tvättfaktorn var 11,6 m³/ODt. Det här betyder att en relativt stor andel filtrat körs förbi AD-tvätten.

För att undersöka om torrhalten i svartluten enkelt kunde ökas med att sänka färskvattentillförseln till bruntvätten konstruerades en modell. Modellen beaktar ett linjärt samband mellan syrgasblekningens DD-tvätts tvättfaktor och de andra tvättarnas tvättfaktor. Samtidigt antogs en maximal gräns på 9,9 procents torrhalt i filtraten med hjälp av en korrelation mellan COD- och torrhaltsnivåerna i filtraten. Resultatet blev att en sänkning på 0,6 m³/ODt i färskvattentillförseln skulle ge en torrhaltsökning från 9,1 % till 9,9 %, vilket kan ge betydelsefulla energibesparingar vid indunstningen. Den potentiella energiinbesparingen beräknades vara upp till 37 500 MWh/år. Ifall att energimängden kunde användas till annat som till exempel fjärrvärme skulle det här bli betydelsefulla inkomster.

Avslutningsvis har björklinjens och barrlinjens bruntvättar jämförts med varandra. Ett jämförelsetal som är ett förhållande mellan barrlinjen och björklinjens tvättresultat har beräknats. Tvättarna har olika konstruktioner vilket leder till att de är relativt svårt att jämföra deras tvättresultat. I effektivitetstestet som tidigare gjorts på björklinjen var AD-tvättens effektivitet inte evaluerad. En stor skillnad mellan barrlinjen och björklinjens tvätt efter syrgasblekningen är att björklinjen använder både en DD-tvätt och en tvättpress i stället för bara en DD-tvätt som på barrlinjen. Slutsatsen av jämförelsen är att björklinjen tvättar massan mer effektivt än barrlinjen vid beaktande av utspädningsfaktorn, Nordéns effektivitetsfaktor vid 10 procents utloppstorrhalt på massan och COD-överföringen. Flera indikationer på att AD-tvätten fungerar missgynnsamt har visat sig i effektivitetstestet, balansberäkningarna och även vid jämförelsen av björklinjens och barrlinjens bruntvättar. Det här betyder att i framtiden kunde fokuset ligga på barrlinjens AD-tvätt vid problemlösningar för att effektivisera bruntvätten. I beräkningarna fanns det även utmaningar med att använda olika uppkopplade mätare. Av den här orsaken skulle det därför vara viktigt att systematiskt kalibrera de uppkopplade mätarna i framtiden.

10 Referenser

Andritz, 2021. *ANDRITZ DD-waser*. [www]

Hämtat från: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/fiberline/dd-washer>

[Använd 15 November 2021].

Bajpai, P., 2018. i: P. Bajpai, red. *Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Raw Material and Pulp Making*. 3:e red. Amsterdam: Elsevier, s. 19-53, 313-340.

Bertini, F., 2012. *Brownstock Washing*. [www]

Hämtat från: <https://www.slideshare.net/francisco50/brownstock-washing>

[Använd 22 November 2021].

Biermann, C. J., 1996. *Handbook of Pulping and Papermaking*. i: 2:a red. Oregon: Elsevier Science & Technology, pp. 86-91.

Brown, M. T., 2017. *Process Control of Brownstock Washers*. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Principles*. Georgia: Tappi Press, s. 431-541.

Cantrell, J., 2019 . *Brownstock Washing Cost Optimization*. St. Louis, TAPPI peers conference.

Chirat, C. o.a., 2011. *Bleaching*. i: P. Fardim, red. *Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. 2:a red. Borgå: Papers Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, s. 476-481; 552-555.

Dandekar, V. D., Patil, V. V. & Bobade, S. R., 2014. *Design, Fabrication and Analysis of Prototype Twin Roll Press Pulp Washing*. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(2), s. 415-421.

Esteves, C. V., Sevastyanova, O., Östlund, S. & Brännvall, E., 2021. *Differences and similarities between kraft and oxygen delignification of softwood fibers: effects on chemical and physical properties*. *Cellulose*, Volym 28, s. 3149-3167.

