

PAIR/P.260/1988

PENENTUAN UNSUR MIKRO DAN RUNUTAN
DALAM CONTOH TEH DENGAN CARA
ANALISIS PENGAKTIFAN NEUTRON

June Mellawati, Mirarni A., dan
Surtipanti S.

K.P. 558

PENENTUAN UNSUR MIKRO DAN RUNUTAN DALAM CONTOH TEH DENGAN CARA ANALISIS PENGAKTIFAN NEUTRON

June Mellawati*, Minarni A.*, dan Surtipanti S.*

ABSTRAK

PENENTUAN UNSUR MIKRO DAN RUNUTAN DALAM CONTOH TEH DENGAN CARA ANALISIS PENGAKTIFAN NEUTRON. Analisis unsur Br, La, Ca, Sc, Cr, Fe, Rb, Sb, Co, Zn, Eu, As, Se, Cs, dan Hg dalam contoh teh dari pasaran Indonesia telah dilakukan, baik unsur dalam jumlah mikro atau runutan. Analisis dilakukan dengan mengiradiasi contoh menggunakan sumber neutron dalam reaktor TRIGA-MARK di Pusat Penelitian Teknik Nuklir, Bandung, yang mempunyai fluks neutron 10^{11} n cm⁻² s⁻¹. Iradiasi dilakukan selama 36 jam, diikuti pendinginan 2 hari. Pengukuran energi sinar gamma dilakukan dengan menggunakan alat penganalisis salur ganda (Multi Channel Analyzer). Hasil analisis yang diperoleh ialah Br 2,84 - 4,95 ppm; La 0,13 - 3,84 ppm; Sc 0,10 - 0,88 ppm; Cr 0,18 - 1,03 ppm; Ca 0,28 - 0,94%; Fe 161,33 - 894,11 ppm; Rb 50,42 - 144,61 ppm; Sb 0,09 - 0,88 ppm; Co 0,06 - 0,18 ppm; Zn 11,17 - 33,50 ppm; Eu 0,01 - 0,06 ppm; As 0,14 - 1,50 ppm; Se 3 - 60 ppb; Cs 0,07 - 0,38 ppm; dan Hg 10 - 80 ppb.

ABSTRACT

DETERMINATION OF MICRO AND TRACE ELEMENTS IN TEA LEAVES BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS. Analysis of Br, La, Ca, Sc, Cr, Fe, Rb, Sb, Co, Zn, Eu, As, Se, Cs, and Hg in tea leaves samples has been carried out either as micro or trace elements. Analysis were carried out by irradiating the samples for 36 hours followed by 2 days cooling in TRIGA-MARK reactor, at thermal neutron flux of 10^{11} n cm⁻² s⁻¹. A Multi Channel Analyzer was used for identifying the energy of gamma ray emitted. The results obtained in term of concentration range were Br 2.82 - 4.95 ppm; La 0.13 - 3.84 ppm; Sc 0.10 - 0.88 ppm; Cr 0.18 - 1.03 ppm; Ca 0.28 - 0.94%; Fe 161.33 - 894.11 ppm; Rb 50.42 - 144.61 ppm; Sb 0.09 - 0.88 ppm; Co 0.06 - 0.18 ppm; Zn 11.17 - 33.50 ppm; Eu 0.01 - 0.06 ppm; As 0.14 - 1.50 ppm; Se 3 - 60 ppb; Cs 0.07 - 0.38 ppm; and Hg 10 - 80 ppb.

PENDAHULUAN

Analisis pengaktifan neutron telah banyak digunakan untuk menentukan unsur mikro atau runutan (trace). Dengan cara analisis ini deteksi limit yang dicapai sampai orde nano gram (1).

