

KARAKTERISASI UNSUR-UNSUR DALAM
BATUAN SULFUR ELEMENTAL DENGAN
MEYODE SPEKTROMETRI PENDAR SINAR-X.

Evarista Ristin P.I, June Melawati, Tommy Hutabarat
dan Bungkus.P.

KARAKTERISASI UNSUR-UNSUR DALAM BATUAN SULFUR ELEMENTAL DENGAN METODE SPEKTROMETRI PENDAR SINAR-X

Evarista Ristin P.I*, June Mellawati*, Tommy Hu abarat*, Bungkus P*

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi - BATAN

ABSTRAK

KARAKTERISASI UNSUR-UNSUR DALAM BATUAN SULFUR ELEMENTAL DENGAN METODE SPEKTROMETRI PENDAR SINAR-X. Sulfur elemen ilumumnya terdapat pada daerah vulkanik yang dapat terasosiasi dengan beberapa mineral seperti calcite, dolomit, gypsum, anhidrit barit dan celestite. Sedangkan kulit bumi diperkirakan mengandung sulfur 0,1 % yang umumnya berupa senyawa sulfida besi dan sulfida logam berat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui unsur-unsur yang terdapat dalam batuan sulfur elemental yang diambil dari Papandayan, Tangkuban Prahu, Ciater - Jawa Barat, Sibayak - Sumatra Utara dan Cugung Rajabasa - Lampung. Analisis unsur dilakukan dengan pencacahan contoh batuan menggunakan spektrometer penlar sinar-x. Unsur S, P, Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Zr dan Nb terdapat pada kelima contoh batuan sulfur elemental tersebut dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Konsentrasi sulfur terbesar terdapat pada contoh dari Tangkuban Prahu (97,25 %) diikuti Papandayan (91,26 %), Sibayak (84,9 %), Cugung Rajabasa (82,98 %) dan Ciater (64,12 %). Pada contoh dari Sibayak dan Cugung Rajabasa terdapat unsur silikon yang cukup besar yaitu 7,77 % dan 13,49 %, sedangkan pada contoh dari Ciater terdapat unsur besi 13,6 %.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF ELEMENTS IN ELEMENTAL SULFUR ROCK USING X-RAY FLOURESCENCE SPECTROMETRI METHOD. Most of elemental sulfur located in volcanic region are associated with some minerals as calcite, dolomite, gypsum, anhydrite, barite and celestite. The earth's crust is estimated as being 0,1 % sulfur which occurs mostly as iron and heavy metal sulfides. The aim of this study is to know element composition in elemental sulfur rocks which taken from West Java namely Papandayan, Tangkuban Prahu, Ciater, Sibayak - North Sumatra and Cugung Rajabasa - Lampung. These rocks are analyzed for their element content using counting system by means of x-ray spectrometer. The elements S, P, Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Zr and Nb with different concentration are occurred in whole elemental sulfur samples. The highest sulfur content is found from Tangkuban Prahu 97.25 % following Papandayan 91.26 %, Sibayak 84.9 %, Cugung Rajabasa 82.98 % and Ciater 64.12 %. The Sibayak and Cugung Rajabasa samples show a specific characteristic by the presence of 7.77 % and 13.49 % silicon element respectively while sample from Ciater contains iron 13.6 %.

PENDAHULUAN

Sulfur ($Z=16$) merupakan unsur non logam dan dalam dapat bersenyawa dengan unsur lain membentuk persenyawaan sulfat (valensi +6), sulfida (valensi -2) dan sulfur elemental (valensi 0). Sulfur pertama kali ditemukan sebagai unsur oleh Lavoisier pada tahun 1777.

Sulfur elemental umumnya terdapat pada daerah vulkanik dan 95 % atau lebih berasal dari proses penumpukan sedimen (*deposit sedimentary*) yang tercampur dengan mineral calcite, dolomite, gypsum, anhidrit dan bahan-bahan bitumen yang kadang-kadang tercampur dengan barit atau celestite. Misalnya pada deposit Sisilian kandungan batuannya mencapai 17 % (selain sulfur elemental). Di Gulf Coast deposit sulfur elemental terdapat dalam cekungan batuan yang terlapisi oleh kubah garam pada kedalaman 950-1500 kaki, umumnya garam tersebut adalah lapisan anhidrit atau calcite anhidrit. Ketebalan lapisan sulfur bisa mencapai 100 kaki dengan rata-rata kandungan sulfur mencapai 50 % (1).