Ghosh, A. & Hart, P. W., 2017. *Modern Washing Processes*. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. 1:a red. Peachtree Corners: Tappi Press, s. 145-163.

Gustafsson, J. A. R. o.a., 2011. *Pulping*. i: P. Fardim, red. *Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. 2:a red. Borgå: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, s. 207-209, 285-322.

Hart, P. W., 2017. *Fundamental Design of Vacuum Washing Systems*. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. 1:a red. Peachtree Corners: Tappi Press, s. 91-113.

- Hart, P. W., 2017. Introduction. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. 1:a red. Peachtree Corners: Tappi Press, s. 1-10.
- Hart, P. W., 2017. Process Upsets, Troubleshooting, and Optimization. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstockwashing Fundamentals and Practises*. Georgia: TAPPI press, s. 233-245.
- Ji, Y., 2007. *Kinetics and Mechanism of Oxygen Delignification*, u.o.: u.n.
- Kleppe, P. J., 1970. Kraft Pulping. *Tappi*, 53(1), s. 35-47.
- Kopra, R. & Dahl, O., 2017. Determining wash loss levels in the brownstock pulp washing line using different methods. *TAPPI Journal*, 16(5), s. 253-259.
- Kopra, R. o.a., 2010. Refractive index measurements for brown stock washing loss - mill investigations. *Appita Journal*, 63(2), s. 131-136.
- Kukreja, V. K., Ray, A. K., Singh, V. P. & Rao, N. J., 1995. Different Approaches to Evaluate Brownstock Washer Efficiency. *IPPTA*, 7(4), s. 61-65.
- MacLeod, M., 2007. The top ten factors in kraft pulp yield. *Paperi ja Puu - Paper and Timber*, 89(4), s. 1 - 7 .
- McDonough, T. J., 1989. *Oxygen Delignification*, Wisconsin: The Institute of Paper Chemistry.
- Moynihan, H. J. & Hart, P. W., 2017. Hot Stock Refining, Cleaning and Screening. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. 1:a red. Peachtree Corners: Tappi Press, s. 584-592.
- Parviainen, K., Jaakkola, H. & Numrinen, K., 2008. Evaporation of black liquor. i: P. Tikka, red. *Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy*. 2a red. Jyväskylä: Paper Engineers'/Paper ja Puu Oy, s. 38-46.
- Pittman, J., 2017. Pulp Consistency Control. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. Georgia: TAPPI press, s. 349-385.
- Santos, R. B. & Hart, P. W., 2014. Brownstock washing - A review of the literature. *Tappi journal*, 13(1), s. 9 - 19.
- Seppälä, M. J. o.a., 1999. i: *Kemiallinen metsäteollisuus I Paperimassan valmistus*. Helsinki : Hakapaino Oy, s. 11-15.
- Sixta, H., 2006. Pulp Washing. i: H. Sixta, red. *Handbook of Pulp*. Weinheim: Wiley-vch Verlag GmbH & Co., s. 533-535.

