

Karakteristik Air Asam Batubara Di Kolam Bekas Tambang Batubara PT. Bukit Asam (PTBA)

Kiswanto^{*1)}, Heru Susanto²⁾, Sudarno³⁾

¹⁾Doctoral Program of Environmental Science, Undip, Jalan. Imam Bardjo, SH No.5, Semarang, 50241, Indonesia

²⁾Chemical Engineering Study Program, Undip, Jalan Prof. Sudharto, SH, Semarang, 50275, Indonesia

³⁾Environmental Science Program, Jalan Imam Bardjo, SH No.5, Semarang, 50241, Indonesia
kiswanto@utu.ac.id, susanto.heru@gmail.com, sudarno_utomo@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik air asam yang berasal dari kolam bekas tambang batubara dari kolam penampungan yang terletak di Tanjung Enim Sumatera Selatan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari pekerjaan lapangan dan pekerjaan laboratorium. Sampel air asam diambil dari kolam bekas kolam tambang batubara dengan menggunakan cara sampel sesaat (grab sampel). Selanjutnya pengukuran parameter air asam meliputi pH, TSS, Fe, Mn dan Cd dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan UNDIP. Hasil penelitian menunjukkan air asam di dalam kolam bekas tambang batubara memiliki kandungan total padatan tersuspensi (TSS) yang tinggi, yaitu mencapai 111534 mg/l, sementara itu, nilai pH limbah cair masih berada pada 5,02. Kandungan besi (Fe) sebesar 9,46 kandungan mangan (Mn) sebesar 2,276 dan kandungan Cadmium (Cd) sebesar 0,001 mg/l masih dibawah baku mutu. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Limbah Cair Pertambangan Batubara.

Kata kunci: air asam, batubara, karakteristik

1. Pendahuluan

PT. Bukit Asam (Persero), Tbk (PT. BA) adalah badan usaha yang didirikan 2 maret 1981 dengan dasar Peraturan Pemerintah No. 42 tahun 1980 dengan kantor pusat yang berada di Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Penambangan batubara di PT. Bukit Asam (Persero), Tbk diawali dengan penyelidikan eksplorasi oleh bangsa Belanda pada tahun 1915 sampai dengan tahun 1918. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa adanya kandungan batubara yang besar di kawasan Bukit Asam. Tambang batubara Bukit Asam dibuka mulai berproduksi sejak tahun 1919. Tambang ini terletak di Sumatera Selatan tepatnya pada Kabupaten Muara Enim. Penambangan pertama mampu menghasilkan batubara sebanyak 9.765 ton, yang dihubungkan ke pelabuhan Kertapati Palembang melalui kereta api sejauh ± 165 km dan jalan darat sejauh ± 200 km.

Kegiatan pertambangan batubara telah menimbulkan dampak bagi kehidupan lingkungan sekitarnya, baik itu bersifat positif maupun bersifat negatif. Secara umum, dampak positif adalah terbukanya lapangan kerja baru serta menambah pendapatan daerah tempat penambangan dilakukan. Sedangkan dampak negatif yang muncul adalah terjadinya perubahan pada penurunan kualitas lingkungan yang disebabkan oleh aktivitas pertambangan. Di Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatera Selatan memiliki potensi sumberdaya batubara yang tersedia 22.240,47 milyar ton dan masuk dalam daftar lima besar produsen batubara di Indonesia. Kebutuhan batubara di bukit asam rata-rata mengalami peningkatan 5,06 % setiap tahunnya (Arief dan Said, 2009).

Penambangan batubara merupakan suatu kegiatan yang berhubungan dengan lingkungan hidup. Dampak dari proses penambangan batubara adalah timbulnya air asam tambang. Timbulnya air asam tambang memiliki dampak yang besar bagi kelestarian lingkungan maupun masyarakat sekitar baik secara langsung maupun tidak langsung. Dampak secara langsung adalah terbentuknya air asam tambang. Pembentukan air asam tambang dipengaruhi oleh tiga faktor utama yaitu air, udara dan material yang mengandung mineral-mineral sulfida (Nurisman dkk, 2012). Pada sistem tambang terbuka sangat berpotensi terbentuk air asam tambang karena

sifatnya berhubungan langsung dengan udara bebas sehingga faktor-faktor yang dapat membentuk air asam tambang akan semakin mudah bereaksi.

