

**PERANAN ABU SEKAM PADI TERHADAP STABILITAS KUALITAS
SEMEN PORTLAND KOMPOSIT YANG MENGGUNAKAN ADITIF
BATU KAPUR**

*ROLE OF RICE HUSK ASH ON THE STABILITY OF THE QUALITY OF
PORTLAND COMPOSITE CEMENT BY USE OF LIMESTONE ADDITIVES*

LOTH BOTAHALA

P1100211404



PROGRAM MAGISTER

JURUSAN KIMIA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2013

TESIS

**PERANAN ABU SEKAM PADI TERHADAP STABILITAS KUALITAS SEMEN
PORTLAND KOMPOSIT YANG MENGGUNAKAN ADITIF BATU KAPUR**

Disusun Dan Diajukan Oleh :

**LOTH BOTAHALA
Nomor Pokok P1100211404**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis

pada tanggal 11 November 2013

dan dinyatakan telah memenuhi syarat

UNIVERSITAS HASANUDDIN

Menyetujui
Komisi Penasehat


Dr. Muhammad Zakir, M.Si
Ketua

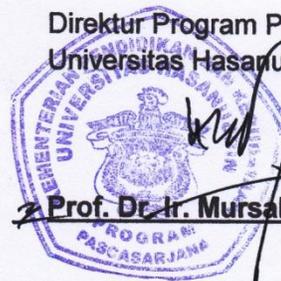

Dr. Paulina Taba, M.Phil
Anggota

Ketua Program Studi
Kimia


Dr. Paulina Taba, M.Phil

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Hasanuddin


Prof. Dr. Ir. Mursalim



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Loth Botahala

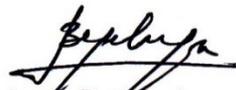
Nomor mahasiswa : P1100211404

Program studi : Pascasarjana kimia

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 11 November 2013

Yang menyatakan,



Loth Botahala

KATA PENGANTAR

ALLAH MAHA BESAR. Itulah yang dapat penulis ucapkan kepada ALLAH yang Esa atas Anugerah-NYA yang begitu luar biasa dalam segala kekurangan penulis menyelesaikan tesis ini.

Gagasan yang melatari permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap kondisi bangunan rumah penduduk yang menggunakan Semen *Portland* Komposit. Penulis bermaksud menyumbangkan ide untuk peningkatan kualitas semen dengan menggunakan limbah sekam padi yang juga merupakan masalah bagi masyarakat,

Banyak kendala yang penulis hadapi dalam rangka penyusunan tesis ini, yang hanya berkat bantuan berbagai pihak sehingga tesis ini dapat selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada Ketua Yayasan Tribuana Alor, Bapak Permenas L. Kolly, SE yang selalu peduli terhadap segala keterbatasan penulis dalam studi, Bapak Dr. Muhammad Zakir, M.Si dan Ibu Dr. Paulina Taba, M.Phill selaku komisi penasihat, atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan ini, pelaksanaan penelitian sampai dengan penulisan tesis ini. Terima kasih kepada Bapak Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sc., Bapak Dr. Ir. Prastawa Budi, dan Bapak Dr. Maming, M.Si selaku penguji yang telah memberikan

koreksi yang sangat berharga terhadap penulisan tesis. Ucapan terima kasih juga kepada Bapak Dahlang Tahir, M.Sc.,Ph.D. pada Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains FMIPA Unhas, Bapak Ashari Ibrahim, S.ST.,M.T. pada Laboratorium Bahan dan Beton POLTEK Ujung Pandang, dan Bapak Budiono pada Laboratorium Pengendalian Mutu PT. Semen Kupang, yang telah banyak membantu dalam penelitian, serta rekan-rekan mahasiswa magister kimia Unhas angkatan 2011 dalam memberikan informasi yang berhubungan dengan tesis ini. Terakhir ucapan terima kasih kepada mama, adik-adik, isteri, anak-anak, serta semua pihak yang namanya tidak tercantum tetapi telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Makassar, 11 November 2013

Penulis,


Loth Botahala

ABSTRAK

LOTH BOTAHALA, *Peranan Abu Sekam Padi terhadap Stabilitas Kualitas Semen Portland Komposit yang Menggunakan Aditif Batu Kapur*, (dibimbing oleh Muhammad Zakir dan Paulina Taba).

Penelitian ini bertujuan menentukan (1) karakteristik semen portland komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif, (2) karakteristik abu sekam padi yang akan digunakan dalam penelitian ini, dan (3) peranan konsentrasi abu sekam padi terhadap stabilitas komponen kimia semen, kuat tekan, penyerapan air, dan porositas dari Semen *Portland* Komposit .

Pengujian dilakukan secara kimia dengan menggunakan metode XRD (*X-Ray Diffraction*) dan XRF (*X-Ray Fluorescence*) serta secara mekanis fisis melalui uji kuat tekan, uji penyerapan air, dan uji porositas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Semen *Portland* Komposit mengandung komponen CaO dan SO₃ yang tinggi (70,96% dan 4,81%) serta perhitungan konsentrasi mineral dengan 3CaO.SiO₂ yang sangat tinggi (118,878%) dan 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ rendah (6,621%) jika dibandingkan dengan Semen *Portland* Tipe I, sedangkan 2CaO.SiO₂ negatif dan 3CaO.Al₂O₃ tidak ditemukan dalam semen. Koonsentrasi semen seperti ini dapat menghasilkan Ca(OH)₂ berlebih. Konsentrasi 2% abu sekam padi terhadap Semen *Portland* Komposit dapat berperan dalam stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit baik secara fisik maupun secara kimia.

Kata Kunci : Semen *Portland* Komposit, sekam padi, stabilitas kualitas semen

ABSTRACT

LOTH BOTAHALA, *The Role of Rice Husk Ash on the Stability of Portland Composite Cement Quality by Use of Limestone Additives*, (Supervised by Muhammad Zakir and Paulina Taba).

The aims of the study are to determine (1) the characteristics of *Portland Composite Cement* with limestone as an additive, (2) characteristics of rice husk ash to be used in this study, and (3) the role of rice husk ash concentration on the stability of the chemical components of cement, compressive strength, water absorption, and porosity of *Portland Composites Cement*.

Tests carried out chemically by using XRD (X-Ray Diffraction) and XRF (X-Ray Fluorescence) and mechanically through the physical test compressive strength, water absorption test, and porosity testing.

The results of the research indicated that the *Portland Composite Cement* containing components CaO and SO₃ is high (70.96% and 4.81%) as well as the calculation of mineral concentrations with a very high 3CaO.SiO₂ (118.878%) and 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ are low (6.621%) compared *Portland Cement Type I*, whereas negative 2CaO.SiO₂ and 3CaO.Al₂O₃ were not found in the cement. Such cement concentrations can produce Ca(OH)₂ excess. Concentration of 2% rice husk ash to *Portland Composite Cement* may contribute to the stability of *Portland Composite Cement* quality both physically and chemically.

Keywords : *Portland Composite Cement, Rice husk, stability of cement quality.*

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xiii
Bab I Pendahuluan	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian	5
E. Ruang Lingkup Penelitian	6
Bab II Tinjauan Pustaka	7
A. Semen	7

B. Klinker	18
C. Sekam Padi.....	19
D. Agregat.....	22
E. Mortar	23
F. Analisis Kimia dan Uji Mekanis Fisis.....	24
G. Kerangka Pikir.....	32
H. Hipotesis	35
Bab III Metode Penelitian	36
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	36
B. Bahan dan Alat Penelitian	36
C. Prosedur Penelitian	37
Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan	45
A. Pembuatan Abu Sekam Padi	45
B. Analisis Karakteristik	45
C. Analisis Sifat Mekanis Fisis	50
Bab V Kesimpulan dan Saran	54
A. Kesimpulan	54
B. Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

nomor	halaman
1. Emisi gas CO ₂ pada proses produksi semen	15
2. Syarat fisika semen portland komposit	16
3. Perbandingan pengaruh emisi gas CO ₂ terhadap pemanasan global	20
4. Data konsentrasi komponen kimia abu sekam padi	20
5. Karakteristik fisik abu sekam padi	21
6. Komposisi mortar Semen <i>Portland</i> Komposit	23
7. Matriks perbandingan variasi pembakaran abu sekam padi	37
8. Matriks perbandingan konsentrasi abu sekam padi terhadap Semen	37
9. Perbandingan Semen <i>Portland</i> Komposit dan abu sekam padi .	41
10. Hasil karakterisasi sampel abu sekam padi	46
11. Karakteristik konsentrasi abu sekam padi terhadap Semen <i>Portland</i> Komposit	47
12. Perbandingan hasil perhitungan konsentrasi mineral semen	48
13. Hasil uji kuat tekan mortar	51

