

**SISTEM PANAS BUMI TEMPERATUR RENDAH-SEDANG PADA CEKUNGAN KUTAI
DAN REKOMENDASI PEMANFAATANNYA****LOW-MEDIUM GEOTHERMAL SYSTEM IN KUTAI BASIN AND ITS UTILIZATION****Andri Eko Ari Wibowo, Mochamad Nur Hadi, dan Dikdik Risdianto**

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

andri.wibowo@esdm.go.id

ABSTRAK

Pengembangan panas bumi di Indonesia masih didominasi pada sistem panas bumi vulkanik yang digunakan sebagai pemanfaatan tidak langsung (listrik), padahal sekitar 70% dari 357 lokasi panas bumi di Indonesia berasosiasi dengan sistem non vulkanik. Keterbatasan informasi bawah permukaan berupa data sumur dan fluida reservoir serta nilai keekonomian yang rendah, menyebabkan kurang berkembangnya pemanfaatan energi panas bumi di sistem non vulkanik. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang karakteristik kimia air panas seperti tipe, asal-usul, dan temperatur fluida di Kalimantan, khususnya Cekungan Kutai Timur, serta memberikan rekomendasi pemanfaatannya.

Terdapat lima manifestasi berupa air panas dengan temperatur mulai dari 42 s.d. 55°C, pH netral, bertipe bikarbonat, dan terletak pada zona *immature water*. Karakteristik fluida di daerah panas bumi ini berkorelasi dengan litologi daerah penyelidikan yang didominasi oleh batuan sedimen. Hasil plotting nilai isotop O¹⁸ dan D menunjukkan sumber fluida panas bumi berasal dari air meteorik. Air permukaan meresap ke bawah permukaan dan akan terpanaskan oleh batuan panas yang diperkirakan timbul akibat adanya pembebanan dalam waktu yang sangat lama (*geopressured*), yang kemudian membentuk fluida reservoir. Temperatur reservoir diperkirakan sebesar 70 s.d. 170°C, dengan pembentukan sistem panas buminya dipengaruhi oleh lingkungan sedimen dengan umur yang relatif sudah tua (*old hydrothermal system*).

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai memiliki reservoir dengan temperatur sedang-rendah, oleh karena itu pemanfaatannya lebih sesuai digunakan untuk pemanfaatan langsung. Rekomendasi pemanfaatan langsung seperti untuk akuakultur, agro industri, pariwisata, dan balneoterapi dapat diaplikasikan pada semua sistem panas bumi di Cekungan Kutai. Pada sistem panas bumi di daerah Santan Tengah, Samboja, dan Tamapole-Dondang sangat memungkinkan dimanfaatkan untuk balneoterapi terhadap penyakit peradangan tulang karena memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi (>500 ppm). Ada peluang untuk pemanfaatan tidak langsung menjadi energi listrik menggunakan siklus biner, pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang (170°C) dan Samboja (150°C).

Kata kunci: panas bumi, temperatur rendah-sedang, pemanfaatan langsung, Cekungan Kutai Timur, Kalimantan

ABSTRACT

Geothermal development in Indonesia still dominated in volcanic geothermal system which is used as indirect use utilization (electricity), whereas about 70% of 357 geothermal location in Indonesian associate with non-volcanic geothermal system. Lack of subsurface information such as well data and reservoir temperature as well as low economic value that cause geothermal utilization in non-volcanic systems are less develop. Therefore, the purpose of this research is to provide the information of geothermal fluid characteristic such as type, origin,

and fluid temperature in Kalimantan, especially in East Kutai Basin and also the recommendation of its utilization.

There are five hot spring manifestations with a temperature of 42 to 55 °C, neutral pH, bicarbonate type, and located in the immature water zone. This fluid characteristics correlate with the lithology of the area which is dominated by sedimentary rocks. The results of the O¹⁸ and D isotopes indicate that the source of the geothermal fluid comes from meteoric water. Meteoric water flows to subsurface and heated by hot rock from geopressed process, which then forms reservoir fluid. This old hydrothermal system has reservoir temperature is about 70 to 170°C with the formation of its geothermal system is affected by the sedimentary environment.

The geothermal system in the Kutai Basin has a reservoir with medium-low temperatures, therefore its utilization is more suitable for direct utilization. Recommendation of geothermal direct use such as aquaculture, agro industry, tourism, and balneotherapy can be applied on all geothermal system in Kutai Basin. Santan Tengah, Samboja and Tamapole-Dondang are possible for balneotherapy to heal bone-ache due to high bicarbonate concentration (>500 ppm). There also an opportunity to develop indirect use for electricity by using binary cycle technology in Tamapole-Dondang (170 °C) and Samboja (150 °C).

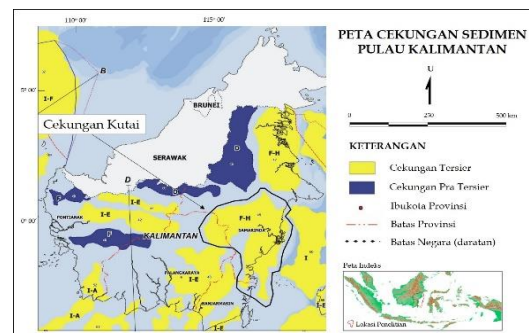
Keywords: geothermal, low-medium temperature, direct use, East Kutai Basin, Kalimantan

PENDAHULUAN

Sistem panas bumi umumnya diasosiasikan dengan gunung api atau busur vulkanik (*volcanic arc*). Semua sistem panas bumi di Indonesia yang sudah dikembangkan menjadi listrik berada di jalur busur vulkanik. Dari 357 lokasi panas bumi yang sudah diidentifikasi oleh Badan Geologi sampai dengan tahun 2020, sekitar 30% berkaitan dengan sistem vulkanik, yang umumnya bertemperatur tinggi. Sisanya sekitar 70% tersebar di Pulau Sulawesi, Kalimantan, dan Papua, yang umumnya merupakan sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang. Beberapa sistem panas bumi diantaranya terletak pada cekungan sedimen seperti di Kalimantan dan Papua. Penelitian ini difokuskan pada beberapa lokasi panas bumi yang sudah diidentifikasi pada Cekungan Kutai di Kalimantan bagian Timur yaitu di Kabupaten Kutai Kartanegara (Gambar 1).

Pengembangan sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang belum banyak diupayakan. Hal ini dikarenakan keterbatasan informasi geosain seperti karakteristik fluida, kedalaman reservoir,

temperatur reservoir, dan model sistem panas bumi serta nilai keekonomian yang kurang menarik. Karakteristik sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang berbeda dengan sistem panas bumi bertemperatur tinggi di lingkungan vulkanik sehingga konsep eksplorasi yang dilakukan juga berbeda. Pada sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang umumnya mempunyai temperatur reservoir 100-200°C, sehingga sistem pembangkitan listrik yang digunakan juga masih terbatas pada *binary cycle*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi non vulkanik di Cekungan Kutai berdasarkan data manifestasi permukaan serta rekomendasi pemanfaatannya.



Gambar 1. Peta lokasi Cekungan Kutai (Modifikasi dari Badan Geologi, 2009)

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berupa pengamatan di lapangan, pengambilan conto, analisis laboratorium dan interpretasi data. Pengamatan yang dilakukan di lapangan meliputi pengamatan karakteristik fisik manifestasi panas bumi seperti temperatur, pH, debit air dan daya hantar listrik. Pengambilan conto fluida berupa pengambilan conto air panas untuk selanjutnya dilakukan analisis geokimia air seperti anion, kation dan isotop di laboratorium. Pengambilan conto fluida dilakukan oleh penulis pada tahun 2018. Data cekungan geologi meliputi formasi dan struktur geologi yang digunakan merupakan data sekunder yang diambil dari beberapa literatur.

Metode analisis yang digunakan terhadap 15 unsur-unsur terlarut meliputi anion utama Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , kation seperti Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Li^+ dan beberapa senyawa netral SiO_2 , NH_3 , F, B, secara berurutan menggunakan ion kromatografi, *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dan spektrometri. Untuk mengetahui kandungan isotop stabil Deuterium dan Oksigen 18 menggunakan *Mass Spectrometer* (MS). Data hasil analisis laboratorium kemudian diinterpretasi sehingga karakteristik fluida yang terdapat di daerah penelitian dapat diketahui yang selanjutnya digunakan untuk pembahasan sistem panas bumi dan rekomendasi pemanfaatannya.

