

CONTENT OF ELEMENTS IN PM₁₀ AND PM_{2.5} DUST IN CEMENT FACTORY, BOGOR AND IN RESIDENCE AREA BY USING X-RAY FLUORESCENCE (XRF)

Gatot Suhariyono

Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir (P3KRBiN) -BATAN
Jl. Cinere Pasar Jum'at, Jakarta selatan 12440 Indonesia. Email: g_suhariyono@batan.go.id

ABSTRACT

CONTENT OF ELEMENTS IN PM₁₀ AND PM_{2.5} DUST IN CEMENT FACTORY, BOGOR AND IN RESIDENCE AREA BY USING X-RAY FLUORESCENCE (XRF). Content analysis of elements in PM₁₀ (diameter of particulate matter under 10 µm) and PM_{2.5} (diameter of particulate matter under 2.5 µm) dust in cement factory, Bogor and in residence area has been carried out by using X-ray fluorescence spectrometer (XRF). The purpose of this research is to provide information about concentration and content of heavy metal elements (Pb, Hg, Zn, Cu, Ni, Cr, Fe and Mn) and light metal elements (Si, P, S, K, Ca, Ti and Sr) in dust of PM₁₀ outdoor and PM_{2.5} indoor to worker of cement factory, Bogor and society on 500 m and 3000 m radius with north, northwest, south and west direction of cement factory and compared to threshold limit value in the air (SE Menteri Tenaga Kerja No. SE-01/MEN/1997). The research results show that most content of elements in dust particles of PM₁₀ and PM_{2.5} in the dwellings on 500 m and 3000 m radius with north, northwest, south and west direction of cement factory came from raw material dust of cement (Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg and of Pb) and soil dust (P, S, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Sr, Zn, Hg, and Pb), except addition of Pb element is from vehicle fuel in north side of cement factory on 3000 m radius in PM_{2.5}. The kind of elements (Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, and Pb) found in samples collected from roadside was also found in cement factory (at raw mill) with different concentration.

Keywords: dust, cement, environment

ABSTRAK

KANDUNGAN UNSUR-UNSUR DALAM DEBU PM₁₀ DAN PM_{2.5} DI DALAM PABRIK SEMEN, BOGOR DAN DI PEMUKIMAN MENGGUNAKAN X-RAY FLUORESCENCE (XRF). Analisis kandungan unsur-unsur dalam debu PM₁₀ (diameter partikel di bawah 10 µm) dan PM_{2.5} (diameter partikel di bawah 2,5 µm) di dalam pabrik semen, Bogor dan di pemukiman telah dilakukan dengan menggunakan *X-ray fluorescence* (XRF). Tujuan penelitian ini adalah menyediakan informasi tentang konsentrasi dan kandungan unsur-unsur logam berat (Pb, Hg, Zn, Cu, Ni, Cr, Fe dan Mn) dan non logam berat (Si, P, S, K, Ca, Ti dan Sr) di dalam debu PM₁₀ di luar rumah dan PM_{2.5} di dalam rumah kepada para pekerja pabrik semen, Bogor dan masyarakat pada radius 500 dan 3000 m dengan arah utara, barat laut, selatan dan barat dari pabrik semen, Bogor dan dibandingkan dengan nilai ambang batas unsur-unsur di udara (SE Menteri Tenaga Kerja No. SE-01/MEN/1997). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar kandungan unsur-unsur dalam partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} di rumah-rumah pada jarak 500 m dan 3000 m sebelah utara, barat laut, barat dan selatan pabrik semen berasal dari debu bahan baku semen (Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb) dan debu tanah (P, S, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Sr, Zn, Hg, dan Pb), kecuali ada tambahan unsur Pb dari bahan bakar kendaraan di sebelah utara pabrik semen pada jarak 3000 m dalam PM_{2.5}. Unsur-unsur Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, dan Pb terdapat di pinggir jalan sama dengan unsur-unsur di dalam pabrik semen (di *raw mill*) dengan konsentrasi berbeda.

Kata Kunci : debu, semen, lingkungan

PENDAHULUAN

Udara yang tercemar oleh debu dapat mengandung unsur-unsur logam berat dan unsur-unsur non logam berat. Selain logam berat, unsur-unsur non logam berat juga berbahaya terhadap kesehatan manusia. Menurut Undang-Undang RI No. 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup, logam berat dan non logam berat termasuk komponen bahan beracun dan berbahaya (B3) yang dapat membahayakan kesehatan

manusia serta kelangsungan makhluk hidup lainnya [1]. Beberapa unsur logam berat adalah Pb, Hg, Zn, Cu, Ni, Cr, Fe dan Mn. Sedangkan unsur non logam berat tersebut adalah Si, P, S, K, Ca, Ti dan Sr.