Kegunaan utama sulfur elemental adalah untuk pemelautan asam sulfat. Asam ini umumnya digunakan pada industri pupuk (20 %), penyulingan minyak (16 %), bahan-bahan kimia (13 %), produksi batubara (11%), pengasaman besi dan baja (10 %), industri metalurgi (8%) dan sebagian digunakan untuk industri cat, bahan peledak, film rayon atau sellulosa, tekstil, pulp sulfat dan karet (2 %) (2).

Untuk analisis beberapa unsur logam yang terkandung dalam batuan sulfur elemental dapat digunakan alat spektrometer pendar sinar-x (X-Ray Flourescence -XRF). Metode ini mempunyai kelebihan, yaitu dapat digunakan untuk analisis sampel dalam bentuk padatan dan cairan tanpa merusak komposisi sampel (*non destructive method*). Dasar analisis pendar sinar-x adalah pencacahan sinar-x yang dipancarkan oleh suatu unsur akibat pengisian kembali kekosongan elektron pada orbital yang lebih dekat dengan inti (karena terjadinya eksitasi elektron) oleh elektron yang terletak pada orbital yang lebih luar. Pengisian kembali elektron pada orbital K akan menghasilkan spektrum sinar-x deret K, pengisian elektron pada orbital berikutnya menghasilkan spektrum sinar-x deret L, deret M, deret N dan seterusnya. Setiap unsur akan memancarkan sinar-x dengan energi

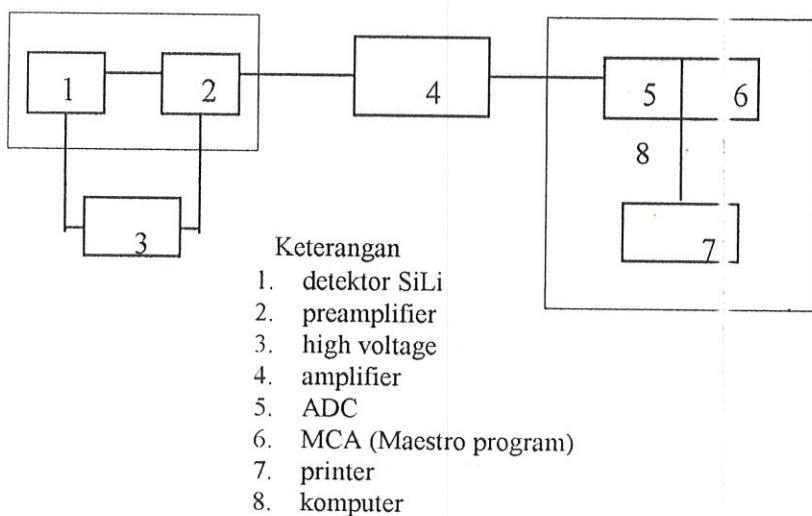
yang karakteristik. Sifat karakteristik inilah yang digunakan untuk analisis kualitatif. Energi sinar-x yang dipancarkan dideteksi dengan detektor penangkap sinar-x yang kemudian diubah menjadi pulsa-pulsa listrik lalu diperkuat oleh penguat awal dan penguat akhir sehingga terbentuk sebuah spektrum. Luas masing-masing puncak pada spektrum digunakan untuk analisis kuantitatif. Eksitasi dilakukan dengan menggunakan sumber radioisotop pemancar sinar-x, yaitu : ^{55}Fe , ^{109}Cd dan ^{241}Am . Pemilihan sumber sinar-x untuk pengeksitasi didasarkan pada jenis unsur yang akan dianalisis, yaitu sumber radiasi primer harus mempunyai energi lebih besar dari energi ikat elektron yang akan dieksitasi (3,4). Analisis kuantitatif dilakukan dengan cara mengintegrasikan intensitas sinar-x suatu unsur pada kurva kalibrasi standar. Zat standar yang digunakan akan mempunyai sifat fisik dan kimia yang hampir mirip dengan sampel. Dalam penelitian ini digunakan standar berupa tanah yaitu soil-1, soil-2, soil-3 yang dikeluarkan oleh IAEA (International Atomic Energy Agency) dengan komposisi kimia diketahui.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kandungan unsur-unsur dalam beberapa batuan sulfur elemental sehingga dapat diketahui unsur yang potensial untuk dieksplorasi. Sampel batuan sulfur elemental diambil dari daerah Java Barat yaitu Papandayan, Tangkuban Prahu, Ciater, dan daerah Sumatra yaitu Sibayak (Sumatra Utara) dan Cugung Rajabasa (Lampung).