TINJAUAN GEOSAIN

Berdasarkan Saemundsson dkk (2011), sistem panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan temperatur reservoir (temperatur tinggi, sedang, dan rendah), entalpi (entalpi tinggi dan rendah), keadaan fisik fluida (dominasi air, 2 fasa, dan dominasi uap), dan kondisi geologi. Sistem panas bumi dapat juga diklasifikasikan berdasarkan kondisi geologi yaitu (Saemundsson dkk, 2011) :

1. *Volcanic geothermal system*, sistem ini berasosiasi dengan aktivitas vulkanisme yang masih aktif maupun vulkanisme yang tidak aktif namun masih memiliki sisa panas. Sumber panas sistem panas bumi ini berupa intrusi atau magma.
2. *Convective fracture controlled system*, sumber panasnya berupa batuan panas di kedalaman pada area dengan aktifitas tektonik yang masih aktif, dengan gradient termal di atas rata-rata ($> 30^\circ\text{C}/\text{km}$).
3. *Sedimentary geothermal system*, ditemukan di hampir semua cekungan sedimen. Sistem ini memiliki lapisan sedimen yang permeabel di kedalaman ($>1 \text{ km}$) dan gradien termal di atas rata-rata ($>30^\circ\text{C}/\text{km}$). Transfer panas pada sistem ini lebih cenderung konduktif dibandingkan konvektif, walaupun di beberapa sistem panas bumi aktifitas sesar yang lebih dominan.
4. *Geopressured geothermal system*, sistem ini mirip dengan terbentuknya reservoir pada minyak dan gas dimana fluida terperangkap di kedalaman dengan tekanan yang mendekati nilai tekanan litostatik.
5. *Hot Dry Rock* (HDR), sistem ini memiliki batuan panas dari gradien termal normal dan terletak pada kedalaman yang dalam. Nilai permeabilitasnya juga umumnya rendah dan belum bisa optimal dieksploitasi dengan metode konvensional.
6. *Shallow resources*, sistem ini mengacu pada aliran panas normal melalui formasi dekat permukaan dan energi panas yang tersimpan di bebatuan serta sistem air tanah hangat di dekat permukaan kerak bumi.

Geologi Cekungan Kutai

Cekungan Kutai berada di Kalimantan bagian Timur, merupakan Cekungan Sedimen Tersier terbesar (165.000 km) dan terdalam (12.000 s.d. 14.000 meter) di Indonesia (Gambar 1). Batas cekungan : di bagian utara tinggian Mangkalihat; di selatan *basin hinges* pada Adang – *Flexure*

(*Adang-Paternoster Fault*); di barat tinggian Kuching – bagian dari Kalimantan *Central Range*; di bagian timur Selat Makassar (Zajuli dkk., 2015).

Cekungan Kutai mengalami subsiden pada Paleosen Akhir – Eosen Tengah hingga Oligosen, akibat *basement rifting*, dan menjadi tempat pengendapan Mangkupa *Shale* lingkungan marginal hingga *open marine*. Terdapat silisiklastik kasar, *Beriu Sands*, dalam sekuen lempung indikasi interupsi oleh pengangkatan. Subsiden berlanjut membentuk mekanisme Basin Sagging, menghasilkan endapan lempung Formasi Atan dan karbonat Formasi Kedango (Satyana dkk., 1999).

Stratigrafi Cekungan Kutai dari yang tua muda sesuai Peta Geologi Lembar Balikpapan (Hidayat dan Umar, 1994) terdiri dari:

- a. Formasi Pemaluan, terdiri batupasir, serpih, perselingan batulanau dan batupasir halus, batubara, serpih, *shaly coal*, *coaly shale*.
- b. Formasi Pulaubalang meliputi batupasir, serpih, batugamping, *coaly shale*.
- c. Formasi Balikpapan tersusun oleh serpih, batupasir, batulempung dan batubara
- d. Formasi Kampung baru terdiri dari batupasir, batubara, serpih, dan batulempung.

Struktur geologi yang umum dijumpai di Cekungan Kutai adalah struktur lipatan dan sesar yang berarah timurlaut - baratdaya, dimana inti antiklin didominasi oleh unit litologi batulempung. Kekar dapat berupa *Shear Joint*, *Extensional Joint*, dan *Hybrid Joint* dengan kondisi bukaan bisa terbuka atau tertutup oleh *fracture filling* mineral (Zajuli dkk., 2015).

Manifestasi Panas Bumi

Terdapat lima pemunculan manifestasi berupa air panas, yaitu air panas Santan Tengah, air panas Samboja, air panas Dondang, air panas Tamapole, dan air panas Sanga-sanga (Gambar 2).

Karakteristik fisik dari kelima manifestasi tersebut ditampilkan pada tabel 1.

Air panas Santan Tengah, terletak di Desa Santan Tengah, Kecamatan Marangkayu. Air panas berada di wilayah usaha pertambangan minyak milik PT VICO yang keluar dari bekas sumur bor minyak PT. VICO. Berdasarkan informasi masyarakat, pengeboran dilakukan pada tahun 1974 dengan kedalaman akhir 3.000 *feet* atau sekitar 1.000 meter. Temperatur air panas terukur sebesar 44,8°C dengan temperatur udara 30,4°C, pH 6,2, dan daya hantar listrik (DHL) 1.036 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Air panas berwarna jernih, rasa tawar, dengan debit total sebesar 2 lt/dtk.

Air panas Samboja, berada di desa Sungai Merdeka, Kecamatan Samboja. Air panas Samboja muncul di kawasan Taman Nasional Bukit Bangkirai yang merupakan daerah konservasi orang utan. Air panas Samboja muncul dari rekahan bidang Sesar berarah N 310 E/65 dan rekahan patahan sekunder berarah N 240 E. Temperatur air panas di patahan utama sebesar 47,12°C dan di patahan sekunder 47,11°C, dengan temperatur udara 28,84°C. Air panas berwarna jernih, rasa tawar, dengan pH 6,38, daya hantar listrik (DHL) 1.656 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan debit 0,5 lt/dtk.

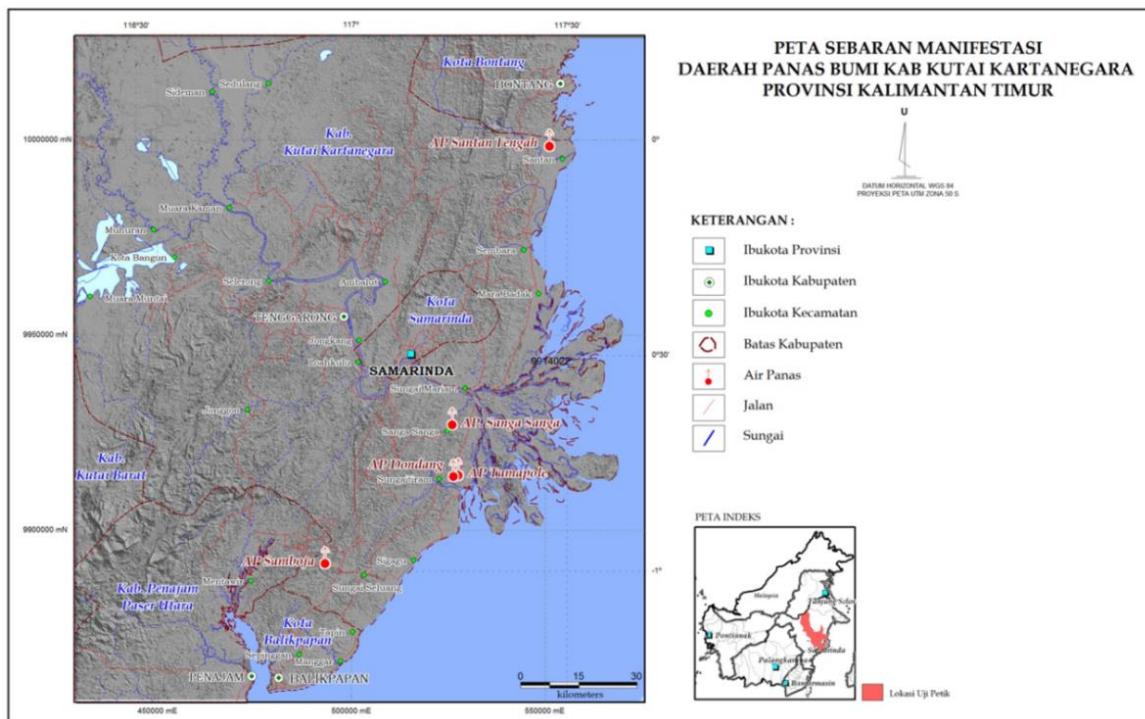
Air panas Dondang, berada di desa Dondang, Kecamatan Muara Jawa, yang muncul melalui celah batuan dan ditampung dalam bak penampungan yang telah dikelola penduduk sekitarnya dengan debit relatif kecil sekitar 0,20 l/detik dan luas manifestasi sekitar 2x3 m². Karakteristik fisik air panas menunjukkan temperatur air sebesar 55,8°C, dengan temperatur udara 36,1°C, pH 8,42, daya hantar listrik 3.520 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ditemukan adanya endapan oksida besi warna kecoklatan dengan kondisi air panas kurang jernih.

