

Review Artikel

**GEL PENGONTROL PEMBAKARAN BATUBARA SPONTAN SEBAGAI
PENCEGAHAN KEBAKARAN**

***A GEL TO CONTROL THE SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL AS
FIRE PREVENTION***

Venny Krysthin*¹

¹Politeknik Negeri Sriwijaya / Teknik Kimia

Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Lama, Bukit Besar, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30139, Telp 0711353414

*e-mail : v.krysthin@gmail.com

ABSTRACT

Spontaneous combustion is a self-combustion process which is caused by self-heating due to an increase in temperature by an exothermic internal reaction. Heating itself rapidly will accelerate the rise in high temperatures, until finally self-ignition occurs. As we know that spontaneous combustion of coal is a bit dangerous if we couldn't control it. A new type of mining fire-extinguishing material designed to prevent the spontaneous combustion of coal is presented. Through the graft copolymerization of corn straw, 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS), and acrylic acid (AA), a corn straw-co-AMPS-co-AA hydrogel was synthesized. A chemical foaming agent was then added to the hydrogel, resulting in a self-foaming gel, which was subsequently mixed with expandable graphite to create an intelligent gel. The intelligent gel exhibited uniform self-foaming when a foaming agent was used. When the water component of the gel had completely evaporated, the gel expanded a second time, with the best results obtained when 10% of expandable graphite was added. The fire-extinguishing performance of the intelligent gel was found to be superior to those of the other gels, as it prevented re-ignition. Thus, this gel is an ideal fire prevention and control material, especially for controlling the spontaneous combustion of coal.

Key words: Spontaneous Combustion, Coal, Hydrogel

1. PENDAHULUAN

Batubara merupakan batuan yang mudah terbakar berwarna coklat tua yang dihasilkan ketika tanaman darat dan air menumpuk dan terkubur selama usia geografis yang ditransmisikan oleh panas dan tekanan. Molekul batubara memiliki jenis molekul tinggi yang membentuk cincin aromatik monomer pada umumnya. Hal ini dapat dikatakan menjadi antrasit atau grafit sesuai dengan tingkat karbonisasi yang terhubung dengan rantai karbon, dll karena monomer membungkus molekul rendah. Oleh karena itu batubara ini dapat terjadi pembakaran spontan yang diakibatkan oleh peningkatkan suhu karena reaksi sendiri. Pembusuan kimiawi adalah cara efektif lain untuk memasukkan struktur berpori ke dalamnya gel dan melibatkan bahan kimia tertentu yang bereaksi dengan asam atau terurai pada suhu tinggi untuk menghasilkan gas (Wang dkk., 2017).

Pembakaran spontan atau pengapian spontan, merupakan proses terbakar akibat pemanasan sendiri, oleh peningkatan suhu, karena reaksi sendiri/internal exotermik, kemudian diikuti dengan pelepasan panas (pemanasan internal cepat, mempercepat terjadinya kenaikan suhu tinggi), sehingga mampu menyalakan dan menimbulkan pengapian. Pembakaran spontan batubara, disebutkan sebagai salah satu bencana alam utama yang mengancam keselamatan produksi tambang batubara, tidak hanya menyebabkan banyak korban jiwa dan kerugian harta benda, menghancurkan

fasilitas tambang dan mengganggu produksi, tetapi dapat membawa bencana kedua seperti ledakan abu batubara, ledakan gas, dll., yang memperparah tingkat bencana (Liu dkk., 2015).

Batubara dapat menyala secara spontan bila terdapat banyak aliran oksigen yang bereaksi dan menimbulkan panas, bila penimbunan tak memiliki sistem pendinginan yang cukup baik, serta oleh akibat oksidasi mineral pirit, sering menimbulkan pengapian spontan. Untuk mengatasi kejadian pembakaran spontan batubara yang merugikan, dibutuhkan suatu metode yang dapat mengenali potensi pembakaran spontan batubara. Pembakaran batubara secara spontan merupakan salah satu ancaman utama keamanan di tambang batubara. Kebakaran yang diakibatkannya dapat menyebabkan korban jiwa dan kerugian harta benda yang signifikan, serta pencemaran lingkungan yang serius. Mengingat kekurangan dari bahan pemadam kebakaran yang ada, terdapat kebutuhan akan material baru yang meningkatkan efisiensi pencegahan pembakaran batubara secara spontan.

