

**KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG PERKUATAN
CARBON FIBER WRAPS (CFW)^[F1]
(BALOK DIBEKANI OLEH BEBERAPA KONDISI PEMBEKANAN AWAL DAN
KEMUDIAN DIPERKUAT DENGAN CFW)**

Albert Aun Umbu Nday¹, Priyosulistyo² dan Andreas Triwiyono³

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang, Jl. Adisucipto Penfui Kupang
Email: albertaun.umbunday@gmail.com

²Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Jl. Bulaksumur Yogyakarta

³Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Jl. Bulaksumur Yogyakarta
Received Date: 26 Mei 2017 Approved Date: 20 Juli 2017

ABSTRAK

Penggunaan struktur beton bertulang pada suatu bangunan sudah lazim. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kekuatan lentur ultimit oleh tambahan carbon fiber wraps (CFW) pada balok beton bertulang yang sudah dan sedang dibekani oleh beban mati. Dalam penelitian ini digunakan 4 buah Benda uji balok, terdiri dari : 1 balok kontrol (BK), dan 1 balok yang diperkuat dengan CFW tanpa beban awal (BP 0%), serta 2 balok yang diperkuat dengan CFW setelah balok dibekani 30% dan 60% beban ultimit (BP 30% dan BP 60%). Balok memiliki lebar 150 mm, tinggi 200 mm, dan panjang 2000 mm. Balok sederhana dengan dua tumpuan dikedua ujungnya dibekani terpusat tepat di tengah bentang. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan terhadap BK yaitu balok BP 0%, BP 30%, dan BP 60% mengalami peningkatan kekuatan secara berturut-turut sebesar 114,28%; 108,57%; dan 105,71%. Kapasitas lentur hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil teoritis secara berturut-turut pada BK, BP 0%, BP 30 %, dan BP 60% yaitu 94,42%, 102,78%, 97,68%, dan 94,41%. Kekakuan kondisi retak pada beban 7 kN terhadap BK yaitu balok BP 0%, BP 30%, dan BP 60% mengalami peningkatan kekakuan secara berturut-turut sebesar 117,27%; 96,99%; 90,20%. Daktilitas terhadap BK yaitu balok BP 0%, BP 30%, dan BP 60% mengalami peningkatan daktilitas secara berturut-turut sebesar 45,90% , 63,97%, 45,47%. Pola keruntuhan yang terjadi pada BK, BP 0%, BP 30%, dan BP 60% adalah keruntuhan lentur.

Kata kunci : Balok persegi, perkuatan, kapasitas lentur.

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini penggunaan beton bertulang sebagai struktur utama suatu bangunan sudah merupakan hal yang lazim dalam dunia konstruksi. Dalam perkembangannya yang cukup pesat, evaluasi terhadap kinerja struktur dilapangan perlu mendapat perhatian khusus untuk mendapatkan hasil yang baik. Evaluasi terhadap mutu beton merupakan keharusan mulai dari proses pembuatannya sampai pengerasannya. Perlakuan dan perawatan beton merupakan hal yang mendasar dari sistem evaluasi mutu. Dalam hal ini

perawatan juga harus sejalan dengan rancangan mutu beton dan proses pembuatannya yang secara prosedur dan standar sudah ditetapkan.

Dalam kasus-kasus tertentu kadangkala mutu beton yang telah dilaksanakan tidak sesuai rencana, walaupun sudah melalui *quality control* dan *quality assurance* yang sudah ditetapkan. Hal ini dapat terjadi karena adanya kesalahan dalam proses perencanaan dan pelaksanaan, ataupun disebabkan oleh faktor alam seperti bencana alam, sehingga perlu diambil

langkah-langkah untuk meningkatkan kualitas beton.