Air panas Tamapole, terletak di desa Tamapole, Kecamatan Muara Jawa. Air panas tersebut berada \pm 1 km sebelah timur dari air panas Dondang, yang

menurut informasi masih terdapat banyak pemunculan-pemunculan air panas lainnya di sekitar air panas Tamapole. Lokasi air panas terletak di pinggir jalan desa yang berada di areal persawahan dengan kondisi lahan yang bergambut. Temperatur air panas terukur sebesar 38 s.d. 44,98°C dengan temperatur udara 23,35°C, pH 7,14, dan daya hantar listrik (DHL) 541 $\mu\text{s/cm}$. Air panas berwarna keruh dan berasa tawar.

Air panas Sanga-sanga, terletak di desa Sanga-sanga, Kecamatan Sanga-sanga, yang lokasi pemunculannya berada di pinggir jalan raya. Air panas keluar dari

bekas sumur pemboran minyak yang kedalaman sumurnya belum diketahui. Kondisi pemunculan air panas Sanga-sanga mirip dengan air panas Santan Tengah, dimana air panas keluar ke permukaan akibat aktivitas pemboran minyak. Namun kondisi air panas Sanga-sanga terkontaminasi oleh karat dari pipa air sehingga ditemukan bau besi yang cukup kuat dan air panas yang keruh. Temperatur air panas terukur sebesar 42,47°C dengan temperatur udara 28°C, pH 7,59, dan DHL 212 $\mu\text{s/cm}$. Air panas berwarna keruh, rasa tawar, dan berbau besi.



Gambar 2. Lokasi manifestasi panas bumi

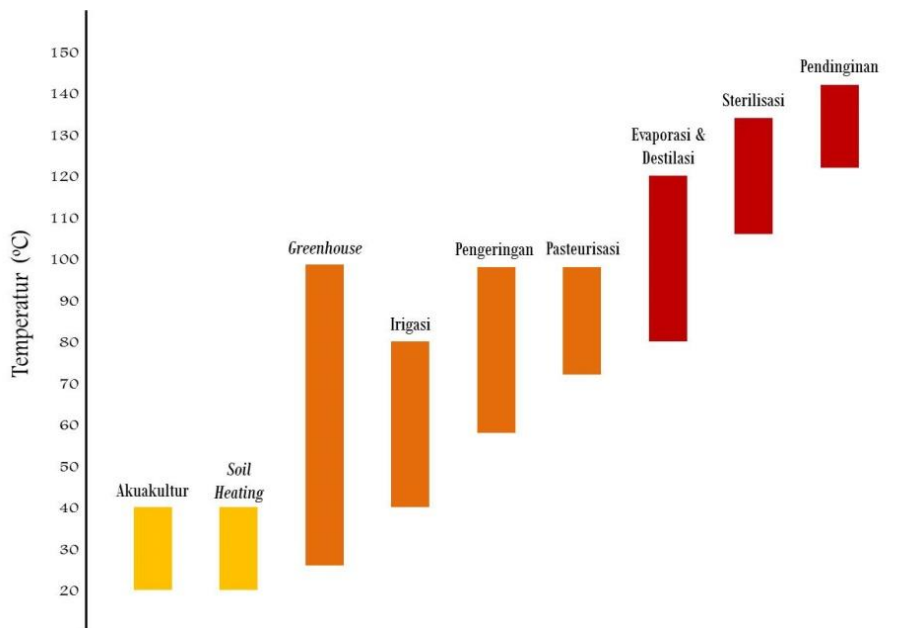
Tabel 1. Karakteristik fisik manifestasi air panas

NO	MANIFESTASI PANAS BUMI	KOORDINAT (UTM)		Z (mdpl)	SUHU AIR (°C)	DEBIT (lt/dtk)	pH	DHL ($\mu\text{S/cm}$)
		(mT)	(mU)					
1	Air Panas Santan Tengah	551270	9998588	38	44,8	2	6,2	1.036
2	Air Panas Samboja	493364	9891728	30	47,12	0,1	6,38	1.656
3	Air Panas Dondang	526425	9914022	12	55,8	0,2	8,24	3.520
4	Air Panas Tamapole	527627	9914350	20	44,98	-	7,14	541
5	Air Panas Sanga-sanga	526146	9927269	3	42,47	-	7,59	212

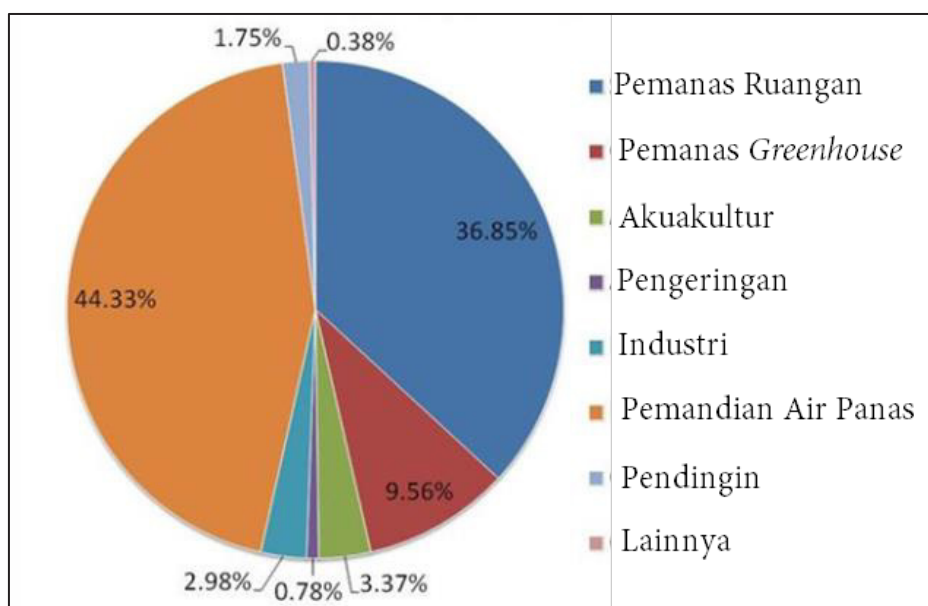
Pemanfaatan Energi Panas Bumi

Secara umum, pemanfaatan energi panas bumi dapat dilihat pada Gambar 3, yaitu pemanfaatan langsung (*direct use*) untuk sektor pariwisata, pertanian, ataupun industri dan pemanfaatan tidak langsung (*indirect use*) menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung di dunia sudah lama berkembang sejak dahulu. Pemanfaatannya digunakan untuk pemandian air panas, pemanas

ruangan, *green house*, pengeringan, dan lain-lain (Gambar 4). Di Indonesia, pemanfaatan langsung energi panas bumi mulai banyak dikembangkan seperti pemanfaatan untuk sektor wisata seperti pemandian air panas dan balneoterapi (terapi air panas) maupun pemanfaatan untuk sektor pertanian seperti pengeringan kopra, teh, coklat, pasteurisasi, dan perikanan.



Gambar 3. Pemanfaatan langsung Panas Bumi di sektor agro industri (modifikasi dari IRENA, 2019)



Gambar 4. Diagram pemanfaatan langsung Panas Bumi di dunia (Lund & Boyd, 2015)

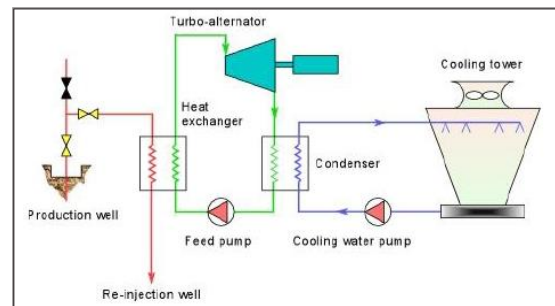
Pemanfaatan Tidak Langsung

Secara ekonomis, fluida panas bumi bertemperatur tinggi (> 225 °C) merupakan fluida panas yang ideal untuk digunakan dalam pembangkit listrik panas bumi dengan sistem pembangkitan konvensional. Namun dengan berkembangnya teknologi, fluida dengan temperatur rendah-sedang dapat pula dimanfaatkan menjadi energi listrik yaitu dengan *binary cycle* (siklus biner). Nilai ekonomis yang semakin baik, pemanfaatan sisa panas, serta terbatasnya sumber energi lain merupakan alasan penggunaan siklus biner ini. Aplikasi siklus biner dapat digunakan baik pada sumur-sumur panas bumi temperatur rendah-sedang, maupun dengan memanfaatkan air brine sisa pembangkit konvensional yang masih mempunyai panas yang tinggi. Pada prinsipnya, proses termodinamika pada siklus biner hampir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Fluida kerja menerima panas dari fluida panas bumi melalui *heat exchanger*, lalu dilepaskan untuk memutar turbin yang kemudian akan menghasilkan listrik dari generator (Vaccaro, 2013). Teknologi yang banyak digunakan pada siklus biner saat ini adalah dengan siklus Kalina (*Kalina Cycle*) dan *Organic Rankine Cycle* (ORC). Perbedaan kedua teknologi ini adalah dalam penggunaan fluida kerja yang berbeda dimana Siklus Kalina menggunakan campuran air dan ammonia sedangkan ORC menggunakan fluida organik seperti iso-butana dan iso-pentana.