Salah satu dampak negatif dari aktivitas produksi pabrik semen adalah pencemaran debu udara yang berdiameter kurang dari 10 µm di luar rumah (PM₁₀ (*particulate matter*)) dan kurang dari 2,5 µm di dalam rumah (PM_{2.5}) yang dapat berakibat infeksi pada saluran pernafasan

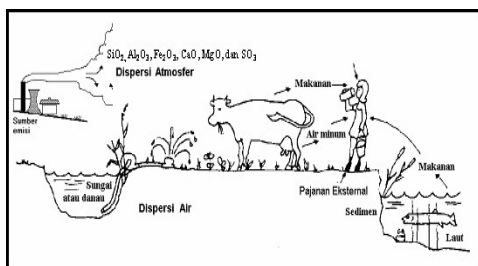
atas (ISPA). [2, 3, 4 dan 5]. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis unsur yang terkandung di dalam debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di pabrik semen, Bogor dan di pemukiman penduduk sekitar pabrik semen, Bogor.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan membantu para pekerja pabrik semen, Bogor dan masyarakat sekitar pabrik semen, Bogor dengan menyediakan informasi tentang kandungan dan konsentrasi unsur logam berat (Pb, Hg, Zn, Cu, Ni, Cr, Fe dan Mn) dan non logam berat (Si, P, S, K, Ca, Ti dan Sr) di dalam debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ dibandingkan dengan nilai ambang batas unsur-unsur di udara (SE Menteri Tenaga Kerja No. SE-01/MEN/1997). Pengukuran debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ dilakukan berdasarkan SK Menteri KLH No. 2 / Men KLH / 1988. Pengukuran kandungan unsur dalam debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ dilakukan di rumah-rumah dengan empat arah mata angin (utara, barat laut, barat dan selatan) dan pada jarak 500 dan 3000 m dengan titik pusat di plant satu pabrik semen di Bogor. Pengukuran juga dilakukan pada bahan baku semen, debu di dalam pabrik semen, dan debu di pinggir jalan sebelah utara pabrik semen.

TEORI

Pabrik Semen, Bogor

Kegiatan pabrik semen, Bogor mencakup penambangan bahan baku sampai dengan proses produksi semen. Proses pembuatan semen pada prinsipnya terdiri dari 4 tahap yaitu : tahap pengeringan dan penggilingan bahan baku (*raw mill*), tahap pembakaran dan pendinginan terak (*kiln*), tahap penggilingan akhir semen (*finish mill*), dan tahap pengantongan semen (*packaging*). Semen yang diproduksi meliputi *portland cement* (PC), *oil well cement* (OWC), dan *white cement* (WC). PC digunakan untuk konstruksi umum dan pekerjaan beton. OWC digunakan khusus untuk pengeboran minyak bumi dan gas alam, baik di pantai maupun lepas pantai. WC merupakan PC yang kandungan Fe_2O_3 nya rendah dibawah 0,3 %, biasanya digunakan untuk beton cor dan estetika. *Ordinary portland cement* (PC) mengandung senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, dan SO_3 . Bahan baku semen terdiri dari batu kapur (*limestone*), tanah liat (*clay*), pasir besi, pasir silika dan gipsum. Dispersi debu semen ke penduduk dan pekerja diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Dispersi debu semen ke penduduk dan pekerja

Toksistas Unsur-Unsur

Pada tubuh manusia, unsur Pb dapat mengganggu kesehatan dan menyebabkan gangguan sistem urinaria, syaraf, reproduksi dan jantung. Unsur Hg dalam tubuh dapat menyebabkan keracunan berupa pusing, mual, muntah dan sakit perut [6]. Kelebihan unsur Zn akan menyebabkan iritasi pada *gastrointestinal* dan *cyanosis* yang dapat menyebabkan kerusakan kulit. Kandungan Cu berlebih menyebabkan gangguan pada hati, ginjal, jantung, dan otak [7]. Toksikitas Ni dapat menyebabkan dermatitis, tumor ganas paru-paru dan kematian. Toksikitas Cr dapat menyebabkan "borok *chrom*" yang biasanya semakin lama semakin dalam. Toksikitas Fe ditandai sakit perut, diare, atau muntah yang berwarna kecoklatan atau warna darah. Penderita terlihat lemah, gelisah dan sakit perut terjadi pendarahan pada *gastrointestinal* yang menyebabkan kematian. Debu yang mengandung Mn cukup banyak dapat menyebabkan *insomnia*, nyeri otot, kejang-kejang, sempoyongan apabila jalan, kaku anggota badan, kadang-kadang tertawa atau menangis diluar kesadaran dan impotensi [8, 9, 10]. Debu yang mengandung unsur-unsur non logam berat (Si, P, S, K, Ca, Ti dan Sr) masing-masing menimbulkan efek toksistas yang berbeda-beda. Silikosis adalah penyakit yang disebabkan oleh debu silika bebas (SiO_2) terutama dominan mengandung unsur Si yang terhirup waktu bernafas dan tertimbun di paru-paru [8, 11, 12, 13]. Gejala tingkat pertama berupa sesak napas ketika bekerja, batuk kering, dan tidak berdahak. Tingkat kedua, batuk dan sesak makin berat, sehingga mengganggu untuk bekerja. Tingkat ketiga, sesak mengakibatkan cacat total dan mengakibatkan kegagalan jantung. Tidak satupun obat khusus untuk silikosis. Toksikitas phosphor (P) yang dikuatirkan adalah osteoporosis, radang sendi, encok, masalah gigi (gigi lepas, gigi busuk), letusan kulit, resiko terkena kanker lebih tinggi, dan batu ginjal [14]. Phosphor putih sangat beracun, sedang P merah tidak beracun. Toksikitas stronsium (Sr) : kerusakan gigi, penyakit rakitis, kekejangan perut (*abdominal*), dan diare [15]. Toksikitas kalium (K) : detak jantung cepat dan tidak beraturan, tekanan darah rendah, penyakit ginjal, infeksi kandung kecing (*cystitis*), resiko terkena kanker lebih tinggi, siklus haid jarang, kekejangan otot atau kram, bisul, sakit punggung, memperlemah sistem kekebalan, impotensi, gelisah (*anxiety*), kesulitan untuk tidur (*insomnia*), dan sifat lekas marah (*irritability*) [16]. Toksikitas sulphur (S) : radang usus yang kronik, penurunan syaraf, sakit asma, dan peradangan vaskuler (pembuluh darah), rambut jadi merah, iritasi kulit, dan muka seperti terbakar [17, 18].

