

POWER OF POTATOES



Yrkeshögskolan Novia – Serie R – Rapport 2026.

WP2: Rapport

**Teknisk utvärdering av sidoströmmar från potatisindustrin som energiråvara:
tekniska metoder för förnybar energi i Österbotten**



Medfinansieras av
Europeiska unionen



ÖSTERBOTTENS FÖRBUND
POHJANMAAN LIITTO



Biniam Tefera (Yrkeshögskolan Novia)

Projekt: Power of Potatoes.

WP2: Teknisk utvärdering av sidoströmmar från potatisindustrin som energiråvara: tekniska metoder för förnybar energi i Österbotten

Andra publikationer i samma serie:

WP1: Rapport 1/3: Energi från torv i Österbotten i jämförelse med energi från potatisens sidoströmmar samt andra biomassor. Yvonne Dahlbäck.

WP1: Rapport 2/3: Potatisens sidoströmmar i Österbotten samt deras användning och potential. Yvonne Dahlbäck.

WP1: Rapport 3/3: Från biomassaflöden till anläggningsplatser: en logistisk modell för regional biogasproduktion i Sydösterbotten. Mikael Ehlers.

WP3: Biogas- och bioetanolproduktion i Österbotten från potatisindustrins sidoströmmar – Tekniskekonomisk analys. Katariina Rantanen.

WP4: Regional produktion av bio- och e-bränslen i Sydösterbotten: förutsättningar, konsekvenser och investeringsvägar. Mikael Ehlers.

Yrkeshögskolan Novia, Wolffskavägen 31, 65200 Vasa, Finland.

Novia Publikation och produktion, serie R: Rapporter 10/2026

ISBN: 978-952-7526-79-8 (Online) ISSN: 1799-4179

CC BY 4.0

Abstrakt

Denna rapport ingår i projektet Power of Potatoes, som finansieras av Fonden för en rättvis omställning (Just Transition Fund, JTF) i samverkan med Österbottens förbund och Yrkeshögskolan Novia. Rapporten undersöker tillgängliga teknologier för att omvandla stora volymer (vattenrika) sidoströmmar från potatisindustrin till förnybara bioenergi källor. Syftet är att utvärdera industriella potatissidoströmmar och kartlägga relevanta konverteringsteknologier för att identifiera de mest lönsamma och energieffektiva processerna för regional implementering i Österbotten. Metoden omfattar en genomgång av substratets förbehandlingsbehov, en bedömning av biologiska och termokemiska konverteringsvägar samt en tillämpning av ramverket Technology Readiness Level (förkortning TRL, ungefärlig översättning teknologins mognadsgrad) för att värdera genomförbarhet och kommersiell mognadsgrad. Resultaten visar att anaerob rötning konsekvent framstår som den mest genomförbara och kommersiellt mogna teknologin för våta potatisrester, med en mognadsnivå motsvarande TRL 9. Eftersom anaerob rötning kan behandla våt biomassa direkt undviks de betydande energiförluster som uppstår vid dehydrering av råa potatisskal. Fristående termiska processer, såsom torr pyrolys och förgasning, kräver däremot energiintensiva torkningssteg som kraftigt försämrar nettoenergieffektiviteten. Resultaten visar även att kaskadkopplade bioraffinaderimodeller, där primära konverteringsteknologier kombineras, kan förbättra den ekonomiska bärkraften. Flera analyserade termiska processer, särskilt hydrotermisk karbonisering, kringgår behovet av dehydrering och framstår därför som framväxande lösningar för vattenrika jordbruksrester. Huvudslutsatsen är att gynnsamma energiomvandlingsmetoder kännetecknas av att vattenrika substrat matchas med våta konverteringsvägar, att beroendet av termisk torkning minimeras och att integrerade system används för att skapa stabila intäktsströmmar.

Nyckelord: potatissidoströmmar, teknikbedömning, benchmarking, optimering, anaerob rötning, hydrotermisk karbonisering

Abstract

This report is part of Power Of Potatoes project financed by Just Transition Fund (JTF) in collaboration with the Regional council of Ostrobothnia and Novia University of Applied Sciences. This report examines the technologies available for converting massive volumes of high moisture potato side-streams into renewable bioenergy carriers. The objective was to evaluate industrial potato peel and map available conversion technologies in order to identify the most profitable and energy-efficient processes for regional deployment in Ostrobothnia. The method consisted of reviewing substrate pretreatment requirements, assessing biological and thermochemical conversion pathways, and applying a Technology Readiness Level framework to rate feasibility of commercial maturity. The results show that anaerobic digestion consistently serves as the most viable and commercially mature technology for wet potato residues, operating at a readiness level of 9. Because anaerobic digestion processes wet biomass directly, it completely bypasses the massive energy penalties associated with dehydrating raw potato peels. By contrast, standalone thermal processes, such as dry pyrolysis and gasification, require energy-intensive drying phases that severely compromise net energy efficiency. The results also demonstrate that combining primary conversion technologies into cascading biorefinery models positively improves financial viability. Several analyzed thermal pathways, including hydrothermal carbonization, circumvent dehydration needs entirely, supporting their status as emerging solutions for wet agricultural residues. The main conclusion is that favorable energy conversion methods are characterized by matching high-moisture feedstocks directly with wet-pathway technologies, minimizing thermal drying dependencies, and applying integrated approaches to generate reliable revenue streams.

Key words: Potato Side-streams, technology Assessment, Benchmarking, Optimization

Innehållsförteckning

1.	Inledning	1
1.1	Översikt över projektet Power of Potatoes.....	1
1.2	Mål och avgränsning	1
2.	Infrastrukturell kontext	2
2.1	Biogasinфраstruktur i europeiska regioner	2
2.2	Regionalt fokus på Finland och Österbotten.....	3
3.	Teknologisk kartläggning och utvärdering.....	3
3.1	Substrategenskaper hos potatissidoströmmar	3
3.2	Förbehandlingsmetoder.....	3
4.	Biokemiska konverteringsteknologier	5
4.1	Anaerob rötning och biogasproduktion.....	5
4.2	Bioetanol syntes.....	6
4.3	Biobutanolfermentering	6
4.4	Mörk fermentering för biohydrogen	6
5.	Termokemiska konverteringsteknologier	7
5.1	Pyrolys	7
5.2	Förgasning	7
5.3	Integrerad pyrolys och förgasning	7
5.3	Hydrotermisk karbonisering.....	7
5.4	Hydrotermisk likvifering.....	7
6.	Kemisk syntes och katalytisk uppgradering.....	8
6.1	Transesterifiering	8
6.2	Metanol syntes	8
7.	Teknikbedömning och ekonomiskt landskap.....	8
7.1	Utvärderingsmetodik och jämförelsekriterier.....	8
7.2	Utvärdering enligt Technology Readiness Level	9
7.3	Energieffektivitet och destillationsförluster	10
7.4	Ekonomiska indikatorer och lönsamhet	11
8.	Avancerad raffinering och standardisering.....	11
8.1	Raffineringsvägar till transportbränslen.....	11
8.2	Optimeringsriktmärken och standarder	12
9.	Slutsats.....	13
10.	Källförteckning	14
11.	Appendix	18

Figurförteckning

Figur 1. Infrastruktur och produktionsvolym för biogas/biometan i europeiska regioner (2024-2025).

Figur 2. Förbehandling av potatissidoströmmar.

Figur 3. Anaerob rötning och biogasproduktion.

Figur 4. Poängsättning av Technology Readiness Level (TRL) för bedömning av kommersiell genomförbarhet.

Figur 5. Syntes: den tekno-ekonomiska bedömningsmatrisen.

Tabellförteckning

Tabell 1. Sammanfattning av uppgraderingsvägar.

Tabell 2. Sammanfattning av optimeringsriktmärken och standarder.

Tabell 3. Jämförelse av teknologier för energiomvandling av potatissidoströmmar.

Förkortningar

ABE - aceton-butanol-etanol

AR - anaerob rötning

AI - artificiell intelligens

bcm - miljarder kubikmeter

BMP - biokemisk metanpotential

BREF - referensdokument för bästa tillgängliga teknik

CAPEX - kapitalutgifter

CH₄ - metan

CO₂ - koldioxid

DoE - experimentplanering

EBA - European Biogas Association

H₂ - molekylärt väte

HTK - hydrotermisk karbonisering

HTL - hydrotermisk likvifering

IRR - internränta

ISO - International Organization for Standardization

ISR - inokulum-substrat-kvot

JTF - Just Transition Fund

LCFA - långkedjiga fettsyror

NPV - nuvärde

TA - total alkalinitet

TDT - teknisk rötningstid

TRL - Technology Readiness Level

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

VFA - flyktiga fettsyror

1. Inledning

Den globala omställningen mot hållbara, klimatneutrala och cirkulära bioekonomier förutsätter en systematisk utvärdering av rikligt förekommande och kostnadseffektiva jordbruks- och industrirestflöden för produktion av förnybar energi (Abad et al., 2019). Den kommersiella potatisförädlingsindustrin genererar mycket stora mängder organiska biprodukter, vilket drivs av den ökande efterfrågan på processade livsmedel såsom chips, pommes frites och stärkelseprodukter. Inom livsmedelsindustrin används flera industriella skalningsmetoder, från abrasiv skalning och lutskalning till avancerad högtrycksångskalning. Dessa processer ger upphov till potatisskalavfall som kan motsvara 15-40 procent av den ursprungliga råa knölmassan (Awogbemi et al., 2022).