Siklus Kalina menggunakan fluida kerja berupa campuran ammonia dan air (Kalina dkk., 1995). Ammonia dan air mempunyai berat molekul yang mirip (ammonia 17 kg/mol, air 18 kg/mol), mudah larut dan mudah juga dipisahkan. Keduanya mempunyai titik didih yang berbeda, ammonia mendidih di -33 °C dan air di 100 °C (Yanagisawa dkk., 2012). Titik didih campuran ammonia dan air bervariasi tergantung rasio campurannya. Hal tersebut membuat siklus ini sangat cocok digunakan, bahkan pada sistem temperatur rendah sekalipun, karena memiliki kisaran

temperatur mendidih yang besar (Renz dan Engelhard, 2006).

Pada alur proses siklus Kalina (Gambar 5), fluida kerja berupa campuran ammonia dan air, dipanasi oleh fluida panas bumi melalui mesin penukar kalor atau *heat exchanger*. Fluida sekunder akan menguap dan mengalir ke turbin, setelah dimanfaatkan akan dikondensasikan sebelum dipanaskan kembali oleh fluida panas bumi. Fluida panas bumi tidak dimanfaatkan langsung melainkan hanya panasnya saja yang diekstraksi, sementara fluidanya sendiri diinjeksikan kembali ke dalam reservoir (Gazo dan Lind, 2010).



Gambar 5. Skema diagram dari siklus Kalina (Kopunicova, 2009)

Temperatur dan laju alir fluida merupakan komponen penting dalam siklus Kalina. Minimum temperatur fluida yang dapat digunakan pada siklus Kalina diperkirakan sebesar 53°C. Namun untuk mendapatkan konversi panas yang efektif, minimum temperatur fluida adalah sebesar 80°C (Yanagisawa dkk., 2012). Berdasarkan hasil studi kelayakan untuk pembangkit listrik dengan siklus biner yang disusun oleh Kopunicova (2009), temperatur optimum *inlet* sebesar 126,4°C dengan laju alir 171 kg/s.

Rasio campuran air dan ammonia juga sangat penting untuk efisiensi termodinamika dan lingkungan (Mirolli dkk., 2002). Kalina dkk (1995) mengatakan rasio komposisi air dan ammonia untuk siklus Kalina sebesar 80 hingga 90 % berat ammonia. Pada aplikasinya, rasio campuran air dan ammonia bervariasi tergantung temperatur *inlet* yang

digunakan, yaitu 82 % berat ammonia pada temperatur *inlet* 121°C (Mirolli dkk., 2002) dan 83,15 % berat ammonia pada temperatur *inlet* 180°C (Kalina dkk., 1995).

Pembangkit listrik panas bumi (PLTP) pertama yang menggunakan siklus Kalina adalah Husavik yang berada di bagian utara Islandia. PLTP ini mampu membangkitkan listrik sebesar 1.700 kW sejak tahun 2000. PLTP dengan siklus Kalina kedua yang berproduksi adalah Unterhaching, Munchen dengan kapasitas 3.300 kW yang beroperasi sejak tahun 2007 dengan temperatur fluida 120°C dari batuan sedimen molase pada kedalaman 3,4 km (Yanagisawa dkk., 2012).

Organic Rankine Cycle (ORC) menggunakan fluida organik sebagai fluida kerjanya seperti iso-butana, iso-pentana, n-pentana, Toluena, R134a, R123, R125, atau R600 (Darvis dkk, 2015). Titik didid senyawa organik pada fluida kerja bervariasi, dari -146.9°C (nitrogen) hingga 197.96°C (R-11), sehingga fluida panas yang dapat digunakan pada ORC pun bervariasi dari 80 hingga 300°C (Hromadka dan Martinek, 2017). Beberapa keunggulan ORC ini antara lain kemampuan untuk mengekstrak energi pada temperatur rendah, efisiensi siklus dan isentropik turbin yang tinggi, desain turbin yang sederhana, mudah dalam pengoperasian, dan daya tahan yang tinggi. Namun diantara banyak kelebihan tersebut, ada kekurangan pada ORC yaitu beberapa senyawa organik mempunyai sifat beracun dan mudah terbakar (Hromadka dan Martinek, 2017).

Pemilihan fluida kerja merupakan faktor penting untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi di ORC. Berdasarkan analisis Darvish dkk (2015), ORC dengan menggunakan fluida kerja iso-butana dan R134a mempunyai efisiensi energi tertinggi dengan fluida panas sebesar 120°C. Sedangkan Karimi dkk (2015) menyebutkan pada temperatur 80-100°C, ORC dengan fluida kerja R125 mempunyai nilai keekonomian yang tinggi dan efek lingkungan yang kecil.

Beberapa pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) telah menggunakan siklus biner, baik menggunakan Siklus Kalina maupun ORC. Tabel 2 menunjukkan beberapa PLTP yang sudah beroperasi menggunakan siklus biner.

Pemanfaatan Langsung

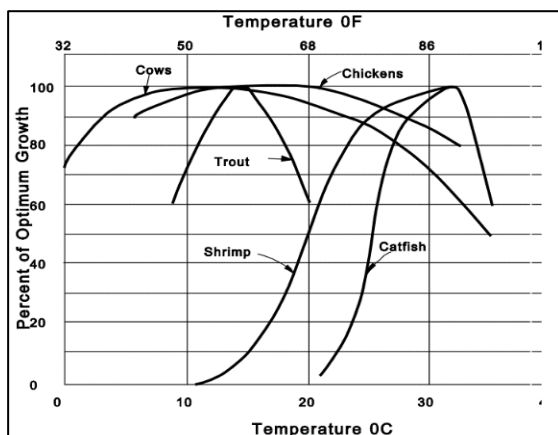
Akuakultur

Air panas bumi dapat digunakan untuk pemanfaatan budidaya perikanan pada kisaran temperatur 20 s.d. 40°C. Prinsip dari penggunaan air panas bumi adalah mengontrol konsistensi temperatur air kolam untuk perkebang-biakan komoditas perikanan, agar dapat meningkatkan ketahanan hidup dan mempercepat perkebang-biakan. Hal tersebut sulit tercapai apabila dengan temperatur air/kolam yang tidak konsisten. Air panas tersebut digunakan untuk memanaskan air kolam melalui *heat exchanger* untuk mencapai temperatur yang diinginkan, ataupun dapat langsung dicampur dengan air kolam.

Tabel 2. PLTP dengan siklus biner yang sudah beroperasi di dunia (Vaccaro, 2013)

No	PLTP	Lokasi	T (°C)	Siklus Biner	Fluida Kerja	Kapasitas Terpasang (kW)
1	Birdsville	Australia	98	ORC	Iso-pentana	150
2	Bruchsal	Jerman	120	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	610
3	Empire	USA	118	ORC	Iso-pentana	1.200
4	Fang	Thailand	116	ORC	Iso-pentana	300
5	Husavik	Islandia	124	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	2.030
6	Nagqu	China	110	ORC	Iso-pentana	1300
7	Unterhaching	Jerman	122	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	4.000
8	Wabuska	USA	104	ORC	Iso-pentana	750
9	Wendel	USA	103	ORC	R114	2.000
10	Wineagle	USA	110	ORC	Iso-butana	750

Beberapa jenis ikan seperti nila, salmon atau ikan lele dapat tumbuh baik dengan mengontrol temperatur air kolam. Beberapa ikan tropis, lobster, ataupun udang juga dapat tumbuh baik. Temperatur optimum untuk masing-masing komoditas, ditunjukkan dalam Gambar 6. Sebagai contoh ikan lele dan udang, dapat tumbuh 50% lebih baik pada temperatur antara 20 s.d. 26°C, dan tumbuh optimum pada temperatur 32°C, tetapi pada temperatur lebih tinggi, pertumbuhannya akan menurun.



Gambar 6. Temperatur pertumbuhan untuk berbagai komoditas perikanan

Budidaya udang tropis yang dikemas dalam bentuk pariwisata sudah lama dikembangkan di New Zealand (Gambar 7). Budidaya ini menggunakan sisa fluida panas dari PLTP Wairakei. Sisa fluida tersebut tidak langsung dialirkan ke kolam karena mengandung silika yang tinggi, namun menggunakan penukar panas yang akan memanaskan air dari sungai Waikato menjadi temperatur 26 °C. Budidaya ikan lele menggunakan air panas juga sudah dilakukan di Lampung. Menurut laporan peternak di Lampung, ikan lele tumbuh sangat bagus dengan metode pencampuran air panas dengan air kolam dibandingkan dengan metode pemanasan air kolam melalui *heat exchanger* (Lund dan Boyd, 2015).

Selain perikanan, budidaya ganggang seperti spirulina dapat diaplikasikan pada temperatur 35 s.d. 37°C (IRENA, 2019).