- Sjöström, E., 1993. *Wood Chemistry Fundamentals and Applications*. i: 2:a red. San Diego: Academic Press, s. 14-15.
- Smith, A. J., Gustafson, R. R. & McKean, W. T., 1993. Enhanced lignin removal in brownstock washing. *Tappi Journal*, 76(6), s. 81-86.
- Tervola, P. o.a., 2011. Washing, screening and cleaning of pulp. i: P. Fardim, red. *Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. Borgå: Papers Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, s. 395-425, 428-447.
- Tervola, P. & Gullichsen, J., 2007. Confidence limits in mass balances with application to calculation of pulp washing efficiency. *Appita Journal*, 60(6), s. 475-481.
- Tran, H. & Vakkilainen, E. K., 2008. *The Kraft Chemical Recovery Process*. [www] Hämtat från: https://www.researchgate.net/profile/Honghi-Tran/publication/267565045_THE_KRAFT_CHEMICAL_RECOVERY_PROCESS/links/54c7be8d0cf289f0cecdb8c4/THE-KRAFT-CHEMICAL-RECOVERY-PROCESS.pdf [Använd 31 January 2022].
- UPM Kymmene Oy, 2022. *UPM annual report 2021*. [www] Hämtat från: <https://www.upm.com/siteassets/asset/investors/2021/upm-annual-report-2021.pdf> [Använd 28 Mars 2022].
- Valmet, 2014. *TwinRoll Evolution Refining a unique tradition*. [www] Hämtat från: https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=06958000000bQSIAA2&_ga=2.68933777.1251822977.1637049580-1168895437.1631528929 [Använd 16 November 2021].
- Wang, X. R., 1993. *Dynamic Simulation of Brown Stock Washers and Bleach Plants*, Vancouver: The University of British Columbia.
- Wilks, R., 2010. Low environment footprint bleaching. *Appita Journal*, 64(3), s. 151-154.
- Willför, S., Alén, R. v. D. J., Liu, Z. & Miia, T., 2011. Raw Materials. i: P. Fardim, red. *Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. 2:a red. Borgå: Papers Engineers' Association /Paperi ja Puu Oy, s. 16-18, 31-33, 120-135.
- Wilson, R. E. & Brogdon, B. N., 2017. Foam Control. i: P. W. Hart & M. T. Brown, red. *Brownstock Washing Fundamentals and Practises*. Georgia: TAPPI Press, s. 545-556.
- Yang, R., Lucia, L., Ragauskas, A. J. & Jameel, H., 2003. Oxygen Delignification Chemistry and Its Impact on Pulp Fibers. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 23(1), s. 13-29.

	Tid	COD-nivå i provet	COD	Korrigerad COD	pH	TOC	TIC	Filtratets torrhalt	Konduktivitet
		mg/l	kg/t	kg/t		mg/l	mg/l	%	mS/m
Inkommande massa		193267	3202						
x ₀	8:53	417984	4149						
	8:02	60220	3333		11,1				
	9:00	105000	2538		11,2				
Medeltal		119496	3306		11,15				
Utgående massa		87134	582	735					
x ₁	8:59	47325	570	712					
	8:08	32830	490	557	10,2				
	9:06	69891	523	559	10,6				
Medeltal		59295	541	641	10,4				
Inkommande tvättvätska	8:07				11	13400	575	3,3	2630
y ₂	9:03				10,6	13570	580	3,44	2650
	8:14				10,6	52038	643	3,83	2750
	9:11				10,7	13960	595	3,23	2740
Medeltal					10,725	23242	598	3,45	2693
Utgående filtrat	8:12				10,7	33310	1272	8,98	5820
y ₁	8:56				10,8	33900	1380	8,99	5830
	8:06				10,9	34042	1167	9,46	5770
	9:04				11	34051	1223	9,09	5740
Medeltal					10,85	33826	1261	9,13	5790

	Tid	COD-nivå i provet	COD	Korrigerad COD	pH	TOC	TIC	Filtratets torrhalt	Konduktivitet
		mg/l	kg/Odt			mg/l	mg/l	%	mS/m
Inkommande massa		70437	570						
X ₀	8:59	40704	482						
	10:03	54866	523		10,6				
	9:06	0			10,4				
Medeltal	10:06	55336	525		10,5				
Utgående massa		49234	396						
X ₁	9:13	19531	418						
	10:40	28343	573		10,4				
	9:21	24856	453		10,2				
Medeltal	10:29	30491	460		10,3				
Inkommande tvättvätska					10,6	7033	485	2,82	1643
Y ₂	9:08				10,2	7279	21	1,83	1629
	10:11				10,4	36388	536	2,04	1821
	9:14				10,3	7917	522	2,41	1840
Medeltal	10:14				10,375	14654	391	2,28	1733
Utgående filtrat					10,6	13570	580	3,44	2650
Y ₁	9:03				10,6	13530	588	3,44	2660
	10:07				10,7	13960	595	3,23	2740
	9:11				10,5	14345	599	3,70	2760
Medeltal	10:09				10,6	13851	590	3,45	2703

