

# Evaluasi Pencairan Batubara Langsung Dan Tidak Langsung Terhadap Parameter Operasi PLTU

DALMASIUS GANJAR SUBAGIO<sup>1,2</sup>, DANI RUSIRAWAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

<sup>2</sup>Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (BRIN), Bandung, Indonesia

<sup>3</sup>Prodi Magister Teknik Mesin – Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung

Email: [dalm001@brin.go.id](mailto:dalm001@brin.go.id)

## ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga uap adalah pembangkit listrik yang menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya. Batubara merupakan jenis batuan sedimen, dengan kandungan karbon sebagai mineral utama dan juga hidrogen, belerang serta oksigen dalam mineral sekundernya. Tingginya kandungan senyawa ini membuat batubara mudah terbakar. Di Indonesia, dengan meningkatnya kegiatan industri dan meningkatnya jumlah penduduk, maka kebutuhan energi listrik juga semakin meningkat. Upaya yang dapat di tempuh oleh perusahaan untuk mendapatkan biaya operasi yang ekonomis adalah dengan mengganti pemakaian bahan bakar, pengoptimalan efisiensi dan pemeliharaan pembangkit yang sudah ada. Oleh karena itu, perlunya pergantian bahan bakar sehingga biaya produksi energi listrik lebih ekonomis. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mendalami pengetahuan tentang pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar batubara yang dicairkan secara langsung/Direct coal liquefaction (DCL) dan tidak langsung/Indirect Coal liquefaction (ICL).

Kata kunci: bahan bakar, batuan sedimen, efisiensi, emisi, pembangkit listrik

## ABSTRACT

*Steam power plants are power plants that use coal as fuel. Coal is a type of sedimentary rock, containing carbon as the main mineral and also hydrogen, sulfur, and oxygen in the secondary minerals. The high content of this compound makes coal flammable. In Indonesia, with increasing industrial activities and an increasing population, the need for electrical energy is also increasing. Efforts that can be taken by companies to obtain economical operating costs are by replacing fuel use, efficiency, and maintenance of existing plants. Therefore, it is necessary to replace fuel so that the cost of producing electrical energy is more economical. The aim of this paper is to deepen knowledge about steam power plants that use direct coal liquefaction (DCL) and indirect coal liquefaction (ICL) fuel.*

*Keywords: Fuel, Rock Sediment, Efficiency, Emissions, Electricity Generation*

## 1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya. Prinsip kerja dari pembangkit listrik tersebut dengan memanfaatkan uap hasil pembakaran batubara untuk menggerakkan turbin uap dan generator listrik. Kinerja dari pembangkit listrik tenaga uap ditentukan oleh dua hal antara lain teknologi konversi energi yang diterapkan dalam pembangkit listrik dan kuantitas serta kualitas batubara yang digunakan sebagai sumber bahan bakar. Kinerja pembangkit listrik tenaga uap batubara tidak akan sesuai dengan perkiraan ketika batubara yang digunakan tidak sesuai dengan persyaratan dalam konversi energi. Batubara merupakan jenis batuan sedimen dengan kandungan karbon sebagai mineral utama dan juga hidrogen, belerang serta oksigen dalam mineral sekundernya. Tingginya kandungan senyawa ini membuat batubara mudah terbakar. Oleh sebab itu batubara dianggap sebagai bahan bakar fosil dan sumber energi terpenting untuk pembangkitan listrik dan berfungsi sebagai bahan bakar pokok. Tujuan dari makalah ini adalah untuk memaparkan kajian tentang pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar batubara dengan membandingkan pencairan batubara langsung dan pencairan batubara tidak langsung untuk mendapatkan nilai ekonomis dari hasil perbandingan tersebut.

Karakteristik dinamis dari pembangkit listrik tenaga batubara dan meningkatkan fleksibilitas operasionalnya, simulasi dinamis dan, khususnya, analisis dinamis pembangkit listrik, adalah langkah penting untuk mencapai kinerja yang diinginkan di bawah berbagai jenis kendala yang terkait dengan desain sistem (Zhao, Wang, et al., 2018)(Wang et al., 2017). Pembangkit listrik tenaga batubara, batas beban rendah teknis ditentukan oleh konsep penembakan, pembakar, bahan bakar, desain generator uap dan siklus air yang sesuai. Ketiga optimalisasi termo-ekonomi pabrik dalam kisaran operasional lengkap, terutama dalam beban bagian, karena waktu yang berjalan pada beban penuh berkurang. Pembangkit listrik tenaga batubara dengan kerugian efisiensi yang lebih rendah pada beban bagian mungkin memiliki posisi yang lebih baik di pasar bebas (Wang, Liu, et al., 2018)(Garðarsdóttir et al., 2018). Untuk membatasi  $\text{CO}_2$  Emisi dari pembangkit listrik, transformasi drastis diperlukan sistem listrik, di mana variabel terbarukan Listrik (*VRE*), yaitu, generasi berbasis angin dan matahari, memberikan sebagian besar pasokan. Argumen lain untuk meningkatkan saham *VRE* adalah peningkatan keamanan pasokan (berkurangnya ketergantungan pada bahan bakar asing) dan peningkatan kualitas udara (Benato et al., 2016). Prosedur yang dapat dianggap sebagai Instrumen Inovatif yang berharga untuk membantu perancang pembangkit listrik dan operator untuk meningkatkan fleksibilitas pabrik dengan tidak berlebihan mengkompromikan integritas perangkat bertekanan termomekanis yang tinggi (Zhao, Liu, et al., 2018).

Model simulasi transien sistem daya termal superkritis dikembangkan dan ditingkatkan melalui perangkat lunak GSE. Tindakan yang dapat dengan cepat mengaktifkan penyimpanan termal adalah dengan mengatur konfigurasi sistem, kinerja respons dinamis dari termal, kunci parameter, penyimpanan termal seluruh sistem termal, dan daya output dijelaskan dan dibandingkan (Wang, Zhao, et al., 2018). Strategi kontrol WFR mengurangi perbedaan TPO dalam target asli. Artinya, fleksibilitas daya termal batubara-merah dapat ditingkatkan secara langsung dengan strategi kontrol WFR yang direvisi (Yongliang Zhao, Peipei Fan, Ming Liu\*, Daotong Chong, 2018). Variasi beban cepat pembangkit listrik tenaga batubara akan menyebabkan pengurangan pemanas seumur hidup karena kelelahan termomekanis selama proses sementara (Benato et al., 2014). Disamping itu ada beberapa peneliti yang membahas tentang pembangkit listrik tenaga uap berdasarkan siklus Rankine. Bahan bakar masa depan memiliki struktur dan komposisi kimia

yang kompleks sangat sulit untuk ditentukan sehingga hampir mustahil untuk ditentukan berdasarkan data yang ada tentang zat murni. Oleh karena itu, penilaian sifat termodinamika dan prediksi data terkait sangat dibutuhkan untuk perkembangan bahan bakar di masa depan. Panas pembakaran atau nilai kalor biasanya diadopsi mengevaluasi karakteristik pemanfaatan bahan bakar, ini hanyalah indikator kuantitas energi pada level tersebut dari hukum pertama termodinamika (Huang et al., 2020).