Teh adalah salah satu jenis minuman yang banyak dikonsumsi oleh penduduk di seluruh dunia, baik penduduk yang berpenghasilan tinggi maupun rendah. Berdasarkan telaah pustaka, ternyata bahwa unsur mikro maupun runutan dalam teh cukup banyak, baik yang

esensial maupun nonesensial (beracun) (2). Hal ini mungkin terjadi akibat penggunaan pupuk atau pestisida pada tanaman tersebut, karena dosis pemupukan mempengaruhi kadar unsur hara dalam daun (3). Seperti telah diketahui, jenis pestisida yang digunakan pada tanaman teh ialah metilbromida dan trikarbamat (mengandung bahan aktif Zn, Fe, M, dan etilen bisditiokarbamat) sebagai fungisida, sedang jenis pestisida sebagai insektisida yang diguna-

*Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN

kan ialah nogos, tamaron, lannate, dan sebagainya.

Untuk mengetahui kadar unsur mikro dan runutan dalam teh, maka dilakukan penelitian analisis unsur tersebut dengan cara pengaktifan neutron (APN). Cara ini cukup peka untuk unsur-unsur yang sulit dideteksi dengan spektrometri serapan atom atau fluoresensi sinar-X (2) dan tidak memerlukan proses kimia terlebih dahulu. Dalam penelitian ini telah dilakukan penentuan unsur Br, La, Ca, Sc, Cr, Fe, Rb, Sb, Co, Zn, Eu, As, Se, Cs, dan Hg dalam contoh teh yang dibeli di pasar dengan cara mengiradiasi contoh di reaktor TRIGA-MARK di Pusat Penelitian Teknik Nuklir Bandung.

Tujuan penelitian ini ialah untuk mengetahui sampai seberapa jauh kemampuan metode APN untuk menganalisis unsur-unsur tersebut dalam contoh teh. Diharapkan hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai tambahan informasi bagi masyarakat.

TATA KERJA

Bahan. Bahan penelitian meliputi 7 macam contoh teh produksi dalam negeri dengan merek dagang yang berbeda, yaitu teh Tongci (perusahaan teh legal), Sariwangi (perusahaan teh Likarta), Gopek, Poci dan Botol (ketiganya dari perusahaan teh Slawi), Bandulan (perusahaan teh Pekalongan), dan Goalpara (perusahaan teh Sukahumi) yang ke-

semuanya mudah di peroleh di pasaran.

Dari masing-masing pak teh diambil secara acak sebanyak 0,5 gram, lalu dianalisis. Sebagai standar digunakan standar "Orchard Leaves" (SRM-1571) dari National Bureau Standard.

Peralatan. Alat yang digunakan, yaitu penganalisis salur ganda (Multi Channel Analyzer) ND-62 yang mempunyai 4096 saluran, dan dirangkaikan dengan detektor germanium murni (Princeton Gamma Tech; model IGC-11 No Seri DI-445) dengan diameter 7,5 cm, dan pre-amplifier/ amplifier (ND-62 No Seri 84-0407). Alat tersebut mempunyai resolusi (FWHM) 3,75 keV untuk energi gamma 1332,4 keV dari ^{60}Co .

Prosedur Analisis. Contoh teh dikeringkan dalam oven pada suhu 65°C selama 24 jam, lalu dihaluskan. Kemudian diambil secara acak sebanyak 0,5 gram, dimasukkan ke dalam vial polietilen dan ditutup. Contoh tersebut diiradiasi di reaktor TRIGA-MARK di Pusat Penelitian Teknik Nuklir, Bandung yang mempunyai fluks neutron $10^{11}\text{ n cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ selama 36 jam, lalu didinginkan selama 2 hari. Untuk standar dilakukan hal yang sama, yaitu menggunakan standar "Orchard Leaves" (SRM-1571) dari NBS. Untuk menentukan kadar air, teh dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 1 jam. Untuk mengetahui unsur yang terlarut dalam air, contoh teh diperlakukan sebagai berikut; ke dalam 300 ml air suling mendidih (+ 3 cang-

kir) dimasukkan masing-masing contoh teh secukupnya (2,5 gram) dan dibiarkan selama 5 - 15 menit lalu disaring. Ampas teh dikeringkan dan kemudian diperlakukan sama dengan contoh teh yang tidak diseduh untuk kemudian diiradiasi.