Hidrogel adalah polimer dengan struktur tiga dimensi dan terdiri dari senyawa makromolekul ikatan silang dan hidrofilik. Dibandingkan dengan air murni, ditawarkan keuntungan yang jelas berkaitan dengan pengikatan air serta pendinginan dan penyegelan. Saat ini, hidrogel digunakan di mana-mana dalam pencegahan kebakaran hutan dan tambang batubara. Untuk meningkatkan efisiensi pemadaman api

dilakukan pembuatan gel baru berbuis multi-fase. Bahan ini dibuat dengan mengaduk abu terbang (zat pembuis), nitrogen (zat pengental), dan zat penghubung silang secara mekanis. Gel yang diperoleh menunjukkan sifat pemadam api yang baik (Qin dkk., 2017).

Melalui proses reaksi dari *2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS)*, dan *acrylic acid (AA)*, a *corn straw-co-AMPS-co-AA hydrogel* buatan. Produk dari proses reaksi tersebut kemudian ditambahkan ke hidrogel, menghasilkan gel *self-foaming*, yang kemudian dicampur dengan grafit yang dapat diperluas untuk membuat gel yang dapat mengontrol pembakaran batubara spontan.

2. METODELOGI PENELITIAN

Metode untuk mencegah pembakaran batubara secara spontan yaitu grouting, penyemprotan penghambat, kabut kimiawi, kabut gel, atau kabut gel lembam, pemerataan tekanan, injeksi gas inert, gel, busa, atau busa tiga fase dan penyegelan udara menggunakan bubuk komposit tanah liat, busa anorganik, atau bahan polimer (seperti busa fenolik, busa poliuretan atau urea formaldehida, dan elastomer poliuretan). Teknik-teknik ini memainkan peran kunci dalam menjaga produksi pertambangan. Namun, beberapa masalah yang terkait dengan teknik ini masih belum terselesaikan. Misalnya, gas inert mudah berdifusi karena kebocoran udara dan cenderung meninggalkan area injeksi. Selanjutnya, gel memiliki fluiditas rendah dan jangkauan penetrasi yang kecil. Selain itu, busa tiga fase tidak mudah mengering dan hanya stabil selama 8-12 jam, sedangkan busa organik mahal dan reaktif secara eksotermis sehingga dapat memicu pembakaran batubara secara spontan. Mengingat kekurangan dari bahan pemadam kebakaran yang ada, ada kebutuhan akan material baru yang meningkatkan efisiensi pencegahan pembakaran batubara secara spontan. Hidrogel superabsorben yang disintesis menggunakan aseton dan NaHCO_3 sebagai agen berbuis dapat merespons perubahan suhu dengan cepat dan memungkinkan hingga 90% air yang ada di dalamnya menguap dalam 10 menit, kemudian menjadikannya bahan pendingin yang baik untuk area kebakaran.

Pada percobaan yang dilakukan oleh Cheng, dkk (2017) batubara yang digunakan untuk uji pembakaran adalah bitumit dengan titik nyala $400\text{ }^\circ\text{C}$. Batubara dibakar melalui pembakaran tanpa asap. Pada percobaan ini hasil yang didapat lebih efisien dan melalui proses yang cukup mudah dari percobaan yang lainnya.

Namun, menurut penelitian Deng, dkk. (2015)^b sebelum pemadaman, ada 80 dari 112 lubang bor yang bersuhu lebih dari $100\text{ }^\circ\text{C}$ dan di antaranya, suhu lubang bor tertinggi adalah lebih dari $600\text{ }^\circ\text{C}$. Setelah memadamkan api, suhu dari 112 lubang bor kembali ke suhu normal ($25\text{ }^\circ\text{C}$).

Menurut Yongliang, dkk (2014) efek dispersi dari koloid tersuspensi pasir ditujukan dengan

penggabungan efek elektrostatis oleh lapisan listrik ganda dan efek halangan sterik pada partikel pasir, memastikan stabilitas sistem koloid dan suspensi partikel pasir yang stabil di koloid yang tersuspensi pasir. Analisis mekanis menunjukkan bahwa pasir tersuspensi secara stabil pada kondisi tegangan partikel pasir batuan pada bagian bawah fluida lebih kecil daripada tegangan leleh koloid. Akhirnya, teknologi pencegah kebakaran dari suspensi mencapai hasil yang sukses dengan suhu $300\text{ }^\circ\text{C}$.