DAFTAR GAMBAR

nomor	halaman
1. Proses pembuatan Semen <i>Portland</i>	8
2. Diagram reaksi hidrasi partikel semen	12
3. Karakteristik peristiwa radiasi	24
4. Jarak radiasi elektromagnetik	25
5. Peristiwa hukum Bragg's	26
6. Diagram energi Jablonski	28
7. Diagram alir kerangka pikir	34
8. Hasil karakterisasi abu sekam padi dengan metode XRD	46
9. Perbandingan konsentrasi mineral semen	49
10. Perbandingan kuat tekan	52
11. Penyerapan air dan porositas	53

DAFTAR LAMPIRAN

nomor	halaman
1. Syarat mutu Semen <i>Portland</i>	60
2. Prosedur pembuatan abu sekam padi	62
3. Prosedur pembuatan benda uji dan pengujian	63
4. Hasil <i>X-RF</i> sampel	64
5. Perhitungan konsentrasi mineral semen	72
6. Data dan hasil pengujian kuat tekan	74
7. Data dan hasil uji penyerapan air dan porositas	77

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
ASP	Abu Sekam Padi.
ASTM	<i>American Society for Testing and Material.</i>
<i>Clinker</i>	Hasil pembakaran material penyusun semen pada tungku pembakaran.
<i>Ettringite</i>	Istilah yang diberikan kepada senyawa yang bersifat menunda reaksi hidrasi.
Mineral	suatu bahan atau zat yang homogen mempunyai komposisi kimia tertentu atau dalam batas-batas dan mempunyai sifat-sifat tetap, dibentuk di alam dan bukan hasil suatu kehidupan.
<i>rpm</i>	<i>revolution per minute</i> (putaran per menit)
SNI	Standar Nasional Indonesia
SPK	Semen <i>Portland</i> Komposit
<i>Tobermorite</i>	Istilah yang diberikan kepada senyawa yang sifatnya sebagai semen (memberikan daya rekat dan kekuatan).
W_{od}	<i>Weight oven dry</i>
W_{ssd}	<i>Weight saturated surface dry.</i>

BAB I

PEDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Peningkatan kebutuhan pembangunan perumahan, perhubungan, dan industri berdampak pada peningkatan kebutuhan akan bahan pendukungnya. Salah satu bahan pendukung yang sangat dibutuhkan adalah semen. Semen merupakan bahan perekat berbentuk bubuk yang jika ditambahkan air dapat mengikat bahan-bahan padat menjadi satu kesatuan massa yang kokoh (Marzuki, 2009).

Untuk mengurangi dampak pemanasan global (*global warming*), melalui penurunan emisi gas CO₂, maka industri semen sebagai salah satu penghasil emisi gas CO₂ (sebanyak 830 kg/ton semen) telah beralih untuk memproduksi Semen *Portland* Komposit dengan mengurangi penggunaan klinker (*clinker*) yang diganti dengan material alternatif pada penggilingan akhir (Partana, *et.al*, 2010; Priyo dan Sofyan, 2012).

Semen *Portland* Komposit adalah hasil pencampuran antara Semen Portland dengan satu atau lebih bubuk bahan anorganik antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur (CaCO₃), dengan kadar total 6 - 35% dari massa Semen *Portland* Komposit (Anonim, 2004). Menurut Riyadi dan Amalia (2005), suatu bahan

diklasifikasikan sebagai pozolan apabila mempunyai komposisi kimia seperti yang dipersyaratkan oleh *ASTM C 618-78*, yaitu jumlah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimal 70%.

Batu kapur yang disyaratkan sebagai aditif dalam SNI 15-7064-2004, juga merupakan bahan baku utama pembuatan semen sehingga bahan ini mudah diperoleh di sekitar lokasi pabrik semen jika dibandingkan dengan bahan aditif lain. Namun demikian, berdasarkan hasil penelitian Tosun *et.al.* (2009), dan Marzuki (2009), setiap penambahan 2% batu kapur sebagai aditif pada semen dapat menurunkan kualitas semen. Oleh karena itu diperlukan suatu aditif pozolanik lain yang dapat ditambahkan pada Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif.

Penelitian sifat mekanik Semen *Portland* Komposit telah dilakukan oleh Partana *et.al.* (2010) yang menyatakan bahwa penambahan *fly ash* pada klinker untuk mengurangi penggunaan klinker pada penggilingan akhir, berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan mortar yang terbuat dari Semen *Portland* Komposit. Menurut Nugraha dan Antoni (2007), *fly ash* memiliki kelebihan yakni memiliki kadar bahan semen dan sifat pozolan yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai aditif tanpa dikombinasikan dengan aditif lain. Walaupun demikian, proses pengambilannya melalui sistem pengendapan elektrostatik dan ketersediaannya sangat terbatas.

Menurut Putra (2006), abu sekam padi dapat diklasifikasikan sebagai pozolan karena mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih besar dari 70%

sesuai dengan mutu pozolan yang dipersyaratkan. Dengan ukuran partikel 5-10 μm ; bentuk partikel *cellular* dan *irregular*; berat jenis 2,0-2,4 kg/m^3 ; luas permukaan 20-50 m^2/kg ; dan memiliki kandungan silika *amorf* 85-90%, abu sekam padi dapat berperan sebagai aditif yang potensial pada semen (Nugraha dan Antoni, 2007; Karim *et.al.*, 2012).

Sekam padi merupakan limbah dari hasil pertanian dari proses penggilingan padi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk pembakaran batubata, atau dibakar begitu saja di area penggilingan padi dan abunya digunakan untuk keperluan abu gosok (Soeswanto dan Lintang, 2011). Aplikasi sekam padi yang lain adalah digunakan sebagai *filter* (penyaring) terhadap arsen dalam air (Kalapathy and Proctor, 2000), sebagai adsorben terhadap minyak pada permukaan air (Chou *et.al.*, 2001), sebagai adsorben terhadap fenol dalam larutan (Mahvi *et.al.*, 2004), sebagai adsorben terhadap ion logam dalam larutan (Srivastava *et.al.*, 2006), sebagai adsorben terhadap penurunan angka peroksida minyak kelapa tradisional (Wahjuni dan Kostradiyanti, 2008), serta sebagai bahan untuk pembuatan briket sekam padi (Jahiding M., *et.al.*, 2011).

Data Badan Pusat Statistik Indonesia menunjukkan bahwa produksi padi Indonesia selama 4 tahun dari tahun 2008 sampai dengan tahun 2011 berturut-turut sebesar 60.325.925, 64.398.890, 66.469.394, dan 66.740.946 ton (Suryamin, 2012). Ketika bulir padi digiling, 78% dari beratnya adalah

beras dan 22% adalah kulit gabah (Nugraha dan Antoni, 2007; Karim *et.al.*,2012). Dengan demikian maka dapat dikatakan bahwa limbah sekam padi selama 4 tahun dari tahun 2008 sampai dengan tahun 2011 berturut-turut sebesar 13.271.703, 14.167.756, 14.623.267, dan 14.683.008 ton dan akan terus meningkat setiap tahunnya sehingga kebutuhan akan abu sekam padi sebagai bahan aditif pada semen cukup tersedia.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 pada abu sekam padi yang diperlukan dalam proses pembuatan semen memiliki konsentrasi yang berbeda-beda (Della, *et.al.*, 2002; Folleto *et.al.*, 2006; Putra, 2006; Bakri, 2008; Silva, *et.al.*, 2008; Salas, *et.al.*, 2009; Karim, *et.al.*, 2012). Oleh karena itu pembuatan abu sekam padi perlu dilakukan dengan variasi suhu terhadap variasi waktu untuk memperoleh mutu pozolan yang terbaik sehingga dapat dalam penelitian ini sebagai bahan aditif bersama batu kapur yang selama ini digunakan oleh pabrik semen sebagai bahan aditif.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif ?

2. Bagaimana karakteristik abu sekam padi dari penggilingan padi kabupaten Alor yang digunakan dalam penelitian ini?
3. Bagaimana peranan konsentrasi abu sekam padi terhadap stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif ?

C. Tujuan Penelitian

1. Menentukan karakteristik Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif.
2. Menentukan karakteristik abu sekam padi dari penggilingan padi kabupaten Alor yang akan digunakan dalam penelitian ini.
3. Menentukan peranan konsentrasi abu sekam padi terhadap stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif .

D. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi ilmiah tentang :

1. Kualitas Semen *Portland* Komposit yang menggunakan aditif batu kapur.
2. Pengolahan limbah sekam padi menjadi bahan aditif untuk stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit.

E. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini dibatasi pada :

1. Analisis karakteristik Semen *Portland* Komposit yang menggunakan aditif batu kapur.
2. Analisis karakteristik abu sekam padi
3. Analisis karakteristik konsentrasi abu sekam padi terhadap Semen *Portland* Komposit.
4. Uji kuat tekan mortar, uji porositas mortar, dan uji penyerapan air mortar dari konsentrasi abu sekam padi terhadap Semen *Portland* Komposit
5. Penentuan peranan konsentrasi abu sekam padi terhadap Semen *Portland* Komposit.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Semen

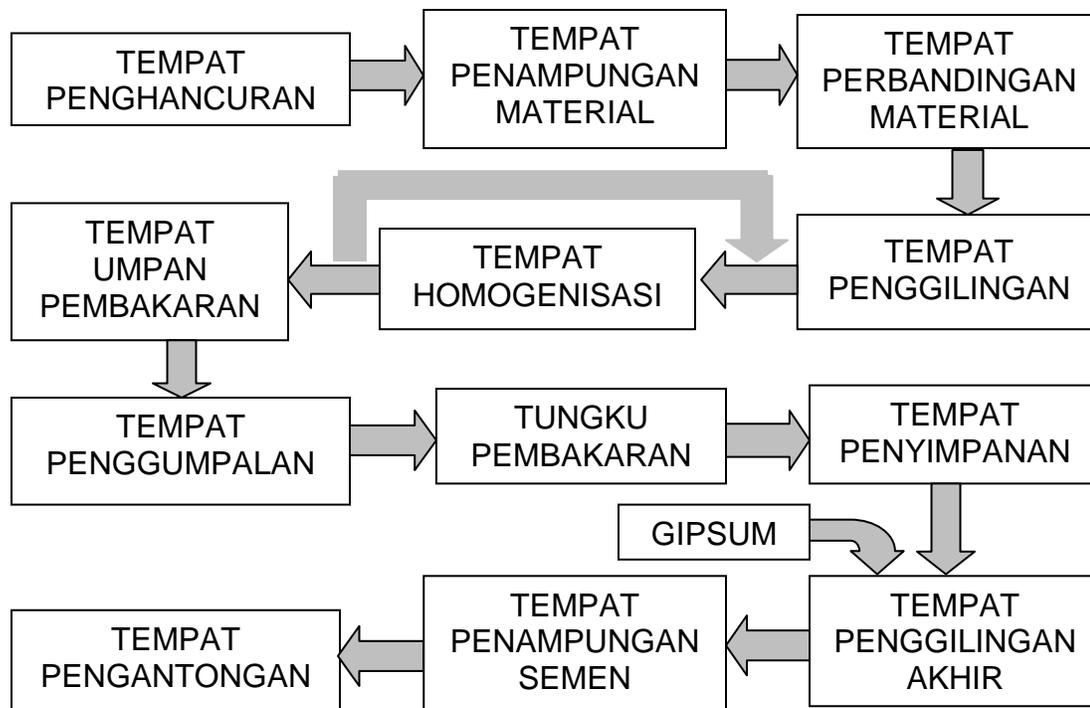
1. Sejarah Semen

Bangunan tertua yang ditemukan di tepi sungai Danube, Lipenski Vir, Yugoslavia adalah sebuah lantai berbentuk trapesium dengan tebal 25 cm, dibuat tahun 6500 Sebelum Masehi. Lantai ini terbuat dari kapur merah, pasir, dan kerikil, yang ditambahkan air. Sekitar tahun 3000 Sebelum Masehi, orang Mesir kuno menggunakan tanah liat yang dikombinasikan dengan jerami dan kapur untuk mengikat batu bata yang dikeringkan untuk membangun piramida-piramida. Tahun 500 Sebelum Masehi, orang Yunani kuno menggunakan kapur untuk menutupi dinding dari bata yang tidak dibakar pada pembangunan istana Croesus dan Attalus. Tahun 300 Sebelum Masehi, orang Romawi menggunakan abu gunung berapi yang mengandung silika dan alumina di Pozzuoli dekat gunung Vesuvius, Italia yang dikombinasikan dengan kapur dan menghasilkan Semen Pozzolan. Tahun 1756, John Smeaton membuat mortar dari campuran kapur dan tanah liat yang dibakar, dan digunakan membangun mercusuar *Eddystone* tahun 1759. Tahun 1824, Joseph Aspdin mengajukan hak paten untuk pembuatan semen

dari pencampuran antara kapur dan tanah liat yang dibakar tersebut dengan nama Semen Portland, karena warnanya yang kelabu dan kekuatan yang dihasilkan menyerupai semen alami dari pulau Portland, Inggris. Setelah 20 tahun kemudian, J.D.White membangun pabrik semen portlad di Kent, Inggris. (Nugraha dan Antoni, 2007).

2. Semen *Portland*

Menurut Riyadi dan Amalia (2005), Semen *Portland* adalah bahan perekat yang dapat mengeras bila bersenyawa dengan air dan berbentuk padat yang tidak larut dalam air. Secara umum, proses pembuatan semen menurut Tarukbua dan Botahala (1996), diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses pembuatan Semen *Portland*.

Bahan baku berupa bongkahan batu kapur dan tanah liat diangkut ke tempat penghancuran untuk dipecahkan lalu diangkut ke tempat penampungan material. Dari tempat penampungan, material (batu kapur, tanah liat, pasir besi, pasir silika) diangkut ke tempat perbandingan material untuk pengaturan perbandingan, selanjutnya diangkut ke tempat penggilingan untuk digiling sekaligus dikeringkan. Dari tempat penggilingan, material diangkut dan dimasukkan ke tempat homogenisasi. Hasil homogenisasi sempurna dengan sendirinya akan masuk ke tempat penampungan umpan pembakaran sedangkan yang belum sempurna dikembalikan untuk dihomogenisasi lagi. Dari tempat penampungan umpan pembakaran, material diangkut ke tempat penggumpalan material untuk pembuatan gumpalan/butiran sebelum dibakar pada tungku pembakaran. Selanjutnya hasil pembakaran diangkut ke tempat penyimpanan untuk didinginkan, dan bersama-sama gipsum dengan perbandingan tertentu diangkut ke penggilingan akhir untuk digiling menjadi semen. Setelah itu semen diangkut ke tempat penampungan semen dan selanjutnya diangkut ke tempat pengantongan semen. Setelah dikantongkan, semen siap dipasarkan.

Komponen utama dalam pembuatan semen adalah oksida kapur (CaO) : (60 - 67)%; oksida silika (SiO_2) : (17 - 24)%; oksida alumina (Al_2O_3) : (3 - 8)%; dan oksida besi (Fe_2O_3) : (0,5 - 6)%. Selain itu semen juga mengandung oksida magnesium (MgO), oksida alkali (Na_2O dan K_2O), oksida titan (TiO_2), oksida fosfor (P_2O_5), serta gipsum. Komponen utama

memberikan kontribusi terhadap proses pembentukan klinker dan sifat-sifat semen yang dihasilkan. Sebaliknya oksida-oksida lain dibatasi sampai persentase tertentu untuk menjaga kualitas semen atau untuk menghindari masalah proses (Neville dan Brooks, 2010; Marzuki, 2009).

Bogue memberikan suatu rumusan tentang reaksi pembentukan fasa mineral semen dalam klinker yaitu terjadi reaksi antara komponen-komponen utama penyusun semen. Oksida besi (Fe_2O_3) bereaksi dengan oksida alumina (Al_2O_3) dan oksida kapur (CaO) membentuk $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$. Oksida alumina (Al_2O_3) yang tersisa bereaksi dengan oksida kapur (CaO) membentuk $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$. Oksida kapur bereaksi dengan oksida silika (SiO_2) membentuk $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ dan $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Mohammed, 2012).

Secara umum, konsentrasi dan sifat mineral Semen *Portland* yaitu: $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (50-70)% yang sifatnya memberikan hidrasi dan pengikatan yang cepat serta kontribusi terhadap kekuatan awal, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (10-30)% yang sifatnya memberikan hidrasi lambat dan kekuatan dalam jangka panjang, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (3-13)% yang sifatnya memberikan hidrasi sangat cepat, panas hidrasi yang tinggi, kontribusi terhadap pengikatan dan kekuatan awal, dan $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5-15)% yang sifatnya memberikan hidrasi cepat, dan warna semen (van Oss, 2005). Menurut Mulyono (2005), penentuan konsentrasi mineral semen dapat dilakukan berdasarkan persamaan stoikiometri Bogue dengan :

- Jika $Al_2O_3 / Fe_2O_3 > 0,64$ maka :

$$3CaO.SiO_2 = (4,071 \times \%CaO) - (7,6 \times \%SiO_2) - (6,718 \times \%Al_2O_3) - (1,430 \times \%Fe_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3) \dots\dots\dots(1)$$

$$2CaO.SiO_2 = (2,867 \times \%SiO_2) - (0,7544 \times \%3CaO.SiO_2) \dots\dots\dots(2)$$

$$3CaO.Al_2O_3 = (2,650 \times \%Al_2O_3) - (1,692 \times \%Fe_2O_3) \dots\dots\dots(3)$$

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = (3,043 \times \%Fe_2O_3) \dots\dots\dots(4)$$

- Jika $Al_2O_3 / Fe_2O_3 < 0,64$ maka :

$$3CaO.SiO_2 = (4,071 \times \%CaO) - (7,6 \times \%SiO_2) - (4,479 \times \%Al_2O_3) - (2,859 \times \%Fe_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3) \dots\dots\dots(5)$$

$$2CaO.SiO_2 = (2,867 \times \%SiO_2) - (0,7544 \times \%3CaO.SiO_2) \dots\dots\dots(6)$$