Spirulina dan ganggang jenis lainnya dijual sebagai suplemen nutrisi kesehatan dan untuk penyembuhan medis. Spirulina tergolong ke dalam ganggang hijau-biru yang tumbuh bagus di bawah sinar matahari yang kuat dan kondisi alkali. Di Yunani, budidaya spirulina sudah dilakukan sejak tahun 1990an. Air panas temperatur 51°C dialirkan sebanyak 10 kg/detik yang digunakan untuk memanaskan air kolam ke temperatur 33 s.d. 36°C. Kandungan CO₂ dalam air panas juga digunakan untuk meningkatkan produksi dan mengurangi biaya operasional (FAO, 2015).



Gambar 7. Pemanfaatan budidaya udang dan pariwisata di New Zealand (<https://hukaprawnpark.co.nz>)

Pengeringan

Aplikasi pemanfaatan langsung panas bumi di bidang pengeringan dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kualitas hasil panen. Banyak industri makanan dan pertanian menggunakan proses pengeringan untuk mempertahankan kualitas produk. Di Negara-negara maju, proses pengeringan menghabiskan 7 s.d. 15 % dari total kebutuhan listrik, namun efisiensi termalnya relatif rendah sekitar 25 s.d. 50 %. Bahkan di beberapa negara maju, konsumsi energinya sepertiga dari total kebutuhan listrik (Chou dan Chua dalam FAO, 2015).

Di Indonesia, aplikasi pengeringan sudah dilakukan secara intensif oleh BPPT. Sebagai contoh di Lampung untuk pengeringan coklat dan kopra, di Kamojang untuk budidaya jamur, di Lahendong untuk proses pengolahan gula aren, dan di

Wayang Windu untuk pengeringan teh (Taufan dalam Abdullah dan Gunadnya, 2010). Pengolahan gula aren di Lahendong menggunakan 4 ton/jam air brine dari PLTP Lahendong. Temperatur yang dibutuhkan untuk proses pengeringan umumnya 60 s.d. 100°C. Untuk pengeringan sayuran, buah, dan ikan umumnya membutuhkan temperatur 70 s.d. 95°C (IRENA, 2019). Tabel 3 memperlihatkan kebutuhan temperatur dan waktu pengeringan untuk beberapa komoditas di Indonesia.

Tabel 3. Temperatur dan waktu pengeringan untuk beberapa komoditas di Indonesia (Abdullah dan Gunadnya, 2010)

No	Komoditas	Temperatur Pengeringan (°C)	Waktu Pengeringan (jam)
1	Coklat		
	- Uji lab 1	50	40
	- Uji lab 2	49,2	32
	- Uji lapangan	45,8	43
2	Kopi Robusta	37	60
3	Vanilla	51	52
4	Benih		
	- Cabai	40	4
	- Timun	40	9,5
5	Buah-buahan		
	- Pepaya	39	33
	- Pisang	40,6	11
6	Bayur	39,3	158
7	Kemiri	48,5	96

Pariwisata dan Balneoterapi

Di Indonesia, pemanfaatan langsung panas bumi umumnya berupa pariwisata untuk pemandian air panas (Gambar 8). Sumber air panas bumi tidak hanya dapat digunakan sebagai tempat wisata, tetapi dapat pula dimanfaatkan lebih lanjut untuk sarana pengobatan. Terapi pengobatan dengan media air panas ini dikenal sebagai Balneoterapi. Istilah balneoterapi berasal dari kata Yunani *balneum* yang berarti mandi. Balneoterapi sendiri berarti mandi/berendam dengan air panas yang mengandung mineral-mineral alami. Komposisi dan karakteristik fisik masing-masing air panas umumnya berbeda, seperti air panas dengan kandungan garam tinggi, air panas kaya sulfur, kaya bikarbonat, kaya CO₂, kaya radon, kaya selenium, dan lain-lainnya. Umumnya

terapi pengobatan ini dikombinasikan dengan terapi fisik, hidroterapi, dan lumpur (Nasermoaddeli dan Kagamimori, 2015). Kolam-kolam terapi air panas telah dimanfaatkan sejak lama di Indonesia, namun informasi jenis penyakit dan metode pengobatannya belum banyak diketahui.



Gambar 8. Pemanfaatan langsung panas bumi untuk pemandian air panas di Kabupaten Kutai Kartanegara (sumber: Dinas ESDM Kabupaten Kutai Kartanegara)

Hasil kajian para pakar sudah banyak di publikasikan. Siswowidjojo (2012) mengatakan bahwa berendam di dalam air panas alami dapat memulihkan kesehatan dari berbagai gangguan pada saluran pencernaan, saluran urin, *vascular, cordial ailment* dan beberapa jenis gangguan organ kandungan akibat dari terserapnya unsur kimia mineral oleh tubuh melalui kulit. Berendam di air panas alami memberikan efek positif bagi penderita sakit kencing manis, diantaranya penurunan kadar gula dalam darah dan *metabolical endocrine function*. Mata air panas alami yang mengandung CO₂ yang bersumber di daerah vulkanik dapat digunakan untuk penyembuhan kelainan fungsi jantung (*cardiovascular disorders*), khususnya *arterial hypertension*. Perawatan dilakukan selama 4 minggu, dengan tiap kalinya berendam selama 15 sampai 20 menit dan dilakukan 3 kali setiap minggunya.

Secara rinci, Nasermoaddeli dan Kagamimori (2015) telah merangkum publikasi ilmiah tentang balneoterapi dari tahun 1966 s.d. 2003. Studi klinis tersebut

menyebutkan manfaat balneoterapi pada kelainan dermatologis, muskuloskeletal kronis (inflamasi dan non-inflamasi), kelainan metabolik, dan psikologis. Balneoterapi menghasilkan efek positif pada penyakit psoriasis, eksim, dan *cutaneous microcirculation* (kelainan dermatologis); *rheumatoid arthritis*, spondylitis ankilosa, dan fibrositis (penyakit *chronic inflammatory musculoskeletal*); *Osteoarthritis* dan nyeri tulang belakang (penyakit *chronic non-inflammatory musculoskeletal*); kekentalan darah, agregasi trombosit, plasma lipid, stress hormones, dan plasma *homocysteine* (kelainan metabolisme); depresi dan ketegangan psikologis (kondisi psikologis).

Galvez dkk (2018) menyampaikan ringkasan studi yang paling relevan, berdasarkan orisinalitas penelitian, desain eksperimental dan metodologi pengobatan. Balneoterapi merupakan metode tambahan untuk pengobatan yang cukup efektif pada beberapa jenis peradangan, tulang, dan kelainan metabolisme. Subyek penelitian yang digunakan antara lain pada tikus, monyet, dan manusia. Pada manusia, umumnya penyakit yang diteliti adalah diabetes dan osteoarthritis dengan efek positif yang didapatkan pada subyek penelitian setelah melakukan terapi air panas. Beberapa metode pengobatan dan efek klinis yang dihasilkan antara lain (Galvez dkk, 2018) :

- *Diabetes*, metode hidroterapi (38 s.d. 42°C) selama 60 kali setiap hari @ 30 menit (pada tikus), 10 kali setiap hari @ 30 menit (pada monyet), dan 18 kali setiap hari @ 30 menit (pada manusia) memberikan efek klinis berupa pencegahan komplikasi diabetes, peningkatan tekanan darah dan metabolisme glukosa. Selain itu didapatkan penurunan level glukosa plasma puasa dan *glycated hemoglobin*.
- *Osteoarthritis*, metode balneoterapi menggunakan air kaya Bikarbonat dan Kalsium (38 s.d. 42°C, 10 kali setiap hari @ 60 menit atau 39 s.d. 40°C, 21 kali setiap hari @ 15 menit) dan metode balneoterapi menggunakan air kaya Sulfur (37°C) dan Lumpur 46-48°C (12 kali setiap hari @ 20 menit) yang disertai meminum air sulfur 400 ml/hari, memberikan efek klinis pengurangan rasa sakit; peningkatan kelenturan lutut, kekakuan dan fungsi fisik; dan kualitas hidup yang lebih baik.