Historiskt har denna omfattande organiska jordbruksrest ofta nedgraderats till lågvärdiga användningsområden. Industriella producenter har främst förlitat sig på direkt spridning på mark, försäljning som lågkvalitativt djurfoder eller deponering i kommunala avfallsflöden (Awogbemi et al., 2022). Dessa traditionella avfallshanteringsstrategier medför emellertid betydande miljömässiga och ekonomiska nackdelar. Anaerob nedbrytning av vattenrika potatisskal på deponier ger okontrollerade metanutsläpp, och metan är en kraftig växthusgas (IPCC, 2006). Därtill innebär transport, logistik och avfallsavgifter direkta kostnader och därmed kapitalförluster för förädlingsanläggningarna.

Under senare år har potatisskalens specifika fysikalisk-kemiska sammansättning medfört att materialet i ökande grad betraktas som ett lovande, i praktiken kostnadsfritt, råmaterial för avancerade bioraffinaderier. Eftersom potatisskal inte konkurrerar med livsmedelssystemen på samma sätt som primära jordbruksgrödor, exempelvis majs eller sockerrör, ligger användningen väl i linje med principerna för andra generationens biodrivmedel (Pandiyan et al., 2019). Denna rapport utvärderar därför teknologier för omvandling av potatisskal till olika bioenergiformer, däribland bioetanol, biobutanol, biometan, biohydrogen, syntesgas, bioolja, metanol, biodiesel genom transesterifiering samt fast hydrokol. Analysen bedömer varje process med avseende på Technology Readiness Level (teknologins mognadsgrad), kommersiell status, driftskala, återbetalningstid, kapitalbehov, energieffektivitet och produktutbyte med utgångspunkt i empiriska data från vetenskaplig litteratur.

1.1 Översikt över projektet *Power of Potatoes*

Den ökande globala energiefterfrågan, i kombination med den snabba genereringen av jordbruksavfall, utgör en central utmaning för hållbar industriell utveckling. Projektet *Power of Potatoes* är direkt förenligt med Finlands nationella utvecklingsstrategier och syftar till att möta denna utmaning genom att omvandla svårhanterliga jordbruksrester till högvärdiga bioenergikällor.

Potatissidoströmmar utgör ett omfattande och underutnyttjat jordbruksbaserat restflöde som kan orsaka betydande miljöbelastning om det tillåts brytas ned i konventionella deponier. Genom att leda dessa sidoströmmar till slutna system för energiåtervinning kan jordbrukssektorn minska växthusgasutsläppen och samtidigt bidra till att ersätta fossil energi med lokalt producerad förnybar energi.

1.2 Mål och avgränsning

Det primära målet med detta arbetspaket är att tillhandahålla en övergripande teknologisk utvärdering av de metoder som kan användas för att omvandla potatissidoströmmar till praktiskt användbara energikällor. Utvärderingen omfattar en kartläggning av biologiska och termokemiska konverteringsteknologier, identifiering av respektive metods driftskrav samt en bedömning av förväntade bränsleutbyten.

I arbetets omfattning ingår även en preliminär tekno-ekonomisk analys som syftar till att identifiera de mest lönsamma och energieffektiva konfigurationerna för industriell implementering. Standardisering av

processmodeller och digitala riktmärken behandlas som ett stöd för att säkerställa att de valda avfall-till-energi-metoderna kan skalas upp på ett tillförlitligt sätt för att möta regionala energibehov.

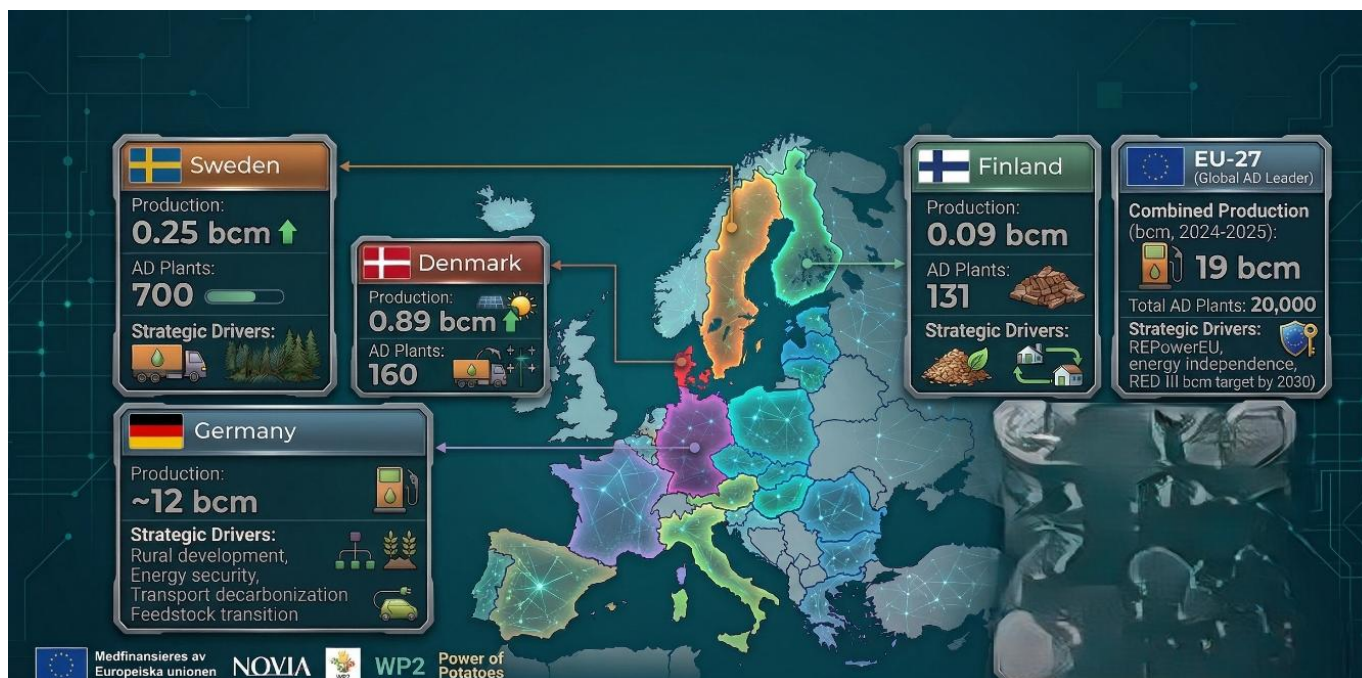
2. Infrastrukturell kontext

2.1 Biogasinfrastruktur i europeiska regioner

Europeiska unionen är i dag en globalt ledande aktör när det gäller användning av anaerob rötning för produktion av förnybar el och gas. Aktuella statistiska bedömningar visar att gasförbrukningen i EU-27 uppgick till 332 miljarder kubikmeter, varav 273 miljarder kubikmeter fortfarande importerades. Denna situation understryker behovet av regionala förnybara energilösningar som kan minska energiberoendet. Biogaser erbjuder ett alternativ som både stärker Europas konkurrenskraft och stödjer ambitionen att fasa ut fossila bränslen.

Enligt European Biogas Association har Europas planerbara kraftproduktionskapacitet minskat från 424 GW år 2012 till cirka 380 GW år 2023, samtidigt som behovet av flexibilitet i elsystemet har ökat. Som ren och förutsägbar energikälla kan biogaser spela en viktig roll för att balansera elnätet under längre perioder med låg sol- och vindkraftsproduktion, särskilt i norra Europa under vinterhalvåret.

Den samlade produktionen av biogas och biometan i Europa ökade måttligt till cirka 22 miljarder kubikmeter år 2024, jämfört med 21,7 miljarder kubikmeter år 2023. Den förväntade tillväxten härrör främst från EU-27-länderna, med omkring 19 miljarder kubikmeter. Länder som Tyskland och Italien dominerar produktionen genom etablerade system och regelverk som stödjer kontinuerlig behandling av jordbruksrester och energigrödor (Capodaglio et al., 2016). Infrastrukturen befinner sig samtidigt i en omställningsfas, där fokus förskjuts från särskilda energigrödor, såsom majsensilage, till rena jordbrukssidoströmmar och industriellt livsmedelsavfall för att undvika konkurrens med livsmedelsproduktion (Almeida et al., 2023).



Figur 1. Infrastruktur och produktionsvolymerna för biogas/biometan i europeiska regioner (2024-2025).

2.2 Regionalt fokus på Finland och Österbotten

I ett nordiskt perspektiv har Finland utvecklat en avancerad avfall-till-energi-infrastruktur med ungefär tio storskaliga avfallsförbrännings- och energiåtervinningsanläggningar under kommunal eller industriell kontroll (EastCham Finland, 2021). I Österbotten har den senaste utvecklingen i högre grad inriktats på gårdsnära teknologier som kan behandla lokala och utmanande substrat, däribland potatisrester och växthusavfall kontaminerat med oorganiska material (Makkonen, 2025).