BAHAN DAN METODE

Bahan. Bahan yang digunakan ialah sampel batuan sulfur elemental dari Papandayan, Tangkuban Prahu, Ciater, Sibayak dan Cugung Rajabasa, zat standar multi unsur dari beberapa oksida logam, zat standar berupa soil-1, soil-2, soil-3.

Alat. Alat yang digunakan ialah perangkat spektrometer pendar sinar-x buatan ORTEC yang terdiri dari: detektor semikonduktor (SiLi), sumber tegangan tinggi (high voltage): 1100 volt, penguat awal (pre amplifier), penguat akhir (amplifier), ADC (analog to digital converter), pencacah salur ganda (MCA) MAESTRO, program software AXIL, dan printer (Gambar 1).



Gambar 1. Skema alat spektrometer penalar sinar-x

Sebagai sumber pengeksitasi digunakan ^{109}Cd dan ^{55}Fe dengan aktivitasi 20 mCi (30/08/95). Analisis secara kualitatif dan kuantitatif menggunakan program yang diperoleh dari IAEA yaitu: QXAS (Quantitative X-Ray Analysis System). Alat penunjang lain yaitu: pengayak, penggerus dan alat pembuat pelet.

Metode analisis. Masing-masing sampel digerus halus (200 mesh) dan ditimbang 1 g untuk dibuat pelet dengan diameter 3 cm. Masing-masing percobaan dilakukan dengan pengulangan 3 kali. Metode standar eksternal digunakan untuk analisis kuantitatif, yaitu dengan cara menginterpolasi intensitas sinar-x yang dihasilkan oleh unsur pada kurva kalibrasi standar. Dalam program QXAS telah dimasukkan beberapa kurva kalibrasi standar berbagai unsur dalam suatu *library* sehingga konsentrasi unsur suatu sampel dapat langsung diketahui. Sedangkan simpangan kurva kalibrasi tersebut dapat diketahui dengan mengikutsertakan suatu zat standar yang telah diketahui kandungan tiap-tiap unsurnya (dalam hal ini adalah soil-1, soil-2 dan soil-3) dalam sistem pencacahan. Besarnya selisih kandungan tiap unsur antara nilai dalam sertifikat dan analisis menunjukkan besarnya simpangan pengukuran unsur dalam sampel.

Analisa kualitatif dilakukan dengan interpolasi nomor salur suatu unsur dalam sampel pada kurva kalibrasi energi. Kurva kalibrasi energi diperoleh dengan melakukan dengan pencacahan beberapa senyawa atau unsur berbentuk pelet, antara lain: SiO_2 , P_2O_5 , KCl, CaO, Ti, V_2O_5 , Cu, As_2O_3 , KBr, Mo, Sb_2O_3 , dan BaO. Pencacahan dilakukan dengan cara meletakkan sampel maupun standar multi unsur pada permukaan sumber sinar-x selama 30 menit.