Penelitian ini membahas tentang penambahan *carbon fiber wraps* yang di berikan pada struktur balok yang tidak mampu mendukung kebutuhan beban rencana tetapi telah di bebani oleh beban mati. Penelitian ini untuk menjawab seberapa besar atau seberapa optimal kekuatan yang dihasilkan oleh balok beton bertulang, setelah diperkuat dengan *carbon fiber wraps* (CFW). Sering terjadi dalam kasus perbaikan dan perkuatan lentur dimana kekuatan *carbon fiber strips/wraps* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dari balok itu sendiri, akibatnya beton pada balok bertulang sudah mengalami hancur lebih dahulu sebelum mencapai kekuatan *carbon fiber strips/wraps*.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Penelitian tentang *carbon fiber strips/wraps* (CFS/CFW), sudah sering dilakukan baik di dalam negeri maupun luar negeri.

Miller dan Nanni (1999) anggota ASCE, melakukan penelitian tentang *Bond Between CFRP and Concrete* untuk menginvestigasi distribusi tegangan antara lembaran-lembaran CFRP dan beton. CFRP digunakan dengan cara diikatkan pada bagian luar sebagai perkuatan lentur dan geser balok. Hasil penelitian memberikan kesimpulan yaitu.

- Panjang ikatan lembaran CFRP tidak memberikan efek apapun terhadap beban ultimit balok, karena sudah terjadi *debonding failure* terlebih dahulu sebelum mencapai beban ultimit.
- Kekuatan beton tidak memberikan efek terhadap beban ultimit balok yang direkatkan CFRP. Dalam test yang dikontrol kegagalan terjadi pada *interface* beton dan bahan *adhesivenya*,

- Meningkatkan kekakuan balok dengan menambah jumlah lapisan CFRP tanpa meningkatkan kekuatan ikatan *adhesive* pada *interface* beton tidak dapat menambah kekuatan balok.

Arjanto (2002) melakukan penelitian tentang Perilaku Dinamik Balok Beton Bertulang *Retrofit* dengan *Carbon Wrap*. Sembilan benda uji balok beton bertulang dengan panjang 1500 mm berpenampang 125 mm x 150 mm dikategorikan 3 kelompok : tiga balok beton bertulang biasa, tiga balok beton bertulang yang diperbaiki, tiga balok beton bertulang yang diperkuat. Parameter yang diamati terdiri dari frekuensi alami, *rasio damping* dan *absolute difference of curvature mode*. Penelitian ini menunjukkan bahwa : (a) perilaku frekuensi alami balok yang diperbaiki/diperkuat sama dengan balok beton bertulang biasa, dimana frekuensi alami balok rusak lebih rendah dibanding balok utuh. (b) perilaku rasio redaman balok yang diperbaiki/diperkuat sama dengan balok beton bertulang biasa, dimana redaman balok yang diperbaiki/diperkuat sama dengan balok beton bertulang biasa, dimana redaman balok rusak lebih besar dibanding balok utuh. (c) *absolute difference of curvature mode* tidak memberikan hasil memuaskan, secara teoritis bagian balok rusak seharusnya menunjukkan *curvature* yang membesar.

Ngudiyono (2001) melakukan penelitian tentang Perilaku Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pasca Bakar dengan *Carbon Fiber Strips*. Dua buah balok beton pasca bakar hanya diperkuat pada bagian tarik (*tensile face*), dan dua buah beton pasca bakar hanya diperkuat pada bagian tarik (*tensile face*) dan badan (*web*) balok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akibat kebakaran pada suhu 800°C menyebabkan balok beton mengalami retak-retak permukaan (*surface rock*), *spalling*, merubah warna beton menjadi keputih-putihan. Kekakuan daktilitas kuat lentur ultimit

berturut-turut sebesar 38,28%; 12,3%; 26,51% terhadap beton pasca bakar. Tetapi kegagalan geser dan *debonding failure* terjadi akibat getas. Penambahan *carbon fiber strips* pada balok beton bertulang pasca bakar di bagian tarik (*tensile face*) dan badan (*web*) dapat meningkatkan kekakuan, daktilitas dan kuat lentur ultimit berturut-turut 32,35%; 42,61%; 17,6% terhadap beton pasca bakar. *Debonding failure* menjadi lebih dominan, akan tetapi keruntuhan yang terjadi bersifat daktil.

