



TUGAS AKHIR - CA234801

LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE ARCHITECTURE DALAM PERANCANGAN LABORATORIUM DI BULAN

IVANDER ICHWANDY
NRP 5013211077

Pembimbing

Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

NIP 19611129 198601 2 001

Program Sarjana

Departemen Arsitektur

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



TUGAS AKHIR - CA234801

LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE ARCHITECTURE DALAM PERANCANGAN LABORATORIUM DI BULAN

IVANDER ICHWANDY

NRP 5013211077

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

NIP 19611129 198601 2 001

Program Sarjana

Departemen Arsitektur

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



FINAL PROJECT - CA234801

LUNAR LAB: THE APPLICATION OF SPACE ARCHITECTURE IN THE DESIGN OF A LABORATORY ON THE MOON

IVANDER ICHWANDY

NRP 5013211077

Advisor

Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

NIP 19611129 198601 2 001

Bachelor Program

Department of Architecture

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

LEMBAR PENGESAHAN

LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE ARCHITECTURE DALAM PERANCANGAN LABORATORIUM DI BULAN

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Arsitektur (S.Ars.) pada
Program Studi Sarjana Arsitektur
Departemen Arsitektur
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : Ivander Ichwandy

NRP. 5013211077

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

Pembimbing



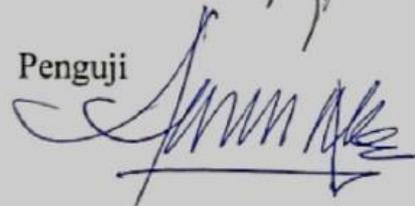
2. Dr. Defry Agatha Ardianta, S.T., M.T.

Penguji



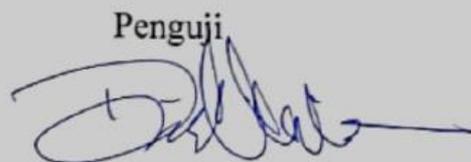
3. Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D.

Penguji



4. Dr.Eng. Didit Novianto, S.T., M.Eng.

Penguji



PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa/NRP : Ivander Ichwandy / 5013211077
Program Studi : Program Sarjana Arsitektur
Pembimbing/NIP : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T./ 19611129 198601 2 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**Lunar Lab: Penerapan Space Architecture dalam Perancangan Laboratorium di Bulan**" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2025

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.
19611129 198601 2 001

Mahasiswa



Ivander Ichwandy
5013211077

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya haturkan pada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan Roh Kudus-Nya lah laporan Tugas Akhir yang berjudul "Lunar Lab: Penerapan Space Architecture dalam Perancangan Laboratorium di Bulan" dapat terselesaikan dengan baik. Laporan ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan tahapan studi pada Program Studi Arsitektur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Keberhasilan ini tentu tidak hanya sebatas upaya dari perancang sendiri semata, melainkan juga dari berbagai pihak, yang senantiasa memberikan arahan dan dukungan baik secara materil maupun moral kepada saya. Oleh karena itu, perancang mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, dan kedua adik yang selalu memberikan dukungan, semangat dan juga doa. Merekalah yang telah memberikan bahan bakar bagi perancang untuk dapat menyelesaikan tugas ini hingga akhir,
2. Ibu Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T., selaku dosen pembimbing yang senantiasa mendampingi dan memberikan masukan kepada perancang, selama menyelesaikan tugas ini,
3. Bapak Dr. Defry Agatha Ardianta, S.T., M.T., selaku dosen penguji 1,
4. Bapak Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D., selaku dosen penguji 2,
5. Bapak Dr.Eng. Didit Novianto, S.T., M.Eng., selaku dosen penguji 3,
6. Teman-teman satu bimbingan, Halyn dan Mba Inasya yang senantiasa mendukung sebagai teman satu bimbingan,
7. Teman-teman satu Angkatan, sebagai teman seperjuangan,
8. Teman-teman dekat saya, Albeth dan Agung, tempat berharga saya untuk bercerita dan berkeluh kisah.
9. Pihak-pihak lain yang secara langsung maupun tidak langsung mendukung dan membantu dalam proses hingga tahap penyelesaian tugas akhir ini.

