

MODIFIKASI BETON BERPORI VERSUS TUMBUKAN

ANALISIS PENDEKATAN TEGANGAN PLASTIS PADA PERILAKU
MODIFIKASI FOAMED CONCRETE TERHADAP BEBAN TUMBUKAN



JOSEF HADIPRAMANA

MODIFIKASI BETON BERPORI VERSUS TUMBUKAN

*ANALISIS PENDEKATAN TEGANGAN PLASTIS PADA PERILAKU
MODIFIKASI FOAMED CONCRETE TERHADAP BEBAN TUMBUKAN*

MODIFIKASI BETON BERPORI VERSUS TUMBUKAN

*ANALISIS PENDEKATAN TEGANGAN PLASTIS PADA PERILAKU
MODIFIKASI FOAMED CONCRETE TERHADAP BEBAN TUMBUKAN*

JOSEF HADIPRAMANA

HAK CIPTA DILINDUNGI UNDANG-UNDANG

*Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian isi buku ini dalam bentuk apapun,
baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam dan dengan
sistem penyimpanan lainnya tanpa izin tertulis dari penulis*



DAFTAR ISI

Judul
**MODIFIKASI BETON BERPORI VERSUS TUMBUKAN:
 Analisis Pendekatan Tegangan Plastis pada Perilaku
 Modifikasi Foamed Concrete Terhadap Beban Tumbukan**

Penulis
Josef Hadipramana

Editor
Fetra Venny Riza

Layouter
Feby Nur Indah Sari

Cetakan Pertama; Juli 2022
(xviii + 116 hlm); 15 x 23 cm

ISBN : 978-623-408-147-3
 E-ISBN : 978-623-408-148-0 (PDF)

Foto sampul
<https://seamless-pixels.blogspot.com/>
<https://www.pexels.com>

Penerbit



Redaksi

Jalan Kapten Muktar Basri No 3 Medan, 20238
 Telepon, 061-6626296, Fax. 061-6638296
 Email; umsupress@umsu.ac.id
 Website; <http://umsupress.umsu.ac.id/>
 Anggota IKAPI Sumut, No: 38/ Anggota Luar Biasa/SUT/2020
 Anggota APPTI, Nomor: 005.053.1.09.2018
 Anggota APPTIMA (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah
 Aisyiyah

DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
PRAKATA	xv
PENGANTAR EDITOR	xvii

BAB 1	
PENDAHULUAN	1
A. Karakteristik <i>Foamed Concrete</i>	2
B. Beban Tumbukan pada Beton Kaku	4
C. Beban Tumbukan Kecepatan Tinggi pada <i>Foamed concrete</i>	7
D. Latar Belakang Permasalahan	9
E. Temuan Kebaruan (Novelty)	11
F. Ruang Lingkup Pembahasan	12

BAB 2	
FOAMED CONCRETE	15
A. Material Utama Foamed Concrete	15
B. Modifikasi <i>Foamed concrete</i>	19
1. Tegangan Tekan Elastis	24
2. Tegangan Tekan Plastis	26
3. Kerusakan Gelombang Tarik Plastis	27
E. Kerusakan Lokal pada Beton Akibat Tumbukan	28
F. Tumbukan Plastis dan Disipasi Energi Tumbukan	30
G. Mekanisme Deformasi pada Material Seluler	31
1. Teori Honeycomb effect	31
2. Deformasi pada Pori-Pori Foamed Concrete	33

BAB 3	
KOMPONEN, TAHAPAN DAN TATA CARA MODIFIKASI	
FOAMED CONCRETE	37
A. RHA Sebagai Pengganti Pasir	37
B. Proporsi Campuran	39
1. Desain Pembuatan Busa	40
2. Desain Campuran Untuk Pelat FCRHA	42
3. Desain Campuran Foamed Concrete	43
C. Dimensi Pelat Polos (<i>Plain Plate Dimension</i>)	45
1. Ketebalan Pelat Spesimen	45
2. Luas Area Pelat Spesimen	50
D. Perawatan	50
E. Uji Sifat kekuatan FCRHA	51
1. Kuat Tekanan, Elastisitas, Modulus dan Rasio Poisson	51
2. Kekuatan Tarik belah (<i>Splitting Tensile Strength</i>)	52
F. Uji Tumbukan	53
BAB 4	57
HASIL PENGUJIAN DAN MODIFIKASI FOAMED CONCRETE	57
A. Kerusakan Lokal	57
B. Mekanisme Deformasi Dinding <i>Foamed concrete</i> yang Berpori	60
C. Diameter Cekungan Kawah	64
D. Kedalaman Penetrasi Obyek Penumbuk pada FCRHA	66
1. Kekuatan Tekan	67
2. Kekuatan Tarik	69
BAB 5	75
PENUTUP	75

GLOSARIUM	87
INDEKS	99
TENTANG PENULIS	103
TENTANG EDITOR	105

DAFTAR GAMBAR

No Gambar	Keterangan	Hal
Gambar 1.1	<i>Permukaan struktur matriks foamed concrete</i>	3
Gambar 1.2	<i>Fenomena yang terjadi ketika sebuah proyektil kaku menghantam target beton kaku</i>	6
Gambar 1.3	<i>Kerusakan beton kaku dan bertulang akibat beban tumbukan proyektil tajam</i>	9
Gambar 1.4	<i>Kerusakan lokal yang terjadi pada foamed concrete akibat beban tumbukan</i>	9
Gambar 2.1	<i>(a) RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ selama ± 6 jam mengandung banyak material poros. (b) RHA yang dibakar dengan terkendali</i>	19
Gambar 2.2	<i>Antar-muka (interfacial) agregat dan pasta semen</i>	24
Gambar 2.3	<i>Gelombang tegangan tekan yang terjadi akibat beban tumbukan</i>	25
Gambar 2.4	<i>Gelombang tegangan tekan plastis yang terjadi akibat beban tumbukan dan pantulan gelombang.</i>	26
Gambar 2.5	<i>Mekanisme kerusakan akibat beban tumbukan dan proses spalling.</i>	28
Gambar 2.6	<i>Penetrasi yang menghasilkan fenomena cone cracking pada beton, akibat kekuatan tarik</i>	29

	<i>beton yang sangat rendah (beton kaku)</i>	
Gambar 2.7	<i>Mekanisme deformasi pada material busa bila terkena beban tekan</i>	32
Gambar 2.8	<i>Skema tegangan-regangan tekan untuk kondisi elastis-plastis dinding sel material busa</i>	33
Gambar 3.1	<i>RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ dalam waktu ± 6 jam</i>	37
Gambar 3.2	<i>RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ dalam waktu ± 6 jam di bawah pembesaran 1000 kali.</i>	38
Gambar 3.3	<i>Proses pencampuran mortar foamed concrete dan FCRHA</i>	40
Gambar 3.4	<i>Generator pembuat busa</i>	42
Gambar 3.5	<i>Busa yang dihasilkan dari generator busa</i>	42
Gambar 3.6	<i>Hubungan antara I dan X_f/d sebagai acuan ketebalan desain.</i>	47
Gambar 3.7	<i>Luas area pelat spesimen foamed concrete dan FCRHA.</i>	50
Gambar 3.8	<i>Foamed concrete dicetak dengan ukuran sesuai dengan desain</i>	51
Gambar 3.9	<i>Proses perawatan (curing)</i>	51
Gambar 3.10	<i>Pengujian Kekuatan Tekan dengan menghasilkan nilai Modulus Elastisitas dan rasio Poisson dengan komputerisasi</i>	56
Gambar 3.11	<i>Pengujian Tarik Belah</i>	53

Gambar 3.12	<i>(a) Diagram skematik uji benturan/tumbukan berat jatuh di mana H adalah tinggi jatuh dan h adalah ketebalan target pelat polos, (b) Menara tumbukan berat jatuh eksperimental.</i>	54
Gambar 3.13	<i>Model obyek penumbuk berbentuk bola yang tidak dapat berdeformasi yang mewakili penumbuk tumpul yang di-gunakan dalam penyelidikan ini.</i>	59
Gambar 4.1	<i>Cekungan (crater) yang terbentuk (diameter D) pada permukaan FCRHA (a, c, e) dan foamed concrete (b, d, f) akibat 9,9 m/det (a, b), 8,9 m/det (c, d), dan 7,7 m/det (e, f) kecepatan beban tumbukan</i>	58
Gambar 4.2	<i>Struktur matriks foamed concrete dengan FAS 0,6 dengan pandangan yang diperbesar 10 kali.</i>	61
Gambar 4.3	<i>Skema tegangan-regangan tekan untuk kondisi elastis-plastis dinding sel material busa.</i>	62
Gambar 4.4	<i>Energi Plastis yang bekerja pada foamed concrete dan FCRHA</i>	63
Gambar 4.5	<i>Pengukuran diameter dan kedalaman cekungan kawah</i>	64
Gambar 4.6	<i>Diameter kawah (D) untuk foamed concrete dan FCRHA</i>	66

	<i>dibuat berdasarkan kecepatan tumbukan.</i>	
Gambar 4.7	<i>Kedalaman penetrasi vs Kecepatan tumbukan</i>	67
Gambar 4.8	<i>Kekuatan Tekan foamed concrete dan FCRHA menurut umur.</i>	68
Gambar 4.9	<i>Kekuatan Tarik belah foamed concrete dan FCRHA berdasarkan densitas.</i>	70
Gambar 4.10	<i>FCRHA struktur mikro di bawah 50 kali perbesaran SEM.</i>	72
Gambar 4.11	<i>Bayangan foamed concrete di bawah 50 kali perbesaran SEM.</i>	73

DAFTAR TABEL

No Tabel	Keterangan	Hal
Tabel 2.1	Karakteristik Foamed Concrete	17
Tabel 2.2	Komposisi antara semen Portland, RHA dan Serbuk Marmer sebagai pengganti semen dan pasir	20
Tabel 2.3	Komposisi RHA dan Fly Ash	23
Tabel 3.1	Komposisi Kimia RHA	39
Tabel 3.2	Rasio Bahan Penyusun Untuk Menghasilkan FCRHA dan <i>Foamed Concrete</i> .	44
Tabel 3.3	Kedalaman penetrasi non-dimensi berfungsi sebagai acuan ketebalan pelat.	46
Tabel 3.4	Ketebalan dan jumlah pelat spesimen	49
Tabel 4.1	Kedalaman penetrasi FCRHA	74

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrohiim

Alhamdulillah, segala puji hanya milik Allah yang telah menganugerahkan semangat dan motivasi kepada kami sebagai penulis untuk dapat menyelesaikan buku ini. Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan nabi kita tercinta Muhammad Rasulullah saw.

Buku ini merupakan hasil penelitian yang sesuai dengan minat penulis dalam bidang material konstruksi, struktur dan rekayasa tumbukan. Penelitian ini dilaksanakan karena melihat beberapa fenomena di lapangan, bahwa terdapat beberapa kelemahan pada beton berpori. Kekuatan beton berpori masih merupakan kelemahan nomor satu sebagai beton, apalagi beton berpori adalah beton ringan non-konstruksi yang biasanya dipakai sebagai penutup dan pelindung bangunan, sehingga beban tumbukan dapat setiap waktu terjadi pada material tersebut.

Selain dari itu, penelitian ini mencoba membangkitkan teknologi material hijau, yaitu meman-faatkan limbah pertanian yang sangat melimpah di Indonesia, sehingga mempunyai manfaat lain di bidang konstruksi dan mempunyai nilai ekonomis. Sehingga penulis berharap, agar material hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai pengganti material konvensional yang telah ada.

Tanpa mengurangi rasa hormat dan tidak dapat menyebutkan satu persatu, penulis menyampaikan dengan tulus rasa terima kasih kepada semua yang terlibat dalam penelitian ini, juga kepada *Jamilus Research Centre Univeristi Tun Hussein Onn Malaysia*, yang telah memberikan konsultasi penelitian dan menyediakan laboratorium struktur sehingga tercapai hasil penelitian ini.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan serta kelemahan dalam penulisan buku ini, namun penulis

berharap segala kebaikan dan hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat dan referensi kepada semua pembaca, terutama di lingkungan akademik dan bidang penelitian sains dan teknologi.

Medan, Mei 2022

Penulis

PENGANTAR EDITOR

Puji dan syukur ke hadirat *ilahi rabbi*, Allah Swt., dengan segala kabar gembira dan ujian sesungguhnya bagian dari nikmat-Nya yang tiada tara. Selanjutnya salawat dan salam kepada junjungan nabi besar, Muhammad saw, dengan segala bimbingan dan teladannya kia menjadi makhluk berdaya dan beradab.

Buku yang saat ini berada di hadapan pembaca adalah buku bergenre monograf yang merupakan hasil dari penelitian, dengan tujuan memberikan data dan fakta ilmiah kepada setiap insan akademis dan praktisi dalam upaya pengembangan keilmuan dan perbaikan pada salah satu sektor bidang kehidupan manusia.

Sebagaimana sebuah monograf maka isi dalam buku ini diulas melalui pijakan sebuah laporan karya ilmiah yang diawali oleh latar belakang masalah dan tujuan serta manfaat penelitian, lalu dilanjutkan dengan kajian pustaka, metodologi penelitian, hasil dan temuan penelitian dan ditutup oleh kesimpulan.

Pada dasarnya buku ini ingin bercerita tentang kelemahan beton berpori dan tawaran solusi terhadap permasalahan tersebut. Menariknya, buku ini memberikan tawaran terhadap permasalahan yang beton berpori selama ini yang sering digunakan sebagai bahan penutup dan pelindung bangunan konvensional yaitu dengan memanfaatkan limbah pertanian yang sesungguhnya nilainya lebih ekonomis.

Secara umum buku ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja mekanis beton berpori itu sendiri, dan secara spesifik buku ini bertujuan untuk untuk menyelidiki perilaku dan kedalaman penetrasi *foamed concrete* dan FCRHA yang mengalami berbagai kecepatan tumbukan. Penelitian ini diharapkan menghasilkan model empiris

yang akan sesuai dengan kedalaman penetrasi *foamed concrete* dan FCRHA terhadap kecepatan tumbukan.

Dari hasil penelitian yang dilakukan, buku ini diharapkan mampu memberikan kontribusi kepada ilmu pengetahuan dan teknologi secara mendasar juga diharapkan dapat memberikan kontribusi di bidang konstruksi dan jasa konstruksi. Jelaslah, sebuah buku yang sangat menarik untuk dibaca dan dipelajari terkhusus kepada para ilmuan dan teknisi dalam pengembangan ilmu konstruksi bangunan ke depannya.

Akhir kata, kami ucapkan selamat atas terbitnya buku ini, semoga diterima secara luas dan terbuka. Sebuah harapan dari hasil penelitian buku ini dapat terdistribusi secara massif dan massal.

Medan, Juni 2022

Editor

BAB 1

PENDAHULUAN

Buku ini mempunyai dua hal yang diangkat sebagai obyek temuan penelitian. Obyek pertama yaitu meningkatkan kinerja mekanis beton berpori selanjutnya dalam buku ini disebut *foamed concrete* sebagai bahan yang sering dipakai dalam bidang industri konstruksi. Peningkatan kinerja mekanis *foamed concrete* ini menggunakan bahan terbuang hasil pertanian yang banyak melimpah di Indonesia sepanjang tahun. Bahan ini adalah Abu Sekam Padi atau *Rice Husk Ash* selanjutnya dalam buku ini disebut **RHA** yang dimanfaatkan sebagai bahan pengganti pasir sebagian di dalam *foamed concrete*. *Foamed concrete* yang dimodifikasi ini disebut dengan *foamed concrete Rice Husk Ash* selanjutnya disebut **FCRHA**. Obyek temuan penelitian kedua adalah, menganalisa perilaku *foamed concrete* dan FCRHA ketika diberikan beban tumbukan/benturan oleh benda kaku berbentuk bola atau tumpul dengan kecepatan sedang. Penelitian ini dilaksanakan karena catatan dan informasi mengenai beban tumbukan pada beton ringan sangat terbatas, khususnya terhadap *foamed concrete* sebagai beton ringan yang dipakai di bidang konstruksi secara luas yang berfungsi sebagai pelindung pada struktur bangunan.

A. Karakteristik *Foamed Concrete*

Foamed concrete mempunyai banyak pori di seluruh strukturnya, yaitu sekitar 25% pori-pori udara yang terperangkap dalam matriks beton, oleh sebab itu material ini biasa disebut dengan beton berpori. Pada awal abad ke 21, *foamed concrete* merupakan beton ringan yang mulai banyak dipakai di bidang konstruksi dan salah satu contoh produk yang biasa dikenal di Indonesia adalah *Hebel*. Penerapan *foamed concrete* dalam bidang konstruksi telah berkembang pesat karena keunggulan teknis dan potensi ekonominya. Sebagai bahan konstruksi, *foamed concrete* sangat ringan dan menunjukkan karakteristik yang sangat baik, misalnya rasio yang sangat tinggi antara kekuatan terhadap berat, kemampuan *workability* yang tinggi, hemat energi, penahan panas temperatur tinggi (anti api) dan penyimpanan panas, serta dipakai sebagai insulasi kebisingan (Aldridge, 2005).

Walaupun *foamed concrete* merupakan beton ringan, namun dapat diproduksi dalam berbagai densitas, mulai dari 400 hingga 1800 kg/m³ dengan kekuatan tekan dari 1 hingga 14 N/mm² (Lee & Hung, 2005; Jhatial, et. al, 2020; Hadipramana, et. al, 2019). Dalam hal kekuatan, volume dan ukuran pori sangat memengaruhi kekuatan dan densitas *foamed concrete*. Oleh karena itu, karakteristik *foamed concrete* tergantung kepada desain campurannya. Gelembung udara yang terperangkap dalam matriks akan mengurangi kepadatan/densitas campuran dasar (mortar) tetapi mempunyai efek plastisitasi yang kuat (Kearsley, 1999)



Gambar 1.1 Permukaan struktur matriks *foamed concrete*

Ketika pada fase basah (*fresh state*) / mortar, *foamed concrete* sangat mudah mengalir bebas tetapi berperilaku *thixotropic* yaitu campuran mortar menjadi cair ketika diaduk tetapi kembali ke keadaan semisolid saat didiamkan. Karena mudah mengalir maka mortar *foamed concrete* mudah dituangkan ke hampir berbagai bentuk cetakan bahkan dengan cetakan yang berongga tidak beraturan dan tempat yang paling sempit, sehingga tidak memerlukan pemadatan ataupun vibrasi ketika ditempatkan dalam cetakan. Kelebihan lainnya, *foamed concrete* dapat dipompa secara vertikal atau horizontal dengan sangat mudah dibandingkan dengan mortar beton konvensional.

Beberapa temuan sebelumnya menyatakan bahwa *foamed concrete* memiliki ketahanan beku/pencairan yang baik, modul elastisitas yang cukup tinggi dibandingkan dengan tanah, ikatan matriks yang cukup kaku, penyusutan rendah mempunyai sifat tahan api dengan suhu tinggi, insulasi termal, penyerap akustik dan guncangan. Terhadap serangan kimia dan vegetasi, *foamed*

concrete tidak rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh hidrokarbon, bakteri dan jamur. Para peneliti juga telah mengamati bahwa *foamed concrete* memiliki kemampuan yang baik untuk menyerap energi kinetik tumbukan dari sebuah obyek dibandingkan dengan material berbahan semen lainnya.