2.1.1. Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Dipohusodo (1994), menyebutkan kuat lentur suatu balok beton tersedia karena berlangsungnya mekanisme tegangan-regangan dalam yang timbul di dalam balok yang pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Menurut SNI 03-2847-2002 keadaan seimbang gaya tekan beton (C_c) dan gaya tekan baja (C_s) yang akan diimbangi oleh gaya tarik tulangan baja (T_s). Pada kondisi ini tulangan baja telah mengalami pelelehan ($f_s = f_y$), sehingga berlaku persamaan $C_c + C_s = T_s$.

3. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Bahan Penelitian dan Alat penelitian

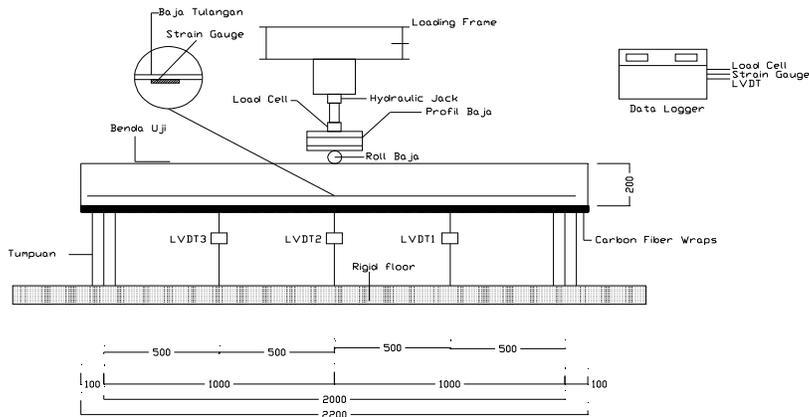
Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton jadi produksi PT. Jaya *Readymix*, baja tulangan merek dagang KS diameter 12 mm, 8 mm, dan 6 mm, *epoxy adhesives* jenis *Adhesives-330-Dry Application* dari PT. Sika Nusa Pratama, *Carbon fiber wraps* (CFW) Jenis CFW yang dipakai

adalah *SikaWrap Hex-230C-Dry Application* dari PT. Sika Nusa Pratama. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rangka Baja (*Loading Frame*), *Hydraulic Jack* dan *Hydraulic Pump*, *Load Cell*, *Data Logger*, *LVDT (Linear Variable Differential Transducer)*, *Strain Gauge*.

3.2. Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan persiapan bahan penelitian dan alat penelitian serta dilakukan pengujian awal material yaitu pengujian selinder beton dan kuat tarik CFW. Kemudian pembuatan *bekisting* balok beton bertulang benda uji yang berjumlah 4 buah dengan dimensi panjang 2200 mm, lebar 150 mm, dan tinggi 200 mm. Dengan 3 buah tulangan diameter 12 mm pada bagian tarik balok, 2 buah tulangan diameter 6 mm pada bagian tekan balok, dan diameter sengkang 8 mm. Sebelum dilakukan pencoran benda uji di pasang *strain gauge* sebanyak 1 buah pada masing-masing benda uji. Proses *curing* dilakukan setelah pencoran benda uji dengan durasi 28 hari.