Ketergantungan yang sangat besar pada pembangkit listrik tenaga panas berbahan bakar fosil, yang menyumbang sekitar 65% dari seluruh listrik yang diproduksi secara global. Namun, pembakaran bahan bakar fosil di pembangkit listrik ini telah menimbulkan permasalahan lingkungan yang signifikan, termasuk emisi gas rumah kaca dan polusi udara, sehingga memerlukan analisis keberlanjutan yang mendesak. Analisis eksergi memungkinkan dilakukannya evaluasi komprehensif terhadap kinerja seluruh komponen sistem pembangkit listrik dan kontribusinya terhadap ireversibilitas sistem, sehingga memungkinkan penentuan besaran, lokasi, dan alasan kehilangan energi dengan lebih tepat (Kumar et al., 2024). Sebagian besar kualitas batubara di seluruh dunia diklasifikasikan sebagai batubara bitumen (yaitu sekitar 52% dari total batubara). Namun, batubara peringkat rendah (*LRC*), yang mencakup batubara lignit dan subbituminus, juga merupakan batubara yang signifikan (yakni menyumbang 47% dari total batubara). *LRC* dan batubara peringkat tinggi (*HRC*) biasanya diklasifikasikan berdasarkan nilai kalori, bahan mudah menguap, dan karbon tetapnya. *HRC* seperti antrasit ditunjukkan oleh nilai kalorinya yang tinggi dan karbon tetap, sedangkan *LRC* dicirikan karena nilai kalornya yang rendah, bahan mudah menguap yang tinggi, dan karbon tetap yang rendah (Sardi et al., 2023).

Penggunaan bahan bakar meningkat karena permintaan energi meningkat, terutama di negara-negara yang mengalami pertumbuhan ekonomi luar biasa, seperti Tiongkok dan India, serta negara-negara maju, seperti Amerika Serikat dan Uni Eropa (UE). Oleh karena itu, seiring dengan meningkatnya permintaan bahan bakar, emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida, juga meningkat. Dampak pemanasan global nampaknya terjadi lebih cepat dari perkiraan, sehingga banyak yang percaya bahwa pengurangan gas rumah kaca sangat diperlukan (Clifford & Song, 2011). Dengan demikian, struktur makromolekul lignit dapat diuraikan secara efektif menjadi senyawa cair dengan berat molekul yang relatif kecil dengan menerapkan proses pencairan katalitik dengan adanya katalis yang dapat meningkatkan hasil fraksi dengan berat molekul rendah. Dengan cara ini, proses pencairan katalitik dapat mengurangi struktur batubara lignit dan menghasilkan senyawa organik dalam jumlah besar dalam skala besar dibandingkan dengan pencairan non-katalitik (Ali & Zhao, 2020).

Bahan bakar fosil masih menempati posisi teratas lebih dari 80% dari total pasokan energi primer di dunia, dan keduanya bahan bakar fosil, minyak mentah, dan batubara yang paling banyak dikonsumsi memainkan peran penting dalam hal ini pasokan energi dunia. Selain itu, batubara juga memegang porsi terbesar konsumsi energi di Tiongkok (Tong et al., 2021). Sebagai salah satu pasar penerbangan sipil terbesar di dunia yang potensial. Oleh karena itu, bahan bakar jet alternatif menarik perhatian besar di Tiongkok. Karena kaya akan sumber daya batubara, proyek bahan bakar jet dari batubara menjadi cair menjadi hal yang wajar pilihan di Tiongkok dan banyak negara lain yang kekurangan sumber daya minyak bumi. Secara umum konversi batubara menjadi bahan bakar cair dapat diklasifikasikan menjadi dua teknologi, yaitu pencairan batubara tidak langsung dan pencairan batubara langsung (Yang et al., 2021).

Teknologi pencairan batubara telah mendapat perhatian dunia sejak awal abad ini karena pesatnya permintaan batubara bahan bakar cair, namun sumber daya minyak (minyak bumi) terbatas didistribusikan secara tidak merata (Wang, et al., 2018)(Wang et al., 2017).

Mengubah batubara padat menjadi bahan bakar cair dan bahan kimia yang dapat diangkut terutama melalui dua metode yaitu pencairan batubara langsung, pencairan batubara tidak langsung (Kong et al., 2019). Pencairan (*ICL*) adalah dua teknologi terpenting yang digunakan mengubah batubara menjadi bahan bakar cair dan bahan kimia. Dalam proses *DCL*, sejumlah besar (~0,5 juta t/a) produk sampingan yang tidak diinginkan yang biasa disebut residu *DCL* (Selanjutnya disebut *DCLR*), menyumbang 20–30% berat batubara mentah yang dikonsumsi dalam proses *DCL* dan telah muncul sebagai masalah serius untuk aplikasi industri (Zheng et al., 2020).

