

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai beton HVFA (*High Volume Fly ash*) sudah banyak dilakukan di dunia, walaupun di Indonesia masih sedikit penelitian yang membahas mengenai beton tersebut. Selain itu, belum juga ditemukan penelitian beton HVFA dengan penggunaan limbah abu batu *stone crusher* untuk difungsikan sebagai material substitusi agregat halus (pasir).

Penelitian ini menitikberatkan pada kuat tekan beton HVFA dengan menggunakan variasi limbah abu batu *stone crusher* sebagai substitusi agregat halus (pasir alam) dengan kadar substitusi sebesar 0%, 10%, 15% dan 20%. Selain itu penelitian beton HVFA ini juga menggunakan bahan tambah *superplastisizer* sebesar 0,5% dari berat semen dan *silica fume* dengan kadar 15% dari berat semen. Kemudian dilakukan uji tekan untuk mengetahui nilai kuat tekan pada umur 14, 28 dan 56 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan setiap variasi untuk mengetahui pengaruh limbah abu batu *stone crusher* terhadap kuat tekan beton HVFA, kemudian dibandingkan dengan kuat tekan beton normal yang diuji pada umur yang sama.

2.1.1. Penelitian Terdahulu tentang Agregat Halus

Pratiwi dkk. (2016) memeriksa agregat halus berupa pasir yang berasal dari Sungai Progo, Kabupaten Kulonprogo. Adapun hasil pemeriksaan agregat halus (pasir) Sungai Progo, Kabupaten Kulonprogo didapatkan gradasi daerah No. 2; modulus halus butir 2,648; berat jenis 2,58; Berat satuan (gr/cm³) 1,31; Kadar air (%) 4,575; Penyerapan air (%) 0,276; Kadar lumpur (%) 4,532.

Ariyanto (2010) memeriksa agregat halus (pasir) yang berasal dari Sungai Progo, Kabupaten Kulonprogo. Adapun hasil pemeriksaan agregat tersebut termasuk dalam gradasi daerah 1 dengan modulus halus butir 3,2; berat jenis 2,79; kadar air 0,9%; penyerapan air 0,9%; kadar lumpur 2,3% dan berat satuan 1,4 gr/cm³.

Ikhsan (2016) memeriksa agregat halus berupa pasir yang berasal dari Sungai Progo, Kulonprogo. Adapun hasil pengujian agregat halus dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hasil pengujian agregat halus (Ikhsan, 2016)

No.	Jenis Pengujian Agregat	Satuan	Hasil
1	Gradasi butiran	-	Daerah 2
2	Modulus halus butir	-	2,648
3	Kadar air	%	4,575
4	Berat jenis	-	2,58
5	Penyerapan air	%	0,26
6	Berat satuan	gram/cm ³	1,31
7	Kadar lumpur	%	4,532

2.1.2. Penelitian Terdahulu tentang Agregat Kasar

Adi (2015) dalam penelitian yang berjudul pemrograman analisis kapasitas kolom dengan variasi mutu beton dalam satu penampang memeriksa agregat kasar (kerikil) yang berasal dari Clereng, Kabupaten Kulonprogo. Adapun hasil pemeriksaan agregat kasar tersebut yaitu modulus halus butir 6,620; berat jenis kering permukaan (SSD) 2,705; kadar air 0,685%; penyerapan air 1,199%; abrasi 17,88% dan berat isi 1,457 (gr/cm³).

Ikhsan (2016) meneliti mengenai agregat kasar berupa kerikil atau batu pecah yang berasal dari Clereng (Sungai Progo) memeriksa agregat kasar (kerikil) yang berasal dari Clereng, Kulonprogo. Berdasarkan hasil pemeriksaan agregat kasar tersebut, kadar air, berat jenis, keausan butir, berat satuan dan penyerapan air sudah sesuai dengan syarat yang telah ditentukan. Sedangkan nilai kadar lumpur yang terkandung dalam agregat ini belum sesuai dengan syarat yang telah ditentukan. Adapun hasil pemeriksaan agregat kasar penelitian ini disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hasil pemeriksaan agregat kasar (Ikhsan, 2016)

No.	Jenis pengujian	Satuan	Hasil
1	Kadar air	%	0,549
2	Berat jenis	-	2,63
3	Penyerapan air	%	4,47
4	Berat satuan	gram/cm ³	1,55
5	Kadar lumpur	%	1,75
6	Keausan butir	%	21,36

Prayuda dkk. (2018) memeriksa kerikil Clereng, Kulonprogo. Adapun hasil pemeriksaan kerikil Clereng disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hasil pemeriksaan kerikil Clereng (Prayuda dkk, 2018)

Jenis pengujian agregat	Satuan	Hasil
Kadar air	%	2,73
Berat jenis	-	2,71
Penyerapan air	%	6,72
Berat satuan	gram/cm ³	1,43
Kadar lumpur	%	2,52
Keausan	%	38,31

2.1.3. Penelitian terdahulu tentang campuran *fly ash* untuk beton

Siddique (2004) dalam penelitian mengenai karakteristik kinerja *fly ash* kelas F volume tinggi dalam beton, memanfaatkan *fly ash* sebagai substitusi semen sebanyak 40, 45 dan 50%. Penelitian ini menguji kuat tekan, belah tarik, lentur dan ketahanan abrasi yang masing-masing diuji pada umur 7, 28, 91 dan 365 hari. Berdasarkan hasil uji kuat tekan menunjukkan penggunaan substitusi *fly ash* kelas F terhadap semen pada beton HVFA mengalami penurunan kuat tekan dibandingkan beton normal pada umur 28 hari. Namun kuat tekan beton mengalami peningkatan yang berkelanjutan dan signifikan pada umur beton 91 dan 365 hari. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa *fly ash* kelas F dapat digunakan untuk mengganti sebagian semen sampai 50%. Adapun campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.4 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Proporsi campuran beton (Siddique, 2004)

No. Campuran	M-1	M-2	M-3	M-4
<i>Fly ash</i> (%)	0	40	45	50
Semen, C (kg/cm ³)	400	240	220	200
<i>Fly ash</i> , FA (kg/cm ³)	0	160	180	200
Air, W (kg/cm ³)	164	160	164	160
W/(C+A)	0,41	0,40	0,41	0,40

Tabel 2. 5 Hasil uji kuat tekan beton (Siddique, 2004)

No. Campuran	Kuat tekan (MPa)			
	7 hari	28 hari	91 hari	365 hari
M-1 (0% <i>fly ash</i>)	25,7	37,2	39,5	42,1
M-2 (40% <i>fly ash</i>)	17,0	26,7	33,5	38,6
M-3 (45% <i>fly ash</i>)	15,3	24,7	30,1	34,4
M-4 (50% <i>fly ash</i>)	14,7	23,1	27,7	32,1

Huang dkk. (2013) dalam penelitian mengenai proporsi campuran dan sifat mekanik dari beton yang mengandung *fly ash* kelas F sangat tinggi menggunakan substitusi *fly ash* terhadap semen sebesar 0, 20, 40, 60 dan 80%. Hasil penelitian

menyebutkan kuat tekan beton sebesar 37,4 MPa pada umur beton 56 hari dengan kandungan *fly ash* sebanyak 60% dan kuat tekan beton terus meningkat seiring dengan umur dari beton tersebut. Pada umur yang sama dengan kandungan *fly ash* sebanyak 0% menghasilkan kuat tekan beton sebanyak 37,2%. Proporsi campuran beton disajikan pada Tabel 2.6, sifat campuran beton disajikan pada Tabel 2.7 dan tabel hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.6 Proporsi campuran beton (Huang dkk, 2013)

Kode beton	W/cm	W/C	Semen (kg/m ³)	<i>Fly ash</i> (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Agregat kasar (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	SP (l/m ³)	Binder (%)
L24F00	0,72	0,72	280	0	777	988	2020	0,0	0,0
L24F20	0,66	0,83	224	56	788	1003	185	0,5	0,2
L24F40	0,56	0,93	268	112	802	1041	157	2,1	0,8
L24F60	0,44	1,11	112	168	801	1106	124	3,9	1,4
L24F80	0,27	1,34	112	448	418	1101	150	3,7	0,7
L35F00	0,60	0,60	340	0	737	977	203	0,4	0,1
L35F20	0,55	0,69	272	68	743	985	188	0,8	0,2
L35F40	0,48	0,80	204	136	752	1017	163	1,7	0,5
L35F60	0,36	0,91	136	204	756	1089	124	3,3	1,0
L35F80	0,24	1,20	136	544	295	1062	163	4,9	0,7
H35F00	0,60	0,60	340	0	737	977	203	0,4	0,1
H35F20	0,55	0,69	272	68	743	985	188	1,5	0,4
H35F40	0,48	0,80	204	136	752	1017	163	2,7	0,8
H35F60	0,36	0,91	136	204	756	1089	124	5,0	1,5
H35F80	0,26	1,32	136	544	279	1038	180	8,7	1,3

*SP= Superplastisizer

Tabel 2.7 Sifat campuran beton segar (Huang dkk, 2013)