Pengujian dilakukan pada balok beton bertulang berumur diatas 28 hari, benda uji ditempatkan diatas *rigid floor* yang diangkur pada *loading frame* dengan sendi dan rol pada salah satu ujungnya. Pembebanan dengan beban satu titik di tengah bentang yang ditimbulkan oleh *hydraulic jack* kapasitas 60 ton. Lendutan diukur dengan LVDT yang dipasang sebanyak 3 buah pada masing-masing benda uji balok. *Setting up* pengujian seperti pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 *Setting up* pengujian

4. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Awal Material

Pengujian awal material terdiri dari pengujian kuat tekan selinder beton, pengujian kuat tarik baja, pengujian kuat

tarik *carbon fiber wraps* (CFW). Hasil pengujian untuk kuat tekan selinder diperoleh kuat tekan rerata selinder beton adalah 22,06 MPa. Hasil pengujian selinder beton dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil uji kuat tekan selinder beton

NO	Kode	Tinggi (mm)	Diameter (mm)	Beban Maks (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan rata-rata (MPa)
1	A	300	150	375	21,21	22,06
2	B	300	150	410	23,19	
3	C	300	150	405	22,91	
4	D	300	150	380	21,49	
5	E	300	150	380	21,49	

Hasil pengujian kuat tarik baja yaitu tulangan diameter 6 mm (P6) dengan $f_y = 414,37 \text{ MPa}$, tulangan diameter 8 mm (P8) dengan $f_y = 372,28 \text{ MPa}$, tulangan diameter 12 mm (P12) dengan

$f_y = 393,42 \text{ MPa}$. Hasil pengujian kuat tarik baja dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Hasil uji kuat tarik baja tulangan

NO	Diameter (mm)	Tegangan leleh (MPa)	Tegangan leleh rata-rata (MPa)	Tegangan ultimit (MPa)	Tegangan ultimit rata-rata (MPa)	Regangan (ϵ %)
1	P6-1	407,50	414,37	521,00	530,05	38,0
2	P6-2	413,97		532,52		33,0
3	P6-3	421,66		536,66		36,0
4	P8-1	377,29	372,28	491,16	485,04	18,8
5	P8-2	384,36		487,59		18,8

6	P8-3	355,20		476,37		18,8
7	P12-1	394,68	393,42	542,69	545,38	28,6
8	P12-2	392,98		548,20		27,1
9	P12-3	392,59		545,27		31,4

Carbon fiber wraps (CFW) yang diujikan adalah SikaWrap Hex-230C-Dry Application. Proses pengujian CFW dilakukan dengan beberapa proses dimulai dengan pengujian berat jenis dengan 2 sampel benda uji dan diperoleh berat jenis CFW rerata adalah 1,259

gr/cm^3 . Hasil pengujian kuat tarik CFW menurut spesifikasi pengujian kuat tarik CFW dari PT. Sika Nusa Pratama $\epsilon_{Lmax} \leq 0,5 \epsilon_{Lu}$ diperoleh tegangan sebesar 651,6044 MPa, secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 Hasil pengujian kuat tarik CFW

No	Gaya Maksimum Pmax (kN)	Pertambahan Panjang ΔL (mm)	Luas Tampang (cm^2)	Tegangan (N/mm^2)	Regangan (%)
1	6,64	13,52	0,04332	766,3113	6,145
2	5,12	25,74	0,04476	571,8296	11,7
3	4,72	26,87	0,03826	616,6724	12,215
Rata-rata				651,6044	10,02

4.2. Pengujian Lentur Benda Uji Balok Beton Bertulang

Benda uji balok terdiri dari balok kontrol (BK), balok perkuatan (BP 0%),

balok perbaikan 30% ultimit (BP 30%), balok perbaikan 60% ultimit (BP 60%). Hasil pengujian lentur dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil pengujian lentur balok

Benda Uji	Lebar Retak		Beban Maksimum (kN)	Presentasi Peningkatan Beban (%)	Tipe Keruntuhan
	Retak Pertama (mm)	Retak Maks (mm)			
BK	0,02	11,1	35	100	Lentur
BP 0%	0,02	17,6	40	114,2857	Lentur
BP 30%	0,02	18,33	38	108,5714	Lentur
BP 60%	0,02	18,9	37	105,7142	Lentur