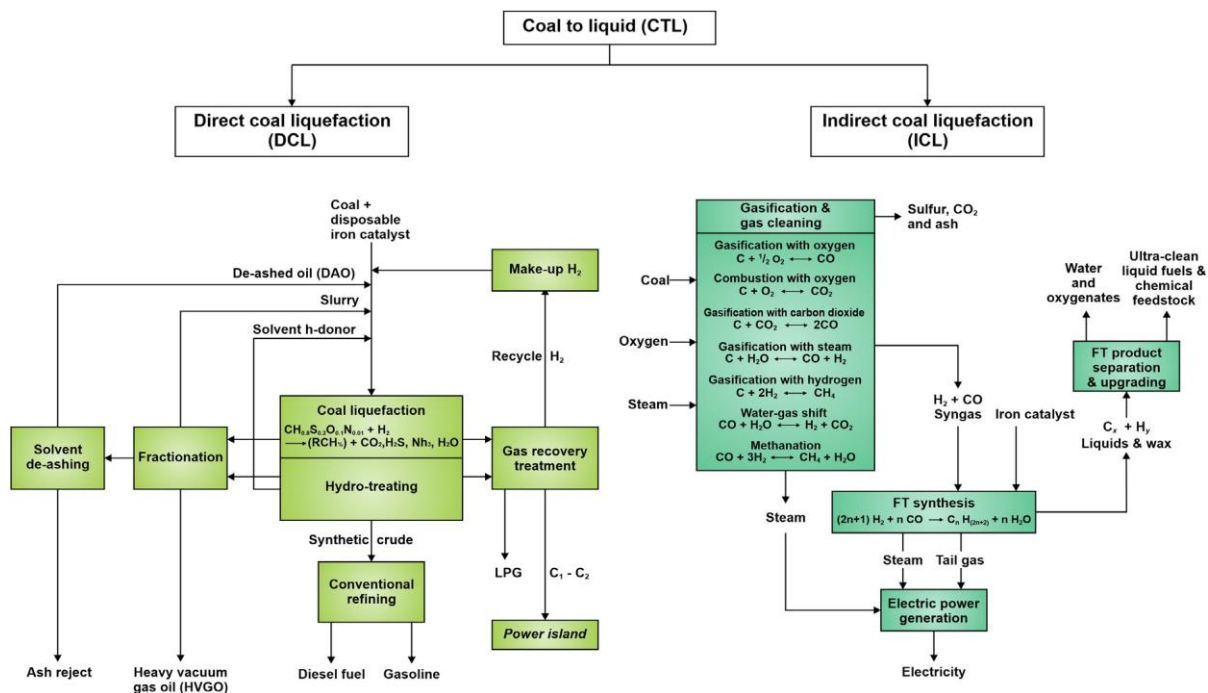
Dua pendekatan yang sangat berbeda dalam menyediakan bahan bakar cair dari batubara dijelaskan dan dibandingkan dalam makalah ini pencairan batubara langsung (*Direct coal liquefaction/DCL*) dan pencairan batubara tidak langsung. Bagi kedua pendekatan tersebut, tantangan terbesarnya adalah meningkatkannya rasio hidrogen-karbon (Williams & Larson, 2003). Oleh karena itu, mengembangkan perubahan batubara menjadi cair mempunyai arti strategis bagi ketahanan energi nasional dan perbaikan struktur energi. Batubara-ke-cair (*CtL*) adalah teknologi yang didasarkan pada pencairan batubara menggunakan tiga pendekatan dasar: pirolisis, pencairan batubara langsung dan pencairan batubara tidak langsung (Zhao, et al., 2018). Analisis siklus hidup batubara-ke-cair (*CtL*) dilakukan untuk mengevaluasi dampak dan potensi ekonomi dari teknik pencairan batubara langsung dan tidak langsung. Beberapa metode teknis *CtL* yang berbeda dibahas secara rinci dengan fokus pada emisi  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ , biaya dan efisiensi energy (Gao et al., 2018).

Dua metode menuju bahan bakar cair dari batubara meliputi pencairan batubara langsung dan pencairan batubara tidak langsung. *DCL* merupakan produk minyak mentah sintetik melalui kontak langsung batubara dengan katalis yang sesuai dengan adanya tambahan hidrogen pada suhu tinggi, dalam makalah dibahas pendamping *ICL* adalah produksi bahan bakar dengan tahap peralihan produksi gas sintesis melalui gasifikasi batubara. Konstituen utama dari "syngas" adalah karbon monoksida dan hidrogen, yang dapat diproses secara kimia menjadi berbagai bahan bakar berbeda (Larson & Tingjin, 2003). Merencanakan peta jalan pembangunan yang baik untuk *ICL* memerlukan penilaian yang luas dan komprehensif. Analisis teknoekonomi merupakan bagian penting dari proses ini dan yang lebih penting lagi, peran penangkapan  $CO$  dalam pembangunan *ICL* harus dipertimbangkan karena adanya perubahan iklim (Zhou et al., 2011).

Masalah utama pembangkit energi berbasis batubara adalah polusi terhadap lingkungan seperti emisi  $SO$ ,  $NO$  dan karbon dioksida. Namun, teknik pencairan batubara dapat mengubah batubara menjadi minyak dan produk kimia penting lainnya dengan polusi lingkungan yang terbatas (Gao et al., 2018). Dua metode menuju bahan bakar cair dari batubara meliputi pencairan batubara langsung dan pencairan batubara tidak langsung. Produk minyak mentah sintesis melalui kontak langsung batubara dengan katalis yang sesuai dengan adanya tambahan hidrogen pada suhu tinggi. *ICL* adalah produksi bahan bakar dengan tahap peralihan produksi gas sintesis melalui gasifikasi batubara.

Tiongkok bermaksud akan produksi *Cold to Liquid (CtL)* tahunan sebesar 30 juta ton pada tahun 2020. Dalam hal ini, pemerintah daerah menunjukkan ambisi yang lebih agresif. Menurut perkiraan informal dari *NDRC*, kapasitas proyek *CtL* yang direncanakan oleh pemerintah dan perusahaan lokal Tiongkok, yang sebagian besar merupakan *ICL* (pencairan batubara tidak langsung) sama besarnya (Larson & Tingjin, 2003).

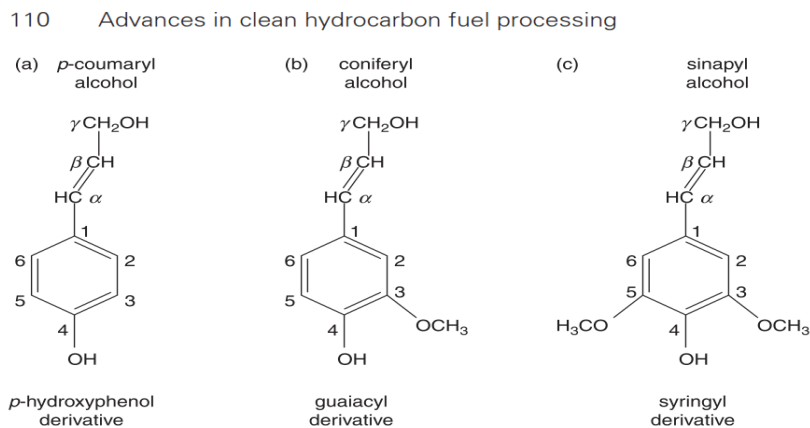




Gambar 1. Perbandingan Antara Teknologi Pencairan Batubara Langsung Dan Tidak Langsung (Sardi Et Al., 2023)

### 2.1.1 Pencairan Batubara Langsung/*Direct Coal liquefaction (DCL)*

Pencairan batubara secara langsung biasanya dianggap sebagai metode konversi batubara. Namun, produk sampingan lignin juga dimasukkan karena merupakan salah satu senyawa utama batubara. Berikut ini dibahas struktur kimia lignin dan batubara berbagai tingkatan seperti dapat dilihat pada Gambar 2.