No. Campuran	W/cm	SP (l/m ³)	<i>Slump</i> (mm)	Rongga Udara (%)	Berat unit (kg/m ³)	Waktu set	
						Awal (h:min)	Akhir (h:min)
L24F00	0,77	0,0	160	2,2	2347	6:10	7:2-
L24F20	0,66	0,5	170	2,5	2340	7:25	9:10
L24F40	0,56	2,1	180	2,6	2311	10:40	10:40
L24F60	0,44	3,9	210	2,8	2280	13:30	13:30
L24F80	0,27	3,7	220	3,5	2218	15:50	15:50
L35F00	0,60	0,4	220	2,1	2352	7:00	7:00
L35F20	0,55	0,8	210	2,7	2348	8:55	8:55
L35F40	0,48	1,7	160	2,9	2324	10:00	10:00
L35F60	0,36	3,3	230	3,2	2289	13:05	13:05
L35F80	0,24	4,9	230	3,6	2230	15:20	15:20
H35F00	0,60	0,4	220	2,1	2352	7:00	7:00
H35F20	0,55	1,5	210	2,8	2307	8:55	8:55
H35F40	0,48	2,7	230	3,2	2280	10:50	10:50
H35F60	0,36	5,0	220	3,5	2265	14:20	14:20
H35F80	0,26	8,7	230	4,3	2090	18:10	18:10

Tabel 2.8 Hasil uji kuat tekan (MPa) (Huang dkk, 2013)

No. Campuran	W/cm	1 hari	3 hari	7 hari	28 hari	56 hari	91 hari	182 hari	365 hari
L24F00	0,72	5,3	14,6	20,9	25,0	27,6	29,0	32,4	36,5
L24F20	0,66	5,0	12,9	18,9	25,4	28,5	32,1	35,9	43,2
L24F40	0,56	3,9	10,4	16,8	25,6	30,0	35,2	39,8	39,4
L24F60	0,44	2,6	9,7	14,5	23,5	25,6	30,6	37,3	41,2
L24F80	0,27	2,3	8,5	14,1	20,9	24,3	28,5	33,6	38,4
L35F00	0,60	7,6	20,4	27,2	34,5	37,2	40,3	41,8	44,6
L35F20	0,55	7,6	17,6	23,9	36,5	40,8	35,8	49,4	54,7
L35F40	0,48	5,8	17,8	24,7	40,3	42,5	51,3	56,1	62,4
L35F60	0,36	3,5	13,3	18,9	34,5	38,8	47,8	55,6	65,3
L35F80	0,24	3,3	9,8	16,5	30,0	34,4	40,4	48,6	61,6
H35F00	0,60	7,6	20,4	27,2	34,5	37,2	40,3	41,8	44,6
H35F20	0,55	6,9	16,8	22,4	34,9	36,1	39,6	43,2	46,2
H35F40	0,48	6,0	11,3	21,5	34,1	37,4	40,8	51,5	54,3
H35F60	0,36	2,5	12,1	17,8	30,5	33,9	39,0	47,3	55,8
H35F80	0,24	1,0	5,2	11,6	25,2	28,3	34,1	39,6	43,4

Siddique dkk. (2012) meneliti mengenai pengaruh serat *polyester* pada kuat tekan dan ketahanan abrasi beton HVFA menyatakan beton dengan kandungan *fly ash* sebanyak 50% menghasilkan kuat tekan 33,8 MPa pada umur 56 hari. Penelitian ini menggunakan total 12 jenis benda uji. Hasil penelitian menunjukkan semakin banyak substitusi *fly ash* terhadap semen, maka kuat tekan akan semakin turun meskipun perkembangan beton akan semakin naik seiring dengan umur beton. Adapun detail proporsi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.9 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.9 Detail proporsi campuran beton (Siddique dkk, 2012)

Campuran No.	<i>Fly ash</i> (%)	Fiber (%)	Semen (kg/m ³)	<i>Fly ash</i> (kg/m ³)	Agregat halus (kg/m ³)	Agregat kasar (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	Plastisizer (lt/m ³)
M0	-	-	470	-	620	916	208	2,7
M1	30	-	329	141	620	916	208	2,9
M2	40	-	282	188	620	916	208	3,3
M3	50	-	235	235	620	916	208	3,3
M4	30	0,03	329	141	620	916	208	3,6
M5	30	0,04	329	141	620	916	208	3,6
M6	30	0,05	329	141	620	916	208	3,6
M7	40	0,03	282	188	620	916	208	3,3
M8	40	0,04	282	188	620	916	208	3,4
M9	40	0,05	282	188	620	916	208	3,4
M10	50	0,03	235	235	620	916	208	3,4
M11	50	0,04	235	235	620	916	208	3,4
M12	50	0,05	235	235	620	916	208	3,4

Tabel 2.10 Hasil kuat tekan campuran beton (Siddique dkk, 2012)

Campuran no.	Fly ash (%)	Fiber (%)	Kuat tekan (MPa)		
			7 hari	28 hari	56 hari
M0	-	-	30,50	40,2	51,4
M1	30	-	18,4	32,4	42,1
M2	40	-	15,3	26,2	33,9
M3	50	-	14,2	24,2	31,3
M4	30	0,03	18,8	32,8	43,2
M5	30	0,04	19,5	33,5	44,3
M6	30	0,05	19,5	33,5	45,2
M7	40	0,03	15,8	26,8	34,5
M8	40	0,04	16,5	27,5	35,8
M9	40	0,05	16,5	27,6	36,2
M10	50	0,03	14,6	24,8	32,5
M11	50	0,04	15,9	25,4	33,2
M12	50	0,05	16,1	25,4	33,8

Solikin dan Setiawan (2017) dalam penelitian mengenai pengaruh desain kekuatan, kandungan *fly ash* dan metode *curing* pada kuat tekan beton HVFA menyatakan faktor yang memberikan pengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan beton adalah desain kekuatan dan kadar *fly ash*. Efeknya dapat diperoleh bahwa desain kuat tekan beton adalah $f_c' = 45$ MPa dan kadar *fly ash* sebagai pengganti semen sebesar 50%. Solikin dan Setiawan (2017) menyarankan untuk tidak mengganti semen sebesar 70% dengan *fly ash* karena akan menghasilkan kuat tekan yang rendah. Hal tersebut terjadi karena kandungan Ca (OH)₂, yaitu produk hidrasi semen yang kemudian bereaksi dengan silika (kandungan kimia utama dalam *fly ash*) akan menguntungkan dalam menghasilkan proses hidrasi yang lebih baik untuk mendapatkan kuat tekan beton yang tinggi. Adapun proporsi campuran penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Proporsi campuran beton (Solikin dan Setiawan, 2017)

Campuran	Semen (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Agregat halus (kg/m ³)	Agregat kasar (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	SP
Normal strength HFA	188,0	188,0	637,0	1250,0	128	0,4%
Normal strength UHVFA	113,0	264,0	637,0	1250,0	128	0,4%
High strength HVFA	269,0	269,0	613,0	919,0	188	0,4%
High strength UHVFA	173,0	173,0	613,0	919,0	188	0,4%

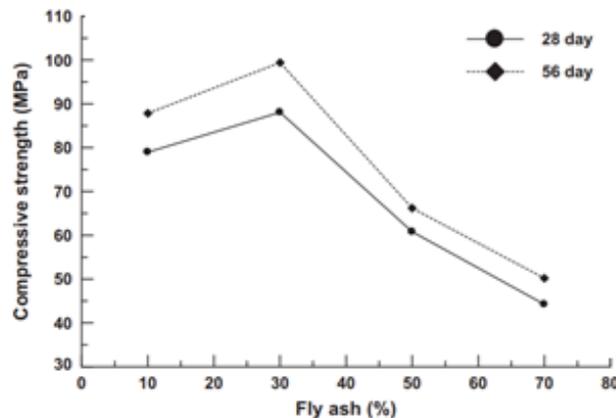
*SP= Superplastisizer

Dinakar (2013) meneliti mengenai perilaku beton memadat sendiri menggunakan semen *portland* dan kadar *fly ash* yang berbeda menggunakan empat jenis benda uji dengan variasi substitusi *fly ash* terhadap semen sebesar 10, 30, 50

dan 70%. Hasil penelitian menunjukkan beton dengan kadar *fly ash* 30% dari berat semen menghasilkan kuat tekan paling optimal yaitu 88 MPa pada umur beton 28 hari dan 100 MPa pada umur beton 56 hari. Namun semakin banyak penggunaan *fly ash* pada beton akan semakin menurunkan kuat tekan beton. Adapun detail proporsi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.12 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Tabel 2.12 Detail proporsi campuran (kg/m³) (Dinakar, 2013)

Material	SCC10	SCC30	SCC50	SCC70
Semen	495	385	275	165
Air	165	165	165	165
Agregat halus	836	818	800	783
20 mm	382	374	366	357
12,5 mm	525	514	503	491
<i>Fly ash</i>	55	165	275	385
HRWR	6,6	7,15	7,15	8,80
VMA	0,55	1,10	1,10	2,75



Gambar 2.1 Hasil uji kuat tekan beton umur 28 dan 56 hari
Dinakar (2013)

Rivera dkk. (2015) meneliti material yang lebih berkelanjutan dengan *fly ash* yang menggantikan semen dan beton. Penelitian ini berfokus pada penilaian efek tingkat substitusi dan jenis *fly ash* yang digunakan. Persentase substitusi *fly ash* terhadap semen 40, 60 dan 80%. Penelitian ini mengembangkan beton HVFA massa (beton HVFA dalam volume besar) dengan memaksimalkan penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen dan agregat. Beton yang mengandung *fly ash* sebanyak 728 kg/m³ menghasilkan kuat tekan lebih dari 30 MPa.

