

Review Pengaruh Suhu Tinggi Terhadap Perilaku Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash

Remigildus Cornelis¹, Iwan Rustendi²

¹Jurusan teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

Email : remi@staf.udana.ac.id ; iwanrustendi72@gmail.com

ABSTRAK

Semen portland merupakan material pengikat yang banyak digunakan dalam dunia konstruksi. Salah satu alasannya adalah bahwa semen portland memiliki sifat tahan panas yang cukup baik disamping itu material semen portland tidak mudah terbakar, tidak berasap dan tidak mengeluarkan zat beracun ketika terbakar. Namun akibat permasalahan polusi yang cukup signifikan berkaitan dengan produksi semen portland sehingga diperlukan material alternatif yang memiliki sifat yang mirip namun ramah lingkungan. Beberapa hasil penelitian yang menyangkut sifat tahan panas semen geopolimer telah membuktikan bahwa semen geopolimer baik berbentuk pasta, mortar dan beton geopolimer memiliki kestabilan thermal yang lebih baik dibanding semen portland walaupun perilaku ketika mengalami perlakuan panas hampir mirip. Terungkap juga bahwa penurunan kekuatan tekan signifikan material berbasis semen portland yang mengalami perlakuan panas terjadi pada suhu 200°C dan runtuh pada suhu 400°C, sedangkan material geopolimer dapat mencapai suhu hingga 1000°C dan runtuh pada suhu 1200°C. Ketika material geopolimer mengalami perlakuan panas, pada suhu tertentu terjadi perubahan fase atau transisi glass yakni perubahan dari fase getas menjadi fase viscose yang mirip dengan polimer organik, hal ini tidak dimiliki oleh semen portland.

Kata kunci : Suhu Tinggi, Beton, Geopolimer, Fly Ash

Portland cement is a binder that widely used in the construction world. One reason is that it offers adequate fire resistant, unflammable, does not produce any smoke and toxic gases in fire. However, due to the significant pollution problems associated with the production of portland cement necessitating alternative materials that have similar properties but environmentally friendly. Some research concerning heat-resistant properties of geopolymer cement has proved that paste, mortar and geopolymer concrete has better thermal stability than portland cement. The behavior of geopolymers at elevated temperatures is almost similar to portland cement. Also revealed that a significant reduction in the compressive strength of portland cement-based materials occurs at 200°C and collapsed at 400°C, while the geopolymer can reach up to 1000°C and collapsed at 1200°C. at a particular temperature, geopolimer transit from brittle condition to a viscous phase that similar to viscous organic polymer, it is not owned by portland cement.

Key Words : Elevated temperatures, Concrete, Geopolymer, Fly Ash

Pendahuluan

Beton berbasis semen Portland (OPC) secara umum memiliki sifat tahan api, namun sayangnya kekuatan tekannya semakin menurun seiring peningkatan suhu saat terbakar akibat perubahan fisik dan kimia. Disamping itu, mudah terlepasnya selimut beton (spalling) dari beton berbasis semen portland sering terjadi saat kebakaran sehingga bagian terdalam hingga lapisan tulangan terekspose. Untuk itu tentu dibutuhkan biaya perbaikan yang cukup besar guna merehabilitasi struktur beton yang telah mengalami kebakaran. Karena itu banyak usaha dilakukan untuk mencari bahan perekat/pengikat alternatif yang memiliki ketahanan yang cukup baik kekuatan tekannya maupun ketahanan terhadap spalling.

Geopolimer merupakan salah satu bahan perekat/pengikat alternatif yang cukup ramah lingkungan terbuat dari bahan baku yang memiliki kandungan oksida silika dan oksida aluminium yang tinggi antara lain fly ash, kaolin, abu sekam dan sebagainya. Bahan baku ini terutama fly ash adalah produk limbah dari PLTU selanjutnya diaktifasi menggunakan larutan alkali yakni kombinasi campuran dari larutan sodium atau potassium dan larutan sodium silikat atau potassium silikat menghasilkan gel

aluminosilikat yang berfungsi sebagai perekat atau pengikat (*binder*). Pada semen portland, rekasi kimia yang terjadi adalah rekasi hidrasi yang menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (*calcium silicate hydrate*, C S H) sedangkan pada semen geopolimer, rekasi kimia yang terjadi adalah reaksi polimerisasi menghasilkan gel aluminosilikat atau Natrium silikat aluminat hidrat (*Natrium Silicate Aluminate Hydrate* , N S A H). Perbedaan struktur kimia ini menyebabkan perilaku yang berbeda pada saat terpapar suhu tinggi atau terbakar.

