



Potensi Pemanfaatan Sampah Menjadi Energi di Kabupaten Kotabaru (Provinsi Kalimantan Selatan)¹

Potential Waste-to-Energy Utilization in Kotabaru Regency (South Borneo Province)

Rian Yaitsar Chaniago^a

^a Dosen Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember

ABSTRAK

Meningkatnya jumlah penduduk, ekonomi yang berkembang pesat, urbanisasi yang pesat, dan peningkatan taraf hidup masyarakat telah mempercepat timbunan sampah. Jumlah timbunan sampah Kabupaten Kotabaru meningkat dari 47.540,81 ton/tahun pada tahun 2021 menjadi 66.175,43 ton/tahun pada tahun 2024. Sebagian besar sampah yang tersisa saat ini dibuang di tempat pembuangan akhir. Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah dengan menerapkan pengolahan sampah menjadi energi atau yang dikenal dengan *Waste to Energy (WtE)*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi pemanfaatan energi dari sampah di Kabupaten Kotabaru. Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan nilai tipikal pada Tchobanoglous et. al. (1993). Hasil analisis menunjukkan formula kimia sampah Kabupaten Kotabaru tiap hari tanpa kandungan sulfur adalah $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (tanpa air) dan $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (dengan air). Sedangkan untuk formula kimia dengan kandungan sulfur adalah $C_{463}H_{714}O_{252}N_{14}S$ (tanpa air) dan $C_{463}H_{743}O_{267}N_{14}S$ (dengan air). Formula kimia sampah dengan sulfur selanjutnya dianalisis untuk menentukan potensi WtE dari sampah di Kabupaten Tabalong. Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi energi dengan menggunakan berat basah adalah sebesar 8.993 Btu/hari atau 9.489 kJ /hari. Sedangkan potensi energi jika sampah menggunakan berat kering adalah 8.768 Btu/hari atau 9.251 kJ/hari.

Kata kunci: Energi, Sampah, Sampah Menjadi Energi

ABSTRACT

The increasing population, rapidly growing economy, rapid urbanization, and the improved standard of living of the community have speeded up waste generation. The amount of waste generation in Kotabaru Regency increased from 47.540,81 tons/year in 2021 to 66.175,43 tons/year in 2024. Most of the residual waste is currently disposed of in landfills. One of the strategies that can be applied is to implement waste-to-energy processing, known as *Waste to Energy (WtE)*. The purpose of this study is to determine the potential for energy utilization from waste in Kotabaru Regency. The method used is by using the typical value in Tchobanoglous et. al. (1993). The results of the analysis show that the chemical formula of Kotabaru Regency waste per day without sulfur content is $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (without water) and $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (with water). Meanwhile, the chemical formula with sulfur content is $C_{463}H_{714}O_{252}N_{14}S$ (without water) and $C_{463}H_{743}O_{267}N_{14}S$ (with water). The chemical formula of waste with sulfur was then analyzed to determine the WtE potential of waste in Tabalong Regency. The results of the analysis show that the potential energy using wet weight is 8.993 Btu/day or 9.489 kJ/day. While the potential energy if the waste uses dry weight is 8.768 Btu/day or 9.251 kJ/day.

Keywords: Energy, Solid Waste, Waste to Energy

¹ Info Artikel: Diterima (*received*) 22 Juni 2025. Disetujui (*accepted*) 29 Juni 2025. Diterbitkan (*published*) 30 Juni 2025.

² Email: yaitsarchaniago@unej.ac.id

PENDAHULUAN

Sampah merupakan permasalahan krusial bagi Indonesia (Misrawati & Zaim, 2024). Meningkatnya jumlah penduduk, ekonomi yang berkembang pesat, urbanisasi yang pesat, dan peningkatan taraf hidup masyarakat telah mempercepat timbulan sampah secara global (Song et. al., 2015). Sampah merupakan salah satu sektor yang menyumbang emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 3,2% dari total emisi GRK di seluruh dunia (Aprilia, 2021). Kompleksitas pengelolaan sampah telah menjadi tantangan terhadap pembangunan berkelanjutan (Mojtahedi et. al., 2021; Wibisono et. al., 2020). Tata kelola pengelolaan sampah yang buruk dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya (Chaniago, 2024). Dampak negatif dari pengelolaan sampah meliputi tersumbatnya sistem drainase karena sampah, pembakaran sampah yang menyebabkan pencemaran udara, tingginya biaya pengumpulan sampah oleh pemerintah, dan gangguan kesehatan akibat sampah seperti diare, cacingan, sesak napas, penyakit kulit, nyeri dada, gangguan pernapasan, dan lainnya (Axmalia & Mulasari, 2020; Dominici, 2025).