Menurut Gautama (2014), air tambang merupakan air yang berasal dari penyaliran tambang (mine drainage) yang berpotensi mencemari badan perairan alamiah baik dalam bentuk air asam tambang maupun bukan air asam tambang jika tidak dikelola dan dikontrol dengan baik.

Adanya kegiatan penambangan batubara selain telah menciptakan kolam-kolam raksasa juga diperkirakan akan timbul tekanan terhadap ekosistem lingkungan sekitarnya, akibat adanya perubahan struktur batuan yang diikuti dengan perubahan kualitas fisika dan kimia tanah serta air di sekitarnya (Komarawidjaja, W. 2011).

Bekas areal penambangan batubara yang telah digenangi air akan menjadi kolam raksasa yang membentuk cekungan. Kolam bekas tambang batubara akan terbentuk apabila musim hujan tiba. Ketika musim hujan maka kupasan tanah dan sisa-sisa bekas penambangan batubara akan terlarut di dalamnya. Dampaknya air dalam kolam bekas batubara ini akan menjadi asam.

Kolam bekas tambang batubara di PT. Bukit Asam ini terletak tidak jauh dari penumpukan *stockpile* batubara berpotensi mempengaruhi kualitas lingkungan sekitarnya. Ketika musim hujan limbah cair yang berasal dari *stockpile* batubara ikut larut dan masuk kedalam kolam bekas tambang batubara dan sejumlah zat terlarut didalamnya. Supaya tidak mencemari lingkungan sekitarnya, air asam tersebut harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan. Liu dan Liptak (1999) menyatakan bahwa langkah penting didalam pengolahan limbah cair adalah dengan mengetahui karakteristik dari limbah cair. Dengan mengetahui karakteristik air asam yang akan diolah maka proses pengolahan limbah akan berjalan efektif (Binnie *et al.*, 2002). Maka sangat penting dan perlu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui karakterisasi air asam yang berada dalam kolam bekas tambang batubara dan dampaknya terhadap lingkungan sekitar.

2. Metodologi

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian terdiri dari pekerjaan lapangan dan pekerjaan laboratorium. Pekerjaan lapangan dilakukan dengan pengambilan air asam yang berasal dari kolam bekas tambang batubara. Dalam penelitian ini parameter yang diukur pH, TSS, Fe, Mn dan Cd dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan antara lain pH meter, botol sampel, cool box, kertas label, Oven, desikator, neraca analisis, gelas ukur, gelas beker, kertas saring, dan spektro. Bahan yang digunakan yaitu larutan, HNO₃, larutan Buffer 3, Larutan Buffer 10, Aquadest, dan larutan blanko.

Prosedur Penelitian

Sampel air asam di kolam bekas tambang batubara diambil dari tiga kolam bekas tambang batubara yang berbeda dengan menggunakan cara sampel sesaat (grab sampel). Sampel dimasukkan dalam botol kemudian diukur pH nya sebelum sampel diawetkan. Kemudian sampel air asam yang sudah dimasukkan botol dititrasi dengan larutan HNO₃ hingga pH kurang dari 2. Selanjutnya sampel air asam batubara dianalisis dengan parameter yang diukur meliputi pH, TSS, Fe, Mn dan Cd.

Analisis Data

Parameter air asam batubara yang diperoleh dari hasil pengukuran dianalisis di laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro. Hasil pengukuran parameter pH, TSS, Fe, dan Mn pada air asam tambang batubara dibandingkan dengan baku mutu limbah cair berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan hidup no. 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Limbah Cair Pertambangan Batubara

3. Hasil Dan Pembahasan

Analisis kualitas limbah asam cair kolam bekas tambang batubara dilakukan untuk mengetahui karakteristik air asam batubara yang berada dalam bekas tambang batubara. Limbah yang dihasilkan berasal dari limpasan air hujan yang membawa partikel-partikel halus batubara. Analisis kualitas air asam di kolam bekas tambang batubara dilakukan di tiga kolam IPAL yang terdapat di area *stockpile* batubara tersebut yaitu Kolam A, Kolam B dan Kolam C.