Den regionala produktionspotentialen i specifika österbottniska noder har beräknats till 24-59 ton potatisskalavfall. Detta gör det nödvändigt att använda specialiserade och driftssäkra reaktorkonfigurationer, exempelvis biogasreaktorer med sluttande botten, för att uppnå lönsam lokal energiåtervinning (Makkonen, 2025).

3. Teknologisk kartläggning och utvärdering

3.1 Substrategenskaper hos potatissidoströmmar

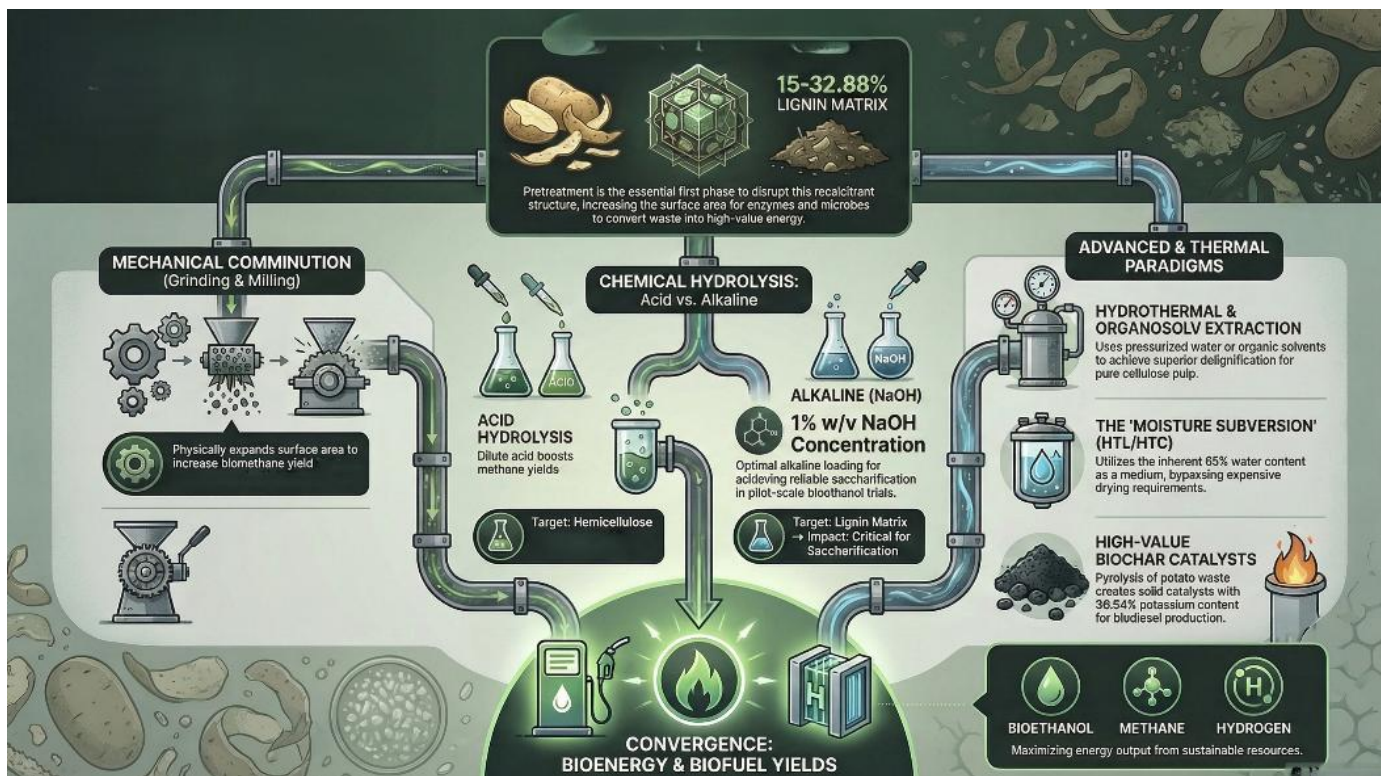
En framgångsrik omvandling av potatissidoströmmar förutsätter en noggrann förståelse av materialets naturliga fysikalisk-kemiska egenskaper. Potatisbaserade restflöden kännetecknas av mycket hög vattenhalt. Vattenhalten i potatisskal ligger vanligen mellan 77 och 85 procent, vilket i hög grad styr valet av efterföljande processer (Almeida et al., 2023).

Det organiska materialet utgörs huvudsakligen av kolhydrater, motsvarande 46,2-77,4 procent av torrvikten. Stärkelse utgör en betydande andel, tillsammans med strukturella polymerer såsom lignin (21,6-32,9 procent) och cellulosa (Awogbemi et al., 2022). Potatissidoströmmar innehåller dessutom låga nivåer av lipider och proteiner. Potatisskal innehåller även glykoalkaloider, exempelvis alfa-solanin, vilka kan hämma direkt mikrobiell nedbrytning om de inte hanteras genom lämplig förbehandling (Elhag et al., 2023).

3.2 Förbehandlingsmetoder

Potatisskalens robusta lignincellulosastrukturer och potentiella inhibitorer kräver ändamålsenlig förbehandling för att brytas ned effektivt. Biomassans bioåtkomlighet kan förbättras med flera förbehandlingsmetoder. Bland de fysiska processerna lyfts mekanisk malning och ultraljudsbehandling ofta fram i litteraturen (Sagar et al., 2024). Dessa processer ökar den tillgängliga ytan hos biomassan och förbättrar därmed kontakten mellan substratet och mikroorganismerna under rötningen.

Användning av utspädd svavelsyra, exempelvis vid en koncentration om 1 procent, är en effektiv metod för att omvandla komplexa kolhydrater till jäsbara sockerarter (Soni et al., 2023). Ett alternativ är biologisk förbehandling med specifika stammar av amylasproducerande svampar, såsom *Rhizopus stolonifer*, som hydrolyserar stärkelsen. Denna metod erbjuder ett mer miljövänligt sätt att hydrolysera stärkelse utan att bilda de toxiska biprodukter som ofta associeras med kraftig kemisk hydrolys (Elhag et al., 2023).



Figur 2. Förbehandling av potatissidoströmmar.

Även om potatissidoströmmar i sig är rika på jäsbar stärkelse är en del av bioenergipotentialen bunden i styva och svårnedbrytbara lignincellulosastrukturer och komplexa cellväggar (Awogbemi et al., 2022). För att maximera bränsleutbyten kan förbehandling delas in i tre strategiska kategorier: mekaniska, kemiska och avancerade fysikalisk-kemiska metoder.

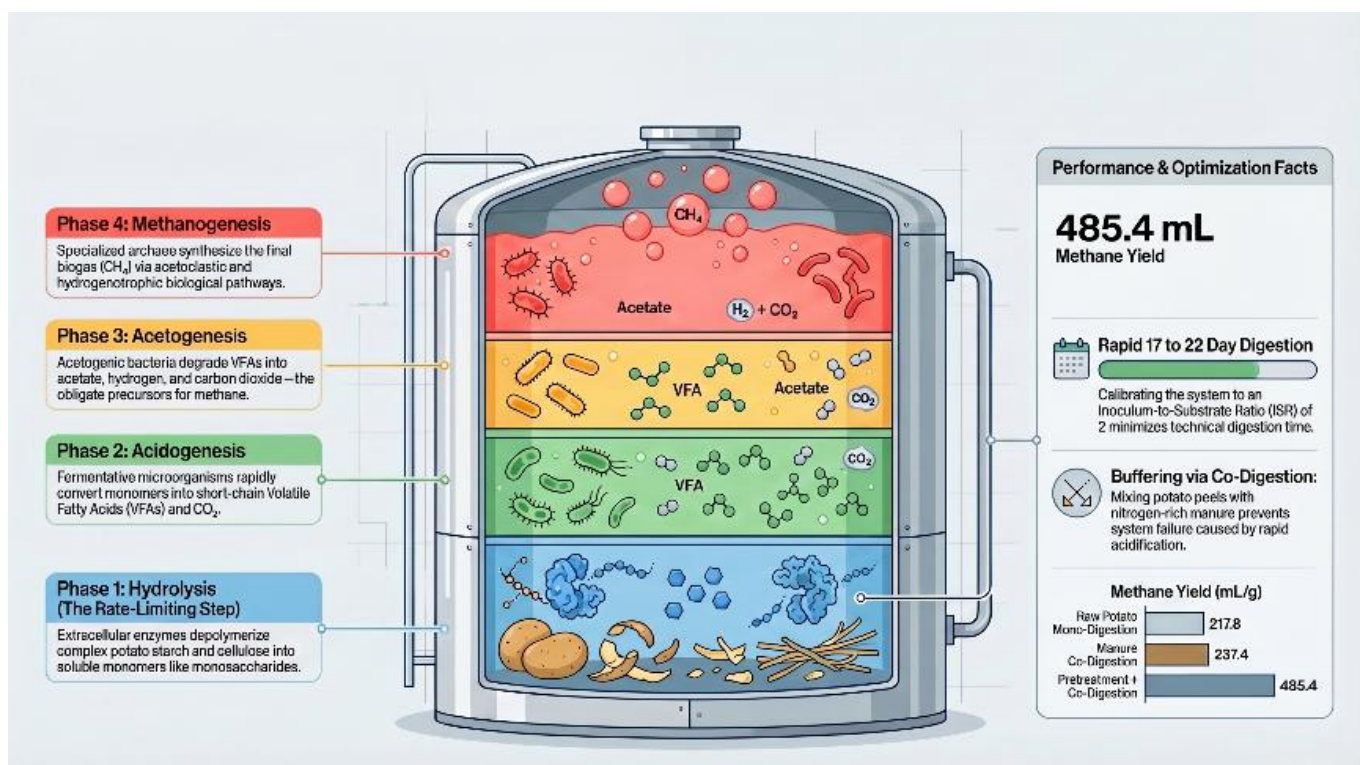
Mekanisk sönderdelning, såsom malning eller finfördelning, fungerar genom att fysiskt fragmentera biomassan och kraftigt öka den exponerade ytan. Denna strukturella påverkan ger mikroorganismer och enzymer direkt tillgång till interna stärkelsepolymerer och kan därigenom minska den nödvändiga uppehållstiden i röt-kammaren (Sagar et al., 2024). Kemisk förbehandling med utspädda syror eller alkaliska lösningar syftar till att göra biomaterialet mera lösligt och omvandla svårnedbrytbart fast material till en mer lättjäsbar vätskefas (Liang et al., 2024).