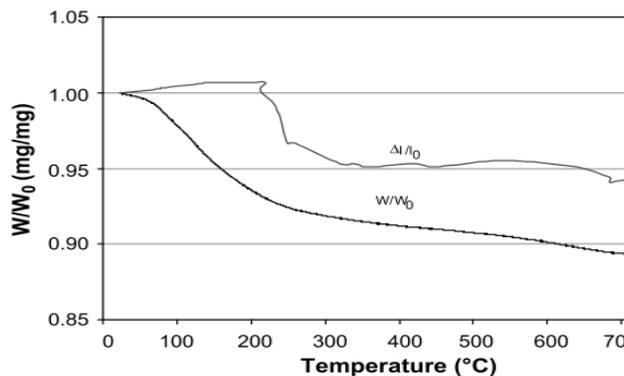
Review ini akan mengkompilasi beberapa hasil penelitian terutama menyangkut perilaku pasta geopolimer, mortar geopolimer maupun beton geopolimer pada saat terpapar suhu tinggi atau terbakar. Perilaku material beton geopolimer yang mengalami perlakuan panas bergantung pada sifat termal (*thermal properties*), sifat mekanikal, sifat deformasi (*deformation properties*) dan spalling. Serupa dengan beton berbasis semen portland, sifat-sifat ini berubah seiring perubahan suhu pada material geopolimer. Sifat-sifat ini bervariasi seiring peningkatan suhu dan bergantung pada komposisi dan karakteristik geopolimer. Beberapa perubahan sifat hasil penelitian dari beberapa peneliti akan direview.

Untuk mempelajari perilaku pasta geopolimer saat terpapar panas dengan suhu yang tinggi, (Bakharev 2006) melakukan penelitian terhadap pasta geopolimer yang terbuat dari fly ash dengan aktifatornya adalah campuran sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3), potassium hidroksida (KOH) dan potassium silikat (K_2SiO_3). Dalam penelitian tersebut, level suhu pemanasan terhadap benda uji divariasikan yakni 800°C , 1000°C dan 1200°C selama 4 jam dengan laju pemanasan $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku pasta geopolimer yang terpapar suhu tinggi sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia fly ash dan jenis larutan aktifasi yang digunakan. Pasta geopolimer dengan jenis aktifatornya adalah larutan yang mengandung sodium (Na) memiliki kekuatan awal tinggi pasca perawatan sebelum perlakuan panas namun mengalami penurunan kekuatan yang signifikan saat suhu paparan mencapai 800°C . Beberapa hal lain diungkapkan oleh (Bakharev 2006) antara lain adanya fase kristal Na-feldspar yang berkontribusi pada tingginya porositas saat suhu mencapai 800°C . Kristal Na-feldspar ini terbentuk dari ion Na, Si dan Al yang bebas pada suhu tinggi. Selanjutnya ion Na, Si dan Al yang bebas ini merupakan hasil dekomposisi gel aluminosilikat. Terungkap bahwa

dekomposisi gel aluminosilikat yang mengandung ion Na^+ lebih mudah terjadi karena koefisien difusi ion Na^+ lebih tinggi dari ion K^+ . Sebaliknya pasta geopolimer dengan larutan aktifatornya mengandung potassium (K) memiliki kekuatan awal yang lebih rendah sebelum perlakuan panas namun mengalami peningkatan kekuatan hingga 1000°C dan hancur pada suhu 1200°C . Hal ini terjadi akibat pengurangan rata-rata ukuran pori yang berakibat penurunan porositas saat suhu mencapai 800°C hingga 1000°C . Berdasarkan hasil pengujian tersebut, (Bakharev 2006) selanjutnya menyimpulkan bahwa pasta geopolimer dengan aktifator Potasium (K) memiliki kestabilan thermal yang lebih baik dari pasta geopolimer dengan aktifator sodium (Na). Namun (Bakharev 2006) mengungkapkan bahwa pasta geopolimer dengan larutan aktifator mengandung sodium maupun potassium tidak cocok digunakan sebagai bahan isolasi tahan api karena memiliki susut yang tinggi dan perubahan kekuatan yang tinggi saat suhu mencapai 800°C hingga 1200°C , walaupun kinerjanya masih lebih baik dari beton berbasis semen portland pada level suhu yang sama.