		COD-nivå i procet	COD	Korrigerad COD	pH	TOC	TIC	Filtratets torrhalt	Konduktivite t
		mg/l	kg/t			mg/l	mg/l	%	mS/m
Inkommande massa	10:30	24983	1467	362					
X ₀	11:20	25584	1549	308					
	10:30	25150	1794	509	10,1				
	11:30	29810	1603	360	10,2				
Medeltal		26382	1603	385					
Utgående massa	10:32	7551	68						
X ₁	11:20	8372	70						
	10:35	11864	94		9,8				
	11:30	9746	88		9,2				
Medeltal		9383	80						
Inkommande tvättvätska	10:24				9,5	3846	382	1,17	931
Y ₂	11:15				9,6	3770	361,4	0,36	926
	10:20				9,5	4903	508,5	1,38	1180
	11:12				9,5	5086	520,1	1,59	1265
Medeltal						4401	443	1,13	1076
Utgående filtrat PE14	10:24				9,5	2330	234	0,69	614
Y ₁	11:15				9,8	3296	336	0,94	858
	10:22				9,5	3329	329	0,86	825
	11:10				9,5	3029	325	0,95	829
Medeltal						2996	306	0,86	782
Utgående filtrat PE10	10:14				10,3	6989	451	2,08	1664
Y ₁	11:06				10,3	7205	471	1,78	1680
	10:17				10,3	7933	533	2,35	1828
	11:08				10,2	8399	540	2,47	1881
Medeltal						7632	499	2,17	1763

	Tid	COD-nivå i provet	COD	Korrigerad COD	pH	TOC	TIC	Filtratets torrhalt	Konduktivitet
		mg/l	kg/t	kg/t		mg/l	mg/l	%	mS/m
Inkommande massa	10:30	25450,8	1504	329					
x ₀		27822,2	1494	351					
	10:30	25283,8	1624	401	10,1				
	11:30	29024,6	1697	340	9,8				
Medeltal		26895	1580	355					
Utgående massa		10378,3	79						
x ₁		9158,9	60						
	10:35	25251,1			9,6				
		11014,0	86						
Medeltal		13951	75						
Inkommande tvättvätska	10:24				9,5	3846	382	1,17	931
Y ₂	11:15				9,6	3770	361,4	0,36	926
	10:20				9,5	4903	508,5	1,38	1180
	11:12				9,5	5086	520,1	1,59	1265
Medeltal						4401	443	1,13	1076
Utgående filtrat PE14	10:24				9,5	2330	234	0,69	614
Y ₁	11:15				9,8	3296	336	0,94	858
	10:22				9,5	3329	329	0,86	825
	11:10				9,5	3029	325	0,95	829
Medeltal						2996	306	0,86	782
Utgående filtrat PE10	10:14				10,3	6989	451	2,08	1664
Y ₁	11:06				10,3	7205	471	1,78	1680
	10:17				10,3	7933	533	2,35	1828
	11:08				10,2	8399	540	2,47	1881
Medeltal						7632	499	2,17	1763

	Tid	COD-nivå i provet	COD	pH	TOC	TIC	Filtratets torrhalt	Kondukti vitet	
		mg/l	kg/t		mg/l	mg/l	%	mS/m	
Inkommande massa		12016	136						
X ₀		14179	180						
	11:14	14753	198	9,4					
	12:10	15788	224	9,3					
Medeltal		14184	185						
Utgående massa		1607	20						
X ₁		1732	20						
	11:25	2612	35	9,2					
	12:16	1351	18	9					
Medeltal		1826	23						
Inkommande tvättvätska	11:08			7,7	74,85	1,317	0	10	
Y ₂	11:53			8,1	71,56	1,494	0	11	
	11:21			7,3	71,02	1,285	0	10	
	12:04			7,2	62,32	1,16	0	11	
Medeltal				7,575	69,9375	1,314	0	10,5	
Utgående filtrat PE14	11:15			9,6	3770	361,4	0,36	926	
Y ₁	11:53			10	3734	371	0,74	930	
					3770	361,4	0,36	926	
	12:06			9,5	3734	371	0,74	930	
Medeltal					3752	366,2	0,55	928	
Utgående filtrat PE10	10:33			9,8	3296	335,6	0,94	858	
Y ₁	11:53			10,2	751	298,5	0,94	751	
					3296	335,6	0,94	858	
	12:04			9,5	751	298,5	0,94	751	
Medeltal					2023,5	317,05	0,94	804,5	