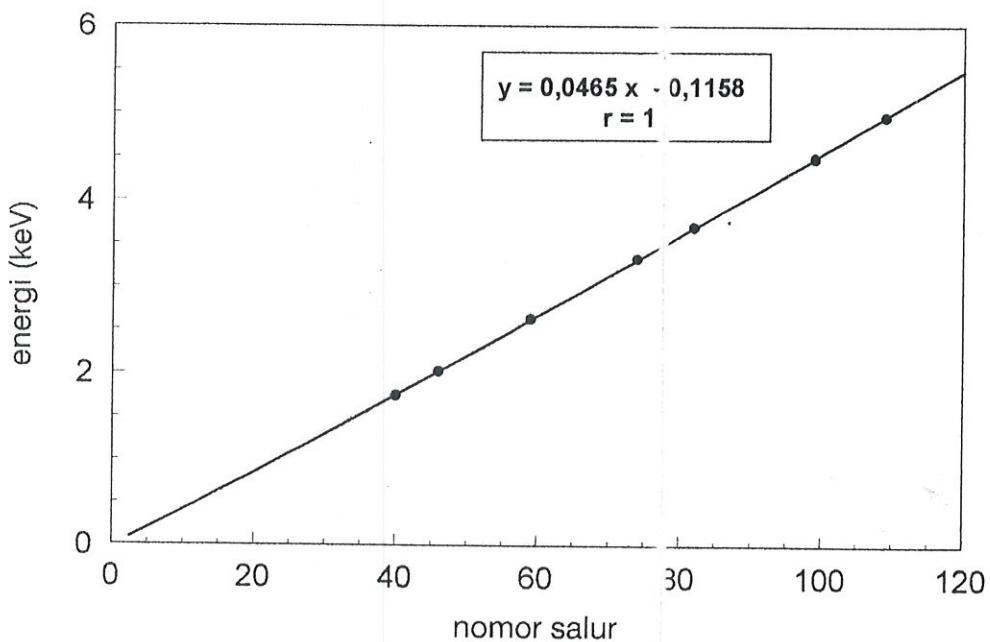
HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode spektrometer pendar sinar-x dapat digunakan untuk uji kualitatif dan kuantitatif unsur logam maupun non logam. Spesifikasi nuklir unsur-unsur yang diukur dengan XRF terlihat pada tabel 1 untuk sumber pengeksitasi ^{55}Fe dan tabel 2 untuk sumber pengeksitasi ^{109}Cd . Sumber pengeksitasi ^{55}Fe digunakan untuk pencacahan unsur-unsur yang bermomor atom lebih kecil dari 56 (nomor atom Fe), misalnya: P, S, K, Ca, Ti, V, Si, Sc. Sedangkan untuk pencacahan unsur-unsur yang bermomor atom lebih besar dari 56 digunakan sumber pengeksitasi ^{109}Cd . Hal ini berkaitan dengan kemampuan suatu sumber untuk mengeksitasikan elektron dari unsur yang akan dianalisis. Energi sumber pengeksitasi harus lebih besar dari energi ikat elektron yang akan dieksitasi.

Kurva kalibrasi energi dengan sumber pengeksitasi ^{55}Fe seperti terlihat pada gambar 1 sedangkan kurva kalibrasi energi dengan sumber pengeksitasi ^{109}Cd seperti terlihat pada gambar 2. Kedua kurva tersebut menunjukkan hubungan linieritas yang cukup baik dengan persamaan $y = 0,0465x - 0,1158$ untuk sumber ^{55}Fe , dan $y = 0,046x - 0,113$ untuk sumber ^{109}Cd .

Tabel 1. Spesifikasi unsur-unsur yang dianalisis menggunakan metode spektroskopi pendar sinar-x dengan sumber pengeksitasi ^{55}Fe

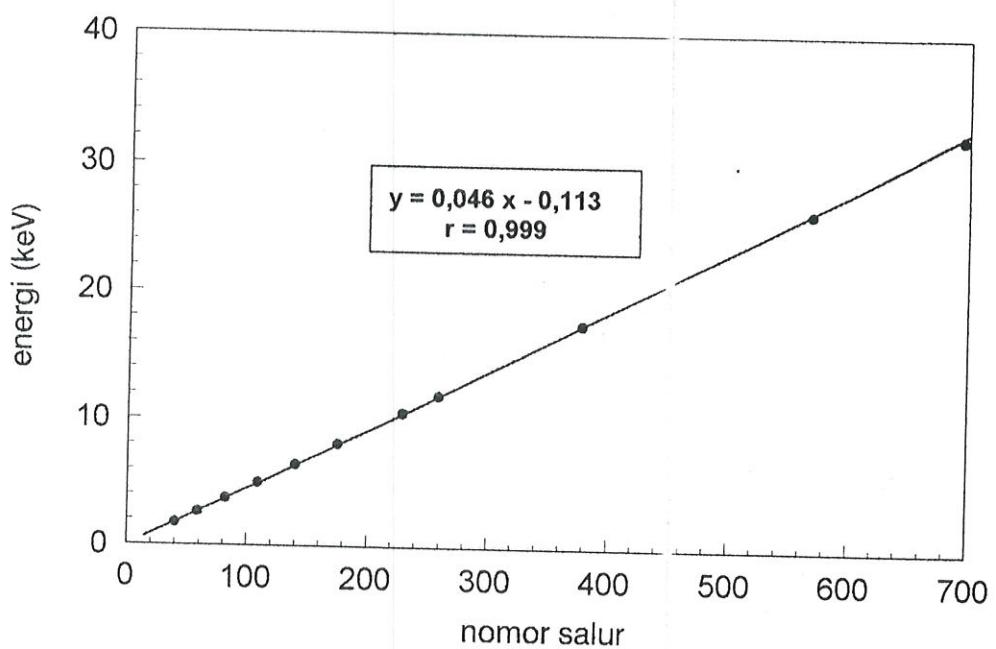
Senyawa	jenis spektra	energi (ke V)	Nomor salur
SiO_2	Si	1,744	40
P_2O_5	P	2,023	46
KCl	Cl	2,627	59
	K	3,325	74
CaO	Ca	3,697	82
Ti (logam)	Ti	4,487	99
V_2O_5	V	4,952	109