Toksistas kalsium (Ca) : pengapuran pembuluh darah, penyakit jantung dan urat darah (*cardiovascular*), penyakit jantung *ischemic* dan *stroke*, tekanan darah tinggi, asam perut rendah, sakit otot / tulang sendi, depresi, kelelahan, *glaucoma*, *osteoporosis*, *osteoarthritis*, terjadi pengerasan kapur, kulit kering, sembelit (*constipation*), peningkatan resiko terhadap

ginjal (*hypercal-caemia*), sehingga terjadi radang air kencing [19, 20]. Toksisitas titanium (Ti) : ketidakaktifan organisme jaringan, dan *prosthesis* (berhubungan dengan sakit gigi) [21].

METODE PERCOBAAN

Bahan. Filter paper Whatman 41 Ashless England dan filter mylar buatan Taiyo berdiameter 8,1 cm, kertas label, wadah compact disk (CD) untuk wadah filter, HNO_3 , NH_4OH , larutan APDC 1%, kertas saring millipore diameter 2,2 cm dengan diameter pori-pori 0,4 μm , larutan standar mengandung unsur-unsur sebagai berikut : unsur Si sebanyak 551,57 ppm, unsur P dan unsur S masing-masing 10 ppm, unsur K dan Ca masing-masing 10 ppm, unsur Ti sebanyak 755,38 ppm dan unsur Sr 10 ppm. Standar internal yang digunakan adalah Co dan Br masing-masing sebanyak 20 ppm. Bahan baku semen berupa clay (tanah liat), pasir silika, gypsum masing-masing 0,05 g, serta pasir besi dan limestone (batu kapur) masing-masing 0,025 g. Plastik mylar untuk penutup sampel dalam filter, nitrogen cair untuk pendingin detektor, air demineralisasi, sumber pengekstansi untuk alat XRF : ^{241}Am dan ^{55}Fe .

Alat. Cascade impactor 9 tingkat dengan diameter pori mulai dari di bawah 0,4 μm sampai 9,0 μm buatan Andersen-USA, tripot, pompa isap vakum SIBATA buatan Hitachi Ltd. beserta flowmeter, generator listrik (jenset) 2500 watt buatan Honda, dan perangkat spektrometri pendar sinar-X (XRF) buatan Ortec USA model 659.

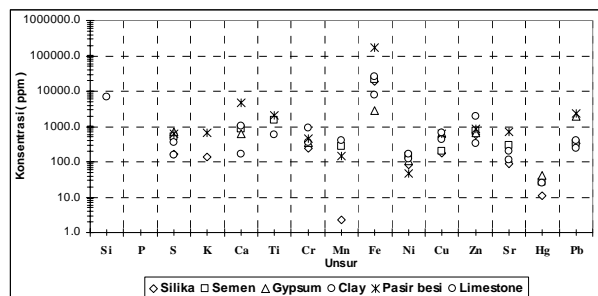
Tata kerja. Penentuan kandungan dan konsentrasi unsur-unsur di dalam debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ dilakukan dengan mengukur contoh pada filter Whatman dan filter mylar yang ada di cascade impactor dengan menggunakan alat Spektrometer Pendar Sinar-X (XRF). Sampel debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ yang ada di filter didestruksi secara kimia sebelum diukur dengan alat XRF. Pengukuran juga dilakukan terhadap bahan baku semen dan debu di pinggir jalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan dan konsentrasi unsur-unsur yang dikandung bahan baku semen ditampilkan pada Gambar 2. Kandungan unsur-unsur dalam semen dari pabrik semen, Bogor jenis ordinary portland cement adalah S, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb. Kandungan unsur-unsur dalam pasir silika yaitu S, K, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb. Gypsum mengandung unsur-unsur S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Hg, dan Pb. Tanah liat mengandung unsur-unsur S, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb. Unsur-unsur yang ada didalam pasir besi adalah S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, dan Pb.