Kabupaten Kotabaru merupakan salah satu dari 13 Kabupaten/Kota yang berada di Provinsi Kalimantan Selatan. Berdasarkan data SIPSN 2024, jumlah timbulan sampah Kabupaten Kotabaru meningkat dari 47.540,81 ton/tahun pada tahun 2021 menjadi 66.175,43 ton/tahun pada tahun 2024. Tingginya jumlah timbulan sampah yang dihasilkan berkaitan dengan kurangnya kesadaran dan pengetahuan masyarakat dalam memilih, memilah, dan mengelola sampah, serta minimnya lahan sebagai tempat pembuangan sampah (Azhari, 2022). Sebagian besar sampah yang tersisa saat ini dibuang di tempat pembuangan akhir (Perrot & Subiantoro, 2018). Situasi global saat ini menuntut pendekatan yang komprehensif dan efisien terhadap pengelolaan limbah untuk mengurangi dampak lingkungan (Teixeira & Guerra, 2024). Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah dengan menerapkan pengolahan sampah menjadi energi atau yang dikenal dengan *Waste to Energy (WtE)* (Vertakova & Plotnikov, 2019).

Konsep dari teknologi WtE adalah dengan mengekstraksi sampah menjadi energi (Khan et. al., 2022). Teknologi WtE berkaitan dengan paradigma baru sampah yakni memandang limbah sebagai sumber daya berharga yang dapat didaur ulang dan digunakan kembali (Almansour & Akrami, 2024). Teknologi ini dapat mereduksi sampah yang masuk ke TPA (Farhah et. al., 2025). Teknologi ini memungkinkan pemulihan energi sebagai panas dan tenaga listrik serta memfasilitasi 'pembersihan' siklus dengan penghancuran zat organik berbahaya. WtE mengubah limbah dengan volume dan daya larut tinggi menjadi residu dengan volume dan daya larut lebih kecil, sehingga mengurangi kebutuhan akan tempat pembuangan akhir (Brunner & Morf, 2024). Berdasarkan permasalahan tersebut, analisis potensi energi dari sampah di Kabupaten Kotabaru perlu dilakukan. Penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan daerah dalam memilih alternatif teknologi yang sesuai untuk Kabupaten Kotabaru.

METODE PENELITIAN

Timbulan sampah kota di Indonesia dinilai berdasarkan data sumber, laju timbulan, dan komposisi pada tahun 2024. Data diperoleh dari situs web inventarisasi timbulan sampah nasional milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) yakni Sistem

Informasi Sampah Nasional (SIPSN). Menggunakan data timbunan dan komposisi sampah dari SIPSN, kandungan energi dapat diprediksi menggunakan metode Tchobanoglous et. al. (1993). Tahapan dalam analisis data terdiri dari:

1. Analisis karakteristik kimia pada sampah

Analisis karakteristik kimia pada sampah dilakukan dengan menggunakan pendekatan karakteristik kimia sampah menggunakan nilai tipikal *proximate analysis* dan *ultimate analysis* pada Tchobanoglous et. al. (1993) dan yakni dengan:

a. Menentukan komposisi kimiawi sampah

Komposisi kimia sampah ditentukan menggunakan persamaan berikut:

Komposisi kimia elemen = persentase kimia sampah $\times$ berat kering sampah

Komposisi kimiawi sampah ditentukan berdasarkan dua kondisi yakni saat menggunakan berat basah dan berat kering.

b. Menghitung komposisi molar dari elemen dengan mengabaikan kandungan abu

Analisis komposisi molar dari elemen dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

Komposisi molar elemen = Berat elemen / Massa Atom

2. Perhitungan kandungan energi pada sampah

Metode yang digunakan mengacu pada Tchobanoglous et. al. (1993) yakni dengan persamaan berikut:

$$Kandungan\ energi = 145C + 610\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 40S + 10N$$

dengan C fraksi kering karbon, H fraksi kering hidrogen, O fraksi kering oksigen, S fraksi kering sulfur, dan N fraksi kering nitrogen (Novita dan Damanhuri, 2010).