Gambar 1. Kurva kalibrasi energi menggunakan sumber Fe-55 dengan spektrometer pendar sinar-x

Tabel 2. Spesifikasi unsur-unsur yang dianalisis menggunakan metode spektroskopi pendar sinar-x dengan sumber pengeksitasi ^{109}Cd

Senyawa	jenis spektra	energi (ke V)	Nomor salur
SiO_2	Si	1,74	40
P_2O_5	P	2,62	59
CaO	Ca	3,69	82
V_2O_5	V	4,95	109
Fe_2O_3	Fe	6,4	140
Cu (logam)	Cu	8,05	175
As_2O_3	As	10,55	229
KBr	Br	11,92	259
Mo (logam)	Mo	17,48	378
Sb_2O_3	Sb	26,36	569
BaO	Ba	32,19	695



Gambar 2. Kurva kalibrasi energi menggunakan sumber Cd-109 dengan spektrometer sinar-x

Sensitivitas alat XRF untuk mencacah tiap-tiap unsur dalam penelitian ini berkisar antara 5- 10 ppm. Ketidakpastian nilai ini berubah dari satu unsur ke unsur lain menurut kesulitan dalam pemrosesan spektra. Ketidakpastian terbesar berasal dari cacah latar belakang, baik dari alam maupun dari sumber-sumber radiasi lainnya yang berada di lingkungan pengukuran. Cacahan latar belakang ini tidak terlalu mengganggu bila aktifitas sumber yang diukur cukup kuat tetapi tidak demikian halnya bila sumber yang akan diukur mempunyai aktifitas yang lemah.

Hasil analisis dan data sertifikat konsentrasi unsur dalam standar soil-1, soil-2 dan soil-3 dari IAEA terlihat pada tabel 3 (5). Pada tabel tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi unsur hasil analisis dengan nilai yang tertera pada sertifikat tidak berbeda nyata atau masih termasuk dalam *range* nilai sertifikat. Sehingga kurva kalibrasi standar pada *library* program QXAS (Quantitative X-ray Analysis Sistem) masih dapat digunakan

untuk analisis kuantitatif unsur suatu sampel dengan simpangan konsentrasi sebesar selisih antara nilai hasil analisis dengan nilai yang tertera pada sertifikat.

Konsentrasi unsur-unsur pada batuan sulfur elemental yang diambil dari Jawa Barat, yaitu Papandayan, Tangkuban Prahu dan Ciater dan dari Sumatra yaitu Cugung Rajabasa (Lampung) dan Sibayak (Sumatra Utara) yang dihitung dengan standar soil-1, soil-2 dan soil-3 seperti terlihat pada tabel 4. Unsur S, P, Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Zr dan Nb terdapat pada kelima sampel batuan tersebut dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Unsur-unsur tersebut yang dominan adalah S dan P dalam orde persen, sedangkan yang lain dalam orde ppm kecuali unsur Fe dari sampel batuan sulfur elemental Ciater 13,6 %. Konsentrasi sulfur terbesar pada sampel batuan sulfur elemental Tangkuban Prahu 97,25 % kemudian diikuti Papandayan 91,26%, Sibayak 84,9%, Cugung Rajabasa 82,98% dan terakhir adalah Ciater 64,12%. Pada sampel batuan sulfur elemental Cugung Rajabasa dan Sibayak terdapat unsur Si yang cukup besar yaitu berturut-turut 13,49% dan 7,77%, sedangkan pada sampel lain tidak ditemukan unsur tersebut. Pada sampel batuan sulfur elemental Ciater juga ditemukan unsur K yang cukup besar yaitu 8,46 %, sedangkan pada sampel dari Papandayan tidak ditemukan unsur tersebut. Unsur-unsur logam berat seperti Hg, La dan Pb juga ditemukan pada sampel batuan sulfur elemental dari Papandayan dan Cugung Rajabasa sedangkan sampel lain tidak ditemukan unsur tersebut. Gambar 2 memperlihatkan contoh spektrum pendar sinar X batuan sulfur elemental dari Tangkuban Prahu dengan sumber pengeksitasi ^{55}Fe dan ^{109}Cd . Unsur-unsur logam tersebut kemungkinan terikat sebagai senyawa besi sulfida maupun logam sulfida yang terdapat di kulit bumi. Diistimasikan kulit bumi mengandung sulfur 0,1 % yang umumnya mengandung senyawa sulfida. Dalam kondisi pengoksidasi, deposit sulfur dapat terasosiasi dengan calcite CaCO_3 , gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan anhidritnya, barit BaSO_4 , celestite SrSO_4 dan glauberite $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$. Deposit sulfur elemental juga dapat terasosiasi dengan deposit kubah garam maupun deposit volkanik.

