

REVIEW TEKNOLOGI UNDERGROUND COAL GASIFICATION DAN STATUS PENGEMBANGANNYA DI INDONESIA

Zulfahmi

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara
zulfahmi@tekmira.esdm.go.id

SARI

Permasalahan kelangkaan energi di masa mendatang harus segera diantisipasi secara dini dengan menyiapkan alternatif yang paling memungkinkan untuk dikembangkan saat ini. Menurut beberapa pakar energi, bahwa saat ini produksi minyak dan gas bumi Indonesia terus menurun dan menurut prediksi mereka dalam satu dasawarsa ke depan Indonesia akan menjadi *net* importir migas. Bila ditinjau dari sumber daya, batubara adalah salah satu sumber energi yang paling memungkinkan untuk dikembangkan saat ini, namun perlu diperhatikan juga permasalahan lingkungan yang menjadi kendala utama bila menggunakan teknologi konvensional, baik pada saat proses penambangan maupun pengolahannya. Salah satu solusi yang memungkinkan adalah menggunakan teknologi non konvensional *underground coal gasification* (UCG) yang langsung membuat gas dengan membakar batubara secara *in-situ* di bawah tanah. Metode ini dianggap ramah lingkungan, karena tidak perlu melakukan eksploitasi batubara dan saat proses gasifikasi tidak menghasilkan gas berbahaya seperti SO_2 dan NO_x . Walaupun di beberapa negara teknologi ini telah terbukti, namun teknologi ini perlu penelitian yang lebih mendalam bila ingin dikembangkan di Indonesia, karena sangat tergantung kepada kondisi geologi dan litologi setempat. Oleh karena itu evaluasi kondisi geologi, hidrogeologi, geokimia dan geomekanika di Indonesia perlu dipertimbangkan untuk melihat kecocokan dalam pemilihan metode UCG ataupun teknologinya. Pada tulisan ini telah dilakukan penelaahan beberapa penelitian terdahulu dengan melihat beberapa aspek terkait dengan kondisi geologi, teknologi dan lingkungan yang ada di Indonesia.

Kata kunci : energi, gas, ilmu kebumihan, *underground coal gasification*

1. PENDAHULUAN

Batubara merupakan salah satu sumber energi alternatif yang paling penting di Indonesia, mengingat sumberdaya batubara Indonesia sangat menjanjikan. Menurut Badan Geologi (2012), Jumlah sumber daya batubara ada sekitar 161 milyar ton dan apabila dieksploitasi pada tingkat produksi seperti saat ini, diperkirakan dapat mencapai antara 150 - 200 tahun. Sebesar 120 milyar ton batubara tersebut dapat ditambang secara terbuka (*open pit*) dan sisanya menggunakan metode tambang bawah tanah (40,3 milyar ton). Potensi tersebut akan lebih besar lagi bila dihitung sampai kedalaman

1000 m dpl. Meskipun demikian, dalam pemanfaatan batubara ini pemerintah khawatir tentang polusi yang disebabkan oleh pembakaran batu bara dan kerusakan lingkungan yang berkaitan dengan pertambangan. Oleh karena itu potensi ini perlu dikembangkan dengan teknologi yang ramah lingkungan, salah satunya adalah dengan *underground coal gasification* (UCG). Teknologi ini berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia, karena selain dikenal dengan *clean energy technologies* juga sesuai dengan karakteristik batubara Indonesia yang umumnya berkualitas rendah. Di samping dapat mengintensifkan pemanfaatan batubara pada kedalaman yang tidak menguntungkan untuk di

tambang secara terbuka maupun bawah tanah, pemanfaatan batubara peringkat rendah juga sebagai alternatif pengganti energi fosil yang berasal dari minyak dan gas bumi (migas). Sejauh ini cadangan migas secara nasional terus berkurang dan produksi migas pun semakin menurun, sementara konsumsi bahan bakar minyak (BBM) terus meningkat.


Sejalan dengan semakin berkembangnya pembangunan di dalam negeri di masa mendatang, maka pemanfaatan batubara sebagai energi alternatif akan terus meningkat. Hal ini sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 5 Tahun 2006 dimana batubara akan mempunyai kontribusi pada bauran energi nasional pada tahun 2025 sebesar 33 %, dibandingkan dengan kondisi saat ini kontribusinya hanya 18% (KESDM, 2012). Selain dengan teknologi konvensional saat ini, untuk batubara yang relatif dalam, teknologi nonkonvensional seperti UCG ini dapat mempercepat kontribusi batubara pada tahun-tahun mendatang.

Aplikasi teknologi UCG dilakukan dengan membuat dua lubang (sumur) bor, di mana satu lubang berfungsi sebagai media untuk injeksi katalis dan lubang lainnya berfungsi sebagai lubang produksi. Teknologi UCG ini telah dicoba oleh banyak negara. Di Amerika lebih dari 30 *pilot* dilakukan ujicoba untuk jenis batubara bituminuous, sub-bituminuous dan lignit antara tahun 1975 - 1996. Sebelumnya negara Uni Soviet telah melakukan penelitian lebih dari 50 tahun untuk teknologi ini. Uji lapangan dan beberapa proyek komersil telah dibangun untuk pembangkit tenaga listrik, seperti di Angren, Uzbekistan yang sampai saat ini masih beroperasi dengan baik. Saat ini Rusia telah menjalankan proses komersialisasi UCG pada 12 lokasi berbeda dengan kedalaman kurang dari 200 meter dan mayoritas digunakan untuk pembangkit listrik dan industri. Selain itu sejak tahun 1991 China telah melakukan 16 kali pengujian dan beberapa diantaranya telah komersil. Di Eropa, salah satunya di Laut Utara, telah beroperasi 15 skala *pilot* di beberapa lokasi yang berbeda. Pada tahun 2000, Australia memulai *pilot project* yang cukup besar di Chin-

chilla untuk memproduksi *SynGas* dan sudah dapat memproduksi 5 barrel/hari (Hattingh, 2008). Saat ini proyek-proyek UCG komersial tersebut telah berkembang di banyak negara seperti di Amerika, Kanada, Afrika Selatan, India, Australia, Selandia Baru dan China yang menghasilkan tenaga listrik, bahan bakar cair dan gas alam sintetis (Burton, 2008).

Pelaksanaan kegiatan penelitian dan pengembangan aplikasi teknologi UCG di Indonesia telah dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara (tekMIRA), Badan Litbang ESDM diawali dengan kegiatan konfirmasi kondisi bawah permukaan di lokasi PTBA yaitu blok Mahayung yang berada di sebelah barat-utara Airlaya. Hasil kajian menunjukkan bahwa lokasi di sini cukup sulit untuk dikembangkan karena berbatasan dengan lokasi tambang serta lokasi rencana pemindahan perumahan pegawai perusahaan tersebut. Namun secara regional data yang dihasilkan, dapat dijadikan referensi untuk kegiatan selanjutnya, terutama kondisi stratigrafi, geomekanika dan hidrogeologi.

Mengingat penerapan teknologi UCG ini belum berkembang di Indonesia dan sebagai upaya untuk mengoptimalkan penggunaan batubara peringkat rendah, maka dalam melakukan penerapan teknologi ini perlu terlebih dahulu mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi desain UCG. Menurut Bowen (2008), ada tujuh faktor yang mempengaruhi desain UCG, yaitu: kondisi lapisan batubara (tebal, kedalaman, kemiringan dan permeabilitas); sifat-sifat batubara (kadar abu, kandungan karbon, komposisi kimia); kondisi lapisan batuan pengapit (geologi, hidrologi, geomekanika, dan *drilling properties*); kondisi operasional (komposisi injeksi, laju alir, tekanan, *layout* sumur); produk gas; proses efisiensi dan interaksi UCG dengan lingkungan. Selain itu zonasi potensi UCG dan masalah kebijakan kedepan menjadi target berikutnya untuk dikaji. Untuk melakukan penelitian tersebut perlu dilakukan pembuatan *pilot plant* UCG serta proses pengolahannya sebagai dasar melaksanakan kajian keekonomian. Tulisan ini



bertujuan untuk mengulas penerapan teknologi UCG di dunia dengan beberapa permasalahannya dan melakukan analisis komparatif terhadap data teknis yang relevan di Indonesia.

