

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

## **ALLAM-KIERTOPROSESSI**

### **Allam Cycle**

Nokialla 21.6.2021

Kristian Heiskala

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Kristian Heiskala

Allam-kiertoprosessi

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: TkT Markku Nikku

Ohjaaja: TkT Markku Nikku

30 sivua ja 5 kuvaa

Hakusanat: Allam, happipolttolito, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Allam-kiertoprosessi on happipolttoprosessi, jossa kiertoaineena toimii ylikriittinen hiilidioksidi. Osaltaan Allam-kiertoprosessi voi olla vastaamassa ilmastonmuutoksen aiheuttamiin haasteisiin ja vaadittavaan hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Prosessin avulla esimerkiksi maakaasua pystytään polttamaan käytännössä päästöttömästi, mikä on merkittävä asia energijärjestelmän toimintavarmuuden kannalta tulevaisuudessa uusiutuvan energiantuotannon kasvattaessa osuuttaan.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan Allam-kiertoprosessia yleisellä tasolla. Työssä esitellään kivihiili- ja maakaasukäyttöinen prosessi sekä niiden toimintaperiaate. Lisäksi tärkeimpiä komponentteja esitellään. Työssä verrataan lyhyesti prosessia sen kilpailijoihin ja selvitetään sen soveltuvuutta osakuormakäyttöön. Lisäksi esitellään muutamia ehdotettuja variaatioita prosessiin.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO .....	6
2	ALLAM-KIERTOPROSESSI .....	7
2.1	Kiertoaineen tila .....	9
2.2	Maakaasukäyttö .....	10
2.3	Kivihiilikäyttö.....	11
2.3.1	Kaasutus .....	13
2.3.2	Varsinainen prosessi .....	13
2.4	Osakuormatoiminta .....	14
3	HYÖTYSUHDE JA KOMPONENTIT .....	16
3.1	Hyötysuhde.....	16
3.2	Turbiini .....	16
3.3	Polttokammio .....	17
3.4	Lämmönsiirrin .....	17
4	VARIAATIOT .....	19
4.1	Ylijäämahiilidioksidi .....	19
4.2	Allam-prosessi ja LNG.....	19
4.3	Integrointi aurinkoenergian kanssa.....	20
4.4	Allam Z-prosessi .....	20
5	ALLAM-KIERTOPROSESSI JA KILPAILIJAT .....	22
5.1	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi .....	22
5.2	Happipolttoprosessit .....	22
5.2.1	Clean Energy System (CES).....	23
5.2.2	Graz .....	23
5.2.3	Kustannukset.....	23
5.3	Kaasutuskombiprosessi .....	24
5.3.1	Kustannukset.....	25
6	YHTEENVETO .....	26

LÄHTEET .....	28
---------------	----

## LYHENNELUETTELO

IGCC Kaasutuskombiprosessi

ASU Ilmanerotusyksikkö

CCS Hiilidioksidin erotus ja talteenotto

EOR Kehittynyt öljyn poraus

LCOE Tasoitettu sähkön hinta

HTT Korkealämpötila-turbiini

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on nopeasti noussut erääksi suurimmista uhkakuvista ihmiskunnan tulevaisuudelle. Ihmisen toiminnasta aiheutuneet päästöt ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosikymmeninä. Energiantuotannossa suurin osa päästöistä aiheutuu fossiilisten polttoaineiden poltosta. Niiden poltossa vapautuva hiilidioksidi on merkittävä kasvihuonekaasu, jonka vapautuminen ilmakehään kiihdyttää ilmastonmuutosta. Ilmastonmuutoksen estämiseksi ja ehkäisemiseksi on ehdotettu ja jo toteutettukin monia toimia, joista energiantuotannon kannalta tärkein on fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen ja lopulta lopettaminen.

Viime vuosina uusiutuvat energiantuotantomuodot, kuten esimerkiksi tuulivoima ovat kasvattaneet osuuttaan energiantuotannossa. Kuitenkin nykyinen yhteiskunta on rakennettu fossiilisten polttoaineiden tarjoamalle pohjalle. Tämän takia nopea siirtyminen uusiutuviin energianlähteisiin perustuvaan energiantuotantoon ei ole mutkatonta. Kuitenkin fossiilisia polttoaineita on mahdollista hyödyntää samalla vähentäen päästöjä. Tämä perustuu hiilidioksidin kaappaukseen ja varastointiin. Nämä tekniikat mahdollistavat fossiilisten polttoaineiden käytön osana siirtymää kohti uusiutuvaa energiantuotantoa.

Allam-kiertoprosessi on Rodney Allamin ja Netpowerin kehittämä, happipolttua hyödyntävä uudenlainen tapa tuottaa sähköä. Allam-kiertoprosessissa kiertoaineena toimii höyryn sijasta hiilidioksidi, mikä yhdistettynä polttoon puhtaan hapen läsnäollessa mahdollistaa sen alhaiset CO<sub>2</sub>-päästöt poltettaessa maakaasua ja kivihiihtä. Hyötysuhteeltaan Allam-kiertoprosessi on kilpailukykyinen verrattuna perinteisiin voimalaitoksiin, kuten maakaasukombiin tai kivihiihtien pölypolttoon.

Tässä kandidaatintyössä suoritetaan kirjallisuuskatsaus Allam-kiertoprosessiin. Työssä keskitytään erityisesti prosessin toimintaan, uudenlaisiin komponentteihin ja niiden kehitystyöhön, mahdollisiin variaatioihin ja yhdistelmiin sekä taloudelliseen näkökulmaan. Tavoitteena on luoda kattava yleiskatsaus prosessista.

## 2 ALLAM-KIERTOPROSESSI

Allam-kiertoprosessi voidaan ajatella muunnelmaksi Brayton-prosessista ja sen tärkeimmät komponentit ovat lämmönvaihdin, polttokammio ja turbiini, aivan kuten perinteisessä kaasuturbiinissakin. Turbiinin painesuhde on välillä 6–12 ja sisääntulopaine noin 200–400 bar. Prosessille ominaista onkin korkea paine turbiinissa ja polttokammiossa. (Allam et al. 2013, s. 1138)

Allam-kiertoprosessissa kiertoaineena toimii hiilidioksidi. Prosessin korkeammalla painetasolla, eli polttokammiossa ja turbiinin sisääntulossa, hiilidioksidi on ylikriittistä (Allam et al 2017, s. 5948). Hiilidioksidin kriittinen paine on noin 73 bar ja kriittinen lämpötila noin 31 °C (NIST Webbook). Esimerkiksi turbiinin sisääntulossa hiilidioksidi on ylikriittistä, jolloin sillä on korkea tiheys ja kaasun kaltainen olomuoto (Tong 2019, s. 193). Lisäksi korkean tiheyensä takia vaadittava hiilidioksidin massavirta pienenee, mikä johtaa tarvittavien komponenttien pienentymiseen ja alhaisempiin kustannuksiin (Osti.gov). Hiilidioksidi soveltuu kiertoaineeksi myös myrkyttömyytensä ja palamattomuutensa vuoksi (Zhu et al. 2019, s. 478).

Allam-kiertoprosessissa polttoainetta ei polteta ilman, vaan lähes puhtaan hapen kanssa. Poltossa tarvittava happi erotetaan ilmasta ilmanerotusyksikön (ASU) avulla. Tällä hetkellä hapen erotus ilmasta perustuu kryogeeniseen tislaukseen (Allam 2009, s.461). Hapen erotuksessa syntyy myös typpeä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi ammoniakkin valmistuksessa (Allam et al., 2016, s. 5963).

Happipolttoteknologiaa ei ole vielä juurikaan saatavilla kaupallisilla markkinoilla. Allam-kiertoprosessi on tämän hetkisen tiedon mukaan lupaavimpien teknologioiden joukossa, ja maakaasukäyttöinen versio saadaan eri arvioiden mukaan kaupallisesseen käyttöön vuosina 2027–2032. (Jukkola et al., 2021, s. 1, 11)

Kaupallisen tuotannon puutteesta huolimatta ensimmäinen Allam-kiertoprosessiin perustuva voimalaitos on jo olemassa, sillä prosessi on toiminnassa Texasissa sijaitsevassa 50 MW:n polttoaineteholla toimivassa testilaitoksessa. Huhtikuussa 2021 Allam-kiertoprosessin patenttia hallinnoiva NetPower tiedotti, että se suunnittelee 280 MW sähköteholla toimivien laitosten rakentamista Coloradon ja Illinoisin alueille. Molempien laitosten tapauksessa

rakennuttamispäätöksen oletetaan tapahtuvan vuonna 2022 ja sähköntuotanto saattaisi alkaa jo vuonna 2025. (Patel, 2021)

Kuvassa 1 esitetään 50 MW<sub>th</sub> testilaitos, jonka avulla prosessin kehitystä jatketaan.