Unsur-unsur yang ada didalam batu kapur adalah Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg, dan Pb. Kandungan unsur Si sebenarnya ada di dalam semen dan pasir silika. Akan tetapi karena konsentrasinya kecil, dan larutan

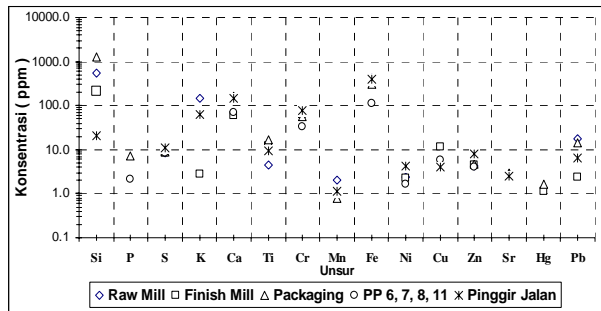
APDC dalam preparasi contoh di laboratorium yang berfungsi menggumpalkan contoh termasuk semua unsur di dalamnya kurang bisa menggumpalkan unsur Si pada semen dan pasir silika, sehingga unsur Si tidak ada yang terdeteksi oleh alat XRF pada semen dan pasir silika.



Gambar 2. Konsentrasi unsur-unsur yang dikandung bahan baku semen

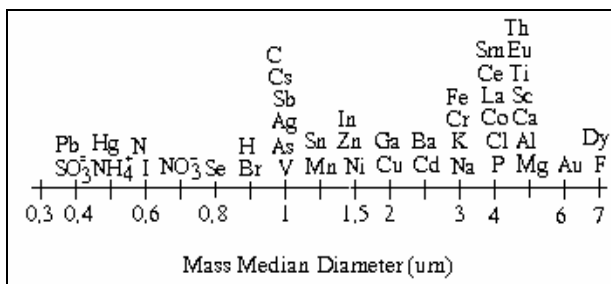
Secara keseluruhan total hasil analisis kandungan unsur-unsur di dalam bahan baku semen yang terdeteksi dari pabrik semen ada 15 unsur adalah Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb, kecuali unsur P tidak terdeteksi. Unsur-unsur S, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb terdapat pada semua bahan baku semen dari pabrik semen, sedangkan unsur-unsur yang tidak semua bahan baku semen ada yaitu Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Sr, dan Hg. Menurut standar semen USA, ordinary portland cement (BCS-CRM no. 372/1) buatan Bureau of Analyzed Samples Ltd. mengandung unsur-unsur Si, Al, Ti, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, S, sedang white portland cement (BCS-CRM no. 354) mengandung unsur-unsur Si, Al, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, S, Sr, dan P. Berdasarkan laporan kerja pabrik semen, Bogor (2000), komposisi bahan kimia bahan baku semen dari pabrik semen yang lebih banyak memproduksi ordinary portland cement mengandung senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, dan SO_3 . Menurut Darmono (2001), pabrik semen di Eropa pada tahun 1979 mengeluarkan emisi logam berbahaya berupa unsur Pb dan Cd [10]. Unsur-unsur Mg, Al dan Na tidak dapat dideteksi dengan alat XRF, sedang unsur Cd memerlukan waktu pencacahan XRF yang agak lama. Karena keterbatasan alat, unsur-unsur tersebut tidak dilakukan penulis. Dengan demikian beberapa hasil analisis kandungan unsur-unsur di dalam bahan baku semen dari penelitian ini bersesuaian dengan unsur-unsur dari beberapa sumber informasi diatas. Konsentrasi unsur-unsur di dalam pabrik semen dan di pinggir jalan diperlihatkan pada Gambar 3. Unsur-unsur yang beterbangan di raw mill pabrik semen adalah Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, dan Pb. Unsur-unsur yang ada di finish mill juga sama dengan di raw mill, tetapi ada tambahan unsur Hg dan tidak terdeteksinya Mn dan Sr. Unsur-unsur yang diteliti di packaging ada semua, kecuali unsur K yang tidak terdeteksi. Unsur P tidak terdeteksi dalam bahan baku semen ordinary portland cement, tetapi terdeteksi di tempat packaging, berarti unsur P tersebut berasal dari

semen jenis *white portland cement* yang juga diproduksi pabrik semen. Unsur Si terbesar di *packaging* daripada di *raw mill* dan *finish mill*. Unsur Si yang berdiameter kurang dari 5 µm tinggi dapat menyebabkan silikosis [8, 12]. Dari 15 unsur yang terdeteksi hanya 8 unsur saja yang terdeteksi di pusat Plant 6, 7, 8, dan 11 yaitu unsur-unsur P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu dan Zn.