2. PERKEMBANGAN UCG DUNIA

Kalau melihat dari sejarah perkembangan UCG dunia, teknologi ini termasuk sudah lama, namun tidak berkembang akibat ditemukannya minyak bumi dan gas yang dianggap lebih mudah dalam proses penambangannya. Tercatat paling awal yang menggagas UCG ini adalah Sir William Siemens pada tahun 1868 dan oleh kimiawan Rusia Dmitri Mendeleev yang mengembangkan ide Siemens tersebut selama beberapa dekade berikutnya (Burton, dkk., 2008). Selanjutnya pada kurun 1909-1910, Amerika, Kanada, dan Inggris mulai mengembangkan metode ini. Karya eksperimental pertama UCG dimulai pada tahun 1912 di Durham, Inggris yang dipimpin langsung oleh pemenang Hadiah Nobel Sir William Ramsay namun gagal karena Perang Dunia I, dan proyek ini ditinggalkan. Pada tahun 1913, karya Ramsay ini diminati oleh tokoh Rusia Vladimir Lenin yang menulis di surat kabar Pravda sebuah artikel tentang kelebihan teknologi ini yang dapat membebaskan para pekerja tambang batubara bawah tanah dari pekerjaan berbahaya.

Pengujian bawah tanah dilakukan di Uni Soviet oleh organisasi milik negara Podzemgaz. Uji ini dilakukan di cekungan batubara Moskow di tambang Krutova pada tahun 1933, namun beberapa pengujian mengalami kegagalan. Pada pertengahan tahun 1934, uji coba UCG berhasil dilakukan di Lysychansk, di cekungan Donetsk dan selanjutnya pada tahun 1935 dibuat proses skala pilot pertama Horlivka masih di cekungan Donetsk. Produksi meningkat secara bertahap dan pada kurun waktu 1937-1938, hampir seluruh pabrik kimia setempat mulai menggunakan gas UCG ini. Selanjutnya tahun 1940, *pilot plant* dibangun kembali di Lysychansk dan Tula. Kegiatan UCG Soviet memuncak

setelah perang dunia II dengan mengoperasikan lima pabrik UCG skala industri di awal tahun 1960. Namun, kegiatan pengembangan UCG di Uni Soviet kemudian menurun karena penemuan sumber daya gas alam yang besar. Pada tahun 1964, program UCG ini menurun drastis, hanya di lokasi Angren (Uzbekistan) dan Yuzhno-Abinsk (Rusia) saja yang masih tetap beroperasi sampai saat ini. Di luar Soviet, akibat Perang Dunia II, kekurangan energi memicu minat Eropa Barat dan Amerika Serikat untuk mengembangkan UCG.

Di Amerika Serikat, ujicoba dilakukan pada tahun 1947-1960 di Gorgas, Alabama. Dari tahun 1973-1989, pengujian secara ekstensif dilakukan. Departemen Energi Amerika Serikat dan beberapa perusahaan minyak dan gas melakukan pengujian secara besar-besaran. Lawrence Livermore National Laboratory melakukan tiga tes di tahun 1976-1979 di Hoe Creek, Campbell County, Wyoming namun belum menunjukkan hasil yang optimal. Departemen Energi Amerika Serikat melakukan kerjasama dengan Sandia National Laboratories dan Radian Corporation, Livermore dengan melakukan ujicoba pada kurun waktu 1981-1982 di Tambang WIDCO dekat Centralia, Washington. Tahun 1979-1981, UCG berhasil dioperasikan pada lapisan batubara curam di dekat Rawlins, Wyoming dan pada kurun waktu 1986-1988, program ini dikembangkan pada lapisan batubara di Rocky Mountain di dekat Hanna, Wyoming.

Pada tahun 1948, di Eropa metode UCG ini diuji di Bois-la-Dame, Belgia dan di lanjutkan di Jerada, Maroko, pada tahun 1949. Selanjutnya pada tahun 1949-1950 metode dengan lubang bor diuji di Newman Spinney dan Bayton, Inggris. Beberapa tahun kemudian di lokasi ini dikembangkan sampai skala komersial. Selama tahun 1960 aktivitas UCG di Eropa berhenti total karena kelebihan energi dan harga minyak rendah, namun aktif kembali tahun 1980-an. Di Perancis uji lapangan dilakukan pada tahun 1981 di Bruay-en-Artois dan pada tahun 1983-1984 di La Haute deule. Di Belgia kegiatan pengembangan UCG ini dilakukan di Thulin pada

tahun 1982-1985. Sedangkan Spanyol memulai melakukan pengembangan UCG pada tahun 1992-1999 di lokasi El Tremedal, di Provinsi Teruel.

Di Selandia Baru, uji coba skala kecil dioperasikan pada tahun 1994 di Cekungan Huntly Coal. Di Australia, uji coba dilakukan mulai tahun 1999. China telah mengoperasikan program terbesar sejak akhir 1980-an, termasuk 16 percobaan lainnya di beberapa lokasi penambangan batubaranya.

3. TEKNOLOGI UCG

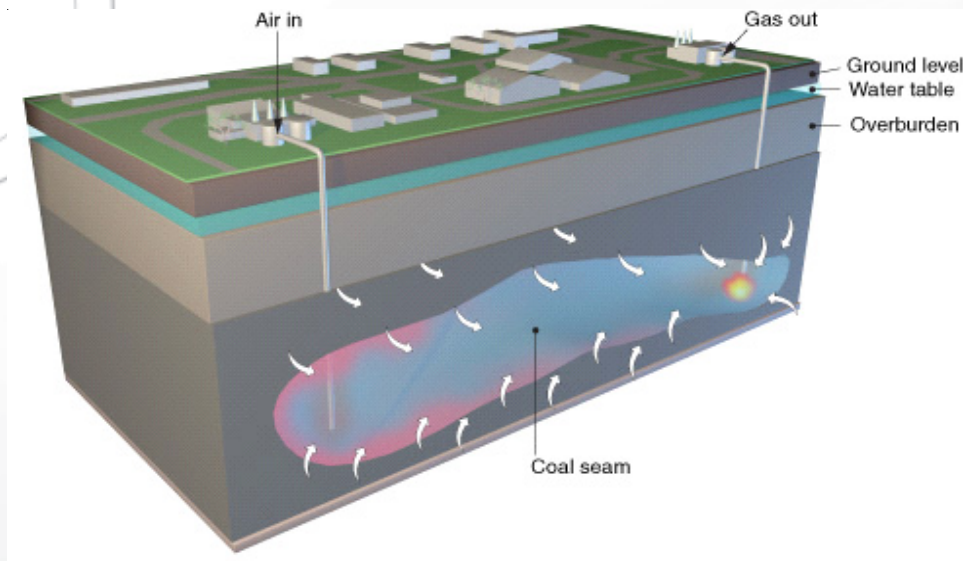
UCG mengkonversi batubara secara *in-situ* menjadi produk gas, umumnya dikenal sebagai gas sintesis (CO dan H₂) atau *syngas* melalui reaksi kimia yang sama dengan *gasifiers* permukaan. Gasifikasi mengubah hidrokarbon menjadi *syngas* pada suhu dan tekanan tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik, bahan baku kimia, bahan bakar cair. Gasifikasi memberikan banyak kesempatan untuk pengendalian pencemaran, terutama berkenaan dengan emisi sulfur, oksida nitrat, dan merkuri. UCG dapat meningkatkan sumber daya batubara yang tersedia untuk pemanfaatan yang lebih efisien dan sebagai bentuk pemanfaatan batubara yang tak mungkin ditambang karena kondisi geologi dan keekonomisan (Burton, dkk., 2004).

Pengeboran dianggap sebagai salah satu dari langkah utama dalam melakukan eksploitasi batubara dengan UCG. Selama pengembangannya dua model geometri pengeboran UCG telah diaplikasikan yaitu *Linked vertical wells* (LVW) dan *controlled-retraction injection point* (CRIP). Model yang pertama dilakukan dengan pemboran dua sumur vertikal sebagai injeksi dan sumur produksi yang kemudian keduanya dihubungkan. Uji coba lapangan dari LVW menunjukkan terjadinya penurunan kualitas gas yang dihasilkan, terkait dengan hilangnya gas dan panas yang keluar melalui *overburden* (Gourden, 2009). Sedangkan metode yang berikutnya (CRIP), titik

injeksi bergerak mengikuti arah pembakaran yang terjadi (Cena, dkk., 1984). Reaksi dimulai dari dekat sumur produksi dan batubara yang berada di antara sumur injeksi dan produksi akan habis membentuk rongga (*caving*), udara yang diinjeksikan melalui *coil tubing* digerakkan secara terkendali. Kedua model ini sangat bergantung pada permeabilitas alami dari lapisan batubara untuk menyalurkan gas ke dan dari zona pembakaran atau terjadi peningkatan permeabilitas yang diciptakan melalui *reversed combustion*, kanal dalam lapisan batubara, atau akibat *hydraulic fracturing* (Creedy & Garner, 2004).