Umboh dkk. (2014) meneliti mengenai pengaruh pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) dari PLTU II Sulawesi Utara sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton. Tipe abu terbang yang digunakan yaitu kelas C dengan variasi substitusi sebesar 0, 30, 40, 50, 60 dan 70% berat semen. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan pengujian kuat tekan pada umur beton 7, 14, 21 dan 28 hari. Hasil pengujian menyatakan bahwa variasi substitusi paling optimum yang menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu beton dengan substitusi abu terbang terhadap semen sebesar 30% yang mendapatkan nilai kuat tekan sebesar 24,18 MPa pada umur beton 28 hari. Nilai kuat tekan terendah dihasilkan oleh beton dengan substitusi abu terbang terhadap semen sebesar 70% yaitu sebesar 3,645 MPa untuk beton dengan umur 7 hari. Adapun detail komposisi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.13 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.13 Komposisi campuran beton dengan variasi *fly ash* pada kondisi lapangan (m^3) (Umboh dkk, 2014)

Semen (Kg/m ³)	<i>Fly ash</i> (Kg/m ³)	Total (Kg/m ³)	Air (Kg)	fas	Pasir Kg/m ³	Agregat <10mm (Kg/m ³)	Agregat >10mm (Kg/m ³)	<i>Slump</i> (mm)	<i>Fly ash</i> (%)
300	0	300	140	0,47	664	740	493	85-95	0%
210	90	300	140	0,47	664	740	493	85-95	30%
180	120	300	140	0,47	664	740	493	85-95	40%
150	150	300	140	0,47	664	740	493	85-95	50%
120	180	300	140	0,47	664	740	493	85-95	60%
90	210	300	140	0,47	664	740	493	85-95	70%

Tabel 2.14 Hasil kuat tekan beton dengan presentase *fly ash* terhadap umur *curing* (perawatan beton) (Umboh dkk, 2014)

Presentase <i>fly ash</i>	Kuat Tekan Beton (MPa)			
	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari
0%	15,07	16,85	19,01	24,83
30%	14,18	14,2	16,41	24,18
40%	9,02	11,09	12,45	15,3
50%	7,09	7,64	9,13	12,28
60%	5,26	6,62	6,74	8,02
70%	3,56	4,39	4,66	4,79

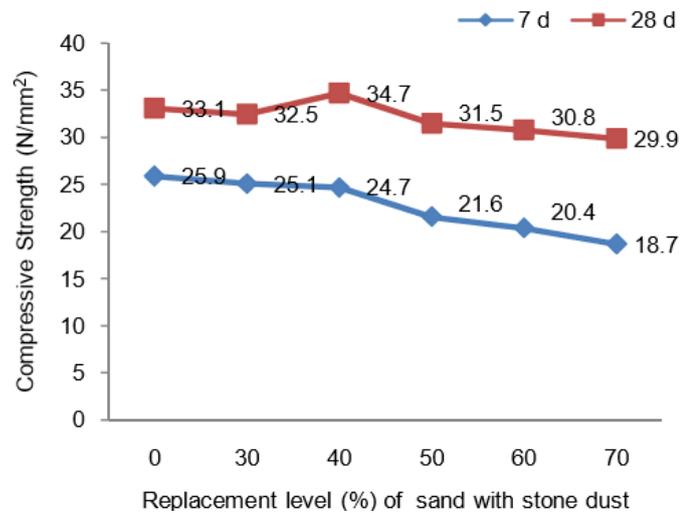
2.1.4. Penelitian terdahulu tentang campuran Limbah Abu Batu *Stone crusher* dalam beton

Naik dkk. (2014) dalam penelitian mengenai investigasi eksperimental limbah abu batu *stone crusher* sebagai substitusi agregat halus pada beton menggunakan enam jenis benda uji dengan masing-masing substitusi sebanyak 0, 30, 40, 50, 60 dan 70%. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan meningkat 4,8%

pada umur beton 28 hari. Campuran dengan hasil kuat tekan paling maksimal dicapai oleh beton A3 yaitu dengan substitusi limbah abu batu *stone crusher* sebesar 30% terhadap agregat halus, dengan pengujian kuat tekan pada umur beton 28 hari. Adapun detail substitusi agregat halus dapat dilihat pada Tabel 2.15 dan grafik hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Tabel 2.15 Hasil uji kuat tekan dan % substitusi agregat halus (Naik dkk, 2014)

Desain kubus	Kuat tekan rata-rata (N/mm ²)		% substitusi penggantian agregat halus
	7 d	28 d	
A1	25,9	33,1	0
A2	25,1	32,5	30
A3	24,7	34,7	40
A4	21,6	31,5	50
A5	20,4	30,8	60
A6	18,7	29,9	70



Gambar 2.2 Hasil uji kuat tekan

Naik dkk. (2014)

Khan dkk. (2016) dalam penelitiannya mengenai studi komparatif mengenai perilaku kuat tekan LVFAC (*light volume fly ash concrete*) dan HVFAC (*High Volume Fly ash concrete*) dalam penggantian parsial dengan limbah abu batu *stone crusher* dan agregat daur ulang. Penelitian ini menitikberatkan pada efektivitas penggunaan *fly ash* dalam meningkatkan kuat tekan beton. Substitusi limbah abu batu *stone crusher* yang digunakan terhadap agregat halus untuk beton yaitu sebesar 0, 5, 10, dan 15%. Agregat kasar daur ulang yang digunakan bervariasi pada tingkat 5, 10 dan 15%. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa variasi optimum

yang menghasilkan kuat tekan beton paling tinggi dihasilkan oleh beton dengan variasi 5% dari limbah abu batu *stone crusher* dalam semua benda uji LVFAC maupun HVFAC yaitu sebesar 41 MPa, 45,5 MPa, 36,21 MPa, 36,53 MPa, 34,88 MPa dan 34, 24 MPa. Pengujian kuat tekan dilakukan ketika umur beton mencapai 7 dan 28 hari. Kenaikan kuat tekan pada substitusi 10-12% lebih sedikit untuk LVFAC dalam semua benda uji. Penelitian ini menyarankan penggunaan *fly ash* yang diperbanyak karena sifat semennya merupakan kontribusi terbanyak dalam mendapatkan kuat tekan yang tinggi.

Menurut Patel dkk. (2013) mengenai substitusi semen menggunakan limbah abu batu yang efektif untuk mendapatkan *green concrete* dengan proporsi substitusi limbah abu batu terhadap semen sebanyak 0, 10, 20, 30, 40 dan 50%. Hasil kuat tekan paling optimum penggunaan abu limbah batu sebanyak 20% (B2) pada umur beton 7 dan 14 hari. Namun, kuat tekan paling tinggi pada umur 28 hari dihasilkan oleh beton B1. Proporsi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.16 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.17.

Tabel 2.16 Proporsi campuran beton M25 (Patel dkk, 2013)

No.	Tipe beton	Proporsi <i>mix design</i> beton				
		W/B rasio	C	F.A.	C.A.	S.W.
1	B0	0,40	1,00	1,01	2,50	-
2	B1	0,40	0,90	1,01	2,50	0,10
3	B2	0,40	0,80	1,01	2,50	0,20
4	B3	0,40	0,70	1,01	2,50	0,30
5	B4	0,40	0,60	1,01	2,50	0,40
6	B5	0,40	0,50	1,01	2,50	0,50

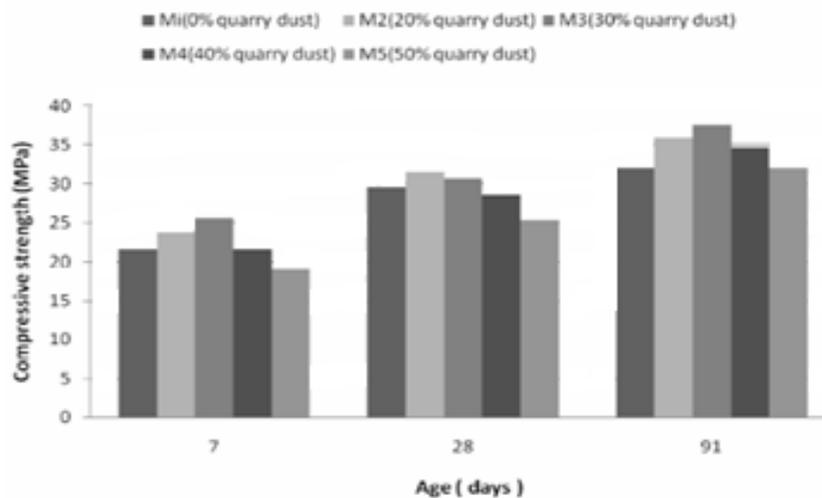
C = Cement, F.A. = Fine Aggregate, C.A. = Coarse Aggregate, S.W. = Stone Waste

Tabel 2.17 Hasil kuat tekan kubus (150×150×150) untuk M25 (Patel dkk, 2013)

Kode beton	Kuat tekan rata-rata umur 7 hari (N/mm ²)	Kuat tekan rata-rata umur 14 hari (N/mm ²)	Kuat tekan rata-rata umur 28 hari (N/mm ²)
B0	27,56	30,22	44,44
B1	18,96	20,59	31,56
B2	22,67	26,52	29,04
B3	13,67	20,07	21,04
B4	12,44	19,41	19,85
B5	6,81	10,07	10,81

Lohani dkk. (2012) dalam penelitiannya mengenai optimalisasi pemanfaatan debu tambang (*quarry dust*) sebagai pengganti sebagian pasir di

Indonesia. Penelitian ini agregat halus digantikan oleh debu tambang, yaitu produk sampingan dari unit pemecah batu (*stone crusher*). Penelitian ini mengganti 0, 20, 30, 40 dan 50% dari debu tambang. Pengujian yang dilakukan yaitu uji *slump flow*, uji kuat tekan (benda uji berbentuk kubus dan silinder), uji faktor pemadatan, kuat tarik belah, kuat lentur, modulus elastisitas dan daya serap air pada beton yang mengeras. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan paling optimum dicapai oleh substitusi debu tambang sebesar 30% pada umur beton 14 hari yaitu sebesar 26 MPa dan pada umur beton 90 hari yaitu sebesar 39 MPa. Namun pada umur beton 28 hari, substitusi debu tambang sebesar 20% merupakan yang paling optimum yaitu sebesar hampir 35 MPa. Adapun grafik hasil kuat tekan beton disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik hasil kuat tekan beton

Lohani dkk. (2012)

Sachan dkk. (2015) dalam penelitian mengenai investigasi eksperimental mengenai pengaruh agregat daur ulang dan limbah abu batu pada beton membuat 4 jenis benda uji dengan pengujian kuat tekan dilakukan saat umur beton 7 dan 28 hari pada benda uji berbentuk kubus ukuran 100 mm³. Substitusi limbah abu batu *stone crusher* terhadap agregat halus sebesar 0 dan 10%, sedangkan substitusi agregat daur ulang yang diuji sebesar 0, 50, 60, dan 70%. Hasil penelitian menyebutkan bahwa kuat tekan beton dengan substitusi limbah abu batu *stone crusher* terhadap agregat halus sebesar 60% dan substitusi agregat kasar agregat kasar sebesar 10% memiliki kekuatan tertinggi pada umur beton 7 dan 28 hari

dengan masing-masing kuat tekan mencapai 22 N/mm² dan 36,1 N/mm². Adapun detail proporsi campuran dan hasil kuat tekan disajikan pada Tabel 2.18.