Kelebihan lain dari *foamed concrete* adalah dapat ditambahkan bahan lain ke dalamnya, untuk merubah ataupun meningkatkan sifat-sifatnya (Nambiar & Ramamurthy, 2006b; Al-Shwaiter, Awang, & Khalaf, 2021; Yuanliang, et. al, 2021; B. Park & Choi, 2021). Beberapa peneliti memasukan bahan- bahan seperti *fly ash* ke dalam *foamed concrete* dengan maksud untuk meningkatkan kekuatan dan karakter lainnya (Li, et. al, 2021; Gencel, Oguz, Gholampour, & Ozbakkaloglu, 2021; Gencel, et. al., 2021; Gopalakrishnan, et.al, 2020), walaupun ada beberapa dari penelitian tidak mendapatkan kekuatan yang diharapkan, namun telah memberikan kepastian bahwa ada beberapa hal yang tidak dapat dilakukan dengan penambahan bahan-bahan tersebut ke dalam *foamed concrete*. Tetapi kepastian yang di dapat adalah dengan menambahkan bahan-bahan tertentu maka dipastikan dapat merubah karakteristik *foamed concrete*. Dalam penelitian ini, pengganti *fly ash* digunakan RHA, karena RHA mempunyai karakteristik seperti *fly ash* (Ramezaniapour, Mahdi, & Ahmadibeni, 2009)

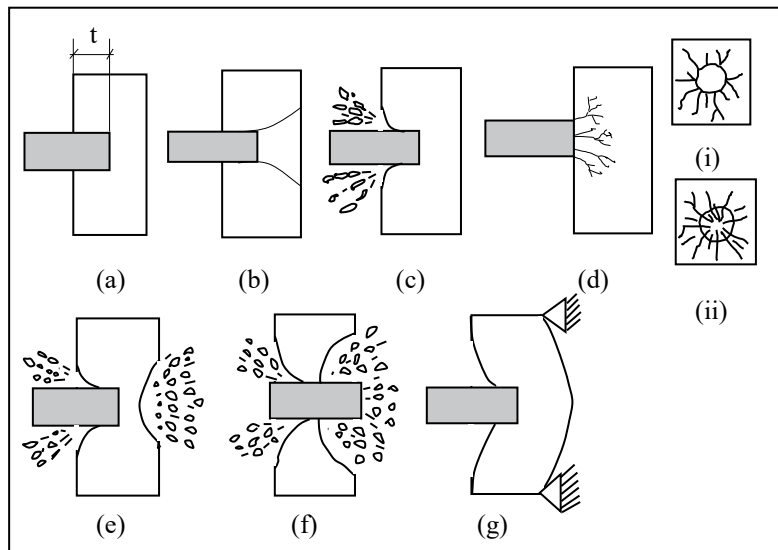
B. Beban Tumbukan pada Beton Kaku

Dalam istilah mekanis, definisi tumbukan/benturan (*impact*) berarti kontak berupa tabrakan yang kuat satu obyek terhadap obyek yang lain. Tumbukan terjadi ketika gaya tekan yang tinggi atau daya kejut dua atau lebih objek bertabrakan terjadi dalam waktu yang singkat. Misalnya, ketika sebuah proyektil menghantam sebuah

obyek yang inelastis (kaku) dengan kecepatan normal (atau kecepatan konstan), proyektil dan obyek (target) akan berubah bentuk (berdeformasi). Deformasi yang terjadi merupakan penyerapan gaya tumbukan. Deformasi tersebut bisa berbentuk deformasi sebagian atau deformasi keseluruhan pada kedua obyek tersebut (penumbuk dan target). Dalam perspektif energi dan hukum konservasi energi, deformasi dan getaran yang dihasilkan oleh kejadian tumbukan adalah sebuah konsekuensi energi kinetik obyek penumbuk yang diubah menjadi panas dan energi suara.

Bilamana sebuah pelat beton polos (tanpa tulangan ataupun serat penguat) sebagai material yang kaku dihantam oleh obyek penumbuk, misalnya sebuah proyektil yang juga kaku sebagai sebuah tumbukan, maka akan menghasilkan kemungkinan beberapa fenomena seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 1.2, yaitu:

- a) **Penetration** (penetrasi), didefinisikan ketika proyektil menghantam target beton, membentuk lubang dengan kedalaman t .
- b) **Cone Cracking** (retak kerucut), terbentuk oleh hantaman proyektil pada target beton yang menembus beton (penetrasi) dan membentuk kerucut pada permukaan belakang pelat beton. Biasanya fenomena ini terjadi bila beton mempunyai ketebalan yang relatif tipis.
- c) **Cratering** dan **Spalling**, ketika proyektil menghantam target beton, maka permukaan beton yang dihantam membentuk cekungan kawah (*crater*) dan melemparkan pecahan beton dengan kecepatan cukup tinggi (*spalling*) ketika membentuk kawah.



Gambar 1.2. Fenomena yang terjadi ketika sebuah proyektil kaku menghantam target beton kaku: (a) Penetration; (b) Cone cracking; (c) Cratering-Spalling; (d) Radial crack: (i) Distal surface (ii) Proximal surface; (e) Scabbing; (f) Perforation; (g) Overall target response. (Q. M. Li, Reid, Wen, & Telford, 2005)

- d) **Radial crack** (retakan berbentuk bundar), fenomena ini terjadi ketika proyektil saat mengenai target beton, dimulai dari titik awal benturan, menciptakan retakan yang memancar dipermukaan beton dan muncul sebagai: (i) permukaan distal (jauh di luar retakan bundar) atau (ii) permukaan proximal dari titik pusat retakan (retakan diawali dari tengah/pusat retakan bundar).
- e) **Scabbing** (bopeng), mirip dengan *cratering* namun pecahan yang dihasilkan bukan saja dari permukaan yang terkena langsung proyektil, tetapi juga terjadi pecahan pada belakang permukaan target beton, akibat rambatan energi benturan ke

belakang target beton. Namun proyektil belum menembus pelat beton.

- f) **Perforation** (menembus target), terjadi ketika proyektil menembus target beton, baik tanpa maupun dengan kecepatan residu proyektil.
- g) **Overall Target Response** (struktur target merespon secara keseluruhan), dimana keseluruhan target beton mengalami respon/kerusakan secara menyeluruh.

Fenomena-fenomena a) sampai dengan f) merupakan kerusakan setempat atau disebut dengan kerusakan lokal. Fenomena-fenomena di atas tersebut sudah mewakili semua kondisi kedua obyek, baik penumbuk (proyektil) maupun target (pelat beton) sehingga salah satu fenomena tersebut dapat terjadi tergantung pada kondisi kedua obyek tersebut. Kondisi-kondisi kedua obyek tersebut adalah selain kekakuan masing-masing, baik obyek penumbuk (proyektil) maupun pelat beton sebagai target, tetapi juga tergantung kepada beberapa hal seperti kecepatan penumbuk atau energi yang dihasilkan dari tumbukan, kekuatan target beton, bentuk hidung/ujung penumbuk dan densitas kedua obyek.

C. Beban Tumbukan Kecepatan Tinggi pada *Foamed concrete*

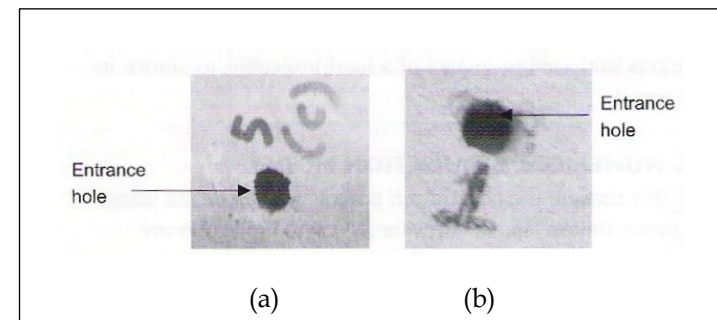
Pada penelitian yang sangat terbatas mengenai *foamed concrete* ketika mengalami pembebanan tumbukan, menunjukkan bahwa hasil yang didapat tidaklah sama dengan beton kaku ketika menerima beban tumbukan. Dari penelitian sebelumnya dengan menggunakan pelat *foamed concrete* sebagai target dari hantaman berbagai bentuk ujung proyektil yang kaku dengan

kecepatan tinggi diatas 30 m/det, maka *foamed concrete* dapat menyerap energi kinetik dengan baik. Kerusakan yang terjadi adalah kerusakan lokal yang sangat sedikit (Zaidi & Li, 2009; Roderick & Zheng, 2013). Efek bentuk hidung proyektil tidak berpengaruh kepada kerusakan maupun kedalaman target *foamed concrete*, dimana kerusakan lokal sangat kecil dan hanya membentuk lubang penetrasi, hal ini sangat bertentangan dengan prinsip target beton konvensional yang kaku bila dihantam berbagai bentuk proyektil. Gambar 1.3 menunjukkan kegagalan beton padat berkekuatan tinggi yang mengalami beban tumbukan sebuah proyektil kaku dengan hidung tajam dan kecepatan tinggi (Zhang, et. al, 2005).

Hasil tersebut pada Gambar 1.3, berbeda dengan *foamed concrete* yang mengalami hantaman proyektil kaku dengan bentuk (a) kerucut dan (b) plat/datar dengan kecepatan tinggi di atas 30 m/det seperti dalam Gambar 1.4 (Zaidi & Li, 2009). Kerusakan lokal pada *foamed concrete* akibat tumbukan ternyata dipengaruhi oleh kemampuan menyerap energi tumbukan dan komposisi materialnya untuk mengubah energi kinetik menjadi deformasi elastis dan plastis (Wu, Li, & Thornton, 2005).



Gambar 1.3 Kerusakan beton kaku dan bertulang akibat beban tumbukan proyektil tajam (X. Zhang, Wu, Zhang, & Huang, 2020)



Gambar 1.4 Kerusakan lokal yang terjadi pada *foamed concrete* akibat beban tumbukan: (a) proyektil bentuk hidung kerucut/tajam dan (b) proyektil bentuk hidung datar (Zaidi & Li, 2009)

D. Latar Belakang Permasalahan

Mode deformasi dan kegagalan *foamed concrete* yang mengalami beban benturan berbeda dengan struktur beton biasa. Sebagai contoh dalam Gambar 1.3 dan 1.4,

dimana beton biasa akan membentuk cekungan kawah (*cratering*) dan retakan (*cracking*), sehingga menghasilkan pecahan, sementara kerusakan lokal yang terjadi pada *foamed concrete*, hanya membentuk lubang dan hanya terjadi penetrasi proyektil tanpa disertai fenomena lainnya. Kerusakan lokal yang terjadi pada *foamed concrete* tersebut disebabkan karena *foamed concrete* mempunyai densitas yang rendah dibandingkan beton konvensional dan struktur matriks yang berpori.

Namun demikian, muncul dua permasalahan yang diidentifikasi dalam penelitian ini yaitu, pertama, *foamed concrete* mempunyai pori-pori yang sangat mempengaruhi karakteristik kekuatannya. Porositas *foamed concrete* menghasilkan retak mikro (*microcrack*) yang seterusnya dapat membentuk serta menghasilkan retak besar dan mengurangi kekuatan gesernya. Sementara itu, *foamed concrete* sebagai material pelindung pada bangunan membutuhkan kekuatan yang cukup untuk menahan beban benturan. Oleh karena itu, beton harus dimodifikasi untuk meningkatkan densitas dan kekuatannya tanpa mengurangi karakteristik *foamed concrete* sebagai beton ringan dan beton berpori.

Selanjutnya permasalahan yang kedua adalah, studi mengenai *foamed concrete* yang mengalami beban tumbukan sangat terbatas, terutama untuk penyelidikan mengenai perilaku *foamed concrete* terhadap efek benturan dengan kecepatan sedang dan prediksi kedalaman penetrasi obyek penumbuk, sampai saat ini belum ditemukan. Sehingga diperlukan sebuah penelitian untuk mengetahui perilaku *foamed concrete* yang terkena beban tumbukan kecepatan sedang, sehingga dapat memprediksi kegagalan yang terjadi pada *foamed concrete*.

Permasalahan kedua ini sangat berhubungan erat dengan permasalahan pertama karena dengan me-

ningkatnya kekuatan dan densitas akan mempengaruhi karakter *foamed concrete* dibawah tekanan beban benturan.

Adapun tujuan dari pembahasan penelitian dalam buku ini adalah untuk menyelidiki perilaku dan kedalaman penetrasi *foamed concrete* dan FCRHA yang mengalami berbagai kecepatan tumbukan sedang. Penelitian ini diharapkan menghasilkan model empiris yang akan sesuai dengan kedalaman penetrasi *foamed concrete* dan FCRHA terhadap kecepatan tumbukan. Untuk mencapai tujuan ini, maka diuraikan sebagai berikut:

1. Mengembangkan spesimen dari *foamed concrete* dan FCRHA dengan densitas sampai mencapai 1800 Kg/m³.
2. Menyelidiki secara eksperimental kedalaman penetrasi pelat *foamed concrete* dan FCRHA akibat berbagai variasi kecepatan benturan.
3. Menyelidiki dan mengamati perilaku kerusakan lokal *foamed concrete* dan FCRHA akibat berbagai variasi kecepatan benturan.

E. Temuan Kebaruan (Novelty)

Beberapa penelitian telah dilakukan pada ketahanan beton konvensional yang sangat kaku terhadap tumbukan dengan kecepatan rendah dan tinggi. Hasil menunjukkan bahwa kekuatan dan kekakuan beton dapat menahan beban tumbukan dan menghasilkan catatan-catatan kerusakan beton berupa *Cratering*, *Penetrasi*, *Scabbing*, *Cone Cracking*, *Spalling*, *Radial Crack*, *Perforation*, dan *Overall target response*. Dari semua hasil beban tumbukan pada beton konvensional yang kaku menunjukkan kerusakan yang memberikan efek sekunder, yaitu beban tumbukan menghasilkan pecahan beton yang sangat berbahaya, karena pecahan tersebut mempunyai

kecepatan yang tinggi ibarat sebuah proyektil/peluru dan dapat melukai manusia disekitarnya dengan fatal. (Hughes, 1984; Halдар & Hamieh, 1984; Dancygier & Yankelevsky, 1996; Yankelevsky, 1997; Zhang, et. al., 2005; Beppu, et. al, 2008).

Sementara penelitian mengenai *foamed concrete* yang diberi beban benturan/tumbukan sangat terbatas, dan belum ada penelitian yang menentukan perilaku *foamed concrete* akibat beban tumbukan dengan kecepatan sedang, padahal *foamed concrete* adalah material potensial yang dapat menggantikan beton konvensional non struktur yang sudah menjadi kebutuhan di bidang konstruksi dan dipakai secara luas. Artinya *foamed concrete* dapat berperan sebagai pelindung bangunan, misalnya dinding, atap, pagar, *shelter*, dan sebagainya yang dapat terpapar beban benturan. Oleh sebab itu, *foamed concrete* perlu ditingkatkan karakteristik mekanik nya dan dalam penelitian ini *foamed concrete* dimodifikasi untuk meningkatkan performa plastis nya terhadap beban tumbukan. Selain itu, penelitian ini menyajikan pembahasan serta mendapatkan informasi mengenai kerusakan lokal *foamed concrete* akibat beban tumbukan dan memahami fenomena material baru FCRHA akibat beban tumbukan, yang merupakan sebuah kebaruan dalam penelitian ini.

F. Ruang Lingkup Pembahasan

Untuk mencapai tujuan buku ini, maka dibuat pelat *foamed concrete* dan FCRHA untuk uji benturan dan penelitian ini dibatasi dalam lingkup berikut:

1. Modifikasi *foamed concrete* dalam penelitian ini adalah *foamed concrete* dengan RHA sebagai pengganti agregat halus sebagian.
2. Semua spesimen *foamed concrete* dan FCRHA memiliki kepadatan 1800 kg /m³.

3. Spesimen pelat mempunyai berbagai ketebalan yaitu: pada 160 mm, 270 mm, 380 mm, 490 mm.
4. Impaktor atau obyek penumbuk mempunyai berat 5,9 kg diterapkan dengan menggunakan metode *high tower drop impactor* yang dilakukan di laboratorium.
5. Impaktor yang digunakan adalah berbentuk bola yang tidak dapat berubah bentuk dengan kepadatan 1094 kg / m³ dan diameter 218 mm.
6. Kecepatan tumbukan impaktor bervariasi dari 9,9 m/det, 8,9 m/det dan 7,7 m/det.

Buku ini diharapkan mampu memberikan kontribusi kepada ilmu pengetahuan dan teknologi secara mendasar juga diharapkan dapat memberikan kontribusi di bidang konstruksi dan jasa konstruksi.

BAB 2

FOAMED CONCRETE

Kerangka berfikir penelitian yang dijalankan sesuai dengan relevansi pustaka yang terkait dengan material *foamed concrete* dan semua komponen material untuk memodifikasinya. Selain itu penelitian ini berdasarkan kepada teori yang terkait dengan hukum mekanisme tumbukan, hukum kekekalan energi, mekanisme deformasi elastis-plastis di bawah beban tekanan tumbukan, dan mekanisme material selular.

A. Material Utama Foamed Concrete

Foamed concrete merupakan beton ringan yang dapat dibuat ke berbagai bentuk produk material konstruksi seperti beton normal, misalnya: blok bata, *hebel*, pelat, balok pagar dan lain-lain. Pada intinya, material dasar *foamed concrete* mirip dengan beton konvensional yang menggunakan semen *Portland*, agregat dan air. Namun perbedaan beton konvensional dengan *foamed concrete* terletak pada penggunaan agregat halus (pasir) saja tanpa agregat kasar (kerikil) kedalam campuran semen sebagai mortar kemudian menambahkan larutan busa yang sangat ringan kedalam campuran mortar tersebut.

Proses pengerasan *foamed concrete* sama dengan beton konvensional, dimana semen akan mengalami hidrasi ketika tercampur dengan air dan pengerasan memerlukan waktu normal 28 hari. Ada 2 hal yang ditinjau mengenai material utama dalam penelitian ini, yaitu : Karakteristik *foamed concrete* dan Abu Sekam Padi.

1. Karakteristik Foamed Concrete

Teknologi *foamed concrete* telah digunakan sejak lebih dari 5000 tahun yang lalu oleh orang Mesir, dan kemudian diterapkan oleh orang Romawi pada 3000 tahun setelahnya. Pada masa tersebut, *foamed concrete* dibuat dengan cara mencampur kerikil halus, pasir kasar, kapur panas dan air secara bersamaan. Gelembung udara kecil diciptakan dengan mencampur darah hewan ke dalam campuran, sementara untuk mengurangi penyusutan, maka dimasukan rambut kuda. Hasilnya memang tidak seperti *foamed concrete* yang dikenal di era modern saat ini, namun ide memasukan gelembung udara ke dalam mortar beton memberikan hasil seperti mana beton berpori dan ringan.