Pada prosesnya, batubara yang berada di bawah tanah ini bereaksi dengan udara atau oksigen dan uap air yang diinjeksikan untuk membentuk gas, cairan, dan abu sebagai residunya (Sinha, 2007). Komponen yang diinjeksikan akan bereaksi dengan batubara untuk membentuk gas bakar yang dibawa menuju ke permukaan melalui sumur produksi gas. Kemudian gas tersebut dibersihkan melalui proses filterisasi dan digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia (Creedy et.al, 2001). Produser gas merupakan campuran dari gas bakar (karbon monoksida, hidrogen, dan metana) dan gas yang tak terbakar (karbondioksida, nitrogen, dan uap air), Sinha, (2007). Proses UCG hampir serupa dengan proses gasifikasi pada reaktor di permukaan. Meskipun reaktor gasifikasinya berada di bawah tanah, namun rangkaian prosesnya lebih singkat dibandingkan dengan gasifikasi permukaan (Gambar 1).

Sekarang UCG dimanfaatkan bagi sumber daya batubara yang tidak layak secara ekonomi untuk ditambang (Hattingh, 2008) atau tidak dapat ditambang dengan metode yang ramah lingkungan (Sinha, 2007). Secara prinsip, metode ini akan mengurangi resiko dari penambangan dan meminimalkan aktivitas perusakan lingkungan (Schridder & Whieldon, 1977). Menurut Hattingh (2008), implementasi teknologi UCG dilakukan dengan enam tahapan, yaitu : mencari potensi batubara yang akan diolah dengan teknologi UCG; pengeboran; membuat jalur penghubung antar dua lubang



Gambar 1. Konversi batubara ke gas bakar (Blinderman and Jones, 2002)

bor; pembakaran batubara; injeksi oksigen atau udara dan uap air; dan melakukan ekstraksi gas sintesis. Selanjutnya gas bertekanan akan mengalir keluar melalui lobang bor menuju ke permukaan.

4. PROSES UCG

Reaksi yang terjadi pada proses gasifikasi batubara melalui UCG ini secara umum sedikit berbeda dengan pembakaran batubara konvensional. Pada proses reaksi ini O_2 akan menghasilkan CO_2 dan H_2O dan suhu yang dihasilkan pada proses ini akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan pembakaran batubara secara konvensional. Selain itu perbedaan penting antara pembakaran batubara dan gasifikasi batubara adalah dalam pembentukan polutan. Menurut Burton, dkk. (2008), secara lengkap proses reaksi kimia dari UCG cukup kompleks seperti dapat dilihat pada Tabel 1. Reaksi UCG (Tabel 1) merupakan reaksi stoikiometri sederhana dan pada kenyataannya reaksi ini dapat menghasilkan produk sampingan tambahan berdasarkan jenis

senyawa karbon yang ada. Reaksi pirolisis ditulis dalam bentuk yang sangat umum karena pirolisis memiliki stoikiometri rumit yang tergantung pada komposisi gas, suhu, tekanan dan tingkat pemanasan. Ruang gasifikasi akan membesar dan separuhnya terisi dengan abu, akibatnya bagian kedua sisi ruang di mana batubara segar terkena atau ruang kosong di bagian atas ruangan akan terbakar, karena oksidan terus diinjeksikan secara berkelanjutan ke lapisan batubara dan harus terus mengalir.

Pada ruang kosong dari ruang bakar tersebut terjadi perbedaan konsentrasi dan gradien temperatur. Gradien ini menurut Perkins and Sahajwalla, (2005) disebabkan oleh reaksi kimia dan konveksi alami dari difusi ganda (*double diffusive natural convection*). Aliran fluida pada lokasi timbunan abu ditentukan oleh distribusi permeabilitas, sedangkan di ruang kosong ditentukan oleh *double diffusive natural convection*, namun didominasi oleh gaya apung tunggal akibat adanya gradien temperatur akibat proses pembakaran oksigen dengan CO yang dihasilkan dari gasifikasi dari dinding lapisan batubara (Perkins, 2005).

Tabel 1. Reaksi kimia UCG

PROSES	REAKSI	ENTHALPHI
Oksidasi Volatile	$O_2 + CO, H_2, CH_4, HC's^* = CO_2 + H_2O$	$\Delta H = -$ eksotermis kuat
Oksidasi Char	$C + O_2 = CO_2$	$\Delta H = - 406.0$ kJ/mol
Penguapan air	$H_2O_{cair} = H_2O_{gas}$	$\Delta H = +40.68$ kJ/mol
Pirolisis	Batubara + Panas \rightarrow Char + Abu + $HC's^* + CH_4 + H_2 + H_2O + CO + CO_2$	Endothermic
Gasifikasi	$C + H_2O = H_2 + CO$	$\Delta H = +118.5$ kJ/mol
Reaksi Boudouard	$C + CO_2 = 2CO$	$\Delta H = +159.9$ kJ/ mol, pelan
Perubahan air ke gas	$CO + H_2O = H_2 + CO_2$	$\Delta H = - 42.3$ kJ/mol
Metanisasi	$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	$\Delta H = - 206.0$ kJ/mol
Perubahan hidrogen ke methan	$C + 2H_2 = CH_4$	$\Delta H = - 87.5$ kJ/ mol

kJ/mol = kiloJoules per mole

*HC's = Senyawa hidrokarbon dan produk turunannya

Pada suhu di atas 200°C, konstanta dielektrik air menjadi sebanding dengan konstanta dielektrik aseton dan metanol. Pada suhu ini cairan menjadi media yang sangat difusif dengan kelarutan yang baik untuk zat terlarut organik polar dan non-polar. Perilaku kelarutan senyawa dalam air pada temperatur tinggi berubah secara signifikan dan hal ini mempengaruhi dispersi kontaminan di lokasi UCG (Burton, dkk., 2008; Nourozieh & Kariznovi, 2010). Menurut Solcova dkk., (2009), pengaruh peningkatan tekanan terhadap permukaan gas pada media berpori lebih besar dibanding peningkatan suhu dan ukuran pori.

5. MANFAAT LINGKUNGAN UCG

Gasifikasi batubara bawah tanah memiliki beberapa manfaat lingkungan yang lebih daripada pertambangan konvensional antara lain, tidak ada pembuangan *tailing*, emisi sulfur berkurang dan mengurangi pembuangan abu, merkuri dan *tar* (Shuqin, et al., 2007). UCG merepresentasikan metode yang bersih dan dapat meningkatkan perbaikan lingkungan yang mengkombinasikan antara proses penambangan bawah tanah dengan gasifikasi

batubara permukaan. Beberapa keuntungan lainnya adalah :

- menurunkan resiko pencemaran air permukaan;
- keselamatan dan kesehatan kerja lebih terjamin;
- pengurangan penggunaan air;
- partikulat emisi rendah, kebisingan dan dampak visual pada permukaan;
- mengurangi emisi metana dari tambang batubara - dengan referensi bahwa 5 m³/ton di lapisan dangkal dan 20 sampai 75 m³/ton di lapisan dalam, serta mengurangi emisi gas rumah kaca dari seluruh 0,02 ton/MWh dalam batubara dangkal untuk 0,4 ton/MWh di lapisan dalam batubara yang mengandung gas (*deep gassy seams*) di mana CO₂ ekuivalen dengan per satuan listrik yang dihasilkan (UK-China Technology Transfer, 2009).
- tidak ada penanganan kotoran dan pembuangan di lokasi tambang;
- tidak ada pencucian batubara dan pembuangan disposal di lokasi tambang;
- tidak ada penanganan abu dan pembuangannya di lokasi pembangkit listrik;
- sedikit menghasilkan SO₂;
- sedikit menggunakan transportasi;

- tidak memerlukan lahan yang luas dan penebangan hutan;
- tidak perlu ada pemulihan air tambang (*mine water recovery*); dan
- tidak ada kewajiban mereklamasi terhadap bahaya permukaan tambang yang ditinggalkan.

Dampak lingkungan yang merugikan dari proses UCG bila dibandingkan dengan teknologi eksploitasi konvensional lebih rendah. Produk utama dari proses eksploitasi dengan UCG ini adalah gas dan beberapa produk samping yang tersisa akan tersimpan di tanah, atau dapat dihilangkan.

Dengan gasifikasi in-situ ini, UCG hanya meninggalkan jejak permukaan minimal dan tidak memerlukan dislokasi di permukaan. UCG adalah teknologi eksploitasi batubara yang terbersih.