Gambar 3. Konsentrasi unsur-unsur di dalam pabrik semen dan di pinggir jalan.

Menurut Darmono (2001), ke-8 unsur yang ada di pusat Plant 6, 7, 8, 11, berdiameter MMD minimal 1,5 sampai 7 µm (Gambar 4) [10]. Unsur-unsur yang terdapat di pinggir jalan ± 400 m di utara pabrik semen sama dengan 13 unsur-unsur yang ada di *raw mill* dengan konsentrasi yang berbeda. Dengan demikian unsur-unsur yang kemungkinan berasal dari *raw mill* dikeluarkan lewat cerobong mengalami deposisi di pinggir jalan tersebut, tetapi tidak terdeposisi secara keseluruhan di Pusat Plant (PP) 6, 7, 8, 11, hanya 8 unsur saja. Hal ini terbukti beberapa unsur di pinggir jalan tersebut mengalami penurunan konsentrasi dari konsentrasi unsur di *raw mill*, sedangkan sebagian unsur mengalami peningkatan konsentrasi yang kemungkinan berasal dari unsur debu tanah atau bahan bakar kendaraan bermotor.



Gambar 4. Ukuran Mass Median Diameter (µm)

Hardjowigeno (1989) menyatakan unsur-unsur Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Sr, dan Sn adalah unsur-unsur yang berasal dari proses abrasi tanah yang terbawa debu terbang ke udara [22]. Sedangkan menurut Darmono (1995), kandungan logam berat dalam tanah secara alami dengan kisaran non pencemaran adalah unsur-unsur As (5 sampai 3000 ppm, rata-rata 100 ppm), Co (1 sampai 40 ppm, rata-rata 8 ppm), Cu (2 sampai 300 ppm, rata-

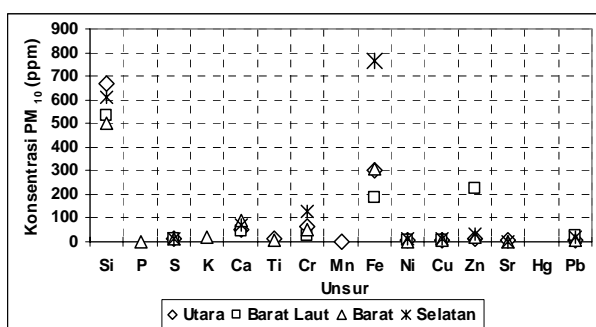
rata 20 ppm), Pb (2 sampai 200 ppm, rata-rata 10 ppm), Zn (10 sampai 300 ppm, rata-rata 50 ppm), Cd (0,05 sampai 0,7 ppm, rata-rata 0,06 ppm) dan Hg (0,01 sampai 0,3 ppm, rata-rata 0,03 ppm) [7]. Saeni (1989) mengungkapkan hara-hara makro di dalam tanah adalah unsur-unsur C, H, O, Ni, P, K, Ca, Mg dan S, sedangkan hara-hara mikro di dalam tanah adalah unsur-unsur B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Na, V dan Zn [23]. Dengan demikian hasil analisis kandungan unsur-unsur di dalam partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} dari penelitian ini mengandung partikel debu dari tanah adalah P, S, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Sr, Zn, Hg, dan Pb. Unsur-unsur dalam tanah tersebut terdapat di dalam kandungan unsur-unsur di dalam partikel debu di pinggir jalan ± 400 m di utara pabrik semen dengan konsentrasi logam berat yang lebih rendah dari konsentrasi yang disebutkan Darmono (1995), terkecuali unsur Hg dan P yang tidak terdeteksi.

Kandungan unsur-unsur dari bahan bakar minyak mentah (untuk pabrik, kendaraan, pembangkit tenaga listrik, dan lain-lain) dan batubara berdasarkan informasi dari Darmono, 1995 adalah As, Cd, Pb dan Hg [7]. Untuk minyak mentah, konsentrasi unsur-unsur tersebut adalah As (0,0024 sampai 1,63 ppm), Cd (0,03 sampai 2,10 ppm), Pb (0,001 sampai 0,31 ppm), dan Hg (0,014 sampai 30 ppm). Untuk batubara, adalah As (0,34 sampai 130 ppm), Cd (0,01 sampai 300 ppm), Pb (0,70 sampai 220 ppm), dan Hg (0,01 sampai 1,60 ppm). Soedomo (1999) menyatakan bahwa pencemar dari bahan bakar bensin dan solar adalah CO, NO_x (NO, NO₂), SO₂, TSP, dan Pb [9]. Unsur Pb dari bahan bakar tersebut terdapat di dalam kandungan unsur-unsur di dalam partikel debu di pinggir jalan ± 400 m di utara pabrik semen dengan konsentrasi Pb yang lebih tinggi dari konsentrasi yang disebutkan Darmono (1995).