(Kong & Sanjayan 2008) selanjutnya melakukan penelitian yang bertujuan mempelajari perilaku pasta geopolimer dan

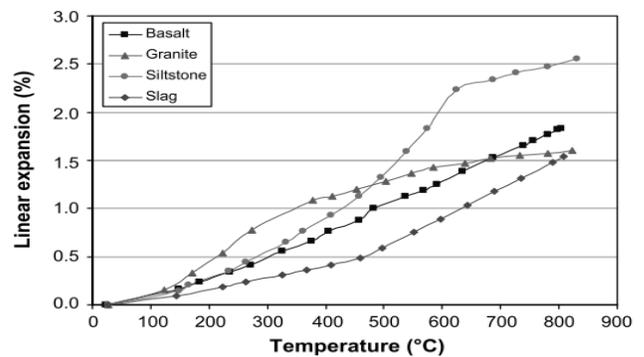
beton geopolimer ketika terpapar suhu tinggi. Sesuai dengan hasil penelitian (Bakharev 2006) maka (Kong & Sanjayan 2008) menggunakan aktifator larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) yang dicampurkan dengan larutan potassium hidroksida (KOH). Benda uji selanjutnya dipanaskan hingga suhu mencapai 800°C . Seperti hasil penelitian dari (Bakharev 2006), kekuatan tekan pasta geopolimer meningkat sebesar 53% setelah terpapar suhu tinggi, namun beton geopolimer justru mengalami penurunan kekuatan hingga 65% . (Kong & Sanjayan 2008) selanjutnya melakukan pengujian thermogravimetric dan dilatometry dan hasilnya seperti terlihat pada grafik 1 berikut :



Gambar 1. Kurva uji Thermogravimetric (TGA) dan uji Dilatometric (DTG) untuk geopolimer, (Kong & Sanjayan 2008)

Dari Gambar 1 tersebut, terungkap bahwa pasta geopolimer mengalami sedikit ekspansi pada suhu hingga 200°C kemudian mengalami susut hingga mencapai 800°C .

Hal ini dipertegas lagi oleh grafik pengurangan massa hasil analisis thermogravimetric. Pengurangan massa pada pasta geopolimer tersebut seiring dengan susut yang terjadi. (Kong & Sanjayan 2008) meyakini bahwa pengurangan massa ini berkaitan dengan penguapan air akibat pemanasan. Untuk melihat perilaku beton geopolimer ketika mengalami radiasi panas maka dilakukan pengujian thermal terhadap aggregate, hasilnya dapat dilihat pada gambar 2 :



Gambar 2. Grafik hubungan ekspansi linier dan temperatur dari beberapa agregat, (Kong & Sanjayan 2008)

Berdasarkan Gambar 2 tersebut terlihat bahwa aggregate justru mengalami pemuaian saat terpapar radiasi panas. Peningkatan pemuaian pada agregat seiring peningkatan suhu pemanasan. Berdasarkan gambar 1 dan 2 terungkap bahwa beton geopolimer yang merupakan komposit antara pasta geopolimer dan aggregate ketika mengalami pemanasan atau terpapar suhu

tinggi, mengalami dua proses yang saling berbeda efeknya yakni agregat mengalami pemuaian sedangkan pasta geopolimer mengalami susut sehingga terjadinya deformasi atau pergerakan yang tidak sama pada dua fase material yang berbeda. Hal ini menjadi salah satu penyebab munculnya ketidaksesuaian termal (*incompatibility thermal*) pada material non homogen. Fenomena ini sangat bergantung pada konduktivitas termal dan kapasitas termal material.