Tahapan yang penting dilakukan pada saat membangun, menyiapkan dan mengekstrak gas dari batubara melalui teknologi UCG menurut Hattingh (2008) adalah sebagai berikut:

- Mencari potensi batubara yang potensial dan cocok untuk diolah dengan teknologi UCG ;
- Pengeboran;
- Membuat jalur / jaringan UCG di bawah tanah;
- Pembakaran batubara;
- Injeksi oksigen/udara dan *steam*; dan
- Ekstraksi gas sintesis

6. POTENSI RESIKO UCG

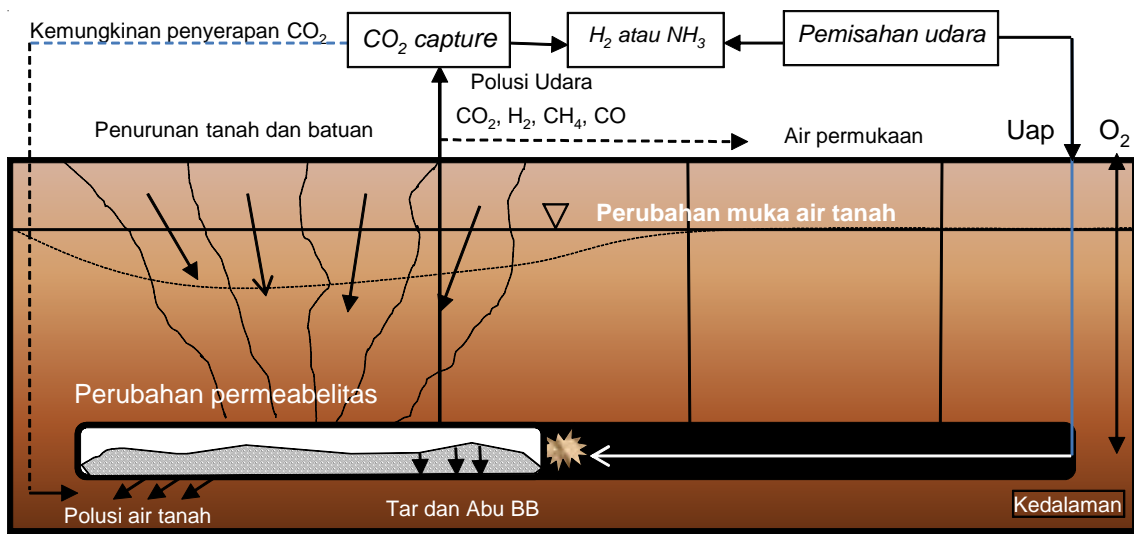
Bahan bakar gas yang dihasilkan dari proses UCG pasti akan sarat dengan kontaminan yang berasal dari batu bara sebagai akibat dari suhu tinggi yang terlibat dalam proses gasifikasi. Tar, partikulat, amonia, hidrogen sulfida, hidrogen klorida dan unsur yang tak terlacak (*trace species*) seperti Cd, Hg, Pb, Zn, Na, K dan unsur lainnya yang semuanya akan muncul ketika terbentuk gas bersamaan dengan dengan senyawa utama seperti H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 dan N_2 (Liu, dkk., 2006). Ketika terjadi proses gasifikasi, dan ketika melewati rongga (*cavity*)

sumur produksi bersifat dingin, maka selama proses transportasi tersebut, kontaminan dan termasuk partikulat gas (*gas-borne particulates*) akan mengendap atau membentuk kondensat di sekitar permukaan (termasuk pada pipa sumur produksi).

Bila suhu gas menurun di dalam sumur produksi atau suhu tidak dapat dipertahankan di atas titik embun air, maka uap air dari gas akan terkondensasi mengumpul di dasar sumur produksi. Air dan/atau *ter* yang berasal dari bahan bakar gas akan mengental dan berpotensi menjadi penyebab penyumbatan sumur. Dalam kondisi ini, air yang dikumpulkan akan menjadi sangat tercemar oleh kontaminan tersebut, sehingga akan mengarah kepada potensi pencemaran air tanah. Oleh karena itu kontaminan gas residu yang akan naik melewati sumur terlebih dahulu harus dibersihkan sebelum dikompresi dan digunakan dalam turbin gas.

Pada saat proses UCG di bawah tanah, interaksi fisika dan kimia antara reaktor UCG dan lingkungan di sekitar lokasi tersebut sangat mungkin terjadi, karena proses pembakaran batubara akan menghasilkan perubahan fisik dan kimia, sehingga kemungkinan terjadi kontaminasi terhadap formasi di sekitar reaktor UCG bisa terjadi dan akan mungkin terjadi polutan pada air tanah, air permukaan serta kualitas atmosfer termasuk potensi *subsidence* akibat adanya rongga-rongga paska proses pembakaran UCG. Navaro, Atkins dan Singh (2014) mengilustrasikan interaksi UCG terhadap lingkungan seperti pada Gambar 2.

Pengeboran dan proses gasifikasi bawah tanah adalah tindakan yang akan menyebabkan terjadinya perubahan penting dalam massa batuan dan air tanah. Rongga gasifikasi dari lapisan batubara merupakan sumber polutan gas dan cair dan hal ini menjadi sumber dari beberapa risiko lingkungan untuk air tanah dalam strata yang berdekatan, tergantung pada apakah kontaminan tersebut dapat bermigrasi ke luar zona reaktor UCG secara langsung atau tidak. Keterampilan dan pengetahuan ahli hidrogeologi dibutuhkan dalam hal ini, untuk menjamin aplikasi



Gambar 2. Interaksi proses UCG dengan lingkungan

UCG tidak menimbulkan permasalahan kontaminasi air tanah (Younger & Gonzales, 2010).

a. Polusi Udara dan Air Tanah

Beberapa hal yang patut diwaspadai dalam proses UCG ini adalah pencemaran pada saat proses di permukaan maupun di bawah permukaan, antara lain:

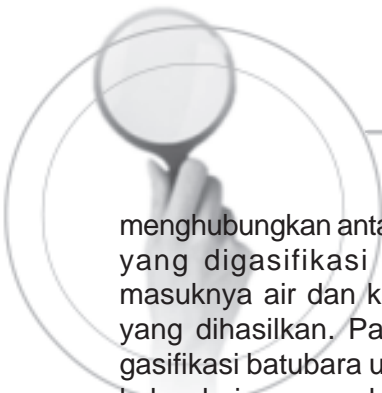
- Peningkatan konsentrasi garam anorganik dekat zona gasifikasi;
- Hasil *leaching* dari zat organik proses gasifikasi seperti fenol dan benzena;
- melarutnya gas berbahaya seperti H₂, CH₄, CO₂, H₂S, dan NH₃ dalam air tanah;
- pelarutan logam berat seperti Hg, As, Pb, Cr, Cd;
- emisi polutan; dan
- gas rumah kaca.

Kekhawatiran utama pada air tanah adalah pencemaran air oleh residu fenol namun ini dapat dibersihkan (*flushed out*) oleh adanya kelarutan air yang relatif tinggi, dan pengelolaan air yang benar. Jika dibiarkan di tanah, fenol akan tersebar secara alami. Sebetulnya tidak ada permasalahan pencemaran air tanah yang serius, namun, ada kebutuhan untuk terus

memantau kualitas air tanah sebagai bagian dari skema UCG dalam merancang langkah-langkah perbaikan dalam pencegahan pencemaran lingkungan (Young dan Sapsford, 2004). Produk gas hasil UCG perlu dibersihkan untuk menghilangkan polutan agar dapat meminimalkan emisi lingkungan dan mencegah korosi dan kerusakan pada turbin gas. CO₂ dalam gas dapat diserap dengan menggunakan larutan limbah alkali dan tetap menjadi abu kalsium batubara yang tinggi untuk mengisi rongga UCG yang kosong. Penghapusan CO₂ akan mengurangi dampak emisi rumah kaca dan meningkatkan nilai kalor dari produk gas per satuan volume.

b. Batuan Pengapit dan Penurunan Permukaan Tanah (*Subsidence*)

Salah satu aspek yang penting perlu dipertimbangkan dalam mendesain konstruksi UCG adalah karakteristik lokasi yang sesuai. Karakteristik batuan pengapit penting untuk diperhatikan, terutama ketebalan dan jarak akuifer dengan lapisan batubara. Masuknya air ke dalam rongga gasifikasi secara substansial dapat mengurangi efisiensi gasifikasi. Penelitian yang dilakukan di Soviet menjelaskan tentang pengaruh intensitas gasifikasi dengan



menghubungkan antara jumlah tonase batubara yang digasifikasi per jam versus tingkat masuknya air dan kandungan panas dari gas yang dihasilkan. Pada intensitas rendah dan gasifikasi batubara untuk satu ton per jam, nilai kalor dari *syngas* akan turun dari sekitar 4657 kJ/m³ dengan tingkat intrusi air rendah 15 gpm menjadi hanya 932 kJ/m³ pada intrusi air tinggi sebesar 150 gpm (Gastech, 2007). Pada lapisan permukaan di sekitar UCG, potensi penurunan akan sangat kecil dibandingkan dengan aktifitas tambang bawah tanah. Menurut Friedman (2005) kasus penurunan tanah untuk kedalaman tertentu belum pernah ditemukan. Meskipun demikian risiko penurunan tanah mungkin saja terjadi, seperti dalam pemodelan numerik yang diteliti oleh Ren, dkk., (2003). Pada saat proses UCG, rongga-rongga bawah tanah akan terbuka akibat pembakaran lapisan batubara yang menyebabkan terjadinya tekanan massa batuan di sekitarnya dan tekanan ini akan membentuk rongga baru yang akan didistribusikan kembali. Sebelum rongga tersebut terbuka, tegangan *insitu* terdistribusi secara merata disekitar area batuan. Setelah hilangnya lapisan batubara dan membentuk rongga, tekanan yang berada disekitar rongga seketika berubah dan tekanan baru terjadi dan terdistribusi mengikuti pola rongga yang muncul (Van der Riet, 2008).