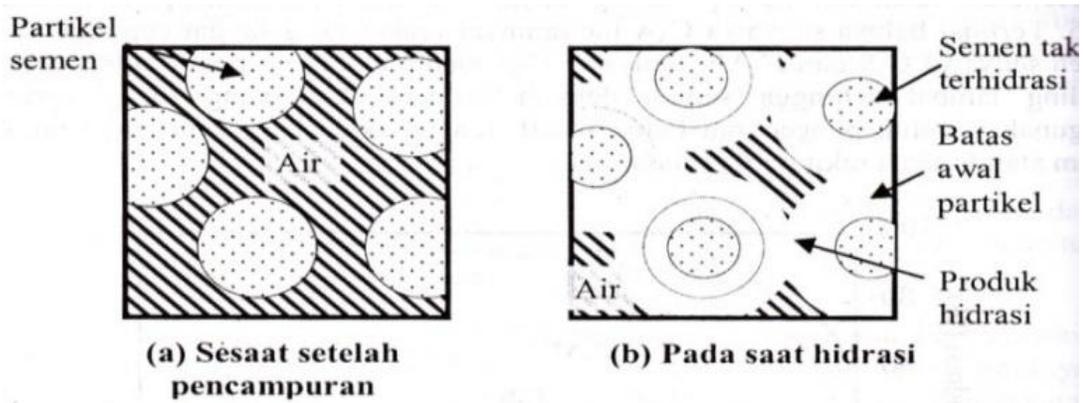
$$3CaO.Al_2O_3 = \text{tidak ada dalam komposisi semen ini}$$

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = (2,1 \times \%Al_2O_3) + (1,702 \times \%Fe_2O_3) \dots\dots\dots(7)$$

ASTM C 150-2004 memberikan rumusan konsentrasi mineral Semen Portland Tipe I sebagai berikut : $3CaO.SiO_2 = 56,9\%$; $2CaO.SiO_2 = 14,8\%$; $3CaO.Al_2O_3 = 8,9\%$; $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = 8,2\%$ (Tennis and Bhatta, 2006).

a. Reaksi hidrasi

Menurut Nugraha dan Antoni (2007), semen akan mengalami hidrasi ketika bersenyawa dengan air. Proses hidrasi terjadi seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram reaksi hidrasi partikel semen (sumber : Nugraha dan Antoni, 2007).

b. Hidrasi CaO.SiO_2

CaO.SiO_2 akan terhidrasi menjadi $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$ (*gel tobermorite*) yang merupakan perekat/pengikat sebenarnya dalam semen dan Ca(OH)_2 (kapur padam) yang bersifat basa kuat ($\text{pH} = 12,5$), menyebabkan semen sensitif terhadap asam (Nugraha dan Antoni, 2007).

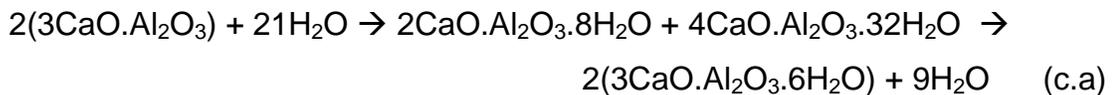


Menurut van Oss (2005), 3CaO.SiO_2 mengalami reaksi hidrasi yang relatif cepat. Pada umur 5 hari, 60% dari total 3CaO.SiO_2 mengalami hidrasi membentuk $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca(OH)}_2$. Umur 10 hari, meningkat menjadi 70% terhidrasi. Umur 28 hari, 80% 3CaO.SiO_2 terhidrasi, hingga 85% 3CaO.SiO_2 terhidrasi pada umur 60 hari, setelah itu hidrasi 3CaO.SiO_2 akan melambat dan tidak memberikan pengaruh lagi terhadap kekuatan. Sebaliknya hidrasi 2CaO.SiO_2 relatif lambat dengan sekitar 20% pada umur

5 hari, meningkat menjadi 30% setelah umur 10 hari, sekitar 40% setelah 28 hari dan 55% pada umur 60 hari. Laju hidrasi akan melambat setelah 60 hari. $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ yang terbentuk dari $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ memberikan kontribusi yang berarti bagi kekuatan setelah 7 hari.

c. **Hidrasi $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$**

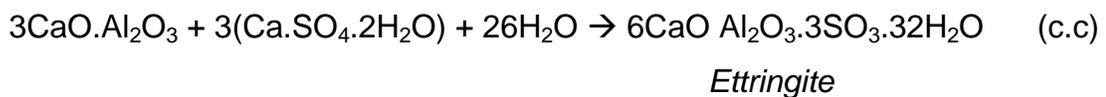
Menurut van Oss (2005), kedua mineral ini memiliki jalur hidrasi yang kompleks dan mirip namun $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ bereaksi sangat cepat secara eksotermis, meningkatkan kekuatan awal dengan cepat. Jika tidak adanya sulfat yang signifikan, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ sangat cepat terhidrasi membentuk $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ yang tidak stabil dan akan terkonversi ke bentuk lain.



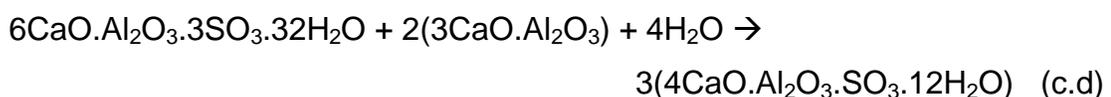
Kekurangan Al_2O_3 menyebabkan dominannya kapur



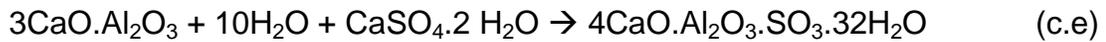
Sedangkan hidrasi $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ dengan adanya sulfat (ditunjukkan sebagai gipsum) adalah sebagai berikut.



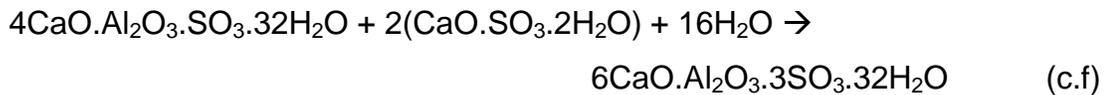
Ettringite memblokir air dari permukaan $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ sehingga menunda hidrasi. Kemudian *ettringite* akan bereaksi dengan $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.



Atau hidrasi $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ dalam kondisi sulfat rendah, dinyatakan dengan

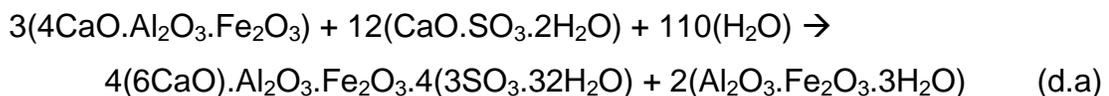


Adanya $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, dapat membentuk *ettringite* kembali

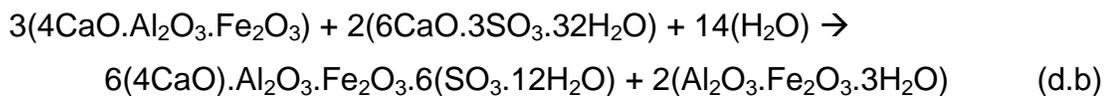


Sedangkan $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ tidak berperan penting dalam hidrasi semen.

Dengan adanya sulfat, hidrasi $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ menjadi lambat dengan terbentuknya fasa *ettringite*, seperti reaksi berikut.



Sebagaimana pada reaksi (c.e), jika konsentrasi sulfat rendah maka *ettringite* dari $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ menjadi tidak stabil dan terbentuk reaksi seperti berikut



Berdasarkan *ASTM C-150*, Semen *Portland* dibagi menjadi 5 Tipe yaitu Tipe I, semen untuk penggunaan umum, sehingga tidak memerlukan persyaratan khusus dengan konsentrasi $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tidak melebihi 15%; Tipe II, semen yang penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dengan konsentrasi $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tidak melebihi 8%; Tipe III, semen yang penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi dengan konsentrasi $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ dan $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ lebih tinggi; Tipe IV, semen yang penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah

dengan konsentrasi $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ dan $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ relatif tinggi serta $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ dan $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ relatif rendah; Tipe V, semen yang penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat dengan konsentrasi $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ sangat rendah (Mulyono, 2005); van Oss, 2005). Menurut Anonim (2004a), syarat mutu Semen *Portland* di Indonesia harus memenuhi persyaratan kimia dan fisika SNI 15-2049-2004 yang dapat dilihat pada Lampiran 1.