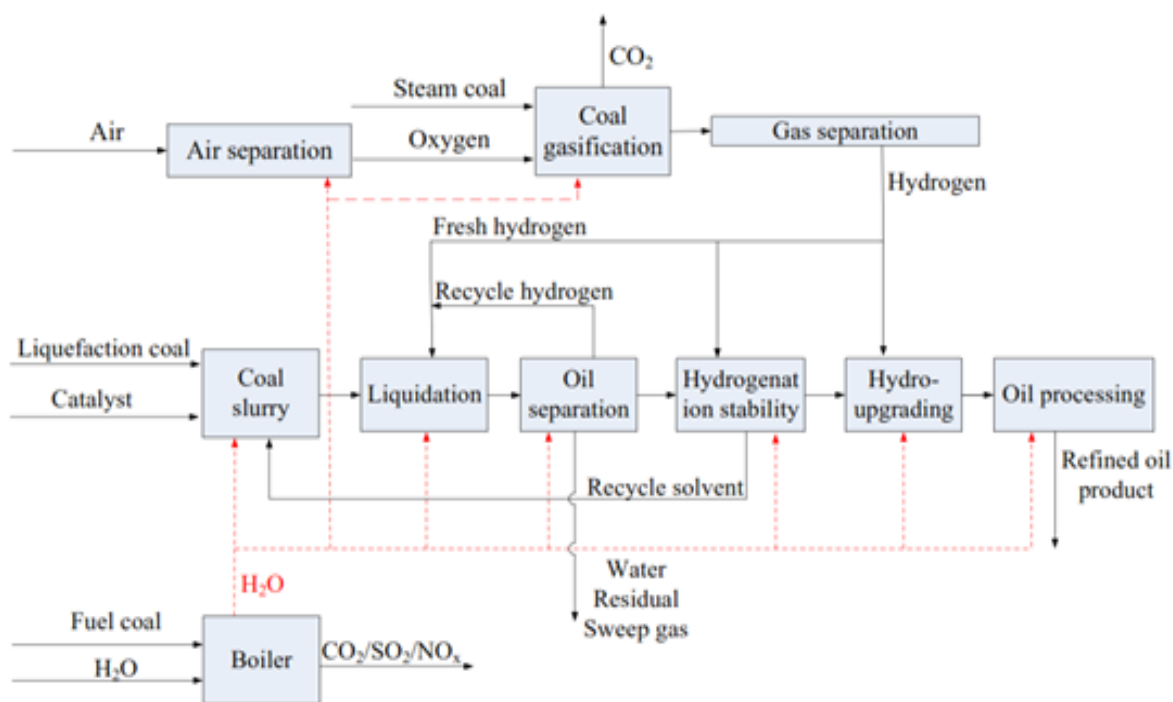
Gambar 2. Representasi Struktur Kimia dari Bahan Penyusun Utama Lignin. (a) P-Coumaryl Alkohol, (b) Coniferyl Alkohol, dan (c) Sinapyl Alkohol (Burgess Clifford & Song, 2011)

Peneliti lain menyatakan bahwa, lignit merupakan batubara peringkat rendah yang memiliki struktur kompleks yang berbeda-beda menurut asal, jenis, dan peringkatnya. Karena kompleksitas struktur dan kesulitan yang terkait dengan pemisahan produk pencairan, pencairan lignit masih dalam tahap pengembangan. Penelitian lignit menggunakan model

simulasi memberikan cara yang efisien untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang proses pencairan lignit (Ali & Zhao, 2020).

Penelitian lain menyatakan bahwa kerugian ekonomi secara keseluruhan pada proses pada ketiga rute *CTL* diperoleh dengan tujuan memberikan acuan dasar dalam pengambilan keputusan biaya. Proyek *ICL* dalam pekerjaan ini menghasilkan 4,06 juta ton produk minyak setiap tahunnya, sedangkan proyek *DCL* dan *COCP* masing-masing menghasilkan 1,08 dan 4,00 juta ton. Efisiensi energi, emisi CO, dan kondisi ekonomi teknologi *DCL* dan *ICL*. Artinya, metode *DCL* jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan metode *ICL* (Tong et al., 2021).

Pencairan batubara langsung ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah pencucian, batubara pencairan akan dicampur dengan katalis dan kemudian bubur batubara akan diangkut ke unit likuidasi untuk bereaksi dengan hidrogen. Pencampuran minyak cair yang dihasilkan oleh unit pencairan akan diangkut ke unit pemisahan minyak dimana air, sisa dan gas penyapu dilepaskan. Di unit stabilitas hidrogenasi, pelarut pasokan hidrogen diproduksi dan didaur ulang ke dalam unit likuidasi, sementara minyak cair akan dimurnikan lebih lanjut untuk melepaskan beberapa pengotor. Setelah peningkatan hidro dan unit pengolahan minyak, produk minyak olahan akhirnya akan diperoleh. Beberapa parameter utama dan produk minyak utama dalam sistem *DCL* yang disederhanakan tercantum pada Tabel 2. Selain itu, untuk memenuhi konsumsi uap pada proses pencairan batubara tradisional, bahan bakar batubara dibakar dalam boiler dan sementara itu sejumlah besar CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> akan dilepaskan. Sekitar 65% uap diangkut ke pemisahan udara, unit gasifikasi batubara untuk produksi hidrogen (Kong et al., 2019).