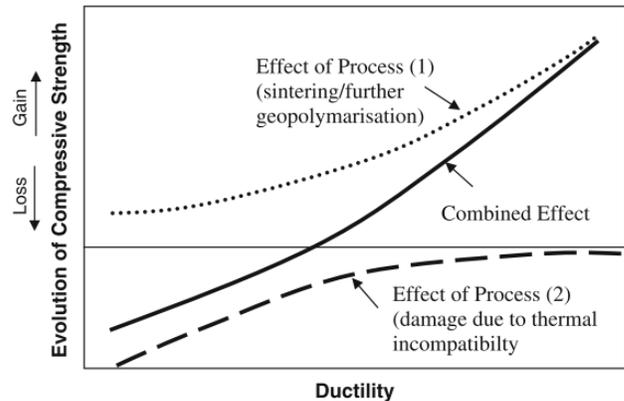
Fenomena tersebut terjadi juga pada beton yang berbasis semen Portland. Menurut (Khoury 1992) mekanisme yang mempengaruhi kekuatan tekan beton saat mengalami pemanasan yakni (i) Thermal incompatibility, (ii). Efek tekanan pori, (iii). Transformasi fase. Menurut (Kong & Sanjayan 2008), fenomena ini juga yang menyebabkan rusaknya bidang ikatan aggregate dan pasta geopolimer sehingga menjadi salah satu penyebab penurunan kekuatan tekan pada beton geopolimer ketika terpapar panas dengan suhu yang tinggi. Pengaruh fenomena ketidaksesuaian termal (*thermal incompatibility*) terhadap kekuatan tekan beton geopolimer bergantung pada (i). Besarnya ketidaksesuaian termal (*thermal incompatibility*) yang dialami material saat suhu tinggi, (ii). Sejauh mana material dapat

mengalami deformasi tanpa runtuh yakni daktilitas material.

Untuk melihat pengaruh ketidaksesuaian termal (*thermal incompatibility*) lebih lanjut dan pengaruh daktilitas terhadap kekuatan beton geopolimer maka (Pan et al. 2009) melakukan penelitian terhadap perilaku mortar geopolimer berbasis fly ash yang terpapar panas dengan suhu hingga 800°C. Hasil penelitian (Pan et al. 2009) menunjukkan bahwa mortar dengan kekuatan tekan awal hingga 16 MPa mengalami peningkatan kekuatan tekan setelah terpapar pada suhu yang tinggi sedangkan mortar dengan kekuatan awal lebih besar dari 16 MPa justru mengalami penurunan kekuatan tekan. Hasil ini hampir mirip dengan penelitian pada pasta geopolimer oleh (Bakharev 2006). Hasil uji thermogravimetric (TGA) juga mirip dengan yang dilakukan oleh (Kong & Sanjayan 2008) yakni mortar geopolimer mengalami penurunan masa hingga 8% ketika suhu mencapai 500°C namun masih lebih tinggi dari mortar berbasis OPC yakni mencapai 30% pada level suhu yang sama.

Pada penelitian (Pan et al. 2009) juga terungkap bahwa mortar geopolimer dengan kekuatan awal yang tinggi memiliki daktilitas yang rendah setelah terpapar panas dengan

suhu yang tinggi sedangkan mortar geopolimer dengan kekuatan awal rendah memiliki daktilitas yang tinggi setelah dipanaskan hingga suhu tinggi. Berdasarkan hal ini maka kekuatan awal merupakan salah satu faktor yang menentukan apakah terjadi peningkatan kekuatan tekan atau penurunan kekuatan tekan mortar geopolimer setelah terpapar panas dengan suhu tinggi. Hasil ini juga sesuai dengan hasil penelitian (Bakharev 2006). (Pan et al. 2009) juga mengungkapkan bahwa efek *thermal incompatibility* muncul akibat perbedaan temperatur (*thermal gradient*) yang sangat besar dalam benda uji. Namun menurut (Pan et al. 2009) penurunan kekuatan tekan pada suhu tinggi tidak hanya dipengaruhi oleh efek *thermal compatibility* namun bergantung juga pada kemampuan mortar geopolimer mengakomodasi deformasi yang tidak sama yang dialami oleh pasta dan agregat ketika terpapar suhu tinggi atau disebut efek *incompatible deformasi*. Deformasi yang tidak compatible ini diukur dari daktilitas atau kegetasan material. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara perubahan kekuatan tekan dengan daktilitas. Berikut adalah skema hubungan antara daktilitas perubahan kekuatan mortar geopolimer yang terpapar suhu tinggi yang diusulkan oleh (Pan et al. 2009).

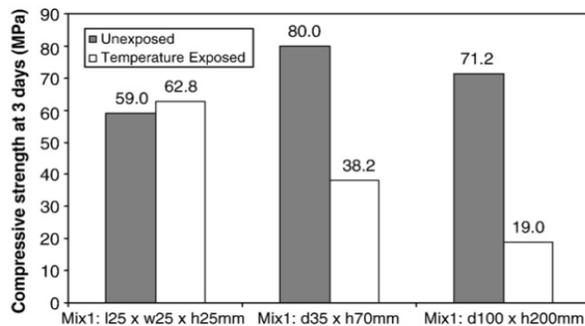


Gambar 3. Diagram skematik efek parallel yang terjadi pada mortar geopolimer pada suhu tinggi, (Pan et al. 2009).