3. Semen *Portland* Komposit

Untuk mengurangi dampak pemanasan global (*global warming*), dengan cara penurunan emisi gas CO_2 , industri semen banyak yang beralih untuk memproduksi Semen *Portland* Komposit dengan mengurangi penggunaan klinker yang diganti dengan material alternatif pada penggilingan akhir (Partana, *et.al.*, 2010). Data Cembureau 1999 bahwa proses produksi semen menghasilkan emisi gas CO_2 sebanyak 830 kg/ton semen dengan rincian seperti pada Tabel 1 (Priyo dan Sofyan, 2012).

Tabel 1. Emisi gas CO_2 pada proses produksi semen

Hasil	Kalsinasi CaCO_3	Batu bara	Operasional
Jumlah emisi (kg/ton semen)	450	280	100

Semen *Portland* Komposit adalah hasil pencampuran antara Semen *Portland* dengan satu atau lebih bubuk bahan anorganik, antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan

kadar total 6 - 35% dari massa semen (Anonim, 2004b). Menurut Riyadi dan Amalia (2005), suatu bahan diklasifikasikan sebagai Pozolan berdasarkan ASTM C 618-78 yaitu $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimal 70%.

SNI 15-7064-2004 menetapkan spesifikasi teknis Semen *Portland* Komposit yang digunakan untuk konstruksi umum dengan acuan normatif SNI 15-2049-2004, Semen *Portland*. Sedangkan syarat mutu Semen *Portland* Komposit berdasarkan SNI-15-7064-2004 adalah sebagai berikut (Anonim, 2004b) :

- a. Syarat kimia Semen *Portland* Komposit : SO_3 maksimum 4,0 %.
- b. Syarat fisika Semen *Portland* Komposit dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Syarat fisika Semen *Portland* Komposit

No	Uraian	Satuan	Persyaratan
1	Kehalusan dengan alat blaine	m^2/kg	min. 280
2	Kekekalan bentuk dengan autoclave : - pemuaian - penyusutan	% %	maks. 0,80 maks. 0,20
3	Waktu pengikatan dengan alat vicat : - pengikatan awal - pengikatan akhir	menit menit	min. 45 maks. 375
4	Kuat tekan : - umur 3 hari - umur 7 hari - umur 28 hari	kg/cm^2 kg/cm^2 kg/cm^2	min. 125 min. 200 min. 250
5	Pengikatan semu : - penetrasi akhir	%	min. 50
6	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

Berdasarkan SNI 15-7064-2004, salah satu bahan aditif yang dapat digunakan dalam pembuatan Semen *Portland* Komposit adalah batu kapur, yang juga merupakan bahan baku utama pembuatan semen sehingga bahan ini mudah diperoleh di sekitar lokasi pabrik semen jika dibandingkan dengan bahan aditif lain (Anonim, 2004b). Namun demikian, berdasarkan hasil penelitian oleh Marzuki (2009) bahwa setiap penambahan 2% batu kapur sebagai bahan aditif pada semen, dapat mengakibatkan penurunan kualitas semen. Demikian pula oleh Tosun *et.al.* (2009), bahwa dengan penambahan unsur kalsium oksida (CaO) yang terkandung dalam batu kapur pada semen dapat menurunkan kuat tekan semen. Hal ini disebabkan karena dengan semakin banyaknya kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) yang terbentuk dari hasil hidrasi semen, akan menimbulkan celah atau rongga antara pasta semen dengan agregat sehingga dapat mengurangi daya rekat semen yang mengakibatkan struktur di dalamnya lemah dan menyebabkan kuat tekannya rendah. Oleh karena itu diperlukan penambahan aditif lain yang dapat mengimbangi tingginya CaO, sehingga dapat mengisi celah atau rongga yang terbentuk dari hasil hidrasi CaO pada mortar Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif.

Penelitian sifat mekanik dari mortar Semen *Portland* Komposit telah dilakukan oleh Partana, *et.al.* (2010) yang menyatakan bahwa penambahan *fly ash* dan *slag* dapat mengurangi penggunaan klinker pada penggilingan akhir, berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan mortar yang terbuat dari

Semen *Portland* Komposit. Kelebihan dari *fly ash* menurut Nugraha dan Antoni (2007) yaitu memiliki kadar bahan semen yang tinggi dan sifat pozolan sehingga tidak perlu dikombinasikan dengan aditif lain. Walaupun demikian, proses pengambilannya melalui sistem pengendapan elektrostatik dan ketersediaannya sangat terbatas.

B. Klinker

Klinker merupakan bahan hidrolis yang terdiri atas mineral $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, dan $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan konsentrasi tertentu yang dihasilkan melalui proses pembakaran (Aldieb and Ibrahim, 2010; Alemaheyu and Sahu, 2013; Idris *et.al.*, 2007). Kualitas klinker ditentukan oleh perbandingan proporsional material pembentuk semen sebelum dibakar (Nugraha dan Antoni, 2007; Alemaheyu and Sahu, 2013).

Pabrik semen mengurangi penggunaan klinker (*clinker*) dan diganti dengan material alternatif dengan konsentrasi tertentu pada penggilingan akhir untuk mengurangi emisi gas CO_2 (Partana, *et.al.*, 2010; Priyo dan Sofyan, 2012).

C. Sekam Padi

Sekam padi merupakan hasil samping dari proses penggilingan padi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk pembakaran batu bata, atau dibakar begitu saja di area penggilingan padi dan abunya digunakan hanya untuk keperluan abu gosok (Soeswanto dan Lintang, 2011). Aplikasi sekam padi yang lain adalah digunakan sebagai *filter* (penyaring) terhadap arsen dalam air (Kalapathy and Proctor, 2000), sebagai adsorben terhadap minyak pada permukaan air (Chou *et.al.*, 2001), sebagai adsorben terhadap fenol dalam larutan (Mahvi *et.al.*, 2004), sebagai adsorben terhadap ion logam dalam larutan (Srivastava *et.al.*, 2006), sebagai adsorben terhadap penurunan angka peroksida minyak kelapa tradisional (Wahjuni dan Kostradiyanti, 2008), serta pembuatan briket sekam padi sebagai bahan bakar alternatif (Jahiding M., *et.al.*, 2011).

Kandungan kimia dalam kulit gabah atau sekam padi terdiri atas 50% selulosa, 25-30% lignin, dan 15-20% silika. Ketika dibakar pada suhu 500 °C – 700 °C, 75% kulit gabah habis terbakar dan 25% berat akan berubah menjadi abu yang dikenal dengan abu sekam padi yang mempunyai kandungan silika reaktif (*amorphous silica*) sekitar 85 % - 90 %, (Nugraha dan Antoni, 2007; Karim *et.al.*, 2012).

Menurut Chungsangunsit, *et.al.* (2009), 10% dari asap pembakaran sekam padi berupa gas CO₂ sedangkan pengaruhnya terhadap pemanasan

global ketika dibandingkan dengan beberapa bahan industri lain dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan emisi gas CO₂ pada beberapa bahan industri

Pengaruh terhadap pemanasan global	Sekam padi	Batu bara	Minyak	Gas alam
CO ₂ (kg/MWh)	17,16	1.269,19	813,15	569,27
Perbandingan	1	73,96	47,38	33,17

Beberapa hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan konsentrasi komponen kimia abu sekam padi seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data konsentrasi komponen kimia abu sekam padi

No	Peneliti	Negara	Komponen			
			CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
1.	Della, <i>et.al.</i> , 2002	Brazil	0,54	94,95	0,39	0,26
2.	Folleto <i>et.al.</i> , 2006	Brazil	0,83	94,4	0,61	0,03
3.	Putra, 2006	Indonesia	-	88,92	0,67	0,61
4.	Bakri, 2008	Indonesia	0,65	72,28	0,37	0,32
5.	Silva, <i>et.al.</i> , 2008	Brazil	0,22	97,53	-	0,21
6.	Salas, <i>et.al.</i> , 2009	Kolumbia	0,49	99,00	< 0,01	0,13
7.	Karim, <i>et.al.</i> , 2012	Malaysia	0,90	92,50	1,20	2,10

Karakteristik fisik abu sekam padi menurut Nugraha dan Antoni (2007) serta Karim *et.al.* (2012) seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik fisik abu sekam padi

Bentuk partikel	Ukuran partikel (μm)	Luas permukaan (m^2/kg)	Massa jenis (kg/m^3)
<i>Cellular, Irregular</i>	5 - 10	20 - 50	2,0 – 2,4

Menurut Zhang (1996) meskipun ukuran partikel abu sekam padi lebih besar dari semen, namun dengan reaktivitas yang tinggi karena memiliki kadar silika *amorf* tinggi, dapat meningkatkan kualitas semen.

Menurut Putra (2006), abu sekam padi dapat diklasifikasikan sebagai pozolan karena mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih besar dari 70 % sesuai dengan mutu pozolan yang dipersyaratkan. Pozolan tidak memiliki sifat semen tetapi dengan butiran yang halus dapat bereaksi dengan kapur padam dan air membentuk bahan perekat pada temperatur normal (Wiryasa, *et.al.*, 2006). Sedangkan untuk mengatasi penyerapan air dalam jumlah yang banyak pada semen, volume dan ukuran rongga komposit semen harus dikurangi dengan menambahkan bahan pozolan pada matriks semen yang digunakan (Bakri dan Baharuddin, 2010).