Keterangan : * : presentasi peningkatan kekuatan dihitung terhadap balok control

4.3. Perbandingan Beban Hasil Teoritis dan Hasil Pengujian

Beban hasil eksperimen di Laboratorium dibandingkan dengan beban hasil perhitungan teori menurut PT. Sika Nusa Pratama (Seminar : The Latest Sika Technology in Structural Strengthening with "SIKA CARBODUR" Composite Strengthening

System). Hasilnya menunjukkan beban hasil eksperimen mendekati hasil teoritisnya, dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Perbandingan beban hasil teoritis dan beban eksperimen

NO	Benda Uji	Pteoritis (kN)	Peksperimen (kN)	Pteoritis/Peksperimen (%)
1	BK	37,0664	35	94,4251
2	BP 0%	38,918	40	102,7802
3	BP 30%	38,9012	38	97,6833
4	BP 60%	39,1876	37	94,4176

4.4. Kekakuan Benda Uji Balok Beton Bertulang

Kekakuan pada titik retak awal yaitu titik 7 kN. Kekakuan benda uji balok dibandingkan dengan kekakuan balok kontrol (BK). Hasilnya menunjukkan BP 0% mengalami kenaikan sebesar 117,2727% terhadap BK hal ini disebabkan oleh CFW yang sudah ditempelkan bersama balok uji sebelum pengujian, sedangkan untuk BP 30% dan BP 60% mengalami kenaikan kekakuan

sebesar 96,9925% dan 90,2098% terhadap BK hal ini kemungkinan terjadi karena kekuatan pada benda uji yang berbeda akibat kemampatan beton yang berbeda-beda yang terjadi pada proses pembuatan benda uji. Kondisi berbeda pada BP 0% disebabkan balok sudah diperkuat lebih dahulu dengan CFW sehingga memberikan hasil kekakuan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan BP 30% dan BP 60%. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Nilai kekakuan lentur di titik 7 kN

Benda Uji	Pcrack (N)	Lendutan Retak Pertama LVDT 2 (mm)	Kekakuan (N/mm)	Persen peningkatan* (%)
BK	7000	1,29	5426,3565	100
BP 0%	7000	1,10	6363,6363	117,2727
BP 30%	7000	1,33	5263,1578	96,9925
BP 60%	7000	1,43	4895,1048	90,2098

Keterangan : * : presentasi peningkatan kekakuan dihitung terhadap balok kontrol

4.5. Daktilitas Benda Uji Balok Beton Bertulang

Daktilitas benda uji balok dibandingkan dengan daktilitas balok kontrol (BK). Daktilitas mengalami penurunan karena adanya penambahan

perkuatan benda uji. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Daktilitas benda uji

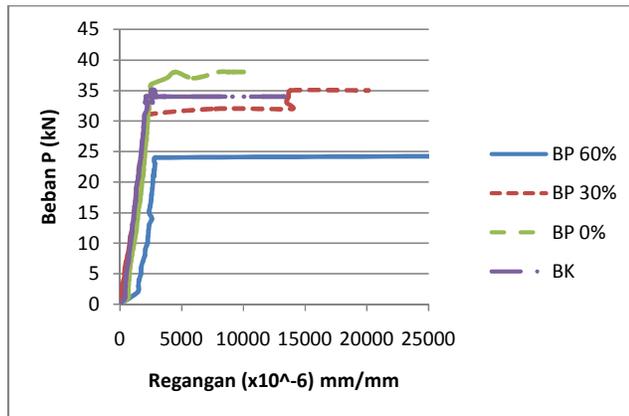
Benda Uji	δy (mm)	δu (mm)	Daktilitas $U = \delta u / \delta y$	Persen peningkatan* (%)	Keterangan
BK	7,2	35,06	4,8694	100	-
BP 0%	9,7	25,55	2,6340	145,9071	Menurun
BP 30%	8,22	14,42	1,7542	163,9741	Menurun
BP 60%	5,91	15,69	2,6548	145,4799	Menurun