Tabel 2.18 Hasil kuat tekan (Sachan dkk, 2015)

Desain kubus	Persentase penggantian limbah abu batu	Persentase penggantian agregat daur ulang	Kuat tekan rata-rata (MPa)	
			7d	28 d
A1	0	0	25,9	33,1
A2	10	50	17,0	30,3
A3	10	60	22,0	36,1
A4	10	70	20,5	33,0

Mir (2015) dalam penelitian peningkatan properti beton menggunakan debu *quarry* sebagai pengganti untuk pasir alam menggunakan debu *quarry* yang merupakan produk sampingan yang terbentuk dalam pemrosesan batu granit yang dipecah menjadi agregat kasar. Pengujian kuat tekan menggunakan benda uji sesuai standar IS 516: 1959 ukuran 150×150×150mm untuk beton umur 7, 14, 21 dan 27 hari. Penelitian ini menggunakan variasi tingkat debu *quarry* yang menggantikan pasir alam sebesar 0, 10 dan 20%. Hasil penelitian menyebutkan ada peningkatan kuat tekan beton yang signifikan ketika umur beton mencapai 21 hari. Kuat tekan maksimum dicapai beton dengan variasi substitusi debu *quarry* sebesar 20% pada pengujian kuat tekan ketika umur beton mencapai 27 hari, yaitu sebesar 35, 21 MPa. Adapun hasil kuat tekan beton terdapat pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Hasil kuat tekan (Mir, 2015)

Hari	Campuran Normal	10%	20%
7 hari	23,12	22,86	22,65
14 hari	24,45	23,87	23,50
21 hari	30,52	31,45	31,69
27 hari	33,00	34,46	35,21

Shukla dkk. (2017) dalam penelitiannya mengenai sifat beton normal menggunakan limbah abu batu dan *fly ash*. Penelitian ini menggunakan persentase penggantian pasir oleh limbah abu batu sebesar 15, 30, 45, 60% dan persentase penggantian semen dengan *fly ash* sebesar 5, 10%, 15% dan 20%. Penelitian ini menguji mengenai kuat tekan beton variasi dan dibandingkan dengan beton normal. Hasil kuat tekan tertinggi didapatkan pada variasi campuran limbah abu batu 30% dan *fly ash* 0%. Adapun hasil nilai *slump* dapat dilihat pada Tabel 2.20 dan hasil kuat tekan umur 28 hari pada benda uji berbentuk kubus dapat dilihat pada Tabel 2.21.

Tabel 2.20 Hasil uji *slump* (Shukla dkk, 2017)

No.	Persentase limbah abu batu (%)	Persentase <i>fly ash</i> (%)	<i>Slump</i> (mm)
1	0	0	89
2	15	0	81
3	30	0	73
4	45	0	58
5	60	0	55
6	15	5	93
7	30	10	86
8	45	15	78
9	60	20	70

Tabel 2. 21 Hasil uji kuat tekan benda uji kubus (Shukla dkk, 2017)

No.	Persentase limbah abu batu (%)	Persentase <i>fly ash</i> (%)	Kuat tekan setelah 28 hari <i>curing</i> (N/mm ²)
1	0	0	22,89
2	15	0	25,11
3	30	0	26,29
4	45	0	21,36
5	60	0	19,55
6	15	5	20,80
7	30	10	24,25
8	45	15	25,32
9	60	20	22,05

2.1.5. Penelitian Terdahulu tentang *superplastisizer* dan *silica fume*

Atiș dkk. (2003) dalam penelitiannya mengenai beton HVFA (*High Volume Fly ash*) mutu tinggi dan penyusutan pengeringan rendah menggunakan enam jenis benda uji. Penelitian ini menggunakan substitusi *fly ash* terhadap semen sebesar 50 dan 70%. Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat umur beton 1, 3, 7, 28, 91, 182 dan 365 hari. Campuran paling optimum yang menghasilkan kuat tekan tertinggi di antara dua benda uji yang mengandung *superplastisizer* (M3 dan M5) yaitu M5. Adapun detail proporsi campuran beton terdapat pada Tabel 2.22 dan hasil kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.23.

Tabel 2.22 Proporsi campuran beton (m³) (Atiș dkk, 2003)

Mix	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Cement (kg)	400	400	120	120	200	200
<i>Fly ash</i> (kg)	-	-	280	280	200	200
Pasir (kg)	600	600	600	600	600	600
Kerikil (kg)	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Air (L)	136	128	112	116	132	120

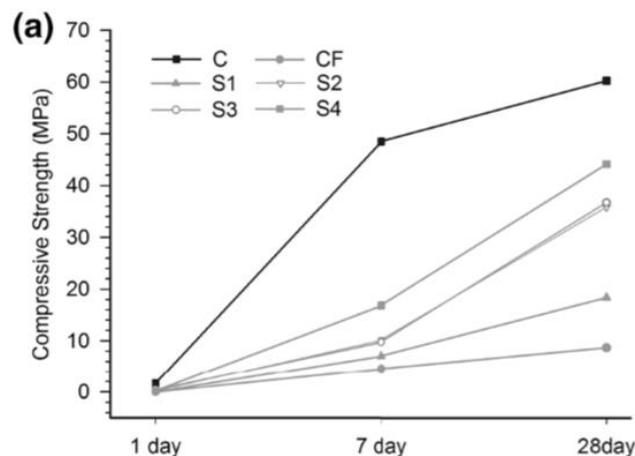
Tabel 2.22 Proporsi campuran beton (m³) (Atiș dkk, 2003) (lanjutan)

Optimum w/c rasio	0,32	0,32	0,29	0,29	0,30	0,30
Actual w/c rasio	0,34	0,32	0,28	0,29	0,33	0,30
Superplastisizer	5,6	-	5,6	-	5,6	-
Flow tabel (mm)	560	0	570	0	600	0

Tabel 2.23 Hasil uji kuat tekan beton (MPa) (Atiș dkk, 2003)

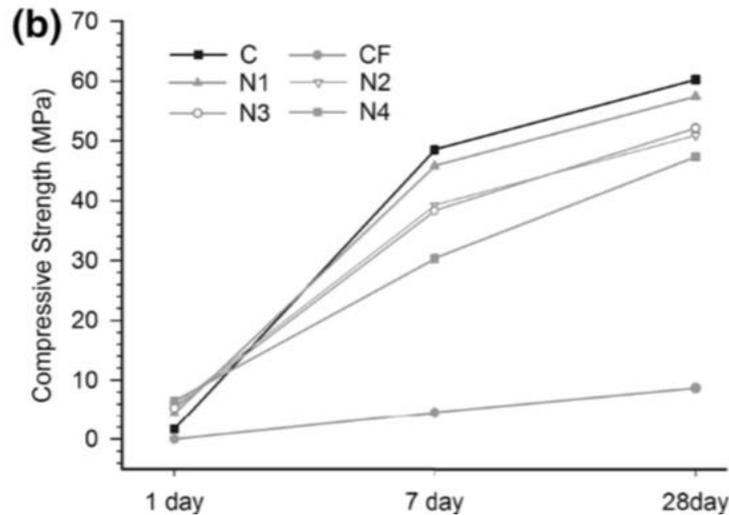
Umur	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1 hari	12,05	33,51	1,76	7,09	5,62	28,25
3 hari	38,41	45,27	16,34	16,64	31,85	35,30
7 hari	49,27	52,63	24,01	18,60	38,00	48,30
28 hari	60,75	64,95	33,25	30,55	57,00	66,55
1 bulan	65,03	68,1	40,75	41,10	60,20	79,90
6 bulan	69,13	72,29	42,45	43,00	67,30	81,60
1 tahun	71,00	77,08	45,00	48,05	67,60	83,60

Roychand dkk. (2015) dalam penelitian rekayasa mikro dan nano campuran *high volume ultrafine fly ash* dengan dan tanpa zat aditif. Penelitian ini menyajikan efek dari SF (*silica fume*) dan NS (nano silica) yang digunakan sendiri maupun dalam kombinasi dengan set akselerator (*superplastisizer*) dan atau HL (*hydrated lime*), pada UFFA (*ultra fine fly ash*) kelas F yang menggantikan 80% semen. Hasilnya menunjukkan dengan mengganti sebagian UFFA dengan SF, ada peningkatan 55% dalam kekuatan 7 hari yang selanjutnya meningkat menjadi 116% pada 28 hari di SL dibandingkan dengan SF. Hal ini dikaitkan dengan pengaruh SF terhadap peningkatan kekuatan komposit semen HVFA. Adapun grafik hasil uji kuat tekan sampel campuran *silica fume* dan nano silica berturut-turut disajikan pada Gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2.4 Hasil uji kuat tekan sampel campuran *silica fume*

Roychand dkk. (2015)



Gambar 2.5 Hasil uji kuat tekan sampel campuran nano silica
Roychand dkk. (2015)

Amran (2014) dalam penelitian pengaruh *silica fume* dan sikament-NN (*superplastisizer*) pada campuran beton mutu tinggi mengacu pada ACI (American Concrete Institute) menggunakan variasi penambahan *silica fume* sebesar 0, 5, 10%, 15% dan 20%. Variasi penambahan *silica fume* paling optimum yang menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari yaitu variasi penambahan *silica fume* sebesar 15%, dengan hasil kuat tekan sebesar 458,60 kg/cm². Hasil kuat tekan dan persentase peningkatan kuat tekan beton dengan variasi penambahan *silica fume* disajikan pada tabel 2.24. Penelitian ini juga mengkaji kuat tekan beton menggunakan variasi penambahan *silica fume* dan sikament-NN dengan hasil kuat tekan dan persentase peningkatan kuat tekan beton dapat dilihat pada tabel 2.25. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan maksimal sebesar 551,07 kg/cm² pada variasi penambahan SP 0,5% + SF 15%.