För högre processprestanda kan hydrotermisk förbehandling användas för att övervinna cellväggspolymerernas motståndskraft. Vid förhöjd temperatur och tryck, utan nödvändiga kemikalietillsatser, främjas stärkelsegelatinisering och nedbrytning av biomassans kristallina struktur (Soni et al., 2023). Valet av förbehandlingssystem innebär därför en avvägning mellan maximalt biologiskt utbyte och minimal energiinput. Dessa förbehandlingsval avgör i praktiken om efterföljande konverteringsvägar, såsom mörk fermentering eller bioetanol-syntes, kan bli ekonomiskt genomförbara (Almeida et al., 2023).

4. Biokemiska konverteringsteknologier

4.1 Anaerob rötning och biogasproduktion

Anaerob rötning (AR) är fortsatt den mest mogna och tillförlitliga biokemiska vägen för att omvandla vattenrika potatissidoströmmar till metanrik biogas. Processen är inte en enskild kemisk reaktion utan en komplex symbiotisk kedja som bygger på fyra mikrobiella huvudfaser: hydrolys, acidogenes, acetogenes och metanogenes (Almeida et al., 2023).



Figur 3. Anaerob Digestion and Biogas Production

I hydrolysfasen utsöndrar hydrolytiska bakterier extracellulära enzymer, såsom amylaser, cellulaser och proteaser. Dessa enzymer bryter ned resistenta och olösliga organiska komponenter i potatisskal, exempelvis stärkelse, cellulosa och proteiner, till lösliga monomerer såsom monosackarider, aminosyror och långkedjiga fettsyror (Achinas et al., 2019; Ren et al., 2018). Enligt Ren et al. (2018) är den vattenberoende klyvningen ofta det hastighetsbegränsande steget i hela AD-processen, eftersom potatisskalets komplexa biopolymerer är relativt svårnedbrytbara.

I acidogenesfasen tar acidogena och fermentativa mikroorganismer snabbt upp dessa lösliga monomerer och omvandlar dem till kortkedjiga flyktiga fettsyror. Produktbilden domineras av propionsyra, smörsyra och valeriansyra, tillsammans med mindre mängder alkoholer, koldioxid och molekylärt väte (Achinas et al., 2019; Pandey et al., 2020).

Acetogenes är den tredje fasen och innebär ytterligare nedbrytning av bildade fettsyror och alkoholer genom acetogena bakterier. Denna dehydrogeneringsprocess genererar acetat samt koldioxid och väte, vilka fungerar som obligatoriska prekursorer för den biologiska metanbildningen (Pandey et al., 2020; Stams & Plugge, 2009).

I den avslutande metanogenesfasen syntetiserar metanogena arkéer (arkebakterier) målprodukten biogas. Denna fas domineras av två biologiska vägar. Acetoklastiska metanogener omvandlar acetat direkt till metan och koldioxid, medan hydrogenotrofa metanogener reducerar koldioxid med hjälp av väte från föregående fas och bildar metan och vatten (Stams & Plugge, 2009; Wang & Lee, 2021).

Baslinjen för monorötning av råa potatisskal ger cirka 217,8 mL metan per gram råmaterial (Achinas et al., 2019). För att optimera utbytet och buffra systemet mot snabb försurning används ofta samrötning med kväverika substrat, exempelvis nöt- eller fårgödsel. Detta förskjuter kol-kväve-kvoten till mer gynnsamma driftsintervall och kan öka metanutbytet till 237,4 mL per gram råmaterial (Adeleye et al., 2022). När sur eller enzymatisk förbehandling kombineras med samrötning har metanutbyten upp till 485,4 mL per gram råmaterial rapporterats (Achinas et al., 2019). För att bibehålla processtabilitet och korta drifttider är rörelsestyrning avgörande. En optimal inokulum-substrat-kvot (ISR) på 2 kan maximera nedbrytningshastigheten och minska den tekniska rötningstiden till cirka 17-22 dagar.

4.2 Bioetanolsyntes

Bioetanolsyntes från potatissidoströmmar bygger på kontrollerad fermentering av glukos och maltos. Effektiv fysisk och kemisk förbehandling ökar biomassans aktiva yta och därmed den mikrobiella tillgängligheten. Efter förbehandling introduceras mikroorganismer såsom *Saccharomyces cerevisiae* eller *Zymomonas mobilis* för att omvandla de upplösta sockerarterna till etanol under strikt anaeroba förhållanden (Mazaheri & Pirouzi, 2020).

Integrerad sackarifisering och fermentering i samma processteg har visat sig kunna minska reaktorns uppehållstid och begränsa kapitalbehovet (Chohan et al., 2020). Det slutliga volymetriska etanolutbytet beror främst på förbehandlingens intensitet och på en effektiv borttagning av de fermenteringsinhibitorer som kan bildas vid syrahydrolys (Soni et al., 2023).

4.3 Biobutanolfermentering

Biobutanol har högre energitäthet och lägre hygroskopisk (vattenattraherande) tendens än etanol, vilket gör ämnet till en mer attraktiv energibärare och mer kompatibelt med befintlig förbränningsinfrastruktur. Produktion av butanol från potatissidoströmmar sker via ABE-fermentering (aceton-butanol-etanol), där bakteriestammar såsom *Clostridium acetobutylicum* används (Jin et al., 2022).

Organosolvent förbehandling och riktad avlägsning av inhibitorer har för potatisskal rapporterats ge butanolkoncentrationer upp till 12,6 g/L (Abedini et al., 2020). Den huvudsakliga tekniska begränsningen är produkttoxicitet. Butanolackumulering kan hämma och slutligen avdöda bakterier vid relativt låga lösningsmedelshalter, vilket skapar behov av kontinuerlig produktutvinning (Hijosa-Valsero et al., 2018).

4.4 Mörk fermentering för biohydrogen

Mörk fermentering är en avancerad biologisk väg för direkt framställning av bio-väte från organiska substrat. Tekniken använder antingen blandkulturer eller specifika hypertermofila stammar såsom *Thermotoga neapolitana*. Mikroorganismerna bryter ned komplexa kolhydrater i potatissidoströmmar till vätgas och flyktiga fettsyror (Mars et al., 2010).

Processen kan drivas vid förhöjd temperatur, vilket accelererar hydrolysen av potatisstärkelse och ger högre nettoväteproduktionshastigheter än konventionell mesofil (medeltempererad) rötning (Salem et al., 2018). Trots att bio-väte har en helt koldioxidfri förbränningsprofil kräver samtidig ackumulering av flyktiga fettsyror ofta ett efterföljande behandlingssteg, exempelvis en kopplad metanogen reaktor, för att säkerställa fullständig energiåtervinning från den kvarvarande vätskefasen (Elhag et al., 2023).

5. Termokemiska konverteringsteknologier

5.1 Pyrolysis

Pyrolysis ger snabb termisk nedbrytning av organiskt material till energitäta produkter. Torr pyrolysis innebär att dehydrerade potatissidoströmmar upphettas i en syrefattig miljö, vanligen vid 400-700 °C. Processen producerar en blandning av bioolja, syntesgas och fast biokol (Daimary et al., 2022).

Den grundläggande svagheten vid tillämpning av denna torra termiska process på råa potatissidoströmmar är den stora termodynamiska kostnad som uppstår i det nödvändiga torkningssteget. För att processen ska bli praktiskt genomförbar behöver råa potatisskal torkas från en initial vattenhalt kring 85 procent till under 20 procent innan de matas in i den termiska reaktorn (Almeida et al., 2023).

5.2 Förgasning

Förgasning sker vid avsevärt högre temperaturer, typiskt mellan 800 och 1200 °C. Tekniken använder ett kontrollerat förgasningsmedel för att maximera produktionen av brännbar syntesgas (Giuliano et al., 2020). Förgasning kan effektivt omvandla organiskt material till ett flexibelt gasformigt bränsle, men vid råa potatissidoströmmar möter tekniken samma grundläggande begränsning som torr pyrolysis.

Kravet att först förånga den inneboende vattenhalten innebär ett energiintensivt förbehandlingssteg. Detta försämrar både nettoenergieffektivitet och ekonomisk genomförbarhet (Almeida et al., 2023).