Teknik Pencacahan. Contoh yang sudah diiradiasi dan didinginkan dicacah dengan alat penganalisis salur ganda. Kalibrasi energi menggunakan ^{60}Co yang mempunyai energi 1173 dan 1332,4 keV dilakukan pada setiap pengukuran. Pencacahan dilakukan selama 1800 detik pada jarak 30 cm dari detektor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan berbagai unsur mikro dan runutan dalam contoh teh telah diteliti, demikian juga dalam ampas teh yang telah diseduh selama beberapa menit dengan air suling mendidih, untuk mengetahui berapa banyak unsur tersebut yang terlarut dalam air seduhan teh. Unsur-unsur yang ditentukan adalah seperti yang tertera dalam Tabel 1. Hasil analisis unsur dalam contoh teh tertera dalam Tabel 2, dan Gambar 1. Hasil tersebut adalah harga perata dari lima kali ulangan.

Penentuan unsur brom (Br), arsen (As) dan stibium (Sb) ditentukan sebagai isotop ^{82}Br (554,3 keV), ^{76}As (559,2 keV), dan ^{122}Sb (564,1 keV). Ketiga unsur tersebut dapat ditentukan secara langsung karena tidak mengalami

gangguan (Gambar 2). Demikian juga untuk penentuan unsur seng (Zn) dan skandium (Sc) yang ditentukan sebagai isotop ^{65}Zn (1115,4 keV) dan ^{46}Sc (1120,3 keV) (Gambar 3). Untuk unsur merkuri (Hg), sebagai isotop ^{203}Hg (279,2 keV) ditentukan dengan memperhatikan faktor koreksi terhadap ^{75}Se (279,5 keV), karena keduanya mempunyai energi sinar γ hampir sama sehingga mengganggu dalam pengukuran (5). Penentuan unsur lain seperti Fe, Cs, Co, Cr, Ca, Rb, Eu, Sc, dan La dapat dilakukan secara langsung tanpa mengalami gangguan. Unsur tersebut ditentukan sebagai isotop ^{134}Cs (795 keV), ^{75}Se (264,6 keV dan 136 keV), ^{51}Cr (320 keV), ^{46}Ca (1298,6 keV), ^{85}Rb (1077 keV), ^{59}Fe (1098,6 keV dan 1291,5 keV), ^{60}Co (1173,1 keV dan 1332,4 keV) dan ^{140}La (1595,4 keV dan 486,8 keV).

Penentuan secara kuantitatif menggunakan perhitungan secara nisbi (4), yaitu :

$$W \text{ contoh} = \frac{\text{Cps contoh}}{\text{Cps standar}} \times W \text{ standar}$$

W = kadar unsur dalam

Cps = jumlah cacah tiap detik
(count per second)

Metode APN ini sebelumnya telah diterapkan pada standar "Orchard Leaves" (SRM-1571) dari NBS dengan ulangan percobaan sebanyak 5 kali dan hasilnya tertera pada Tabel 3.

Unsur-unsur beracun seperti selenium (Se), merkuri (Hg), brom (Br),

arsen (As), stibium (Sb), dan krom (Cr) merupakan unsur racun yang paling menarik dibicarakan karena dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa kelarutannya dalam air seduhan teh cukup besar (Tabel 4).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur Se dalam contoh teh adalah 0,06 ppm, dan dalam ampas teh 0,02 ppm. Ini berarti $\pm 66\%$ kandungan Se dalam teh larut dalam air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram teh dalam 300 ml) maka tubuh akan menerima unsur Se sebanyak 0,10 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih lebih kecil dari jumlah Se yang diperbolehkan masuk ke dalam tubuh manusia yaitu 56 - 326 $\mu\text{g}/\text{hari}$ (6).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur merkuri (Hg) dalam contoh teh adalah 0,08 ppm dan dalam ampas teh 0,03 ppm. Ini berarti $\pm 62\%$ kandungan Hg dalam teh larut dalam air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram teh dalam 300 ml), maka Hg yang masuk ke dalam tubuh manusia sebanyak 0,13 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih lebih kecil daripada jumlah unsur Hg yang diperbolehkan WHO/FAO, yaitu 42,9 $\mu\text{g}/\text{hari}$ (7).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur arsen (As) dalam contoh teh adalah 1,50 ppm, sedang dalam ampas teh 0,07 ppm. Ini berarti $\pm 95\%$ kandungan As dalam teh larut dalam