Ma, dkk (2019) menjelaskan bahwa selama proses pemanasan oksidasi batubara mentah dan sampel batubara pra-oksidasi, kurva TG tidak menunjukkan tahapan penyerapan oksigen dan penambahan berat dan selalu dalam keadaan penurunan kualitas sebelum terjadi burnout. Ditunjukkan bahwa nilai temperature penyalaan, temperature saat massa hilang dan temperatur pemadaman dari sampel batubara dengan suhu pra-oksidasi yang berbeda tidak memiliki perubahan yang jelas, yang terutama tercermin di temperature kritis. Kisaran suhu kritis adalah $56,8\text{ }^\circ\text{C}$ hingga $65,5\text{ }^\circ\text{C}$. Dengan meningkatnya temperatur pra-oksidasi, temperatur kritis cenderung pertama menurun, kemudian meningkat, dan mencapai minimum pada temperatur perlakuan $120\text{ }^\circ\text{C}$. Selain itu, suhu kritis sampel batubara pra-oksidasi lebih rendah daripada sampel batubara mentah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa risiko pembakaran spontan batubara pra-oksidasi meningkat selama oksidasi sekunder, dan risiko terbesar ketika suhu naik hingga $120\text{ }^\circ\text{C}$ dan batubara berhasil dipadamkan ketika temperature tertinggi pemadaman mencapai $574,3\text{ }^\circ\text{C}$.

Menurut penelitian Qin, dkk (2015) pengaruh busa *pickering* yang distabilkan FA pada karakteristik oksidasi batubara diselidiki berdasarkan data CPT yang diperoleh dari analisis sampel batubara dicampur dengan kandungan berbeda dari busa *pickering* yaitu dengan CPT $169,7\text{ }^\circ\text{C}$, $185,1\text{ }^\circ\text{C}$ dan $195,2\text{ }^\circ\text{C}$ untuk sampel batubara yang mengandung 0,5 dan 10 wt.% busa pemetik. Terbukti bahwa nilai CPT meningkat karena penambahan busa *pickering* yang distabilkan oleh FA. Ditunjukkan juga bahwa CPT mencerminkan karakteristik oksidasi batubara selama tahap oksidasi percepatan. Peningkatan CPT sampel batubara yang dicampur dengan busa *pickering* menunjukkan bahwa laju percepatan oksidasi sangat terhambat.

Pada salah satu hasil penelitian gel pengontrol pembakaran batubara secara spontan ini (Cheng, dkk. 2017) didapat hasil pada suhu optimal dengan bahan baku yang murah dan *biodegradable* (bisa terurai kembali). Bahan baku yang digunakan yaitu jerami jagung yang melalui proses reaksi dari *2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS)*, dan *acrylic acid (AA)*, a *corn straw-co-AMPS-co-AA hydrogel* buatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam hal ini ada beberapa bahan baku dan metode yang di uji oleh beberapa peneliti. Perbandingan dari beberapa penelitian tersebut akan dijelaskan pada Tabel 1.

Penelitian yang dilakukan Deng, dkk (2015)^b menyajikan penerapan teknologi injeksi gel abu terbang komposit, bersama dengan beberapa metode lain untuk membantu memadamkan kebakaran spontan batubara (penggalian, peledakan dan penyegelan). Kebakaran batubara Haibaoqing meluas hingga 6000 – 7000 m di area selebar 1000 m, yang sebagian disimulasikan oleh Fluent untuk menentukan distribusi suhu tinggi dan situasi kebocoran. Metode uji radon digunakan untuk mendeteksi secara akurat luas area terbakar, bersama dengan derajat dan kecenderungan terbakar. Daerah-daerah itu kemudian dipisahkan menjadi tiga wilayah berbeda: utara, tengah dan selatan. Lubang bor injeksi dan pemantauan gel kemudian dipasang di daerah tersebut. Aplikasi komprehensif teknologi injeksi gel fly ash komposit, penggalian, peledakan, dan penyegelan digunakan untuk memadamkan api singkapan batubara. Setelah peledakan bawah permukaan, gel komposit disuntikkan ke dalam lapisan batubara untuk memadamkan dan mencegah penyalaan kembali api dengan mengisi area baru yang dibuat oleh peledakan dan membentuk lapisan komposit yang efektif untuk mencegah pembakaran. Lubang bor memantau suhu dan konsentrasi CO selama seluruh proses untuk menunjukkan kapan api padam, bersama dengan pemantauan yang diperpanjang untuk memverifikasi tidak ada pembakaran yang terjadi kembali. Menggunakan kombinasi metode ini telah terbukti