5.3 Integrerad pyrolysis och förgasning

För att minska begränsningarna hos fristående termiska processer kan moderna systemarkitekturer koppla pyrolysis- och förgasningsenheter till biologiska reaktorer. I en kaskadkopplad bioenergianläggning avvattnas den fasta rötresten som återstår efter anaerob rötning och behandlas därefter i en pyrolysenhet (Deng et al., 2020).

Den värme som krävs för att upprätthålla pyrolyskammaren kan delvis tillhandahållas genom förbränning av en del av den producerade biogasen, medan det resulterande biokolet kan användas som jordförbättringsmedel eller kolsänka (Maroušek et al., 2020). Denna dubbla teknikkonfiguration maximerar den totala kolåtervinningen från potatissidoströmmen och minskar samtidigt kostnaderna för hantering av våt rötrest (Monlau et al., 2015).

5.3 Hydrotermisk karbonisering

Hydrotermisk karbonisering (HTC) är en specialiserad termisk process som är särskilt anpassad för våt biomassa. Tekniken drivs vanligen vid 180-250 °C i trycksatt vatten (Funke & Ziegler, 2010). Eftersom HTC håller vattnet i flytande fas eliminerar det omfattande behovet av termisk energi för att förånga den höga vattenhalten i potatisskal (Catenacci et al., 2022).

Huvudprodukten är hydrokol, ett tätt och kolrikt fast material som delvis liknar fossilt kol i förbränningsegenskaper men också kan ha goda egenskaper som jordförbättringsmedel (Nizamuddin et al., 2017). HTC framstår därför som den mest energieffektiva termiska vägen för råa, vattenrika jordbruksrester såsom potatisskal (Wang et al., 2023).

5.4 Hydrotermisk likvifering

Hydrotermisk likvifering (HTL) kringgår behovet av dehydrering av potatissidoströmmar. Tekniken arbetar under kontrollerade förhållanden, vanligen vid 280-370 °C och tryck upp till 25 MPa (Brindhadevi et al., 2021).

Under dessa subkritiska vattenförhållanden depolymeriseras och omformas potatisskalets polymera komponenter till en tung och energität flytande bio-olja.

HTL kan återvinna en stor del av det kol och den energi som finns i den våta potatismatrisen. Den producerade biooljan innehåller dock ofta höga halter syre och kväve, vilket kräver omfattande katalytisk vätebehandling innan den kan blandas med konventionella petroleumbränslen för transportsektorn (Dimitriadis & Bezergianni, 2017).

6. Kemisk syntes och katalytisk uppgradering

6.1 Transesterifiering

De lipidfraktioner som finns i potatisprocessavfall, liksom de långkedjiga fettsyror som bildas under rötningens acidogena fas, kan användas som prekursorer för biodieselproduktion. Processen innebär sekventiell återvinning av lipider följt av enzymatisk esterifiering. Transesterifiering kan ske med biokatalysatorer, exempelvis lipaser som utsöndras av *Rhizopus stolonifer*, vilka omvandlar lipiderna till fettsyrametylestrar (Elhag et al., 2023).

Det biokol som produceras vid pyrolys av potatisskal kan dessutom aktiveras kemiskt och användas som en porös och lågkostnadsbaserad heterogen katalysator för transesterifieringsreaktioner. Därmed kan materialkretsloppet inom bioraffinaderiet slutas i högre grad (Daimary et al., 2022). Den kombinerade biologiska och kemiska strategin har rapporterats ge biodieselåtervinning på upp till cirka 64,8 procent av tillgängligt råmaterial (Elhag et al., 2023).

6.2 Metanolsyntes

Gasformiga produkter från primära konverteringsprocesser kan uppgraderas kemiskt till stabila flytande bränslen. Därigenom minskas de lagrings- och transportutmaningar som är förenade med rå biogas. Metanolsyntes bygger på infångning av koldioxidfraktionen i biogas och reaktion med externt förnybart väte (Dieterich et al., 2020).

Syntesgas från högtemperaturförgasning kan även användas i katalytisk Fischer-Tropsch-syntes eller direkt metanolsyntes (Kiefer et al., 2021). Sådana power-to-liquid-strategier omvandlar lågvärdiga gasformiga komponenter från potatissidoströmmar till mer stabila och internationellt säljande kemiska energibärare för exempelvis sjöfart och tung transport (Lin et al., 2021).

7. Teknikbedömning och ekonomiskt landskap

7.1 Utvärderingsmetodik och jämförelsekriterier

En tekno-ekonomisk bedömningsmatris har tagits fram för Power of Potatoes-projektet med hjälp av ett jämförande ramverk. Teknologerna kategoriseras inte godtyckligt, utan matrisen bygger på syntes av empiriska data från fackgranskade ekonomiska modeller och pilotvalideringar.

Datainsamlingen baserades på systematisk genomgång av tillgänglig litteratur. Studier gavs särskild tyngd när de redovisade transparenta metoder, detaljerade konverteringssteg, massbalanser och teknologiska resultat (Spizzirri et al., 2026). När data om utbyte eller lönsamhet var motstridiga prioriterades empiriska resultat från kontinuerliga pilot- eller demonstrationsanläggningar framför teoretiska laboratorieförsök. Detta gjordes eftersom laboratorieförhållanden sällan fångar de driftmässiga flaskhalsar som uppstår vid storskalig implementering (Fotis et al., 2022).

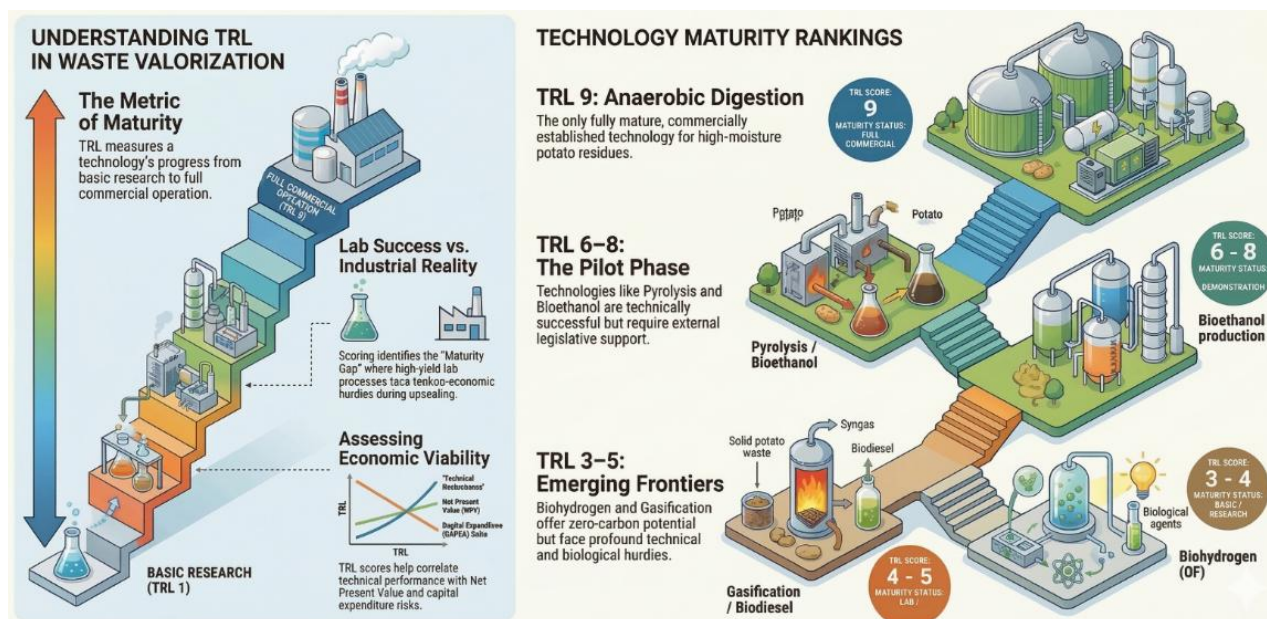
Teknikmognad bedömdes med hjälp av Technology Readiness Level, en standardiserad skala från 1 till 9. Teknologier värderades utifrån i vilken skala de framgångsrikt och kontinuerligt har drivits på anläggningsnivå. Teknologier på nivå 8-9, exempelvis anaerob rötning, bedöms som mycket mogna eftersom tusentals kommersiella anläggningar visar deras globala driftsäkerhet (Almeida et al., 2023). Lägre nivåer, exempelvis 2-3, tilldelas tekniker såsom mörk fermentering för biohydrogen, där litteraturen visar att processerna huvudsakligen är laboratoriebaserade och fortfarande begränsas av biologisk instabilitet (Spizzirri et al., 2026).

Den kommersiella genomförbarheten definierades som låg, medelhög eller hög genom en samlad bedömning av ekonomiska indikatorer, särskilt nuvärde, internränta och förväntad återbetalningstid (Morero et al., 2024). För att klassificeras som hög ekonomisk attraktivitet skulle en teknologi visa konsekvent positivt nuvärde och internränta över en normalt acceptabel diskonteringsränta, ofta cirka 10 procent, utan permanent beroende av omfattande offentliga subventioner.