**Kuva 1** Allam-kiertoprosessi todellisuudessa (Netpower.com)

Kuvasta 1 voidaan havaita suora eroavaisuus tavanomaisiin voimalaitoksiin; Allam-prosessiin ei tarvita yhtäkään savupiippua. Lisäksi tarvittava pinta-ala on jopa 40 prosenttia pienempi verrattuna saman kokoluokan perinteiseen maakaasua hyödyntävään voimalaitokseen. (Netpower.com)

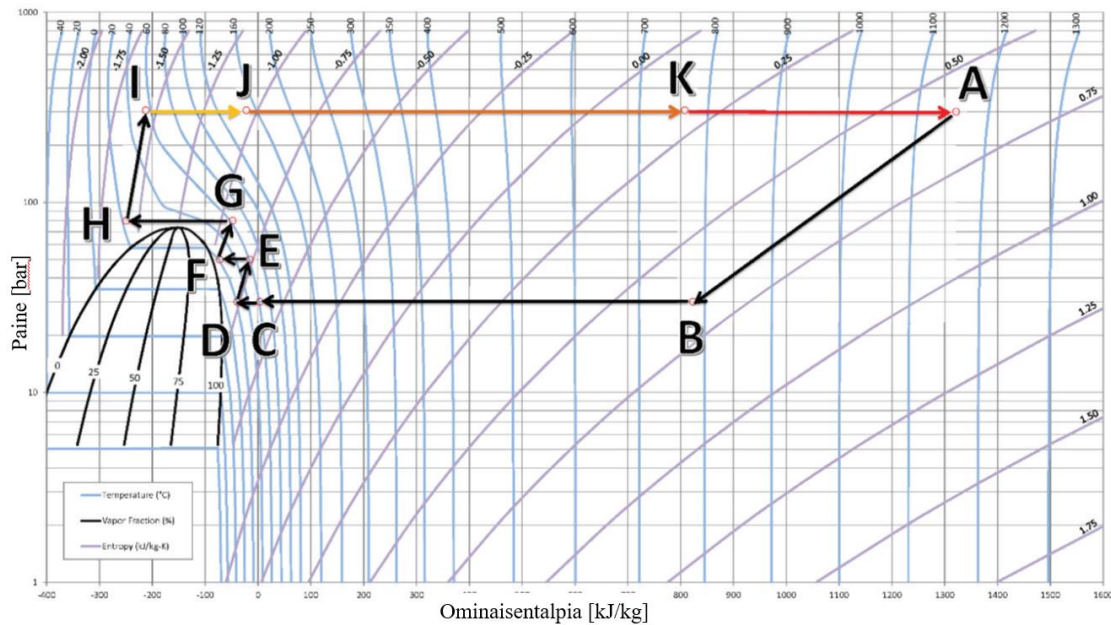
On todettu, että Allam-kiertoprosessiin sopii parhaiten korkean puhtausluokan happi (99,5 %), vaikka se kasvattaaakin ilmanerotukseen kulumaa tehoa. Kuitenkin epäpuhtaudet, argon ja typpi lisäävät kompressoreiden tehonkulutusta paineistusvaiheessa. Tästä johtuen hapnerotuksen tehon kasvun haitta on vähäisempi kuin kompressoreiden tehonkulutuksen vähentyminen, minkä takia 99,5 % puhtaus on sopiva valinta. (IEAGHG, 2015 D2 s. 27)

Ilmanerotusyksikön (ASU) optimointi on muutoinkin tärkeää, sillä se kuluttaa paljon sähköä. IEAGHG:n vuonna (2015, D2 s. 19) raportissa ilmanerotuksen on laskettu kuluttavan 170,9 MW sähköä, kun mallinnetun prosessin kokonaiskulutus on 207,5 MW ja nettoteho 848,4 MW. Myös Mitchell et al. (2019, s. 7) pääsivät vastaavan kokoluokan energiankulutukseen ASU:a tarkasteltaessa.



## 2.1 Kiertoaineen tila

Kuvassa 2 esitetään Allam prosessi logaritmisena paine-entalpia-kuvaajana.



**Kuva 2** Allam kierto prosessi log p, h tasossa (Allam et al, 2016)

Kuvasta 2 nähdään, että hiilidioksidi on suuren osan prosessia ylikriittisellä tasolla. Pisteiden A ja B välillä tapahtuu hiilidioksidin paisuminen turbiinissa, ja kohdat B:stä D:hen sisältävät lämmönpoiston lämmönvaihtimessa sekä veden erotuksen savukaasusta. Puristus tapahtuu vaiheittain pisteissä D:stä I:hin. Ensiksi kiertoaine puristetaan välijäähdytetyillä kompresso-reilla ylikriittiseen tilaan (piste G), jonka jälkeen hiilidioksidi jäähdytetään lähes ympäristön lämpötilaan, jolloin sen tiheys on yli  $700 \text{ kg/m}^3$ . Tämän seurauksena se voidaan pumpata ylemmän painetason paineeseensa ( $\approx 300 \text{ bar}$ ) monivaiheisella keskipakopumpulla. J:stä K:hon kiertoaine esilämmitetään lämmönvaihtimessa. (Allam et al., 2013 s. 1138)

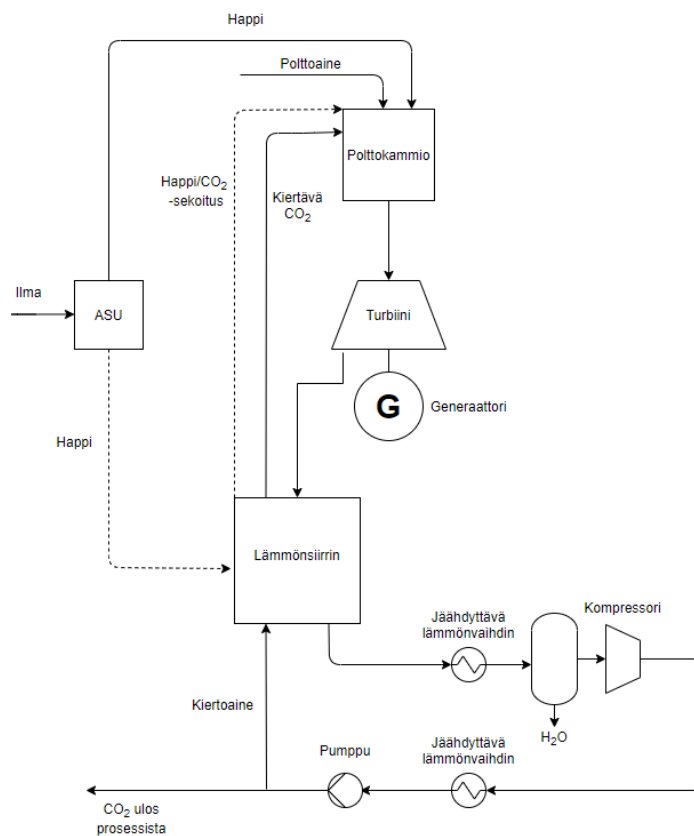
Kuten kuvasta 2 huomataan, prosessiin tuotava lämpömäärä (I→A) on merkittävästi suurempi, kuin prosessissa vapautuva (B→C). Tämän takia välillä I:stä J:hin kiertoainetta lämmitetään ulkoisesti, hyödyntämällä esimerkiksi ilmanerotusyksikön kompressorien tai hiilidioksidikierron kompressorien hukkalämpöä, joilla tavoitellaan noin  $100\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$  asteen lämpötilan nousua. Vaikka nämä toimet lisäävät edellä mainittujen komponenttien tehonkulutusta, kokonaisyötysuhteeseen toimilla on positiivinen vaikutus, sillä esilämmityksen

myötä sisään tuotavan polttoainetehon tarvittava määrä pienenee. (Allam et al., 2017, s. 5952)

Polttoaineen ollessa metaania, eli maakaasua tai biokaasua prosessissa päästään jopa 59 % hyötysuhteeseen käyttämällä laskennassa alemmaa lämpöarvoa (Allam et al., 2013 s.1145). Hyötysuhteissa on lähteestä riippuen eroavaisuuksia, sillä esimerkiksi Scaccabarozzi et al. artikkeli vuodelta 2016 kertoo hyötysuhteeksi 54.80 prosenttia.

## 2.2 Maakaasukäyttö

Kuvassa 3 esitetään maakaasukäyttöisen Allam-kiertoprosessin prosessikaavio.