secara efektif memadamkan api batubara dengan biaya yang wajar di wilayah tersebut.

Menurut Yongliang, dkk (2014) yang menerapkan mekanisme suspensi dan aplikasi batubara *slurry* yang disuspensikan dengan pasir. Sistem untuk menyiapkan *slurry* suspensi pasir dan simulasi aliran dalam pipa dikembangkan di laboratorium untuk memenuhi kebutuhan tambang batubara. Sistem tersebut terdiri dari peralatan preparasi untuk *slurry*, blender, pompa untuk pengangkutan, dan pipa pelurusan. Volume peralatan persiapan adalah 2 m³, dan mampu mempersiapkan 30 m³/h *slurry*. Pembangkit listriknya adalah pompa tipe G85-1 dengan satu ulir, yang memiliki aliran maksimum 43,5 m³/h. Pompa dengan diameter impor dan ekspor 150 mm ini memiliki daya 15 kW dan memiliki kemampuan untuk mengangkut *slurry* dengan partikel berukuran 10 mm dan viskositas setinggi 200 Pa.s. Panjang pipa lurus adalah 80 m dengan tata letak lurus. Pipa lurus dengan diameter masukan 100 mm dan diameter keluaran 125 mm digunakan untuk menguji tahanan pipa. Dalam penelitian ini, dianalisis kondisi mekanik suspensi tunak partikel pasir dalam sistem koloid berdasarkan prinsip, yang menyatakan bahwa pada kondisi di mana tekanan partikel pasir batuan pada bagian bawah fluida ($\tau_s = 4,05 \text{ Pa}$) lebih kecil dari tegangan luluh koloid itu sendiri ($\tau_0 = 4,57 \text{ Pa}$), maka partikel pasir dengan ukuran di bawah 0,5 mm dapat tersuspensi dengan mantap di dalam koloid. Bubur yang disuspensikan dengan pasir dimaksudkan untuk pencegahan kebakaran tambang batu bara. Hasil dari penelitian ini dapat dimanfaatkan dalam aplikasi lapangan lainnya seperti yang ditunjukkan oleh hasil di Tambang Batubara Daliuta.

Tabel 1. Perbandingan metode dan bahan baku yang digunakan untuk mencegah pembakaran batubara secara spontan

Bahan baku yang digunakan	Metode	Temperatur tertinggi pemadaman api	Referensi
Jerami Jagung (IG-II, TSG, PAM) dan air	Gel	± 500 °C	Cheng, dkk (2017)
Lumpur, nitrogen, dan air	Gel	± 600 °C	Deng, dkk (2015) ^b
Gel mineral anorganik, polimer organik dan dispersan	Gel Anorganik	± 300 °C	Yongliang, dkk (2014)
Bubuk <i>potassiumbromide</i> kering	Gel Busa	± 575 °C	Ma, dkk (2019)
Partikel <i>Fly Ash</i> (FA) yang dimodifikasi <i>Sodium Dodecyl Sulfate</i> (SDS)	Gel Busa	± 200 °C	Qin, dkk (2015)