Tabel 2.24 Persentase peningkatan kuat tekan beton rata-rata setelah ditambahkan *Silica fume* terhadap beton normal (Amran, 2014)

Variasi Penambahan	Kuat Tekan Rata-rata (Kg/cm ²)	
	% Peningkatan (Dari Beton Normal)	28 Hari
0%	0%	371,79
5%	4,1%	386,88
10%	5,2%	390,88
15%	23,5%	458,60
20%	6,3%	396,32

Tabel 2.25 Persentase peningkatan kuat tekan beton rata-rata setelah ditambahkan SP dan SF terhadap beton normal (Amran, 2014)

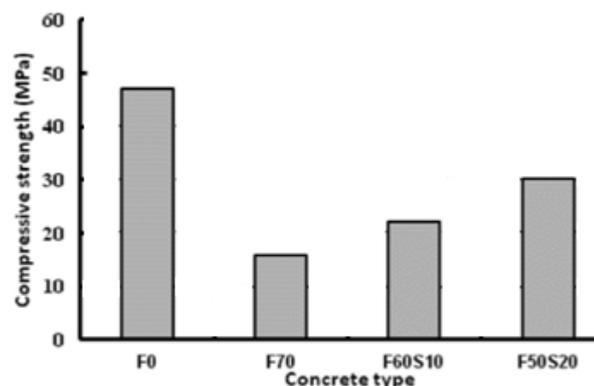
Variasi Penambahan	Kuat Tekan Rata-rata (Kg/cm ²)	
	% Peningkatan (Dari Beton Normal)	28 Hari
SP 0,5% + SF 15%	48%	551,07
SP 0,5% + SF 20%	15%	428,40
SP 1,0% + SF 15%	25%	466,15
SP 1,0% + SF 20%	11%	413,31

Rashad (2014) meneliti pengaruh *silica fume* dan terak terhadap kuat tekan dan ketahanan abrasi beton HVFA. Penelitian ini menjelaskan substitusi semen menggunakan *fly ash* sebanyak 70% untuk menghasilkan beton HVFA (F70). Kemudian F70 dimodifikasi dengan menyubstitusi *fly ash* (FA) sebanyak 10 dan 20% dengan *silica fume* (SF), serta grand granulated blast furnace slag (GGBS) dan kombinasi keduanya. Pengujian dilakukan pada umur beton 7, 28, 90 dan 180 hari. Adapun proporsi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.26 dan grafik hasil kuat tekan beton umur 28 hari dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Tabel 2.26 Proporsi campuran beton (Rashad, 2014)

Campuran Desain	Komposisi campuran/m ³						
	PC (kg)	FA (kg)	SF (kg)	GGBS (kg)	CA/Pasir*	w/b	HRWR (L)
F0	400	0	0	0	1,8	0,4	8
F70	120	280	0	0	1,8	0,4	8
F60S10	120	240	40	0	1,8	0,4	8
F50S20	120	200	80	0	1,8	0,4	8
F60G10	120	240	0	40	1,8	0,4	8
F50G20	120	200	80	0	1,8	0,4	8
F60S5G20	120	240	20	20	1,8	0,4	8
F60S10G10	120	200	40	40	1,8	0,4	8

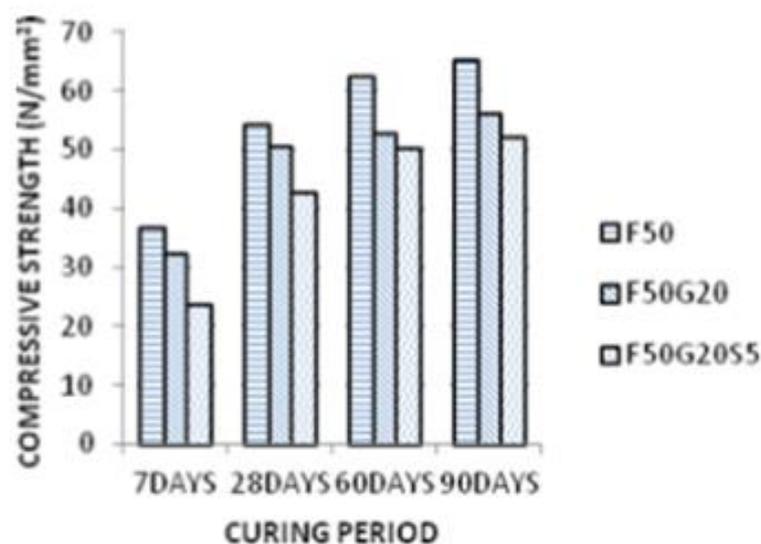
*agregat kasar ke rasio pasir sesuai berat



Gambar 2. 6 Grafik hasil kuat tekan beton umur 28 hari

Rashad (2014)

Venkatakrishnaiah dkk. (2015) meneliti mengenai pemanfaatan *fly ash* secara massal untuk beton memadat sendiri. Penelitian ini menyajikan upaya untuk mengembangkan campuran beton memadat sendiri yang menggunakan *fly ash* dengan volume tinggi (substitusi *fly ash* sebesar 50% terhadap semen) dan ditambahkan dengan pencampuran mineral lainnya seperti *Ground Granulated Blast furnace Slag* (GGBS) dan *silica fume*. Penelitian ini menggunakan tiga set campuran, yang pertama campuran 50% *fly ash* dari konten semen, set kedua campuran merupakan campuran set pertama ditambah 20% GGBS, kemudian set ketiga yaitu campuran set kedua ditambah dengan 5% *silica fume*. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan dari campuran paling optimum dihasilkan oleh beton dengan set campuran pertama pada semua umur beton (7, 14, 28, 60 dan 90 hari). Adapun hasil kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Grafik hubungan waktu *curing* dan hasil uji kuat tekan beton Venkatakrishnaiah dkk. (2015)

Wongkeo dkk. (2014) meneliti kuat tekan dan ketahanan dari klorida beton memadat sendiri yang mengandung *fly ash* dengan volume tinggi dan *silica fume*. Penelitian ini menggunakan *fly ash* berkalsium tinggi sebanyak 40-70% dan *silica fume* sebanyak 0-10% yang digunakan sebagai material substitusi semen sebesar 50, 60 dan 70% dari berat semen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi *fly ash* terhadap semen umumnya mengurangi kuat tekan SCC (*self compacting concrete*) pada semua usia uji (3, 7, 28 dan 90 hari). Namun, substitusi semen dengan *fly ash*

dan *silica fume* memperoleh kompresif yang lebih tinggi setelah 7 hari bila dibandingkan dengan campuran semen biner pada tingkat penggantian yang sama. Kekuatan tekan lebih dari 60 MPa (beton mutu tinggi) dapat diperoleh saat menggunakan *fly ash* berkalsium tinggi dan *silica fume* sebagai substitusi semen. Adapun detail proporsi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 2.27.

Tabel 2.27 Proporsi campuran beton SCC (Wongkeo dkk, 2014)

Mix	Proporsi (kg/m ³)						
	Air	PC	FA	SF	Agregat Halus	Agregat Kasar	SP (%)
W/B=0,3							
PC	180	600	0	0	1084	595	1,19
50FA	180	300	300	0	958	595	0,25
60FA	180	240	360	0	933	595	0,17
70FA	180	180	420	0	908	595	0,12
5SF	180	570	0	30	1072	595	1,33
10SF	180	540	0	60	1059	595	1,43
45FA5SF	180	300	270	30	958	595	0,37
55FA5SF	180	240	330	30	933	595	0,30
60FA5SF	180	180	390	30	908	595	0,20
40FA10SF	180	300	240	60	958	595	0,60
50FA10SF	180	240	300	60	933	595	0,48
60FA10SF	180	180	360	60	908	595	0,38
W/B=0,35							
PC	180	514	0	0	1131	621	1,50
50FA	180	257	257	0	1023	621	0,26
60FA	180	206	309	0	1001	621	0,19
70FA	180	154	360	0	980	621	1,13
5SF	180	489	0	26	1120	621	1,60
10SF	180	463	0	51	1110	621	1,75
45FA5SF	180	257	231	26	1023	621	0,40
55FA5SF	180	206	283	26	1001	621	0,32
60FA5SF	180	154	334	26	980	621	0,22
40FA10SF	180	257	206	51	1023	621	0,62
50FA10SF	180	206	257	51	1001	621	0,50
60FA10SF	180	154	309	51	980	621	0,40
W/B=0,4							
PC	180	450	0	0	1166	640	1,80
50FA	180	225	225	0	1072	640	0,26
60FA	180	180	270	0	1053	640	0,21
70FA	180	135	315	0	1034	640	0,13
5SF	180	428	0	23	1157	640	1,90
10SF	180	405	0	45	1147	640	2,10
45FA5SF	180	225	203	23	1072	640	0,43
55FA5SF	180	180	248	23	1053	640	0,34
60FA5SF	180	135	293	23	1034	640	0,28
40FA10SF	180	225	180	45	1072	640	0,64
50FA10SF	180	180	225	45	1053	640	0,52
60FA10SF	180	135	270	45	1034	640	0,46

*PC= Portland Cement; FA= Fly ash; SF= Silica fume; SP= Superplastisizer

2.1.6. Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Sampai saat penelitian ini dilakukan, sudah banyak penelitian yang dilakukan mengenai beton HVFA. Namun untuk variasi penggunaan limbah abu batu *stone crusher* sebagai material substitusi agregat halus (pasir) masih belum ada yang menelitinya. Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang disajikan pada tabel 2.28.