Sejak tiga dekade terakhir, *foamed concrete* telah menjadi bahan konstruksi populer untuk aplikasi konstruksi untuk berbagai macam fasilitas infrastruktur misalnya untuk jalan raya bermutu tinggi dan kereta bawah tanah (Jones & McCarthy, 2005). Selain ringan, *foamed concrete* menunjukkan sifat-sifat dan karakteristik yang sangat baik (Aldridge, 2005), bahkan karakteristik tertentu mempunyai kelebihan dibandingkan dengan beton konvensional, misalnya *foamed concrete* mempunyai sifat insulasi terhadap panas dan tahan terhadap api (Othuman & Wang, 2011; Hadipramana, et al., 2019), besaran sifat insulasi ini tergantung kepada kepadatan/densitas, dimana nilai insulasi ini berbanding terbalik dengan densitas, semakin tinggi densitas maka semakin kecil insulasi. Itu sebabnya beton konvensional yang padat mempunyai penghantaran panas yang tinggi dan beton cepat rusak. Namun demikian, untuk tujuan insulasi panas *foamed concrete* dapat dibuat dalam berbagai macam kepadatan dan kekuatan tanpa menghilangkan sifat berbusanya (Narayanan &

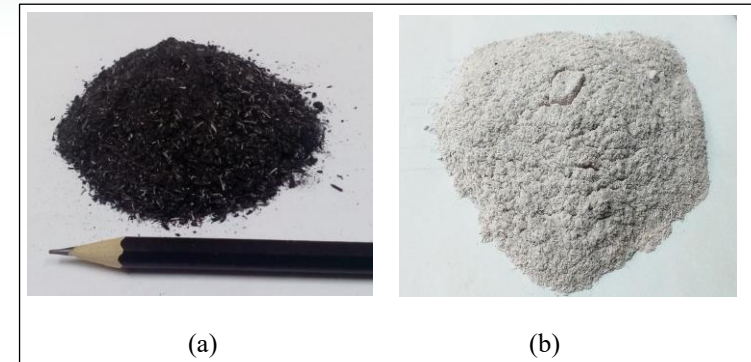
Ramamurthy, 2000). Hal yang sama juga berlaku kepada *foamed concrete* yang mempunyai sifat tahan terhadap api secara langsung, karena pori-pori dapat menahan api dan menghambat panas dengan baik tanpa kerusakan pada strukturnya. Bukan saja sifat terhadap api dan panas, tetapi *foamed concrete* mempunyai sifat menyerap akustik. Transmisi suara yang dipantulkan dinding *foamed concrete* sebagian besar mempunyai rentang frekuensi yang dapat didengar lebih tinggi sebesar 2-3% dibandingkan beton normal (Ramamurthy, Nambiar, & Ranjani, 2009). Hal ini disebabkan beton padat cenderung membelokkan atau memantulkan suara, sementara *foamed concrete* yang banyak mengandung pori-pori udara dapat menyerap gema, oleh karena itu *foamed concrete* memiliki kapasitas penyerapan suara yang lebih tinggi dari beton normal. Lebih lengkapnya sifat-sifat *foamed concrete* disajikan dalam Tabel 2.1

Tabel 2.1
Karakteristik Foamed Concrete

Karakteristik <i>Foamed concrete</i>	Nilai
Volume pori dalam matriks beton	$\pm 25\% - 74,9\%$ (tergantung densitas)
Densitas	400 sampai 1800 kg/m ³
Kekuatan Tekan	1–14 N/mm ²
Kekuatan Tarik	3 sampai 4,5 N/mm ²
Modulus Elastisitas	0,18 sampai 13,58 kN/mm ²
Rasio Poisson	$\pm 0,2$
Akustik / Transmisi suara	2–3% lebih tinggi dari beton normal
Penghantar Panas	0,07–0,21 W/m.°C
Tahan Panas / Api (per 1000 kg/m ³)	3796 J/kg.°C / 1450°C tanpa kerusakan

2. Abu Sekam Padi (RHA)

RHA merupakan limbah pertanian yang melimpah di dunia dengan potensi sebagai pengisi atau pengikat berkelanjutan dalam semen atau beton (Al-khalaf & Yousift, 1984). Dari penelitian sebelumnya didapat bahwa karakteristik dan komposisi RHA mempunyai kesamaan dengan *fly ash* (Detphan & Chindaprasirt, 2009), namun hal ini dapat terjadi bila RHA didapat dengan pembakaran dan penggilingan yang tepat, sehingga elemen amorpous reaktif dalam RHA dapat diproduksi dan dapat berlaku sebagai *pozzolan* yaitu sifat identik dengan semen, dimana material ini ketika bercampur dengan semen ataupun kapur dapat mengikat agregat dan mengeras bersama-sama. Pada kondisi ketika RHA dibakar dalam dengan suhu yang tidak terkendali (Hadipramana, et. al, 2013), maka RHA menyisakan butiran-butiran hasil pembakaran sehingga struktur RHA akan sebagian berbentuk butiran yang poros dan sebagian lagi berbentuk abu. Bilamana butiran ini mengisi ruang pori-pori *foamed concrete*, maka sel pori akan mendapat penguatan dan peningkatan kepadatan *foamed concrete* tanpa menghilangkan sifat porositas (Hadipramana, et al, 2014).



Gambar 2.1 (a) RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ selama ± 6 jam mengandung banyak material poros. (b) RHA yang dibakar dengan terkendali (sesuai dengan yang diharapkan)

B. Modifikasi *Foamed concrete*

Sama halnya dengan beton konvensional, untuk mendapatkan sifat-sifat baru yang diinginkan, maka *foamed concrete* dapat ditambahkan dengan material lainnya baik sebagai pengganti atau sebagai tambahan dan pengisi. Seperti semisalnya, penggantian pasir dengan *fly ash* (pengisi halus) menghasilkan rasio kekuatan yang lebih tinggi terhadap densitas, sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan *foamed concrete* (Nambiar & Ramamurthy 2006b). Dalam penggunaan RHA, biasanya RHA sering digunakan sebagai pengganti semen dikarenakan RHA bersifat *pozzolan* daripada dipakai sebagai pengganti agregat, dan biasanya pasir digantikan dengan bahan lain yang serupa dengan pasir, baik sifat-sifat fisiknya maupun kimiawinya.

Namun pada intinya, penggantian material akan menggunakan bahan yang mempunyai sifat dan karakter yang sama dengan material dasar, baik secara kimiawi maupun fisik, seperti dalam Tabel 2.2, selanjutnya material tersebut bisa saling mengisi satu sama lain atau saling menguatkan (Gencel, et. al., 2021). Contoh lain,

misalnya RHA sebagai pengganti semen kemudian ditambahkan dengan bahan kapur (*silica fume*) (Luna, et. al, 2018), dengan maksud agar reaksi hidrasi dan pengerasan pada campuran *foamed concrete* terjadi dapat lebih berkesinambungan, sehingga memberikan kontribusi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat *foamed concrete* lainnya seperti penahan panas, penyerap gempa, penyerap energi, dan lain-lain.

Tabel 2.2

Komposisi antara semen Portland, RHA dan Serbuk Marmer sebagai pengganti semen dan pasir

Oksida (%)	Semen Portland	RHA	Serbuk Marmer
CaO	63.48	0.68	52.5
SiO ₂	18.93	95.24	2.79
Al ₂ O ₃	5.22	0.82	0.68
Fe ₂ O ₃	3.42	0.18	0.08
MgO	1.76	0.33	0.62
SO ₃	2.69	0.16	0.09
Na ₂ O	0.45	0.11	0.12
K ₂ O	0.71	1.33	0.22
Loss in ignition	3.17	1.15	42.8
Specific gravity	3.14	2.12	2.68

Sumber: (Luna-Galiano et al., 2018).

Modifikasi juga dapat dibuat dengan menambahkan beberapa material yang tidak sejenis/mirip secara kimiawi ataupun fisik dengan material dasar pada *foamed concrete*. Para peneliti mengamati bahwa menambahkan potongan serat *polypropylene* ke dalam *foamed concrete* dimaksudkan sebagai penguat (*reinforcement*) akan

mengurangi kerapuhan, karena serat *polypropylene* dapat meningkatkan kekuatan tarik yang pada akhirnya akan meningkatkan perilaku gesernya (Jones & McCarthy, 2005; Kearsley, 1999; Hadipramana, et. al, 2013).

C. Pengaruh RHA pada Reaksi Hidrasi Semen

Pemakaian *foamed concrete* mempunyai porsi tersendiri sebagai material pengganti beton, bahkan sifat porositasnya dianggap menjadi sebuah keunggulan tertentu. Beberapa peneliti (Zaidi & Li, 2009; Roderick & Zheng, 2013) melaporkan kemampuan *foamed concrete* dalam menyerap energi benturan mempunyai cara yang berbeda dengan beton konvensional dan ini menunjukkan potensi yang besar sebagai struktur pelindung alternatif untuk menggantikan beton konvensional.

Namun tidak dipungkiri, bahwa *foamed concrete* terlalu lemah dalam menahan benturan yang lebih kuat, sehingga tidak sekedar menyerap energi benturan, tetapi hasilnya adalah *foamed concrete* akan hancur berkeping-keping, para pelaku di bidang konstruksi ataupun konsumen sering mempertimbangkan kekurangan ini dalam pemakaian sebagai bahan konstruksi yang menginginkan kekuatan, terutama akibat benturan. Maka dengan demikian, *foamed concrete* memerlukan penambahan kekuatan. Namun, tetap ringan dan mempunyai kemampuan menyerap energi benturan yang memadai untuk mempertahankan karakteristik porositasnya.

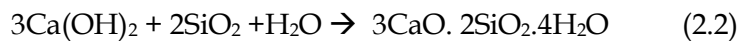
Beberapa penelitian mengungkapkan teknik-teknik untuk meningkatkan kekuatan *foamed concrete*, salah satu teknik yang direkomendasikan untuk meningkatkan kekuatan *foamed concrete* adalah melalui penambahan bahan tambah, diantaranya adalah *fly ash* ke dalam mortar campuran *foamed concrete* (Nambiar &

Ramamurthy, 2006a; Gökçe, Hatungimana, & Ramyar, 2019).

Fly ash mempunyai karakter sebagai bahan *pozzolan* dimana pada reaksi hidrasi semen pada campuran beton basah, akan memproduksi Kalsium Hidroksida (Ca(OH)) yang dilepaskan sebagai unsur bebas, dimana reaksi pertama adalah reaksi hidrasi semen:



Dengan kehadiran *fly ash* yang kaya dengan Silika (Si) akan mengikat kembali Ca(OH) yang dilepas pada reaksi pertama, sehingga proses hidrasi akan berulang pada reaksi kedua (Zaidi, et. al, 2014). Pengikatan dan pengerasan material beton akan bertambah pada reaksi kedua yaitu reaksi *pozzolanic*:



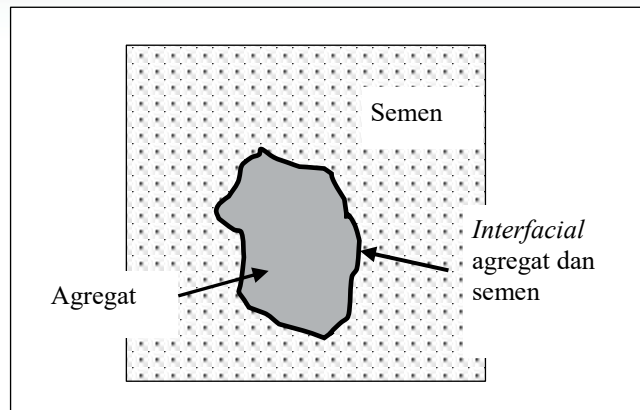
Dalam penelitian ini bahan pengganti *fly ash* digunakan Abu sekam Padi (RHA) dimana sangat penting untuk dicatat bahwa RHA memiliki karakteristik yang mirip dengan *fly ash* (Ramezaniapour, et. al., 2009; Detphan & Chindaprasirt, 2009) seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.3 Sehingga RHA sebagai bahan pengisi dapat berlaku seperti mana sebagai material *pozzolan* dan dapat membuat reaksi hidrasi semen.

Tabel 2.3
Komposisi RHA dan Fly Ash

Unsur	RHA	Fly Ash
SiO_2	91,91	38,72
Al_2O_3	0,12	20,76
Fe_2O_3	0,29	15,28
CaO	0,69	16,55
Na_2O	0,20	1,19
TiO_2	0,01	0,44
MgO	0,08	1,49
K_2O	1,98	2,69
PO_2O_5	0,54	0,16
SO_3	0,78	2,63

Sumber: (Detphan & Chindaprasirt, 2009)

Dalam penelitian lainnya, pasta semen yang bergabung dengan RHA memiliki Ca(OH) yang lebih rendah daripada konten dari kontrol pasta semen Portland tanpa RHA. Selanjutnya reaksi *pozzolanic* mengurangi jumlah lebar zona antar-muka (*interfacial*) antara agregat (pasir) dan pasta semen (Zhang, Lastra, & Malhotra, 1996), seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.2



Gambar 2.2 Antar-muka (*interfacial*) agregat dan pasta semen

Proses ini mengakibatkan *foamed concrete* (dengan RHA) dapat meningkatkan kekuatannya karena berkurangnya porositas dan mengurangi jumlah zona antar-muka antara pasir dan semen juga meningkatkan kepadatan zona (Hadipramana, et. al., 2017).

D. Mekanisme Tumbukan/Benturan

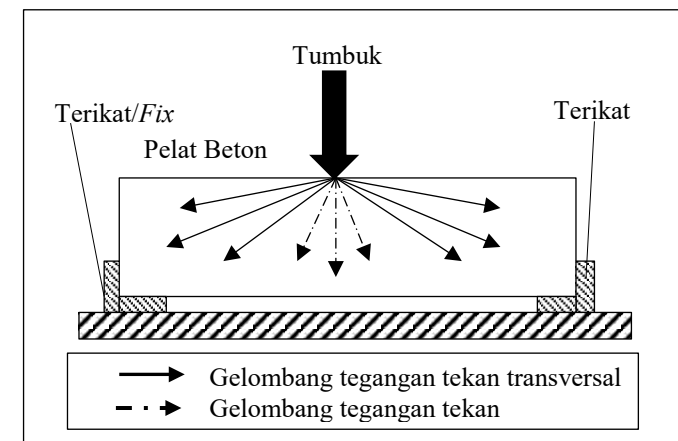
Tumbukan atau benturan (*impact*) dalam istilah mekanik, berarti suatu kontak yang sangat kuat dari sebuah obyek dengan obyek lainnya. Tumbukan terjadi ketika sebuah daya yang besar atau sebuah daya kejut dari dua atau lebih obyek yang bertabrakan satu sama lain dalam waktu yang singkat. Tumbukan merupakan sebuah beban dinamis yang menghasilkan efek pada obyek-obyek yang berbenturan, dan merupakan sebuah mekanisme dinamis yang berkesinambungan sehingga menghasilkan fenomena-fenomena tumbukan.

1. Tegangan Tekan Elastis

Bila sebuah beban dinamis yang cepat (tiba-tiba/kejut) misalnya sebuah obyek keras dan kaku (tidak berdeformasi) mengalami tumbukan kepada sebuah

target semisalnya pelat beton, maka benturan akan berubah menjadi gelombang tekan yang merambat ke berbagai arah dari titik awal benturan pada permukaan beton tersebut. Apabila gelombang tekan yang terjadi besarnya lebih kecil dari tegangan leleh (*yield stress*) material beton, maka hasilnya adalah gelombang tegangan tekan elastis.

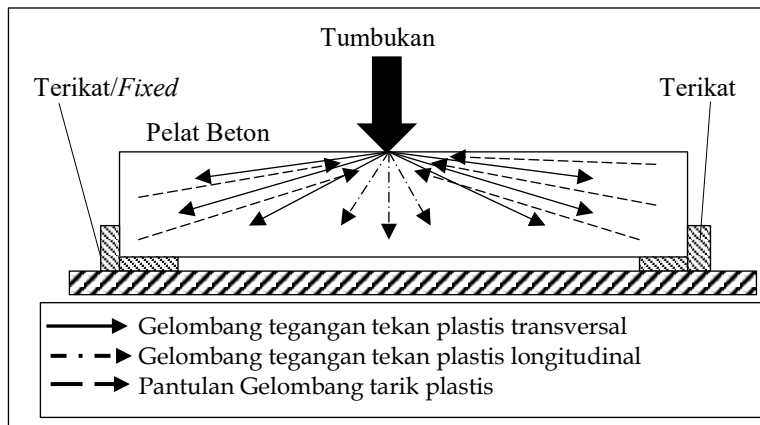
Gelombang tegangan tekan diilustrasikan seperti pada Gambar 2.3 Pada saat gelombang tegangan tekan merambat ke segala arah, maka secara umum ada 2 arah gelombang, yaitu gelombang *transversal* yaitu arah menjauhi titik tumbukan sejajar dengan lebar pelat beton dan arah gelombang *longitudinal*, yaitu searah dengan arah tumbukan. Pada kondisi tegangan tekan elastis biasanya pelat beton tidak akan mengalami *spalling* atau menghasilkan pecahan, namun hanya menghasilkan retakan pada titik tumbukan.



Gambar 2.3 Gelombang tegangan tekan yang terjadi akibat beban tumbukan

2. Tegangan Tekan Plastis

Pada kasus sebuah tumbukan oleh obyek keras dan kaku menghantam pelat beton, maka apabila gelombang tekan terjadi menghasilkan tegangan yang melebihi tegangan leleh beton maka akan menghasilkan gelombang tegangan tekan plastis (Lu & Yu, 2003). Pada Gambar 2.4, diilustrasikan bahwa gelombang tegangan tekan yang terjadi setelah merambat menjauhi titik tumbukan, maka selanjutnya tegangan tekan tersebut akan memantul kembali menuju titik awal tumbukan. Pantulan gelombang tegangan tekan ini akan berubah menjadi gelombang tegangan tarik dan proses ini terjadi dengan cepat. Pantulan terjadi terutama pada arah gelombang tegangan tekan transversal. Sementara untuk arah gelombang tegangan tekan longitudinal tidak akan terjadi pantulan apabila tebal pelat relatif tipis, maka gelombang tegangan tekan akan diteruskan ke arah bagian permukaan bawah pelat dan bisa menyebabkan fenomena kerusakan *spalling* pada pelat beton.



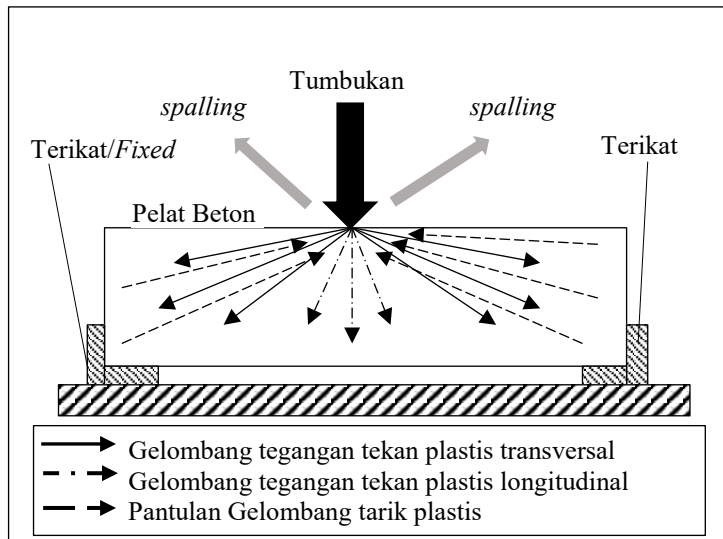
Gambar 2.4 Gelombang tegangan tekan plastis yang terjadi akibat beban tumbukan dan pantulan gelombang.

Pada kondisi ini deformasi maupun fenomena kerusakan akan bergantung kepada keadaan kedudukan pelat beton, bila semua tepi pelat terikat seluruhnya maka akan terjadi kegagalan struktur di daerah tepi pelat beton dan terjadi retakan akibat kegagalan kekuatan geser pelat, dimana gelombang tegangan tekan plastis tidak akan dipantulkan tetapi sepenuhnya akan di tanggung oleh perletakan jepit tepi pelat.

3. Kerusakan Gelombang Tarik Plastis

Sebuah pelat beton yang terikat (*fixed/clamped*) pada ujung tepi permukaan bawahnya, sementara ujung tepi permukaan pelat atas dalam keadaan bebas seperti ilustrasi pada Gambar 2.5. Ketika beban tumbukan mulai menyentuh permukaan pelat beton, maka benturan akan dirubah menjadi tegangan tekan elastis, namun apabila dampak benturan lebih kuat, maka tegangan tekan elastis akan berubah menjadi tegangan plastis dalam waktu yang singkat (secara tiba-tiba), sehingga menghasilkan gelombang tegangan tekan plastis yang menyebar ke seluruh badan target.

Ketika gelombang tekan plastis sudah mencapai ujung terjauh dari pelat beton (gelombang transversal), gelombang tersebut akan memantul kembali ke arah titik awal tumbukan. Hal ini karena di ujung tepi atas pelat dalam keadaan bebas. Gelombang pantul ini berubah menjadi gelombang tarik plastis dengan proses yang cepat. Apabila gelombang tarik plastis ini lebih besar dari tegangan leleh material beton atau kuat geser beton, maka bila sudah mencapai titik awal tumbukan, gelombang tarik plastis ini akan menghasilkan pecahan yang terlempar (*spalling*) di daerah titik tumbuk (Lu & Yu, 2003).



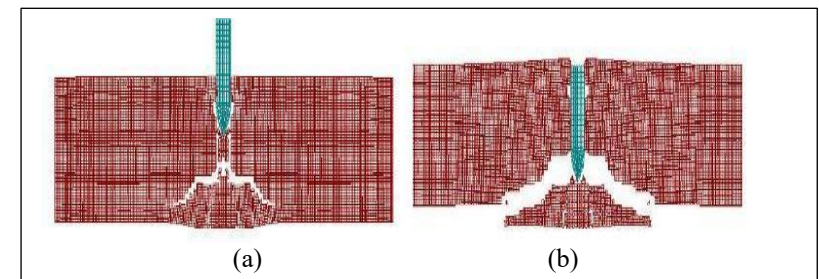
Gambar 2.5 Mekanisme kerusakan akibat beban tumbukan dan proses *spalling*.