ANALISIS DAN HASIL

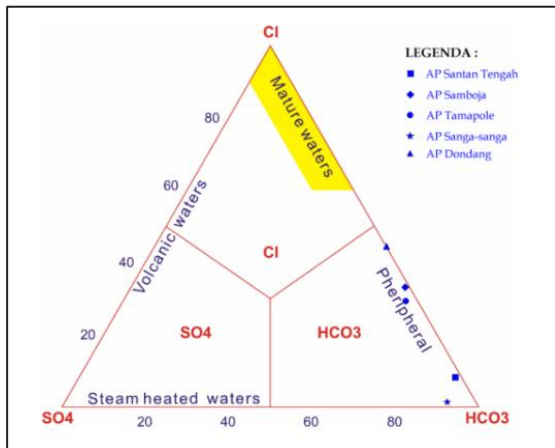
Analisis kimia dilakukan terhadap 5 sampel air panas untuk mengetahui karakteristik fluida panas bumi seperti tipe fluida, asal fluida, maupun perkiraan temperatur reservoir. Hasil analisis kimia air panas ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Kimia Air Panas di Cekungan Kutai (Wita dkk, 2019)

Parameter	AP Santan Tengah	AP Samboja	AP Tamapole	AP Sanga-sanga	AP Dondang
Temp (°C)	44,3	45,3	36,8	49,5	55,7
pH	6,20	6,38	7,14	7,59	8,42
DHL (µS/cm)	1036	1656	541	212	3520
SiO ₂	95,88	27,85	29,43	23,37	33,45
B	1,13	8,08	1,41	1,62	3,81
Al ³⁺	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03
Fe ³⁺	0,16	1,44	0,27	0,45	0,10
Ca ²⁺	13,21	11,86	2,41	4,10	34,1
Mg ²⁺	7,57	5,74	1,20	2,89	24,61
Na ⁺	236,65	366,26	129,62	31,88	635,4
K ⁺	7,18	15,17	7,72	20,34	34,18
Li ⁺ (mg/L)	0,14	0,21	0,01	0,03	0,10
As ³⁺	0,00	0,10	0,10	0,00	0,17
NH ₄ ⁺	1,51	4,06	1,13	1,51	15,28
F ⁻	0,27	0,19	0,31	0,46	0,26
Cl ⁻	51,44	274,34	100,00	2,00	667,2
SO ₄ ²⁻	10,00	10,00	10,00	10,00	0,01
HCO ₃	569,82	547,35	232,52	132,23	838,61
CO ₃ ⁼	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Karakteristik Fluida Panas Bumi

Hasil plotting pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ memperlihatkan bahwa air panas di Cekungan Kutai termasuk dalam tipe bikarbonat (Gambar 9). Hal ini sesuai dengan litologi daerah penyelidikan yang didominasi oleh batuan sedimen. Hasil analisis kimia juga menunjukkan komposisi bikarbonat yang tinggi jika dibandingkan dengan komposisi kimia lainnya (132 s.d 838 mg/L).

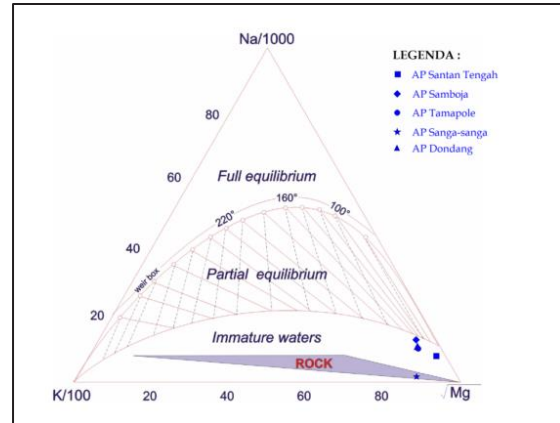


Gambar 9. Diagram segitiga Cl - SO₄ - HCO₃

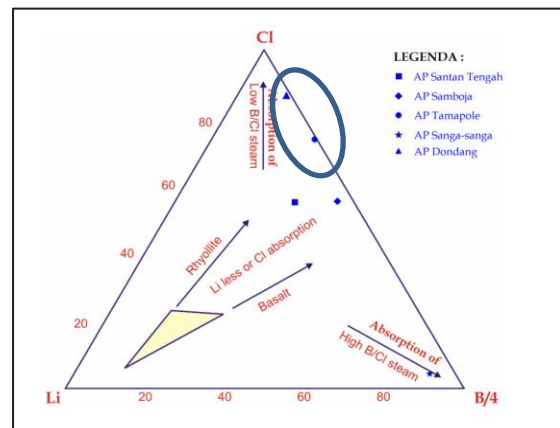
Berdasarkan diagram segitiga Na/1000-K/100-√Mg, menunjukkan air panas di Cekungan Kutai merupakan *Immature Water* atau tidak dalam kesetimbangan (Gambar 10). Hal ini menunjukkan pengaruh dari pelarutan batuan lebih dominan dibandingkan kesetimbangan air dengan batuan (Gigenbach, 1988), interaksi air dengan batuan di dekat permukaan (Nicholson, 1993), kemungkinan kesetimbangan pada temperatur yang lebih rendah (Powell dan Cumming, 2010), ataupun pencampuran dengan air permukaan (Rahayudin, 2018) sehingga tidak dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer Na/K (Gigenbach, 1988).

Berdasarkan diagram segitiga Cl-Li-B, air panas di Cekungan Kutai berada di antara zona Cl dan B, yang menunjukkan lingkungan pembentukan sistem panas bumi di daerah Cekungan Kutai dipengaruhi oleh lingkungan sedimen

dengan umur sistem panas bumi relatif sudah tua (Gambar 11). Dari diagram tersebut juga dapat disimpulkan bahwa air panas Tamapole dan Dondang yang berjarak berdekatan diperkirakan mempunyai reservoir yang sama.



Gambar 10. Diagram segitiga Na/1000-K/100-√Mg



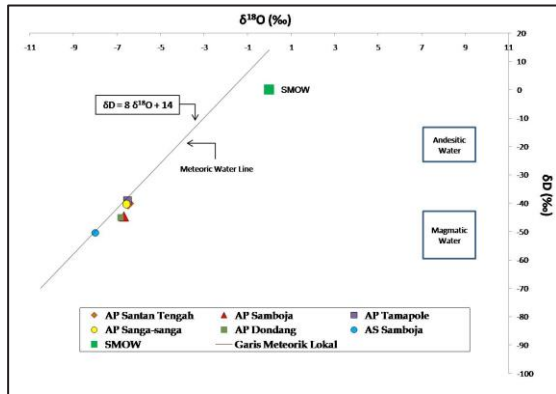
Gambar 11. Diagram segitiga Cl-Li-B/4

Isotop ¹⁸O dan ²H

Isotop ¹⁸O dan ²H (D) didapat dari empat sampel air panas serta satu sampel air dingin. Nilai δ¹⁸O berkisar -6,49 sampai -7,99 ‰, sedangkan nilai δD berkisar -38,99 sampai -50,4 ‰. Nilai rasio dari sampel air di plot pada grafik δD terhadap δ¹⁸O, dengan garis air meteorik δD = 8δ¹⁸O +14.

Posisi air panas pada umumnya berada pada garis air meteorik (*Meteoric Water Line*) yang mengindikasikan bahwa sumber fluida panas bumi berasal dari air meteorik (Gambar 13). Tidak terjadi pengkayaan ¹⁸O

yang signifikan dikarenakan temperatur fluida yang tidak terlalu tinggi sehingga interaksi fluida dengan batuan tidak terjadi dengan intensif.



Gambar 13. Grafik isotop δD dan $\delta^{18}O$

Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan

Geotermometri unsur terlarut umumnya digunakan untuk mengestimasi temperatur bawah permukaan dari suatu sistem panas bumi. Hasil perhitungan geotermometer SiO_2 memberikan nilai temperatur bawah permukaan sebesar 70 s.d. 130°C, geotermometer Na/K sebesar 150 s.d. 190°C, dan geotermometer Na/K/Ca sebesar 140 s.d. 170°C (tabel 5).

Penggunaan geotermometer silika sangat bergantung pada konsentrasi absolut silika dibandingkan pada rasio konsentrasi,

sehingga akan terpengaruh oleh proses di bawah permukaan seperti pendidihan (*boiling*) dan pengenceran (Nicholson, 1993). Fluida panas di daerah Cekungan Kutai merupakan *immature water* yang mengalami pencampuran oleh air permukaan, yang menyebabkan konsentrasi silika di air panas tidak mencerminkan konsentrasi silika di reservoir. Oleh karena itu, geotermometer silika kurang tepat digunakan untuk perhitungan geotermometer. Begitu juga dengan penggunaan geotermometer Na/K. Geotermometer Na-K-Ca lebih tepat digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir karena dapat digunakan pada air hangat/sedikit panas dan *immature water* (D'Amore dan Arnorsson, 2010). Hal tersebut juga didukung dengan hasil komposisi kimia yang mempunyai nilai $Ca^{1/2}/Na > 1$ (Nicholson, 1993).

Pada sistem panas bumi Santan Tengah diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 140°C, sistem panas bumi Samboja diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 150°C, sistem panas bumi Sanga-sanga diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 70°C, dan sistem panas bumi Tamapole-Dondang diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan sebesar 170°C.