Gambar 3. Ilustrasi Sistem *DCL* yang Disederhanakan (Kong et al., 2019)

Tabel 2. Parameter Utama Dan Produk Utama Sistem *DCL* Yang Disederhanakan (Kong Et Al., 2019)

Item	Unit	Amount
Factory scale	10,000 tons/year	100.00
Annual running time	h	7440.00
Liquefaction reaction pressure	MPa	15-30
Liquefaction temperature	°C	440-470
Naphtha	10,000 tons/year	23.47
Diesel	10,000 tons/year	67.11
LPG	10,000 tons/year	9.42
Liquefaction residue	10,000 tons/year	54.25

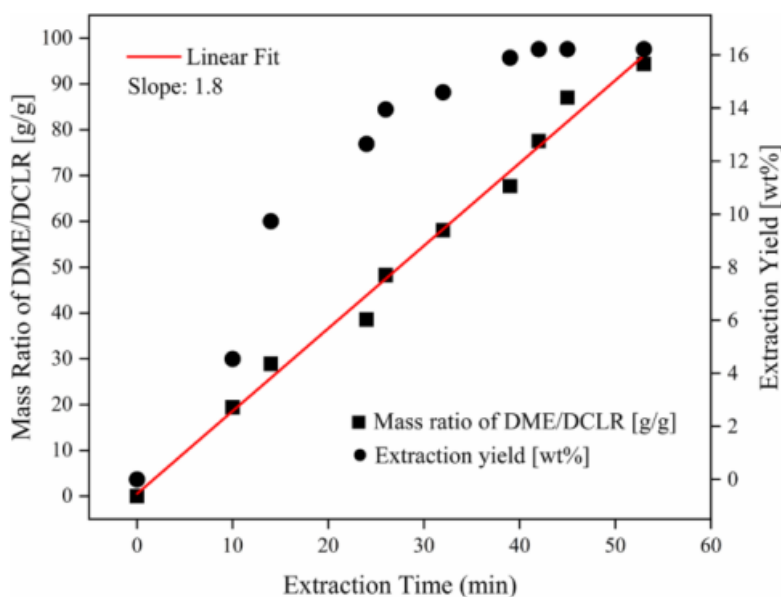
Pengembangan mekanisme pengganti *DDCL* komposisi dan sifat utamanya tercantum pada Tabel 3 bersama dengan petrodiesel sebagai perbandingan. Terlihat bahwa komposisi kedua bahan bakar ini sangat berbeda. *DDCL* sebagian besar terdiri dari sikloalkana, sedangkan pada petrodiesel, kelas hidrokarbon yang berbeda tersebar lebih merata. Perbandingan bilangan setana (CN) dan titik didih antara *DDCL* dan petrodiesel menunjukkan bahwa *DDCL* jauh lebih tidak reaktif namun lebih mudah menguap dibandingkan petrodiesel konvensional, yang berdampak pada karakteristik penyalaan pada mesin (Fang et al., 2020).

Tabel 3. Komposisi Dan Sifat Utama *DDCL* Petrodiesel (Fang et al., 2020)

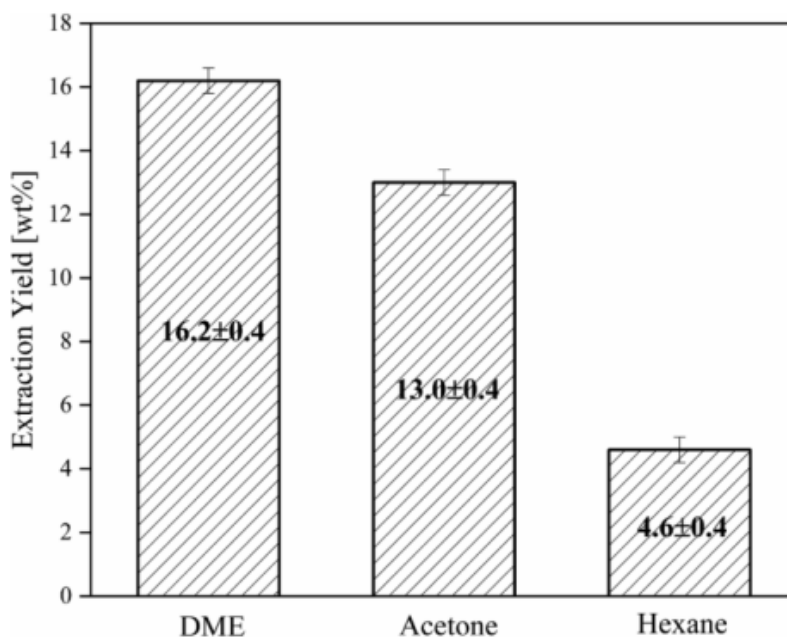
Properties	DDCL	Petrodiesel
Composition (vol.%)	10.8	38.9
Alkanes	86.8	36.3
Cycloalkanes	2.4	24.8
Aromatics		
Cetane number (CN)	40.5	51
Hydrogen-Carbon ratio	1.896	1.879
Lower heating value (MJ/kg)	42.77	42.76
Density at 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	0.8465	0.8337
Viscosity at 20 °C (mm <sup>2</sup> /s)	2.5	4.4
Boiling range ( °C)	185.6–267.8	168.5–346.2
Flash point ( °C)	66	68
Cold filter plugging point ( °C)	<-45	-3

Perbedaan antara nilai konsumsi DME teoritis dan aktual dapat disebabkan oleh kesalahan yang ditimbulkan dengan prosedur interval. Seperti yang ditunjukkan oleh lingkaran padat hitam pada gambar. 4, hasil ekstraksi meningkat dengan aliran *DME* cair selama 10 menit pertama. Untuk waktu ekstraksi 10–24 menit, rasio massa *DME/DCLR* berubah dari 20 menjadi 39, dan laju pertumbuhan hasil ekstraksi mencapai maksimum. Selanjutnya, hasil ekstraksi meningkat perlahan dan tetap tidak berubah pada 16,2%, menunjukkan bahwa ekstraksi merupakan hasil tindakan untuk *DCLR* menggunakan *DME* cair, aseton, dan heksana sebagai pelarut yang hampir selesai pada titik ini, rasio massa *DME/DCLR* kira-kira 70 dan waktu ekstraksi adalah 40 menit sedangkan untuk hasil ekstraksi *DCLR* menggunakan *DME* cair, aseton, dan heksana sebagai pelarut dapat dilihat pada Gambar 4 sedangkan untuk hasil ekstraksi dapat dilihat pada Gambar 5. (Zheng et al., 2020).





Gambar 4. Hubungan Waktu Ekstraksi, Konsumsi DME, dan Hasil Ekstraksi. ■ Rasio Massa DME/DCLR; ● Hasil Ekstraksi (Zheng Et Al., 2020).