**Kuva 3** Yksinkertaistettu maakaasukäytön prosessikaavio (muokattu lähteestä Allam, et al., 2013, s.1140)

Polttoaine, esimerkiksi maakaasu tai kaasutettu kivihiili, poltetaan polttokammiossa prosessissa kiertävän hiilidioksidin ja hapen kanssa. Tällöin syntyy savukaasuja, jotka sisältävät lähes pelkästään vettä ja hiilidioksidia. Turbiinilta poistuvat savukaasut kuljetetaan lämmönsiirtimeen, jossa lämpöä siirtyy savukaasuista kierrätettyyn hiilidioksidivirtaan sekä ASU:lta

saapuvaan happivirtaan. Polttokammioon tarvitaan lämmönsiirtimeltä hiilidioksidivirtaa turbiinin sisäänmenolämpötilan säätelyyn materiaalikestävyyden takaamiseksi. Lämmönsiirtimestä poistuvat savukaasut lauhdutetaan lähes ympäristön lämpötilaan, jotta vesi saadaan erotettua hiilidioksidista. Tämän jälkeen hiilidioksidi paineistetaan uudestaan kompressoreissa sekä myöhemmin pumpuissa, jonka mahdollistaa ylikriittisyyden aiheuttama korkeampi tiheys. Seuraavaksi kiertoaine johdetaan lämmönsiirtimeen, jossa se lämpenee ennen siirtymistä takaisin polttokammioon. Ennen lämmönsiirintä noin 5 prosenttia hiilidioksidivirrasta erotetaan kierrosta massatasapainon ylläpitämiseksi. Täten prosessia voidaan kuvailla puoliksi suljetuksi. (Allam et al., 2017 s. 5950–5951) Erotettu hiilidioksidi voidaan varastoida esimerkiksi maaperään tai meren pohjaan (Ilmastoopas.fi), tai hyödyntää sitä tarvitsevilla prosesseilla, joista lisää myöhemmissä luvuissa. Ennen lämmönsiirintä osa hiilidioksidivirrasta sekoitetaan ASU:lta saapuvaan happivirtaan. Lämmönsiirtimeen jälkeen ne johdetaan polttokammioon ja kierto alkaa alusta. (Allam et al., 2017 s. 5950–5951)

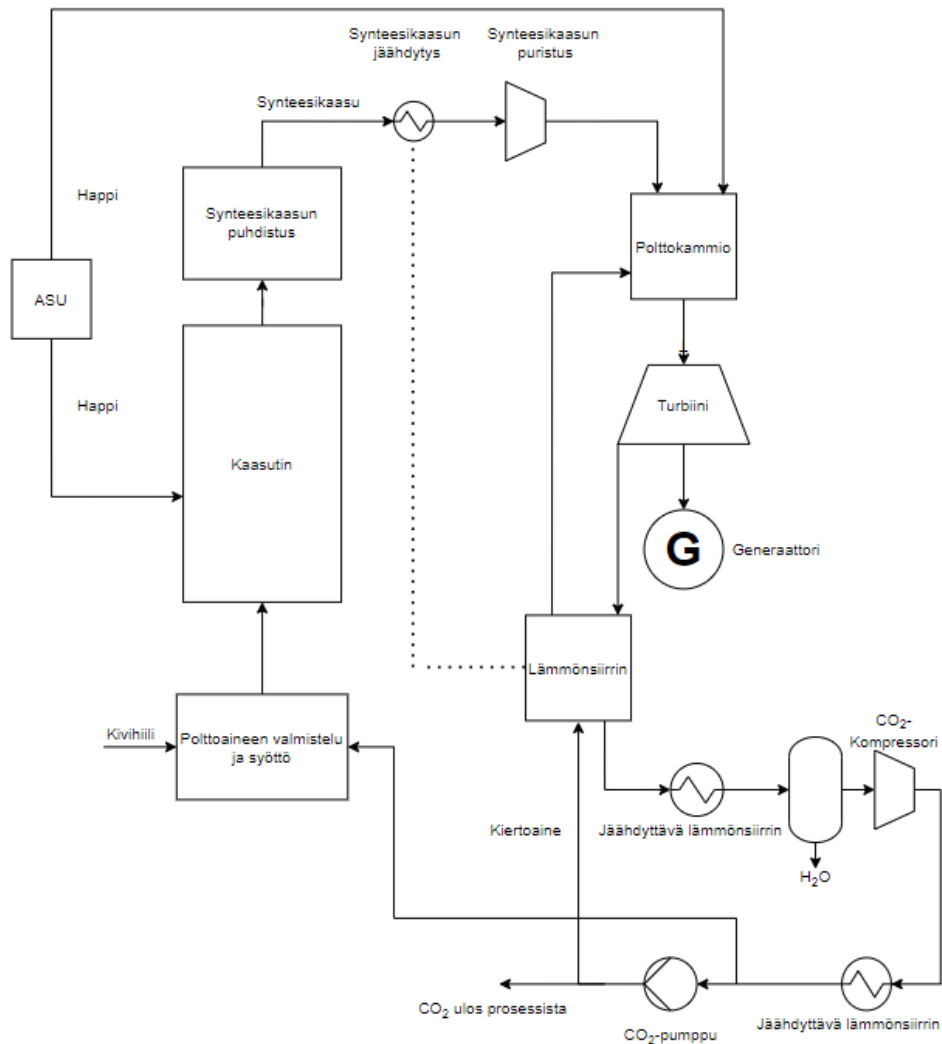
### 2.3 Kivihiilikäyttö

Allam-kiertoprosessin avulla myös kiinteitä polttoaineita, kuten kivihiiltä tai biomassaa, voidaan hyödyntää päästöttömässä energiantuotannossa kaasutuksen avulla. Tässä kandidaatin työssä keskitytään tarkastelemaan kivihiiltä. Prosessi itsessään on samankaltainen kuin maakaasua polttoaineena käyttävä. Kivihiili täytyy kuitenkin kaasuttaa niin sanotuksi synteetisikaasuksi. Kaasutuksen myötä prosessiin täytyy lisätä komponentteja, kuten syöttöjärjestelmä, kaasutuskattila sekä syntyvän synteettisen kaasun puhdistukseen liittyvät komponentit. Prosessin turbiini on samankaltainen kuin maakaasukäytössä, sillä kaasutuksessa syntyvän synteetisikaasun kemiallinen koostumus ei merkittävästi eroa maakaasusta. Kuitenkin esimerkiksi polttoainesuuttimet ovat erilaiset, johtuen maakaasuun ja synteetisikaasun eroavista alemmista lämpöarvoista (Lu et al, 2016 s. 2–4).

Kiinteän polttoaineen käyttöön liittyvien lisäkomponenttien valinta on kriittistä prosessin kustannustehokkuuden sekä hyötysuhteen kannalta. Esimerkiksi käytettävä polttoaine määrittää kaasutukseen tarvittavat osat. Maailmalla kivihiilenkaasutukseen on saatavilla laajalti tekniikkaa, johtuen esimerkiksi öljynjalostukseen liittyvästä teollisuudesta. Kuitenkin Allam-prosessissa tarvitsee huomioida uudenlaisia asioita verrattuna perinteisiin

kaasutusprosesseihin, kuten esimerkiksi kaasutuskombivoimalaitosprosessiin (Integrated Gasification Combined Cycle). (Lu et al., 2016, s. 2)

Kuvassa 4 esitetään Allam-prosessin toiminta kivihiilellä.



**Kuva 4** Allam-prosessi kivihiilellä (muokattu lähteestä Lu et al., 2016)

Kuvassa 4 esitettävä prosessikaavio kivihiilikäyttöisestä Allam-kiertoprosessista on pääpiirteittäin samanlainen kuin maakaasukäyttöisellään. Kivihiierversioon on lisättävä kuitenkin komponentteja liittyen polttoaineen valmisteluun, kuten esimerkiksi kaasutin.

### 2.3.1 Kaasutus

Kaasutus ja siihen liittyvät erilaiset teknologiat eivät ole tämän tutkielman keskiössä, joten ne esitellään tässä kappaleessa pintapuolisesti, itse prosessiin ja siihen vaikuttaviin tekijöihin keskittyen.