Bilaga 2. Beräkning av torrhalten efter den första DD-tvätten

			V2	C3	V3	V1	C1
	Efter- Utspädning	Efter- Utspädning	Utspädning	Massatorrhalt efter AD matningscistern	Massaflöde till AD 2	Massaflöde till AD 2 matningscistern	Massatorrhalt efter DD-tvätten
30 november	l/s	l/s	l/s	%	l/s		%
Test 1 kl 8	37,74	12,93	24,81	9,42	120,87	96,06	11,9
Test 2 kl 9	35,95	12,70	23,25	9,52	123,99	100,74	11,7
1 december							
Test 3 kl 8	26,41	10,91	15,50	10,47	132,30	116,80	11,9
Test 4 kl 9	20,32	10,85	9,46	11,14	128,48	119,02	12,0
Medeltal			18,25				11,9

Beräkning av kolumn C1 genom följande ekvationer:

$$C_1V_1 + C_2V_2 = C_3V_3$$

$$C_1 = \frac{C_3V_3}{V_1}$$

Bilaga 3. Beräkning av COD-nivån efter den första DD-tvätten

Utgående COD, utspädd	59250 mg/l
COD i utspädning	50950 mg/l
Inloppstorrhalt på massan	11,9 %
Utloppstorrhalt på massan	10,14 %
Medeltal från DNA processtyrning 30.11 & 1.12 kl 8-9 (bruntvätt)	
Produktionshastighet (torrmasa)	12,8 kg/s
Utspädningsflöde	31,4 l/s
Inloppsflöde	107,563 l/s
Vätskefas i inkommande massa	94,76303 l/s
Vätskefas i utgående massa	126,163 l/s
COD-nivå från DD-tvätten	62000,23 mg/l

Bilaga 4. Beräkning av COD-nivån efter den syrgasblekningens DD-tvätt

Utgående COD, utspädd	1826 mg/l
COD i utspädning	255 mg/l
Inloppstorrhalt på massan	10,4 %
Utloppstorrhalt på massan	10,6 %
Medeltal från DNA processtyrning 30.11 & 1.12 kl 8-9 (syrgasblekning)	
Produktionshastighet (torrmasa)	12,1 kg/s
Utspädningsflöde	30 l/s
Inloppsflöde	116,3 l/s
Vätskefas i inkommande massa	104,2 l/s
Vätskefas i utgående massa	134,2 l/s
COD-nivå från syrgasblekningens DD-tvätts filtrat	2278,1 mg/l