air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram teh dalam 300 ml) maka As yang masuk ke dalam tubuh manusia 3,58 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih lebih kecil dari jumlah unsur As yang diperbolehkan yaitu 40 $\mu\text{g}/\text{hari}$ (6).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur brom (Br) dalam contoh teh adalah 4,95 ppm, sedang dalam ampas teh 1,45 ppm. Ini berarti bahwa $\pm 70\%$ kandungan Br dalam teh larut dalam air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram dalam 300 ml) maka tubuh akan menerima unsur brom 8,75 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih lebih kecil dari jumlah Br yang diperbolehkan masuk ke dalam tubuh manusia, yaitu 1 mg/hari (5).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur stibium (Sb) dalam contoh teh adalah 0,88 ppm, dan dalam ampas teh 0,64 ppm. Ini berarti bahwa sekitar 27% kandungan Sb dalam teh larut dalam air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram teh dalam 300 ml) maka tubuh akan menerima unsur Sb 0,6 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih di bawah harga yang diperbolehkan yaitu 36 - 178 $\mu\text{g}/\text{hari}$ (6).

Harga rata-rata tertinggi kandungan unsur krom (Cr) dalam contoh teh adalah 1,03 ppm, dan dalam ampas teh 0,13 ppm. Ini berarti $\pm 87\%$ kandungan

krom dalam teh larut dalam air seduhan teh. Apabila rata-rata orang minum teh sehari 3 cangkir ($\pm 2,5$ gram teh dalam 300 ml) maka tubuh akan menerima unsur krom 2,25 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Jumlah ini masih di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh WHO, yaitu 0,05 ppm (6).

Dari hasil analisis pada lima kali pengambilan contoh, ternyata antara merek satu dan merek yang lain, dan teh dalam satu merek pun hasilnya bervariasi (Tabel 2). Hal ini mungkin disebabkan oleh kondisi tanah tempat teh ditanam, pemberian pupuk dan pestisida, serta tempat memproses teh yang berbeda-beda.

KESIMPULAN

Dengan metode analisis pengaktifan neutron, kandungan unsur mikro dan runtuhan dalam contoh teh dapat ditentukan secara serempak, tanpa melalui pemisahan. Contoh yang diperlukan cukup sedikit, yaitu sekitar 0,50 gram. Dari hasil analisis unsur beracun dalam contoh teh, seperti Se, Hg, As, Sb, Br, dan Cr, ternyata bahwa kadar masing-masing unsur tersebut dalam teh masih belum membahayakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Saudara Suropto yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. OLMEZ, I., ARAS, N.K., and ISAK, I., Instrumental neutron activation analysis of tea, *Technical Journal* 3 (1976) 17.
2. KASRAI, M., SHOUSHARIAN, M.J., BOZORGZADEH, M.H., Determination of trace elements in tea leaves by neutron activation analysis, *Journal of Radioanalytical Chemistry* 41 (1977) 73.
3. SRI WIBOWO, Z., dan VERSTIGOEN, U., Nilai baku kadar unsur hara daun teh, *Warta BPTK* 2 (1976) 305.
4. SUSETYO, W., Instrumentasi Kimia II Spektrometri Gamma, Program Pendidikan dan Latihan, PUSDIKLAT-BATAN (1984) 9.
5. AHMAD, S., CHAUDARI, M.S., MANNAN, A., and QURESHI, I.N., Determination of toxic elements in tea leaves by instrumental neutron activation analysis, *Journal of Radioanalytical Chemistry* 78 2 (1983) 375.
6. FRIBERG, L., GUNNAR, F. NODBERG, and VELIMIR, B.V., *Hand Book on the Toxicology of Metals*, Elsevier/North-Holland Biomedical Press. Amsterdam, New York, Oxford (1979).
7. FAO/WHO, Expert Committee; Evaluation of Certain Food Additives and the Contaminants Hg, Pb, and Cd (World Health Organization Technical Report Science No. 505), WHO, Geneva (1972) 16.