ANALISIS KARAKTERISTIK KIMIA SAMPAH

Peningkatan produksi sampah diprediksi terjadi di masa mendatang (Chen et. al., 2020). Praktik pengelolaan sampah yang inovatif dibutuhkan untuk mengatasi peningkatan volume sampah secara global (Sharma et. al., 2024). Pemanfaatan sampah menjadi Energi merupakan solusi berkelanjutan untuk pengelolaan limbah yang tidak terpilah (Cucchiella et. al., 2014). Konsep pemanfaatan sampah menjadi energi atau *Waste to Energy* (WtE) difokuskan pada analisis energi untuk pembangkitan listrik penggunaan akhir. Implementasi WtE memerlukan informasi terkait dengan karakteristik kimia pada sampah (Hla & Roberts, 2015). Informasi mengenai sifat kimia sampah berguna dalam menentukan alternatif teknologi pendaur ulangan pada pengelolaan sampah. Sampah pada kondisi eksisting biasanya bervariasi. Variasi jenis sampah ini menentukan efisiensi dari masing-masing teknologi (AlQattan et. al., 2018).

ANALISIS KELEMBAPAN, *VOLATILE MATTER*, DAN *NON-COMBUSTABLE MATTER*

Data dasar untuk menentukan persentase kelembapan, *volatile matter*, dan *non-combustable matter* sampah Kabupaten Kotabaru diperoleh dari data SIPSN (2024). Berdasarkan hasil analisis diketahui, komposisi sampah di Kabupaten Kotabaru terdiri dari sampah sisa makanan sebesar 123.286 kg/hari, kertas sebesar 22.663 kg/hari, kayu 1.269 kg/hari, kain sebesar 725 kg/hari, karet/ kulit sebesar 725 kg/hari, plastik sebesar 22.482

kg/hari, logam sebesar 1.632 kg/hari, kaca 1.994 kg/hari, dan lainnya sebesar 6.527 kg/hari. Menggunakan data tersebut, selanjutnya analisis kelembapan, *volatile matter*, dan *non-combustible* sampah dapat ditentukan menggunakan persentase hasil analisis proksimat dari Tchobanoglous et. al. (1993). Hasil analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis kelembapan, *volatile matter*, dan *non-combustible* sampah

Komposisi	MC (%) [*]	VM (%) [*]	FC (%) [*]	NC (%) [*]	MC (kg/hari)	VM (kg/hari)	FC (kg/hari)	NC (kg/hari)
Sisa Makanan	70	21	3,6	5	86.300	7.915	1.331	1.849
Kertas	10,2	76	8,4	5,4	2.312	15.447	1.710	1.099
Kayu	20	68,1	11	0,6	254	691	112	6
Kain	10	66	17,5	6,5	73	431	114	42
Karet/kulit	8,43	56	1,23	42,9	61	371	8	285
Plastik	0,2	96	2	2	45	21.494	449	449
Logam	5	0	0	98	82	0	0	1.519
Kaca	2	0	0	98	40	0	0	1.915

Keterangan

MC : *Moisture Content*

VM : *Volatile Matter*

FC : *Fixed Carbon*

NC : *Non-combustible*

^{*}Tchobanoglous et. al. (1993)

Analisis terhadap sampah lainnya (residu sampah) tidak dilakukan. Analisis kimia terhadap sampah lainnya yang bersifat heterogen berbeda-beda tergantung dari komposisi residu sampah masing-masing studi kasus. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa sampah yang dapat dimasukkan dalam perencanaan adalah sampah sisa makanan, kertas, kayu, kain, karet/kulit, dan plastik. Hal yang menjadi pertimbangan adalah persentase kelembapan, *volatile matter*, dan *non-combustible matter*. Sedangkan logam dan kaca, diabaikan karena nilai *non-combustible* sampah tersebut jika diolah sebesar 98%.

ANALISIS KOMPONEN UTAMA PENYUSUN SAMPAH

Terdapat 5 elemen yang digunakan untuk menganalisis kandungan energi dalam sampah antara lain karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur (Baawain et. al., 2017). Data persentase kimia sampah diperoleh dari Tchobanoglous et. al. (1993) dan Gunamantha & Sarto (2012). Hasil analisis komposisi kimia sampah disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia sampah

Komposisi	Berat kering sampah (lb/hari)	Berat (%)**						Berat (lb/hari)					
		C	H	O	N	S	Abu	C	H	O	N	S	Abu
Sisa Makanan*	28.111	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0	39.139	5.219	30.659	2.120	326	4.077
Kertas*	39.735	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0	19.472	2.602	19.876	135	90	2.692
Kayu*	4.165	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5	1.108	134	956	4	2	34
Kain-Tekstil*	7.028	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2	691	92	576	32	3	46
Karet-kulit**	2.383	46,3	0,0	0,0	3,8	0,1	42,9	678	0	0	56	2	628
Plastik*	62.343	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0	29.678	3.561	11.278	0	0	4.946