Tabel 3. Hasil analisis unsur dan data sertifikat standar soil-1, soil-2, dan soil-3 dari IAEA dengan metode spektrometri penda sinar-x *

Unsur	Kadar unsur (ppm)					
	Soil-1		Soil-2		Soil-3	
	Analisis	Sertifikat	Analisis	Sertifikat	Analisis	Sertifikat
Si	-	-	-	-	182 E3	169 - 201 E3
P	788	831	-	-	458	461 ± 1
K	-	-	8,81 E3	7,92 - 9,57 E3	11,8 E3	11,3 - 12,7 E3
Ca	0,26 E6	0,25 E6	0,111 E6	0,107 - 0,115 E6	169 E6	157 - 174 E6
Ti	-	4,8 - 5,54 E3	-	2,3 - 2,92 E3	3,61 E3	2,6 - 3,7 E3
V	-	155 - 185	-	-	64	59 - 73
Cr	111	95,8 - 113	-	-	51,2	49 - 74
Mn	-	3,3 - 3,62	-	-	0,674	0,604 - 0,650
Fe	61,2	65,7 - 69,1	-	-	25,4	25,2 - 26,3
Co	15,21	18,3 - 21,3	-	-	10,7	8,4 - 10,1
Ni	41,05	36,9 - 52,9	-	-	21,1	21 - 37
Cu	37,3	24,4 - 35,6	-	-	10,6	9 - 13
Zn	236	223 - 233	-	-	112	101 - 113
Hg	-	0,13	-	-	0,03	0,03 - 0,07
Rb	104	113 ± 11	37,8	36,9 - 40,6	48	47 - 56
Pb	38,2 E3	37,7 ± 7,4 E3	-	-	68,3 E3	55 - 71 E3
Br	7,43	6,82 ± 1,73	-	4,84 - 6,42	7,56	3 - 10
Sr	78,9	80	474	460-490	108,2	103 - 114
Y	-	-	-	-	18,8 E3	15 - 27 E3
U	-	3,7 - 4,34	-	2,08 - 2,52	2,45	2,2 - 3,3
Zr	-	-	-	-	191 E3	180 - 201 E3
Mo	-	1,3	-	-	2,03	0,9 - 5,1

*. Jumlah standar masing-masing 5

Tabel 4 Kadar unsur-unsur dalam batuan sulfur elemental Papandayan, Cugung Rajabasa, Sibayak, Ciater dan Tangkuban Prahu