Robustheten hos de ekonomiska indikatorerna bedömdes även mot marknadsvariationer. De mest tillförlitliga studierna använde Monte Carlo-simuleringar för att beräkna sannolikhetsintervall för finansiella mått och tog därmed hänsyn till osäkerheter i elpris, råvarulogistik och kapitalutgifter (Wang et al., 2024). Medelhög eller låg ekonomisk attraktivitet tilldelades teknologier som kräver betydande termodynamiska insatser och därmed minskar marginalerna, exempelvis torra termiska processer för vattenrika potatissidoströmmar (Almeida et al., 2023).

7.2 Utvärdering enligt Technology Readiness Level

Technology Readiness Level är ett standardiserat mått för att bedöma teknologiers utvecklingsstadium och kommersiella mognad. Skalan sträcker sig från grundläggande laboratorieforskning till full kommersiell implementering. Genom att tillämpa TRL-ramverket kan forskare och projektutvecklare objektivt kategorisera olika teknologiska lösningar, identifiera tekniska hinder för storskalig implementering och fastställa vilka insatser som krävs för att föra ett koncept från pilotnivå till marknadsmogen teknologi (Fotis et al., 2022).



Figur 4. Poängsättning av Technology Readiness Level (TRL) för bedömning av kommersiell genomförbarhet.

Den kommersiella genomförbarheten vid behandling av potatissidoströmmar beror i hög grad på den valda teknologins TRL. Anaerob rötning för biogasproduktion är en fullt mogen teknologi på TRL 9, stödd av tusentals aktiva industriella anläggningar globalt (Almeida et al., 2023). Avancerade integrerade bioraffinaderimodeller, exempelvis system som kopplar kontinuerlig biobutanolfermentering till samtidig produktutvinning, befinner sig däremot vanligen mellan TRL 4 och 6 och kräver ytterligare validering i pilotskala (Hijosa-Valsero et al., 2018). Hydrotermiska karboniseringssystem närmar sig den kommersiella tröskeln, med flera fullskaliga anläggningar i drift som visar teknisk tillförlitlighet för våta organiska matriser (Romano et al., 2023).



Figur 5. Syntes: den tekno-ekonomiska bedömningsmatrisen.

Figur 5 visar den tekno-ekonomiska bedömningsmatrisen. Den utvärderar olika konverteringsvägar från potatissidoströmmar till energi utifrån två dimensioner: Technology Readiness Level på x-axeln och kommersiell eller ekonomisk attraktivitet på y-axeln. Matrisen klargör vilka teknologier som är redo för omedelbar industriell implementering och vilka som kräver fortsatt forskning och utveckling.

Anaerob rötning för biogasproduktion placeras i den mest gynnsamma delen av matrisen, med TRL 9 och hög kommersiell genomförbarhet. Tekniken är globalt etablerad, fullt mogen och kan omvandla vattenrikt organiskt avfall till förnybar energi utan energikrävande torkningssteg.

Gasifiering, bioetanolsyntes, biobutanolfermentering och pyrolys är tekniskt mer utvecklade men begränsas ekonomiskt av höga kapitalbehov, produktseparation, produkttoxicitet eller torkningskrav. Integrerad pyrolys och förgasning, hydrotermiska processer och transesterifiering befinner sig i mellanskiktet av mognad och ekonomisk attraktivitet. Mörk fermentering för biohydrogen har låg teknisk mognad men hög framtida ekonomisk potential om biologiska stabilitetsproblem och uppskalningsutmaningar kan lösas.

Sammanfattningsvis visar matrisen att anaerob rötning är det mest tillförlitliga och lönsamma alternativet för omedelbar industriell tillämpning. Samtidigt kan framväxande tekniker, särskilt mörk fermentering och hydrotermiska processer, få betydande betydelse om de avancerar på TRL-skalan och integreras i bredare bioraffinaderisystem.

7.3 Energieffektivitet och destillationsförluster

En bedömning av anläggningarnas nettoenergi kräver noggrann redovisning av den interna energiförbrukningen. Bioetanol- och biobutanolanläggningar belastas av betydande energiförluster vid destillation och rening. Dessa slutsteg kan konsumera en stor del av den återvunna bruttoenergin eftersom alkoholerna måste separeras från en utspädd fermenteringsvätska (Soni et al., 2023).

Torra termiska processer medför stora latent värmebehov när de behandlar vattenrika potatisskal och riskerar därför att få negativ termodynamisk balans utan föregående mekanisk avvattning (Almeida et al., 2023). Våta konverteringsvägar, framför allt anaerob rötning och hydrotermisk karbonisering, bibehåller därför den högsta nettoenergieffektiviteten genom att helt undvika termiska förångningsförluster (Catenacci et al., 2022).

7.4 Ekonomiska indikatorer och lönsamhet

Ekonomisk modellering visar att fristående energiproduktion från jordbrukssidoströmmar ofta har svårt att upprätthålla lönsamhet på grund av höga kapitalutgifter och fluktuerande energipriser. En övergång till kaskadkopplade bioraffinaderier kan däremot förbättra den finansiella bärkraften. Tekno-ekonomiska analyser visar att integrerade anläggningar som först extraherar högvärdiga polyfenoler, därefter producerar biogas och slutligen återvinner biokol, kan ge internräntor över 10 procent och kortare återbetalningstider (Almeida et al., 2023).

Implementering av sådana integrerade system i regioner som Österbotten kan skapa robusta nuvärden genom att samtidigt minska kostnader för avfallshantering och generera flera intäktströmmar från energi- och biokemikalieförsäljning.

8. Avancerad raffinering och standardisering

8.1 Raffineringsvägar till transportbränslen

Transportsektorns klimatneutralitet kräver att fossil bensin, diesel och flygbränsle ersätts med hållbara lågkolalternativ (Suckling et al., 2022). Grundläggande biologisk fermentering kan producera enkla alkoholer såsom bioetanol, men mer avancerad bearbetning krävs för att producera komplexa, direkt utbytbara kolvätebränslen för tung transport.

Rå biogas från potatissidoströmmar kräver omfattande rening för att uppfylla kraven för fordonsbränsle eller gasnätsinmatning. Den viktigaste raffineringsvägen är kontinuerlig avlägsning av koldioxid och svavelväte genom skrubberteknologier. Kostnadseffektiva aminskrubbersystem med glasfiberkonstruktion kan minska initiala investeringskostnader och samtidigt höja metankoncentrationen till biometanspecifikationer (Makkonen, 2025). Flytande biodrivmedel, exempelvis biodiesel från avfallslipider, behöver standardiseras genom katalytisk behandling och destillation för att uppfylla internationella bränslestandarder såsom EN 14214 och ASTM D6751 (Valero et al., 2019).

Tabell 1. Sammanfattning av uppgraderingsvägar

Teknologi / väg	Ursprungligt substrat / intermediär	Målbränsle	Genomförbarhet och effektivitet
Direkt dehydrering och inblandning	Fermenteringsvätska (bioetanol)	Gasohol (bensinersättning)	Kommersiellt mogen; kräver omfattande dehydrering till <0,5 procent vatten.
Direkt inblandning	ABE-fermentering (biobutanol)	Drop-in för diesel/bensin	Hög energitäthet och låg hygroskopicitet; kompatibilitet med direktinsprutade dieselmotorer har visats.
Biologisk metanolsyntes	Biogas/metan	Biometanol	Framväxande teknik med immobiliserade metanotrofer (metanproducerande bakterier).

Ångreforming	Biogas/metan	Biometanol	Tekniskt möjlig men sänker anläggningens totala energieffektivitet till cirka 32,3 procent på grund av sitt energibehov.
Fischer-Tropsch-syntes	Syntesgas/biometan	Syntetisk diesel och jetbränsle	Kan producera bränslen för tung transport men präglas av betydande termodynamiska förluster, cirka 26,4 procent energieffektivitet.

Utvärderingen av att omvandla enkla bioalkoholer eller biometan till syntetiska drop-in-bränslen visar en tydlig ekonomisk och termodynamisk avvägning. Uppgraderingsprocesser kräver dyr konverteringsteknik och medför betydande energiförluster. Medan anaerob rötning kombinerad med biogasuppgradering kan nå en nettoenergieffektivitet omkring 56,8 procent, kan ångreforming för syntes av flytande biometanol reducera den totala energieffektiviteten till cirka 32,3 procent (Wu et al., 2023).

8.2 Optimeringsriktmärken och standarder

Effektiv drift av konverteringsanläggningar förutsätter avancerad processanalys och simulering. Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) gör det möjligt för ingenjörer att simulera nedbrytningskinetik för komplexa jordbrukssubstrat och därmed fastställa hydrauliska uppehållstider och organiska belastningar innan fysisk anläggningsdesign påbörjas (Koch et al., 2020). Maskininlärning och experimentplanering kan dessutom användas för dynamisk realtidsoptimering av reaktorparametrar, exempelvis pH och temperatur, så att termodynamiskt utbyte maximeras samtidigt som försurningsrelaterade driftsfel förebyggs (Pei et al., 2022).