TSS

Total Suspended Solid (TSS) adalah padatan yang menyebabkan kekeruhan air, tidak terlarut, dan tidak dapat mengendap. Menurut Azwir (2006) bahwa padatan tersuspensi terdiri dari partikel-partikel yang ukuran maupun beratnya lebih kecil dari pada sedimen, seperti bahan-bahan Organik tertentu, tanah liat dan lainnya. Sementara itu partikel menurunkan intensitas cahaya yang tersuspensi dalam air umumnya terdiri dari fitoplankton, zooplankton, kotoran hewan, sisa tanaman dan hewan, kotoran manusia dan limbah industri (Azwir, 2006). Menurut (Effendi, 2002), TSS adalah kepadatan tersuspensi yang umumnya terdapat dalam senyawa organik dan anorganik. Pada pemeriksaan laboratorium TSS merupakan padatan yang tertahan pada saringan yang terdiri dari bagian yang bisa mengendap dan bagian yang tidak bisa mengendap. TSS merupakan padatan yang menyebabkan kekeruhan, tidak terlarut dan tidak mengendap langsung. Hasil yang diperoleh dari analisis TSS yaitu untuk sampel air kolam bekas tambang batubara pada kolam A, B dan C tidak memenuhi syarat mutu. Untuk sampel air asam tambang bekas batubara hasil yang diperoleh berturut-turut 522, 111534, 55726 mg/L ini menunjukkan bahwa hasil karakterisasi air asam tambang batubara melebihi syarat mutu yang diperbolehkan yaitu 200 mg/l. Tabel 1. Hasil Uji Kualitas air asam batubara pada Kolam A, Kolam B, dan Kolam C

Tabel 1. Hasil Uji Kualitas Limbah Cair Asam batubara

| No | Parameter | Satuan | Kolam A | Kolam B | Kolam C |
|----|-----------|--------|---------|---------|---------|
| 1. | TSS | mg/l | 522 | 111534 | 55726 |
| 2. | pH | mg/l | 5,02 | 5,24 | 5,65 |
| 3. | Fe | mg/l | 5,14 | 8,05 | 9,46 |
| 4. | Mn | mg/l | 0,189 | 1,011 | 2,276 |
| 5. | Cd | mg/l | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |

Padatan tersuspensi dalam air umumnya terdiri dari fitoplankton, zooplankton, kotoran manusia, kotoran hewan, lumpur, sisa tanaman dan hewan serta limbah industri. Jika padatan mempunyai nilai yang tinggi di permukaan perairan dapat mengurangi penetrasi sinar matahari yang masuk ke dalam air sehingga proses fotosintesis biota akan terganggu (Effendi, 2003).

Hasil pemeriksaan laboratorium dengan tiga kali pengambilan sampel menunjukkan kandungan TSS dikolam A sebesar 522 mg/l, dikolam B sebesar 111534 mg/l, serta di kolam C sebesar 55726 mg/l. Berdasarkan kondisi visual, air asam di Kolam A memang terlihat cukup jernih. Rendahnya kandungan TSS pada kolam A, jika dilihat kondisi di lapangan, hal ini terjadi karena kolam A tidak menerima limpasan dari area penumpukan batubara. Sementara kolam A merupakan kolam outlet dari pengolahan IPAL, dimana disekitarnya terdapat tanaman yang berfungsi sebagai bioremediasi dan juga fitoremediasi yang dapat mendegradasi larutan tersuspensi dan menjernihkan air asam yang ada dalam kolam bekas tambang batubara tersebut. Namun, batubara yang tercecer hanya dalam jumlah kecil, sehingga kadar TSS yang terdapat dalam air asam yang berasal dari kolam A memiliki kadar yang sangat rendah. Untuk Kolam B dan C, dikedua Kolam tersebut, parameter TSS memiliki kadar yang sangat tinggi yaitu berkisar 55726 mg/l – 111534 mg/l. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Plafflin dan Ziegler (2006) yang menyatakan bahwa padatan tersuspensi yang berasal dari *run-off stockpile* batubara berada pada