E. Kerusakan Lokal pada Beton Akibat Tumbukan

Dari banyak penelitian dan studi mengenai kerusakan lokal pada beton kaku yang dibebani beban tumbukan dipengaruhi oleh karakteristik tertentu, seperti energi fraktur (*fracture energy*), laju aliran regangan (*strain rate*), kekuatan tarik (*tensile strength*) dan kekuatan tekan (*compressive strength*) (Leppänen, 2006; Haifeng & Jianguo, 2009; Kennedy, 1976). Karakteristik beton tersebut berperan dalam penyerapan energi ketika beton terkena tumbukan. Selain itu, penyerapan energi dikaitkan dengan total elastis dan plastis atau regangan inelastis dari struktur material sedemikian rupa sehingga dua material dengan volume yang sama yang terkena benturan memiliki efisiensi penyerapan energi yang berbeda berdasarkan perbedaan nilai regangan elastis total dan regangan inelastis (Jones, 2010). Hal ini menjadikan parameter elatis dan inelastis tersebut

sebagai komponen penting dalam penyerapan energi, hal ini terlihat ketika beton kaku menghasilkan pecahan *spalling* dan *scabing* yang disebabkan oleh sifat regangan elastis dan inelastis yang rendah. Oleh karena itu, untuk meningkatkan regangan elastis dan inelastis beton kaku diperlukan untuk menambahkan serat ke dalam beton (Zhang, et. al., 2005).

Pada kasus benturan sebuah proyektil padat yang berujung tajam pada beton kaku, menghasilkan lubang sekaligus pecahan *spalling*. Hal ini terjadi karena beban tumbukan yang ditanggung oleh parameter material elastis beton yang secara bersamaan menanggung gelombang plastis (inelastis) yang dihasilkan oleh beban benturan itu sendiri, dan gelombang inelastis ini ternyata lebih besar daripada gelombang elastis (Yankelevsky, 1997). Dengan kasus seperti ini, hasil tumbukan dapat membentuk "lonceng" atau fenomena *cone cracking* pada beton kaku (seperti pada Gambar 2.6). Hal ini disebabkan oleh parameter beton yang mempunyai kekuatan tarik rendah sehingga beban tumbukan membentuk distribusi geser berbentuk 'lonceng' dan selanjutnya menghasilkan *spalling* dan pecahan pada permukaan belakang beton berbentuk kerucut menyerupai lonceng.



Gambar 2.6 Penetrasi yang menghasilkan fenomena *cone cracking* pada beton, akibat kekuatan tarik beton yang sangat rendah (beton kaku) (Teng, Chu, Chang, & Chin, 2004)

F. Tumbukan Plastis dan Disipasi Energi Tumbukan

Ada dua mekanisme yang digunakan untuk menghilangkan energi kinetik awal tumbukan, yang pertama yaitu, penyebaran gelombang tegangan energi pada target dan yang kedua adalah, deformasi plastis target. Ketika tumbukan terjadi mulai mengenai permukaan target, maka energi kinetik diubah menjadi energi regangan elastis, energi regangan plastis (inelastis) dan energi gelombang tegangan elastis (Wu, et. al., 2005). Energi regangan elastis disimpan dalam 'tubuh' target selama terjadinya tumbukan dan juga dapat keluar lagi sebagai pantulan energi kinetik.

Sementara itu, energi regangan plastis yang timbul menyebabkan deformasi plastis target secara plastis dan menyebabkan deformasi plastis yang tidak dapat diubah (*irreversible*) pada target. Sedangkan gelombang energi tegangan elastis merambat disepanjang seluruh target. Sehingga energi kinetik dapat diubah menjadi deformasi plastis dan gelombang tegangan. Normalnya, energi kinetik awal lebih besar berubah menjadi deformasi plastis dibandingkan gelombang tegangan yang terjadi (Hutchings, 1979). Hal ini memperkuat fakta bahwa deformasi plastis adalah mekanisme disipasi yang dominan untuk benturan plastis. Namun, penting untuk dicatat bahwa energi kinetik yang diserap oleh deformasi plastis target melibatkan respons keseluruhan termasuk deformasi lentur dan struktur pendukung. Ini berarti energi plastis atau inelastis tidak hanya mengurangi gaya kontak tetapi juga menentukan jumlah energi yang dikonsumsi oleh target melalui kerja negatif yang dilakukan (Ali, et. al, 2006).

Ketika energi tumbukan cukup tinggi dari sebuah proyektil, maka akan menciptakan penetrasi yang dalam

pada target dan tidak akan memantul kembali. Fenomena ini menggambarkan perilaku benturan plastis pada *foamed concrete*, begitupun jika penetrasi yang diamati hasilnya dangkal, maka masih dapat diasumsikan bahwa tumbukan yang terjadi diperlakukan sebagai tumbukan plastis terutama ketika dalam menentukan penyerapan energi dari target. Selain itu, kondisi tumbukan plastis juga menyebabkan jumlah energi kinetik yang dihasilkan oleh kecepatan tumbukan proyektil yang diubah menjadi energi regangan, sehingga menyebabkan deformasi pada proyektil. Sisa energi kinetik yang dihasilkan oleh kecepatan tumbukan saat menumbuk target diserap oleh target dan melibatkan semua respon pada target termasuk deformasi lentur sampai dengan respon struktur pendukung target (Kennedy, 1976).

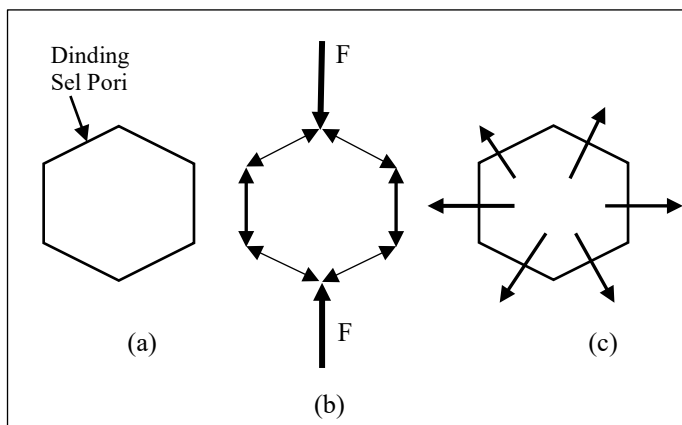
G. Mekanisme Deformasi pada Material Seluler

Pada kasus beban obyek penumbuk berupa proyektil dengan hidung yang tajam ataupun kerucut menembus *foamed concrete* dengan kecepatan tinggi, maka proyektil akan menembus *foamed concrete* dengan tidak menghasilkan *spalling* ataupun *scabbing* pada permukaan *foamed concrete* (Zaidi & Li, 2009). Hasil ini berkaitan dengan material *foamed concrete* yang penuh dengan pori dan berhubungan dengan penyerapan energi. Untuk itu, sebagai material seluler (*cellular materials*) *foamed concrete* mempunyai mekanisme deformasi material selular bila dibebani oleh beban benturan.

1. Teori Honeycomb effect

Untuk memahami mekanisme material busa yang terbebani beban tekan, maka diilustrasikan seperti pada Gambar 2.7, dimana digambarkan sebuah sel pori di dalam material busa yang mempunyai sudut heksagon

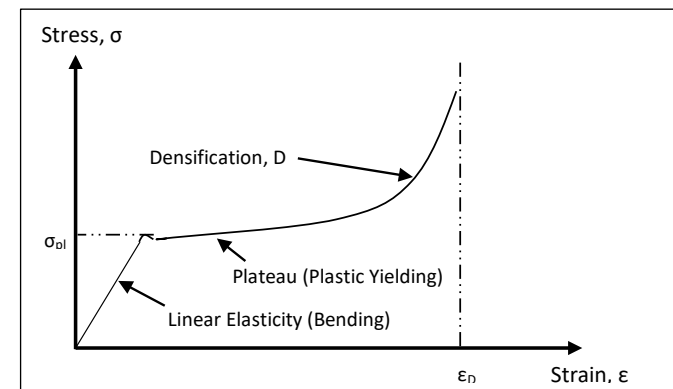
mendapat beban tekan. Ketika beban tekan mulai bekerja pada material busa, maka pori-pori dinding material busa akan menanggung beban tekan tersebut. Gambar 2.7a, mengilustrasikan ketika sebuah sel pori menanggung beban tekan, maka sel pori menahan beban tersebut dalam bentuk tegangan dinding sel pori. Dalam kondisi ini daerah tegangan elastis linear dikendalikan oleh dinding pori tersebut (Gambar 2.7b).



Gambar 2.7 Mekanisme deformasi pada material busa bila terkena beban tekan. (a) sel pori (b) beban tekan mengakibatkan tegangan tekan dinding sel pori, σ (c) udara keluar dari sel pori pada saat keruntuhan sel dinding pori (Gibson & Ashby, 2014).

Pada kondisi tegangan linear elastis digambarkan sebagai daerah elastis pada diagram tegangan pada Gambar 2.8. Pada saat kondisi ini dinding sel pori dapat menanggung tegangan tekan, namun bila tekanan semakin besar maka sel pori akan tertekuk atau berdeformasi aksial karena regangan dinding permukaan sel pori. Disebabkan beban adalah tekan dan material bersifat getas (*brittle*), maka ketika tegangan mencapai daerah zona plastis (*Plateau/Plastic yielding* pada Gambar 2.8) boleh dikatakan dinding sel pori hampir sepenuhnya

runtuh. Ketika itu sel dinding saling menyentuh dan menekan oleh sel dinding dari arah berlawanan, maka tegangan menurun selanjutnya tegangan meningkat dengan cepat dan terjadi pepadatan di zona akhir atau disebut zona pepadatan (*densification zone* pada Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Skema tegangan-regangan tekan untuk kondisi elastis-plastis dinding sel material busa.

Jika bahan porous tersebut rapuh seperti beton atau keramik, maka keruntuhan tersebut disebut kehancuran getas (*brittle crushing*). Kehancuran getas dalam *foamed concrete* diwakili oleh runtuhnya dinding pori-pori. Ketika dinding pori-pori *foamed concrete* mencapai keruntuhan, udara akan dilepaskan (Gambar 2.7c). Luas permukaan, yang sarat oleh tekanan tekan akan lebih padat dan sel-sel berpori akan menjadi pecahan. Kehancuran getas merupakan bentuk deformasi dari *foamed concrete* akibat beban tekan statis maupun dinamis seperti tumbukan.

2. Deformasi pada Pori-Pori Foamed Concrete

Karena banyak mengandung pori dalam matriksnya, *foamed concrete* dapat berlaku sebagai

material yang menyerupai sarang lebah (*honeycomb*). Perilaku material yang seperti sarang lebah, bilamana terkena beban tumbukan, maka material tersebut mempunyai sifat plastis yang dominan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini pengamatan difokuskan kepada perilaku benturan plastis *foamed concrete* akibat beban tumbukan.

Tegangan tekan yang terjadi pada *foamed concrete* akibat beban tekan, akan diterima oleh dinding-dinding poros dalam matriks. Mekanisme tegangan tekan dinding poros yang ada dalam matriks *foamed concrete* yang terbebani tegangan tekan apat dianalogikan dengan analisis material busa (*foam material*) (Gibson & Ashby, 2014).

Pada kasus *foamed concrete* yang terkena beban tumbukan, tegangan akibat tumbukan menghasilkan tegangan tekan elastis ketika penumbuk mulai menyentuh permukaan target. Maka gelombang elastis tekan mulai menyebar dalam wilayah elastis linear (Beppu, et. al., 2008). Namun pada target di daerah terkena tumbukan berubah menjadi plastis secara cepat (dengan tiba-tiba) hal ini disebabkan pada titik tumbukan mempunyai dampak yang kuat akibat tumbukan yang menghasilkan gelombang plastis secara tiba-tiba.

Namun pada *foamed concrete* tidak akan terjadi pecahan yang melayang/terlempar (*spalling*) diakibatkan oleh rambatan gelombang plastis (tarik) yang dipantulkan dari semua arah luas permukaan *foamed concrete*. Gelombang yang dipantulkan sebagai gelombang tarik yang merambat dari luas permukaan target akan dikendalikan oleh dinding berpori (sel pori) pada *foamed concrete*.

Sifat getas *foamed concrete* tidak dapat diabaikan sehingga menyebabkan beton ini, dikategorikan sebagai

material dengan *strain-hardening* yang menurun, yaitu Modulus Tangensial (Modulus Elastisitas) berkurang ketika regangan meningkat. Selain itu, tegangan yang lebih tinggi yang dibawa oleh gelombang tegangan tekan plastis dengan arah longitudinal akan menyebarkan kecepatan yang lebih rendah sehingga gelombang plastis akan tersebar merata.

BAB 3

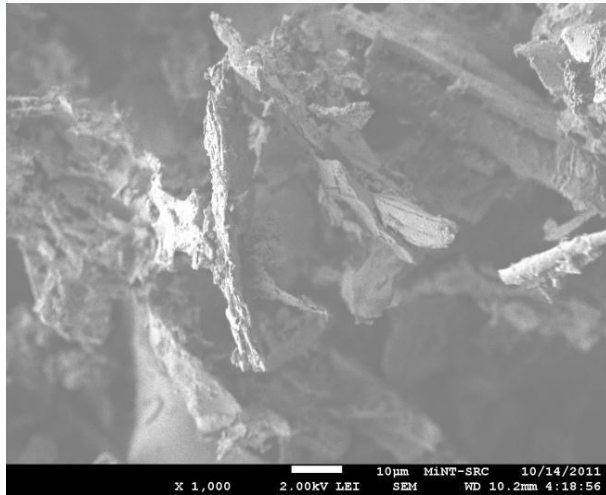
KOMPONEN, TAHAPAN DAN TATA CARA MODIFIKASI FOAMED CONCRETE

A. RHA Sebagai Pengganti Pasir

Asumsi penggantian agregat halus di dalam *foamed concrete* oleh RHA adalah karena kemampuan butiran ini dalam mengisi porositas di dalam matriks *foamed concrete*. Selain itu, porositas butiran RHA tidak menghilangkan sifat poros secara total dalam *foamed concrete*. Gambar 3.1 menunjukkan produksi sekam padi dengan pembakaran yang tidak terkendali pada suhu $\pm 700^{\circ}\text{C}$ selama ± 6 jam, sedangkan Gambar 3.2 menunjukkan hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap porositas dari butiran RHA (Hadipramana, et. al, 2014).



Gambar 3.1 RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ dalam waktu ± 6 jam



Gambar 3.2 RHA dibakar tanpa kendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ dalam waktu ± 6 jam di bawah pembesaran 1000 kali.

Beberapa penelitian menunjukkan pengaruh yang signifikan dari perbedaan suhu pembakaran terhadap kualitas akhir RHA (Odler, 2000). Sebagian besar hasil pembakaran sekam padi di pabrian juga telah memproduksi RHA pada pembakaran dengan temperatur yang tidak dikendalikan (*uncontrolled burning*). Pembakaran sekam padi dilaksanakan oleh pabrik hanya sebagai bahan bakar untuk menghasilkan tenaga dalam menjalankan mesin. Namun, pembakaran yang terjadi biasanya terjadi pada temperatur dan waktu yang relatif konstan, karena sekam padi akan menghasilkan panas pada suhu rata-rata dan habis menjadi abu dalam jangka waktu tertentu. Namun demikian proses ini tidak mempengaruhi unsur-unsur yang terjadi pada RHA.

Tabel 3.1 menunjukkan perbandingan komposisi dari RHA pada pembakaran yang tidak dikendalikan dengan rata-rata $\pm 700^{\circ}\text{C}$ selama ± 6 jam dengan hasil pembakaran sekam padi yang dikontrol dan diperoleh dari Hasil X-Ray Fluorescence (XRF) dari hasil penelitian sebelumnya.

(Ramezianpour et al., 2009; Al-khalaf & Yousift, 1984). Hasil XRF menunjukkan bahwa Silika (SiO_2) adalah unsur yang dominan dalam RHA baik dari pembakaran yang dikontrol maupun tidak dikontrol. Kehadiran silika dalam campuran mortar semen mempunyai kegunaan untuk reaksi hidrasi semen dan menyebabkan beton mengeras (Zhang, et al., 1996).

Tabel 3.1
Komposisi Kimia RHA

Elemen	Konsentrasi (%)		
	Investigasi Saat Pembakaran yang tidak terkendali $\pm 700^{\circ}\text{C}$ selama ± 6 jam.	Ramezianpour, et., al. (2009) 700°C selama 90 menit	Ramezianpour, et., al. (2009) 750°C selama 30 menit
CO_2	0,10	-	-
SiO_2	89,90	92.19	84.22
K_2O	4.50	1.64	1.35
P_2O_5	2.45	0,41	0,61
CaO	1.01	0,71	0,54
TiO_2	-	0,01	0,02
MgO	0,79	0,41	0,38
Na_2O	-	0,05	0,06
Fe_2O_3	0,47	0,10	0,18
Al_2O_3	0,46	0,09	0,09
MnO	0.14	-	-
SO_3	-	0,09	0,17
LOI*	0.3	4.14	12.09

*Kehilangan sewaktu pembakaran

B. Proporsi Campuran

Komposisi *foamed concrete* mengandung larutan pembentuk busa (*foam agent*), semen *Ordinary Portland Cement* (OPC), dan pasir alam yang lolos saringan 5,0 mm

(BS-EN882-1992, 1992). Dalam membuat *foamed concrete* dan FCRHA menggunakan metode *pre-foaming*, yaitu sebuah metode, dimana pembuatan mortar dan pembuatan busa dilakukan terpisah. Pertama adalah membuat campuran mortar dan kedua, busa yang telah dibuat secara terpisah dimasukkan ke dalam mortar.

Perlu ditekankan, bahwa *foamed concrete* dibuat sebagai kontrol penelitian dan sebagai pembanding untuk FCRHA nantinya. Maka pembuatan *foamed concrete* dan FCRHA dilakukan secara terpisah namun tetap menggunakan metode yang sama. Pada dasarnya pembuatan *foamed concrete* maupun FCRHA adalah sama dengan membuat campuran mortar beton biasa (seperti pada Gambar 3.3) hanya pada *foamed concrete* dan FCRHA ditambahkan larutan busa khusus.



Gambar 3.3 Proses pencampuran mortar *foamed concrete* dan FCRHA

1. Desain Pembuatan Busa

Bahan dasar busa untuk mortar *foamed concrete* adalah *foam agent* yang dicampur dengan air dan *foam agent* dapat diperoleh di pasaran. *Foam agent* adalah larutan yang dapat menghasilkan sejumlah besar

gelembung dengan menangkap udara ke dalam surfaktan dan menjadikan tegangan permukaan cairnya menjadi lebih stabil. Dalam penelitian ini, untuk menghasilkan busa yang stabil digunakan metode berbuisa kering (*dry foaming method*), yaitu mencampur *foam agent* dan air dengan perbandingan 1:20 (data seperti dalam Tabel 3.2) ke dalam tabung tertutup dalam hal ini adalah tabung generator (seperti dalam Gambar 3.4) yang kedua bahan ini akan menghasilkan larutan pra-berbuisa. Selanjutnya ketika *foam agent* melarut dengan air dalam tabung generator, pada saat yang sama tekanan udara dimasukkan ke dalam tabung generator. Tekanan udara memaksa larutan surfaktan mengembang dan menebal serta menghasilkan buih/gelembung di dalam surfaktan. Setelah mencapai ukuran diameter gelembung buih kurang dari 1 mm dan sangat stabil, maka dicampurkan ke dalam campuran mortar.