Ma, dkk (2019) menyatakan bahwa parameter karakteristik pembakaran spontan lignit dianalisis dengan analisis termal simultan-spektroskopi inframerah transformasi Fourier dan eksperimen spektroskopi inframerah *in situ* dari perspektif oksidasi batubara, eksotermisitas dan gugus fungsi struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur kritis dan penyerapan panas total batubara pra-oksidasi lebih rendah dibandingkan dengan batubara mentah. Untuk batubara dengan suhu pra-oksidasi 120 °C, suhu kritis dan panas total reaksi endoterm adalah yang paling rendah, yang

mengakibatkan peningkatan pelepasan CO dan produksi gas CO₂. Pada tahap suhu rendah, tahap pra-oksidasi melemahkan beberapa gugus fungsi dalam batubara; namun, jumlah partisipasi struktur CH₃ meningkat. Analisis kinetik dilakukan pada gugus OH dan CH₃ selama oksidasi sekunder batubara. Setelah pra-oksidasi, energi aktivasi batubara lebih rendah daripada batubara mentah; itu adalah yang terendah ketika suhu pra-oksidasi adalah 120 °C. Ringkasnya, risiko pembakaran spontan batubara pra-oksidasi meningkat selama oksidasi sekunder, dan risiko

terbesar terjadi ketika suhu pra-oksidasi naik hingga 120 °C.

Qin, dkk (2015) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengkarakterisasi struktur mikro, perilaku pembusaan, proses evolusi dan karakteristik penghambatan spontan batubara pembakaran busa Pickering ini. Evolusi busa Pickering ini diukur dengan mengukur laju pertumbuhan gelembung serta kinetika drainase cairan dan kedua proses tersebut berkorelasi. Data ini memungkinkan kami untuk mengidentifikasi waktu transisi, memisahkan dua tahap evolusi busa yang berbeda. Peningkatan konsentrasi FA dalam busa Pickering menyebabkan peningkatan stabilitas busa, yang muncul dari pembentukan struktur gelembung lapis baja FA yang kuat. Selain itu, hasil percobaan oksidasi percepatan batubara menunjukkan bahwa busa Pickering ini dapat meningkatkan stabilitas termal batubara dan secara efektif menghambat proses oksidasi batubara dengan meningkatkan suhu titik persimpangan (CPT) dan mengurangi emisi CO. Hasilnya menunjukkan bahwa busa Pickering yang distabilkan FA berair, murah dan tidak beracun secara efektif memperlambat oksidasi batubara, sehingga menunjukkan potensi penerapannya dalam pencegahan dan pengendalian pembakaran spontan batubara.

Penelitian yang dilakukan Cheng, dkk (2017) menghasilkan jenis baru bahan pemadam kebakaran pertambangan yang dirancang untuk mencegah pembakaran batu bara secara spontan. Melalui kopolimerisasi cangkok jerami jagung, asam 2-akrilamida-2-metilpropanasulfonat (AMPS), dan asam akrilat (AA), hidrogel jerami jagung-co-AMPS-co-AA disintesis. Agen pembusa kimia kemudian ditambahkan ke hidrogel, menghasilkan gel berbusa sendiri, yang kemudian dicampur dengan grafit yang dapat diperluas untuk membuat gel ini. Dibandingkan dengan gel yang peka terhadap suhu dan poliakrilamida, gel ini menunjukkan stabilitas termal yang baik, serta daya rekat dan pembengkakan pada suhu tinggi. Eksperimen pemadam kebakaran mengungkapkan bahwa gel ini dapat menutupi permukaan batu bara yang terbakar, dengan demikian secara signifikan mengurangi suhu sumber pengapian, radiasi termal, dan jumlah CO yang dihasilkan. Analisis spektrum inframerah menunjukkan bahwa sampel IG dengan grafit tereksansi 10% dapat menghambat oksidasi gugus hidroksil selama proses pemanasan. Kinerja pemadam api gel ini ditemukan lebih unggul dari gel lainnya, karena mencegah penyalaan kembali. Dengan demikian, gel ini merupakan bahan pencegah dan pengendalian kebakaran yang ideal, terutama untuk mengendalikan pembakaran spontan batubara.