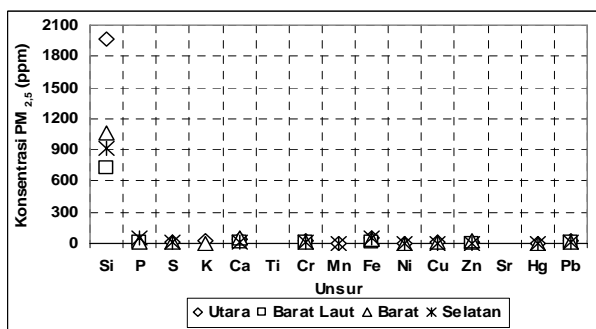
Kandungan unsur-unsur di dalam hasil analisis partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} di pinggir jalan sebelah utara pabrik semen dapat disimpulkan mengandung unsur-unsur di dalam debu bahan baku semen (Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr dan Pb), debu tanah (S, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr dan Pb) dan unsur Pb dari bahan bakar. Unsur-unsur di pinggir jalan tersebut dijadikan kontrol untuk mendeteksi kandungan unsur-unsur di dalam partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} di rumah-rumah sekitar pabrik semen.

Konsentrasi unsur-unsur dalam partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} di rumah-rumah pada jarak 500 m dari pabrik semen masing-masing dapat diperhatikan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Unsur-unsur Si, Ca, Cr, Fe, Zn dan Pb terdapat di rumah-rumah sebelah utara, barat laut, barat dan selatan dari pabrik semen baik pada PM₁₀ dan PM_{2.5}. Konsentrasi unsur Si dalam PM₁₀ dan PM_{2.5} tertinggi terdapat pada arah utara. Unsur Si berasal dari kandungan bahan baku semen, berarti di rumah-rumah sebelah utara pabrik semen pada jarak 500 m kemungkinan tercemar bahan baku semen. Unsur-unsur P, K, Ti, dan Mn sebagian tidak terdeteksi, sedangkan unsur Hg tidak terdeteksi pada partikel debu PM₁₀. Pada

partikel $PM_{2.5}$ terdapat unsur-unsur K dan Mn yang sebagian tidak terdeteksi, sedangkan unsur Ti dan Sr tidak terdeteksi. Sebagian besar konsentrasi unsur-unsur S, Ca, K, Cr, Ni, Sr, dan Fe rata-rata hampir sama atau lebih rendah, sedangkan konsentrasi unsur-unsur Si, Cu, Zn, dan Pb lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi unsur-unsur di pinggir jalan. Konsentrasi unsur Pb dalam partikel debu PM_{10} tertinggi di sebelah barat laut, sedangkan $PM_{2.5}$ tertinggi di sebelah utara. Konsentrasi unsur Fe tertinggi pada PM_{10} di sebelah selatan, tetapi pada $PM_{2.5}$ tertinggi di sebelah utara.



Gambar 5. Konsentrasi debu PM_{10} di luar rumah pada jarak 500 m dari pabrik semen



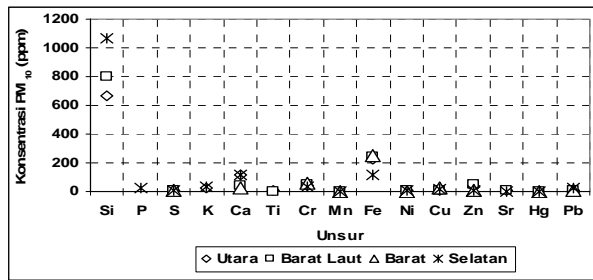
Gambar 6. Konsentrasi debu $PM_{2.5}$ di dalam rumah pada jarak 500 m dari pabrik semen

Konsentrasi unsur-unsur di dalam PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di rumah-rumah yang melebihi konsentrasi unsur-unsur di pinggir jalan, kemungkinan unsur-unsur tersebut berasal dari partikel debu bahan baku semen dan tanah, sebaliknya bila lebih rendah dari konsentrasi unsur di pinggir jalan kemungkinan salah satu dari bahan baku semen atau tanah, tergantung konsentrasi unsur di dalam pabrik semen. Bila konsentrasi unsur tersebut di dalam pabrik semen rata-rata lebih rendah, berarti unsur di rumah tersebut berasal dari debu tanah, dan bila sebaliknya berasal dari bahan baku semen. Terkecuali unsur-unsur Si, Ti, dan Cr yang hanya berasal dari debu bahan baku semen, dan unsur P hanya berasal dari debu tanah. Konsentrasi unsur-unsur di dalam partikel debu PM_{10} lebih besar daripada konsentrasi unsur-unsur di dalam $PM_{2.5}$, berarti kemungkinan unsur-unsur tersebut dari luar rumah masuk ke dalam rumah lebih besar,