kadar diatas 2000 mg/l bahkan mencapai 10.000 mg/l. Tingginya kadar TSS di Kolam B dan C ini terjadi karena kedua Kolam tersebut menerima air limpasan yang berasal dari lapangan penumpukan (*stockpile*) batubara. Air hujan yang jatuh di area *stockpile* batubara membawa serta partikel-partikel halus batubara menuju Kolam B dan Kolam C. Banyaknya sisa-sisa batubara dan partikel-partikel yang terbawa air hujan menyebabkan kandungan TSS di kedua Kolam tersebut sangat tinggi.

pH

Nilai pH atau derajat keasaman menunjukkan kadar asam atau basa di dalam suatu larutan. pH adalah istilah untuk menyatakan intensitas keadaan basa atau asam sesuatu melalui kadar ion hidrogen atau (H⁺). Ion hidrogen menjadi faktor utama untuk mengetahui reaksi kimia. Ion H⁺ selalu ada dalam keseimbangan dinamis dengan air (H₂O), yang membentuk suasana untuk semua reaksi kimia yang berkaitan dengan masalah pencemaran air, meskipun sumber ion hidrogen tidak pernah habis. Nilai pH yang normal adalah sekitar netral antara pH 6- 8. Kristanto, (2002) menyatakan bahwa pH air buangan berbeda-beda tergantung jenis buangannya nilai pH merupakan salah satu faktor pembatas utama bagi kelangsungan hidup biota air. Pada pengolahan limbah cair, pH juga memiliki peranan penting, yaitu dalam mereduksi zat pencemar yang ada didalamnya (Effendi,2003). Perubahan keasaman pada air buangan baik kearah alkali (pH naik), maupun kearah asam (pH) menurun akan sangat mengganggu kehidupan air dan lingkungan sekitarnya. Menurunnya nilai pH akan memperbesar sifat korosif. Conel dan Miller (1995) menyatakan bahwa tingkat keasaman yang tinggi juga akan melarutkan logam berat sehingga meningkatkan kelarutan logam. Sebagai contoh, kelarutan logam tembaga akan meningkat seratus kali lipat setiap pH turun satu satuan (Eckenfelder, 1989). Dari hasil analisis kualitas limbah air dalam kolam bekas tambang batubara didapatkan bahwa nilai pH di kolam A 5,02; di kolam B 5,24 dan di kolam C nilai pH 5,65. Secara umum, nilai pH pada ketiga kolam ini berada pada nilai pH yang asam, sehingga melebihi batas ambang baku mutu.

Besi (Fe)

Besi adalah logam yang mungkin terdapat di perairan dan sedimen dengan konsentrasi yang tinggi. Besi merupakan unsur terbesar keempat yang terdapat pada kerak bumi dan termasuk unsur yang esensial bagi makhluk hidup. Besi diperlukan oleh tanaman dan hewan pada konsentrasi yang signifikan. Pada hewan, zat besi sangat penting dalam metabolisme oksidatif dan merupakan komponen kunci dalam hemoglobin. Menurut Kadlec dan Scott (2009), zat besi merupakan elemen penting dalam sintesis klorofil, sitokrom, dan dalam enzim nitrogenase. Pada tumbuhan, besi juga berperan dalam sistem enzim dan transfer elektron pada proses fotosintesis. Namun, kadar besi yang berlebihan dapat menghambat fiksasi unsur lainnya (Effendi, 2003).