*Tchobanoglous et. al. (1993)

** Gunamantha and Sarto (2012)

Komposisi molar dari masing-masing elemen dapat ditentukan menggunakan data distribusi presentase elemen. Penentuan distribusi presentase dari elemen sampah dengan dan tanpa air dilakukan dengan menjumlahkan hasil analisis saat berat basah dan berat kering. Perbedaan hasil analisis ada di unsur H dan O. Hasil analisis komposisi molar dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi molar sampah

Komponen	Massa Atom (A_r), lb/mol	Mol	
		Tanpa H ₂ O	Dengan H ₂ O
C	12,01	10.816	10.816
H	1,01	16.661	17.356
O	16,00	5.875	6.226
N	14,01	319	319
S	32,07	23	23

Penentuan rumus kimia sampah dapat dilakukan dengan menormalisasi rasio mol nitrogen dan sulfur. Normalisasi rasio mol nitrogen dan sulfur dilakukan dengan membagi dengan mol nitrogen atau mol sulfur. Hasil analisis menunjukkan formula kimia sampah Kabupaten Kotabaru tiap hari tanpa kandungan sulfur adalah $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (tanpa air) dan $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (dengan air). Sedangkan untuk formula kimia dengan kandungan sulfur adalah $C_{463}H_{714}O_{252}N_{14}S$ (tanpa air) dan $C_{463}H_{743}O_{267}N_{14}S$ (dengan air). Formula kimia sampah dengan sulfur selanjutnya dianalisis untuk menentukan potensi WtE dari sampah di Kabupaten Tabalong. Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi energi dengan menggunakan berat basah adalah sebesar 8.993 Btu/hari atau 9.489 kJ /hari. Sedangkan potensi energi jika sampah menggunakan berat kering adalah 8.768 Btu/hari atau 9.251 kJ/hari.

KESIMPULAN

Meningkatnya jumlah penduduk, ekonomi yang berkembang pesat, urbanisasi yang pesat, dan peningkatan taraf hidup masyarakat telah mempercepat timbulan sampah. Jumlah timbulan sampah Kabupaten Kotabaru meningkat dari 47.540,81 ton/tahun pada tahun

2021 menjadi 66.175,43 ton/tahun pada tahun 2024. Sebagian besar sampah yang tersisa saat ini dibuang di tempat pembuangan akhir. Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah dengan menerapkan pengolahan sampah menjadi energi atau yang dikenal dengan *Waste to Energy (WtE)*. Teknologi WtE berkaitan dengan paradigma baru sampah yakni memandang limbah sebagai sumber daya berharga yang dapat didaur ulang dan digunakan kembali. Hasil analisis menunjukkan formula kimia sampah Kabupaten Kotabaru tiap hari tanpa kandungan sulfur adalah $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (tanpa air) dan $C_{34}H_{52}O_{18}N$ (dengan air). Sedangkan untuk formula kimia dengan kandungan sulfur adalah $C_{463}H_{714}O_{252}N_{14}S$ (tanpa air) dan $C_{463}H_{743}O_{267}N_{14}S$ (dengan air). Formula kimia sampah dengan sulfur selanjutnya dianalisis untuk menentukan potensi WtE dari sampah di Kabupaten Tabalong. Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi energi dengan menggunakan berat basah adalah sebesar 8.993 Btu/hari atau 9.489 kJ /hari. Sedangkan potensi energi jika sampah menggunakan berat kering adalah 8.768 Btu/hari atau 9.251 kJ/hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Almansour, M., & Akrami, M. (2024). Towards Zero Waste: An In-Depth Analysis of National Policies, Strategies, and Case Studies in Waste Minimisation. *Sustainability* (Switzerland), 16(22), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su162210105>
- AlQattan, N., Acheampong, M., Jaward, F. M., Ertem, F. C., Vijayakumar, N., & Bello, T. (2018). Reviewing the Potential of Waste-to-Energy (WTE) Technologies for Sustainable Development Goal (SDG) Numbers Seven and Eleven. In *Renewable Energy Focus* (Vol. 27, pp. 97–110). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.09.005>
- Aprilia, A. (2021). *Waste Management in Indonesia and Jakarta: Chalenges and Way Forward*.
- Axmalia, A., & Mulasari, S. A. (2020). Dampak Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) Terhadap Gangguan Kesehatan Masyarakat. *Jurnal Kesehatan Komunitas*, 6(2), 171–176. <https://doi.org/10.25311/keskom.vol6.iss2.536>
- Azhari, I. (2022). Improving Community Welfare by Improving Waste Functions. *Budapest International Research and Critics Institute Journal (BIRCI-Journal)*, 5(1), 461–470. <https://doi.org/10.33258/birci.v5i1.3628>
- Baawain, M., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., & Al-Amri, W. (2017). Ultimate Composition Analysis of Municipal Solid Waste in Muscat. *Journal of Cleaner Production*, 148, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.013>
- Brunner, P. H., & Morf, L. S. (2024). Waste to energy, indispensable cornerstone for circular economy: A mini-review. In *Waste Management and Research*. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0734242X241227376>
- Chaniago, R. Y. (2024). Key Factors in the Effectiveness of Solid Waste Transportation System. *Jurnal Proteksi: Jurnal Lingkungan Berkelanjutan*, 4(2), 1–12.
- Chen, D. M., Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A., & Popp, A. (2020). The World's Growing Municipal Solid Waste: Trends and Impacts. *Environmental Research Letters*, 15(7), 1–12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8659>
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Gastaldi, M. (2014). Sustainable Management of Waste-to-Energy Facilities. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 33, pp. 719–728). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.015>