Gambar 5. Hasil Ekstraksi DCLR Menggunakan DME Cair, Aseton, dan Heksana Sebagai Pelarut (Zheng Et Al., 2020).

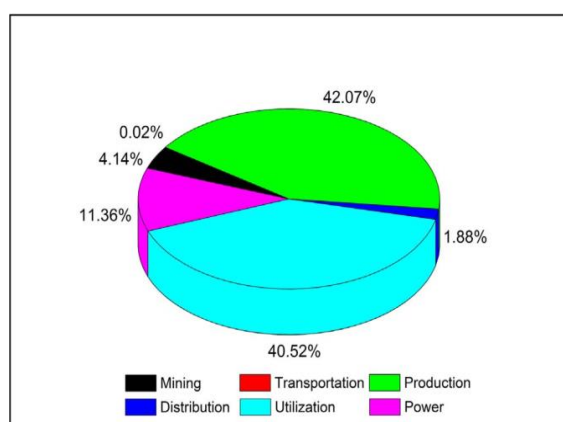
### 2.1.2 Pencairan batubara tidak langsung/ Indirect Coal Liquefaction (ICL)

Teknologi DCL, tidak seperti teknologi ICL, belum pernah didemonstrasikan pada skala komersial, perbandingan ketat antara biaya bahan bakar DCL dan ICL saat ini tidak memungkinkan. Namun, teknologi ICL sudah cukup maju sehingga perkiraan kasar biaya bahan bakar ICL relatif terhadap biaya bahan bakar yang berasal dari minyak mentah. Pabrik buatan AS dan buatan Tiongkok mengacu pada analisis sistem rinci untuk MeOH dan DME yang dilakukan di Larson dan Ren pada tahun 2003, sedangkan analisis teknologi DCL didasarkan pada tinjauan literatur. Beberapa karakteristik teknologi produksi DCL dirangkum dalam Tabel 4 (Williams & Larson, 2003).

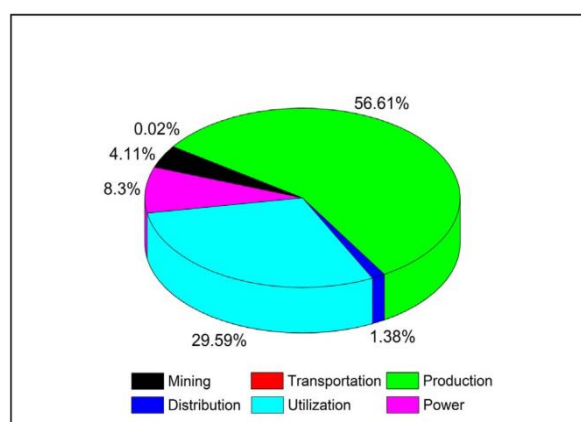
Tabel 4. Neraca Energi/Bahan untuk Produksi Batubara Langsung Cairan - Berdasarkan Estimasi HTI (basis HHV) (Williams & Larson, 2003).

	HTI Design <sup>1</sup>	HTI design Modified so that all H <sub>2</sub> made from coal
Energy inputs, 10 <sup>3</sup> GJ/day		
Coal	257.9	354.7
Natural gas	94.4	
Total	352.4	354.7
H <sub>2</sub> production, 10 <sup>5</sup> kg/day		
From coal	3.02	7.90 <sup>[2]</sup>
From natural gas	4.88 <sup>[2]</sup>	-
Total	7.90	7.90
Energy outputs, 10 <sup>3</sup> GJ/day (10 <sup>3</sup> barrels/day)		
Gasoline (@ 5.84 GJ/barrel)		69.0 (11.8)
Diesel (@ 6.08 GJ/barrel)		174.1 (28.6)
Propane (@ 4.05 GJ/barrel)		13.2 (3.3)
Butane (@ 4.62 GJ/barrel)		8.8 (1.9)
Total (@ 5.81 GJ/barrel)		265.0 (45.6)
Overall efficiency (%)	75.2	74.7
Fuel-cycle GHG emissions for final product		
In kg C/GJ of final product <sup>[3]</sup>	34.61	38.51
Relative to petroleum-derived gasoline <sup>[4]</sup>	1.45	1.61

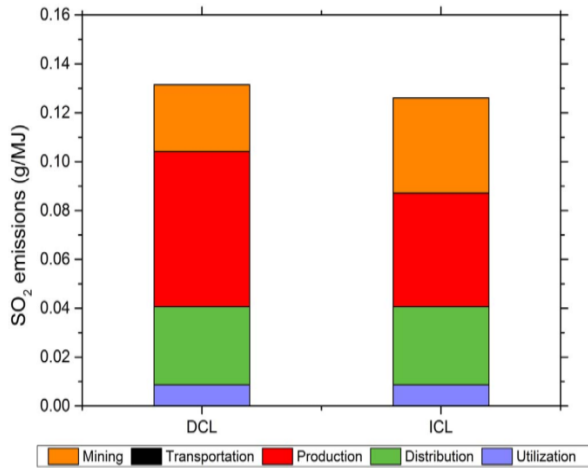
Pada penelitian ini, pencairan batubara secara langsung dan tidak langsung digunakan untuk menyediakan tenaga bagi kendaraan. Gambar 6 dan 7 menunjukkan kehilangan energi dan daya akhir proses *DCL* dan *ICL*. Di sini, efisiensi energi (11,36% pada Gambar 6 dan 8,3% pada Gambar 7) didefinisikan sebagai jumlah energi terminal dibagi dengan energi primer masukan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan. Sebagai perbandingan, pendistribusian produk batubara ke cair dilakukan dengan truk untuk pengiriman yang lama baik untuk *DCL* maupun *ICL*. Pertama, emisi polutan (misalnya SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pro dibandingkan untuk dua metode teknis pencairan batubara yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9. Dengan membandingkan kedua metode tersebut, tidak ada perbedaan yang jelas di antara keduanya. Misalnya, SO, MJ lebih sedikit dibandingkan "*ICL*", dan emisi NO<sub>2</sub> dari "*DCL*" hanya 0,005 g/x emisi dari kedua rute tersebut (Gao et al., 2018).