Bilaga 5. Modell för filtratens torrsubstans

Resultat från provtagning		Optimerad mängd försärvatten	Resultat	
Första DD-tvätten				
C _{in}	4,8 %			
C _{ut}	11,9 %			
x0	119500 mgO ₂ /l			
x1	59300 mgO ₂ /l			
y2	51000 mgO ₂ /l			
y1	107000 mgO ₂ /l			
V2	22,5 m ³ /ODT			
V1	10,1 m ³ /ODT			
L0	19,8 m ³ /ODT			
L1	7,4 m ³ /ODT			
V2 HV2 förhållande	0,98			
V1 HV2 förhållande	1,74			
AD 2				
C _{in}		10,3 %		
C _{ut}		8,1 %		
x0		55300 mgO ₂ /l		
x1		30500 mgO ₂ /l		
y2		26500 mgO ₂ /l		
y1		49900 mgO ₂ /l		
V2		9,0 m ³ /ODT		
V1		11,6 m ³ /ODT		
L0		8,7 m ³ /ODT		
L1		11,3 m ³ /ODT		
V2 HV2 förhållande		1,13		
V1 HV2 förhållande		0,69		
Urvattarna				
C _{in}			1,8 %	
C _{ut}			17 %	
x0			26900 mgO ₂ /l	
x1			14000 mgO ₂ /l	
y2			13000 mgO ₂ /l	
y1			26700 mgO ₂ /l	
V2			59,9 m ³ /ODT	
V1			10,2 m ³ /ODT	
L0			54,6 m ³ /ODT	
L1			4,9 m ³ /ODT	
V2 HV2 förhållande			0,99	
V1 HV2 förhållande			4,62	
Sygasbleknings DD-tvätt				
C _{in}			10,4 %	
C _{ut}			14,4 %	
x0			14200 mgO ₂ /l	
x1			2300 mgO ₂ /l	
y2			250 mgO ₂ /l	
y1			9200 mgO ₂ /l	
V2			13,0 m ³ /ODT	
V1			10,3 m ³ /ODT	
L0			8,6 m ³ /ODT	
L1			5,9 m ³ /ODT	
V2 HV2 förhållande			1	
V1 HV2 förhållande			1	
Förändrad tvätt-faktor				
DS _{in}	10,29612 m ³ /ODT	Förändrad tvätt-faktor	11,82524 m ³ /ODT	Förändrad tvätt-faktor
DS _{ut}	3,45 %	DS _{in}	2,28 %	DS _{in}
DS _{in} fixerad	9,13 %	DS _{ut}	3,45 %	DS _{ut}
DS _{ut} fixerad	3,45 %	DS _{in} fixerad	2,225 %	DS _{in} fixerad
DS _{ut} fixerad	9,13 %	DS _{ut} fixerad	3,45 %	DS _{ut} fixerad
Torrsubstans ökning		Torrsubstans ökning		Torrsubstans ökning
ifrån tvätten	0,574 tds/ODT	ifrån tvätten	0,142 tds/ODT	ifrån tvätten
DS%-ökning	5,6 %	DS%-ökning	1,2 %	DS%-ökning
TDS%	9,1 %	TDS%		TDS%
Symbolförteckning				
Torrhetsgräns		C	konstens	V1
y = 11858x + 2305,3		x0	COD-nivå i inkommande massa	V2
x = y/11858 - 2305,3/11858		x1	COD-nivå i utgående massa	L0
Maksimal mängd TDS%	9,9	y1	COD-nivå i inkommande vätvätska	L1
		y2	COD-nivå i utgående filtrat	V2 HV2 förhållande
			V2 HV2 förhållande	
			Utgående filtrat	
			Tvättfaktor	
			Inkommande vätskefas i massa	
			Utgående vätskefas i massa	
			Förhållande mellan en tvätt V2 och försärvatten/illförsel	
			DS _{in}	
			DS _{ut}	
			TDS%	
			DS%-ökning	
			Torrhalt i tvättväska	
			Torrhalt i filtrat	
			Totala mängden torrhalt i filtraten från brunvattnen	
			Tvättens torrhetsbidrag, vikt-%	
			Torrsubstans ökning	
			ifrån tvätten	
			DS%-ökning	
			TDS%	
			0,107 tds/ODT	
			1,0 %	
			10,5 m ³ /ODT	
			0 %	
			0,95 %	
			0 %	
			1,04 %	