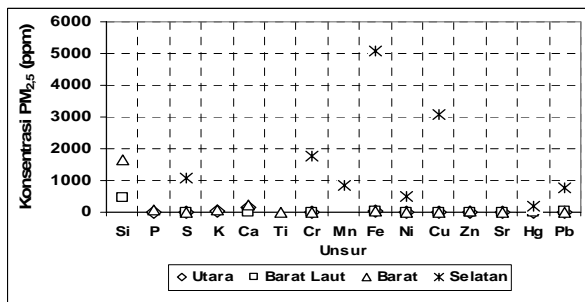
kecuali unsur di dalam $PM_{2.5}$ tidak terdeteksi berarti kondisi fisik rumah tersebut telah melakukan penyaringan dengan baik. Sebaliknya bila konsentrasi unsur-unsur di dalam PM_{10} lebih rendah daripada di dalam $PM_{2.5}$, berarti unsur tersebut mendapat kontribusi dari dalam lingkungan rumah tersebut dibandingkan dari luar rumah. Unsur Pb bisa berasal dari bahan baku semen, debu tanah dan bahan bakar. Bila konsentrasi unsur Pb di rumah-rumah lebih rendah dibandingkan dengan unsur Pb di pinggir jalan, maka unsur Pb tersebut berasal dari bahan bakar (mengingat konsentrasi Pb kecil menurut Darmono, 1995). Bila lebih tinggi, maka unsur Pb di rumah tersebut bisa berasal dari bahan baku semen atau debu tanah, tergantung konsentrasi unsur Pb di dalam pabrik semen rata-rata lebih rendah, berarti unsur Pb di rumah tersebut berasal dari debu tanah, dan bila sebaliknya berasal dari bahan baku semen.

Kandungan dan konsentrasi unsur-unsur di dalam partikel debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di rumah-rumah pada jarak 3000 m dari pabrik semen dapat diperhatikan masing-masing pada Gambar 7 dan Gambar 8. Unsur Si terdapat di rumah-rumah sebelah utara, barat laut, dan selatan pabrik semen pada pengukuran PM_{10} , sedangkan pada $PM_{2.5}$ hanya terdapat di barat dan barat laut pada jarak 3000 m. Konsentrasi unsur Si dalam PM_{10} tertinggi terdapat di sebelah selatan dan dalam $PM_{2.5}$ tertinggi terdapat di sebelah barat. Unsur-unsur P, K, Ti, dan Mn sebagian besar tidak terdeteksi. Unsur-unsur S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb sebagian besar terdapat di rumah-rumah sebelah utara, barat laut, barat dan selatan. Sebagian besar konsentrasi unsur-unsur S, Ca, K, Cr dan Fe rata-rata hampir sama atau lebih rendah, sedangkan konsentrasi unsur-unsur Ni, Cu, Zn, Sr dan Pb lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi unsur-unsur di pinggir jalan. Konsentrasi unsur Pb dalam partikel debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ tertinggi di rumah di sebelah selatan. Konsentrasi unsur-unsur S, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Hg dan Pb tertinggi dalam debu $PM_{2.5}$ berada di sebelah selatan. Hal ini kemungkinan karena unsur-unsur tersebut mendapat kontribusi dari dalam lingkungan rumah tersebut dibandingkan debu semen dari pabrik semen, yaitu di sekitar rumah-rumah itu dilewati conveyor belt yang membawa bahan baku semen dari pegunungan ke pabrik.

Nilai Ambang Batas (NAB) unsur-unsur berdasarkan Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja No. SE-01/MEN/1997 tentang Nilai Ambang Batas (NAB) faktor kimia di udara lingkungan kerja yang diadopsi sepenuhnya dari TLV-ACGIH 1996, ditampilkan pada Tabel 1. Sebagian besar hasil analisis unsur-unsur dari partikel debu PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di rumah-rumah pada jarak 500 m dan 3000 m dari pusat pabrik semen lebih besar daripada NAB unsur-unsur. Hal ini membuktikan bahwa unsur-unsur tersebut dapat menyebabkan toksisitas yang melebihi kandungan normal maksimum dan dapat mengganggu kesehatan penghuni.