Perancang menyadari, bahwa laporan ini masih memiliki berbagai macam kekurangan. Oleh karenanya, berbagai macam saran, kritik maupun komentar yang sekiranya mampu memberikan perubahan yang lebih baik di masa mendatang, sangat diharapkan oleh perancang. Sekiranya, melalui perancangan ini, dapat berkontribusi bagi dunia arsitektural, memberikan motivasi dan juga semangat yang tidak terbatas bagi orang-orang yang bergelut dalam ranah arsitektur, melainkan siapapun yang membaca.

Surabaya, 30 Juli 2025



Penulis

ABSTRAK

LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE ARCHITECTURE DALAM PERANCANGAN LABORATORIUM DI BULAN

Nama Mahasiswa / NRP : Ivander Ichwandy / 5013211077
Departemen : Arsitektur FT-SPK ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

Abstrak

Space Architecture adalah teori yang melihat bagaimana bangunan di luar angkasa seharusnya dibangun dengan prinsip *Livability* dalam menghadirkan ruang semaksimal mungkin, *Usability* dalam memberikan fasilitas menunjang dan *Flexibility* dalam memberikan fleksibilitas yang memungkinkan adaptasi pada perubahan. Prinsip-prinsip ini kemudian digunakan dalam melakukan perancangan sebuah laboratorium, dengan tujuan untuk memfasilitasi keingintahuan manusia yang lebih tentang bulan kita.

Menggunakan kerangka *Force-based Framework* oleh Plowright, merespon lingkungan ekstrim bulan yakni tidak ada oksigen, keadaan atmosfer yang vakum, suhu dan radiasi ekstrim, pergerakan matahari yang dapat mempengaruhi kehidupan manusia ketika berada di bulan. Perancang melakukan berbagai eksplorasi dan iterasi melalui analisa daring, serta sketsa dan permodelan tiga dimensi dalam menghasilkan rancangan.

Lunar Lab, adalah modul-modul berbagai aktivitas yang ditutupi oleh regolith yang mampu secara mandiri memanfaatkan matahari dalam menghasilkan listrik, dengan pertimbangan penggunaan tangga vertikal sebagai akses vertikal utama, yang dimana memfasilitasi kegiatan penelitian di permukaan bulan, tepatnya di kutub selatan.

Kata kunci: *arsitektur, bulan, laboratorium, Space Architecture*

ABSTRACT

LUNAR LAB: THE APPLICATION OF SPACE ARCHITECTURE IN THE DESIGN OF A LABORATORY ON THE MOON

Student Name / NRP : Ivander Ichwandy / 5013211077
Department : Architecture FT-SPK ITS
Advisor : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

Abstract

Space Architecture is a theoretical approach that examines how buildings in outer space should be designed based on the principles of Livability to maximize space, Usability to provide supporting facilities, and Flexibility to allow adaptability to change. These principles are then applied in the design of a laboratory, with the aim of facilitating humanity's deeper curiosity and understanding of our Moon.

Using the Force-based Framework by Plowright, this approach responds to the Moon's extreme environment, such as the absence of oxygen, a vacuum atmosphere, extreme temperatures and radiation, and the movement of the Sun that affects human life on the Moon. The design process involved a series of explorations and iterations carried out through online analysis, sketching, and three-dimensional modeling to generate the final proposal.

Lunar Lab is a series of activity modules covered with regolith, capable of independently harnessing solar energy to generate electricity. The design considers the use of vertical stairs as the primary means of vertical circulation, facilitating research activities on the lunar surface especially at the moon's south pole.