Sebagai catatan, busa harus benar-benar stabil (Gambar 3.5), yaitu tidak banyak mengandung air, karena bila banyak mengandung air, maka busa yang dihasilkan akan sedikit dan campuran beton menjadi cair karena kelebihan air. Begitu juga, pada busa sebaiknya tidak terlalu kering, karena bila terlalu kering, busa akan kekurangan keplastisitasan dan cepat pecah ketika dicampurkan pada mortar. Untuk itu, guna menghasilkan busa yang stabil, dilakukan dengan cara *trial-error*, bila buih busa keluar dari tabung generator masih banyak mengandung air, perlu menambahkan tekanan udara dan bila terlalu kering terpaksa harus menunggu beberapa saat. Sebagai acuan dalam penelitian ini, stabilitas campuran surfaktan dihitung pada perhitungan desain dengan nilai 50 kg/m^3 , dimana angka ini telah diuji dengan nilai perbandingan jumlah aktual campuran

pada penelitian sebelumnya. (M. R. Jones & Mccarthy, 2005; 2006; Hadipramana, et. al.,2012).



Gambar 3.4 Generator pembuat busa



Gambar 3.5 Busa yang dihasilkan dari generator busa

2. Desain Campuran Untuk Pelat FCRHA

Langkah pertama yang dilakukan adalah menyiapkan campuran dasar mortar yang mengandung semen, pasir, air, dan RHA. Sedangkan pembuatan busa dibuat secara terpisah dengan campuran mortar. Perbandingan

dan rasio semua bahan ditampilkan dalam Tabel 3.2 Langkah kedua, busa dicampurkan secara menyeluruh ke dalam campuran dasar/mortar FCRHA untuk mencapai kepadatan (densitas) basah $2502,8 \text{ kg/m}^3$.

Walaupun densitas basah mempunyai nilai seperti beton konvensional, kepadatan FCRHA berkurang sebesar 27,92% setelah ditambahkan busa dan mengeras/kering pada umur 28 hari, sehingga mengurangi densitas FCRHA kering menjadi $\pm 1800 \text{ kg/m}^3$ dan merupakan kepadatan target yang diperlukan. Penting untuk dicatat bahwa densitas basah mempunyai nilai yang tinggi diatas 1800 kg/m^3 , dikarenakan penyerapan air yang tinggi dari RHA, dan rasio air/RHA adalah 1,25 seperti disajikan dalam Tabel 5.

3. Desain Campuran Foamed Concrete

Sedangkan untuk membuat *foamed concrete* tanpa RHA sebagai kontrol penelitian, maka densitas campuran mortar sebesar 2022 Kg/m^3 . Densitas ini lebih tinggi dari densitas target karena berpotensi mengalami reduksi sebesar 10,68% pada umur 28 hari setelah penambahan busa dan pengeringan. Proporsi campuran yang digunakan dalam memproduksi pelat polos *foamed concrete* tertuang dalam Tabel 3.2

Tabel 3.2

Rasio Bahan Penyusun Untuk Menghasilkan FCRHA dan *Foamed Concrete*.

Densitas dan proporsi campuran	FCRHA	<i>Foamed Concrete</i>
Densitas Target (Kering)	1800 Kg/m ³	1800 Kg/m ³
Densitas Target (Basah)	2502.8 Kg/m ³	2022 Kg/m ³
Rasio bahan <i>foam agent</i> /air	1:20	1:20
Rasio air/semen	0.6	0.6
Air / RHA	1.25	-
Rasio semen/pasir/RHA	1:3:1	-
Rasio semen/pasir	-	1:4
Pengurangan densitas dari basah ke kering	10,9%	40,43%
Perawatan (<i>curing</i>)	28 hari	28 hari

C. Dimensi Pelat Polos (*Plain Plate Dimension*)

Agar memenuhi kriteria yang diharapkan dalam tujuan penelitian ini, yaitu untuk menentukan kedalaman penetrasi oleh obyek penumbuk dan pengamatan perilaku spesimen yang terkena tumbuka, maka untuk itu perlu ditentukan ketebalan dan luas area pelat spesimen baik untuk *foamed concrete* maupun FCRHA.

1. Ketebalan Pelat Spesimen

Tiga kecepatan tumbukan yang berbeda diterapkan pada pelat (*plain plate*) *foamed concrete* dan FCRHA adalah 9,9 m/det, 8,8 m/det dan 7,7 m/det. Selain itu, ketebalan target pelat dirancang untuk menghindari *scabbing*, perforasi, dan semua kemungkinan kegagalan deformasi. Hal ini terkait dengan fungsi energi tumbukan berdimensi, I dan tak-berdimensi, h/d (Li & Chen, 2003) di mana h dan d masing-masing adalah ketebalan target dan diameter penumbuk. Ketebalan pelat target diharapkan lebih besar dari kedalaman penetrasi (Hughes, 1984), di mana kedalaman penetrasi dihitung berdasarkan rumus non-dimensi:

$$(X_f/d) = 0.19.k.(I/S) \quad (3.1)$$

Dimana, X_f adalah kedalaman penetrasi penumbuk, k adalah koefisien bentuk ujung penumbuk, dimana dalam penelitian ini penumbuk berbentuk bola dan besarnya dalam penelitian ini adalah 1,26, dan S adalah faktor laju regangan (*strain rate*) yang ditentukan melalui persamaan berikut:

$$S = 1 + 12,3 (\ln(1 + 0,03.I)) \quad (3.2)$$

Dimana I adalah fungsi energi tumbukan yang ditentukan dengan:

$$I = (m.v^2) / (fc'. d^3) \quad (3.3)$$

Dimana m dan v masing-masing adalah massa dan kecepatan penumbuk. Kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari gaya gravitasi sehingga diturunkan dari hukum kekekalan energy, yaitu energi kinetik penumbuk yang dijatuhkan sama dengan energi potensialnya, sehingga menghasilkan persamaan berikut:

$$v = \sqrt{(2.g.H)} \quad (3.4)$$

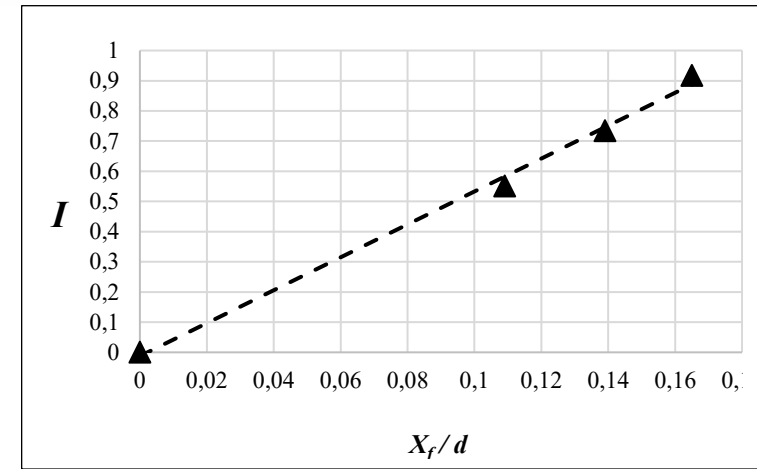
Dimana g adalah gravitasi konstan sebesar, 9,81 m/det, dan H adalah ketinggian penumbuk saat dijatuhkan.

Fungsi kedalaman penetrasi non-dimensi dari X_f/d diturunkan dari Persamaan (3.1) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 sedangkan fungsi energi tumbukan non-dimensi, I , diperoleh dari Persamaan (3.3). Jika diameter penumbuk (d) adalah 218 mm dan kecepatan tumbukan (v) adalah 9,9 m/det, 8,8 m/det, dan 7,7 m/det, maka penting untuk dicatat bahwa X_f digunakan sebagai acuan untuk merancang tebal pelat seperti yang disajikan pada Gambar 3.6.

Tabel 3.3

Kedalaman penetrasi non-dimensi berfungsi sebagai acuan ketebalan pelat.

Kecepatan, v (m/det)	I	S	$\frac{X_f}{d}$
9.9	0,917870	1.3351115	0.165
8.8	0,734296	1.268140	0.139
7.7	0,550722	1.2015560	0.109



Gambar 3.6 Hubungan antara I dan X_f/d sebagai acuan ketebalan desain.

Untuk mencegah *scabbing* dan perforasi maka ketebalan pelat target diharapkan lebih besar dari h_s/d dan h_p/d (Hughes, 1984) seperti yang ditunjukkan pada hubungan berikut:

$$(h_s/d) = 1,74. (X_f/d) + 2,3 \quad (3.5)$$

Dimana h_s adalah ketebalan target untuk mencegah *scabbing*, dan

$$(h_p/d) = 1,58. (X_f/d) + 1,4 \quad (3.6)$$

Dimana h_p adalah ketebalan target untuk mencegah perforasi. Dari hasil perhitungan X_f/d pada setiap kecepatan yang tertuang dalam Tabel 6, maka untuk perhitungan Persamaan (3.5) dan (3.6) cukup menggunakan kecepatan yang tertinggi yaitu kecepatan 9,9 m/det. Selanjutnya perhitungan dinyatakan

$$(h_s/d) = 1,74 \cdot (0,165) + 2,3 = 2,59 \quad (3.7)$$

dan

$$(h_p/d) = 1,58 \cdot (0,165) + 1,4 = 1,66 \quad (3.8)$$

Diameter penumbuk yang digunakan dalam penelitian ini adalah 218 mm, maka nilai h_s untuk mencegah *scabbing* adalah dari perhitungan Persamaan (3.7) didapatkan ketebalan sebesar 545mm.

Sedangkan besarnya h_p untuk mencegah perforasi dari persamaan (3.8) adalah sebesar 362mm. Hal ini berarti nilai-nilai ini perlu dipenuhi untuk mencegah *scabbing* dan perforasi.

Untuk mendesain ketebalan pelat yang akan dijadikan specimen yang akan diberikan beban tumbukan, dihitung berdasarkan kepada nilai X_f/d pada Gambar 17, tetapi nilai X_f/d harus lebih kecil dari nilai h_s/d atau h_p/d (Persamaan 3.7 dan 3.8) dan dipilih mana yang lebih tinggi, maka dalam hal ini yang tertinggi adalah h_s/d yaitu 2,59. Selanjutnya perhitungan ketebalan pelat adalah: $X_f/d = 0,75$ maka desain ketebalan adalah $0,75 \times 218 \text{ mm} = 160 \text{ mm}$. Nilai $X_f/d = 1,25$ didapat ketebalan 270 mm juga $X_f/d = 1,75$ bernilai ketebalan 380 mm, dan $X_f/d = 2,25$ sehingga ketebalan pelat 490 mm.

Dari perhitungan tersebut didapat 4 (empat) ketebalan pelat specimen baik untuk *foamed concrete* maupun FCRHA yaitu, 160 mm, 270 mm, 380 mm dan 490 mm, seperti dalam Tabel 3.4, berikut jumlah specimen yang diperlukan dalam percobaan tumbukan. Ketebalan ini memang tidak umum bagi ketebalan sebuah pelat beton, dan lebih cocok disebut sebagai sebuah slab, namun terlepas dari sebutan apakah pelat atau slab, dalam eksperimen ini didesain sedemikian rupa untuk

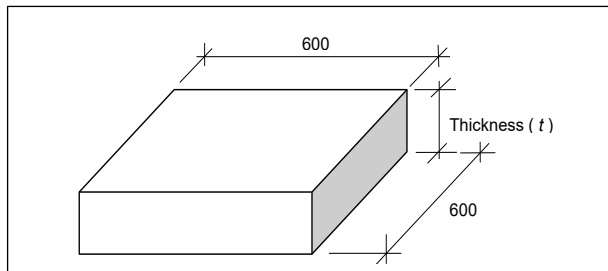
menghindari *scabbing* dan perforasi akibat beban tumbukan dengan kecepatan sedang. Dalam penelitian ini yang diperlukan adalah untuk mengetahui dan menghitung kedalaman penetrasi dengan kecepatan sedang sebuah penumbuk yang mempunyai diameter yang relatif lebar/besar.

Tabel 3.4
Ketebalan dan jumlah pelat specimen.

Pelat Specimen	Densitas (Kg/ m ³)	Ketebalan (mm)	Jumlah specimen setiap kecepatan tumbukan (9.9, 8.9 and 7.7 m/det)
<i>Foamed concrete</i>	1800	490	3
		380	3
		270	3
		160	3
FCRHA	1800	490	3
		380	3
		270	3
		160	3
		270	3
		160	3

2. Luas Area Pelat Spesimen

Luas area permukaan pelat dalam penelitian ini dibuat cukup lebar, karena untuk menghindari retak *distal* maupun patah keseluruhan pelat. Maka luas permukaan pelat dibuat berbentuk persegi sama sisi yaitu 600mm x 600mm, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.7



Gambar 3.7 Luas area pelat spesimen foamed concrete dan FCRHA.

D. Perawatan

Berdasarkan ASTM (C31/C31M, 2001) semua specimen dicetak dalam cetakan yang sudah disediakan. Kemudian spesimen dikeluarkan dari cetakan setelah berumur satu hari dan masuk dalam masa perawatan (*curing*) selama 28 hari. Karena spesimen cukup besar maka perawatan yang dilakukan dengan menutupi oleh kain basah (goni) seperti diperlihatkan pada Gambar 3.9 dan disiram air setiap hari agar tetap lembab sehingga proses hidrasi pada semen tetap berlanjut dan menghindari terjadinya penyusutan (*shrinkage*).



Gambar 3.8 Foamed concrete dicetak dengan ukuran sesuai dengan desain



Gambar 3.9 Proses perawatan (*curing*).

E. Uji Sifat kekuatan FCRHA

1. Kuat Tekanan, Elastisitas, Modulus dan Rasio Poisson

Sifat mekanik beton yang penting adalah kekuatan tekanan dan diuji dalam penelitian ini melalui penerapan beban uniaksial pada benda uji kubus berukuran 100mm x 100mm x 100mm sesuai dengan standar (BS-EN-123390-3, 2009). Dalam pengujian kekuatan tekan beton dengan menggunakan *Unit Testing Machine*, beban yang diterapkan pada spesimen *foamed concrete* dan FCRHA

dilakukan dari awal pembebanan secara berlanjut tanpa ada tekanan kejut dan terus ditingkatkan pada tingkat beban konstan 10% sampai tidak mungkin untuk menahan beban yang lebih besar. Tingkat tegangan konstan yang digunakan dalam uji tekan ini adalah $0,6 \text{ N/mm}^2$.det dan beban tidak melebihi 30% dari bebankeruntuhan. Selain itu, uji kuat tekan juga digunakan untuk menentukan Modulus Elastisitas dan rasio Poisson dan hasilnya secara otomatis direkam dalam perangkat lunak pada komputer khusus pada mesin uji tekan, seperti yang disajikan dalam Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pengujian Kekuatan Tekan dengan menghasilkan nilai Modulus Elastisitas dan rasio Poisson dengan komputerisasi

2. Kekuatan Tarik belah (Splitting Tensile Strength)

Pengujian ini dilakukan pada silinder yang dirancang dengan diameter 150mm dan panjang 300mm dan menggunakan Mesin Kompresi 3000kN. Laju tegangan konstan diterapkan pada $0,05 \text{ N/mm}^2$.det dan laju pembebanan konstan diterapkan secara bertahap hingga momen kegagalan. Penting untuk dicatat bahwa beban awal diterapkan pada spesimen adalah tanpa ada tekanan kejut dan beban tambahan yang tidak melebihi sekitar 20% dari beban kegagalan. Perlu untuk

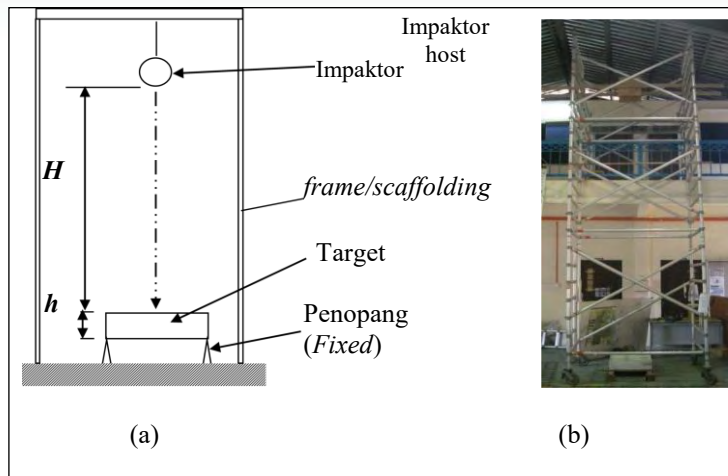
diperhatikan bahwa laju pembebanan dan tegangan tarik belah dihitung berdasarkan standar (BS-EN 12390-6, 2009). Pengujian tarik belah di sajikan dalam Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Pengujian Tarik Belah

F. Uji Tumbukan

Metode tumbukan untuk penelitian ini dilaksanakan dengan metode jatuh bebas melalui menara seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.12. Obyek penumbuk dilepaskan pada ketinggian yang sudah ditentukan melalui menara yang dipasang dan target pelat beton diletakkan tepat di posisi tengah di bawah menara. Metode ini pernah digunakan oleh peneliti sebelumnya dan menghasilkan hasil yang cukup presisi (Ando, et. al, 2000; May, et. al, 2005; Toyota, et. al., 2006).



Gambar 3.12 (a) Diagram skematik uji benturan/tumbukan berat jatuh di mana H adalah tinggi jatuh dan h adalah ketebalan target pelat polos, (b) Menara tumbukan berat jatuh eksperimental.

Kecepatan tumbukan yang digunakan dalam percobaan ini adalah 9,9 m/det, 8,9 m/det, dan 7,7 m/det dan dihitung menggunakan Persamaan (3.4) dengan menjatuhkan obyek penumbuk, dari ketinggian masing-masing 5m, 4m, dan 3m. Obyek penumbuk berbentuk bola kaku atau digunakan sebagai model untuk mewakili penumbuk proyektil berujung tumpul seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.13. Bola ini terbuat dari urethane dan komposit polimer dengan berat 5,9 kg, diameter 218mm, dan kepadatan 1106 kg/m³. Bentuk bola digunakan karena tidak memiliki masalah dengan gerakan berputar (*gyration*), dimana pun permukaan penumbuk yang menyentuh target akan sama ketika penumbuk bergerak berputar disudut mana pun saat dijatuhkan.



Gambar 3.13 Model obyek penumbuk berbentuk bola yang tidak dapat berdeformasi yang mewakili penumbuk tumpul yang digunakan dalam penyelidikan ini.

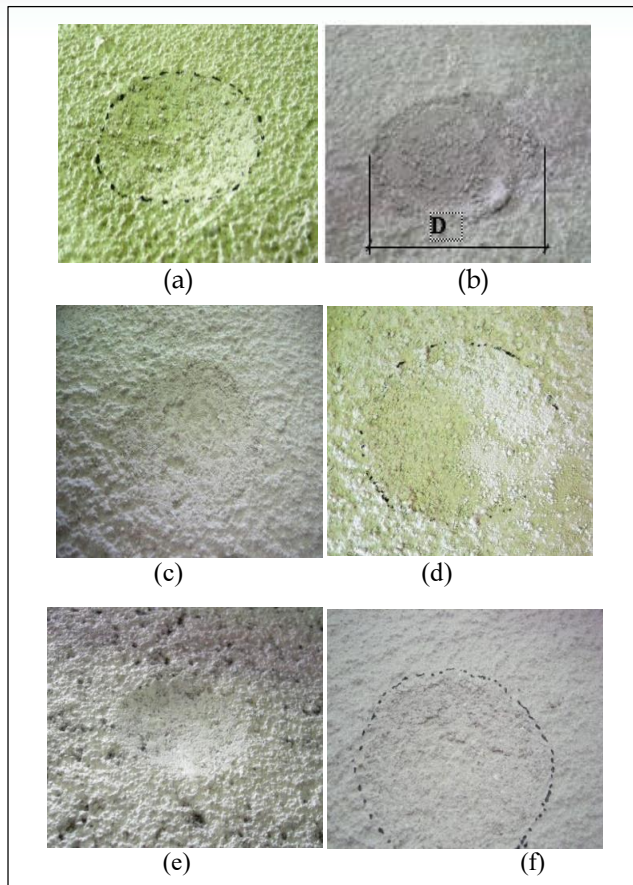
BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN MODIFIKASI FOAMED CONCRETE

A. Kerusakan Lokal

Kerusakan lokal yang terjadi dengan indikasi bahwa permukaan pelat membentuk sebuah cekungan kawah sesuai dengan permukaan penumbuk yang berbentuk bola seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Retak radial terjadi ketika penumbuk dijatuhkan ke permukaan pelat dan terlihat samar-samar di tepi/pinggir cekungan kawah. Hasil ini tidak menghasilkan retakan lebih lanjut atau retak muka distal menjauh dari batas cekungan. Hasil observasi dari eksperimen tumbukan menyimpulkan bahwa kedua material baik *foamed concrete* maupun FCRHA tidak menghasilkan fenomena *spalling*, meskipun ada beberapa spesimen terjadi kerusakan lokal yang menghasilkan seperti pecahan, namun tidak mengakibatkan pecahan tersebut terlempar (*spalling*).