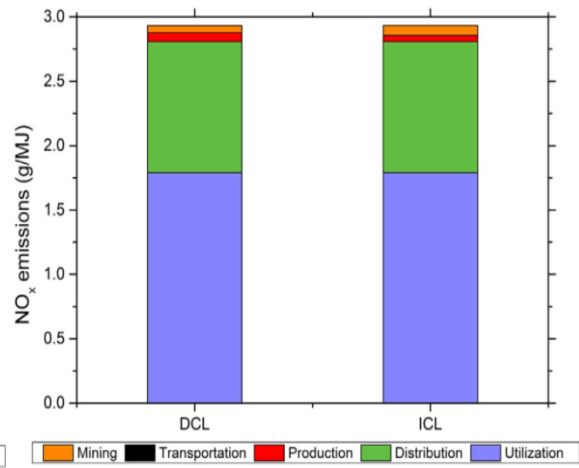
Gambar 6. Teknis Pencairan Batubara Langsung (Gao Et Al., 2018)



Gambar 7. Teknis Pencairan Batubara Tidak Langsung (Gao Et Al., 2018)

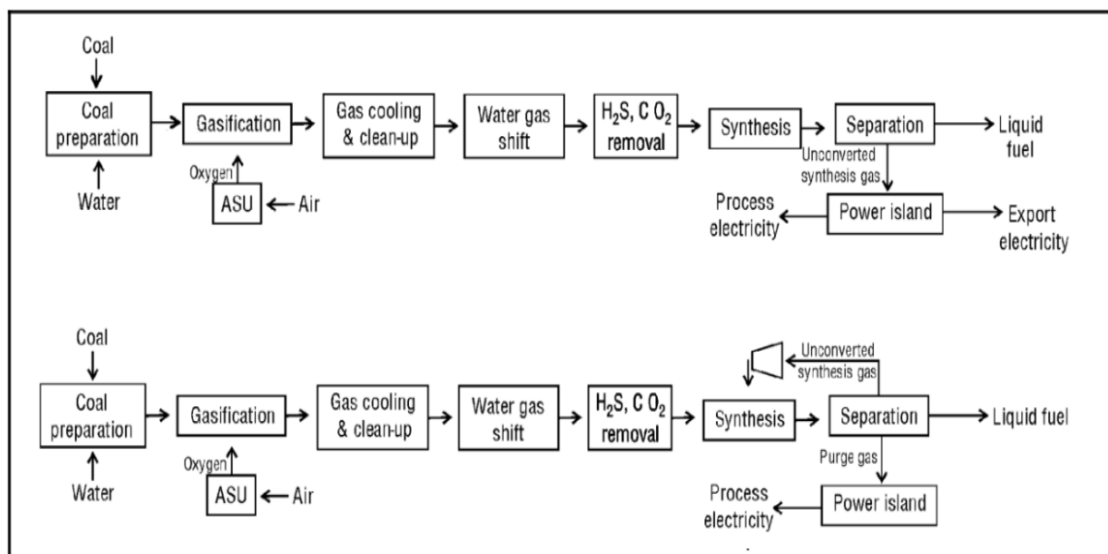


Gambar 8. Perbandingan Emisi SO (Gao Et Al., 2018)



Gambar 9. Perbandingan Emisi Nox Antara (Gao Et Al., 2018)

Produk minyak mentah sintetis melalui kontak langsung batubara dengan katalis yang sesuai dengan adanya tambahan hidrogen pada suhu tinggi, dibahas dalam makalah pendamping. *ICL* adalah produksi bahan bakar dengan tahap peralihan produksi gas sintesis melalui gasifikasi batubara. Konstituen utama dari "syngas" adalah karbon monoksida dan hidrogen yang dapat diproses secara kimia menjadi berbagai bahan bakar berbeda. Gambar 10 mengilustrasikan dua konfigurasi proses dasar untuk pembuatan bahan bakar *MeOH*, *DME*, atau *Fischer-Tropsch* melalui pencairan batubara tidak langsung. Perbedaan antara keduanya adalah bahwa dalam satu kasus, satu-satunya keluaran dari fasilitas tersebut adalah bahan bakar cair. Dalam kasus lain, listrik merupakan produk sampingan utama. Kedua konfigurasi pada dasarnya identik melalui beberapa langkah proses pertama. Langkah proses pertama adalah gasifikasi, yang mengubah batubara menjadi "gas sintesis" atau syngas yang terutama mengandung hidrogen (H<sub>2</sub>) dan karbon monoksida (CO) (Larson & Tingjin, 2003).



Gambar 10. Dua Konfigurasi Proses Dasar Untuk Produksi Bahan Bakar Cair Melalui Pencairan Batubara Secara Tidak Langsung. (Larson & Tingjin, 2003).

Hasil kajian dan perbandingan pencairan batubara antara teknologi *ICL* dan *DCL* yang diproduksi dari bahan bakar sintetis batubara antara lain adalah Teknologi *ICL* dan teknologi *DCL* akan sama hemat energinya jika efisiensi penggunaan akhir dan konversi produksi diperhitungkan. Dari proses pencairan batubara terdapat bahan bakar turunan *ICL* seperti *DME* yang memiliki kinerja lebih baik dibandingkan bahan bakar turunan *DCL* dan bahan bakar hidrokarbon konvensional dalam hal dampak terhadap kualitas udara. Teknologi *ICL* menawarkan prospek menurunkan risiko dan dampak dari bencana (mitigasi) emisi gas rumah kaca yang lebih baik dibandingkan teknologi *DCL*. Penerapan teknologi *ICL* saat ini dapat menempatkan sistem energi batubara pada metode yang konsisten dalam menghadapi kendala iklim dan lingkungan hidup yang parah tanpa harus meninggalkan batubara, namun penerapan teknologi *DCL* tidak akan mampu. Terdapat infrastruktur teknologi pendukung yang jauh lebih kuat baik di Tiongkok maupun di seluruh dunia untuk teknologi *ICL* lebih baik dibandingkan dengan teknologi *DCL*. Propek yang paling menjanjikan adalah prospek *DME* yang diproduksi dalam konfigurasi sekali pakai. *DME* adalah bahan bakar ramah lingkungan dan serbaguna yang mampu bersaing dengan harga impor *LPG* saat ini. Catatan penting adalah potensi realisasi pengurangan emisi gas rumah kaca yang signifikan dalam kasus *DME* dibandingkan dengan bahan bakar hidrokarbon yang berasal dari minyak mentah.