Keywords: *architecture, laboratory, moon, Space Architecture,*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah Riset/Rancangan	1
1.3 Tujuan Riset/Rancangan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Riset dan/atau Kriteria Rancangan	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Riset/Rancangan Terdahulu	3
2.1.1 Kajian Preseden 1 – Apollo Lunar Module 11	3
2.1.2 Kajian Preseden 2 – International Space Station	4
2.2 Dasar Teori	5
BAB 3 METODOLOGI	9
3.1 Metode yang Digunakan	9
3.2 Bahan dan Peralatan yang Digunakan	9
3.3 Urutan Pelaksanaan Riset/Rancangan	9
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	11
4.1 Hasil Riset/Rancangan	11
4.1.1 Deskripsi Tapak	11
4.1.2 Program Ruang	13
4.1.3 Konsep Rancangan	15
4.2 Pembahasan	25
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	27
5.1 Kesimpulan	27
5.2 Saran	27

DAFTAR PUSTAKA	29
LAMPIRAN	33
BIODATA PENULIS	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lunar Module Configuration	3
Gambar 2.2 Foto International Space Station di Luar Angkasa dengan Latar Belakang Bumi	4
Gambar 3.1 Diagram Force-Based Framework	9
Gambar 3.2 Proses / Tahapan Perancangan mengadopsi <i>Force-Based Framework</i> milik Plowright	10
Gambar 4.1 Titik Lokasi Keberadaan Air di Kutub Bulan	11
Gambar 4.2 Tingkat Iluminasi pada Shackleton Crater.....	12
Gambar 4.3 Topografi Lokasi Tapak.....	13
Gambar 4.4 Simulasi Pergerakan Matahari pada Area Kutub Selatan Bulan	13
Gambar 4.5 Skema Aktifitas Pengguna	14
Gambar 4.6 Diagram Hubungan Ruang	15
Gambar 4.7 Gambar Roket SLS Block 2 Cargo.....	15
Gambar 4.8 Kriteria Rancang	16
Gambar 4.9 Gagasan Awal	16
Gambar 4.10 Pembagian Living Part dan Engine Part	17
Gambar 4.11 Konsep Bukaannya	18
Gambar 4.12 Konsep Lipatan Ruang	18
Gambar 4.13 Jumlah Tekukan/Bukaan pada Modul	19
Gambar 4.14 Proposed Form.....	19
Gambar 4.15 Perlindungan dari Radiasi.....	19
Gambar 4.16 Konsep Akses Vertikal	20
Gambar 4.17 Roll Out Solar Array.....	20
Gambar 4.18 Konsep Penghubung antar Modul	21
Gambar 4.19 Material Softgood	21
Gambar 4.20 Konfigurasi Dry Lab	21
Gambar 4.21 Konfigurasi Antar Modul.....	22
Gambar 4.22 Siteplan	22
Gambar 4.23 Fase Kedatangan dan Deployment Modul.....	23
Gambar 4.24 Isometri Modul	24
Gambar 4.25 Tampak Bangunan	24
Gambar 4.26 Flowchart dan Isometri Utilitas Listrik mengadaptasi dari sistem elektrikal ISS	24
Gambar 4.27 Lokasi OGA.....	25
Gambar 4.28 Gambar Lokasi WHC, WRA dan PWD-25	25

Gambar 4.29 Rak Sistem OGS, dan WRA	25
Gambar 4.30 Titik Masker Oksigen, dan Portable Fire Extinguisher	26
Gambar 5.1 Keterhubungan Sistem Oksigen dan Sistem Daur Air	26
Gambar 5.2 Gambar Masker Oksigen dan Portable Fire Extinguisher pada simulasi kebakaran	26
Gambar 5.3 Denah Sleep Module.....	35
Gambar 5.4 Denah Social Module.....	35
Gambar 5.5 Denah Laboratorium Geologi	36
Gambar 5.6 Denah Laboratorium Material Science	36
Gambar 5.7 Denah Laboratorium Astrochemistry	37
Gambar 5.8 Denah Laboratorium Astrobiology	37
Gambar 5.9 Detail 1 & Detail 2.....	38
Gambar 5.10 Potongan A	38