Nilai-nilai tegangan ini bervariasi tergantung pada kedalaman, kondisi struktur dan sifat-sifat geoteknik dari massa batuan sekitar rongga UCG. Tekanan yang muncul adalah kuat tarik dan tekan dari massa batuan yang menjadi penyebab keruntuhan dan berpotensi menyebabkan perluasan ke arah horizontal dan vertikal dan akhirnya akan dapat menyebabkan keruntuhan rongga (Hoek 2000, Navarro, dkk., 2011). Secara umum bila proses ekstraksi semakin dalam, maka terjadinya penurunan permukaan. Limbah, abu, oksida, bahan radioaktif dan batuan sisa setelah gasifikasi yang tersisa di bawah tanah, akan mengeliminasi akumulasi limbah di permukaan dan mengurangi ruang rongga yang terbentuk dibandingkan bila menggunakan tambang bawah tanah.

Lapisan batubara dengan kedalaman lebih dari 150 meter dan kurang dari 600 meter di beberapa negara dianggap cukup ideal untuk pengembangan UCG. Namun untuk di Indonesia dengan kondisi lapisan batuan pengapit yang relatif mempunyai kuat tekan yang rendah, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Sedangkan lapisan batubara kurang dari 150 meter umumnya untuk metode penambangan konvensional. Adanya *parting* dan lensa-lensa pada lapisan batubara tidak begitu penting dalam mengevaluasi potensi sumber daya batubara untuk UCG.

Adanya *parting* yang tipis dan lensa pada lapisan batubara bermanfaat untuk membatasi hubungan antara sumur pada proses UCG, yaitu kontak atmosfer antara sumur injeksi dan produksi. Namun demikian ada batasan yang perlu diperhatikan, bahwa *parting* ini tebalnya harus < 6 m dan sepertiga bagian dari lapisan batubara (Gastech, 2007). Kondisi struktur seperti lipatan atau patahan, menjadi pertimbangan yang penting. Kesalahan dalam memperhitungkan adanya lipatan atau patahan akan menjadi masalah besar dan akan terjadi masuknya air yang berlebihan dan runtuhnya atap lebih cepat. Pentingnya evaluasi geofisika terutama metode seismik refleksi akan menjadi hal yang penting untuk menentukan lokasi yang cocok untuk UCG (Burton, dkk., 2008).

c. Kontaminasi Air Tanah

Polutan utama terhadap kualitas air tanah pada proses UCG ini adalah hasil dari proses pembakaran batubara yang berupa senyawa hidrokarbon seperti benzena, toluena, etilbenzena dan xilena (BTEX), fenol, abu batubara dan ter, hidrokarbon aromatik dan sulfida, NOX, NH₃, boron, sianida, CO dan H₂S (Creedy, et al., 2001). Pelindian dari Fenol dianggap sebagai bahaya lingkungan yang paling signifikan karena proses kelarutan pada air tanah dan afinitas gasifikasi yang tinggi (Shuquin dan Jun-hua, 2002). Terjadinya migrasi yang tak terkendali dan kebocoran dari reaktor *syngas* itu sendiri dapat mengakibatkan kontaminasi terhadap akuifer air tanah di atasnya.

Selain itu, produk samping seperti kontaminan organik seperti PAH, fenol dan benzene serta senyawa anorganik seperti sulfat, boron, logam dan metaloid seperti merkuri, arsenik dan selenium juga cukup berbahaya yang mungkin secara tidak sengaja dihasilkan dari batubara selama proses UCG tersebut (Sury, dkk., 2004; Liu, dkk., 2006). Merkuri, arsenik dan selenium yang tidak stabil dapat juga dilepaskan sebagai gas selama proses UCG berlangsung. Proses liberasi ini mungkin bisa berdampak negatif terhadap kualitas air tanah dan udara. Massa batuan, mineral dan *trace impurities*, yang bersinggungan dengan lapisan batubara ditargetkan juga akan cenderung terkena dampak dari proses UCG ini dan dengan demikian, proses oksidasi dan geokimia lainnya dalam batuan yang berada di sekitar areal tersebut juga bisa mengakibatkan pelepasan kontaminan (Stratus Consulting Inc, 2010).

d. Kontaminasi Air Permukaan

Potensi pencemaran air permukaan akibat adanya proses UCG seperti fenol, amoniak, *chemical oxygen demand* (COD), pH, konduktivitas dan *sulfide* sangat rendah (Sury, et al., 2004). Air permukaan dapat dipengaruhi oleh proses pemompaan air tanah dan operasi pengeboran dan dalam percobaan di Spanyol, air yang dipompa ke permukaan sudah tercemar oleh fenol dengan kandungan sekitar 500 ppm (Green, 1999).

e. Kontaminasi Atmosfir

Konstituen utama dari produk gas hasil UCG adalah CO₂, H₂, CH₄, dan CO. Sebagai contoh untuk proses UCG uji coba proses untuk batubara bituminous yang mengandung sulfur, klorin dan nitrogen yang mempunyai berat masing-masing 2,0%, 0,8% dan 0,2% akan menghasilkan produk emisi gas sebesar 22,7% dari H₂O, 46,1% dari CO₂, 19,2% dari CO, 9,4% CH₄, 1,6% dari H₂ dan 1,0% dari senyawa lain seperti (H₂S, HCl, N₂). Berkaitan dengan kualitas udara, gas yang tidak terpakai tidak akan dibiarkan masuk ke dalam atmosfer, karena proses ini melakukan pembakaran di dalam tanah dengan konsep *clean coal technology*.

7. PENERAPAN TEKNOLOGI UCG DI INDONESIA

a. Sumber Daya Batubara UCG

Pendekatan saat ini untuk pengembangan UCG di Indonesia difokuskan pada lapisan batubara di kedalaman medium, yaitu sekitar 250 - 500 meter dari permukaan. Perhitungan sumber daya batubara untuk UCG, telah dilakukan dan dari 11 cekungan batubara (Gambar 3), yang ada di Indonesia, ada lima cekungan yang memenuhi batasan ketebalan dan kedalaman batubara, yaitu cekungan Ombilin (3 lapisan batubara), cekungan Sumatera Selatan (5 lapisan



Gambar 3. Cekungan batubara Indonesia (ARI, 2003)

batubara), cekungan Barito (7 lapisan batubara), cekungan Kutai (7 lapisan batubara) dan Asam-asam (2 lapisan batubara).

Jumlah sumber daya batubara untuk UCG Indonesia, berdasarkan perhitungan tim Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara sebanyak 796 milyar ton (Tabel 2). Hal ini menunjukkan potensi yang berlimpah untuk dapat dikembangkan melalui teknologi ini.

Apabila dikonversikan dengan asumsi 1 kg batubara menghasilkan 3 Nm³ gas (1 Nm³ = 35,315 scf) dengan nilai panas <200 BTU/ft³, maka potensi gas UCG akan dapat mencapai sekitar 84.354 Tscf (Tabel 3). Apabila dibandingkan dengan produksi gas alam, serta potensi *Coal Bed Methane* (CBM), maka potensi UCG mencapai lebih dari 35 kali gas alam atau CBM (Tabel 4).

b. Karakteristik Batuan dan Batubara Indonesia

Meskipun jumlah sumber daya batubara berlimpah, faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan adalah kondisi lapisan batubara, sifat-sifat batubara, kondisi lapisan batuan pengapit, kondisi operasional dan yang lainnya menjadi hal utama yang perlu diperhatikan. Karakteristik batuan dan batubara ini menjadi prasyarat dalam memilih lokasi untuk pemboran produksi dan injeksi pada aktivitas UCG. Bila mengacu pada beberapa tulisan terdahulu (Bell, dkk., 2011; Blinderman & Friedman, 2006; Bowen, 2008; Burton, dkk., 2008; da Gama, 2010; Drzewiecki, 2012), dapat disimpulkan bahwa beberapa parameter utama yang perlu diperhatikan lebih awal seperti pada Tabel 5, dan bila memperhatikan kondisi batubara Indonesia, semua parameter tersebut dapat terpenuhi. Oleh karena itu, dengan