Ett sammanhållet ramverk av standarder är viktigt för bioenergisektorns strukturella tillförlitlighet. VDI 4630 behandlar substratkaraktärisering och biokemisk metanpotential och ger därmed en grund för jämförbar utvärdering av råvaror. VDI 4631 anger kvalitetskriterier för konstruktion av biogasanläggningar och är därmed ett centralt tekniskt riktämärke för investerare och operatörer. ISO 20675:2021 standardiserar terminologi, klassificering och säkerhetsprotokoll för biogas och skapar ett gemensamt tekniskt språk för internationell tekniköverföring.

Tabell 2. Sammanfattning av optimeringsriktmärken och standarder.

Standard / riktlinjer	Beskrivning och tillämpning
VDI 4630	Reglerar karakterisering av organiska substrat och protokoll för biokemisk metanpotential (BMP). Möjliggör tillförlitlig råvarubedömning och enhetligare prissättning.
VDI 4631	Fastställer tekniska kvalitetskriterier för fysisk utformning av biogasanläggningar. Viktigt riktämärke för investerare och operatörer som bedömer nya projekt.
ISO 20675:2021	Global kvalitetsstandard för biogasterminologi, klassificering och säkerhetsprotokoll. Underlättar internationell tekniköverföring.
EU BREF (avfallsbehandling)	Beskriver bästa tillgängliga teknik för avfallsbehandlingsanläggningar och anger miljö- och utsläppskrav enligt EU-regelverk.

VFA/TA-kvot	Operativa riktlinjer för förhållandet mellan flyktiga fettsyror och total alkalinitet. Möjliggör kontinuerlig processövervakning och proaktiv styrning.
-------------	---

Samtidigt skapar artificiell intelligens och maskininlärning en ny uppsättning digitala standarder för optimering av bioraffinaderier. Med avancerade datadrivna metoder har det blivit möjligt att förutsäga råvaruegenskaper och gasproduktion, vilket underlättar realtidsbeslut i komplexa rötningssystem med hög torrsubstanshalt (De Clercq et al., 2020; Wang et al., 2020). När Europa rör sig mot klimatneutralitet kommer kombinationen av hållbar hantering av livsmedelsavfall, inklusive potatissidoströmmar, och avancerade förbehandlingsteknologier att vara central. Integrering av bioenergiinfrastruktur med andra förnybara konverteringsteknologier blir därför avgörande för en robust och koldioxidneutral energiframtid.

9. Slutsats

Avfall-till-energi-strategier måste anpassas direkt till de fysiska och termodynamiska egenskaperna hos de substrat som behandlas. Råa potatissidoströmmar kan innehålla upp till 85 procent vatten. Traditionella torra termiska processer, såsom förgasning och torr pyrolys, skapar därför betydande termodynamiska underskott eftersom de kräver omfattande förtorkning innan konverteringen kan inledas. Detta försämrar anläggningens nettoenergieffektivitet. För att bibehålla positiv energibalans och operativ lönsamhet bör våta konverteringsvägar prioriteras.

Anaerob rötning framstår som den bästa konverteringsteknologin på kort sikt. Med en fullmogen TRL-nivå på 9 kan AD behandla vattenrik biomassa direkt och därmed undvika dyra dehydreringssteg. Den biologiska vägen är särskilt väl lämpad för Finlands omställning mot decentraliserad förnybar energi, framför allt i Österbotten. Strategin stämmer också överens med Finlands ambition att utveckla lokal energiåtervinning från svårhanterliga jordbruksrester.

Hydrotermisk karbonisering är det mest lovande tekniska alternativet på medellång sikt. Genom trycksatta vattenförhållanden vid 180-260 °C hålls vattnet i flytande fas, vilket helt undviker den förångningsförlust som begränsar andra termiska processer. Reaktionen producerar snabbt ett kolrikt material som kan användas som fast bränsle eller jordförbättringsmedel. HTC befinner sig ungefär på TRL 5-6, vilket innebär att höga kapitalutgifter för trycksatta reaktorer fortfarande begränsar användning på mindre gårdar. Pågående kommersiell uppskalning kan dock göra tekniken attraktiv och lönsam i framtiden.

Framtida projekt för omvandling av potatissidoströmmar till energi bör gå från specialiserad energiproduktion till multifunktionella och integrerade bioraffinaderier. Finansiell avkastning förbättras när högvärdiga polyfenoler först extraheras, följt av energikonvertering och ytterligare koppling till biokolproduktion. Nya anläggningar bör dessutom följa digitala standarder och utnyttja maskininlärning för prediktion av råvaruegenskaper och gasutbyten. Kombinationen av hållbar råvaruhantering, avancerad förbehandling och integrering med andra förnybara energisystem kommer att vara nödvändig för resilient klimatomställning och klimatneutralitet i Finland och Europa.

10. Källförteckning

- Abad, V., Avila, R., Vicent, T., & Font, X. (2019). Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: biogas production impact and economic factors. *Bioresource Technology*, 283, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>
- Abedini, A., Amiri, H., & Karimi, K. (2020). Efficient biobutanol production from potato peel wastes by separate and simultaneous inhibitors removal and pretreatment. *Renewable Energy*, 160, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.112>
- Achinas, S., Li, Y., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2019). Biogas Potential from the Anaerobic Digestion of Potato peels: Process Performance and Kinetics Evaluation. *Energies*, 12(12), 2311. <https://doi.org/10.3390/en12122311>
- Adeleye, T., Yeo, H., Seth, R., Hafez, H., & Biswas, N. (2022). Influence of mix ratio of potato peel and pig manure on reaction kinetics and methane recovery from anaerobic co-digestion. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(7), 675–682. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0210>
- Almeida, P. V., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2023). Biorefinery perspective for industrial potato peel management: technology readiness level and economic assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110049. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110049>
- Awogbemi, O., Von Kallon, D. V. V., & Owoputi, A. O. (2022). Biofuel Generation from Potato peel Waste: Current State and Prospects. *Recycling*, 7(2), 23. <https://doi.org/10.3390/recycling7020023>
- Brindhadevi, K., Anto, S., Rene, E. R., Sekar, M., Mathimani, T., Chi, N. T. L., & Pugazhendhi, A. (2021). Effect of reaction temperature on the conversion of algal biomass to bio-oil and biochar through pyrolysis and hydrothermal liquefaction. *Fuel*, 285, 119106. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119106>
- Capodaglio, A., Callegari, A., & Lopez, M. (2016). European framework for the diffusion of biogas uses: emerging technologies, acceptance, incentive strategies, and institutional-regulatory support. *Sustainability*, 8(4), 298. <https://doi.org/10.3390/su8040298>
- Catenacci, A., Boniardi, N., & Malpei, F. (2022). Hydrothermal carbonization of anaerobic digestate: A review of the process and its application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112215.
- Chohan, N. A., Aruwajoye, G. S., Sewsynker-Sukai, Y., & Kana, E. G. (2020). Valorisation of potato peel wastes for bioethanol production using simultaneous saccharification and fermentation: Process optimization and kinetic assessment. *Renewable Energy*, 146, 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.042>
- Daimary, N., Eldiehy, K. S. H., Boruah, P., Deka, D., Bora, U., & Kakati, B. K. (2022). Potato peels as a sustainable source for biochar, bio-oil and a green heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107108. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107108>
- De Clercq, D., Wen, Z. G., Fei, F., Caicedo, L., Yuan, K., & Shang, R. X. (2020). Interpretable machine learning for predicting biomethane production in industrial scale anaerobic co digestion. *Science of the Total Environment*, 712, 14.
- Deng, C., Lin, R., Kang, X., Wu, B., O’Shea, R., & Murphy, J. D. (2020). Improving gaseous biofuel yield from seaweed through a cascading circular bioenergy system integrating anaerobic digestion and pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109895. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109895>
- Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2020). Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review. *Energy & Environmental Science*, 13(10), 3207–3252. <https://doi.org/10.1039/D0EE01187H>

- Dimitriadis, A., & Bezergianni, S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>
- Ebrahimian, F., Denayer, J. F. M., & Karimi, K. (2022). Potato peel waste biorefinery for the sustainable production of biofuels, bioplastics, and biosorbents. *Bioresource Technology*, 360, 127609. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127609>
- EastCham Finland. (2021). Waste-to-Energy Solutions. EastCham Finland ry. <https://www.eastcham.fi/finnishwastemanagement/municipal-solid-waste/recycling-and-recovery/kampanjan-alasivun-alasivu/>
- Elhag, E. A., Bagy, H. M. K., & Hassan, S. M. (2023). Bioconversion of Potato peel Wastes into Biofuels by Fungal Amylases. *Catalysts*, 13(5), 913. <https://doi.org/10.3390/catal13050913>
- European Biogas Association. (2025). EBA Statistical Report 2025, EBA, Bruxelles.
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160–177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- Giuliano, A., Barbanera, M., & Freda, C. (2020). Gasification of agricultural residues: A review of the technology and its application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109632.
- Hijosa-Valsero, M., Paniagua-García, A. I., & Díez-Antolínez, R. (2018). Industrial potato peel as a feedstock for biobutanol production. *New Biotechnology*, 46, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.06.001>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- Jin, Y., Zhang, L., Yi, Z., Fang, Y., & Zhao, H. (2022). Waste-to-energy: biobutanol production from cellulosic residue of sweet potato by *Clostridia acetobutylicum*. *Environmental Engineering Research*, 27(5), 210372. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.372>
- Kiefer, D., Merkel, M., Lilge, L., Henkel, M., & Hausmann, R. (2021). From acetate to bio-based products: underexploited potential for industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 39(4), 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.09.004>
- Koch, K., Plöchl, M., & Wichern, M. (2020). Probabilistic simulation of biogas production from anaerobic co-digestion using Anaerobic Digestion Model No. 1. *Water Research*, 185, 116268.
- Liang, J., Liu, C., Lu, H., Yang, G., Zhang, G., & Wang, A. (2024). Enhanced anaerobic fermentation of potato waste for volatile fatty acid production by dilute sulfuric acid pretreatment: Performance, microbial community, and gene expression. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 105054. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105054>
- Lin, R., O'Shea, R., Deng, C., Wu, B., & Murphy, J. D. (2021). A perspective on the efficacy of green gas production via integration of technologies in novel cascading circular bio-systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111427>
- Makkonen, P. (2025). Farm-scale biomethane production facility for challenging raw materials (MaaMeta). Project Presentation, Vaasa, Finland.
- Maroušek, J., Rowland, Z., Valášková, K., & Král, P. (2020). Techno-economic assessment of potato waste management in developing economies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(4), 937–944. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01835-w>
- Mars, A. E., Veuskens, T., Budde, M. A. W., van Doeveren, P. F. N. M., Lips, S. J., Bakker, R. R., de Vrije, T., & Claassen, P. A. M. (2010). Biohydrogen production from untreated and hydrolyzed potato steam peels by the