Data Badan Pusat Statistik Indonesia menunjukkan bahwa produksi padi di Indonesia dari tahun 2008 sampai dengan tahun 2011 berturut-turut sebesar 60.325.925, 64.398.890, 66.469.394, dan 66.740.946 ton (Suryamin, 2012). Ketika bulir padi digiling, 78 % dari beratnya adalah beras dan 22 % adalah kulit gabah (Nugraha dan Antoni, 2007). Dengan demikian maka dapat dikatakan bahwa limbah sekam padi dari tahun 2008 sampai dengan

tahun 2011 berturut-turut sebesar 13.271.703,5; 14.167.755,8; 14.623.266,7; serta 14.683.008,1 ton, dan akan meningkat setiap tahunnya sehingga kebutuhan akan sekam padi sebagai bahan aditif pada semen cukup tersedia.

Beberapa peneliti seperti Ajiwe *et.al.* (2000); Putra (2006); Sakr (2006); Silva *et.al.* (2008); Habeeb and Fayed (2009); Bakri dan Baharuddin (2010); Givi *et.al.* (2010) telah membuktikan bahwa penggunaan abu sekam padi sebagai bahan aditif pada Semen *Portland* dapat meningkatkan kuat tekan beton atau mortar secara signifikan dan menurunkan persentase penyerapan air. Namun sejauh ini belum ada penelitian tentang penambahan abu sekam padi sebagai aditif pada mortar Semen *Portland* Komposit yang menggunakan aditif batu kapur. Untuk memperoleh mutu pozolan terbaik, dilakukan variasi suhu dan waktu dalam pembuatan abu sekam padi.

D. Agregat

Agregat adalah butiran material berupa pasir yang berfungsi sebagai bahan pengisi mortar atau beton. Agregat harus terdiri dari butiran yang beragam besarnya agar dapat memiliki daya ikat antara butiran. Agregat halus disebut juga pasir yang butirannya harus menembus ayakan 4,8 mm, dapat diperoleh dari dasar sungai dan galian. Kandungan agregat dalam campuran biasanya berkisar antara 60 - 70% dari berat campuran (Mulyono, 2005).

E. Mortar

Mortar adalah suatu campuran yang terdiri atas semen, agregat halus dan air baik dalam keadaan dikeraskan ataupun tidak dikeraskan (SNI-15-2049-2004). Fungsi utama mortar adalah menambah kerekatan dan ketahanan ikatan dengan bagian-bagian penyusun suatu konstruksi. Kekuatan mortar tergantung pada air semen, jenis semen, jenis agregat, dan bahan tambahan lainnya.

Rasio perbandingan yang proporsional dari mortar standar berdasarkan SNI -15-2049-2004 adalah 1 semen : 2,75 pasir : 0,485 air. Selanjutnya komposisi mortar untuk pembuatan 6 dan 9 benda uji (Anonim, 2004) diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Komposisi mortar semen portland

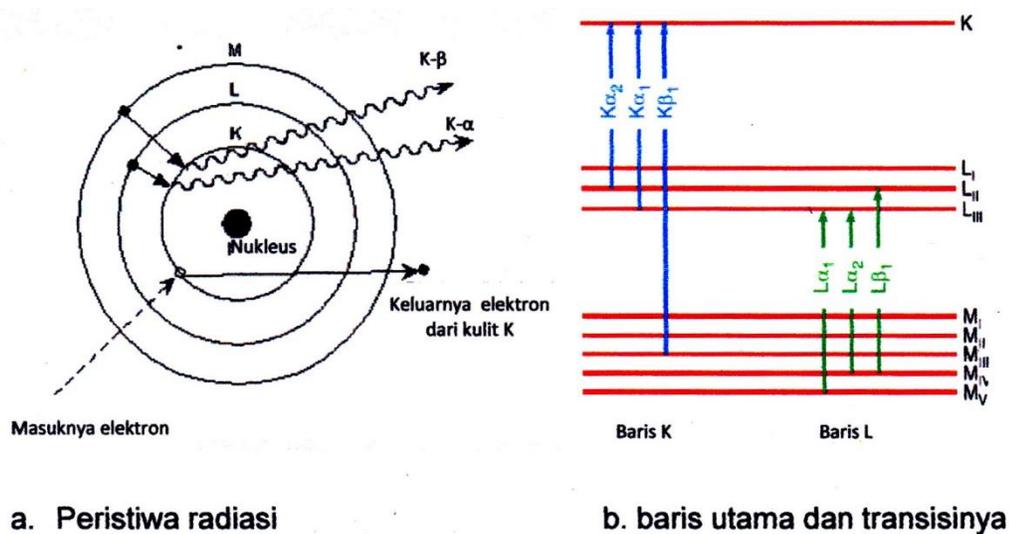
Material	Jumlah benda uji	
	6	9
Semen (gram)	500	740
Pasir (gram)	1375	2035
Air (mL)		
- <i>Portland</i>	242	359
- <i>Portland</i> yang mengandung udara	230	340
- Lain-lain (dengan laju alir 110 ± 5)	-	-

F. Analisis Kimia dan Uji Mekanis Fisis

1. Analisis Kimia

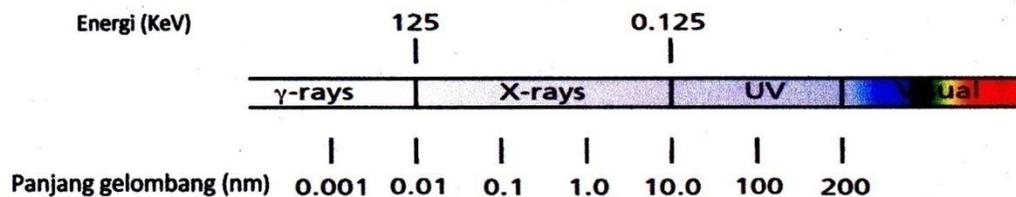
Kebutuhan analisis kimia yang cepat dan akurat oleh suatu industri sangat diperlukan guna kelancaran produksi dengan mutu produk yang memuaskan (Marzuki, 2009). Penggunaan sinar-x dalam analisis kimia merupakan salah satu metode yang cepat dan akurat.

Menurut Atkins' (2006), sinar-x adalah radiasi elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang yang biasanya dihasilkan oleh penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi yang mengemisikan elektron dari atom pada kulit terdalam. Jika elektron jatuh pada kulit K ($n=1$), sinar-x diklasifikasikan sebagai radiasi K, demikian pula pada kulit L ($n=2$), dan pada kulit M ($n=3$). Kekuatannya dibedakan oleh garis K_{α} , K_{β} , dan sebagainya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik peristiwa radiasi (Cobb, 2009; Brouwer, 2010).

Menurut Brouwer (2010), panjang gelombang sinar-x berbanding terbalik dengan energi sebagaimana rumus $E = hv = hc / \lambda$, dimana E adalah energi dalam KeV, λ adalah panjang gelombang dalam nm, h adalah konstanta Planck (1,23985), c adalah kecepatan cahaya (3×10^{10} cm/detik). Jarak radiasi sinar-x dapat dilihat pada Gambar 4.



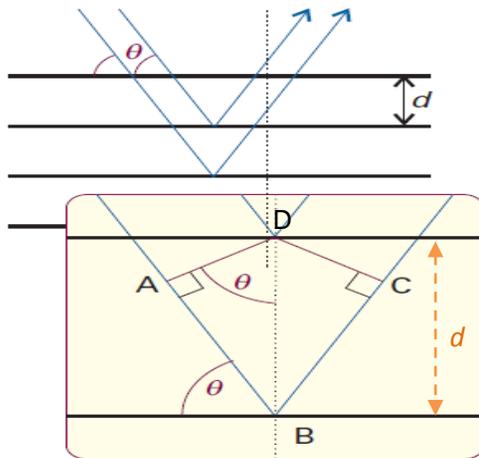
Gambar 4. Jarak radiasi elektromagnetik (Brouwer,2010)

Penggunaan *XRD (X-Ray Diffraction)* untuk menentukan kristalinitas bahan, dan *XRF (X-Ray Fluorencence)* untuk menentukan komponen kimia bahan (Della, *et.al.*, 2002. Salas *et.al.*,2009, Ummah *et.al.* 2010).

1.a. XRD (*X-Ray Diffraction*)

XRD (X-Ray Diffraction) merupakan metode karakterisasi untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi. Dasar prinsip kerja *X-Ray Diffraction* terjadi pada hamburan elastis foton-foton sinar X oleh atom dalam sebuah kisi periodik (Brouwer, 2010; Munasir *et.al.*, 2012).