Tabel 2. Sumber daya batubara Indonesia untuk UCG

No	Cekungan	Formasi	Jumlah Seam	Total Ketebalan (m)	Luas Sebaran Batubara Utk UCG (m ²)	Faktor Koreksi	Sumberdaya Batubara UCG (Ton)
1	Sumatera Selatan	Muara Enim	5	61,47	9.400.000.000	0,5	375.581.700.000
2	Ombilin	Ombilin	3	17,4	60.750.000	0,5	687.082.500
3	Barito	Warukin-Tanjung	7	48,55	8.100.000.000	0,5	255.615.750.000
4	Pasir/Asam2	Warukin-Tanjung	2	14,87	502.500.000	0,5	4.856.913.750
5	Kutai	Prangat	5	31,55	7.776.000.000	0,5	159.466.320.000
					25.839.250.000		796.207.766.250

Tabel 3. Sumber daya hipotetik gas bakar dari UCG

No	Cekungan	Formasi	Sumber Daya	Potensi Gas UCG	
			ton	Miliar Nm ³	Tscf
1	Sumatera Selatan	Muara Enim	375.581.700.000	1.126.745	39.791
2	Ombilin	Ombilin	687.082.500	2.061	73
3	Barito	Warukin	255.615.750.000	766.847	27.081
4	Pasir/Asam-Asam	Warukin	4.856.913.750	14.571	515
5	Kutai	Balikpapan	159.466.320.000	478.399	16.895
	TOTAL		796.207.766.250	2.388.623	84.354

Tabel 4. Perbandingan produksi gas dari gas alam, CBM dan UCG

No	Kegiatan	Gas Yang dihasilkan			
		Tscf	Btu/scf	T.Btu	MM Btu
1	Gas Alam	487	1.000	487.000	487 x 10 ⁹
2	Coal Bed Methane (CBM)	453	1.000	453.000	453 x 10 ⁹
3	Underground Coal Gasification (UCG)	84.354	150	12.653.135	12.653 x 10 ⁹
		42.177	400	16.870.846	16.871 x 10 ⁹

(Gas Bakar
: Syngas

Tabel 5. Parameter utama UCG dan kondisi di Indonesia

No.	Parameter	Kondisi Indonesia
1.	Lapisan atas dan bawah yang <i>impermeable</i>	Umumnya batuan pengapit adalah batuan klastik halus (<i>impermeable</i>)
2	Ketebalan batubara > 5 meter	Ketebalan batubara 5 – 20 meter
3.	Kedalaman lapisan batubara > 200 meter	Kedalaman lapisan batubara > 200 meter
4.	Cadangan batubara = 150 juta ton untuk produksi 155 mmscfd, selama 25 tahun	Cadangan batubara > 150 juta ton
5.	Kondisi struktur geologi tidak kompleks	Kondisi struktur geologi sederhana
6.	Kadar abu + air <60 %	Kadar abu + air <60 %
7.	Peringkat batubara < bituminus	Umumnya lignit dan subbituminus

memperhatikan kondisi tersebut, beberapa langkah teknis yang perlu diketahui sebelum melakukan operasional UCG ini adalah melakukan studi-studi yang terkait dengan sifat-sifat batubara Indonesia, sifat-sifat mekanika batuan, kondisi perlapisan dan hidrogeologi. Bila disimpulkan dari beberapa tulisan peneliti terdahulu (Burton, dkk., 2008; Cena, 1987; Creedy, 2001 & 2004) secara keseluruhan, data-data keseluruhan yang perlu dievaluasi seperti pada Tabel 6.

Bila melihat kondisi kekuatan batuan pengapit batubara Indonesia (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7 dan 8), maka hal penting yang perlu dilakukan segera adalah menilai kemampuan batuan pengapit tersebut terhadap kemungkinan kebocoran yang mengakibatkan keluar atau masuknya air tanah ke dalam reaktor. Untuk

kasus kekuatan batuan seperti pada Tabel 7 dan 8, menunjukkan bahwa batuan pengapit lemah, namun kedap air (*impermeable*).

c. Pemilihan Teknologi UCG di Indonesia

Apabila ke depan Indonesia menerapkan teknologi UCG ini, maka akan terjadi perubahan bentuk dan pemandangan yang berbeda dengan kondisi tambang saat ini, di mana teknologi akan berubah dari tambang mekanis (dengan manusia dan alat berat) menjadi pengeboran dan lokasi penambangan batubara yang banyak merubah rupa bumi, menjadi lapangan gas yang hanya membutuhkan sedikit lahan yang terbuka.

Hal ini berarti akan lebih ramah lingkungan. Teknologi untuk membuat rongga pembakaran bawah tanah telah dikembangkan dan hal yang

Tabel 6. Beberapa aspek yang perlu dievaluasi untuk UCG

<input type="checkbox"/> Peringkat batubara (BB) dan reaktivitas	<input type="checkbox"/> Data inti bor yang meliputi analisis dan foto-foto (termasuk nama kedalaman)
<input type="checkbox"/> Analisis proksimat dan ultimat	<input type="checkbox"/> Log-log geofisika (<i>Gamma Ray, Spontaneous Potential, Resistivity, Sonic, Acoustic Televiewer, Density, Neutron</i>)
<input type="checkbox"/> Kandungan gas metana BB, kapasitas penyimpanan gas, kejenuhan air/gas dan komposisi gas BB untuk setiap lapisan BB dan kedalamannya	<input type="checkbox"/> Uji tekanan formasi (<i>drill stem tests, injection fall of tests and step rate test</i>)
<input type="checkbox"/> Formasi porositas dan permeabilitas air dan gas (metana) dalam BB	<input type="checkbox"/> Informasi stratigrafi
<input type="checkbox"/> Nilai kalori (HHV – <i>as received</i>)	
<input type="checkbox"/> Pembuatan pirolisis BB (char, oil, gas, komposisi gas, nilai-nilai komponen, kurva didih minyak, <i>Fischer assay</i>)	<input type="checkbox"/> Tipe batuan, analisis kekuatan batuan (<i>Uniaxial Compressive and Triaxial Strength, Young Modulus and Poisson's Ratio, Phi, Cohesion, Friction Angle</i>), <i>moisture content, density, grain size analysis, porosity and permeability, Analysis up to ~ 30 m above the coal seam and ~ 15 m below</i>)
<input type="checkbox"/> Bahan-bahan mineral, <i>Free-Swelling Index</i> , densitas dan sifat-sifat termal	<input type="checkbox"/> Konduktivitas termal
<input type="checkbox"/> Analisis unsur-unsur dan abu BB yang meliputi Fe, CaO, MgO, Fl, Pb, V, Cl, HG, K, Na, As dan sianida, unsur-unsur jarang, bentuk-bentuk sulfur, suhu perpaduan abu	<input type="checkbox"/> Pembukaan rekahan dan tekanan penutupan batubara dan lapisan pengapit batubaranya
<input type="checkbox"/> Kekuatan batubara (<i>Uniaxial Compressive and Triaxial Strength, Young Modulus and Poisson's Ratio, Phi, Cohesion, Friction Angle</i>)	<input type="checkbox"/> <i>Logging</i> geoteknik
<input type="checkbox"/> Litologi/log-log komposit (meliputi perolehan inti bor %), log-log lumpur, log geoteknik, termasuk RQD)	<input type="checkbox"/> Kekar/sesar/arrah rekahan dan <i>sifat-sifatnya (fractured, jointed frable, etc)</i>

Tabel 7. Karakteristik batuan di salah satu lokasi di Kalimantan Timur

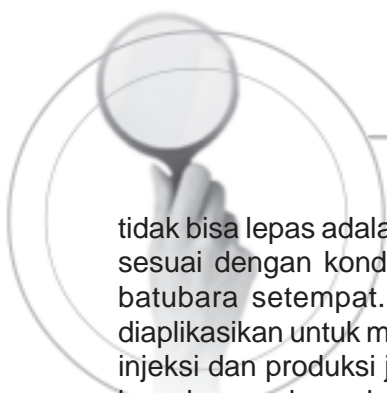
Material	Bobot Isi	Modulus Elastisitas	Poisson's Ratio	Kuat Tarik	Kohesi puncak	Sudut Gesek puncak	Kohesi residu	Sudut Gesek residu
-	MN/m ³	MPa	-	MPa	MPa	... ⁰	MPa	... ⁰
Soil	0,0165	1340	0,202	0,065	0,15	16	0,03	6,2
Claystone 1	0,0171	1882	0,246	0,098	0,22	23	0,05	7,5
Seam A NR	0,0132	2650	0,294	0,093	0,27	26	0,07	9,9
Sandstone 1	0,0174	2702	0,291	0,107	0,25	27	0,09	7,6
Seam A LMT	0,0132	2650	0,294	0,093	0,27	26	0,07	9,9
Sandstone 2	0,0176	3536	0,287	0,121	0,30	29	0,10	7,5
Seam A G2	0,0132	2650	0,294	0,093	0,27	26	0,07	9,9
Claystone 2	0,0171	1856	0,233	0,118	0,25	24	0,07	9,7
Seam A BN1	0,0132	2650	0,294	0,093	0,27	26	0,07	9,9
Claystone 3	0,0172	2049	0,234	0,099	0,26	25	0,09	8,7
Seam A BN2	0,0132	2650	0,294	0,093	0,27	26	0,07	9,9
Claystone 4	0,0172	2272	0,256	0,106	0,25	25	0,08	7,6