Dalam eksperimen ini, pecahan-pecahan terlihat berada di dalam cekungan kawah yang diakibatkan oleh mekanisme kehancuran material yang rapuh atau mekanisme runtuhnya sel pori. Dengan memperhitungkan kejadian efek *spalling*, ternyata pecahan-pecahan ini terjadi karena material target mempunyai parameter regangan (*strain*) yang rendah dan kerapatan yang rendah pada dinding pori *foamed concrete* (Gibson & Ashby, 2014).



Gambar 4.1 Cekungan (crater) yang terbentuk (diameter D) pada permukaan FCRHA (a, c, e) dan foamed concrete (b, d, f) akibat 9,9 m/det (a, b), 8,9 m/det (c, d), dan 7,7 m/det (e, f) kecepatan beban tumbukan.

Sebagai bahan perbandingan, pada beton konvensional yang mendapatkan beban tumbukan, hasilnya sangat berbeda dengan hasil penelitian ini, dimana temuan penelitian sebelumnya pada beton konvensional menunjukkan adanya *spalling* yaitu terpantau pecahan yang signifikan dengan ukuran relatif besar terlempar jauh dari permukaan target beton konvensional akibat benturan (Zhang, et. al., 2005), dalam hal ini kecepatan benturan yang diterapkan pada beton konvensional cukup tinggi, tentu saja bilamana diberikan kecepatan benturan 9,9 m/det pada beton konvensional kemungkinan tidak akan cukup memberikan efek kerusakan lokal yang signifikan.

Namun perbandingan ini cukup memberikan gambaran yang seimbang karena densitas dan kekuatan beton konvensional jauh lebih tinggi daripada *foamed concrete*, sehingga diperlukan kecepatan tumbukan yang menghasilkan gelombang tekan plastis untuk memberikan efek *spalling*, maka hal ini harus menggunakan kecepatan yang cukup tinggi pada beton konvensional. Tapi justru sebaliknya, bilamana *foamed concrete* diberikan beban tumbukan dengan kecepatan tinggi, maka hasilnya akan membentuk sebuah lubang pada beton *foamed concrete* (Zaidi & Li, 2009) karena gelombang tekan plastis pada *foamed concrete* akan diserap oleh pori-pori.

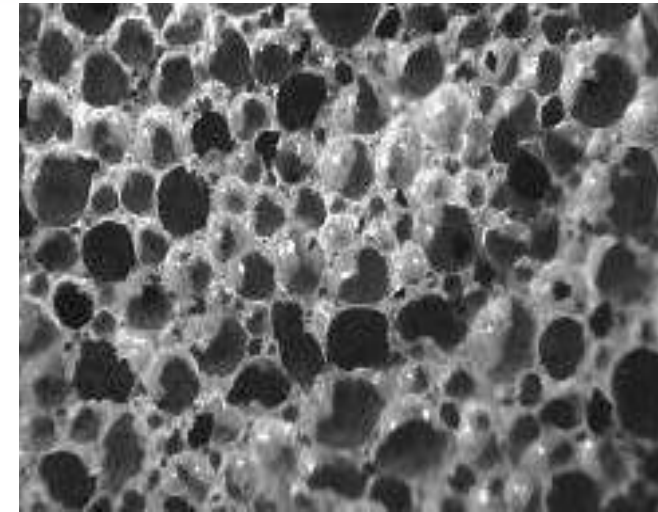
Untuk itu, analisis dari tiga kecepatan tumbukan yang berbeda menunjukkan 9,9 m/det menghasilkan lebih sedikit pecahan pada FCRHA seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1a dibandingkan *foamed concrete* pada Gambar 4.1b. Sementara itu, pecahan tidak dihasilkan di FCRHA pada kecepatan 8,9 m/det seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1c dibandingkan dengan *foamed concrete* pada Gambar 4.1d, sedangkan kecepatan tumbukan 7,7 m/det tidak menghasilkan

pecahan pada kedua bahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1e untuk FCRHA dan 4.1f untuk *foamed concrete*, karena kurangnya energi tumbukan pada target (Roderick & Zheng, 2013).

B. Mekanisme Deformasi Dinding *Foamed concrete* yang Berpori

Seperti yang telah di bahas dalam Bab 2 sebagai landasan teori penelitian, terkait mekanisme deformasi pada material berpori maka kerusakan lokal yang terjadi pada pelat target *foamed concrete* sangat berhubungan dengan mekanisme deformasi dinding poros pada *foamed concrete*. Gelombang tekan yang dihasilkan oleh pembebanan tumbukan akan merambat di dalam tubuh pelat *foamed concrete* dan harus berhadapan dengan porositas matriks pelat. Penyerapan energi dan densifikasi (pemadatan) akibat tumbukan pada pelat target yang berongga dalam struktur *foamed concrete* diyakini memiliki kemampuan untuk menyerap banyak energi tumbukan (Zaidi & Li, 2009) disebabkan struktur *foamed concrete* mempunyai struktur material berbusa (*honey comb effect*) seperti terlihat pada Gambar 4.2. Hal ini serupa terjadi pada material berbusa lainnya berbahan polimer yang dibebani beban benturan dengan tegangan tekan yang cepat (Gibson & Ashby, 2014).

Ketika penumbuk mulai menyentuh pelat target *foamed concrete*, maka setelah itu tumbukan menghasilkan gelombang elastis tekan yang membentuk daerah elastis linier di dalam kurva tegangan-regangan. Pada percobaan ini maka tegangan tekan yang dihasilkan oleh pembebanan tumbukan memiliki dua arah yaitu transversal dan longitudinal.

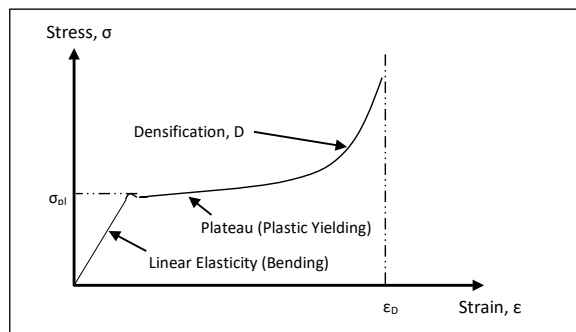


Gambar 4.2 Struktur matriks *foamed concrete* dengan FAS 0,6 dengan pandangan yang diperbesar 10 kali.

Pertama, ketika pembebanan tumbukan diterapkan pada target permukaan, gelombang elastis tekan merambat ke arah transversal (sepanjang badan target arah horizontal) hingga mencapai permukaan distal (terjauh dari titik awal tumbukan) setelah itu dipantulkan kembali menjadi gelombang tegangan tarik. Gelombang tarik yang terjadi adalah refleksi gelombang tekan akibat tumbukan. Perlu dicatat bahwa pada pelat target yang getas seperti beton atau keramik bila diberikan beban tumbukan dengan tegangan rendah sekalipun, akan menghasilkan patahan disekitar titik tumbukan bahkan menghasilkan beberapa bagian material pada lapisan permukaan di sekitar titik tumbukan akan terlempar melalui konsep *spalling* (Beppu, et. al., 2008; Lu & Yu, 2003).

Kedua, gelombang tegangan tekan juga merambat melalui permukaan belakang target pelat dalam arah longitudinal (tegak lurus pelat target / searah dengan

arah tumbukan ke bawah). Porositas *foamed concrete* menghambat gelombang tegangan tekan sebelum mencapai bagian bawah target pelat dan meregangkan dinding berpori *foamed concrete*. Selain itu, dinding berpori yang dikompresi akan menahan tekanan kompresi tersebut dengan tegangan dinding semua pori-pori yang mendapatkan tekanan dan saling menguatkan antara pori yang satu dengan pori-pori yang lain disekitarnya, sampai kondisi semua dinding pori-pori yang mendapatkan tekanan hampir runtuh dan ini menyebabkan regangannya meningkat, sehingga menciptakan daerah *plateau* dalam kurva tegangan--regangan pada Gambar 4.3.

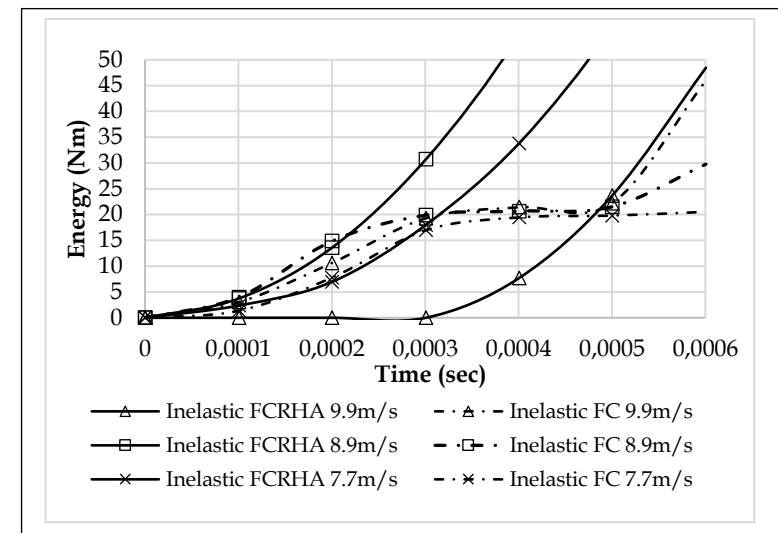


Gambar 4.3 Skema tegangan-regangan tekan untuk kondisi elastis- plastis dinding sel material busa.

Ketika kondisi keruntuhan tercapai, maka hal ini menyebabkan 'peremukan getas' (hancurnya porositas/busa dari material getas akibat tekanan) yang mengarah pada pengurangan regangan dan kompresi permukaan target menjadi padat (mengalami densifikasi). Selanjutnya, peningkatan tegangan akan cepat dicapai di wilayah akhir sehingga peningkatan kerapatan relatif *foamed concrete* menyebabkan peningkatan Modulus Young, di mana tegangan meningkat setelah

daerah *plateau* dan mengurangi regangan, hal ini sampa di wilayah densifikasi (Gibson & Ashby, 2014). regangan seperti dalam kurva tegangan-regangan pada Gambar 4.3

Hal ini berarti peningkatan regangan dinding berpori memiliki kemampuan untuk meningkatkan daerah plastis sehingga menyebabkan gaya tarik *foamed concrete* lebih tinggi dari pada gelombang tarik refleksi baik dalam arah longitudinal maupun transversal. Pada Gambar 4.4 ditunjukan bahwa FCRHA mencapai densifikasi lebih cepat daripada *foamed concrete*, karena dinding berporinya lebih 'padat' akibat butiran-butiran RHA yang mengisi lobang-lubang porositas, pada struktur FCRHA.



Gambar 4.4 Energi Plastik yang bekerja pada foamed concrete dan FCRHA.

Pengurangan energi kinetik dengan cepat berhubungan dengan peningkatan energi inelastis dan elastis. Jadi, energi kinetik diubah menjadi keadaan energi tersebut. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa energi inelastis lebih besar dari energi elastis. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyimpulkan

bahwa energi inelastis (plastis) lebih besar dari energi elastis, ketika kondisi tumbukan menghasilkan tegangan plastis (Hutching, 1979; Wu, et al., 2005).

C. Diameter Cekungan Kawah

Disebabkan bentuk obyek penumbuk berbentuk bola, maka hasil tumbukan berupa cekungan kawah berbentuk lingkaran seperti pada Gambar 4.5. Besarnya diameter cekungan kawah yang dihasilkan oleh beban tumbukan oleh obyek penumbuk menunjukkan reaksi kekuatan pelat.

Kecepatan benturan yang diterapkan dalam eksperimen bukan merupakan kecepatan tumbukan yang tinggi, maka pelat *foamed concrete* dan FCRHA masih dapat menahan energi tumbukan. Kemungkinan bila kecepatan tumbukan tinggi dan diameter obyek penumbuk sangat besar maka, pelat akan mengalami deformasi keseluruhan atau patah/hancur.



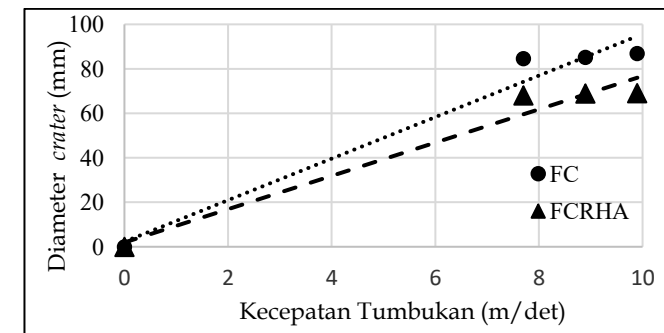
Gambar 4.5 Pengukuran diameter dan kedalaman cekungan kawah

Gambar 4.5 menunjukkan hasil pengukuran diameter cekungan kawah antara *foamed concrete* dan FCRHA pada setiap kecepatan tumbukan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kedua material mempunyai kecenderungan yang sama dalam merespon

beban tumbukan pada semua kecepatan, kecuali besarnya diameter yang dihasilkan.

Hal ini dapat disimpulkan bahwa diameter kawah yang diamati berbanding lurus dengan kecepatan tumbukan (Gambar 4.6). Ini berarti kedua bahan memiliki kinerja yang sama dalam menyerap energi tetapi mempunyai cara yang berbeda untuk mengubah dampak energi dan inilah alasan yang penting untuk menentukan ukuran diameter obyek penumbuk pada pelat. Selain itu, kerusakan lokal dipengaruhi oleh energi yang tidak mencukupi sebagaimana terlihat dari energi disipasi yang dihasilkan oleh kecepatan tumbukan yang rendah.

Sedangkan penggunaan energi tumbukan yang lebih besar pada kedua target memiliki kemampuan untuk menyebabkan retakan pada pelat tanpa adanya *spalling* (pecahan) dan *scabbing* (Roderick & Zheng, 2013) dan hal ini terkait dengan densifikasi pelat dan energi inelastis yang melebihi kapasitas material plastik. Ini berlaku untuk beton dan keramik termasuk *foamed concrete* dan FCRHA.



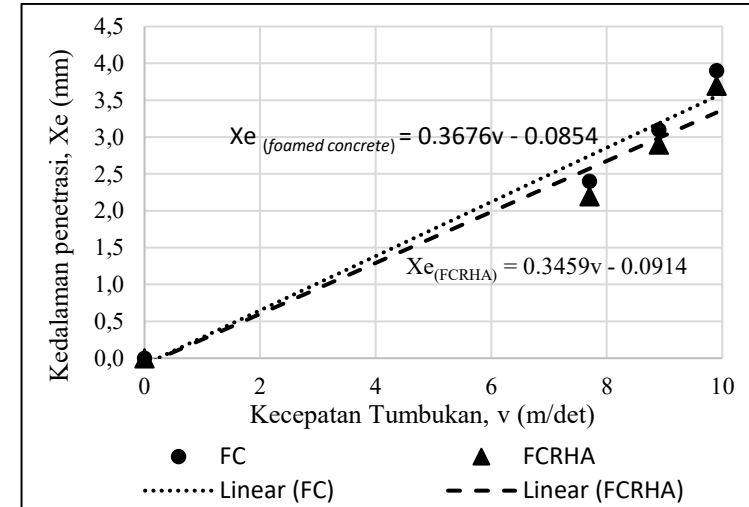
Gambar 4.6 Diameter kawah (D) untuk *foamed concrete* dan FCRHA dibuat berdasarkan kecepatan tumbukan.

D. Kedalaman Penetrasi Obyek Penumbuk pada FCRHA

Sebagian besar peneliti prihatin tentang pengaruh kuat tekan beton terhadap kedalaman penetrasi dan menjadikannya pembeda dalam hasil prediksi mereka. Sehingga mereka memberikan perhatian juga kepada fungsi kekuatan beton sebagai penentu kedalaman penetrasi (Kennedy, 1976; Haldar, et. al, 1999; Li et. al, 2005) dan ini membuat kekuatan beton menjadi faktor penting dalam memperkirakan kedalaman penetrasi hingga saat ini. Namun, *foamed concrete* diperkirakan akan mengalami kerusakan lokal lebih besar daripada beton konvensional ketika mengalami pembebanan tumbukan, karena faktanya *foamed concrete* adalah material berpori yang mendapat tekanan yang kuat.

Gambar 4.7 menunjukkan kedalaman penetrasi FCRHA sedikit lebih dangkal dari pada *foamed concrete* dan pengamatan lebih dekat menunjukkan kedalaman penetrasi kedua material memiliki sedikit perbedaan berdasarkan kecepatan tumbukan. Hal ini berarti FCRHA memiliki kemampuan menyerap energi kinetik pada tingkat yang sama dengan *foamed concrete* dan menunjukkan pencampuran RHA mempengaruhi dan meningkatkan kapasitas laju regangan dinding berpori terutama dengan penambahan butiran (Hadipramana, et. al., 2014).

Peningkatan kinerja ini menyebabkan FCRHA meningkatkan ketahanannya terhadap dampak kejut yang terkait dengan kekuatan tekan bahan berbusa (Zhang, et al., 2005) dan ini berarti peningkatan laju regangan dinding berpori yang pada akhirnya mempengaruhi tumbukannya, sehingga mengarah pada produksi pecahan yang lebih sedikit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1a.

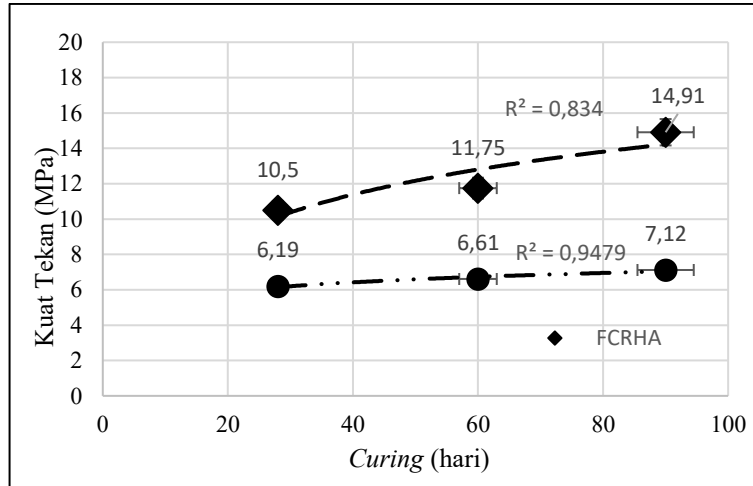


Gambar 4.7 Kedalaman penetrasi vs Kecepatan tumbukan.

Dari hasil eksperimen penelitian ini seperti pada Gambar 4.7, menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi baik pada *foamed concrete* maupun FCRHA pada densitas 1800 kg/m^3 mempunyai prediksi tergantung kepada kecepatan tumbukan.

1. Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan *foamed concrete* dan FCRHA seperti yang disajikan dalam Gambar 4.8, menunjukkan bahwa kekuatan FCRHA lebih tinggi daripada *foamed concrete*, hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kekuatan pada FCRHA yang melibatkan reaksi penggabungan semen dan silika yang terdapat dalam RHA. Indikasi ini dapat dilihat ketika FCRHA berumur lebih dari 28 hari yang menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan dari pada *foamed concrete*. Hal ini mengindikasikan bahwa pada FCRHA masih terjadi reaksi hidrasi dibandingkan dengan *foamed concrete*.