Tabel 1. Data nuklir unsur-unsur yang ditentukan secara APN (Analisis Pengaktifan Neutron).

Unsur	Isotop dan Waktu paruh (T _{1/2})	Energi-γ (keV)	Intensitas(%)
As	⁷⁶ As (26,4 jam)	559,2 (100%)	657 (14%)
Br	⁸² Br (35,3 jam)	554,3 (80%)	777 (100%)
Se	⁷⁵ Se (120,4 hari)	264,6 (100%)	136 (90%)
Hg	²⁰³ Hg (46 hari)	279,1 (100%)	
Sb	¹²² Sb (60,6 hari)	564 (100%)	
Fe	⁵⁹ Fe (45,6 hari)	1098,6 (100%)	1291,5 (100%)
Co	⁶⁰ Co (5;2 hari)	1173,1 (100%)	1332,4 (100%)
Cr	⁵¹ Cr (27,8 hari)	320 (100%)	
Zn	⁶⁵ Zn (243 hari)	1115,4 (100%)	
Ca	⁴⁷ Ca (4,54 hari)	1296,9 (100%)	
Rb	⁸⁶ Rb (18,6 hari)	1076,6 (100%)	
La	¹⁴⁰ La (40,27 jam)	1595,4 (100%)	186,8 (100%)
Eu	¹⁵² Eu (12,7 tahun)	1407,4 (90%) 121,8 (60%)	964,1 (55%)
Sc	⁴⁶ Sc (84 jam)	889,4 (100%)	1120,3 (100%)
Cs	¹³⁴ Cs (2,07 tahun)	604,7 (100%)	795,8 (90%)

Tabel 2. Hasil perata kadar unsur Br, La, Ca, Sc, Cr, Fe, Rb, Co, Zn, Eu, As, Se, Cs, dan Hg dalam contoh teh, dinyatakan dalam Ug/g berat kering, kecuali Ca (dalam %).