Bilaga 6. Korrelation mellan filtratens COD-nivåer och torrhalter

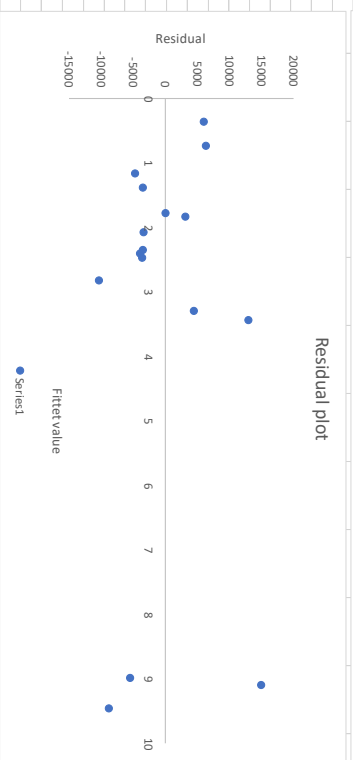
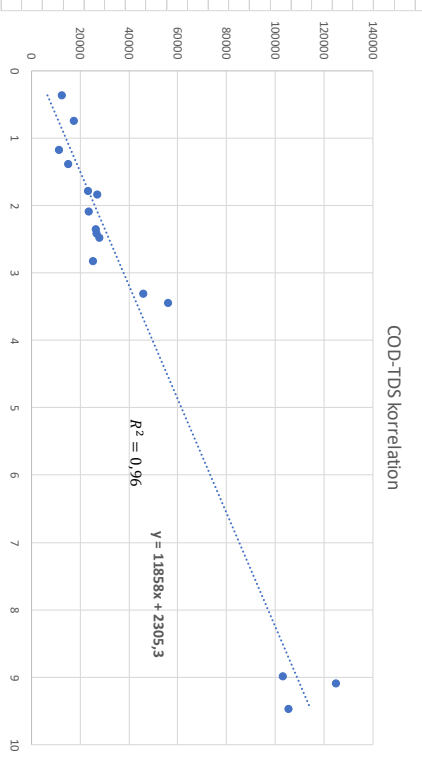
Prediktor	Respons	Predikterad	Residual
%	COD(mg/l)	COD	
1,17	11410	16179	-4769
0,36	12520	6574	5946
1,38	15100	18669	-3569
0,74	17400	11080	6320
1,78	23380	23413	-33
2,08	23600	26970	-3370
2,82	25400	35745	-10345
2,35	26600	30172	-3572
2,41	26900	30883	-3983
1,83	27100	24005	3095
2,47	28000	31595	-3595
3,3	45900	41437	4463
3,44	56000	43097	12903
8,98	103300	108790	-5490
9,46	105600	114482	-8882
9,09	125000	110095	14905

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0,979727289
R Square	0,959865561
Adjusted R Square	0,956988816
Standard Error	7549,300549
Observations	16

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	19082474251	19082474251	334,83	3,57696E-11
Residual	14	797887142,9	56991938,78		
Total	15	19880361394			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	2305,323561	2878,514987	0,80087565	0,4366	-3868,46806	8479,133
X Variable 1	11858,4547	648,0633656	18,29829508	4E-11	10468,49702	13248,41



Bilaga 7. Balansberäkning över bruntvättens vätskefas

	Massans torrhalt (%)	Massans vätskefas (l/m ³)	Massans vätskefas (m ³ /ADt)	Tvättfaktor/ motsrömsflöde (m ³ /ADt)	Filtrat
Till indunstning	-	-	-	15,4	-
Tömningscistern	4,8	952	17,9	22,8	-
För-avvattnare	5,5	945	15,5	20,4	-
Första DD-tvätten	11,9	881	6,7	11,6	-
AD 2 utspädning	10,14	898,6	8,0	12,9	-
AD 2-tvätten	8,1	919	10,2	15,2	-
Massasilningen	1,9	981	46,5	36,3	-
Återcirkulation i massasilningen	-	-	-	-	51,4
Urvattnarna	16,05	839,5	4,7	9,7	-
Syrgasbleknings	10,1	899	8,0	13,0	-
Syrgasbleknings DD-tvätt	14,4	856	5,4	10,3	-

Bilaga 9. Resultat från effektivitetstesten av barrlinjensbruntvätt

	Enhet	Första DD- tvätt en	AD 2-tvätten	Urvattnar e 2/1	Urvattnar e 2/2	Syrgasblekningens DD-tvätt
COD- överföring	kgO ₂ /ODt	641	460	80	75	23
Inkommande massaflöde (L ₀)	m ³ /ODt	20,0	8,7	50,5	53,6	8,6
Utgående massaflöde (L ₁)	m ³ /ODt	7,4	11,3	5,6	4,9	5,9
Tvättfaktor (V ₂)	m ³ /ODt	10,1	11,6	10,2	10,1	10,2
Utspädningsfaktor (DF)	m ³ /ODt	2,7	0,3	4,6	5,2	4,3
E		1,2	0,2	-	1,9	1,4
E ₁₀		4,0	4,3	-	4,6	3,6
DR		0,88	0,86	-	0,93	0,9
EDR		0,86	0,73	-	0,95	0,86
COD-balans	%	-1,7	1,8	9,2	5,2	24,4