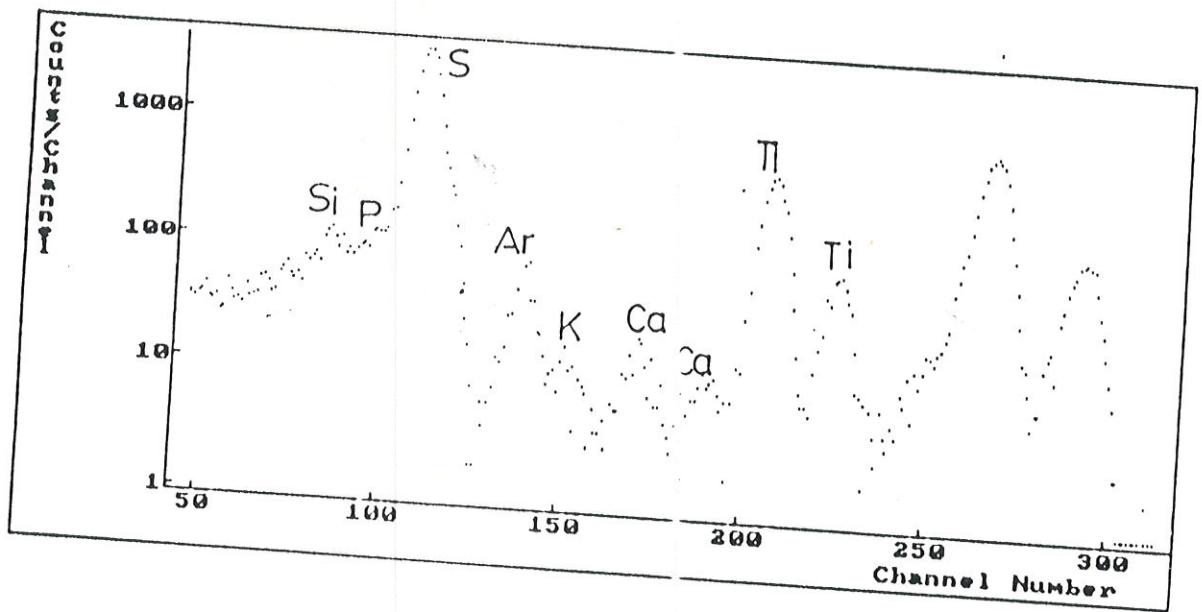
Nama Unsur	Kadar unsur dalam batuan sulfur elemental (ppm)				
	Tangkuban Prahu	Ciater	Papandayan	Cugung Rajabasa	Sibayak
S	97,25 ± 1,94 E6	64,12 ± 1,04 E6	91,26 ± 1,02 E6	82,98 ± 0,43 E6	84,9 ± 0,71 E6
P	8939,34 ± 643,49	3,46 ± 0,28	5,41 ± 0,92	1,5 ± 0,27	6,93 ± 0,24
Si	tt	tt	Tt	13,49 ± 0,97 E6	7,77 ± 0,51 E6
Cl	< 9294,97	4926,3 ± 128,18	Tt	tt	Tt
K	117,32 ± 31,48	8,46 ± 0,29 E6	Tt	1168,36 ± 94,98	495,07 ± 57,76
Ca	138,81 ± 19,43	4301,8 ± 264,5	426,98 ± 24,05	738,3 ± 50,76	518,57 ± 40,04
Ti	1755,74 ± 29,87	3299,93 ± 90,7	48,45 ± 6,07	5623,47 ± 68,35	192,22 ± 12,09
V	28,59 ± 7,85	664,39 ± 40,48	Tt	tt	< 153,71
Cr	< 67,76	894,23 ± 124,5	Tt	tt	< 62,77
Mn	< 42,62	919,7 ± 123,33	< 101,18	tt	< 39,42
Fe	154,27 ± 10,78	13,6 ± 0,87 E6	168,92 ± 21,83	1361 ± 88,26	34 ± 8,35
Ni	12,03 ± 3,51	< 149,05	< 25,01	tt	< 9,71
Cu	24,99 ± 2,84	242,67 ± 39,78	55,92 ± 6,46	163,85 ± 22,13	11,01 ± 2,5
Zn	8,04 ± 1,79	167,71 ± 27,2	13,61 ± 3,97	45,11 13,95	5,27 ± 1,6
Ga	< 3,69	< 59,06	Tt	< 30,87	< 3,40
Se	< 1,55	< 25,03	384,9 ± 3,6	< 12,53	< 1,48
Rb	< 0,7	17,76 ± 4,04	2,07 ± 0,57	14,08 ± 2,02	0,86 ± 0,22
Sr	0,9 ± 0,19	159,31 ± 5,17	< 1,29	8,72 ± 1,6	0,65 ± 0,18
Y	< 0,43	9,03 ± 2,57	Tt	tt	< 0,39
Zr	11,16 ± 0,25	12,01 ± 2,24	1,4 ± 0,28	59,95 ± 1,76	0,7 ± 0,12
Nb	0,57 ± 0,11	< 4,4	< 0,67	3,6 ± 0,83	< 0,28
Mo	< 0,3	< 4,06	< 0,66	tt	< 0,26
La	tt	Tt	1290,4 ± 201,6	2405,8 ± 737,77	Tt
Hg	tt	Tt	40,32 ± 3,06	34,85 ± 9,54	Tt
Pb	tt	Tt	19,93 ± 3,28	43,17 ± 7,67	Tt
Sc	tt	Tt	108,8 ± 14,51	80,77 ± 22,28	Tt
As	tt	581,28 ± 31,07	48,89 ± 2,41	tt	Tt