Berdasarkan gambar 3 tersebut terlihat bahwa terdapat dua proses yang berlangsung secara paralel dan saling bertolakbelakang yakni (i) peningkatan kekuatan tekan seiring peningkatan daktilitas selalu bernilai positif akibat proses sintering atau reaksi geopolimerisasi lanjutan, (ii). Penurunan kekuatan tekan akibat *thermal incompatibility* selalu bernilai negatif. Dengan demikian penurunan kuatantekan atau peningkatan kekuatan tekan mortar geopolimer setelah pemanasan tergantung pada dua proses ini.

(Kong & Sanjayan 2010) selanjutnya melakukan penelitian terhadap pasta, mortar dan beton geopolimer yang terpapar pada suhu tinggi. Larutan aktifator yang digunakan adalah KOH dicampur Na_2SiO_3 . Beberapa parameter yang dikaji antara lain perilaku kekuatan tekan, pengaruh ukuran sampel, pengaruh variasi ukuran agregat

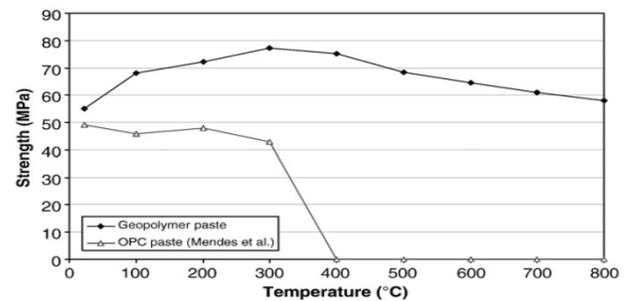
dan pengaruh agregat kasar perilaku sampel geopolimer ketika terpapar suhu tinggi. Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa kekuatan awal paste, mortar dan beton geopolimer hampir sama namun setelah terpapar oleh suhu tinggi, benda uji pasta geopolimer mengalami reduksi kekuatan sebesar 73,4%, mortar tidak memiliki kekuatan sisa sama sekali dan beton geopolimer hanya mengalami reduksi kekuatan sebesar 58,4% untuk kondisi suhu yang sama. Selanjutnya (Kong & Sanjayan 2010) melakukan pengujian tekan terhadap benda uji dengan memvariasi ukurannya namun menggunakan komposisi pasta geopolimer yang sama. Ukuran sampel yang digunakan antara lain 25 x 25 x 25 mm, 35 x 70 mm dan 100 x 200 mm. Hasil pengujian tekan seperti terlihat pada gambar 4 berikut :



Gambar 4. Pengaruh ukuran terhadap perilaku pasta geopolimer setelah terpapar radiasi panas.(Kong & Sanjayan 2010)

Terlihat bahwa semakin besar ukuran sampel, kekuatan tekan setelah terpapar suhu tinggi mengalami penurunan yang semakin

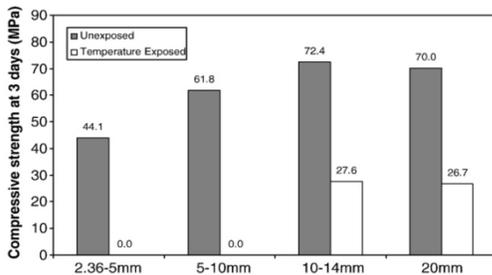
signifikan. Menurut (Kong & Sanjayan 2010), hal ini terjadi akibat semakin besar sampel, konduksi panas yang terjadi semakin menurun, menyebabkan perbedaan suhu antara bagian terdalam dan bagian terluar sehingga gradient panas yang terjadi semakin signifikan dan akhirnya dapat menyebabkan adanya retak panas (*thermal cracking*). Meskipun penurunan kekuatan tekan akibat adanya retak panas pada pasta geopolimer terlihat masih lebih baik jika dibandingkan dengan pasta semen OPC seperti gambar 5 berikut :



Gambar 5. Grafik perbandingan reduksi kekuatan tekan pasta geopolimer dan pasta OPC pada kondisi yang sama setelah terpapar suhu tinggi.(Kong & Sanjayan 2010) dan (Mendes et al. 2008).