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang

No.	Peneliti	Substansi materi penelitian	
		Terdahulu	Sekarang
1	Huang dkk. (2013)	Menggunakan substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 0, 20, 40, 60 dan 80%. Dilakukan pengujian terhadap kuat tekan, belah tarik, lentur dan ketahanan abrasi pada umur beton 1, 3, 7, 28, 56, 91, 182 dan 365 hari.	Menggunakan substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen hanya sebesar 0 dan 40%. Hanya melakukan pengujian kuat tekan beton yang dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.
2	Siddique dkk. (2012).	Meneliti substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen pada beton dengan dan tanpa campuran serat polyester. Proporsi campuran menggunakan standar spesifikasi IS: 10262-1982 dan menggunakan 12 jenis benda uji.	Meneliti mengenai substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen pada beton dengan campuran limbah abu batu <i>stone crusher</i> dan tambahan bahan aditif berupa <i>superplastisizer</i> dan <i>silica fume</i> . Proporsi campuran menggunakan standar spesifikasi ACI 211 dan menggunakan empat jenis benda uji.

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

3	Siddique (2004)	Meneliti mengenai pemanfaatan <i>fly ash</i> sebagai substitusi semen sebanyak 40, 45 dan 50%. Penelitian ini menguji kuat tekan, belah tarik, lentur dan ketahanan abrasi masing-masing diuji pada umur 7, 28, 91 dan 365 hari.	Memanfaatkan <i>fly ash</i> sebagai substitusi semen sebanyak 40% dair berat semen. Penelitian ini hanya menguji kuat tekan dan masing-masing diuji pada umur 14, 28 dan 56 hari.
	Khan dkk. (2016)	Membandingkan kuat tekan LVFAC (<i>light volume fly ash concrete</i>) dan HVFAC (<i>High Volume Fly ash concrete</i>) dalam substitusi limbah abu batu <i>stone crusher</i> dan agregat daur ulang. Subtitusi limbah abu batu <i>stone crusher</i> yang digunakan terhadap agregat halus untuk beton yaitu sebesar 0, 5, 10, dan 15%. Agregat kasar daur ulang yang digunakan bervariasi pada tingkat 5, 10 dan 15%. Pengujian kuat tekan beton dilakukan	Hanya meneliti HVFAC (<i>High Volume Fly ash concrete</i>) dalam penggantian parsial dengan limbah abu batu <i>stone crusher</i> . Subtitusi limbah abu batu <i>stone crusher</i> yang digunakan terhadap agregat halus untuk beton yaitu sebesar 0, 10, 15, dan 20%. Pengujian kuat tekan dilakukan ketika umur beton mencapai 14, 28 dan 56 hari.

ketika umur mencapai 7 dan 28 hari.

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

4	Rivera dkk. (2015)	Membandingkan <i>fly ash</i> kelas F dan C untuk menggantikan sebagian semen pada beton dengan substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 40, 60 dan 80%. Pengujian kuat tekan pada umur beton 7, 14 dan 90 hari.	Hanya meneliti <i>fly ash</i> kelas C untuk menggantikan sebagian semen pada beton dengan substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 0 dan 40% untuk kuat tekan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.
5	Dinakar (2013)	Meneliti perilaku beton memadat sendiri menggunakan variasi substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 10, 30, 50 dan 70%. Pengujian dilakukan pada umur beton 28 dan 56 hari.	Meneliti perilaku HVFA menggunakan variasi substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 10%, 15% dan 20%. Pengujian dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.
6	Umboh dkk. (2014)	Meneliti pengaruh abu terbang (<i>fly ash</i>) yang berasal dari PLTU II Sulawesi Utara sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton. Tipe <i>fly ash</i> yang digunakan kelas C dengan variasi substitusi sebesar 0, 30, 40, 50, 60 dan 70% berat semen.	Meneliti mengenai pengaruh pemanfaatan abu terbang (<i>fly ash</i>) yang berasal dari CV. Lestari dengan variasi substitusi sebesar 0 dan 50% berat semen. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari.

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

7	Patel dkk. (2013)	Manggunakan limbah abu batu sebagai material terhadap semen sebanyak 0, 10, 20, 30, 40 dan 50% untuk kuat tekan pada umur beton 7, 14 dan 28 hari.	Manggunakan limbah abu batu sebagai material terhadap agregat halus sebanyak 0, 10%, 15% dan 20% untuk kuat tekan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.
9	Lohani dkk. (2012)	Menggunakan debu tambang (limbah abu batu <i>stone crusher</i>) sebagai pengganti sebagian pasir dengan variasi substitusi sebesar 0, 20, 30, 40 dan 50%. Digunakan benda uji silinder dan kubus.	Menggunakan debu tambang (limbah abu batu <i>stone crusher</i>) sebagai pengganti sebagian pasir dengan variasi substitusi sebesar 0, 10,15, 20%. Hanya digunakan benda uji berbentuk silinder.
10	Sachan dkk. (2015)	Meneliti pengaruh agregat daur ulang dan limbah abu batu <i>stone crusher</i> pada beton. Terdapat 4 jenis benda uji substitusi limbah abu batu <i>stone crusher</i> sebesar 0 dan 10%, substitusi agregat kasar daur ulang 0, 50, 60 dan 70%. Pengujian kuat	Meneliti mengenai pengaruh substitusi limbah abu batu <i>stone crusher</i> sebesar 0, 10%, 15% dan 20% terhadap kuat tekan beton HVFA. Terdapat empat jenis benda uji dengan pengujian kuat tekan dilakukan pada 14, 28

tekan dilakukan pada 7 dan 56 hari pada benda uji berbentuk silinder. dan 28 hari pada benda uji berbentuk kubus.

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

11	Mir (2015)	<p>Menggunakan produk sampingan yang terbentuk dalam pemrosesan batu granit. Pengujian kuat tekan menggunakan benda uji sesuai standar IS 516: 1959 dengan ukuran 150×150×150 mm untuk beton umur 7, 14, 21 dan 27 hari. Penelitian ini menggunakan variasi tingkat debu <i>quarry</i> yang menggantikan pasir alam sebesar 0, 10 dan 20%.</p>	<p>Menggunakan produk sampingan yang terbentuk dalam pemrosesan batu pecah (<i>stone crusher</i>). Pengujian kuat tekan menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran 15×30 cm untuk beton umur 14, 28 dan 56 hari. Penelitian ini menggunakan variasi tingkat limbah abu batu <i>stone crusher</i> sebesar 0, 10%, 15% dan 20%.</p>
12	Atiş dkk. (2003)	<p>Meneliti substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 50 dan 70%. Terdapat dua jenis benda uji yang menggunakan substitusi <i>fly ash</i> dan campuran <i>superplastisizer</i> dari total enam jenis benda uji. Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat umur beton 1, 3, 7, 28, 91,182 dan 365 hari.</p>	<p>Terdapat dua jenis benda uji yang menggunakan substitusi <i>fly ash</i> terhadap semen sebesar 0 dan 40%. Semua benda uji menggunakan campuran <i>superplastisizer</i>, kecuali beton LAB 0% sebagai kontrol. Pengujian kuat tekan dilakukan pada</p>

			saat umur beton 14, 28 dan 56 hari.
13	Venkatakrishnaiah dkk. (2015)	Meneliti campuran beton memadat sendiri yang menggunakan <i>fly ash</i> dengan volume tinggi	Meneliti campuran beton HVFA menggunakan substitusi <i>fly ash</i> sebesar 50% terhadap semen

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

		(substitusi <i>fly ash</i> sebesar 50% terhadap semen) dan ditambahkan dengan pencampuran mineral lainnya seperti <i>Ground Granulated Blast furnace Slag</i> (GGBS) dan <i>silica fume</i> . Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat umur beton 7, 14, 28, 60 dan 90 hari.	dengan bahan aditif berupa <i>superplastisizer</i> dan <i>silica fume</i> . Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.
14	Amran (2014)	Meneliti pengaruh penggunaan <i>silica fume</i> dan <i>sikament-nn</i> pada campuran beton mutu tinggi menggunakan sepuluh jenis variasi penambahan <i>silica fume</i> dan <i>sikament-nn</i> pada beton.	Meneliti pengaruh penggunaan <i>silica fume</i> dan <i>superplastisizer</i> pada campuran beton HVFA. Hanya menggunakan satu jenis persentase variasi pada semua benda uji.
15	Shukla dkk. (2017)	Menggunakan persentase penggantian pasir oleh limbah abu	Menggunakan persentase penggantian pasir oleh limbah abu

		batu sebesar 15, 30, 45, 60% dan persentase penggantian semen dengan <i>fly ash</i> sebesar 5, 10%, 15% dan 20%.	batu sebesar 10, 15, 20% dan persentase substitusi semen dengan <i>fly ash</i> sebesar 0 dan 40%.
16	Wongkeo dkk. (2014)	Penelitian ini menggunakan <i>fly ash</i> berkalsium tinggi	Penelitian ini menggunakan <i>fly ash</i> sebesar 0% untuk beton