Hasil analisis air asam pada kolam bekas tambang batubara menunjukkan kandungan besi pada kolam A memiliki nilai 5,14 mg/l, kolam B memiliki kandungan besi sebesar 8,05 mg/l serta kandungan besi di kolam C sebesar 9,46 mg/l. Kandungan besi yang tinggi dapat membahayakan kehidupan mikroorganisme akuatik. Moore *dalam* Effendi (2003) menyatakan bahwa kadar besi 1,0 mg/l dianggap membahayakan kehidupan mikroorganisme akuatik.

Mangan (Mn)

Mangan merupakan nutrisi esensial bagi tumbuhan dan hewan. Logam ini berperan dalam pertumbuhan dan merupakan salah satu komponen penting pada sistem enzim. Defisiensi mangan dapat mengakibatkan pertumbuhan terhambat, serta sistem saraf serta proses reproduksi menjadi terganggu. Pada tumbuhan, Mangan merupakan unsur esensial dalam proses metabolisme. Effendi (2003) menyatakan meskipun mangan tidak bersifat toksik, mangan dapat mengendalikan unsur toksik di perairan, misalnya logam berat. Di perairan alami, kandungan mangan ditemukan antara 0,1 dan 1 mg/l. Konsentrasi mangan yang lebih tinggi dapat ditemukan di perairan dengan tingkat pH rendah (Dimkic, Heinz dan Michael 2008). Hasil analisis air asam batubara di kolam bekas tambang batubara menunjukkan kandungan mangan pada kolam A

memiliki nilai 0,189 mg/l, kolam B memiliki kandungan mangan sebesar 1,011 mg/l serta kandungan mangan dikolam C sebesar 2,276 mg/l.

Kadmium (Cd)

Hasil analisis air asam batubara di kolam bekas tambang batubara menunjukkan kandungan Kadmium pada kolam A memiliki nilai 0,011 mg/l, kolam B memiliki kandungan mangan sebesar 0,0101 mg/l serta kandungan mangan dikolam C sebesar 0,01006 mg/l. Hasil analisis kandungan Cd pada kolam A, B, dan C menunjukkan tidak melebihi nilai baku mutu yang telah Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 yaitu 0,1 mg/L.

Baku Mutu Limbah Cair

Limbah cair pada air asam batubara yang berada pada kolam A, B dan C merupakan bekas industri penambangan batubara. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 tentang baku mutu limbah cair pertambangan batubara. Tabel 2. Perbandingan Baku Mutu limbah cair dan Karakteristik No Parameter Satuan BML Kolam A, Kolam B, dan Kolam C

Tabel 2. Perbandingan Baku Mutu Limbah Cair dan Karakteristik

| No | Parameter | Satuan | BML | Kolam A | Kolam B | Kolam C |
|----|-----------|--------|-------|---------|---------|---------|
| 1. | TSS | mg/l | 200 | 522 | 111534 | 55726 |
| 2. | pH | mg/l | 6 – 9 | 5,02 | 5,24 | 5,65 |
| 3. | Fe | mg/l | 7 | 5,14 | 8,05 | 9,46 |
| 4. | Mn | mg/l | 4 | 0,189 | 1,011 | 2,276 |
| 5. | Cd | mg/l | 0,1 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |

Keterangan : BML = Baku Mutu Lingkungan

Pada Tabel 2 diatas dapat dilihat perbandingan Baku Mutu Limbah Cair yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 tentang baku mutu limbah cair pertambangan batubara.

Pada Tabel 2 menunjukkan bahwa karakteristik air asam batubara yang masuk ke Kolam A, B dan C, untuk parameter pH, kandungan Fe dan Mn sedangkan untuk kandungan Cd masih dibawah baku mutu sesuai dengan baku mutu lingkungan yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan hidup No. 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Limbah Cair Pertambangan Batubara tentang Baku Mutu Limbah Cair Kegiatan Pertambangan Batubara. Namun demikian, pemerintah sebaiknya meninjau kembali baku mutu kandungan Fe yang sebesar 9,46 mg/l dan berada jauh diatas 1,0 mg/l. Hal ini mengingat Moore *dalam* Effendi (2003) menyatakan bahwa kadar besi 1,0 mg/l dianggap membahayakan kehidupan mikroorganisme akuatik. TSS yang terdapat dalam limbah air asam bekas tambang batubara berada diatas baku mutu yang telah ditetapkan. Kandungan TSS mencapai nilai 55726 mg/l sementara baku mutu lingkungan menetapkan kandungan TSS sebesar 200 mg/l. Dengan demikian, kandungan TSS didalam limbah air asam bekas kolam batubara berada diatas baku mutu yang ditetapkan.