Tabel 8. Karakteristik batuan di salah satu lokasi di Sumatera Selatan

No	Parameter	Satuan	Minimum	Maksimum
1	Kadar air asli (w)	%	29,01	49,93
2	Bobot Isi asli (<i>Unit Weight</i>) (γ_n)	kN/m ³	16,02	19,20
3	Kuat Tekan Uniaksial (UCS) (σ_c)	MPa	0,46	3,91
4	Modulus Elastisitas (E)	MPa	139,97	1923,94
5	Poisson's Ratio (ν)	-	0,21	0,39
6	Kohesi puncak (C_p)	kPa	40,96	276,13
7	Sudut Gesek Dalam puncak (ϕ_p)	Degree	10,87	37,41
8	Kohesi residu (C_r)	kPa	5,00	140
9	Sudut Gesek Dalam residu (ϕ_r)	Degree	5,88	19,70

SIFAT FISIK DAN MEKANIK	SO	MS	SS	SL	CO
A. Batuan Utuh (<i>Intact Rock</i>)					
1. Bobot isi asli, kN/m ³	19,0	20,6	23,0	21,9	13,4
2. Modulus Ruah, MPa	460	1020	1733	1838	1240
3. Modulus Geser, MPa	331	672	847	948	744
4. <i>Cohesion</i> , MPa	0,130	0,312	0,254	0,327	0,32
5. <i>Internal friction angle</i> , derajat	12,0	27,3	37,2	35,0	36,0
6. Kuat tarik, MPa	0,035	0,2225	0,1179	0,2326	0,156
B. Bidang diskontinu batuan					
1. Kekakuan normal, MPa/m	625	1586	2227	2844	3420
2. Kekakuan geser, MPa/m	260	629	934	1066	1459
3. <i>Cohesion</i> , MPa	0,08	0,15	0,139	0,195	0,22
4. <i>Internal friction angle</i> , derajat	16,0	21,0	26,6	28,5	24,0
5. Kuat tarik, MPa	0,02	0,11	0,06	0,12	0,08

Keterangan : SO : Soil, MS: mudstone, SS: sandstone, SL: Siltstone, dan CO: Batubara



tidak bisa lepas adalah teknik pengeboran yang sesuai dengan kondisi perlapisan batuan dan batubara setempat. Selain itu metode yang diaplikasikan untuk menghubungkan dua sumur injeksi dan produksi juga tak lepas dari kondisi bawah permukaan dan rongga antara dua sumur ini akan menjadi reaktor gasifikasi. Ada tiga metode yang telah dikembangkan, yaitu udara bertekanan (*air pressurization*) yang telah berhasil diaplikasikan di Chinchilla (Australia) dan Rusia, UCG dalam tambang (*in seam UCG*) yang diaplikasikan di Cina dan pemboran berarah yang diaplikasikan Amerika dan Eropa. Pada Tabel 9, memperoleh perbandingan ketiga metode ini.

Bila membandingkan dari ketiga metode tersebut, yang tidak mungkin dilakukan di Indonesia adalah metode UCG dalam tambang,

karena hampir tidak ada yang mengembangkan UCG dalam tambang. Satu-satunya tambang batubara bawah tanah yang masih ada di Indonesia yaitu di Sawah Lunto, Sumatera Barat dan inipun karena struktur geologi yang kompleks maka UCG tidak cocok untuk dikembangkan disini, khawatir terjadi kebocoran gas ke permukaan.

Sedangkan bila menggunakan metode udara bertekanan, dikhawatirkan terjadi kebocoran reaktor akibat batuan pengapit batubara Indonesia pada umumnya lemah, namun hal ini perlu pengetahuan litologi batuan setempat. Bila ditinjau kepraktisan dalam pengembangan UCG, metode ini cukup praktis dan tidak mahal. Oleh karena jarak antar titik bor tidak boleh terlalu jauh, maka metode ini sulit bersaing secara komersial.

Tabel 9. Teknologi UCG

Udara Bertekanan	UCG Dalam Tambang	Pemboran Berarah
<p>Keuntungan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investasi awal tidak besar dan pengerjaannya lebih mudah. • Teknologi <i>proven</i> • Dapat dilakukan dengan cara <i>reverse combustion</i> maupun <i>counter current combustion</i>. • Dapat mengambil batubara yang lebih tipis (>3 dan < 5 m). <p>Kerugian:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan tekanan tinggi untuk membuat <i>fracking</i> pada lapisan batubara. • Dikhawatirkan lapisan pengapit ikut <i>terfracking</i>. • Membutuhkan lapisan pengapit yang mampu menahan tekanan tinggi. • Tidak ekonomis untuk dikembangkan secara komersial karena reaktor lebih pendek. 	<p>Keuntungan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dapat melakukan pemboran secara horizontal mengikuti lapisan batubara. • Dapat mengambil batubara yang lebih dalam • Efektif untuk batubara yang kemiringannya relatif lebih terjal. • Abu batubara lebih mudah tersimpan pada bagian dalam lapisan batubara <p>Kerugian:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sulit untuk mengendalikan keruntuhan atap batuan • Potensi bahaya lebih besar 	<p>Keuntungan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tidak membutuhkan tekanan tinggi untuk menghubungkan dua sumur bor • Panjang reaktor dapat > 200 meter, sehingga lebih efisien dalam proses pemboran dan pembakaran • Dapat dikendalikan sehingga lebih aman terhadap bahaya kebocoran. • Proses pembakaran dapat dikendalikan dengan melakukan injeksi bergerak yang lebih dikenal dengan metode CRIP (<i>Controlled Retractable Injection Procedure</i>) • Teknologi <i>proven</i> dan banyak digunakan pada sektor migas. <p>Kerugian:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investasi awal lebih mahal namun lebih efisien.

Alternatif yang cukup realistis untuk dikembangkan di Indonesia adalah menggunakan teknologi pemboran berarah (*directional drill*). Di samping kemampuan SDM Indonesia sudah banyak menguasainya, juga teknologi ini kemungkinan besar cocok untuk kondisi lapisan batuan khususnya untuk batuan pengapit batubara di Indonesia. Dengan cara ini akan lebih memungkinkan untuk mendapatkan gasifikasi yang berkelanjutan pada jarak sumur injeksi dan produksi yang > 200 m. Untuk skala komersial, metode ini lebih dapat mengefisienkan proses gasifikasi, sehingga batubara persatuan luas lebih banyak termanfaatkan. Saat ini dikembangkan metode gasifikasi yang dapat mengendalikan proses pembakaran dengan melakukan injeksi bergerak menggunakan *coil tubing unit* (CTU). Metode ini lebih dikenal dengan CRIP (*Controlled Retractable Injection Procedure*). Secara komersial diperkirakan metode ini akan berkembang pesat.

d. Peralatan Pendukung UCG

Sebagaimana halnya lapangan gas alam atau CBM, beberapa hal yang dibutuhkan untuk UCG, antara lain peralatan hulu (*upstream equipment*) antara lain kompresor udara dan nitrogen, pompa air bertekanan tinggi dan unit pemboran; peralatan gasifikasi antara lain peralatan pencampur udara dan uap (*air & steam mixing vessel*), *seamless steel tubes and valves* dan penyala api; dan peralatan hilir (*downstream equipment*) antara lain *dust cyclones*, pendingin gas, *scrubbers* dan *electrode-tarring*.

8. KESIMPULAN

Permasalahan kelangkaan energi di masa mendatang perlu diantisipasi lebih dini dengan mencari alternatif yang paling memungkinkan. Salah satunya adalah dengan mengoptimalkan pemanfaatan batubara peringkat rendah yang sumber dayanya sangat berlimpah. Namun untuk mempertimbangkan pemanfaatan batubara ini perlu diperhatikan aspek lingkungan

dan alternatif yang paling memungkinkan adalah dengan metode non konvensional menggunakan UCG. Bila dibandingkan dengan sumber gas lain, baik gas alam maupun CBM, potensi gas hasil UCG ini jauh lebih besar. Secara teoritis bisa mencapai 35 kali dari gas alam maupun CBM.

Perlu kehati-hatian untuk memilih teknologi UCG yang cocok dengan kondisi litologi batuan dan lapisan batubara Indonesia. Beberapa kasus yang terjadi di dunia menunjukkan bahwa penelitian yang detail sangat diperlukan agar permasalahan penurunan permukaan tanah (*surface subsidence*), kebocoran reaktor gasifikasi yang berakibat terkontaminasinya air tanah, serta permasalahan lingkungan lainnya tidak terjadi. Secara teknis metode pemboran berarah menjadi alternatif yang sangat mungkin untuk dikembangkan, namun perlu peningkatan kemampuan penguasaan teknologi ini untuk sumberdaya manusia Indonesia.