Vertailemalla kivihiilen prosessikaaviota maakaasun vastaavaan (kuva 2) voidaan havaita useita eroavaisuuksia. Hiili syötetään prosessiin ja se kaasutetaan synteetikaasuksi hapen läsnäollessa. Tässä vaiheessa synteetikaasu sisältää paljon epäpuhtauksia ja höyryä kaasutuksen takia, jonka vuoksi se puhdistetaan, suodatetaan sekä jäähdytetään lähes ympäristön lämpötilaan lämmönvaihtimessa. Jäähtyminen lauhduttaa synteetikaasussa olevan höyryn, sekä siirtää vapautuvaa lämpöä varsinaisen prosessin lämmönsiirtimen kylmään päähän. Tämän jälkeen synteetikaasu paineistetaan kompressorissa ja syötetään polttokammioon. (Allam et al., 2017, s.5952–5953)

Raakasynteetikaasu voidaan jäähdyttää joko vesisammutuksella, tai käyttämällä esimerkiksi säteilystä tai konvektioon perustuvaa jäähdytintä. IGCC laitoksissa käytetään usein jäähdytintä, josta lämpö otetaan hyötykäyttöön laitoksen höyryturbiinia ajatellen. Tällöin synteetikaasun lämpötila jäähdyttimen jälkeen on noin 1000 °C. Allam-prosessissa käytetään vesisammutusta, josta synteetikaasu poistuu alhaisemmassa lämpötilassa verrattuna jäähdytintä ratkaisuun, jolloin talteen saatava lämpö myöhemmin lämmönsiirtimessä ei ole yhtä suuri, lämpötilan ollessa noin 200 °C-300 °C. Kuitenkin vesisammutteiset järjestelmät ovat toimintavarmempia, yksinkertaisempia ja edullisempia. Lisäksi Allam-prosessissa synteetikaasu kulkeutuu lämmönsiirtimelle poistuttuaan puhdistuksesta, joten osa menetetyistä lämmöstä saadaan ikään kuin takaisin. (Lu et al., 2016, s. 3)

### 2.3.2 Varsinainen prosessi

Poltoissa lopuista jäljellä olevista epäpuhtauksista kuten, H<sub>2</sub>S, COS, NH<sub>3</sub> ja HCN, muodostuu hapettumisen seurauksena SO<sub>2</sub>, NO, H<sub>2</sub>O ja N<sub>2</sub>. Polttokammion kiertoaine johdetaan turbiinin läpi lämmönsiirtimeen samalla tavalla, kuin maakaasullakin. Suurimmat epäpuhtaudet kiertoaineessa turbiinilta poistuvassa virtauksessa ovat SO<sub>2</sub> ja NO/NO<sub>2</sub>. Saavutettuun prosessin ”kylmän” päähän, vesi erotetaan kierrosta lauhduttamalla. Tämän jälkeen kiertoaineesta erotetaan loput vesipohjaiset epäpuhtaudet, kuten esimerkiksi rikkihappo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, hyödyntämällä kiertoaineesta jäljellä oleva happi. (Allam et al. 2017 s. 5952–5953)

Kaasutettua kivihiiltä poltettaessa saavutettavissa oleva hyötysuhde alemmalla lämpöarvolla on kehittäjien mukaan 51,44 %, mikä on metaanin vastaavaa alempi, mutta kuitenkin huomattavasti jo olemassa olevia kaasutukseen tai jauhamiseen perustuvia hiilen polttomenetelmiä parempi. (Allam et al. 2013 s. 1145)

Toisaalta myös alhaisempia hyötysuhteita kivihiilikäyttöiselle prosessille on esitetty. Lu et al. (2016 s. 6) esittävät prosessille hyötysuhdetta väliltä 43,3 ja 49,7 prosentin väliltä perustuen polttoaineen ylempään lämpöarvoon.

## 2.4 Osakuormatoiminta

Tulevaisuuden energiajärjestelmä tulee todennäköisesti olemaan nykyistä epävakaampi johtuen esimerkiksi kasvaneesta tuulivoimasta, jolloin sähköntuotannosta tulee sääriippuvaisempaa. Tämän takia rinnalle tarvitaan varavoimaa tuottamaan sähköä silloin, kun tarve on tuotantoa suurempaa. Tässä luvussa tarkastellaan Allam-kiertoprosessin mahdollisuutta toimia osakuormalla.

Ideaalitulanteessa syötetyn polttoaineen massavirran vähentyminen johtaa pienempään tehoon toiminta-arvojen säilyessä samoina. Kuitenkin todellisuudessa näin ei käy, johtuen esimerkiksi pumppujen, kompressorien ja lämmönsiirrinten toiminta-alueista. Tämän takia prosessin toiminta-arvoja täytyy optimoida hyötysuhteen maksimoimiseksi. (Zaryab et al. 2019, s. 5)

Happipolttoprosessien ja Allam-kiertoprosessin osakuormatoimintaa on tutkittu varsin vähän. Kuitenkin alustavassa tutkimuksessa selvitettiin, että prosessi kykenee toimimaan kilpailukykyisesti verrattuna kaasukombiin, jossa on kolmen painetason höyrykierto. Tutkimuksen mukaan, vaikka kombiprosessin hyötysuhde on täydellä kuormalla hieman korkeampi, Allam-kiertoprosessilla voidaan saavuttaa pienemmillä, erityisesti 60–80 % kuormilla korkeampi hyötysuhde. Tämä ero aiheutuu prosessin hyötysuhteen vähäisemmästä laskusta pienentyvän turbiinin sisääntulolämpötilan johdosta. (Scaccabarrozi et al., 2017, s. 558–559)

Toinen, laajempi tutkimus jatkoi Scaccabarrozi et al. vuonna 2017 suorittamaa edellisessä kappaleessa kuvailtua työtä. Prosessin osakuormakäyttämistä tutkittiin neljällä erilaisella strategialla, joissa käytännössä tavoitellaan massavirran vähentämistä. Turbiinilla tämä tarkoittaa usein sisääntulopaineen laskua, jolla on laskeva vaikutus hyötysuhteeseen.

Sisääntulopaineen laskua voidaan kuitenkin estää, tai ainakin vähentää, pienentämällä ensimmäisen vaiheen poikkipinta-alaa. Rajoituksena on turbiinin ulostulolämpötila, joka pidetään vakiona, johtuen esimerkiksi lämmönsiirtimen materiaalikestävyydestä. (Zaryab, et al. 2019)

Tässä kandidaatintyössä ei perehdytä kovin syvällisesti edellisessä kappaleessa mainittuihin strategioihin, sillä ne ovat melko edistynyttä virtaustekniikkaa, ja siten niiden käsittely ajautuisi melko kauas työn keskeisimmistä asioista.

Optimaalisen strategian valinta riippuu osakuormasta. Kuorman ollessa 60–90 % tehokainta on turbiinin normaali toiminta sekä kompressorien sisääntulon säätö ohjausvanojen avulla. Tätä alemilla kuormilla suositellaan turbiinin sisääntuloa rajoitettavaksi pienentämällä ensimmäisen vaiheen poikkipinta-alaa sekä vaihtamalla syklin alinta painetasoa optimaalisen toimintapisteen löytämiseksi. (Zaryab et al., 2019, s. 13)

Allam-kiertoprosessilla on mahdollisuudet saavuttaa korkea hyötysuhde alhaisillakin kuormilla. Esimerkiksi 15 prosentin kuormalla voidaan saavuttaa lähes 42 prosentin hyötysuhde. Tämänkaltainen hyötysuhde alhaisilla kuormilla tarjoaisi prosessille edun perinteisiä tuotantomuotoja vastaan. (Zaryab et al., 2019 s. 14)

### 3 HYÖTYSUHDE JA KOMPONENTIT

Allam-prosessissa kiertoaineena ei toimi vesihöyry, joten esimerkiksi tuorehöyryputkistot ja tulistus sekä monivaiheinen turbiini jäävät pois. Myöskään esimerkiksi kombiprosesseissa tavattavaa lämmöntalteenottokattilaa ei tarvita. Myös Allam-prosessin korkea painetaso auttaa osaltaan pienentämään komponenttien kokoa. Esimerkiksi verrattuna hiilen pölypolttolaitokseen vaadittava pinta-ala voi olla vain 1/6 vastaavan teholuokan hiilivoimalasta. (Allam et al, 2013 s. 1146)

#### 3.1 Hyötysuhde

On todettu, että prosessin hyötysuhteen kannalta turbiinin sisääntulolämpötila on optimaalisimmillaan noin 1150 °C. Mikäli sisääntulolämpötilaa nostetaan tästä korkeammaksi, hyötysuhde kärsii johtuen turbiinin jäähtytykseen tarvittavien massavirtojen kasvusta, sekä lämmönsiirrossa tapahtuvista palautumattomuuksista. Myös jäähtytysvirtojen lämpötilan kasvattaminen alentaa prosessin hyötysuhdetta. (Scaccabarozi et al. 2016, s. 517)