4. SIMPULAN

Pada penelitian ini dapat diperoleh hasil sebagai berikut :

1. Gel pengontrol menunjukkan pembusaan sendiri yang sama saat *foaming agent* digunakan. Ketika komponen air gel telah menguap seluruhnya, gel mengembang untuk kedua kalinya, dengan hasil terbaik yang diperoleh ketika 10% grafit jernih ditambahkan.
2. Stabilitas termal IG lebih baik daripada TSG dan PAM. IG secara efektif mengurangi dekomposisi termal bubuk batubara jika dimasukkan ke dalam campuran.
3. Selama pemadaman api, IG bisa menyelimuti permukaan sumber api suhu tinggi dan terus menurunkan suhunya. Ini secara efektif mengurangi radiasi termal serta jumlah CO yang dihasilkan dan mencegah penyalaan ulang. Analisis spektrum inframerah menunjukkan bahwa sampel IG dengan 10% grafit tereksansi dapat menghambat oksidasi gugus hidroksil selama proses pemanasan. Dibandingkan dengan TSG, PAM, dan air, IG menunjukkan berbagai keuntungan dalam memadamkan api, sehingga menjadi bahan yang ideal untuk pencegahan kebakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng W, Hu X, Xie J dan Zhao Y. 2017. *An intelligent gel designed to control the spontaneous combustion of coal: Fire prevention and extinguishing properties*. Fuel 210:826–835
- Deng J, Xiao Y, Li QW, Lu JH dan Wen H. 2015^a. *Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal*. Fuel 157:261–270
- Deng J, Xiao Y, Lu JH, Wen H dan Jin YF. 2015^b. *Application of composite fly ash gel to extinguish outcrop coal fires in China*. Nat Hazards 79:881–98.
- Hu ZX, Hu XM, Cheng WM, Zhao YY dan Wu MY. 2018. *Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete*. Constr Build Mater 179:151–9.
- Huang ZA, Yan LK, Zhang YH, Gao YK, Liu XH dan Liu YQ. 2019. *Research on a new composite hydrogel inhibitor of tea polyphenols modified with polypropylene and mixed with halloysite nanotubes*. Fuel 253:527–39.
- Leilin Zhang, Biming Shi, Botao Qin, Qing Wu dan Vanchi Tao. 2017. *Characteristics of Foamed Gel for Coal Spontaneous Combustion Prevention and Control*. Combustion Science and Technology 189:980-990

- Ma T, Chen X, Zhai X dan Bai Y. 2019. *Thermogravimetric and infrared spectroscopic studies of the spontaneous combustion characteristics of different pre-oxidized lignite*. RSC Adv 9:32476–32489
- Qin B, Jia Y, Lua Y, Li Y, Wanga D dan Chen C. 2015. *Micro fly-ash particles stabilized Pickering foams and its combustion-retardant characteristics*. Fuel 154:174–180
- Qin BT, Dou GL, Wang Y, Xin HH, Ma LY dan Wang DM. 2017. *A superabsorbent hydrogel–ascorbic acid composite inhibitor for the suppression of coal oxidation*. Fuel 190:129–35.
- Ren WX, Guo Q, Zuo BZ dan Wang ZF. 2016. *Design and application of device to add powdered gelling agent to pipeline system for fire prevention in coal mines*. J Loss Prevent Process 41:147–53
- Vinogradov AV, Kuprin DS, Abduragimov IM, Kuprin GN, Serebriyakov E dan Vinogradov VV. 2016. *Silica foams for fire prevention and firefighting*. ACS Appl Mater Inter 8:294–301.
- Wang G, Jiang CH, Shen JN, Han DY dan Qin XJ. 2019. *Deformation and water transport behaviors study of heterogenous coal using CT-based 3D simulation*. Int J Coal Geol 211.
- Wu MY, Hu XM, Hu ZX, Zhao YY, Cheng WM dan Lu W. 2019. *Two-component polyurethane healing system: Effect of different accelerators and capsules on the healing efficiency of dynamic concrete cracks*. Constr Build Mater 227:116700.
- Xia TQ, Zhou FB, Wang XX, Zhang YF, Li YM dan Kang JH. 2016. *Controlling factors of symbiotic disaster between coal gas and spontaneous combustion in longwall mining gobs*. Fuel 182:886–96.
- Xiao Y, Ren SJ, Deng J dan Shu CM. 2018. *Comparative analysis of thermokinetic behavior and gaseous products between first and second coal spontaneous combustion*. Fuel 227:325–33.
- Zhang YT, Li YQ, Huang Y, Li SS, Wang WF. 2018. *Characteristics of mass, heat and gaseous products during coal spontaneous combustion using TG/DSC–FTIR technology*. J Therm Anal Calorim 131:2963–74.