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Aspek Arsitektural <i>Lunar Module</i>	4
Tabel 2.2 Aspek Arsitektural ISS	5
Tabel 4.1 Program Ruang	33

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perancangan ini bermula pada teori Space Architecture melalui sebuah tesis yang berjudul “*An Inquiry of Space Architecture: Design Consideration and Design Process*” oleh Ece Yegen. Dimana pada tesis ini merujuk kepada dua hal yang mempengaruhi bagaimana manusia dapat tetap terlindungi dari lingkungan ekstrim juga menciptakan kualitas spasial yang mendukung kegiatan manusia di luar angkasa. Didukung melalui sebuah thesis “*S.E.ARCH: Science Fiction and Extra-terrestrial Architecture*” oleh KaiMei Shum dan buku yang berjudul “*Architecture for Astronauts*” oleh Sandra Häuplik-Meusburger, terdapat tiga prinsip yakni *Usability*, *Livability* dan *Flexibility*.

Bulan adalah satelit alami yang dimiliki oleh bumi yang memiliki radius sebesar 1,740 kilometer. Ukuran bulan hanya kurang dari satu per tiga dari lebar bumi. Jarak antar bumi dengan bulan sendiri sekitar 384,400 kilometer yang dimana jika memasukkan benda luar angkasa yang memiliki lebar sebesar lebar bumi itu sendiri, maka akan ada total tiga puluh benda luar angkasa yang mampu disusun. Meskipun jarak antar bumi dan bulan sangatlah jauh, namun efek dari keberadaan bulan masih dapat dirasakan di bumi, salah satunya adalah pasang surut air laut. Hal ini terjadi akibat adanya gaya gravitasi dari bulan itu sendiri yang kemudian mempengaruhi pasang surut air laut.

Karena keterkaitan manusia dengan bulan yang terbilang cukup dekat, juga jarak antar bumi dan bulan terhitung sangat dekat jika dibandingkan dengan benda langit-benda langit lainnya, maka ada keinginan dari manusia untuk menjelajah dan mencari tahu lebih dalam tentang satelit alami bumi ini. Seiring berkembangnya jaman dan teknologi yang semakin canggih, hal-hal yang sebelumnya hanya berupa karya science-fiction perlahan berubah menjadi sebuah kenyataan. Manusia akhirnya bisa menapakkan kaki untuk pertama kalinya di bulan melalui misi Apollo 11 milik NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Hal ini merupakan suatu pencapaian yang sangat besar bagi umat manusia, juga sebagai salah satu bentuk perkembangan teknologi yang diciptakan oleh manusia.

Dalam mendukung keinginan manusia tentang bulan, maka dalam perancangan ini akan menghasilkan rancangan yang dapat mewadahi aktivitas penelitian yang dilakukan di permukaan bulan, sekaligus juga melindungi manusia dari lingkungan ekstrim di bulan. Hal ini relevan dengan perkembangan di dunia antariksa, dimana perusahaan seperti SpaceX milik Elon Musk, gencar dalam memperbaharui dan mengembangkan teknologi roket Starship. Ditambah lagi badan Antariksa NASA yang terus melakukan penelitian tentang dunia antariksa. Terakhir, proyek untuk mengirim manusia kembali ke bulan, juga dicanangkan dan sudah mulai berproses melalui proyek Artemis (NASA, 2024).

1.2 Rumusan Masalah Riset/Rancangan

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang ditetapkan dalam perancangan ini adalah bagaimana arsitektur dapat memfasilitasi keingintahuan manusia dan juga melindungi mereka dari keadaan lingkungan ekstrim di permukaan bulan dengan menerapkan prinsip *usability*, *livability*, *flexibility*?