Lisäksi Brayton-prosesseissa tärkeä elementti on turbiinin sisääntulopaine. Hyötysuhteen kannalta paras painetaso turbiinin sisääntulossa asettuu välille 260–300 bar. Tarkasteltaessa kyseistä väliä sisääntulopaineessa on huomattu, että ominaistyön väheneminen paisunnan alkupaineen vähentymisestä kompensoituu korkeammassa poistumislämpötilassa, jolloin lämmönsiirto on tehokkaampaa. Tämä mahdollistaisi myös toiminnan 260 bar:in painetasolla, jolloin vaikutus materiaalien kestävyteen olisi positiivinen ilman merkittävää hyötysuhteen alenemista. (Scaccabarozi et al. 2016, s. 517)

#### 3.2 Turbiini

Turbiinilla on tärkeä rooli Allam-prosessissa. Prosessin turbiinissa on piirteitä sekä kaasuetä höyryturbiinista. Turbiinin sisääntulolämpötila on korkea höyryturbiinille, mutta ei kaasuturbiinille. Päinvastoin kuin lämpötilalle, paine on korkea kaasuturbiinille, muttei höyryturbiinille. Edellä mainituilla toiminta-arvoilla materiaalivalinnat ovat kriittisiä. Toshiba suunnitteli ja valmisti turbiinin Allam-kiertoprosessin 50MW testilaitokselle. Siinä käytetään kaksivaippaista rakennetta, joka on peräisin höyryturbiinitekniikasta korkean paineen kestämiseksi. Ulomman ja sisemmän kuoren välissä virtaa jäädyttävä, alhaisessa



lämpötilassa oleva, hiilidioksidivirtaus. Savukaasujen virtausalue on valettu nikkeliin pohjautuvalla aineella ja vastaavasti hiilidioksidin jäädyttämä ulompi vaippa valetaan CrMoV:lla. Vaikka nikkeli kestää hyvin kuumuutta, sen laajamittainen käyttö johtaa hankalampaan valmistustyöhön ja vaatisi merkittäviä panostuksia tutkimukseen ja tuotekehitykseen. (Allam et al. 2013, s. 1141)

### **3.3 Polttokammio**

Prosessin polttokammio eroaa normaalista kaasuturbiinin polttokammioista merkittävästi. Sen lämpötila on matalampi kuin perinteisten kaasuturbiinien vastaavat, kun taas paine on huomattavasti korkeampi. Happipolton takia polttokammiossa ei juurikaan ole typen oksideja. (Allam et al. 2013 s. 1143) Lisäksi Allam-prosessissa kiertoaine on läsnä polttokammiossa tapahtuvassa palamisessa, mikä vaatii uudenkaltaista suunnittelua. (Allam et al. 2017, s. 5956)

Nykyään tavoitellaan usein niin sanottuja low-NO<sub>x</sub>-polttokammiota. Alhaisia NO<sub>x</sub>-päästöjä tavoitellaan usein esimerkiksi esisekoitetun palamisen avulla, jolla tarkoitetaan polttoaineen ja palamisilman sekoittamista ennen varsinaista polttoa. Esisekoitetun palamisen ongelmana on liekin stabiiliuden säilyttäminen erilaisilla kuormilla. Allam-prosessin luontaisena etuna on vähäinen typen määrä polttokammiossa happipoltosta johtuen. Tämän johdosta polttokammiossa muodostuu luonnostaan vähän typen oksideja. Tällöin polttokammiossa voidaan käyttää niin sanottua diffuusialamamista. (Allam et al. 2017, s. 5956)

Polttokammio on suunniteltu Toshiba toimesta juuri Allam-prosessiin sopivaksi. Suunnittelussa on otettava huomioon liekin tasaisuuden säilyttäminen aina käynnistyshetken alhaisista paineista toimintatason kovaan (≈300 bar) paineeseen. (Zaryab et al. 2019, s.4)

### **3.4 Lämmönsiirrin**

Lämmönsiirrin on kriittinen osa prosessia. Allam-prosessissa lämmönsiirtimellä on suuri merkitys, sillä sen kautta kulkee monia virtoja, jotka on kuvattu varsinaisen prosessin käsittelyn yhteydessä. Sen täytyy kyetä operoimaan kovilla paine- ja lämpötilatasoilla erilaisten fluidien kanssa. Lisäksi prosessin kannalta on tärkeää, että lämmönsiirtimessä päästään alhaisiin lämpötilaeroihin virtaavien fluidien välillä. Tämä olisi hankalaa toteuttaa perinteisillä

lämmönsiirtimillä. Heatric suunnitteli ja valmisti prosessin 50 MW testilaitoksen lämmönsiirtimen. (Allam et al., 2017, s. 5957)

Allam-prosessissa lämmönsiirrin koostuu neljästä eri vaiheesta varsinaisen kiertoaineen suhteen, ja sitä kuvaillaankin lämmönsiirrinverkoksi. Lisäksi kompressorille on erillinen jäähdytin. Pintamateriaaleina kuumimmissa kohdissa käytetään metalliseosta 617, ja muualla ruostumatonta terästä 316. Suunnittelussa pyritään kasvattamaan ruostumattoman teräksen osuus mahdollisimman suureksi kustannussyistä. (Allam et al. 2017, s. 5958)

Yleisesti lämmönsiirrinkompleksin suunnittelua hankaloittaa suuri lämpökapasiteettien vaihtelu fluidien välillä, vesiosuuden lauhtuminen sekä hiilidioksidin kriittisen pisteen ylittäminen lämmönsiirtimissä. Näiden tekijöiden takia useat niin sanotut ”pinch pointit”, joissa fluidien lämpötilat ovat lähellä toisiaan, rajoittavat lämmönsiirtoa. (Scaccabarozi et al., 2016, s.511)

Lämmönsiirron kannalta suunnittelua vaikeuttaa kuumen, polttokammioista tulevan virtauksen korroosiota aiheuttava vaikutus, joka aiheutuu hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Lisäksi vaadittavan lämmönsiirtopinta-alan tulee olla suuri, sillä jokaista tuotettua megawattia sähköä kohti, lämmönsiirron tarve on noin 2,9 megawattia. (Scaccabarozi et al., 2016, s. 509)

Lämmönsiirrin myös osaltaan rajaa prosessin lämpötiloja, sillä kiertoaine johdetaan turbiinilta suoraan lämmönsiirtimen sisään tuloon. Kuumen savukaasun tullessa lämmönsiirtimen kuumaan päähän metalliseos 617 rajaa lämpötilan 700–750 °C asteeseen. Tämä vaikuttaa myös turbiinin sisääntulolämpötilaan, joka asetuu 1100–1200 °C välille. (Allam et al. 2017 s. 5952)

## 4 VARIAATIOT

Ilmastonmuutos huolettaa tällä hetkellä kansakuntia ympäri maailman. Tämä avaa Allam-prosessin kaltaisille teknologioille uusia ovia perinteisten sähköntuotantokeinojen menettäessä suosiotaan. Nykyiset hiilidioksidintalteenottomenetelmät nostavat tuotetun sähkön hintaa. Allam-prosessilla on tulevaisuudessa mahdollisuus menestyä vanhoja teknologioita vastaan myös taloudellisesta näkökulmasta katsottuna. Lisäksi Allam-prosessissa saadaan sivutuotteena puhdasta hiilidioksidia, jota voidaan hyödyntää muissa prosesseissa. Tämä avaisi Allam-prosessille markkinat myös sivutuotteena saatavan hiilidioksidin suhteen. (Allam et al. 2017 s. 5963)

### 4.1 Ylijäämähiilidioksidi

Eräs mielenkiintoinen tapa hyödyntää ylimääräistä hiilidioksidia liittyy öljyn poraukseen. Etenkin Yhdysvalloissa, jossa öljyteollisuudessa niin sanotussa kehittyneessä öljyn porauksessa (EOR) hyödynnetään hiilidioksidia öljyn poraamisessa (Allam et al. 2017 s. 5963). Porauksessa hiilidioksidi auttaa öljyn talteenotossa tehden sen esimerkiksi paremmin virtaavaksi. Porauksessa osa syötetystä hiilidioksidista sitoutuu maaperään, ja mikäli takaisin pinnalle palaava hiilidioksidi käytetään uudestaan poraukseen, saadaan muodostettua suljettu kierto, jolloin syntyy pysyvä hiilidioksidivarasto. Arviolta 300–600 kilogrammaa hiilidioksidia syötetään sisään, ja kun barrelin verran öljyä poltettaessa vapautuu noin 500 kilogrammaa hiilidioksidia, olisi teoriassa negatiivisen hiilidioksidipäästön omaavan öljyn tuotanto mahdollista. (McGlade 2019)

Ylijäämähiilidioksidilla voidaan hyödyntää myös monilla muilla tavoilla. Esimerkiksi power-to-x-teknologian avulla valmistettavien synteettisten polttoaineiden eräs tarvittava lähtöaine on hiilidioksidi (LUT University). Lisäksi hiilidioksidista voidaan valmistaa esimerkiksi ruokaa (VTT).