4. Simpulan

Air asam tambang batubara di kolam bekas tambang dari hasil karakterisasi memiliki kandungan total padatan tersuspensi (TSS) yang sangat tinggi, yaitu mencapai 111534 mg/l, selain itu, nilai pH air asam batubara di tambang bekas penambangan masih diatas baku mutu. Untuk kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) tertinggi pada air asam tambang masing-masing sebesar 9,46 mg/l dan 2,276 mg/l. Sedangkan untuk kandungan Cd masih dibawah baku mutu yang ditetapkan kurang dari 0,01 mg/l.

5. Saran

Pengolahan air asam pada kolam bekas tambang batubara PT. Bukit Asam perlu dilakukan. Saat ini metoda menggunakan dolomit sebagai absorben belum optimal sehingga perlu dilakukan pengolahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Heru Susanto, ST, MM., MT dan Dr. Sudarno, M.Sc sebagai promotor dan co-promotor yang telah memberikan dukungan, motivasi dan sabar membimbing penelitian yang sedang berlangsung.

Daftar Pustaka

- Arief.T, Said.M. 2009. Analisis Kebutuhan Batubara dan Gas Bumi Sumatera Selatan Dalam Menunjang Pengelolaan Sumberdaya Energi Yang Berwawasan Lingkungan Sebagai Salah Satu Sumber Pendapatan Asli Daerah (PAD) Sumsel. *Jurnal Pembangunan Manusia* Edisi 5
- Azwir. 2006. Analisa Pencemaran Air Sungai Tapung Kiri Oleh Limbah Industri 1995. *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. UI Press. Jakarta
- Basic Water Treatmen. Third Edition. RSC Press. Cambridge UK Connel, D. W. and Miller, G.J. Binnie .C; Kimber.M; Smethurst.G. 2002.
- Dimkic, Heinz-Jurgen, Michael. 2008. *Groundwater Management in Large River Basin*. Iwa Publishing. London
- Eckenfelder, W.W. 1989. *Industrial Water Pollution Control. Second Edition*. Mc. Graw Hill Book Company. Singapore
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air*. Penerbit Kanisius. Yogyakarta
- Gautama, R. S., 2014. *Pembentukan, Pengendalian dan Pengolahan Air Asam Tambang*. ITB: Bandung.
- Kadlec, Robert H., Scott D. Wallace. 2009. *Treatment Wetlands*. Second Edition. CRC Press. New York
- Komarawidjaja, W. 2011. Status Ekosistem Lingkungan Void Surya, Kolam Pasca Penambangan Batubara Di Kalimantan Timur. *Jurnal HidrosfirIndonesia*, PTL-BPPT 6(1):
- Kristanto, P. 2004. *Ekologi Industri*. Andi Offset. Surabaya
- Liu, H. F. D , Liptak. B. G. 1999. *Environmental Engineer's Handbook*. CRC Press. USA
- Nurisman, E., Cahyadi, R., Hadriansyah, I., 2012. Studi Terhadap Dosis Penggunaan Kapur Tohor (Cao) Pada Proses Pengolahan Air Asam Tambang Pada Kolam Pengendap Lumpur Tambang Air Laya PT. Bukit Asam (Persero), Tbk. *Jurnal Teknik Patra Akademik* Edisi 5: Palembang.
- Peraturan Perundang-Undangan Pengelolaan Lingkungan Hidup Provinsi Sumatera Selatan Tahun 2005
- Plaffin, JR and Ziegler, EN. 2006. *Encyclopedia of Environmental Science & Engineering*. CRC Press. USA