Aplikasi teknologi yang berkaitan dengan ilmu kebumihannya umumnya bersifat *site specific*, oleh karena itu teknologi UCG yang akan diterapkan di Indonesia harus terlebih dahulu dikuasai oleh bangsa Indonesia sendiri agar tidak dikendalikan oleh bangsa lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak Kepala dan Sekretaris Balitbang ESDM yang sudah memberikan kesempatan kepada para penulis untuk melakukan penelitian UCG ini. Selain itu kami ucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Bukin Daulay, MSc., Dra Retno Damayanti, Dipl. EST, Dr. Ir. Binarko Santoso, M.Sc. dan Dr. Miftahul Huda, yang telah banyak memberikan masukan sehingga tersusunnya tulisan ini. Tak lupa juga kepada teman-teman kelompok penelitian, Ir. Edwin Daranin, M.Sc, Ir. Nendaryono M. MT, Ir. Suhendar, Asep Bachtiar, ST. MT, Zulkifli Pulungan, ST serta beberapa rekan lainnya yang telah membantu penulisan ini hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- Advanced Resources International, Inc - ARI, 2003
- Badan Geologi, 2012, *Neraca Energi Fossil Tahun 2011*, Kementerian ESDM.
- Bell, David A., Brian F. Towler and Maohong Fan. 2011, *Coal Gasification and Its Applications*, Elsevier, Burlington, MA.
- Blinderman, M.S., and Jones, R.M., 2002, *The Chinchilla IGCC Project to Date: UCG and Environment, 2002 Gasification Technologies Conference*, San Francisco, USA, October 27-30, 2002. Blinderman, M.S., 2003.
- Blinderman, M.S., and Jones, R.M., 2002, *The Chinchilla IGCC Project to Date: UCG and Environment, 2002 Gasification Technologies Conference*, San Francisco, USA, October 27-30, 2002. Blinderman, M.S., 2003a,
- Blinderman, M.S. and Friedmann, S.J., 2006, *Underground Coal Gasification and Carbon Capture and Storage: Technologies and Synergies for Low-Cost, Low-Carbon Syngas and Secure Storage*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. UCRL-ABS- 218560.
- Bowen, Brian H. 2008, *A Review & Future of UCG, Underground Coal Gasification, Indiana Center for Coal Technology Research*, Energy Center at Discovery Park, Purdue University, Purdue Calumet, Hammond, IN.
- Burton, E.A., Upadhye, R., Friedmann, S.J., Leif, R., McNab, W., Knauss, K., Ezzedine, S., Smith, J.R., 2004, *Assessment of UCG Site Locations*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. Internal report.
- Burton, E., J. Friedmann and A. Upadhye, 2008, *Best Practices in Underground Coal Gasification (draft)*. Lawrence Livermore National Laboratory, U.S. Department of Energy Contract W-7405-7448.
- Carlos Dinis da Gama, Vidal Navaro Torres, Ana Paula Falco Nevesk, 2010, *Technological Innovations on Underground Coal Gasification and CO₂ Sequestration*, Universidad Nacional de Colombia, Dyna, vol. 77, núm. 161, marzo, 2010, pp. 101-108
- Creedy, D. P., et al., 2001, *Review of Underground Coal Gasification Technological Advancements*, DTI Report No. COAL R211, DTI/Pub URN 01/1041, August 2001.
- Creedy, D. P., and K. Garner, 2004, *Clean Energy from Underground Coal Gasification in China*, DTI Cleaner Coal Technology Transfer Programme, Report No. COAL R250 DTI/Pub URN 03/1611, February 2004.
- Drzewiecki, J., 2012, *The Basic Technological Conditions of Underground Coal Gasification (UCG)*, AGH Journal of Mining and Geoengineering Vol. 36 o No. 1, Central Mining Institute, Department of Rockburst and Rock Mechanics, Katowice.
- Friedmann, S.J., 2005, *Underground Coal Gasification in the USA and Abroad*, Congressional Hearing on Climate Change, November 14 in the Senate Foreign Relations Committee.
- Friedmann, J.S., E. Burton, and R. Upadhye. 2006, *LLNL Capabilities in Underground Coal Gasification*, Lawrence Livermore National Laboratory.
- GasTech, Inc. 2007, *Viability of Underground Coal Gasification in the "Deep Coals" of the Powder River Basin, Wyoming*. Prepared for the Wyoming Business Council. <http://www.wyomingbusiness.org/program/ucg-viability-analysis-powder-river-/1169> accessed September 19, 2011.
- Gourdon, C.R, 2009, *Underground Coal Gasification*, IEA clean coal center
- Hattingh, L. 2008, *Underground Coal Gasification*, SASOL Mining (Pty) Ltd.
- Hossein Nourozieh and Mohammad Kariznovi, 2010, *Simulation Study of Underground Coal Gasification in Alberta Reservoirs: Geological Structure and Process Modeling*, *Energy Fuels*, 24 (6), pp 3540-3550

- KESDM, 2012, *Blue Print Pengelolaan Energi Nasional*.
- Liu S, Wanga Y, Yua YL and Oakey J, 2006, Volatilization of Mercury, Arsenic and Selenium During Underground Coal Gasification. *Fuel* 85:10-11(July August), p. 1550 - 1558.
- Navarro Torres, V F, Dinis da Gama C, Costa e Silva M, Neves PF., Qiang X., 2011. Comparative Stability Analyses of Traditional and Selective Room-and-Pillar, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. v.18, p.1 - 8.
- Navarro Torres, Atkins, AS., Singh, R.N., 2014, University of Wollongong.
- Perkins, G., 2005, Numerical Modelling of Underground Coal Gasification and Its Application to Australian Coal Seam Conditions. <http://www.ac3.edu.au/edu/papers/perkinsg01.pdf>
- Perkins, G and Sahajwalla, V. 2005 A mathematical model for the chemical reaction of a semi-infinite block of coal in underground coal gasification, *Energy & Fuels*, 19, pp. 1679-92.
- Ren T X, Whittles D and Reddish DJ, 2003. Coupled Geotechnical and Thermal Modelling for the Prediction of UCG Cavity Growth. *International Workshop on UCG, London*, October 1-2, 2003.
- Shu-qin, L., Jun-hua, Y., 2002, Environmental Benefits of Underground Coal Gasification, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 12, no. 2, pp.284-288.
- Sinha, N. 2007, *Status Report on Underground Coal Gasification*, Office of The Principal Scientific Adviser, Government of India.
- Stratus Consulting Inc., 2010, *Potential Environmental Impacts of the Proposed CIRC Underground Coal Gasification Project*, Western Cook Inlet, Alaska. Washington, US, p. 39.
- Sury M, White M, Kirton J, Carr P and Woodbridge R, 2004, *Report No. COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880*, 2004. Review of Environmental Issues of Underground Coal Gasification, University of Liège Belgium: 126.
- Shuqin Liu, Li Jing-gang, Mei Mei and Dong Dong-lin, 2007, Groundwater Pollution from Underground Coal Gasification, *Journal of China University of Mining & Technology* Vol 17 Issue 4 pgs 467-472.
- Shuqin Liu, Yongtao Wang, Li Yu and John Oakey. 2006, Volatilization of Mercury, Arsenic and Selenium during Underground Coal Gasification. *Fuel* Vol 85 pgs 1550-1558.
- Solcova, Olga, Karel Soukup, Jan Rogut, Krzysztof Stanczyk and Petr Schneider, 2009, Gas Transport through Porous Strata from Underground Reaction Source; the Influence of the Gas Kind, Temperature and Transport-Pore Size. *Fuel Processing Technology* Vol 90 Issue 12 pgs 1495-1501.
- UK-China Technology Transfer, 2009, *Development of UCG for Power Generation*, Contract
- Van der Riet, Mark. 2008. Underground Coal Gasification, *Proceedings of the South African Institute of Electrical Engineers Generation Conference*, February 19, 2008. Midrand South Africa.
- Younger, P.L. and Sapsford, D.J. 2004. *Evaluating the Potential Impact of Opencast Coal Mining on Water Quality (Groundwater Regulations 1998)*. An assessment framework for Scotland. Manual prepared for the Scottish Environment Protection Agency (SEPA). Newcastle University / NuWater Ltd, Newcastle Upon Tyne, UK. 75pp.
- Younger, P.L., and Gonzalez G., 2010, The Groundwater Hydrology of Underground Coal Gasification Coupled to Carbon Capture and Storage, *BHS Third International Symposium*, Managing Consequences of a Changing Global Environment, Newcastle.