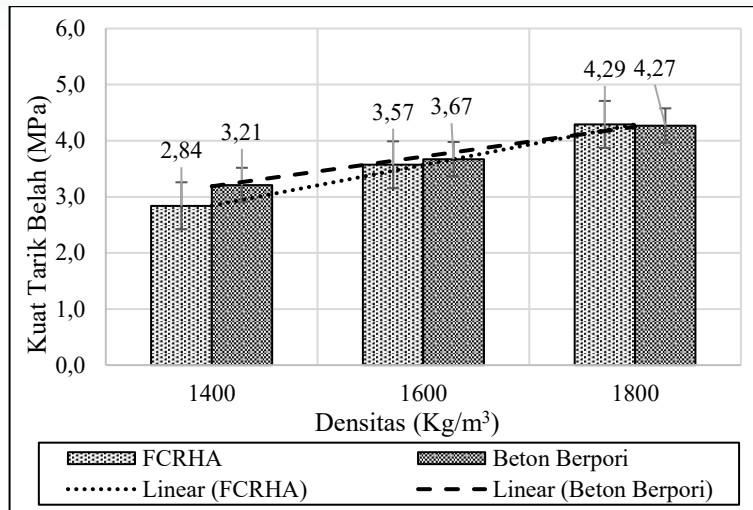
Gambar 4.8 Kekuatan Tekan *foamed concrete* dan FCRHA menurut umur.

Kekuatan beton yang meningkat ini dikontribusikan oleh sifat reaktif aditif pozzolan pada RHA dengan hasil reaksi hidrasi semen pasca umur 28 hari di dalam FCRHA. Seperti diketahui sebelumnya bahwa RHA mengandung Silikon Dioksida (SiO_2) dalam jumlah tinggi, selama proses hidrasi semen, reaksi pozzolan antara Silika dan Kalsium Hidroksida terus berlangsung. Kalsium Silikat Hidrat yang dihasilkan selama reaksi mengubah struktur mikro beton FCRHA menjadi lebih padat daripada tanpa RHA (Ramezaniapour, et. al., 2009). Reaksi akan terus terjadi ketika proses pembebasan Kalsium Hidroksida dalam hidrasi semen memiliki waktu yang cukup dan melibatkan rasio pozzolanic material yang tepat.

2. Kekuatan Tarik

Seperti halnya beton konvensional yang mempunyai kekuatan tarik yang rendah, maka begitupun dengan FCRHA yang mempunyai kekuatan tarik yang rendah. Namun hal ini normal karena beton kurang mempunyai kekuatan tarik yang besar seperti pada logam. Pada penelitian ini disajikan beberapa kekuatan tarik belah untuk FCRHA ataupun *foamed concrete* dengan beberapa densitas yang berbeda, hal ini untuk menunjukkan karakter kekuatan tarik juga sama dengan kekuatan tekan, dipengaruhi oleh densitasnya.

Gambar 4.9 menyajikan hasil pengujian kekuatan tarik belah pada FCRHA dan *foamed concrete* dengan densitas 1400 kg/m^3 , 1600 kg/m^3 dan 1800 kg/m^3 . Hasil pengujian baik FCRHA maupun *foamed concrete* menunjukkan semakin tinggi densitasnya maka kekuatan tarik belah semakin meningkat. Hal menarik disini ditampilkan bahwa kekuatan tarik tidak sama dengan kekuatan tekan pada FCRHA, dimana densitas 1400 kg/m^3 dan 1600 kg/m^3 pada FCRHA memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah daripada *foamed concrete*, namun mempunyai kekuatan yang relatif sama dengan densitas 1800 kg/m^3 . Hasil ini sejalan seperti yang penelitian sebelumnya (De Sensale, 2006), bahwa beton dengan RHA dapat meningkatkan kekuatannya, namun kekuatan tarik tidak dapat ditingkatkan.



Gambar 4.9 Kekuatan Tarik belah *foamed concrete* dan FCRHA berdasarkan densitas.

Fakta ini mengungkapkan bahwa kekuatan tarik menunjukkan regangan yang rendah pada FCRHA (maupun *foamed concrete*) yang memberikan efek pada tekanan tumbukan yang menghasilkan gelombang tarik pada struktur pelat ketika diberi beban tumbukan, dan dapat menyerap energi melalui deformasi dinding sel porinya.

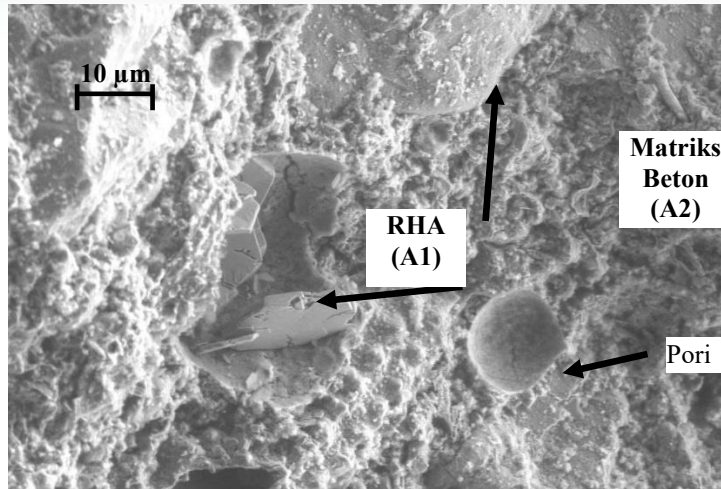
E. Pengaruh RHA pada kekuatan *foamed concrete*

RHA mengisi pori-pori dan membantu mengikat matriks semen sedemikian rupa sehingga keberadaan butiran menggantikan fungsi ruang berpori dari FCRHA (Hadipramana, et al., 2014). Ditemukan bahwa dinding berpori dari pelat *foamed concrete* yang mengalami pembebanan tumbukan menghasilkan regangan yang lebih tinggi sebagai respons langsung terhadap gelombang tekan.

Peningkatan regangan akhirnya mencapai titik daerah *plateau* dalam kurva tegangan-regangan dan

ternyata lebih besar daripada tegangan plastis tekan. Ini berlanjut hingga saat tegangan plastis meningkat dan regangan menurun dengan cepat. Fenomena tersebut didefinisikan berdasarkan runtuhnya dinding berpori yang menyebabkan pelepasan udara, sehingga membuat material menjadi lebih padat (Gibson & Ashby, 2014; Zaidi & Li, 2009).

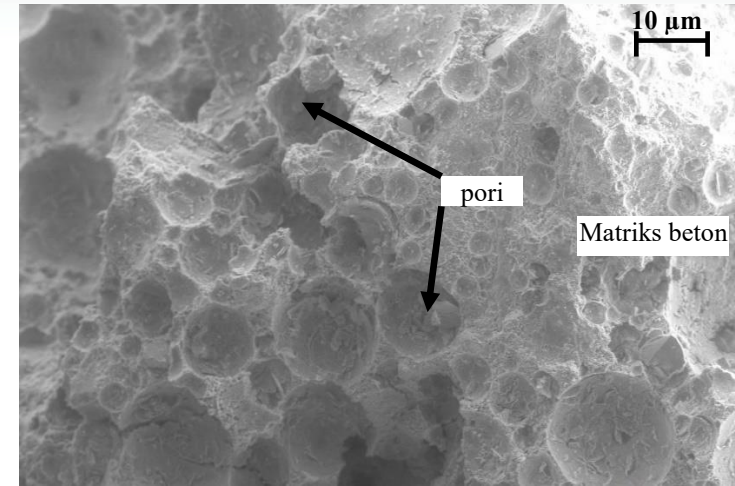
Apabila RHA ditambahkan ke dalam *foamed concrete* (FCRHA), maka keruntuhan strukturnya akan tertunda karena pori-pori *foamed concrete* diisi oleh RHA sehingga terjadi perubahan regangan dinding berpori. Elastisitas dinding berpori juga meningkat karena adanya butiran yang menahan dinding pori-pori sehingga meningkatkan plastisitasnya, selanjutnya pada fase pemadatan atau densifikasi lebih sedikit pecahan yang terjadi sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.9. Hal ini sejalan dengan pengamatan penelitian sebelumnya (Roderick & Zheng, 2013) bahwa pengurangan porositas *foamed concrete* menyebabkan penurunan lekukan dan fragmennya (pecahannya) ketika terkena beban tumbukan pada kecepatan sedang. Hal ini juga sesuai dengan hasil percobaan yang disajikan pada Gambar 26 menunjukkan penetrasi FCRHA lebih dangkal dari *foamed concrete*. Hal ini mengindikasikan bahwa FCRHA lebih padat dari *foamed concrete*, dimana hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)* yang disajikan dalam Gambar 4.10 menunjukkan bulir-bulir RHA terdistribusi dan sebagian melebur ke bagian yang lebih padat dari matriks beton, dan mengalami proses hidrasi semen.



Gambar 4.10 FCRHA struktur mikro di bawah 50 kali perbesaran SEM.

Gambar 4.10 menunjukkan matriks (A1) penuh dengan RHA yang pembakarannya tidak terkontrol dan banyak mengandung butiran yang poros. Kehadiran butiran ini sangat penting dan berperan sebagai material pengisi di dalam *foamed concrete*. Penting untuk dicatat bahwa *foamed concrete* berbeda dari beton konvensional dimana *foamed concrete* menjadi ringan karena mengandung banyak gelembung udara yang didistribusikan ke seluruh struktur. Dengan kehadiran pengisi dari butiran RHA telah memberikan pengaruh karakteristik aerasi *foamed concrete* yang lebih padat tapi ringan. Selain itu, proses hidrasi terus menerus berjalan sebagai akibat dari reaksi *pozzolan* RHA selama tahap perwatan (*curing*) sehingga meningkatkan kekuatan FCRHA (Park, Kwon, & Wang, 2016).

Sedangkan Gambar 4.11 menunjukkan mikrostruktur *foamed concrete* dengan adanya pori-pori dalam matriks beton.



Gambar 4.11 Bayangan *foamed concrete* di bawah 50 kali perbesaran SEM.

Tabel 4.1 menunjukkan nilai kedalaman penetrasi nilai pada Tabel 8 yang menunjukkannya lebih kuat dari *foamed concrete*. Penting dicatat bahwa kedalaman penetrasi dari FCRHA lebih dangkal dari pada *foamed concrete* karena regangan elastis *foamed concrete* yang lebih kecil dari pada FCRHA.

Tabel 4.1
Kedalaman penetrasi FCRHA.

Bahan Target	Kecepatan, v	Energi Kinetik, E_k	Kekuatan Tekan, f_c <i>foamed concrete</i>	Kekuatan Tarik f_t	Modulus Elastisitas	Poisson's Rasio	Kedalaman Penetrasi Percobaan, X_E
FCRHA	7.7	175	10.5	4.3	13.1	0.2	2.2
	8.9	233	10.5	4.3	13.1	0.2	2.9
	9.9	291	10.5	4.3	13.1	0.2	3.7
<i>foamed concrete</i>	7.7	175	6.2	4.3	12.1	0.2	2.4
	8.9	233	6.2	4.3	12.1	0.2	3.1
	9.9	291	6.2	4.3	12.1	0.2	3.9

BAB 5

PENUTUP

Tidak ada *spalling*, *scabbing*, maupun retak radial (retak *distal*) yang terjadi pada kedua bahan baik *foamed concrete* maupun FCRHA akibat beban tumbukan. Pecahan di dalam cekungan kawah dipermukaan dihasilkan dari proses densifikasi material berbuisa dari efek *honeycomb*. Energi disipasi tercapai ketika energi kinetik berubah menjadi gelombang tegangan inelastis yang dibawa oleh dinding berpori *foamed concrete* dan FCRHA. Runtuhnya dinding sel pori *foamed concrete* terjadi, ketika tumbukan berubah menjadi bentuk gelombang tegangan tarik melebihi kapasitas inelastisitas dari dinding pori tersebut. Investigasi menghasilkan bahwa FCRHA dan *foamed concrete* memiliki kinerja yang sama dalam energi penyerapan, meskipun cara mengubah energi FCRHA berbeda dengan *foamed concrete*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil penetrasi dan diameter kawah memiliki tren yang sama meskipun nilainya berbeda.

Kehadiran RHA tidak merubah karakteristik *foamed concrete* sebagai beton ringan yang berpori, terlebih ketika *foamed concrete* mengalami perlakuan pembebanan tumbukan. RHA di dalam *foamed concrete* meningkatkan energi regangan inelastik, dengan demikian penyerapan energi kinetik oleh FCRHA lebih baik daripada *foamed concrete* tanpa RHA. Selain dari itu, disebabkan kekuatan FCRHA yang lebih tinggi daripada *foamed concrete*, maka pembentukan gelombang tekan awal dari beban tumbukan menjadi tertahan. Karakteristik FCRHA yang mempunyai ke-inelastis-an lebih baik daripada *foamed concrete* lebih mampu menyebar dalam gelombang tekan

elastis yang dihasilkan oleh beban tumbukan. Pada kondisi ini FCRHA lebih tahan terhadap deformasi inelastis dan hanya dengan energi kinetik yang jauh lebih besar dapat menghasilkan retakan pada pelat bahkan patah secara keseluruhan.

Dengan demikian untuk menghindari perforasi maupun kehancuran pada *foamed concrete* maupun FCRHA maka Persamaan 3.1 sampai dengan 3.4 dapat dipergunakan untuk mendesain pelat atau slab pada kedua material ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Zaidi, A. M., & Li, Q. M. (2009). Investigation on penetration resistance of foamed concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 162(1), 77–85. <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.1.77>
- Al-khalaf, M. N., & Yousift, H. A. (1984). Use of rice husk ash in concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(4), 241–248.
- Al-Shwaiter, A., Awang, H., & Khalaf, M. A. (2021). The influence of superplasticiser on mechanical, transport and microstructure properties of foam concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.010>
- Aldridge, D. (2005). Introduction to foamed concrete: What, why, how? *Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, 1–14.
- Ali, M., Qamhiyah, A., Flugrad, D., & Shakoor, M. (2006). Compact energy absorbing cellular structure. *WIT Transactions on the Built Environment*, 87, 413–420. <https://doi.org/10.2495/SU060401>
- Ando, T., Kishi, N., Mikami, H., & Matsuo, K. G. (2000). *Weight Falling Impact Tests On Shear-failure Type RC Beams Without Stirrups*. 579–587.
- Beppu, M., Miwa, K., Itoh, M., Katayama, M., & Ohno, T. (2008). Damage evaluation of concrete plates by high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 35(12), 1419–1426. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.021>
- BS-EN-123390-3. (2009). *Compressive Strength of Test Specimens*.

BS-EN 12390-6. (2009). *Testing Hardened Concrete Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens*.

BS-EN882-1992. (1992). *Specification for aggregates from natural sources for concrete*. (1).

C31/C31M, A. (2001). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field* 1. 04(October 2000), 1–6.

Dancygier, A. N., & Yankelevsky, D. Z. (1996). High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact. *International Journal Impact Engineering*, 18(6), 583–599.

Detphan, S., & Chindaprasirt, P. (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6), 720–726. [https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(10\)60019-2](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(10)60019-2)

Gencel, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sutcu, M., & Elabade, W. A. T. (2021). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 291, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123374>

Gencel, O., Oguz, M., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. *Journal of Building Engineering*, 38(November 2020), 102232. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102232>

Gencel, O., Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W.,...Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam

concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294, 123607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123607>

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (2014). *Cellular solids: structure and properties*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>

Gökçe, H. S., Hatungimana, D., & Ramyar, K. (2019). Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036>

Gopalakrishnan, R., Sounthararajan, V. M., Mohan, A., & Tholkapiyan, M. (2020). The strength and durability of fly ash and quarry dust light weight foam concrete. *Materials Today: Proceedings*, 22(xxxx), 1117–1124. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.317>

Hadipramana, J., Abdul Samad, A. A., Mokhtar, S. N., Riza, F. V., Mohamad, N., & Mohd Wahab, M. Y. (2017). An investigation of Crater Diameter on Plain Slab Foamed Concrete Rice Husk Ash (FCRHA) Exposed to Low Impact Loading. *MATEC Web of Conferences*, 1030–7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710302025>

Hadipramana, J., Riza, F. V., Ali, N., Somad, A. A. A., & Basri, N. H. (2019). Thermal conductivity of aerated concrete containing rice husk ash as partially sand replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 674(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/674/1/012023>

Hadipramana, J., Samad, A. A. A., Zaidi, A. M. A., Mohamad, N., & Riza, F. V. (2014). Contribution of

RHA granules as filler to improve the impact resistance of foamed concrete. *Key Engineering Materials*, 594-595, 93-97.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.93>

Hadipramana, Josef, Samad, A. A. A., Zaidi, A. M. A., Mohammad, N., & Ali, N. (2013). Contribution of polypropylene fibre in improving strength of foamed concrete. *Advanced Materials Research*, 626, 762-768.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.762>

Hadipramana, Josef, Samad, A. A. A., Zaidi, A. M. A., Mohammad, N., & Riza, F. V. (2013). Effect of uncontrolled burning rice husk ash in foamed concrete. *Advanced Materials Research*, 626, 769-775. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.769>

Hadipramana, Josef, Samad, A. A. A., Zaidi, A. M. A., Mohammad, N., & Wirdawati. (2012). Influence of Polypropylene Fiber in strength of foamed concrete. *Advanced Materials Research*, 488-489, 253-257. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.253>

Haifeng, L., & Jianguo, N. (2009). Mechanical behavior of reinforced concrete subjected to impact loading. *Mechanics of Materials*, 41(12), 1298-1308. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.05.008>

Haldar, A., ASCE, M., Hatami, M., & Miller, F. J. (1999). *Concrete Structures: Penetration Depth Estimation*. 43(3), 1-14.

Haldar, A., & Hamieh, H. A. (1984). Local Effect of Solid Missiles on Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering* 110(5), 948-960.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339445\(1984\)110:5\(948\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339445(1984)110:5(948))

Hughes, G. (1984). Hard missile impact on reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 77(1), 23-35. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90058-X)

Hutchings, I. M. (1979). Energy absorbed by elastic waves during impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 12, 1819-1824. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(79\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0022-5096(79)90002-9)

Jhatial, A. A., Goh, W. I., Sohu, S., & Mohamad, N. (2020). Thermo-Mechanical Properties of Various Densities of Foamed Concrete Incorporating Polypropylene Fibres. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8171-8186.

<https://doi.org/10.1007/s13369-020-04657-6>

Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. 84, 1398-1409. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.030>

Jones, M. R., & McCarthy, A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. 36, 1032-1041.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.011>

Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, 57(1), 21-31. <https://doi.org/10.1680/macr.2005.57.1.21>

Jones, N. (2010). Energy-absorbing effectiveness factor. *International Journal of Impact Engineering*, 37(6), 754-765.

<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.01.008>

Kearsley, E. P. (1999). Just foamed concrete – an overview In: Dhir R.K., Handerson NA (Specialist; S. techniques and materials for Construction, ed.). London: Thomas Telford.