#### 4. KESIMPULAN

Perbandingan pencairan batubara baik pencairan batubara langsung dan pencairan batubara tidak langsung dapat secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca dan meminimalkan biaya operasi. Secara umum, distribusi produk batubara melalui proses pencairan adalah pilihan paling ekonomis. Tanggapan atau pendapat penulis mengenai teknologi proses pencairan batubara adalah sangat disarankan karena disamping dapat mengurangi polusi juga dapat menghemat biaya.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami sampaikan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan kepada Prodi Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung yang telah banyak membantu dan memfasilitasi dalam penyusunan jurnal ini. Tak lupa pula kami sampaikan terima kasih kepada teman-teman yang telah membarikan masukan, dukungan dan semangat dalam menyelesaikan jurnal ini.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ali, A., & Zhao, C. (2020). Direct liquefaction techniques on lignite coal: A review. *Chinese Journal of Catalysis*, 41(3), 375–389. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63492-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63492-3)
- Benato, A., Bracco, S., Stoppato, A., & Mirandola, A. (2016). LTE: A procedure to predict power plants dynamic behaviour and components lifetime reduction during transient operation. *Applied Energy*, 162, 880–891. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.162>
- Benato, A., Stoppato, A., & Bracco, S. (2014). Combined cycle power plants: A comparison between two different dynamic models to evaluate transient behaviour and residual life. *Energy Conversion and Management*, 87, 1269–1280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.017>
- Burgess Clifford, C., & Song, C. (2011). Direct liquefaction (DCL) processes and technology

- for coal and biomass conversion. In *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing* (pp. 105–154). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857093783.2.105>
- Fang, X., Huang, X., Chen, W., Qiao, X., & Ju, D. (2020). Development of a skeletal surrogate mechanism for emulating combustion characteristics of diesel from direct coal liquefaction. *Combustion and Flame*, *218*, 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.022>
- Gao, D., Ye, C., Ren, X., & Zhang, Y. (2018). Life cycle analysis of direct and indirect coal liquefaction for vehicle power in China. *Fuel Processing Technology*, *169*, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.007>
- Garðarsdóttir, S. Ó., Göransson, L., Normann, F., & Johnsson, F. (2018). Improving the flexibility of coal-fired power generators: Impact on the composition of a cost-optimal electricity system. *Applied Energy*, *209*, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.085>
- Huang, W., Zheng, D., Chen, X., Shi, L., Dai, X., Chen, Y., & Jing, X. (2020). Standard thermodynamic properties for the energy grade evaluation of fossil fuels and renewable fuels. *Renewable Energy*, *147*, 2160–2170. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.127>
- Huang, Z., Xu, X., Ju, D., Han, D., Qiao, X., & Huang, Z. (2018). Development of multi-component surrogates of diesel from indirect coal liquefaction for spray analysis. *Energy*, *152*, 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.167>
- Kong, H., Kong, X., Wang, J., & Zhang, J. (2019). Thermodynamic analysis of a solar thermochemical cycle-based direct coal liquefaction system for oil production. *Energy*, *179*, 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.019>
- Kumar, V., Saxena, V. K., Kumar, R., & Kumar, S. (2024). Energy, exergy, sustainability and environmental emission analysis of coal-fired thermal power plant. *Ain Shams Engineering Journal*, *15*(2), 102416. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102416>
- Larson, E. D., & Tingjin, R. (2003). Synthetic fuel production by indirect coal liquefaction. *Energy for Sustainable Development*, *7*(4), 79–102. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60381-6](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60381-6)
- Sardi, B., Uno, I., Pasila, F., Altway, A., & Mahfud, M. (2023). Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: A review. *FirePhysChem*, *3*(2), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2023.02.002>
- Sarkar, J. (2015). Review and future trends of supercritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle for low-grade heat conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 434–451. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.039>
- Tong, R., Zhang, B., Yang, X., Wang, Y., & Zhang, L. (2021). A life cycle analysis comparing coal liquefaction techniques: A health-based assessment in China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *44*, 101000. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101000>
- Wang, C., Liu, M., Li, B., Liu, Y., & Yan, J. (2017). Thermodynamic analysis on the transient cycling of coal-fired power plants: Simulation study of a 660 MW supercritical unit. *Energy*, *122*, 505–527. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.123>
- Wang, C., Liu, M., Zhao, Y., Qiao, Y., Chong, D., & Yan, J. (2018). Dynamic modeling and operation optimization for the cold end system of thermal power plants during transient processes. *Energy*, *145*, 734–746. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.146>
- Wang, C., Zhao, Y., Liu, M., Qiao, Y., Chong, D., & Yan, J. (2018). Peak shaving operational optimization of supercritical coal-fired power plants by revising control strategy for water-fuel ratio. *Applied Energy*, *216*, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.039>
- Williams, R. H., & Larson, E. D. (2003). A comparison of direct and indirect liquefaction technologies for making fluid fuels from coal. *Energy for Sustainable Development*, *7*(4),

- 103–129. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60382-8](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60382-8)
- Yang, Z.-Y., Zeng, P., Wang, B.-Y., Jia, W., Xia, Z.-X., Liang, J., & Wang, Q.-D. (2021). Ignition characteristics of an alternative kerosene from direct coal liquefaction and its blends with conventional RP-3 jet fuel. *Fuel*, *291*, 120258. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120258>
- Yongliang Zhao, Peipei Fan, Ming Liu\*, Daotong Chong, J. Y. (2018). Fatigue Lifetime Estimation of a Heater in Coal-Fired Power Plants Under a Flexible Operational Framework-Regulating Extraction Steam of High-Pressure Heaters Fatigue Lifetime Estimation of a Heater in Coal-Fired Power Plants Under a Flexible Operational. *10 Th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China 10 Th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China.*
- Zhao, Y., Liu, M., Wang, C., Li, X., Chong, D., & Yan, J. (2018). Increasing operational flexibility of supercritical coal-fired power plants by regulating thermal system configuration during transient processes. *Applied Energy*, *228*, 2375–2386. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.070>
- Zhao, Y., Wang, C., Liu, M., Chong, D., & Yan, J. (2018). Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: A dynamic simulation. *Applied Energy*, *212*, 1295–1309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.017>
- Zheng, Q., Zhang, Y., Wahyudiono, Fouquet, T., Zeng, X., Kanda, H., & Goto, M. (2020). Room-temperature extraction of direct coal liquefaction residue by liquefied dimethyl ether. *Fuel*, *262*, 116528. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116528>
- Zhou, W., Zhu, B., Chen, D., Zhao, F., & Fei, W. (2011). Technoeconomic assessment of China's indirect coal liquefaction projects with different CO<sub>2</sub> capture alternatives. *Energy*, *36*(11), 6559–6566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.007>