Gambar 7. Kandungan debu PM₁₀ di luar rumah pada jarak 3000 m dari pabrik semen



Gambar 8. Kandungan debu PM_{2.5} di dalam rumah pada jarak 3000 m dari pabrik semen

Tabel 1. Nilai Ambang Batas unsur-unsur

Unsur	Berat Molekul	Konsentrasi (ppm)
Si	28	8,75
P	31	0,08
S	32	3,98
K	39	0,06
Ca	40	1,22
Ti	48	5,10
Cr	52	0,24
Mn	55	0,09
Fe	56	0,44
Ni	58	0,42
Cu	63	0,39
Zn	64	3,83
Sr	88	0,0001
Hg	202	0,012
Pb	208	0,006

KESIMPULAN

Sebagian besar kandungan unsur-unsur dalam partikel debu PM₁₀ dan PM_{2.5} di rumah-rumah pada jarak 500 m dan 3000 m sebelah utara, barat laut, barat dan selatan pabrik semen berasal dari debu bahan baku semen (Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Hg dan Pb) dan debu tanah (P, S, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Sr, Zn, Hg, dan Pb), kecuali ada tambahan unsur Pb dari bahan bakar kendaraan di sebelah utara pabrik semen pada jarak 3000 m dalam PM_{2.5}. Unsur-unsur Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, dan Pb terdapat di pinggir jalan sama dengan unsur-unsur di dalam pabrik semen (di *raw mill*) dengan konsentrasi berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- KANTOR MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP / BAPEDAL, Undang - Undang Republik Indonesia Nomor 23 tahun 1997, Tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup , Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup/ Bapedal, (1997).
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME / WORLD HEALTH ORGANIZATION, Measurement of suspended particulate matter in ambient air, GEMS (Global Environment Monitoring System) / AIR Methodology Reviews Handbook Series, Vol. 3, WHO/EOS/94.3, UNEP/GEMS / 94.A.4, UNEP/ WHO, Nairobi, Kenya, (1994).
- BUNAWAS, O.P. RUSLANTO, SURTIPANTI dan YUMIARTI, Partikel debu anorganik : Komposisi, diameter, pengendapan di saluran pernafasan dan efek terhadap kesehatan., Prosiding Seminar Nasional Kimia Anorganik, Hotel Garuda, Yogyakarta, (1999).
- D.A. LUNDGREN, D.N. HLAING, T.A. RICH, and V.A.MARPLE, PM₁₀ / PM_{2.5} / PM₁ Data from a Trichofamous sampler, Aerosol Science and Technology. 25: (1996) 353-357.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, Acute Respiratory Infection in Children Case Management in Small Hospital in Developing Countries, Ditjen PPM & PLP, Depkes RI, Jakarta, (1992).
- L. FRIBERG, T. KJELLSTROM, and G. NORDBERG, Pb, Zn, Cu, Hg., In Handbook on the Toxicology of Metal, Elsevier / North Holland Biomedical Press (1979).
- DARMONO, Logam Dalam Sistem Biologi Mahluk Hidup, Cetakan Pertama, Universitas Indonesia, Jakarta (1995).
- P.K. SUMA'MUR, Higiene Perusahaan dan Kesehatan Kerja, cetakan ke 4, Penerbit PT Gunung Agung, Jakarta, (1984) 105-150.
- M. SOEDOMO, Kumpulan Karya Ilmiah Pencemaran Udara, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung (1999).
- DARMONO, Lingkungan Hidup dan Pencemaran (Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa logam), Universitas Indonesia Press, Jakarta (2001).
- M.M. SINTORINI, Hubungan antara Kadar Partikulat Melayang (PM₁₀) Udara Ambien dengan Kejadian Gejala Penyakit Saluran Pernapasan (Studi pada Pabrik Semen-X dan Penduduk Sekitarnya di Cileungsi, Bogor), Program Pascasarjana, Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia, Jakarta, (1998) 34 - 36.
- S. HENDROMARTONO, Gangguan Saluran Napas Kecil Akibat Pengaruh Debu Semen, Lembaga Penelitian Universitas Airlangga, Surabaya (1995).
- R. ROTH, Germanium Silicon / Silica, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/ gesi.html, (2003).

14. R. ROTH, Sodium Phosphorus, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/pna.html (2003).
15. R. ROTH, Strontium, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/sr.html (2003).
16. R. ROTH, Zinc Potassium, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/znk.html (2003).
17. R. ROTH, Selenium Sulfur, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/ses.html (2003).
18. B. K. MARCIA, Foods that Heal, Sulphur, sci. med. nutrition, bulmj@harrier.sasknet.sk.ca (1996).
19. R. ROTH, DRI/RDA for Calcium & Magnesium + Vitamin A D K, Acu-Cell Nutrition, www.acu-cell.com/acn2.html (2004).
20. ANONYMOUS, Metal in nutrition : Calcium-metals in health and disease, www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session2/group29/index.htm (2003).
21. ANONYMOUS, about trace elements : Titanium Zinc Vanadium, Center For Biotic Medicine, www.microelementsru/english/21-23en.shtml (2003).
22. HARDJOWIGENO, SARWONO, Ilmu Tanah, PT Mediyatama Sarena Perkasa, Jakarta (1989).
23. M.S. SAENI, Zat-zat Pencemar Udara, Bahan Pengajaran Kimia Lingkungan, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Pusat Antar Universitas Ilmu Hayat, Institut Pertanian Bogor, (1989) 131-133.