### 4.2 Allam-prosessi ja LNG

Mikäli Allam-prosessiin yhdistettäisiin nestemäisen maakaasun (LNG) uudelleenhöyrystyslaitos, voitaisiin prosessin hyötysuhteeksi saada jopa 67 %. Tällaisessa prosessissa kylmää LNG:tä käytettäisiin Allam-prosessin kiertoaineen jäähdyttämisessä, jolloin vältyttäisiin tehoa syövältä kompressoripuristukselta, kun hiilidioksidi jäähtyisi alle kriittisen

lämpötilansa, jolloin se voitaisiin pumpata tarvittavaan ylemmän painetason paineeseensa. Tämänkaltaiset sovellukset hyödyttäisivät esimerkiksi nestemäisestä maakaasusta riippuvaisia valtioita, tai paikkoja, joissa ei ole varsinaista kaasuverkostoa. (Allam et al. 2016 s. 5963).

### 4.3 Integrointi aurinkoenergian kanssa

Allam-prosessiin voitaisiin yhdistää aurinkoenergia ja metaanin reformointi. Tällaisessa kombinaatiossa prosessiin syötettävä metaani hajotettaisiin hiilidioksidiksi ja vetykaasuksi, joilla on korkeampi kalorimetrinen lämpöarvo. Hajotus tapahtuisi aurinkoenergian avulla katalyytin läsnä ollessa. Syntynyt synteettinen kaasu johdettaisiin nyt kompressorin kautta polttokammioon, josta eteenpäin prosessi etenisi samaan tapaan, kuin normaali Allam-prosessi. Tämänkaltaisen modifikaatio voisi alentaa polttoaineen kulutusta jopa 11 prosenttia. Kun esitetyn kaltaista modifikaatiota verrattiin tavalliseen Allam-prosessiin molempien sähkötehon ollessa 10MW, saatiin aurinkoenergiaa hyödyntävän prosessin hyötysuhde 0,5 prosenttia suuremmaksi. Esitetyn kaltaisessa konfiguraatiossa on kaiken uusiutuvan energian tapaan epävarmuus aurinkoenergian saatavuudesta. Mikäli sää on pilvinen, eikä auringosta saada tarpeeksi energiaa, voidaan metaania syöttää polttokammioon tavalliseen tapaan. Mikäli aurinkoa on tarjolla ylimäärin osa synteettisistä kaasuista, voidaan varastoida ja käyttää vasta kun niiden tarve ylittää tuotannon. (Xin et al. 2020, s.2–9)

### 4.4 Allam Z-prosessi

Allam Z-prosessin suurin eroavaisuus tavalliseen on paisunnan jälkeinen paine. Allam Z-prosessi muistuttaakin toimintaperiaatteeltaan paljon tavallista Allam-prosessia. Tässä versiossa paisunnan jälkeinen paine asetetaan hiilidioksidin ylikriittiselle alueelle, jolloin kiertoaineen puristuksessa voidaan tavallisessa Allam-prosessissa käytetyt kompressorit korvata pumpuilla. Lisäksi Allam Z-prosessissa hyödynnetään LNG:n ja nestemäisen hapen alhaista lämpötilaa. (Zhu et al. 2019, s. 480)

Prosessissa on viisi lämmönsiirrintä, joista neljässä kiertoaine jäähtyy. Palaminen tapahtuu perättäisissä polttokammioissa sijaitsevissa tuliputkissa, joissa käytetään kiertävää hiilidioksidia lämpötilan säätelyyn, samaan tapaan kuin tavallisessa Allam-prosessissa. Polttokammioiden jälkeen savukaasut koostuvat pääasiassa hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Tämän

jälkeen ne paisutetaan turbiinilla, jonka jälkeen niitä jäähdytetään lämmönsiirtimissä, ja vesi erotetaan prosessista jäähdytyksen jälkeen nesteenä. (Zhu et al. 2019, s.480)

Hyödynnettävä nestemäinen happi tuotetaan ASU:n avulla, kun sähkön hinta on alhainen. Pumppauksen ja lämmönsiirtimien vaikutuksesta happi ja LNG siirretään polttokammioihin korkeassa paineessa ja lämpötilassa. (Zhu et al. 2019, s. 480)

Allam Z-prosessilla voidaan saavuttaa 48,05 prosentin kokonaishyötysuhde. Lisäksi sen avulla voidaan tasapainottaa sähköverkkoa hapen tuotannolla alhaisen kulutuksen aikoina. Verrattuna tavalliseen Allam-prosessiin samoilla turbiinin sisääntuloarvoilla, eli 300 bar:in paineessa ja 900 °C asteen lämpötilassa Allam Z-prosessilla voidaan saavuttaa 2,97 prosenttia korkeampi kokonaishyötysuhde. (Zhu et al. 2019, s. 485)

## **5 ALLAM-KIERTOPROSESSI JA KILPAILIJAT**

Tässä kappaleessa vertaillaan Allam-prosessin toimintaa ja kustannuksia kilpaileviin prosesseihin. Vertailtavat prosessit edustavat myös uudempaa teknologiaa, sillä tulevaisuudessa voidaan olettaa Allam-prosessin kilpailevan markkinoilla ennemmin näiden kanssa, kuin perinteisten fossiilista energiaa hyödyntävien laitosten, johtuen pääasiassa päästöihin keskittyneistä kiristyksistä ja yleisestä huomiosta.

### **5.1 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi**

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) on noussut esiin mahdollisuutena hiilidioksidipäästöjen hillinnässä. Energiantuotannossa hiilidioksidin talteenottotavat voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen ennen polttoa, polton jälkeen, sekä happipolton avulla (Teir et al., 2009, s. 13). Tässä luvussa käsiteltävät prosessit ovat erilaisia CCS-prosesseja.

Allam-kiertoprosessiin hiilidioksidin talteenotto on ikään kuin sisäänrakennettu prosessissa kiertävän hiilidioksidin ja happipolton hyödyntämisen takia. Tämän ansiosta Allam prosessin kustannukset ovat alhaisemmat verrattuna perinteisiin voimalaitoksiin, joissa CCS on käytössä. (Sifat & Haseli, 2019, s.18)

CCS-teknologialle on tarvetta, sillä esimerkiksi EU on asettanut tavoitteekseen olla täysin hiilineutraali vuonna 2050 (EU). CCS-teknologiat voidaan jakaa kahteen alalajiin yhtäläisyyksien perusteella. Hiilidioksidi voidaan erottaa esimerkiksi kemiallisesti, tai sitten varsinaista erotusta ei vaadita, kuten esimerkiksi happipolttoprosessissa. (Sifat & Haseli, 2019, s. 2). Tässä kandidaatintyössä tehdään lyhyt vertailu maakaasukäyttöisen Allam-kiertoprosessin ja kahden muun happipolttoprosessien kesken, jotka pohjautuvat perinteiseen kaasuturbiiniin. Lisäksi kivihiilikäyttöistä Allam-prosessia verrataan kivihiilellä toimivaan kaasutus-kombilaitokseen.

### **5.2 Happipolttoprosessit**

Kaasuturbiiniprosessit, joissa hyödynnetään happipolttoa, voidaan jakaa kahteen ryhmään kiertoaineensa perusteella; vesi- ja hiilidioksidipohjaisiin. Veteen perustuvassa kierrossa savukaasuista lauhtunutta vettä käytetään jäähdytteenä poltossa, ja vastaavasti

hiilidioksidipohjaisissa sovelluksissa lauhtunut vesi poistetaan savukaasuista, jonka jälkeen hiilidioksidivirta ohjataan jäähdyttämään polttotapahtumaa. (Stanger et al. 2015, s.91–92)

### **5.2.1 Clean Energy System (CES)**

CES-prosessissa kiertoaineena toimii vesi. Polttoaine poltetaan polttokammiossa nestemäisen veden ja korkeapaineisen hapen kanssa. Vettä käytetään polttokammiossa lämpötilan meroimiseen. Tämän jälkeen kiertoaine koostuu noin 90 prosenttisesti vesihöyrystä, sillä polttokammioon syötetty vesi höyrystyy. Sitten se johdetaan ensimmäisen turbiinin läpi, josta se siirtyy toiseen polttokammioon välipolttoa varten. Sen jälkeen savukaasut johdetaan kahden turbiinin kautta lauhduttimeen, jonka jälkeen hiilidioksidi erotetaan kierrosta, ja vesi kuljetetaan takaisin ensimmäiseen polttokammioon. CES-prosessin hyötysuhde asettuu eri tutkimusten mukaan 43–47 prosentin välille. (Stanger et al. 2015, s. 98–99)