Pada gambar 5 terlihat bahwa penurunan kekuatan tekan dari pasta OPC sangat signifikan pada suhu 400°C hingga 800°C. Selanjutnya (Kong & Sanjayan 2010) mengungkapkan bahwa ukuran agregat sangat mempengaruhi kinerja beton geopolimer saat terpapar suhu tinggi. Hal sesuai dengan hasil penelitian terhadap

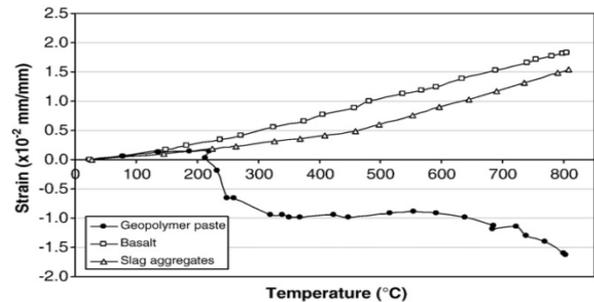
mortar beton yang dilakukan oleh (Pan et al. 2009). Selain itu, hasil penelitian (Kong & Sanjayan 2010) menunjukkan bahwa beton geopolimer yang mengandung aggregate yang tergradasi seragam memiliki kinerja yang lebih baik pada suhu tinggi, seperti gambar 6 berikut :



Gambar 6. Pengaruh ukuran aggregate pada perilaku beton geopolimer setelah terpapar suhu tinggi.(Kong & Sanjayan 2010)

Beton geopolimer yang mengandung ukuran aggregate < 10 mm menghasilkan spalling dan retak yang ekstensif saat mengalami pemanasan sedangkan beton geopolimer yang mengandung ukuran agregat > 10 mm lebih stabil. Penggunaan agregat bertujuan mereduksi pori-pori, mencegah retak, memberi kontribusi kekuatan. Namun demikian, karena agregat yang memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibanding pasta geopolimer sehingga terjadi penahanan (restrain) terhadap susut pada pasta. Efek penahanan (restrain) susut ini, menyebabkan tegangan arah radial dan tangensial sekitar butir agregat. Susut yang terjadi akibat penguapan air juga meningkatkan tegangan

ini sehingga timbulnya retak yang semakin membesar. Perilaku susut ini jelas terlihat pada beton yang menggunakan aggregate yang berukuran kecil, disamping itu kurangnya aggregate yang berbentuk sudut dapat membatasi terjadinya efek jembatan (bridging) aggregate. Pengaruh aggregate kasar terhadap perilaku beton geopolimer ketika terpapar suhu tinggi dapat terlihat pada gambar 7 berikut :



Gambar 7. Pengaruh ekspansi thermal aggregate kasar dan pasta geopolimer, (Kong & Sanjayan 2010)

Hasil penelitian (Kong & Sanjayan 2010) menyangkut thermal ekspansi agregat dan pasta semakin mempertegas penelitian terdahulu bahwa pengurangan kekuatan tekan pada beton geopolimer diakibatkan oleh thermal incompatibility dimana pada suhu yang panas, aggregate mengalami pemuaian sedangkan pasta mengalami penyusutan menyebabkan rusaknya ikatan antara aggregate dan pasta.

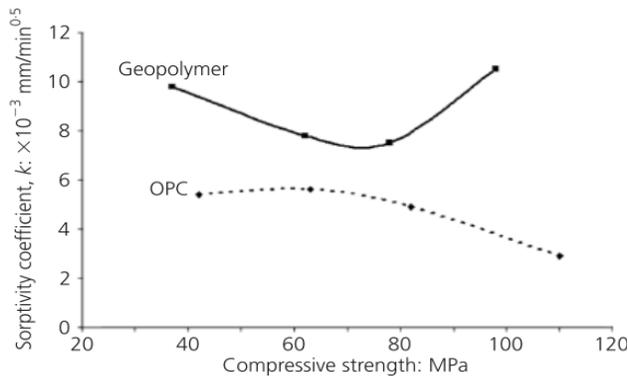
(Pan & Sanjayan 2010) selanjutnya melakukan penelitian eksperimental untuk