Menurut Atkins' (2006), dasar penggunaan difraksi sinar-x adalah persamaan Bragg's yang dijelaskan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Peristiwa hukum Bragg's (Atkins', 2006)

Dari Gambar 5, Atkins' (2006) menjelaskan bahwa 2 berkas sinar paralel dari panjang gelombang yang sama ditembakkan pada 2 bidang kisi yang berdekatan. Seberkas sinar menyerang pada titik D pada bidang atas sedangkan sinar yang lain menempuh jarak AB dan membentuk sudut (θ) terhadap bidang normal. Pantulan sinar dibedakan oleh BC. Jarak kedua sinar tersebut adalah

$$\sin \theta = \frac{AB}{d}$$

$$AB = BC = d \sin \theta$$

$$AB + BC = 2 d \sin \theta.$$

dimana d adalah jarak antara kedua bidang kisi, θ adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal. Ketika panjang gelombang dinyatakan dalam bilangan bulat maka $AB + BC = n \lambda$ sehingga memenuhi hukum Bragg's :

$$n \lambda = 2 d \sin \theta.$$

Penggunaan utama hukum Bragg adalah penentuan jarak antara bidang dalam kisi (d).

1.b. XRF (*X-Ray Fluorescence*)

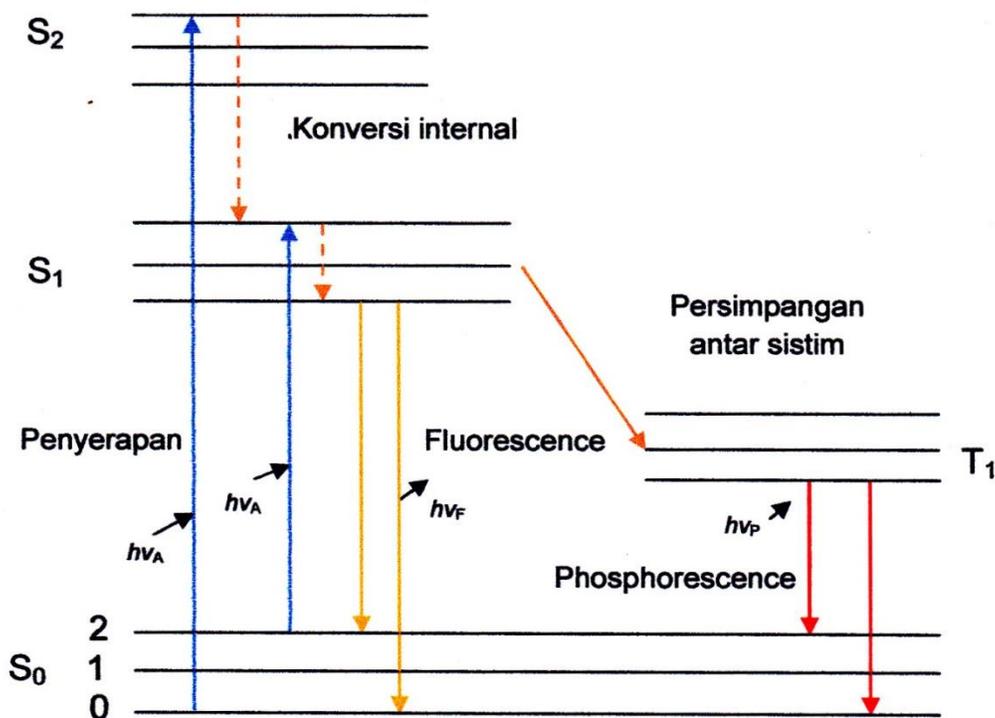
XRF (*X-Ray Fluorescence*) adalah metode analisis kimia untuk menentukan konsentrasi berbagai macam material yang dapat berupa zat padat, cairan, bubuk, atau bentuk yang lain. Metode ini adalah cepat, akurat dan bersifat tidak merusak sampel dan pada umumnya hanya membutuhkan sedikit sampel (Brouwer, 2010).

Menurut Sukirno dan Murniasih (2008), Cobb (2009), dan Gosseau (2009), prinsip pengukuran *XRF* berdasarkan terjadinya proses *eksitasi* elektron pada kulit atom bagian dalam ketika atom suatu unsur tersebut dikenai sinar X. Kekosongan elektron tersebut akan diisi oleh elektron pada kulit atom bagian luar dengan melepaskan sinar X *fluorescence* dengan energi yang spesifik untuk setiap unsur. Spektrum Sinar X *fluorescence* dianalisis untuk diketahui tingkat energi yang identik dengan unsur tertentu dalam sampel sebagaimana terlihat pada Gambar 3.

Menurut Lakowicz (1999), jika molekul dikenai sinar dengan energi yang sesuai dengan perbedaan energi antara elektron pada keadaan dasar dan elektron pada keadaan tereksitasi, maka dapat terjadi penyerapan foton dan penataan distribusi elektron pada molekul hingga mencapai keadaan tereksitasi. Lebih lanjut Lakowicz (1999) menerangkan bahwa setelah eksitasi molekul (atom-atom) dengan penyerapan energi foton, molekul kemudian kembali ke keadaan dasar dengan kehilangan energi dalam 2

kemungkinan yaitu dengan mentransfer panas ke lingkungan (peralihan tanpa radiasi) atau oleh pemancaran (emisi) cahaya (*fluorescence* atau *phosphorescence*).

Penyerapan dan pemancaran cahaya digambarkan dalam diagram tingkat energi oleh A. Jablonski (1935) sebagaimana terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram energi Jablonski (Lakowicz, 1999).

Huruf S (*singlet*) menunjukkan keadaan tereksitasi, pada keadaan dasar (S_0), keadaan pertama (S_1), dan keadaan kedua (S_2), di mana elektron dalam orbital dengan energi yang lebih tinggi memiliki orientasi spin yang berlawanan dengan elektron dalam orbital berikutnya dengan energi yang lebih rendah. 0, 1, 2, dan seterusnya menunjukkan tingkatan energi. Elektron

memiliki orientasi yang sama dalam keadaan *triplet* (T). Pada proses penyerapan, peralihan elektron ke tingkat terendah menghasilkan keadaan getaran tereksitasi dan mencapai keadaan kesetimbangan termal. Setelah penyerapan cahaya, molekul dalam fasa terkondensasi (cair atau padat) dengan cepat menuju tingkat getaran energi terendah dari S_1 dan kelebihan energi beralih ke lingkungan sebagai panas. Proses ini disebut *konversi internal* dan umumnya terjadi pada skala waktu 10^{-12} detik. Karena waktu yang dibutuhkan oleh *fluorescence* (yaitu waktu *fluorophore* dalam keadaan tereksitasi secara elektronik) adalah 10^{-8} detik, *konversi internal* umumnya berhenti sebelum terpancar. Oleh karena itu pancaran *fluorescence* umumnya adalah hasil dari kesetimbangan termal pada keadaan tereksitasi. Molekul pada keadaan S_1 juga dapat mengalami konversi ke keadaan T_1 (disebut persimpangan antar sistim). Pancarannya disebut *phosphorescence* dan umumnya relatif bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang (energi yang lebih rendah) terhadap *fluorescence*. Peralihan dari T_1 ke keadaan dasar merupakan mekanika kuantum “terlarang” karena melibatkan inversi spin. Waktu yang dibutuhkan untuk proses : penyerapan ($\sim 10^{-15}$ detik), konversi internal ($\sim 10^{-12}$ detik), *fluorescence* ($\sim 10^{-8}$ detik), persimpangan antar sistim ($\sim 10^{-8}$ detik), *phosphorescence* (10^{-4} - 10^2 detik), peralihan tanpa radiasi dari S_1 ($\sim 10^{-8}$ detik) atau dari T_1 (10^{-11} - 10^2 detik) (Lakowicz, 1999; Harris, 1999)

2. Uji Mekanis Fisis

a. Kuat Tekan

Kuat tekan mortar adalah kemampuan mortar untuk menahan gaya luar yang menekan mortar. Mortar yang digunakan untuk bahan bangunan harus memiliki kekuatan tertentu, terutama untuk pasangan dinding batu bata, batako dan plesteran. Pengujian kuat tekan mortar dilakukan berdasarkan SNI-15-7064-2004 (Anonim, 2004b), yaitu umur mortar pada 3 hari dengan kekuatan tekan minimum 150 kg/cm^2 , umur 7 hari dengan kekuatan tekan minimum 200 kg/cm^2 , dan umur 28 hari dengan kekuatan tekan minimum 250 kg/cm^2 . Metode pembuatan dan pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan SNI-15-2049-2004 (Anonim, 2004a) dengan beberapa penyesuaian sesuai kebutuhan penelitian. Kuat tekan mortar diperoleh dengan persamaan :

$$F_m = P/A \dots\dots\dots(8)$$

Dengan: F_m adalah kuat tekan (kg/cm^2)

P adalah gaya beban maksimum total (N)