Keterangan : * : presentasi peningkatan daktilitas dihitung terhadap balok kontrol

4.6. Regangan Benda Uji Balok Beton Bertulang

Hasil perbandingan beban regangan dari keempat balok menunjukkan regangan baja tulangan pada BK bekerja sampai beban ultimitnya; untuk BP 0% regangan baja tulangan bekerja bersama-sama dengan CFW sampai beban

ultimitnya; untuk BP 30% dan BP 60% regangan baja tulangan bekerja dan dilanjutkan oleh CFW sampai beban ultimitnya. Hasilnya perbandingan masing-masing balok uji dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Hubungan beban dan regangan BK, BP 0%, BP 30%, BP 60%

5. KESIMPULAN

Pengujian yang dilakukan dengan benda uji balok beton bertulang dengan berbagai tipe perkuatan dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Kapasitas lentur maksimum hasil pengujian secara berturut-turut untuk BK, BP 0%, BP 30%, BP 60% yaitu sebesar 35 kN, 40 kN, 38 kN, 37 kN. Untuk hasil teoritis secara berturut-turut untuk BK, BP 0%, BP 30%, BP 60% yaitu sebesar 37,0664 kN; 38,918 kN; 38,9012 kN; 39,1876 kN. Perbandingan antara hasil pengujian dan hasil teoritis dari SIKA diperoleh hasil yang mendekati teoritisnya secara berturut-turut BK, BP 0%, BP 30%, BP 60% yaitu sebesar 94,4251%; 102,7802%; 97,6833%; 94,4176%.
2. Kekakuan lentur pada pada titik 7 kN secara berturut-turut untuk BK, BP 0%, BP 30%, BP 60% yaitu sebesar 5426,3565 N/mm, 6363,6363 N/mm, 5263,1578 N/mm, 4895,1048 N/mm, bila dibandingkan terhadap BK maka presentasi secara berturut-turut BP0%, BP 30%, BP 60% adalah 117,2727%; 96,9925%; 90,2098%.
3. aktilitas yang terjadi secara berturut-turut pada BK, BP 0%, BP 30%, BP 60% yaitu sebesar 4,8694; 2,6340; 1,7542; 2,6548 yang mengalami presentasi kenaikan secara berturut-turut pada BP 0%, BP 30%, BP 60% adalah 45,9071%;
4. 63,9741%; 45,4799% terhadap BK.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Arjanto., 2002, *Perilaku Dinamik Balok Beton Bertulang Retrofit dengan CFRP Wrap*, Tesis Program Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.
- Badan Standarisasi Nasional., 1990, *Pengujian Tekan* Selinder (SNI 03-1974-1990)
- Badan Standarisasi Nasional., 2002, *Baja Tulangan Beton*. (SNI 07-2052-2002)
- Badan Standarisasi Nasional., 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Bandung. (SNI 03-2847-2002)
- Ferguson, P.M., dan Cowan, H.J., 1978, *Dasar-dasar Beton Bertulang (versi isi)*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Miller, B., dan Nanni A. 1999, *Bond Between CRFP and Concrete.*, USA
- Ngudiyono., 2001, *Perilaku Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pasca Bakar Dengan Carbon Fiber Strips.*, Tesis Sekolah Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.
- Sika Nusa Pratama., 2000, *Prosiding pada Seminar : The Latest Sika Technology in Structural Strengthening with "SIKA CARBODUR"* Composite Strengthening System, Surabaya.
- Tjokrodinuljo K., 2007, *Teknologi Beton*, Biro Penerbit Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Yeninar, A, R., 2005, *Pengaruh Perkuatan Carbon Wrap Pada Pelat Lantai Beton Bertulang Pada Saat dan Setelah Temperatur Tinggi*, Tesis Program Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.

Biodata Penulis

Albert Aun Umbu Nday, alumni Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta (2008), S2 Teknik Struktur Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (2012). Dan Pengajar Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang (2015-sekarang).