mempelajari sifat mekanikal pasta geopolimer pada kondisi suhu tinggi. Berdasarkan pengujian yang dilakukan terungkap bahwa salah satu sifat pasta geopolimer adalah perilaku transisi mendadak pada suhu tinggi. Pada saat suhu dibawah 520°C , pasta geopolimer bersifat getas, sedangkan ketika suhu melebihi 520°C, pasta geopolimer berperilaku mampu menahan deformasi yang besar sebelum runtuh ketika suhu mencapai 680°C. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan sifat getas menjadi bersifat viscous dalam interval 520°C hingga 680°C. Perilaku ini disebut transisi gelas (glass transition) yang biasa dimiliki oleh material polimer organik dan tidak dimiliki oleh pasta OPC. Temperatur yang berhubungan dengan perubahan transisi ini dikenal sebagai temperatur transisi gelas (Tg) namun demikian penelitian tentang temperatur Tg masih membutuhkan penelitian lebih lanjut. Sifat lain dari pasta geopolimer yang ditemukan oleh (Pan & Sanjayan 2010) adalah peningkatan kekuatan tekan setelah terpapar suhu tinggi hingga 800°C seperti beberapa penelitian terdahulu. Namun daerah interval suhu aktual dimana terjadi peningkatan kekuatan tekan pasta geopolimer setelah terpapar suhu tinggi belum diketahui secara pasti. (Pan & Sanjayan 2010) mengidentifikasi dua pola

perilaku yang berbeda karakternya sebelum mencapai temperature Tg. Pada rentang suhu 200°C hingga 290°C, pasta geopolimer mengalami peningkatan kekuatan tekan dan terjadi kontraksi yang cukup signifikan sedangkan pada rentang suhu 380°C hingga 520°C, kekuatan tekan pasta geopolimer terus meningkat namun terjadi ekspansi. Penurunan kekuatan tekan saat pendinginan pasca terpapar suhu tinggi menunjukkan bahwa pasta geopolimer mengalami thermal shock. Selain itu berdasarkan grafik hubungan tegangan dan regangan terungkap bahwa keruntuhan pada pasta geopolimer bersifat getas.

(Sanjayan & Zhao 2011) melakukan penelitian untuk mengetahui perilaku spalling pada beton geopolimer ketika terpapar suhu tinggi dan membandingkan dengan beton berbasis semen portland. Dua jenis simulasi kebakaran yakni uji peningkatan suhu paparan permukaan dengan cepat dan uji kebakaran menggunakan standar kurva. Pada kedua pengujian tersebut tidak ditemukan terjadinya spalling pada beton geopolimer sedangkan pada beton berbasis semen portland terlihat adanya spalling. Hal ini berkaitan dengan struktur pori yang berbeda pada beton geopolimer dan beton berbasis semen portland. Pengujian sorptivity

membuktikan bahwa penyerapan air pada beton geopolimer lebih tinggi dari pada beton berbasis semen portland dengan demikian ketika terjadi pemanasan, air akan keluar lebih cepat melalui penguapan pada beton geopolimer akibatnya tekanan internal pori lebih kecil.



Gambar 8. Grafik hubungan kekuatan tekan dan koefisien sorptivity, (Sanjayan & Zhao 2011).

(Shaikh & Vimonsatit 2014) selanjutnya melakukan penelitian terhadap perilaku kekuatan tekan beton geopolimer yang terpapar suhu tinggi. Pada penelitian ini, suhu paparan divariasikan menjadi 200, 400, 600, dan 800°C. Bahan campuran beton geopolimer antara lain fly ash tipe F, larutan alkali yang merupakan campuran NaOH dan sodium silikat, dan aggregate halus dan Agregat kasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekuatan tekan hingga suhu mencapai 400°C dan tidak ada pengaruh ukuran aggregate dan molaritas larutan alkali yang digunakan.

Ketika suhu mencapai 600°C, terjadi peningkatan kekuatan relatif terhadap kekuatan tekan pada suhu 400°C namun lebih rendah dari kekuatan tekan awal. Penurunan kekuatan selanjutnya terjadi ketika suhu mencapai 800°C, hal ini juga sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Rickard et al. 2012) . Perilaku yang berbeda ditunjukkan oleh beton geopolimer dengan larutan aktifornya adalah 10M NaOH dimana pada rentang suhu 600°C hingga 800°C justru terjadi peningkatan kekuatan namun secara umum, semakin besar molaritas larutan aktifator maka kehilangan kekuatan tekan beton geopolimer semakin besar setelah terpapar suhu tinggi anomaly ini membutuhkan penelitian yang lebih mendalam. Terungkap juga bahwa semakin kecil ukuran aggregate mendekati ukuran minimal yakni 10 mm, semakin besar sisa kekuatan tekan yang dimiliki setelah terpapar suhu tinggi hal ini sesuai dengan penelitian (Kong & Sanjayan 2010). Semakin lama waktu curing, 20 jam hingga 40 jam, menyebabkan kekuatan tekan pada suhu tinggi meningkat hingga 20% akibat geopolimerisasi tambahan.