### **5.2.2 Graz**

Graz-prosessissa kiertoaineesta noin 75 % on vettä, ja noin 25 % hiilidioksidia. Graz-prosessissa on korkeassa lämpötilassa toimiva Brayton-prosessi ja matalassa lämpötilassa toimiva Rankine-prosessi. Prosessissa polttoaine, esimerkiksi metaani syötetään hapen kanssa polttokammioon, jossa vallitsee 40 barin paine ja 1400 °C lämpötila. Polttokammioista se johdetaan korkealämpötila-turbiiniin (HTT). Rankine prosessin höyry-hiilidioksidi kiertoaine jäähdyttää edellä mainittuja vaiheita prosessissa. Korkealämpötila-turbiinin jälkeen kiertoaine kuljetetaan lämmönsiirtimeen, jonka jälkeen kiertoaine jakautuu kahteen osaan. n. 55 % massavirrasta paineistetaan ja kuljetetaan polttokammioon noin 600 °C lämpötilassa jäähdytteeksi. Toinen osa paisutetaan matalapaineturbiinissa noin 0,04 bar:in paineeseen, jonka jälkeen lauhduttimessa vesi lauhtuu ja hiilidioksidi saadaan erotettua poistoa varten. Jäljelle jäävä vesi höyrystetään ja kuljetetaan lämmönsiirtimen kautta korkealämpötila-turbiinille 549 °C:n lämpötilassa ja 180 bar:in paineessa. (Wimmer & Sanz, 2020, s. 2–3) Graz-prosessin hyötysuhde on välillä 48.7–52.9 % (Stanger et al. 2015, s. 102)

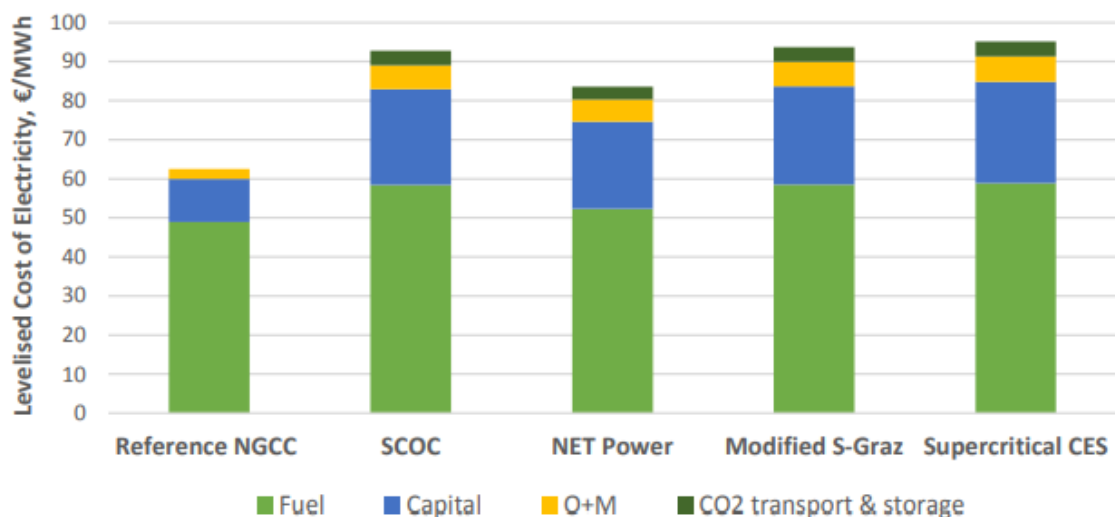
### **5.2.3 Kustannukset**

Allam-kiertoprosessin pääomakustannukset ovat kilpailukykyiset verrattuna esimerkiksi kombivoimalaitoksiin ja hiilen polypolttoon. Lisäksi kustannusten vertailussa on tärkeää huomioida Allam-prosessin mukana tuleva päästöttömyys. Perinteisessä polttolaitoksessa

päästöjen minimointiin tarvitaan siihen suunniteltuja komponentteja, jotka osaltaan lisäävät kustannuksia. (Allam et al, 2013 s. 1146)

Kuvassa 5 esitetään muutaman happipolttoprosessin, sekä Allam-prosessin, joka esiintyy kuvassa nimellä ”NET Power” tuotetun sähkön hinta elinkaaren ajalta. Kaikkien alhaisimpiin kustannuksiin päästään maakaasukombilla (NGCC), mutta kuten kuvasta huomataan, Allam-prosessi on kilpailukykyinen muiden happipolttoprosessien kanssa, johtuen sen korkeasta hyötysuhteesta, jolloin polttoainekustannus pienenee. (IEAGHG, 2015, s.8)

LCOE:n (Levelized Cost of Electricity) avulla voidaan erilaisia energiantuotantotapoja vertailla keskenään. LCOE:ssa huomioidaan kiinteät ja muuttuvat kustannukset laitoksen elinkaaren ajalta ja suhteutetaan ne tuotetun sähkön määrään, jolloin vertailu pystytään tekemään erilaisista kustannusrakenteista huolimatta. (Ueckerdt et al., 2013, s. 61)



**Kuva 5** Erilaisten happipolttoprosessien LCOE (IEAGHG, 2015)

### 5.3 Kaasutuskombiprosessi

Vastaavaan tapaan kuin kaasukäyttöisessä prosessissa, suoritetaan lyhyt vertailu kilpailevaan prosessiin eroavaisuuksien ja samankaltaisuuksien havainnollistamiseksi.

IGCC on kombiprosessi, jossa polttoaineena toimii kaasutettu hiili. Toisin kuin Allam-prosessissa IGCC ei sisällä ”sisäänrakennettua” päästöttömyyttä hiilidioksidin suhteen (Faleke



et al., 2011, s. 41). Tässä työssä tarkastellaan CCS:ää hyödyntävän IGCC-prosessin eroavaisuuksia kivihiilikäyttöiseen Allam-prosessiin.

CCS-teknologiaa hyödyntävän IGCC-prosessin toiminta etenee yksinkertaistettuna seuraavasti: Hiili syötetään ja kaasutetaan, jonka jälkeen synteetikaasu puhdistetaan. Tämän jälkeen seuraa hiilidioksidin talteenottovaihe, jonka jälkeen synteetikaasu poltetaan ja paisutetaan kaasuturbiinilla, jonka hukkalämpö hyödynnetään jätelämpökattilassa ja höyrykiertossa, jolloin sähköntuottoa saadaan kasvatettua. (Chen & Rubin, 2008, s. 916 kuva 1)

CCS:n lisääminen kaasukombiprosessiin alentaa hyötysuhdetta merkittävästi. CCS-teknologiaa hyödyntävän IGCC-laitoksen hyötysuhde on tämän lähteen mukaan 26.1 %. Lisäksi hiilidioksidin talteenotto kasvattaa vedenkulutusta jopa 2.5 tonnia tuotettua megawattituntia kohden. (Falcke et al., 2011, s. 41)

Kivihiilikäyttöinen Allam-prosessi kuluttaa jopa 60 % vähemmän vettä, kuin IGCC tai NGCC, jotka eivät sisällä hiilidioksidin kaappausta. Tämä selittyy kahdella tekijällä. Allam-prosessissa ei käytetä höyrykiertoa sähkön tuotantoon, sekä prosessissa poltossa syntyvän veden erotuksella alhaisessa paineessa kiertoaineen jäädytyksen jälkeen. (8 Rivers Capital, s. 20)

### **5.3.1 Kustannukset**

Kivihiilikäyttöisen Allam-prosessin ja hiilidioksidin kaappausta ja varastointia hyödyntävän IGCC-prosessin eroja vertailtaessa on todettu, että hyötysuhde jää alhaisemmaksi, ollen noin 31.2 %, kun taas Allam-prosessilla hyötysuhde on 37.7 %. Lisäksi Allam-prosessin kustannustaso on parempi. Tuotetun sähkön hinnaksi saadaan 137.3 \$/MWh vastaavan lukeman ollessa IGCC-prosessille 152.6 \$/MWh. Lisäksi on mainittava, että Allam-prosessilla saadaan noin 99 % hiilidioksidista kaapattua, vastaavan lukeman ollessa IGCC:llä noin 90 %. (Weiland & White, 2018 s. 613)

## 6 YHTEENVETO

Allam-kiertoprosessi on lupaava happipolttoteknologia, jonka päästöt ovat käytännössä nolla. Koska ympäri maailmaa vallitsee voimakas tahtotila päästöjen alentamiseen, Allam-prosessille avautuu markkinarakoa perinteisten fossiilisten energiantuotantomenetelmien pikkuhiljaa poistuessa. Kuitenkin prosessi ei ole vielä kaupallisessa valmistusvaiheessa, sillä ainoastaan NetPowerin oma demolaitos on toiminnassa.