Unsur	Merk contoh teh						
	Tongci	Bandulan	Goalpara	Gopek	Sariwangi	Poci	Botol
Br	3,72 ± 1,30	3,63 ± 0,14	4,95 ± 3,37	2,84 ± 1,68	3,11 ± 1,76	2,88 ± 1,69	3,95 ± 1,98
La	1,33 ± 0,31	3,84 ± 3,25	0,75 ± 0,21	0,75 ± 0,62	0,13 ± 0,30	0,21 ± 0,40	2,79 ± 1,60
Ca (%)	0,94 ± 0,93	0,46 ± 0,30	0,28 ± 0,11	0,30 ± 0,19	0,50 ± 0,70	0,45 ± 0,67	0,33 ± 0,31
Sc	0,19 ± 0,01	0,18 ± 0,07	0,11 ± 0,03	0,10 ± 0,30	0,16 ± 0,41	0,19 ± 0,54	0,88 ± 0,93
Cr	0,44 ± 0,18	0,18 ± 0,10	0,34 ± 0,39	0,50 ± 0,06	0,84 ± 0,95	1,03 ± 1,01	0,25 ± 0,55
Fe	253,56 ± 25,75	161,33 ± 83,12	167,08 ± 28,37	51,46 ± 15,58	663,15 ± 1,38	894,11 ± 27,91	683,25 ± 315,04
Rb	38,54 ± 6,21	66,13 ± 8,13	36,12 ± 6,01	76,42 ± 7,51	57,50 ± 7,58	78,00 ± 8,83	144,16 ± 12,01
Sb	0,41 ± 0,36	0,59 ± 0,60	0,37 ± 0,32	0,09 ± 0,28	0,53 ± 0,72	0,78 ± 0,80	0,88 ± 0,01
Co	0,18 ± 0,01	0,13 ± 0,03	0,06 ± 0,04	0,13 ± 0,05	0,17 ± 0,04	0,17 ± 0,03	0,16 ± 0,08
Zn	16,94 ± 3,66	24,29 ± 8,44	16,57 ± 1,05	52,56 ± 17,27	33,50 ± 5,79	11,17 ± 3,34	39,18 ± 5,02
Eu	0,04 ± 0,19	0,01 ± 0,08	0,02 ± 0,11	0,03 ± 0,16	0,02 ± 0,13	0,03 ± 0,17	0,06 ± 0,21
As	0,51 ± 0,07	1,50 ± 0,15	0,40 ± 0,66	0,60 ± 0,05	0,95 ± 0,93	0,50 ± 0,07	0,14 ± 0,04
Se	0,05 ± 0,02	0,005 ± 0,001	0,00 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,003 ± 0,001	0,003 ± 0,005
Hg	0,025 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,02	0,08 ± 0,03	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,02
Cs	0,34 ± 0,58	0,38 ± 0,61	0,14 ± 0,50	0,34 ± 0,50	0,07 ± 0,21	0,30 ± 0,52	0,35 ± 0,61

Tabel 3. Perbandingan hasil analisis kandungan unsur dalam SRM-1571 USNBS (Orchard Leaves) dengan hasil yang tertera dalam sertifikat.

Unsur	Hasil analisis (ppm)	Kadar dalam sertifikat (ppm)
As	12,89 + 8,13	
Br	11,03 + 4,64	10 + 2
Se	0,10 + 0,07	(10)
Hg	0,16 + 0,02	0,08 + 0,01
Sb	3,15 + 1,20	0,155 + 0,015
Fe	309 + 16,46	2,90 + 0,30
Co	0,26 + 0,01	300 + 20
Cr	2,31 + 0,20	(0,20)
Zn	26,01 + 7,27	(2,30)
Ca	2,19 + 0,66*	25 + 3
Rb	12,44 + 3,27	2,09*
La	1,49 + 1,20**	12 + 1
Eu	90 + 18**	1,20 + 0,40**
Sc	85,94 + 20,15**	90 + 10**
Cs	41,50 + 10,50	90 + 60**
		32 + 10