KESIMPULAN :

1. Pasta geopolimer dengan larutan aktifornya mengandung sodium (Na)

mengalami degradasi kekuatan yang signifikan pada saat suhu pemanasan mencapai 800°C sedangkan pasta geopolimer dengan aktifatornya mengandung potassium (K) mengalami degradasi kekuatan signifikan ketika suhu perlakuan panas mencapai 1000°C dengan demikian kestabilan thermal pasta geopolimer yang menggunakan aktifator K⁺ lebih baik dari aktifator yang mengandung Na⁺ ketika terpapar panas dengan suhu tinggi.

2. Salah satu faktor yang menyebabkan penurunan kekuatan tekan pada mortar dan beton geopolimer ketika mengalami perlakuan panas adalah ketidaksesuaian thermal (*thermal incompatibility*). Hal ini disebabkan oleh perbedaan suhu pada material (thermal gradient) dan deformasi yang tidak seragam pada material non homogen.
3. Level kekuatan tekan awal material geopolimer pasca perawatan merupakan salah satu faktor yang menentukan apakah kekuatan tekan meningkat atau menurun setelah perlakuan panas.
4. Faktor yang menentukan perubahan kekuatan tekan material geopolimer setelah perlakuan panas adalah kemampuan untuk mengakomodasi deformasi yang terjadi sebelum runtuh

yang terukur dari level daktilitas material geopolimer.

5. Level kekuatan tekan pasca pemanasan pada mortar dan beton geopolimer juga bergantung pada ukuran dan gradasi aggregate yang digunakan dimana ukuran agregat yang optimum adalah berkisar antara 10 mm hingga 14 mm.
6. Pasta geopolimer memiliki sifat transisi gelas (glass transition) yakni perubahan dari sifat getas menjadi bersifat viscous pada suhu tertentu yang disebut suhu transisi gelas (T_g) ketika pasta geopolimer mengalami perlakuan panas. Sifat ini mirip dengan perilaku yang dimiliki polimer organik. Penjelasan untuk hal ini masih memerlukan penelitian yang lebih mendalam.
7. Semua pasta geopolimer dengan aktifator NaOH secara umum mengalami reduksi kekuatan tekan ketika suhu perlakuan panas berkisar antara 0°C hingga 400°C. Namun ketika suhu perlakuan panas berkisar 400°C hingga 600°C mengalami sedikit peningkatan dan kekuatan tekan menurun kembali ketika suhu perlakuan panas berkisar antara 600°C hingga runtuh pada 800°C. Namun anomaly terjadi pada larutan aktifator 10 M NaOH yakni kekuatannya meningkat terus setelah suhu perlakuan mencapai 600°C

hingga 800°C. Hal ini tentu memerlukan penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakharev, T., 2006. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), pp.1134–1147.
- Khoury, G.A., 1992. Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment. , (161), pp.291–309.
- Kong, D.L.Y. & Sanjayan, J.G., 2010. Cement and Concrete Research Effect of elevated temperatures on geopolymer paste , mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), pp.334–339.
- Kong, D.L.Y. & Sanjayan, J.G., 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), pp.986–991.
- Mendes, A., Sanjayan, J. & Collins, F., 2008. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. *Materials and Structures*, 41(2), pp.345–350.
- Pan, Z. & Sanjayan, J.G., 2010. Stress-strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), pp.657–664.
- Pan, Z., Sanjayan, J.G. & Rangan, B. V., 2009. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 44(7), pp.1873–1880.
- Rickard, W.D. a, Temuujin, J. & Van Riessen, A., 2012. Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(15), pp.1830–1839.
- Sanjayan, J.G. & Zhao, R., 2011. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete Research*, 63(3), pp.163–173.
- Shaikh, F.U. a & Vimonsatit, V., 2014. Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Fire and Materials*, (August).