Tabel 2.28 Perbedaan penelitian terdahulu dan sekarang (lanjutan)

		sebanyak 40-70% dan <i>silica fume</i> sebanyak 0-10% yang digunakan sebagai material substitusi semen pada beton memadat sendiri (SCC/ <i>self compacting concrete</i>). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 3, 7, 28 dan 90 hari.	normal dan 40% untuk beton variasi. <i>Silica fume</i> juga digunakan sebagai bahan aditif campuran beton. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari. Meneliti beton dengan kuat tekan normal dan bukan beton memadat sendiri (<i>Self Compacting Concrete</i>).
17	Rashad (2015)	Meneliti mengenai beton substitusi semen menggunakan <i>fly ash</i> sebanyak 70% untuk menghasilkan beton HVFA (F70). Kemudian F70 dimodifikasi dengan mengganti sebagian <i>fly ash</i> (FA) sebanyak 10 dan 20% dengan <i>silica</i>	Meneliti mengenai beton substitusi semen menggunakan <i>fly ash</i> sebanyak 0 dan 40% dengan bahan tambah <i>superplastisizer</i> 5% dan <i>silica fume</i> 15%. Kemudian dikombinasikan dengan limbah abu batu <i>stone</i>

<p><i>fume</i> (SF), serta grand granulated blast furnace slag (GGBS) dan kombinasi keduanya. Pengujian dilakukan pada umur beton 7, 28, 90 dan 180 hari.</p>	<p><i>crusher</i> sebagai substitusi agregat halus yang masing-masing substitusi sebesar 0, 10%, 15% dan 20%. Pengujian dilakukan pada umur beton 14, 28 dan 56 hari.</p>
---	---

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Beton

“Beton adalah campuran antara semen *portland* atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan tambah membentuk massa padat (BSN, 2002).” Tjokrodinuljo (1996) menyebutkan kekurangan dan kelebihan beton sebagai berikut ini.

a. Kelebihan beton

- 1) Harga relatif lebih murah
- 2) Termasuk bahan yang memiliki kuat tekan tinggi, tahan pembusukan/pengaratn karena kondisi lingkungan.
- 3) Beton segar mudah diangkut dan dicetak dalam bentuk yang diinginkan.
- 4) Apabila beton dikombinasikan dengan baja tulangan (kuat tarik tinggi) dapat dibuat menjadi struktur berat.
- 5) Beton dapat diperbaiki dengan cara disemprotkan ke permukaan beton lama dan perbaikan dengan cara *grouting* atau injeksi ke dalam retakan beton yang bermasalah.
- 6) Beton segar dapat dipompakan sehingga memudahkan untuk dituang pada tempat yang sulit dijangkau.
- 7) Beton termasuk material yang tahan aus dan tahan api, sehingga biaya perawatan juga rendah.

b. Kekurangan beton

- 1) Beton sulit untuk dapat kedap air sempurna, sehingga selalu dapat dimasuki air dan air yang membawa kandungan garam dapat merusak beton.
- 2) Beton segar akan menyusut saat pengeringan dan beton keras akan mengembang jika basah, sehingga perlu diberikan dilatasi (*contraction joint*) pada beton yang panjang/ lebar untuk memberi tempat bagi susut dan kembang beton.
- 3) Beton keras mengembang dan menyusut bila terjadi perubahan suhu, sehingga diperlukan dilatasi (*expansion joint*) agar dapat mencegah terjadinya retak akibat perubahan suhu yang signifikan.
- 4) Kuat tarik beton rendah, sehingga mudah terjadi retak. Oleh karena itu beton perlu diberi baja tulangan atau tulangan kasa (*meshes*).
- 5) Beton bersifat getas, sehingga perlu dihitung dan didetail secara seksama agar setelah dikompositkan dengan baja dapat bersifat daktail, terutama pada struktur yang tahan terhadap gempa.

2.2.2. Beton HVFA

Beton HVFA (*High Volume Fly ash*) merupakan inovasi untuk memaksimalkan penggunaan limbah *fly ash* untuk menyubstitusi semen dalam pembuatan beton. Menurut Sivasundaram dkk (1990) mengganti rasio semen di atas 30% dengan *fly ash* sudah mendefinisikan beton HVFA, namun mengganti rasio semen sebanyak 40% menjadi batas maksimum atas substitusi *fly ash* terhadap semen. Kuantitas substitusi semen 40% juga telah ditetapkan di banyak kasus dan beberapa penelitian meyakini bahwa beton HVFA harus memiliki kuantitas *fly ash* lebih dari 50%. Bilodeau dkk. (1994) juga menyatakan penggunaan *fly ash* pada beton berkisar antara 55-60% dari berat semen. Dinamakan HVFA karena penggunaan *fly ash* lebih besar daripada semen pada beton.

2.2.3. Bahan Penyusun Beton HVFA

a. Semen

Semen merupakan salah satu unsur pembentuk beton. Kandungan silika pada semen menjadi pengikat utama antar agregat pada beton. Rajiman (2015)

menyebutkan bahwa unsur pembentuk utama semen adalah kalsium yang berasal dari batu kapur.

Semen yang digunakan pada penelitian ini yaitu semen *portland*. “Semen *portland* yaitu semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain (BSN, 2004).” Menurut “PUBI (1982) semen *portland* ialah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan.”

Menurut Tjokrodimuljo (1996) fungsi semen untuk merekatkan agregat agar terjadi suatu massa yang padat. Selain itu juga untuk mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat. Walaupun semen hanya kira-kira sekitar 10% dari volume beton, namun karena merupakan bahan yang aktif maka perlu dipelajari maupun dikontrol secara ilmiah.

b. Air

Menurut “BSN (2002) air yang boleh digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.” BSN (2002) juga menyebutkan bahwa tidak boleh menggunakan air yang tidak dapat diminum kecuali memenuhi ketentuan yang disyaratkan.

Tjokrodimuljo (1996) menyebutkan bahwa air dibutuhkan untuk berreaksi dengan semen, serta menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar memudahkan dalam pengerjaan dan pematatan beton. Agar dapat berreaksi dengan semen, air yang diperlukan hanya sekitar 25% dari berat semen. Namun di lapangan akan sulit dikerjakan apabila nilai faktor air semen yang digunakan kurang dari 0,35.

Air perawatan (*curing*) dapat memakai air yang digunakan untuk pengadukan, namun tidak boleh menimbulkan noda atau endapan yang dapat merusak warna permukaan beton. Penyebab utama air yang kotor dan dapat menyebabkan perubahan warna umumnya besi dan zat organik dalam air.

c. Agregat

Agregat merupakan butiran yang berfungsi sebagai filler (material pengisi) campuran mortar atau beton. Agregat ini menempati kurang lebih sebanyak 70% volume mortar atau beton (Tjokrodimuljo, 1996). Walaupun hanya sebagai pengisi beton, namun agregat sangat berpengaruh terhadap mutu beton. Menghemat penggunaan semen *portland*.

Adapun jenis bentuk butiran agregat yaitu agregat berbentuk bulat, bulat sebagiaian, bersudut, panjang dan pipih. Agregat yang disarankan untuk digunakan dalam campuran beton yaitu agregat berbentuk bersudut. Hal tersebut dikarenakan agregat bersudut memiliki rongga berkisar antara 38-40% yang membuat ikatan antar butiran agregat baik, sehingga daya lekat yang dihasilkan juga baik.

1) Agregat kasar

Agregat kasar merupakan agregat yang memiliki butir-butir yang besar. Menurut Tjokrodimuljo (1996) ukuran agregat kasar yaitu agregat yang butirannya lebih besar dari 4,80 mm. Secara umum agregat kasar biasa disebut sebagai kerikil, kericak, batu pecah atau batu *split*.

2) Agregat halus

Menurut Tjokrodimuljo (1996) agregat halus memiliki ukuran lebih kecil dari 4,80 mm. Namun agregat butirannya lebih kecil dari 1,20 mm disebut dengan pasir halus, agregat yang ukurannya lebih kecil dari 0,075 mm disebut *silt* dan agregat yang ukurannya lebih kecil dari 0,002 mm disebut *clay*.

d. Fly ash

Fly ash adalah residu halus hasil dari pembakaran batu bara dan dihantarkan oleh aliran udara panas (BSN, 2014). ASTM (1991) menyebutkan bahwa *fly ash* merupakan bahan yang mengandung senyawa silika atau silika alumina dan dalam bentuk yang sangat halus mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida sehingga dapat membentuk bahan yang memiliki sifat mengikat (*cementitious*). Menurut BSN (2014) *fly ash* merupakan material yang termasuk dalam kelompok pozzolan. "PUBI (1982) menyebutkan bahwa pozzolan adalah bahan alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur silikat dan atau aluminat yang reaktif." Pozzolan sendiri tidak memiliki sifat semen, namun apabila dalam keadaan halus atau lolos saringan 0,21mm dan berreaksi dengan air serta kapur padam pada suhu 24-27 derajat celsius dapat menjadi massa padat yang tidak

larut dalam air (Tjokrodimuljo, 1996). Menurut Tjokrodimuljo (1996) kuat tekan beton pada umur 28 hari dengan menggunakan pozzolan menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dari beton normal, namun sesudah 90 hari kuat tekannya dapat melampaui beton normal.