- Dominici, G. (2025). *Technology and Society: Boon or Bane?* (G. Dominici, Ed.). Business Systems Laboratory.
- Farhah, A. D., Chaerul, M., & Tomo, H. S. (2025). Dampak Lingkungan dari Teknologi Pengolahan Sampah Menjadi Energi di Indonesia: Perspektif Life Cycle Assessment. *Jurnal Serambi Engineering*, *X*(2), 12707–12718.
- Gunamantha, M., & Sarto. (2012). Life Cycle Assessment of Municipal solid Waste Treatment to Energy Options: Case Study of KARTAMANTUL region, Yogyakarta. *Renewable Energy*, *41*, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.008>
- Hla, S. S., & Roberts, D. (2015). Characterisation of Chemical Composition and Energy content of Green waste and Municipal solid Waste from Greater Brisbane, Australia. *Waste Management*, *41*, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.039>
- Khan, H. A., López-Maldonado, E. A., Alam, S. S., Khan, N. A., López, J. R. L., Herrera, P. F. M., Abutaleb, A., Ahmed, S., & Singh, L. (2022). Municipal Solid Waste Generation and the Current State of Waste-to-energy Potential: State of Art Review. *Energy Conversion and Management*, 267.
- Misrawati, K., & Zaim, Z. (2024). Semi-Aerobic Landfill System as Alternative Solution for Indonesian Landfill. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *22*(6), 1400–1411. <https://doi.org/10.14710/jil.22.6.1400-1411>
- Mojtahedi, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Newton, S. (2021). Sustainable Vehicle Routing Problem for Coordinated Solid Waste Management. *Journal of Industrial Information Integration*, *23*, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100220>
- Novita, D. M., & Damanhuri, E. (2010). Perhitungan Nilai Kalor Berdasarkan Komposisi dan Karakteristik Sampah Perkotaan di Indonesia Dalam Konsep Waste To Energy. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Vol 16 (2). 103- 114.
- Perrot, J. F., & Subiantoro, A. (2018). Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(9), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su10093114>
- SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. <https://sipsn.kemenvh.go.id/sipsn/public/data/timbulan> (diakses 22 Juni 2025).
- Song, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Minimizing the Increasing Solid Waste through Zero Waste Strategy. *Journal of Cleaner Production*, *104*, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.027>
- Tchobanoglous G., Theisen H., and Vigil S. A., (1993). Integrated Solid Waste Management. *McGraw-Hill International Edition*.
- Teixeira, C. A., & Guerra, M. (2024). Municipal Solid Waste—Addressing Environmental Concerns. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 3, pp. 1–5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16031235>
- Vertakova, Y. V., & Plotnikov, V. A. (2019). The integrated approach to sustainable development: The case of energy efficiency and solid waste management. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(4), 194–201. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8009>
- Wibisono, H., Firdausi, F., & Kusuma, M. E. (2020). Municipal Solid Waste Management in Small and metropolitan Cities in Indonesia: A review of Surabaya and Mojokerto. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *447*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/447/1/012050>