- Kennedy, R. P. (1976). A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*, 37(2), 183–203.
[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
- Lee, Y. L., & Hung, Y. T. (2005). Exploitation of Solid Wastes in Foamed Concrete Challenges Ahead. *Use of Foamed Concrete in Construction, International Conference of University of Dundee, Scotland, UK*. Scotland. UK: Thomas Telford.
- Leppänen, J. (2006). Concrete subjected to projectile and fragment impacts: Modelling of crack softening and strain rate dependency in tension. *International Journal of Impact Engineering*, 32(11), 1828–1841.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.06.005>
- Li, G., Tan, H., He, X., Zhang, J., Deng, X., Zheng, Z., & Guo, Y. (2021). The influence of wet ground fly ash on the performance of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 304(June), 124676.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124676>
- Li, Q. M., & Chen, X. W. (2003). Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 28(1), 93–116.
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00037-4)
- Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., & Telford, A. R. (2005). Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), 224–284.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.04.005>
- Lu, G., & Yu, T. (2003). Energy Absorption of Structures and Materials. In *Energy Absorption of Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1533/9781855738584>

- Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Arenas, C., & Fernández-Pereira, C. (2018). Fly ash based geopolymeric foams using silica fume as pore generation agent. Physical, mechanical and acoustic properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 500(July), 196–204.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.069>
- May, I. M., Chen, Y., Owen, D. R. J., Feng, Y. T., & Bere, A. T. (2005). Experimental testing and finite element simulation of the behaviour of reinforced concrete beams under impact loading. *Computational Plasticity: Fundamentals and Applications - Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity, COMPLAS VIII, (PART 2)*, 869–872.
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2006a). Influence of filler type on the properties of foam concrete. 28, 475–480.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001>
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2006b). Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. 28, 752–760.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). *Structure and properties of aerated concrete : a review*. 22, 321–329.
- Odler, I. (2000). *Special Inorganic Cement (Vol 8)*. CRC Press. London (1st ed.).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482271942>
- Othuman, M. A., & Wang, Y. C. (2011). Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 705–716.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.16>

- Park, B., & Choi, Y. C. (2021). Investigation of carbon-capture property of foam concrete using stainless steel AOD slag. *Journal of Cleaner Production*, 288,125621.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125621>
- Park, K. B., Kwon, S. J., & Wang, X. Y. (2016). Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 105, 196–205.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.086>
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K. K., & Ranjani, G. I. S. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388–396.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- Ramezaniapour, A. A., Mahdi, M., & Ahmadibeni, G. (2009). *The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concretes*. 7(2),83–91.
- Roderick, J. M., & Zheng, L. (2013). Energy absorption of foamed concrete from low-velocity impacts. *Magazine of Concrete Research*, 65(4), 209–19.
<https://doi.org/10.1680/mac.12.00054>
- Rodríguez De Sensale, G. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158–160.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005>
- Teng, T. L., Chu, Y. A., Chang, F. A., & Chin, H. S. (2004).Simulation model of impact on reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2067–2077.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.019>
- Toyota, K., Okubo, K., Fujii, T., Oguri, T., Uenoya, T., & Sugawara, T. (2006). Mechanical properties of plain-woven CFRP reinforced by spread fiber tow during and after drop-weight impact. *WIT Transactions on the Built Environment*, 87, 455–464.
<https://doi.org/10.2495/SU060441>
- Wu, C. Y., Li, L. Y., & Thornton, C. (2005). Energy dissipation during normal impact of elastic and elastic-plastic spheres. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), 593–604.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.08.007>
- Yankelevsky, D. Z. (1997). Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 19(4), 331–343.
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(96\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(96)00041-3)
- Yuanliang, X., Baoliang, L., Chun, C., & Yamei, Z. (2021).Properties of foamed concrete with Ca(OH)₂ asfoam stabilizer. *Cement and Concrete Composites*,118(January), 103985.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103985>
- Zaidi, A. M. A., Hadipramana, J., Samad, A. A. A., Mohamad, N., & Riza, F. V. (2014). Potential of rha in foamed concrete subjected to dynamic impact loading. *Key Engineering Materials*, 594–595, 395–400.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.594-595.395>
- Zhang, M. H., Lastra, R., & Malhotra, V. M. (1996). Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 963–977.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00061-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00061-0)
- Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., & Chew, C. W. (2005). Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *International Journal of Impact*

Engineering, 31(7), 825–841.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009>
 Zhang, X., Wu, H., Zhang, S., & Huang, F. L. (2020). Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: Experimental study and theoretical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 144(June), 103653.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103653>

GLOSARIUM

abu sekam padi	Abu yang dibuat dari sekam padi yang dibakar dengan suhu dan waktu tertentu sampai menjadi abu.
<i>agregat</i>	Material pembentuk beton yang berasal dari batuan alam.
akustik	Hal yang berhubungan dengan suara atau bunyi.
<i>brittle</i>	Getas atau mudah pecah/patah atau rapuh.
<i>brittle-crushing</i>	Penghacuran material rapuh.
busa	Sebuah obyek yang berbentuk gelembung berisi udara.
<i>clamped</i>	Dijepit.
<i>compressive-strength</i>	Kekuatan tekan beton.
<i>cone-cracking</i>	Retakan berbentuk kerucut.
<i>crack</i>	Retak pada permukaan beton.
<i>cratering</i>	Cekungan berbentuk kawah akibat tumbukan.

deformasi	Perubahan bentuk dari wujud teratur menjadi tidak teratur.
<i>densification-zone</i>	Wilayah yang mengalami pemadatan.
densitas	Kepadatan.
distal	Posisi jauh dari titik pusat.
elastis	Berubah bentuk karena suatu gaya dan kembali seperti semula bila gaya tersebut dilepaskan.
elastisitas	Keadaan yang elastis /keelastisan.
energi-kinetik	Energi suatu benda dikarenakan gerak yang dilakukan atau yang terjadi pada benda tersebut.
<i>fixed</i>	Kondisi tetap tidak berubah karena dipegang atau dijepit.
<i>fly ash</i>	Abu yang berasal dari material padat yang dibakar dengan suhu dan waktu tertentu sehingga menjadi material kecil dan mudah terbang.

<i>foam-agent</i>	Larutan kimia pembuatan busa atau buih seperti dalam sabun.
<i>foamed concrete</i>	Beton yang mengandung banyak pori-pori.
<i>fracture-energy</i>	Energi yang dibutuhkan untuk membuat patah atau retak sebuah material.
<i>fragment</i>	Pecahan material.
<i>fresh state</i>	Kondisi basah pada beton sebelum mengeras.
<i>hebel</i>	Bata ringan.
<i>heksagon</i>	Bentuk geometri tertutup yang mempunyai enam sudut.
hidrasi	Reaksi penggabungan dengan keterlibatan air.
<i>honeycomb</i>	Istilah bentuk bentuk sarang lebah pada suatu material.
<i>impact</i>	Tumbukan atau benturan.
impaktor	Obyek penumbuk.
inelastis	Tidak kembali kepada bentuk semula karena sebuah gaya.

infrastruktur	Segala sesuatu yang merupakan penunjang untuk tercapainya suatu proses.
<i>interfacial</i>	Antar muka atau pertemuan permukaan antara dua atau lebih material.
<i>irreversible</i>	Dapat diubah
<i>komposit</i>	Campuran dua atau lebih bahan yang berbeda secara fisik dan kimia, dan tetap hasil yang berbeda sampai dicampurkan.
konvensional	Sesuatu yang berdasarkan kepada kesepakatan umum atau biasa.
kuat geser	Kekuatan yang dimiliki oleh suatu benda terhadap geseran pada benda tersebut, apakah karena pembebanan atau suatu aksi gaya.
kuat tarik	Kekuatan yang dimiliki oleh suatu benda terhadap tarikan pada benda tersebut, apakah karena pembebanan atau suatu aksi gaya.

kuat tekan	Kekuatan yang dimiliki oleh suatu benda terhadap tekanan pada benda tersebut, apakah karena pembebanan atau suatu aksi gaya.
longitudinal	Arah yang membujur.
<i>loss in ignition</i>	Kehilangan unsur-unsur atau komponen-komponen tertentu dari sebuah material/benda ketika dibakar.
matriks	bagian atau komponen terbesar dari sebuah struktur yang dibangun dari berbagai komponen / unsur.
<i>microcrack</i>	Retak halus yang sangat kecil yaitu dibawah per-sepuluh ribu sentimeter.
modifikasi	Pengubahan pada suatu material baik bentuk maupun unsur-unsur yang membentuk material tersebut.
modulus elastisitas	Suatu nilai yang dipakai untuk mengukur sebuah benda terhadap ketahanan material yang mengalami deformasi elastis.

<i>modulus young</i>	Ukuran kekakuan suatu bahan dalam kondisi elastis.
<i>mortar</i>	Campuran semen, agregat dan air.
<i>novelty</i>	Sesuatu yang baru atau kebaruan.
<i>pasta</i>	Campuran semen dan air membentuk suatu material perekat.
<i>penetrasi</i>	Penerobosan atau penembusan.
<i>perforation</i>	Penembusan sebuah obyek pada obyek lainnya sampai tembus ke sisi belakang.
<i>plastic-yielding</i>	Kondisi suatu material pada kondisi mencapai posisi titik leleh dan mengalami regangan walaupun tidak ditambah tegangannya.
<i>plastisitas</i>	Kekenyalan suatu benda.
<i>plateau</i>	Daerah datar pada kurva tegangan regangan ketika material telah mengalami tegangan leleh dan material mengalami perubahan ben-

<i>polimer</i>	Molekul besar (makromolekul) yang terbentuk dari ratusan bahkan ribuan molekul sederhana (monomer) dan mempunyai massa lebih besar.
<i>polypropylene</i>	Bahan serat buatan dari bahan polimer.
<i>pori-pori</i>	Lubang-lubang kecil terdapat dalam struktur beton
<i>porositas</i>	Ruang kosong didalam suatu material
<i>portland cement</i>	Semen yang kandungannya seperti kandungan semen berasal dari wilayah Portland Inggris.
<i>pozzolan</i>	Bahan yang mempunyai sifat seperti semen dan banyak menganung silika atau silika alumina, bila dicampur dengan air maka akan membentuk senyawa lain kalsium hidroksida.
<i>pre-foaming</i>	Suatu metode pembuatan beton berbuisa.

<i>proyektil</i>	Suatu benda yang ditembakkan di udara.
<i>radial</i>	Lingkaran yang dibentuk dari retakan yang membetuk sebuah lingkaran yang terdiri dari garis- garis retak menjauhi pusat lingkaran tersebut.
<i>rasio poisson</i>	Perbandingan perubahan bentuk kearah lateral terhadap perubahan bentuk ke arah longitudinal.
<i>reinforcement</i>	Penambahan material untuk memperkuat material lainnya.
<i>response</i>	Tanggapan/reaksi sebuah benda terhadap aksi benda lainnya atau sebuah gaya yang mengganggu/membentur/membebani benda tersebut.
<i>rice husk ash</i>	Sama dengan abu sekam padi yaitu Abu yang dibuat dari sekam padi yang dibakar dengan suhu dan waktu tertentu sampai menjadi abu.

<i>scabbing</i>	Bopeng atau keropeng yang terjadi pada permukaan sebuah benda akibat suatu benturan.
<i>shelter</i>	Tempat untuk berlindung.
<i>silica fume</i>	Bahan yang kaya akan silika dan dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dengan bantuan air dan membentuk kalsium silikat.
<i>spalling</i>	Pecahan material sebuah benda yang terlempar akibat sebuah benturan oleh benda lainnya.
<i>specific gravity</i>	Perbandingan suatu densitas atau kepadatan sebuah benda atau material terhadap material cair yang standar biasanya air.
<i>spesimen</i>	Bagian dari kelompok atau bagian dari keseluruhan yang akan diperiksa.
<i>shrinkage</i>	Penyusutan pada beton.
<i>strain-hardening</i>	Penguatan regangan suatu material dikarenakan mengalami perubahan bentuk yang plastis.

<i>strain-rate</i>	Laju aliran regangan pada sebuah material akibat tegangan yang bekerja pada material tersebut.
<i>surface</i>	Permukaan sebuah benda.
<i>surfaktan</i>	Senyawa larutan dalam hasil campuran bahan kimia cair sebagai komponen utama dengan air.
<i>tensile-strength</i>	Adalah kekuatan yang dimiliki oleh suatu benda terhadap tarikan pada benda tersebut, apakah karena pembebanan atau suatu aksi gaya.
<i>thixotropic</i>	Sifat suatu campuran cairan yang kental, ketika dalam kondisi statis akan menjadi tipis atau kurang kental waktu di kocok atau diberi tekanan dari waktu ke waktu.
<i>transversal</i>	Arah gerak yang tegak lurus terhadap arah rambatan.
<i>trial-error</i>	Sebuah metode dengan cara coba-coba.

<i>uncontrolled-burning</i>	Pembakaran yang tidak di kontrol baik suhu maupun waktu.
<i>workability</i>	Tingkat kemudahan pengerjaan beton dalam menuangkan dalam cetakan.
<i>yield</i>	Dalam keteknikan berarti suatu titik leleh dari sebuah material yang diberikan tegangan, di mana titik tersebut mengindikasikan batas elastis material tersebut.
<i>yield stress</i>	Tegangan yang menyebabkan kondisi meleleh pada sebuah benda baik beton atau logam

INDEKS

A

Abu Sekam Padi, 1, 18, 23
 Agregat, 13, 15, 19, 20, 24, 25, 38
 Akustik 4,17

B

Brittle, 34,35
 Brittle Crushing, 35
 Busa, 15, 33, 34, 35, 36, 41, 42, 43, 44, 60, 62, 63

C

Comperssive Strength, 29
 Cone cracking, 6,12, 30, 31
 Crack, 6, 7, 10, 12,30, 31
 Cratering, 6, 7, 10, 12

D

Deformasi, 5, 9 10, 15, 26, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 46, 56, 60 65, 71, 78
 Densification-Zon,e 34
 Densitas, 3, 4, 8, 10, 11, 16, 19, 44, 45, 50, 59, 68, 70, 71
 Distal 6, 7, 50, 57, 61, 76

E

Elastis, 3, 5, 9, 15, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 52, 61, 62, 64, 74, 78
 Elastisitas, 3, 36, 52, 53, 72
 Energi Kinetik, 4, 5, 8, 9, 31, 32, 46, 47, 64, 67, 76, 78

F

Fly-Ash, 4, 20, 22, 23, 24
 Foam Agent, 41, 42, 45
 Fracture-Energy, 29
 Fresh State, 3

G

Gelembung, 2, 16, 42, 73
 Gelombang, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 36, 37, 59, 60, 61, 62, 63, 71, 77, 78

H

Hebel, 2, 15
 Hidrasi, 15, 20, 22, 23, 40, 51, 69, 70, 72, 73
 Honey-comb, 35, 60, 77

I

Impact, 4, 14, 25
 Impaktor, 14
 Inelastis, 5, 29, 30, 31, 32, 64, 66, 77, 78
 Infrastruktur, 16
 Interfacial, 24, 25
 Irreversible, 31

K

Konvensional, 1, 3, 8, 10, 12, 13, 15, 16, 19, 22, 44, 59, 67, 70, 73, 94
 Kuat Geser, 28
 Kuat Tarik, 21, 29, 30, 31, 53, 70, 71, 75
 Kuat Tekan, 52, 53, 66, 94

L

Longitudinal, 26, 27, 37, 61, 62, 63

M

Matriks, 2, 3, 4, 10, 35, 36, 38, 60, 61, 71, 72, 73
 Microcrak, 10
 Modifikasi, 1, 11, 13, 15, 19, 21, 38, 57
 Modulus Elastisitas, 36, 53
 Mortar, 3, 15, 16, 32, 40, 41, 42, 44

P

Pasta, 24, 25
 Perforation, 6, 7, 12
 Plastic-Yielding, 34
 Plastisitas, 42, 72
 Plateau, 34, 62, 63, 72
 Polypropylene, 21
 Pori-Pori, 2, 17, 33, 356, 59, 62, 712, 72, 73
 Porositas, 10, 19, 22, 25, 38, 60, 62, 63, 72
 Portland Cement, 4
 Pozzolan, 18, 20, 23, 24, 69, 70, 73
 Pre-Foaming, 41
 Proyektil, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 30, 32, 33, 55
 Proximal, 6, 7
 R

R

Radial, 6, 7, 12, 77
 Rasio Poisson, 53
 Reinforcement, 21
 Response, 6, 7, 12
 Rice Husk Ash, 1

S

Scabbing, 6, 7, 12, 33, 46, 48, 49, 50, 66, 77
 Shelter, 13
 Silica Fume, 20
 Spalling, 6, 7, 12, 26, 27, 29, 30, 33, 36, 57, 59, 62, 66, 77
 Spesimen, 12, 13, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 57
 Strain-Hardening, 36
 Strain-Rate, 29, 46
 Surface, 6
 T
 Thixotropic, 3
 Transversal, 27, 28, 61, 63
 Trial-Error, 43

U

Uncontrolled-Burning, 39

W

Workability, 2

X

XRF, 40

Y

Yield, 34
 Yield Stress, 26

Z

Zona, 24, 25, 34

TENTANG PENULIS



Josef Hadipramana, lahir di Bandung, 22 Juni 1972 dan kini dosen dan peneliti di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan Indonesia. Mendapat gelar Doktor pada tahun 2015 di Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Department Civil of Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, dengan bidang penelitian material dan struktur. Oleh karena itu, penulis mempunyai minat dibidang struktur bangunan, dan material maju terutama *green materials* yang berorientasi kepada *reuse, recycle sustainability for constructions*, selain itu juga minat pada bidang beban *dynamic impact on constructions*. Setelah lulus S3 pada Tahun 2015, penulis terdaftar sebagai Insinyur Profesioanl oleh Asosiasi Insinyur Indonesia (PII) dan dianugerahi predikat Insinyur Profesional Madya (IPM). Sejak 2010, penulis sudah menghasilkan lebih dari 30 publikasi dalam jurnal dan prosiding bereputasi internasional. Penulis, dianugerahi sertifikasi kompetensi Nasional sebagai *Peneliti Quantitatif Internasional* pada tahun 2021 dan sebelumnya pada tahun 2019 telah dianugerahui sertifikat komptensi sebagai *Reviewer Penelitian Internasional* yang kedua kompetensi tersebut di akreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN). Pada Tahun 2022 meraih sertifikat kompetensi Ahli Penilai Kalaikan Bangunan Gedung (*Building*

Construction Assessors) dari Lembaga Sertifikasi Profesi Tenaga Teknik Indonesia (LSPTTI) dan diakreditasi oleh Badan Nasional Sertifikasi profesi (BNSP).

TENTANG EDITOR



Fetra Venny Riza merupakan dosen di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Program Studi Teknik Sipil sejak tahun 2017. Lahir di Medan pada tanggal 25 Februari 1976 sebelumnya menempuh pendidikan formal pada jenjang S1 pada Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung, jurusan Teknik Sipil. Sempat mengajar pada almamater, kemudian ia melanjutkan studi program S2 di Universiti Malaysia Perlis (UniMAP) pada program Master by Research dan dianugerahi predikat Master of Science pada tahun 2009. Penelitian yang dilakukan pada School of Materials Engineering (setara dengan fakultas) tersebut, berfokus pada beton ringan dan reuse material for construction. Anak pertama dari empat bersaudara ini kemudian melanjutkan studinya ke jenjang doktoral dan mendapat gelar Doktor pada Tahun 2017 di Universiti Tun Hussein Onn (UTHM) Malaysia dengan fokus penelitian untuk material maju dan penggunaan bahan limbah agrikultur (reuse, recycle and sustainability). Penelitian ini membangkitkan minatnya pada penggunaan bahan-bahan limbah pada material konstruksi untuk mewujudkan bangunan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Hasil karyanya sudah lebih dari 20 artikel jurnal, *book chapter* dan prosiding yang sebagian besar bereputasi Internasional.



MODIFIKASI BETON BERPORI VERSUS TUMBUKAN

Buku ini merupakan hasil penelitian yang sesuai dengan minat penulis dalam bidang material konstruksi, struktur dan rekayasa tumbukan. Penelitian ini dilaksanakan karena melihat beberapa fenomena di lapangan, bahwa terdapat beberapa kelemahan pada beton berpori. Kekuatan beton berpori masih merupakan kelemahan nomor satu sebagai beton, apalagi beton berpori adalah beton ringan non-konstruksi yang biasanya dipakai sebagai penutup dan pelindung bangunan, sehingga beban tumbukan dapat setiap waktu terjadi pada material tersebut.

Selain dari itu, penelitian ini mencoba membangkitkan teknologi material hijau, yaitu memanfaatkan limbah pertanian yang sangat melimpah di Indonesia, sehingga mempunyai manfaat lain di bidang konstruksi dan mempunyai nilai ekonomis. Sehingga penulis berharap, agar material hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai pengganti material konvensional yang telah ada.



Jl. Kapten Mukhtar Basri No. 3
Medan, Sumatera Utara
Website: <http://umsupress.umsu.ac.id/>
Email: umsupress@umsu.ac.id