KESIMPULAN

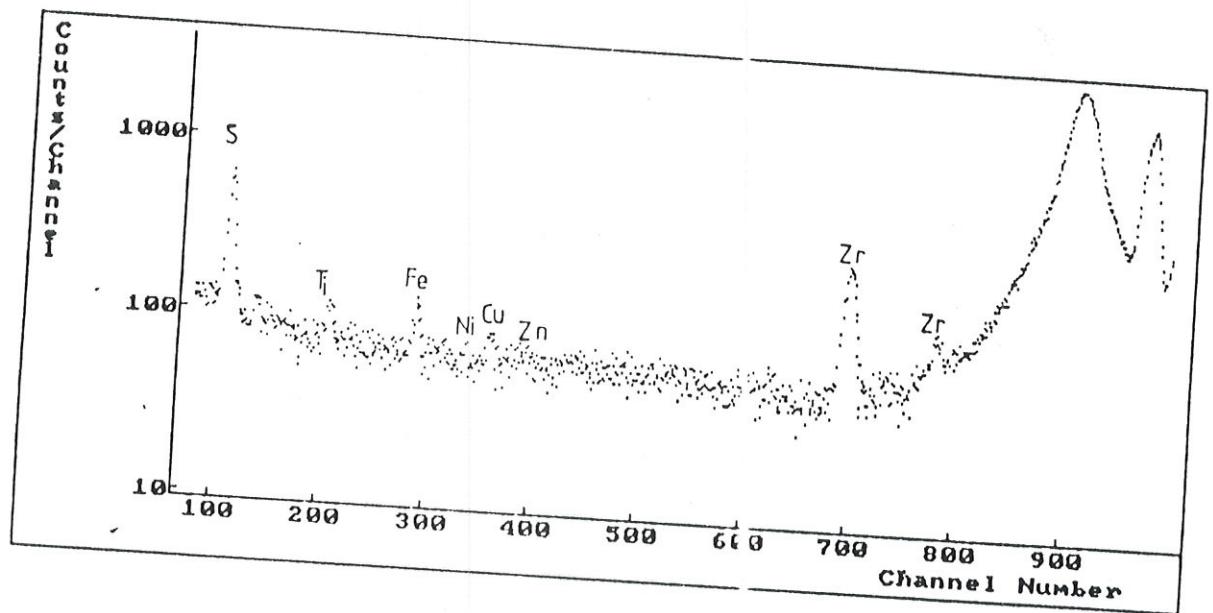
- ①. Unsur S, P, Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Zr dan Nb terdapat pada kelima contoh batuan sulfur elemental yang diambil yaitu dari Tangkuban Prahu, Ciater, Papandayan, Cugung Rajabasa dan Sibayak.
- ②. Konsentrasi sulfur paling tinggi terdapat pada contoh batuan sulfur elemental Tangkuban Prahu (97,25 %) diikuti Papandayan (91,2 %).
- ③. Contoh batuan sulfur elemental dari Cugung Rajabasa dan Sibayak terdapat unsur silikon yang cukup besar, yaitu berturut-turut 7,77 % dan 13,49 %, sedangkan pada contoh dari Ciater terdapat unsur besi yang cukup besar yaitu 13,6 %.

DAFTAR PUSTAKA

1. Robert C. Brasted., Comprehensive inorganic chemistry, volume VIII sulphur selenium, tellurium, polonium and oxygen, Princeton, New Jersey (1961)
2. Kirk – Orhmer., “Sulfur” Encyclopedia of chemical technology, vol 19, second edition, John Wiley and Sons Inc, New York (1969)
3. Ron Jenkins, R.W Gould and D Gedcke., Quantitative x-ray spectrometry, Marcel Dekker, New York (1981).
4. Anonymous., Quantitaive x-ray analysis system , Physic Section, PCI Laboratory Sciberdorf – IAEA, Vienna - Austria (1993)
5. Anonymous., Analytical quality control services, IAEA - Vienna -Austria (1990)



Gambar 2a. Spektrum sinar-x contoh batuan sulfur elemen ital dari Tangkuban Prahu dengan sumber pengeksitasi ^{55}Fe .



Gambar 2b. Spektrum sinar-x contoh batuan sulfur elemenital dari Tangkuban Prahu dengan sumber pengeksitasi ^{109}Cd