Tabel 5. Hasil perhitungan temperatur bawah permukaan

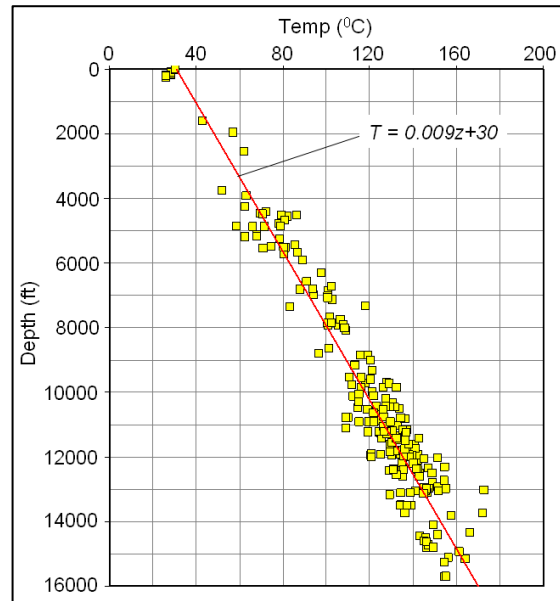
PARAMETER		AP Santan Tengah	AP Samboja	AP Tamapole	AP Sanga sanga	AP Dondang
T. Air Panas	°C	44,3	45,3	36,8	49,5	55,7
pH		6,20	6,38	7,14	7,59	8,42
T SiO_2 (cc)		135	77	79	70	84
T SiO_2 (ac)		131	81	83	74	87
T NaK (G)	°C	152	171	194	442	187
T NaK (F)		133	152	176	452	169
T Na-K-Ca		136	153	167	285	167

DISKUSI

Manifestasi panas bumi di Cekungan Kutai berupa mata air panas, pH netral, dan bertipe bikarbonat sebagai indikasi lingkungan geologinya didominasi oleh batuan sedimen yang kaya karbonatan. Hal ini sesuai dengan litologi di Cekungan Kutai yang didominasi oleh batuan sedimen dengan lingkungan pengendapan deltaik hingga marin. Keberadaan air panas di Kabupaten Kutai Kartanegara pada zona *immature water* memberikan gambaran bahwa kondisi air panas banyak dipengaruhi oleh air permukaan. Komposisi klorida yang cukup tinggi (51 s.d. 667 mg/L) dan hasil plotting diagram Cl-Li-B berada pada zona klorida, mengindikasikan sudah terbentuknya reservoir di kedalaman dengan umur yang relatif tua dan mekanisme pemunculan air panas di permukaan melalui sirkulasi dalam (*deep circulation*). Air permukaan yang turun ke bawah permukaan terpanaskan oleh batuan panas yang diperkirakan timbul akibat adanya pembebanan dalam waktu yang sangat lama (*geopressured*), yang kemudian muncul sebagai air panas di permukaan melalui rekahan berupa struktur sesar yang dalam.

Gupta dan Sukanta (2007) menyatakan bahwa sistem panas bumi *geopressured* terbentuk ketika air panas terperangkap dan terjadi pertukaran atau pencampuran dengan batuan sekitarnya. Sistem panas bumi di cekungan sedimen merupakan hasil interaksi dari berbagai sumber panas dan mekanisme pemindahan (*transfer*) panas dimana panas dari kedalaman dipindahkan ke permukaan. Sistem-sistem panas bumi yang terletak pada cekungan Kutai, diperkirakan berkaitan dengan pembentukan cekungan sedimen yang terisi secara cepat oleh produk sedimentasi, sehingga fluida hidrotermal yang terbentuk mengalami tekanan tinggi. Sistem panas bumi yang berhubungan dengan *geopressured* ataupun yang berada di lingkungan sedimentasi umumnya memiliki depresi yang sangat tebal, bisa mencapai 5 – 8 km (Hadi, 2013).

Ketebalan batuan sedimen yang mengisi cekungan ini berimplikasi terhadap nilai gradien termal yang cukup tinggi pada cekungan ini. Gradien termal pada Cekungan Kutai bagian bawah diperkirakan sebesar 90°C pada kedalaman 2.000 m (Gambar 14), diiringi oleh keberadaan mineral smektit yang mulai hilang (Ramdhan dkk, 2010).



Gambar 14. Kurva gradien termal Cekungan Kutai (Ramdhan, 2010)

Pembentukan sistem panas bumi sangat erat hubungannya dengan siklus hidrologi yang berkesinambungan. Kalimantan memiliki wilayah daratan dengan hutan yang sangat luas. Letak geografisnya sangat menunjang terbentuknya siklus hidrologi di seluruh kawasan dan bahkan dengan curah hujan yang tinggi. Air yang terdapat di permukaan meresap melalui kantong-kantong daerah resapan yang masuk hingga menjangkau akuifer yang paling dalam. Di samping itu, batuan pun mengandung air seperti yang dikenal sebagai *connate water* atau air yang terperangkap di dalam formasi batuan. Umumnya *connate water* ini terdapat pada batuan sedimen. Selain itu, terdapat *juvenile water* atau *magmatic water* sebagai air yang terperangkap pada batuan magmatik, yaitu air yang terbawa sejak bahan-bahan pembentuk batuan itu

masih berupa magma. Cekungan sedimen merupakan wadah atau tempat untuk mengakumulasi fluida tersebut dalam suatu reservoir. Komposisi litologi berjenis lempungan di suatu cekungan sedimen kemungkinan sebagai batuan penutup (*cap rock*) yang menahan keluarnya panas dan fluida di reservoir.

Di Indonesia sistem panas bumi pada cekungan sedimen ataupun *geopressured* tidak lepas dari sejarah tektonik setempat, seperti di Kalimantan yang berhubungan dengan jalur subduksi tua. Sumber panas pada sistem panas bumi ini diantaranya dapat berasal dari sisa panas pada batuan terobosan (intrusi) dan faktor pembebanan pada lapisan sedimen dalam, hingga pemanasan dari aktivitas radiogenik pada *basement* cekungan. Sumber panas dapat juga karena terjadinya pembebanan oleh endapan di atasnya dalam waktu yang relatif singkat pada suatu cekungan, sehingga mengakibatkan terakumulasi panas yang kemudian menjadi sumber panas pada cekungan tersebut (Jones, 1970; Gupta dan Sukanta, 2007).

Secara umum, sistem panas bumi di Cekungan Kutai mempunyai temperatur reservoir rendah ke sedang dengan temperatur bawah permukaan diperkirakan 70 s.d. 170°C. Temperatur tertinggi pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang dengan perkiraan temperatur bawah permukaan sebesar 170°C.

REKOMENDASI PEMANFAATAN PANAS BUMI

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai dapat dimanfaatkan secara tidak langsung menjadi energi listrik maupun secara langsung. Mengingat temperatur reservoirnya tergolong pada temperatur rendah-sedang, maka pemanfaatan menjadi energi listrik masih terbatas pada penggunaan siklus biner (*binary cycle*).

Sedangkan pemanfaatan langsung panas bumi dapat di aplikasikan pada sektor perikanan, agro-industri, ataupun pariwisata.

Pemanfaatan panas bumi baik secara langsung ataupun tidak langsung, tentunya membutuhkan fluida panas yang kontinyu. Kebutuhan fluida panas ini bisa didapatkan dengan cara pemboran ataupun langsung dari manifestasi di permukaan. Pada pemanfaatan tidak langsung menggunakan siklus biner, kebutuhan fluida panas diperoleh dengan cara pemboran dalam hingga ke reservoir untuk mendapatkan temperatur optimum yang dibutuhkan. Pada pemanfaatan langsung untuk pengeringan, kebutuhan fluida panas dapat dipenuhi baik secara langsung dari manifestasi ataupun dengan pemboran. Pengambilan fluida panas langsung dari manifestasi dapat dimungkinkan karena temperatur manifestasi mencukupi dalam hal kebutuhan panas yang dibutuhkan untuk aplikasi pengeringan (tabel 3). Kebutuhan fluida juga dapat dipenuhi dengan cara pemboran sumur dangkal ke dalam reservoir di dekat permukaan. Penentuan titik bor tersebut dapat dilakukan dengan metode geofisika seperti geolistrik untuk mencari letak reservoir dangkal tersebut. Pada pemanfaatan langsung untuk akuakultur, pariwisata, dan balneoterapi kebutuhan fluida panas dapat dipenuhi langsung dari manifestasi.

Pemanfaatan langsung panas bumi erat kaitannya dengan kebutuhan dan hasil komoditas dari daerah setempat. Menurut BPS Kabupaten Kutai Kartanegara (Kukar) tahun 2021, hasil bumi daerah Kukar didominasi oleh kopra, kelapa sawit, kopi, kemiri, dan gula aren sehingga pemanfaatannya dapat diaplikasikan untuk komoditas tersebut. Rekomendasi pemanfaatan panas bumi untuk daerah Cekungan Kutai ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekomendasi Pemanfaatan Panas Bumi di Cekungan Kutai

No	Air Panas	T. Reservoir (°C)	Rekomendasi Pemanfaatan		Keterangan
			Langsung	Tidak Langsung	
1	Tamapole-Dondang	170	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	Siklus biner	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengeringan kopra, kelapa sawit, dan kemiri • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
2	Samboja	150	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	Siklus biner	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengolahan gula aren serta pengeringan kopra, kelapa sawit, dan kopi • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
3	Santan Tengah	140	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	-	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengeringan kopra dan kelapa sawit • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
4	Sanga-sanga	70	Pariwisata, Akuakultur	-	Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai tergolong pada sistem panas bumi temperatur rendah-sedang dengan kisaran temperatur reservoir 70 s.d. 170°C. Pembentukan sistem panas buminya diperkirakan berhubungan dengan proses sedimentasi (*syn-genetic*) dan *geopressured*. Beberapa air panas keluar melalui sumur pemboran minyak dan masih mengalir hingga saat ini. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem panas bumi sudah terbentuk di bawah permukaan dan siklus hidrologinya masih berjalan dengan baik.