* Hasil analisis dalam %

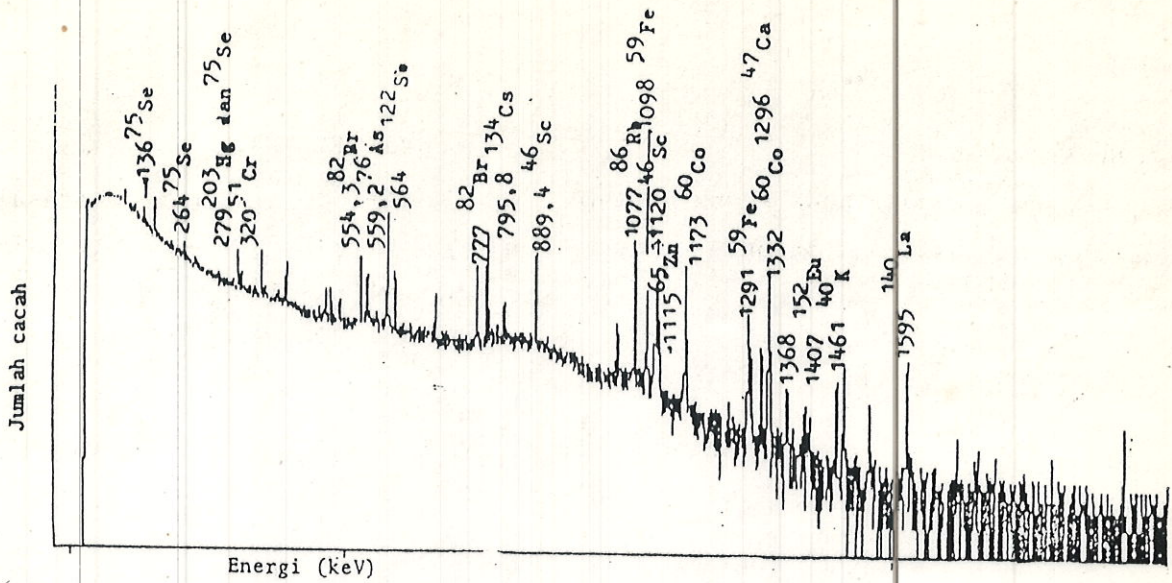
** Hasil analisis dalam ppb

Tabel 4. Harga perata kadar unsur dalam semua contoh teh, ampas teh, dan yang larut dalam air seduhan.

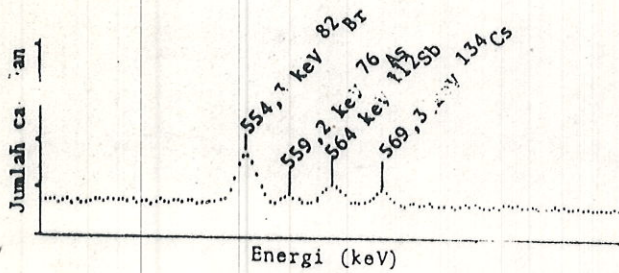
Unsur	Kadar unsur dalam teh (Ug/g)	Kadar unsur dalam ampas teh (Ug/g)	Kadar unsur yang larut dalam air (%)
Br	3,58	1,07	72,10
La	1,37	0,71	51,47
Ca	0,46*	0,42*	8,85
Sc	0,26	0,16	35,68
Cr	0,51	0,06	87,90
Fe	451,28	342,65	24,06
Rb	68,12	31,25	54,18
Sb	0,52	0,36	27,27
Co	140**	88,78**	36,57
Zn	23,60	12,73	45,98
Eu	30**	8,30**	72,50
As	0,66	0,05	93,35
Se	30**	10,87**	63,33
Hg	40**	26,50**	33,32
Cs	0,27	0,13	51,47

* Harga perata dalam %

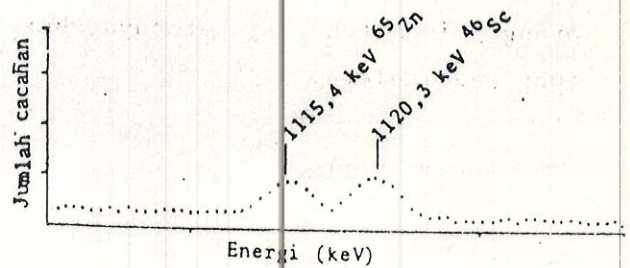
** Harga perata dalam ppb.



Gambar 1. Spektra sinar- γ radionuklida dalam contoh teh. Waktu iradiasi 36 jam dengan neutron termal dan pendinginan selama 2 hari.



Gambar 2. Spektra sinar- γ ^{82}Br (554,3 keV), ^{76}As (559,2 keV), ^{112}Sb (564,1 keV) dalam contoh teh. Waktu iradiasi 36 jam dengan neutron termal dan pendinginan selama 2 hari.



Gambar 3. Spektra sinar- γ ^{65}Zn (1115,4 keV) dan ^{46}Sc (1120,3 keV) dalam contoh teh. Waktu iradiasi 36 jam dengan neutron termal dan pendinginan selama 2 hari.