A adalah luas dari permukaan yang dibebani (mm^2)

b. Penyerapan air

Penyerapan air adalah persentase berat air yang mampu diserap oleh suatu benda jika direndam dalam air. Pasta semen setelah proses hidrasi selalu mengandung rongga-rongga berupa makropori, pori kapiler, pori gel

dengan ukuran yang bervariasi. Rongga-rongga ini akan menempati 5 - 6% volume semen yang telah terhidrasi. Pori gel merupakan lapisan antar ruang $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ yang memiliki jarak antara 1 nm sampai beberapa nm. Pori kapiler merupakan rongga-rongga yang tidak terisi oleh senyawa hasil hidrasi yang memiliki diameter 10 nm sampai 50 nm. Makropori terjadi dalam bentuk gelembung udara ketika pencampuran pasta semen dilakukan yang memiliki diameter antara 0,05 mm sampai 0,2 mm. (Bakri dan Baharuddin, 2010). Hal ini akan menyebabkan semakin meningkatnya daya serap air terhadap pasta semen. Daya serap air dapat ditentukan dengan persamaan menurut Nugraha dan Antoni (2007) sebagai berikut :

$$\text{Penyerapan air (\%)} = \frac{W_{ssd} - W_{od}}{W_{od}} \times 100 \dots\dots\dots(9)$$

Dimana : W_{ssd} = berat benda kering permukaan (gram)

W_{od} = berat benda kering oven (gram)

c. Porositas

Kuat tekan pasta semen dipengaruhi oleh besarnya pori-pori hasil hidrasi. Kelebihan air mengakibatkan semakin banyak pori yang terbentuk pada pasta semen sehingga kuat tekan pasta semen menjadi rendah. Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui besarnya porositas yang terdapat pada benda uji (van Vlack, 1994). Porositas dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{W_{ssd} - W_{od}}{V_b} \times \frac{1}{\rho_{air}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Dengan: W_{ssd} = berat benda kering permukaan (gram)

W_{od} = berat benda kering oven (gram)

V_b = volume benda uji (cm³)

ρ_{air} = massa jenis air (1 gr.cm⁻³)

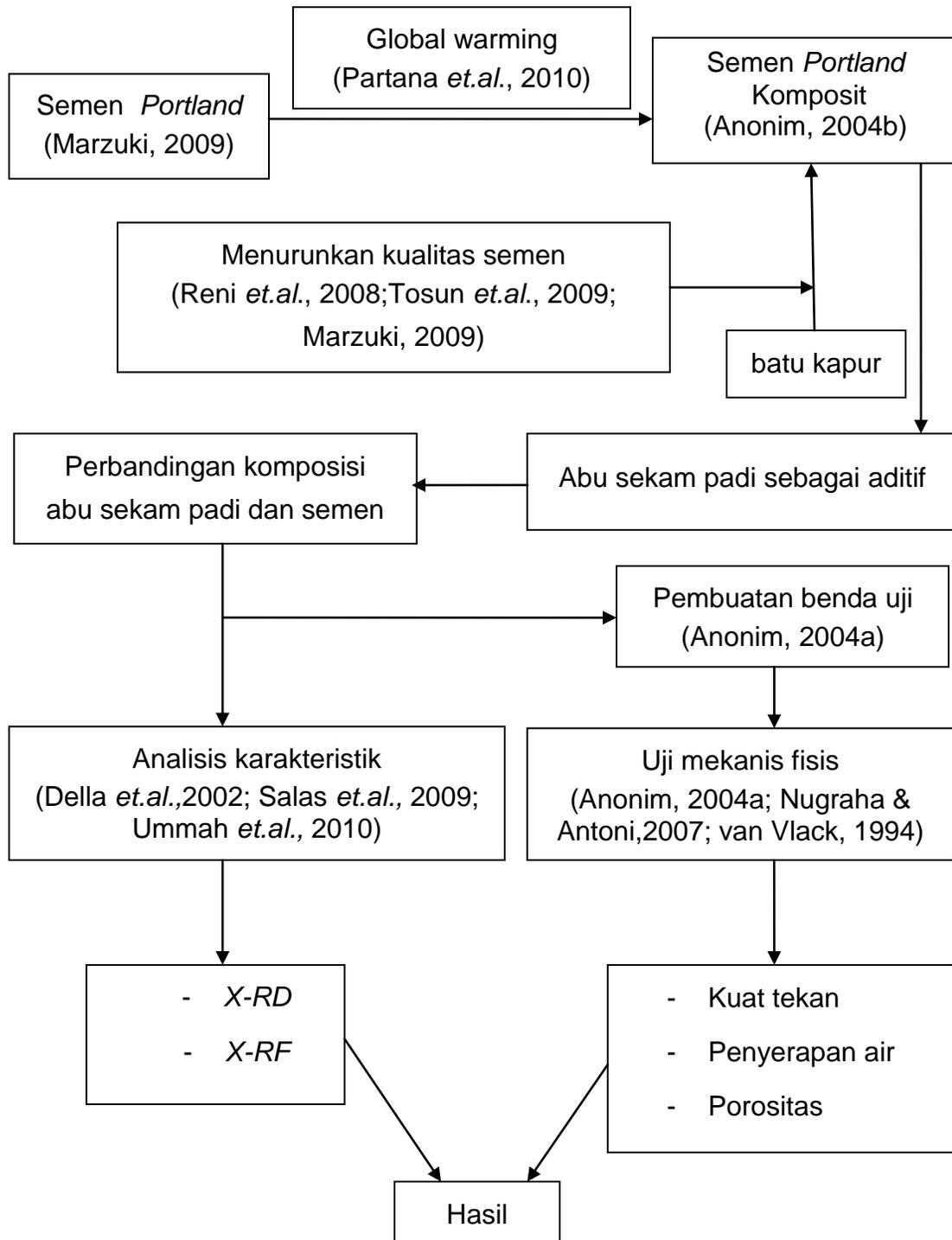
G. Kerangka Pikir

Semen *Portland* Komposit adalah semen jenis baru yang diluncurkan dalam rangka partisipasi menurunkan pemanasan global (*global warming*) dengan cara menurunkan emisi CO₂ dengan mengurangi penggunaan klinker yang diganti dengan material alternatif (Partana, *et.al.*, 2010) seperti batu kapur, slag, material pozolanik (Anonim, 2004b) pada penggilingan akhir. Salah satu bahan aditif yaitu batu kapur merupakan bahan baku utama pembuatan semen sehingga bahan tersebut mudah diperoleh di sekitar lokasi pabrik semen jika dibandingkan dengan bahan aditif lain. Namun berdasarkan hasil penelitian oleh Marzuki (2009) dan Tosun *et.al.* (2009) bahwa setiap penambahan 2 % batu kapur sebagai aditif pada semen, dapat mengakibatkan penurunan kualitas semen karena dengan semakin banyaknya kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) yang terbentuk dari hasil hidrasi semen akan menimbulkan celah atau rongga antara pasta semen dengan agregat. Oleh karena itu diperlukan adanya penambahan aditif lain yang

memiliki sifat pozolan sehingga dapat mengibangi CaO berlebih sekaligus dapat mengisi celah atau rongga pada pasta semen.

Penelitian mengenai pengaruh penambahan abu sekam padi yang mengandung bahan pozolan pada Semen *Portland* terhadap kuat tekan beton dan mortar telah banyak dilakukan, namun sejauh ini belum ada penelitian tentang penggunaan kombinasi aditif antara batu kapur dan abu sekam padi untuk pembuatan Semen *Portland* Komposit.

Untuk mendapatkan silika (*amorf*) reaktif dari abu sekam padi sebagai bahan pozolan, diperlukan kontrol pembakaran yang baik. Temperatur tungku yang tinggi melebihi 800 °C akan menghasilkan abu yang sudah terkristalisasi dan tidak reaktif lagi sehingga tidak mempunyai sifat pozolan (Nugraha dan Antoni, 2007). Selanjutnya, analisa karakteristik sampel untuk penentuan kristalinitas dan komposisi kimia dengan menggunakan *X-RD* dan *X-RF* (Della, 2002, Salas, *et.al.*, 2009, Ummah, *et.al.*, 2010) serta pengujian kuat tekan (Anonim, 2004a), penyerapan air (Nugraha dan Antoni, 2007), dan porositas (van Vlack, 1994).



Gambar 7. Diagram alir kerangka pikir

H. Hipotesis

Berdasarkan rumusan tinjauan pustaka yang telah dikemukakan di atas, maka hipotesis penelitian ini sebagai berikut :

1. Penggunaan batu kapur sebagai aditif pada semen *portland* komposit dapat mempengaruhi komposisi kimia semen sehingga kualitasnya menurun.
2. Abu sekam padi yang dihasilkan memiliki sifat pozolan yang diharapkan sehingga dapat berperan terhadap stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit yang menggunakan aditif batu kapur.
3. Penentuan konsentrasi abu sekam padi dapat berperan dalam stabilitas kualitas Semen *Portland* Komposit yang menggunakan batu kapur sebagai aditif.