Melihat dari karakteristik fluida panas bumi di Cekungan Kutai dan potensi sumber daya alamnya, maka ada beberapa rekomendasi pemanfaatan panas bumi yang dapat diaplikasikan (tabel 6). Pemanfaatan langsung seperti untuk akuakultur, pengeringan, pariwisata, dan balneoterapi dapat diaplikasikan pada

semua sistem panas bumi di Cekungan Kutai. Pada sistem panas bumi Santan Tengah, Samboja, dan Tamapole-Dondang sangat memungkinkan dimanfaatkan untuk balneoterapi terhadap penyakit peradangan tulang karena memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi (>500 ppm). Ada peluang untuk pemanfaatan tidak langsung menjadi energi listrik menggunakan siklus biner, yaitu pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang (170°C) dan Samboja (150°C). Perlu adanya kajian lebih lanjut terhadap komposisi kimia dari masing-masing air panas terkait kemungkinan adanya skaling kalsit pada fasilitas produksi yang dapat mengurangi efisiensi, mengingat tingginya kandungan bikarbonat pada air panas tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama⁽¹⁾ merupakan kontributor utama dari makalah ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat

Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas bumi atas terlaksananya kegiatan kajian sistem panas bumi di Kabupaten Kutai Kartanegara pada tahun 2018. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Kabupaten Kutai Kartanegara atas bantuannya kepada tim kajian selama berada di Lapangan, rekan-rekan di Bidang Panas Bumi, dan tim editor atas koreksi, saran, dan masukannya dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, K., dan Gunadnya, I.B.P., 2010. Use of Geothermal Energy for Drying and Cooling Purposes. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali.
- Angelino, L., dan Barrera, F., 2019. Accelerating geothermal heat adoption in the agri-food sector. *The International Renewable Energy Agency (IRENA) Report*, Abu Dhabi.
- Anonim, 2009. Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan Data Gaya Berat dan Geologi. *Badan Geologi*, Bandung.
- Anonim, 2020. Peta Sebaran Panas Bumi Indonesia, *Badan Geologi*, Bandung.
- Anonim, 2021. Kabupaten Kutai Kartanegara Dalam Angka, *BPS Kabupaten Kutai Kartanegara*.
- Chandrasekharam, D., dan Bundschuh, J., 2008. *Low Enthalpy Geothermal Resources for Power Generation*. CRC Press, pp. 101-102.
- D'Amore, F., dan Arnorsson, S., 2000. Geothermometry, In *Isotopic and Chemical Techniques in: Geothermal Exploration, Development and Use*, Edited by S. Arnorsson, IAEA, Vienna, 152-199.
- Darvish, K., Ehyaei, M. A., Atabi, F., dan Rosen, M. A., 2015. Selection of Optimum Working Fluid for Organic Rankine Cycles by Exergy and Exergy-Economic Analyses. *Journal Sustainability* No 7.
- Galvez, I., Torres-Piles, S., dan Ortega-Rincon, E., 2018. *Balneotherapy, Immune System, and Stress Response: A Hormetic Strategy*. *International Journal of Molecular Sciences*.
- Gazo, F. dan Lind, L., 2010. *Low Enthalpy Geothermal Energy – Technology Review*, GNS Science Report 2010/20. 58 p.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria: derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749–2765
- Gupta, H., dan Sukanta, R., 2007. *Geothermal Energy, An Alternative Resource for the 21st Century*, Amsterdam, the Netherlands; Boston : Elsevier.
- Hadi, M.N., 2013. *Panas Bumi Non-Vulkanik di Indonesia*. *GEOMAGZ*, Vol 3 No 3, Bandung.
- Hadi, M.N., dan Wibowo, A.E.A., 2014. *Panas Bumi Nirgunungapi di Kalimantan*. *GEOMAGZ*, Vol 4 No 1, Bandung.
- Hidayat S., dan Umar I., 1994. *Peta Geologi Lembar Balikpapan, Kalimantan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, Bandung
- Hromádka, A., dan Martinek, Z., 2017. Overview Of The Organic Rankine Cycles And Their Current Utilization: Verification Of Several Current ORC's Utilization By The Software Dymola. *Conference Paper*, DOI: 10.1109/EPE.2017.7967272.
- Jones, P.H., 1970. Geothermal resources of the Northern Gulf of Mexico basin. In: *Proceedings of the U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources*. *Geothermics, Special Issue*, 2 (1), 14–26.
- Kalina, A., Leibowitz, H., Lazzori, L., dan Diotti. F., 1995. Recent development in the application of Kalina cycle for geothermal plants. *Geothermal Resources Council*.

- Karimi, M. N., Dutta, A., Kaushik, A., Bansal, H., dan Haque, S.Z., 2015. A Review of Organic Rankine, Kalina and Goswami Cycle. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, Vol 3.
- Kopunicova, M., 2009. Feasibility Study of Binary Geothermal Power Plant in Eastern Slovakia; Analysis of ORC and Kalina Power Plant. *The School for Renewable Energy Science, Iceland*, pp. 26-28.
- Lund, J.W., dan Boyd, T.L., 2015. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*.
- Mirolli, M., Hjartarson, H., Mlcak, H.A., dan Ralph, M., 2002. Testing and Operating Experience of the 2 MW Kalina Cycle Geothermal Power Plantin Húsavík, Iceland. *OMMI Vol. 1, Issue 2*.
- Marini, L., 2001. *Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova, Italy.
- Nasermoaddeli, A., dan Kagamimori, S., 2005. Balneotherapy in Medicine: A Review. *Environmental Health and Preventive Medicine* vol 10, page 171–179, July 2005.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids; Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag, Berlin.
- Popovski, K., 2009. Agricultural and Industrial Uses of Geothermal Energy in Europe. *Proceedings of the International Conference on National Development Of Geothermal Energy Use, Slovakia*.
- Powell, T., dan Cumming, W., 2010. Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry. In: *Proceedings 35th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University. Stanford, California, USA.
- Rahayudin, Y., Kashiwaya, K., Susmanto, A., Tada, Y., Iskandar, I., and Koike, K., (2018). Estimation of Fluid-rock Interaction Process and Recharge Area of the Tampomas Geothermal Field, West Java, Indonesia by Water Chemistry, *Proceedings 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*.
- Ramdhan, A.M., 2010. *Overpressure And Compaction In The Lower Kutai Basin, Indonesia*. Doctoral Thesis, Durham University.
- Renz, M. dan Engelhard, M., 2006. The New Generation of Kalina Cycle. *Conference on Electricity Generation from Enhanced Geothermal System*. M+W Zander, Strasbourg, France.
- Saemundsson, K., Axelsson, G., dan Steingrímsson, B., 2011. *Geothermal System in Global Perspective*. Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, UNU-GTP, Iceland.
- Satyana, A.H., dan Darman, H., 2000. Kalimantan. dalam *Outline of the geology of Indonesia*, Chapter 5, Indonesian Association of Geologists (IAGI), Jakarta, p. 69-90.
- Siswosidjojo, S.S., 2012. *Balneoterapi di Sumber Air Panas Alami*. GEOMAGZ, Vol 2 No 3, Bandung.
- Vaccaro, M., 2013. *Multidisciplinary Approach For The Sustainable Utilization Of Medium-Low Temperature Geothermal Resources*. PhD Thesis, Università di Pisa, Italia.
- Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson, M., dan Pálsson, P.G., 2015. *Uses of Geothermal Energy in Food and Agriculture – Opportunities for Developing Countries*. Food and Agriculture Organization of United Nation (FAO), Roma, Italia.
- Wita, L.M., Syafri, I., Yoseph, B., dan Wibowo, A.E.A., 2019. Karakteristik Hidrokimia Untuk Mengetahui Sistem Dan Pemanfaatan Fluida Panas Bumi Daerah Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. *Padjajaran Geoscience Journal*, Vol 3 No 5, Bandung.

Yanagisawa, N., Muraoka, H., Sasaki, M., Sugita, H., Ioka, S., Sato, M., dan Osato, K., 2012. Starting Field Test of Kalina System Using Hot Spring Fluid in Japan. *Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

Zajuli, M.H.H., Irawan, D., Permana, A.K., Kusworo, A., Wahyudiono, J., Hamzah, A., Saragih, R., Hermanto, B., Firdaus, M., dan Arifin, A.S., 2015. Karakteristik Serpih Gas (Shale Gas) dan Potensinya di Cekungan Kutai dan Cekungan Akimeugah. Kolokium Pusat Survei Geologi, Bandung.

Diterima	: 2 November 2020
Direvisi	: 2 Desember 2020
Disetujui	: 31 Agustus 2021