Menurut CIRCA (2002), keuntungan menggunakan *fly ash* dalam beton adalah sebagai berikut ini.

1) Keuntungan menggunakan *fly ash* pada beton plastis

a) Meningkatkan *workability*

Hal tersebut dikarenakan *fly ash* berbentuk bulat menghasilkan pasta dengan plastisitas yang lebih baik dan mengurangi jumlah air yang dibutuhkan dalam campuran beton.

b) Mengurangi segregasi

Peningkatan kepadatan beton mengandung *fly ash* memberikan tambahan bodi pada beton keadaan plastis yang tahan terhadap segregasi.

c) Mengurangi *bleeding*

Konten air yang lebih rendah diperlukan untuk pengerjaan beton *fly ash* untuk mengurangi *bleeding*.

d) Meningkatkan daya pompa beton

Bentuk bulat *fly ash* bertindak seperti bantalan bola kecil akan mengurangi *internal friction* (gesekan internal), sehingga menghasilkan campuran beton yang lebih mudah dipompa.

e) Mengurangi keausan peralatan

Beton yang mengandung *fly ash* mengurangi keausan pada pengiriman dan peralatan pabrik karena dapat mengurangi gesekan. Hal tersebut dikarenakan bentuk bulat dari *fly ash*.

2) Keuntungan jangka panjang menggunakan *fly ash* dalam beton

a) Meningkatkan kuat tekan beton setelah umur 28 hari

Penelitian menunjukkan kuat tekan beton yang mengandung *fly ash* akan meningkat setelah melewati usia 28 hari. Peningkatan *workability* dan pengurangan kebutuhan air, beton yang mengandung *fly ash* memberikan faktor air semen yang lebih rendah sehingga menghasilkan kekuatan yang unggul dan umur yang lebih panjang.

b) Mengurangi susut karena pengeringan beton

Fly ash dapat mengurangi air sebanyak 10% dalam kondisi plastisnya, sehingga beton dapat mempertahankan *workability* dan mengurangi susut.

c) Mengurangi permeabilitas

Efek pembalutan permeabilitas dari bentuk bulat partikel *fly ash* dapat membantu mengurangi permeabilitas. Reaksi kimia antara *fly ash* dan kapur membentuk ikatan tambahan yang dapat memblokir saluran *bleeding* dan mengisi pori.

d) Resistensi terhadap serangan sulfat

Fly ash yang dikombinasikan dengan kalsium hidroksida membuatnya tidak bisa bereaksi dengan sulfat.

e) Mengurangi panas hidrasi

Massa beton yang besar biasanya menghasilkan suhu internal yang tinggi dan dapat mengakibatkan retak karena panas. Beton yang mengandung *fly ash* menghasilkan panas yang jauh lebih sedikit daripada beton dengan pemakaian semen *portland* 100%.

f) Biaya lebih ekonomis

Apabila pengaplikasian *fly ash* pada beton tepat, beton yang mengandung *fly ash* menghasilkan biaya yang lebih kompetitif dan dapat mengurangi waktu proyek dengan penempatan material yang mudah, peralatan lebih sedikit dan kebutuhan sumber daya manusia yang juga lebih sedikit.

g) Faktor lingkungan

Mencampurkan *fly ash* dalam *mix design* beton memungkinkan produsen semen dan beton dapat mengurangi emisi GHG terkait dengan pembuatan semen *portland* dan beton.

e. Limbah abu batu *stone crusher*

Limbah abu batu adalah limbah yang diperoleh dari industri batu pecah (*stone crusher*), sehingga komposisi kimia dari limbah abu batu sama dengan agregat kasar yang diperoleh dari industri tersebut. Limbah abu batu yang digunakan untuk beton harus memiliki modulus kehalusan yang sebanding dengan

agregat halus yang digunakan dalam pembuatan beton sehingga tidak akan menyerap terlalu banyak air dari beton dan *workability* beton dapat dipertahankan (Bansal dan Kumar, 2018).

2.2.4. Admixture (bahan tambah)

Admixture menurut ACI 116R adalah material selain air, agregat, semen hidrolis dan serat yang digunakan sebagai komposisi beton atau mortar yang ditambahkan segera sesaat sebelum proses pengadukan beton. Bahan tambah yang digunakan biasanya dalam jumlah yang sangat sedikit dan harus dalam pengawasan ketat. Bahan tambah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu bahan kimia tambahan atau *chemical admixture*. *Chemical admixture* yang dipakai pada penelitian ini ada dua, yaitu *superplastisizer* dan *silica fume*.

a. Superplastisizer

Menurut ACI 116R *superplastisizer* atau HRWR (*High Range Water Reducing*) adalah bahan tambah kimia berbentuk cairan dan berfungsi mereduksi air yang diperlukan *mix design*. *Superplastisizer* juga berfungsi mempercepat proses ikatan serta pengerasan beton. Menurut Paul dan Antoni (2004) *superplastisizer* digunakan untuk campuran beton mutu tinggi karena dapat mengurangi air sampai 30% dan sangat meningkatkan kelecakan campuran beton dengan *slump* sebesar 7,5 cm menjadi 20 cm. Kelemahan *superplastisizer* yaitu *flowability* yang tinggi dan hanya dapat bertahan sekitar 30-60 menit saja, setelah itu air berkurang sangat cepat. Hal tersebut biasa disebut dengan *slump loss*.

b. Silica fume

Silica fume merupakan produk yang dihasilkan dari pengurangan kuarsa kemurnian tinggi dengan batu bara dalam tungku busur listrik selama produksi logam silikon atau paduan *ferrosilikon* (ACI, 2002). Menurut Rashad dkk. (2014) secara umum *silica fume* adalah bahan pozzolan yang sangat reaktif karena sifat fisiknya yang sangat halus dan kandungan *amorphous silicon dioxide* yang sangat tinggi.

Rashad dkk. (2014) menjelaskan mekanisme *silica fume* dalam beton berperan sebagai berikut ini.

- 1) Perbaikan ukuran pori dan densifikasi matriks.
- 2) Perbaikan antar muka pasta-agregat semen.

3) Reaksi dengan kapur bebas

ACI (2002) menyebutkan distribusi ukuran partikel *silica fume* menunjukkan sebagian besar partikel lebih kecil dari satu mikrometer. *Silica fume* biasanya digunakan untuk tiga kategori beton sebagai berikut ini.

- 1) Produksi dari beton dengan permeabilitas rendah dengan peningkatan durabilitas.
- 2) Produksi dari beton dengan kuat tekan tinggi.
- 3) Menjadi pengganti semen (namun dari segi biaya membuat penggunaa *silica fume* mengganti semen tidak layak digunakan).

Menurut ACI (2002) *silica fume* telah sukses digunakan untuk memproduksi beton mutu tinggi (lebih dari 18000 psi), beton permeabilitas rendah dan beton tahan kimia. Guna memaksimalkan kuat tekan beton, *silica fume* harus selalu digunakan dengan *water-reducing admixture* dan lebih disarankan menggunakan *high range water reducer (HRWR) admixture*.

2.2.5. Uji Slump

Uji *slump* merupakan metode pengujian untuk mengetahui nilai *flowability*/ konsistensi/ kekakuan dari campuran beton segar. Nilai yang dihasilkan dari uji *slump* dalam campuran beton menunjukkan banyaknya air yang digunakan. Semakin besar nilai *slump* maka adukan beton akan semakin encer dan hal tersebut menunjukkan beton semakin mudah dikerjakan. Menurut Tjokrodinuljo (1996) umumnya nilai *slump* berkisar antara 5 sampai 12,5 cm.

Prosedur uji *slump* merupakan salah satu cara untuk mengukur derajat *workability* menggunakan alat *slump* berbentuk kerucut terpancung yang ditemukan oleh Abrams. BSN (2013) menyebutkan *slump* harus segera diukur dan dicatat setiap kali pengadukan dimana spesimen dibuat setelah diaduk ulang dalam bak penampung.

2.2.6. Perawatan Beton (Curing)

Perawatan beton atau *curing* adalah suatu proses perawatan untuk menjaga tingkat kelembaban dan temperatur yang ideal untuk mencegah hidrasi (terlalu cepat kehilangan air) yang berlebihan secepatnya setelah proses *finishing* selesai

dan waktu total setting beton telah tercapai. Perawatan beton dilaksanakan secepatnya setelah beton dilepas dari cetakan.

2.2.7. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah beban maksimum dibagi satuan luas yang dapat menyebabkan benda uji beton hancur apabila dibebani dengan gaya tertentu, yang dihasilkan oleh mesin uji tekan Umboh dkk. (2014). Cara mengetahui kuat tekan beton dengan benda uji silinder yaitu menggunakan alat uji tekan beton menggunakan prosedur uji BSN (2011). Secara matematis kuat tekan beton dapat dihitung sebagai berikut ini.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

$f'c$ = Kuat Tekan Beton (MPa atau N/mm^2)

P = Beban Maksimum (N)

A = Luas Penampang (mm^2)

2.1.7. Pengaruh Umur pada Kuat Tekan Beton

Salah satu yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah umur beton. Pada beton normal, peningkatan kuat tekan beton yang paling signifikan terjadi maksimal pada umur 28 hari. Namun sebaliknya, beton HVFA akan mengalami peningkatan kuat tekan lebih signifikan setelah umur 28 hari. Hal tersebut sesuai dengan yang disebutkan CIRCA (2002) mengenai keuntungan jangka panjang menggunakan *fly ash* dalam beton yang salah satunya meningkatkan kuat tekan beton setelah umur 28 hari. Adapun contoh grafik hubungan umur beton dan kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 2.1, 2.3 dan 2.7