- extreme thermophiles *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga neapolitana*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(15), 7730–7737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.064>
- Mazaheri, D., & Pirouzi, A. (2020). Valorization of *Zymomonas mobilis* for bioethanol production from potato peel: fermentation process optimization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 3389–3398.
- Monlau, F., Sambusiti, C., Antoniou, N., Barakat, A., & Zabaniotou, A. (2015). A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. *Applied Energy*, 148, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.024>
- Nizamuddin, S., Baloch, H. A., Griffin, G. J., Mubarak, N. M., Bhutto, A. W., Abro, R., Wabaidur, S. A., & Ali, M. (2017). An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1289–1299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.122>
- Pandiyan, K., Singh, A., Singh, S., Saxena, A. K., & Nain, L. (2019). Technological Interventions for Utilization of Crop Residues and Weedy Biomass for Second Generation Bio-Ethanol Production. *Renewable Energy*, 132, 723–741. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.049>
- Pandey, S., Singh, N. K., Rao, K. N. S., Yadav, T. C., Sanghavi, G., Yadav, M., Bansal, A. K., Thanki, A., & Nayak, J. (2020). Bacterial production of organic acids and subsequent metabolism. In *Engineering of Microbial Biosynthetic Pathways* (pp. 153-173). Springer, Singapore.
- Patel, S. K. S., Gupta, R. K., Kalia, V. C., & Lee, J. K. (2021). Integrating anaerobic digestion of potato peels to methanol production by methanotrophs immobilized on banana leaves. *Bioresource Technology*, 323, 124550. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124550>
- Pei, Z., Liu, S., Jing, Z., Zhang, Y., Wang, J., Liu, J., & Wang, L. (2022). Understanding of the interrelationship between methane production and microorganisms in high-solid anaerobic co-digestion using microbial analysis and machine learning. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133848>
- Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., & Kyritsis, D. C. (2010). Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1989-1997. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.032>
- Ren, Y., Yu, M., Wu, C., Wang, Q., Gao, M., Huang, Q., & Liu, Y. (2018). A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. *Bioresource Technology*, 247, 1069-1076. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.082>
- Romano, S., D'Imporzano, G., & Malpei, F. (2023). Industrial application of hydrothermal carbonization for waste management. *Waste Management*, 156, 1–15.
- Sagar, N. A., Pathak, M., Sati, H., Agarwal, S., & Pareek, S. (2024). Advances in Pretreatment Methods for the Upcycling of Food Waste: A Sustainable Approach. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104413>
- Salem, A. H., Mietzel, T., Brunstermann, R., & Widmann, R. (2018). Two-stage anaerobic fermentation process for bio-hydrogen and bio-methane production from pre-treated organic wastes. *Bioresource Technology*, 265, 399–406. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.017>
- Soni, S. K., Sharma, B., Sharma, A., Thakur, B., & Soni, R. (2023). Exploring the potential of potato peels for bioethanol production through various pretreatment strategies and an in-house-produced multi-enzyme system. *Sustainability*, 15(11), 9137. <https://doi.org/10.3390/su15119137>
- Stams, A. J. M., & Plugge, C. M. (2009). Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. *Nature Reviews Microbiology*, 7(8), 568-577. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2166>
- Suckling, I. D., de Miguel Mercader, F., Monge, J. J., Wakelin, S. J., Hall, P. W., Bennett, P. J., Höck, B., Samsatli, N. J., Samsatli, S., & Fahmy, M. (2022). Best options for large-scale production of liquid biofuels by

varying transportation sectors needs. *Applied Energy*, 323, 119534.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119534>

Valero, E., Rico, C., & Rico, J. L. (2019). Production of biodiesel meeting EN 14214 and ASTM D6751 standards from industrial waste oils. *Fuel*, 239, 1083–1090.

Wang, W., & Lee, D. J. (2021). Direct interspecies electron transfer mechanism in enhanced methanogenesis: A mini-review. *Bioresource Technology*, 330, 124980. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124980>

Wang, W., Li, J., & Zhang, Y. (2023). Hydrothermal carbonization of anaerobic digestate for biochar production. *Bioresource Technology*, 370, 128532.

Wu, B., Lin, R., Bose, A., Diaz Huerta, J., Kang, X., Deng, C., & Murphy, J. D. (2023). Economic and environmental viability of biofuel production from organic wastes: A pathway towards competitive carbon neutrality. *Energy*, 285, 129322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129322>

11. Appendix

Tabell 3. Jämförelse av teknologier för energiomvandling av potatissidoströmmar.

Konverteringsmetod	Fukttolerans	Värmebehov	Förbehandlingsbehov	TRL	Huvudprodukter	Huvudsaklig flaskhals	Lämplighet för Österbotten
Anaerob rötning (AD)	Hög (idealisk för 79-85 % vattenhalt)	Låg (mesofil ca 37 °C eller termofil ca 55 °C)	Ja (mekanisk eller kemisk sönderdelning)	9	Biogas, rötrest	Lång uppehållstid, VFA-ackumulering och hantering av föroreningar	Hög: väl förenlig med Österbottens mål för gårdsnära biometan
Bioetanol	Hög	Låg vid fermentering, hög vid destillation	Ja (sackarifiering och hydrolys)	6-8	Bioetanol	Mikrobiell produkthämning och hög energiförbrukning vid separering	Medelhög: tekniskt beprövat men kräver ofta större centraliserade bioraffinaderier
Biobutanolf fermentering	Hög	Låg vid fermentering, hög vid destillation	Ja (inhibitoravlägsning och omfattande hydrolys)	6-8	Biobutanol	Stark mikrobiell toxicitet och höga energikostnader	Medelhög: bättre drop-in-potential än etanol
Mörk fermentering för biohydrogen	Hög	Låg till medelhög beroende på temperatur	Ja (kräver undertryckning av metanogener)	3-4	Biohydrogen	Biologisk instabilitet och låga volymetriska utbyten	Låg: främst laboratorie- och pilotforskning

Pyrolys	Låg	Hög (300-700 °C)	Ja (intensiv torkning och storleksreduktion)	7	Bioolja, biokol, syntesgas	Stor termodynamisk kostnad för torkning av vått avfall	Låg: svaga ekonomiska marginaler på grund av torkningskrav
Förgasning	Låg	Mycket hög (800-1200 °C)	Ja (torkning och pelletering)	8-9	Syntesgas	Energikrävande torkning och tjärbildning	Låg: mycket kapitalintensiv
Integrerad pyrolys och förgasning	Låg	Mycket hög	Ja (intensiv torkning)	5-6	Syntesgas av hög kvalitet	Komplex drift i dubbla reaktorer	Låg: höga kapitalbehov för småskalig användning
Hydrotermisk karbonisering (HTC)	Hög (idealisk för 15-25 % torrsubstans)	Medelhög (180-260 °C i trycksatt vatten)	Minimal (utnyttjar substratets vattenhalt)	5-6	Hydrochar, vattenfas	Höga kapitalutgifter för trycksatta reaktorer	Medelhög: lovande men ännu begränsad av CAPEX på gårdsnivå
Hydrotermisk likvifering (HTL)	Hög	Medelhög till hög (250-370 °C vid högt tryck)	Minimal	3-5	Biokrud/bioolja	Komplex uppgradering av bioolja	Låg-medelhög: lämplig för våt biomassa men kräver avancerad katalytisk uppgradering
Transesterifiering	Låg	Låg till medelhög	Ja (lipidextraktion och dehydrering)	9	Biodiesel, glycerol	Beroende av lipidrika substrat	Låg: potatissidoströmmar är stärkelse-, inte lipidrika
Metanolsyntes	Låg	Hög (reformering och syntes)	Ja (rening och uppgradering av syntesgas/biogas)	7-9	Biometanol	Stora termodynamiska energiförluster	Medelhög: uppgradering av biogas till metanol kan halvera nettoenergieffektiviteten