Maakaasua käytettäessä Allam-kiertoprosessilla saavutetaan hieman korkeampi hyötysuhde kuin kivihieillä. Mikäli polttoaineena käytetään kivihieitä, voimalaitokseen täytyy integroida lisää laitteita, johtuen vaadittavasta kivihieiden kaasutuksesta synteetikaasuksi. Kummassakin tapauksessa todettiin, että arvioiden mukaan kustannukset ja hyötysuhteet ovat kilpailukykyisiä muiden samankaltaisten prosessien kanssa.

Allam-kiertoprosessin komponentit ovat osittain uusia, ja sikäli niiden käsittely on tärkeä osa koko prosessin ymmärtämistä. Lämmönsiirtimillä on suuri rooli mahdollisimman korkean hyötysuhteen saavuttamisessa, sillä prosessi on voimakkaasti rekuperoitu eikä lämpöä kannata ”hukata”. Turbiini on Toshiba kehittänyt, ja siinä yhdistyy höyry- ja kaasuturbiiniteknologian ominaispiirteitä johtuen haastavista toimintaoloista. Polttokammio vaatii myös uudenlaista suunnittelua, johtuen esimerkiksi happipoltosta ja hiilidioksidin voimakkaasta läsnäolosta.

Lisäksi tarkasteltiin Allam-kiertoprosessin mahdollisia variaatioita. Prosessista poistettava hiilidioksidi voidaan käyttää esimerkiksi öljyn poraukseen, tai sitten vaan säilöä se vaikkapa maaperään. Hiilidioksidin käyttökohteiden kehitys avaa myös uudenlaisen sivutuotemarkkin Allam-kiertoprosessille. Lisäksi Allam-kiertoprosessi voidaan integroida LNG-terminaalien kanssa, jolloin hyötysuhdetta saadaan kasvatettua hyödyntämällä LNG:n alhaista lämpötilaa lämmönsiirrossa. Lisäksi mielenkiintoinen kehityskohta prosessille on aurinkoenergian hyötykäyttö prosessissa.

Kuitenkin prosessi on vasta kehitysasteella, ja varmaa tietoa mahdollisen kaupallistumisen ajankohdasta ei kirjoitushetkellä ole. Lisäksi alustavien tutkimusten mukaan Allam-kiertoprosessi kykenee osakuormalla toimittaessa verrattain tehokkaaseen energiantuotantoon. Tämä parantaa prosessin kilpailukykyä, sillä osakuorma ja huipputehon tuottaminen ovat

tärkeässä roolissa tulevaisuudessa, mikä tekee siitä erittäin vartenotettavan vaihtoehdon niin sanotulle siirtymäkaudelle kohti uusiutuvaa energiajärjestelmää.

## LÄHTEET

- 8 Rivers Capital. 2019. Allam Cycle Zero Emission Coal Power. 89243319CFE000015 Coal-Based Power Plants of the Future.
- Allam, R. 2009. Improved oxygen production technologies. *Energy Procedia* 1 (2009) 461-470.
- Allam, R., Martin, S., Forrest, B., Fetvedt, J., Lu, X., Freed, D., Brown, Jr. G., Sasaki, T., Itoh, M., Manning, J. 2016. Demonstration of the Allam cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. *Energy Procedia* 114 (2017) 5948-5966.
- Allam, R., Palmer, M., Brown Jr., W., Fetvedt, J., Freed, D., Nomoto, H., Itoh, M., Okita, N., Jones Jr., C. 2013. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia* 37 (2013) 1135-1149.
- Chen C., Rubin, E. 2008. CO<sub>2</sub> control technology effects on IGCC plant performance and cost. *Energy Policy* 37 (2009) 915–924.
- Euroopan Unioni. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.1.2021]. Saatavissa; [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en)
- Falcke T., Hoadley, A., Brennan, D., Sinclair, S. 2011. The sustainability of clean coal technology: IGCC with/without CCS. *Process Safety and Environmental Protection* 89 (2011) 41–52
- IEAGHG. 2015. OXY-COMBUSTION TURBINE POWER PLANTS.
- Ilmastoopas.fi. Verkkosivu. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. [Viitattu 8.12.2020]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/fd626ba3-8099-40e4-af75-94124d1f5c7f/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi.html>
- Jukkola, G., Myhre, R., Weitzel, P., Marasigan, J., Maxson, A. Oxy-combustion roadmap to commercialization. 15<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHT-15.

Lu, X., Forrest, B., Martin, S., Fetvedt, J., McGroddy, M., Freed, D. 2016. Integration and optimization of coal gasification systems with a near zero emissions supercritical carbon dioxide power cycle. Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition.

LUT University. Verkkosivu. [Viitattu 27.4.2021]. Saatavissa: [https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/power-to-x-p2x-%E2%80%93-mita-se-tarkoitaa-ja-miten-se-mullistaa-energian-ja-ruoantuotannon](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/power-to-x-p2x-%E2%80%93-mita-se-tarkoitaa-ja-miten-se-mullistaa-energian-ja-ruoantuotannon)

McGlade Christophe. 2019. Can CO<sub>2</sub>-EOR really provide carbon negative oil?. IEA. Saatavissa: <https://www.iea.org/commentaries/can-co2-eor-really-provide-carbon-negative-oil>

Netpower. Verkkosivu. Viitattu [13.3.2021] Saatavissa: <https://netpower.com/technology/>

NIST. [verkkosivu] [Viitattu 6.1.2021]. Saatavissa: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Mask=4>

Osti.gov. [Dia-esitys]. 2016. Supercritical CO<sub>2</sub>-Brayton Cycle- Potential benefits, applications, status and plans. Saatavissa: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1378068>

Patel Sonal. 2021. 8 Rivers Unveils 560 MW of Allam Cycle Gas-Fired Projects for Colorado, Illinois. Power. Saatavissa: [8 Rivers Unveils 560 MW of Allam Cycle Gas-Fired Projects for Colorado, Illinois \(powermag.com\)](https://www.powermag.com/8-Rivers-Unveils-560-MW-of-Allam-Cycle-Gas-Fired-Projects-for-Colorado-Illinois/)

Rodríguez Hervás G., Petrakopoulou F. 2019 Exergonomic Analysis of the Allam cycle. 2019. Energy Fuels, 33, 7561-7568.

Scaccabarozzi, R., Gatti, M., Martelli, E. 2016. Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET Power oxy- combustion cycle. Applied Energy 178 (2016) 505-526.

Sifat, N., Haseli, Y. 2019. A Critical Review of CO<sub>2</sub> Capture Technologies and Prospects for Clean Power Production. MDPI.

Stanger, R., Wall, T., Spörl R., Paneru, M., Grathwohl, S., Weidmann, M., Scheffknecht, G., McDonald, D., Myöhänen, K., Ritvanen, J., Rahiala, S., Hyppänen, T., Mletzko, J., Kather, A., Santos, S. 2015. Oxyfuel combustion for CO<sub>2</sub> capture in power plants. International Journal of Greenhouse Gas control 40 (2015) 55-125.

Teir S., Pikkarainen T., Kujanpää L., Tsupari E., Kärki J., Arasto A., Aatos, S. 2011. Hiili-dioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). VTT Working Papers.

Tong, C. [E-kirja]. 2019. Introduction to Materials for Advanced Energy Systems. Springer.

Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., Edenhofer, O. 2013. System LCOE: What are the costs of variable renewables? Energy 63 (2013) 61-75.

VTT. Verkkosivu. [Viitattu 27.4.2021]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/beyond2030/resurssien-riittavyys/hiilen-uusiotalous>

Wimmer K., Sanz, W. 2020. Optimization, and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle. International Journal of Greenhouse Gas Control 99 (2020) 103055

Xin, T., Xu, C., Liu, X., Li, S., Yang, Y. 2020. Thermodynamics study of a solar hybrid Allam cycle integrated with methane reforming.

Zaryab, S., Scaccabarozzi, R., Martelli, E. 2019. Advanced part-load control strategies for the Allam cycle. Applied Thermal Engineering 168 (2020) 114822.

Zaryab, S.A, Scaccabarozzi R., Martelli, E. 2019. Advanced part-load control strategies for the Allam cycle. Applied Thermal Engineering 168 (2020) 114822.

Zhu, Z., Yaping, C., Wu, J., Zhang, S., Zheng., S. 2019. A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO<sub>2</sub> capture. Energy 174 (2019) 478-487.