1.3 Tujuan Riset/Rancangan

Berdasarkan permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya, maka tujuan dari perancangan ini untuk merancang arsitektur yang menciptakan lingkungan habitasi di tengah lingkungan ekstrim, area yang luas dalam menampung berbagai macam aktifitas, serta memberikan fleksibilitas pada fasilitas yang ditempatkan di permukaan bulan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan perancangan agar bahasan tidak terlalu luas, maka diberikan beberapa pembatasan terhadap permasalahan yakni pada lokasi penelitian terletak pada kutub selatan bulan. Batasan ini dipilih, karena pada area kutub selatan tersebut adalah lokasi yang sudah menarik perhatian bagi para peneliti sendiri. Melalui publikasi "*Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions*" pada 2018, menunjukkan titik-titik air pada kutub-kutub bulan dan kutub selatan, memiliki lebih banyak titik air dibandingkan dengan kutub utara. Oleh karenanya, area lokasi perancangan akan berfokus pada area kutub selatan bulan.

1.5 Manfaat Riset dan/atau Kriteria Rancangan

Rancangan ini harapannya dapat memberikan manfaat antara lain:

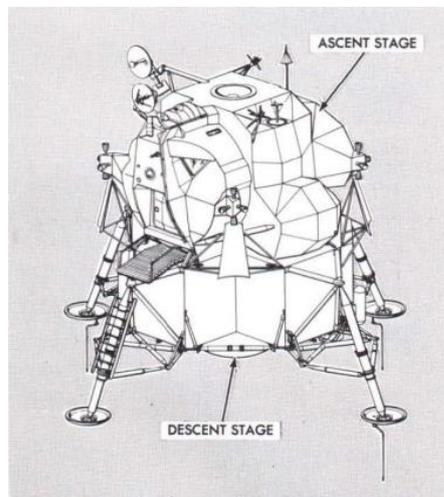
1. Secara akademis dapat memberikan bagaimana prinsip Space Architecture diterapkan dalam sebuah perancangan,
2. Secara praktis perancangan ini dapat menjadi acuan bagi perancangan bangunan sejenis.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Riset/Rancangan Terdahulu

2.1.1 Kajian Preseden 1 – Apollo Lunar Module 11

Lunar Module Apollo 11 adalah modul yang membawa manusia pertama kali untuk mendarat di permukaan bulan dengan selamat. Modul ini terdiri dari dua bagian, yakni bagian *Ascent Stage* yang berada di bagian atas dan juga *Descent Stage* yang merupakan bagian bawah modul yang dimana ukuran tinggi modul keseluruhan 6,7 meter dan diameter 9,4 meter. Bagian *Ascent Stage* adalah bagian pada modul yang dimana para awak akan berada dan terlindungi dari lingkungan diluar bulan dengan pengkondisian tertentu. Sedangkan pada bagian *Descent Stage* adalah bagian modul yang tidak untuk ditempati yang fungsinya untuk menyanggah *Ascent Stage* dan bertindak sebagai alat pendaratan di permukaan bulan.



Gambar 2.1 Lunar Module Configuration (Grumman, 1968)

Lunar Module ini dibawa oleh roket Saturn V keluar dari orbit bumi dan ketika memasuki orbit bulan, pendaratan dilakukan oleh bagian *Descent Stage* pada bagian bawah modul. Pada misi ini, ada tiga astronot yakni Neil Armstrong, Buzz Aldrin, Michael Collins yang menjadi tiga orang pertama yang berhasil mendarat dan menapakkan kaki di permukaan bulan. Mereka berada di permukaan bulan selama lebih dari 2 jam (Tillman, 2019). Modul yang kembali setelah melakukan misi pendaratan ini adalah modul bagian atas, yakni *Ascent Stage* yang ditempati oleh para astronot. Bagian dalam modul hanya memiliki satu volume saja dan tidak bersekat dengan volume habitasi sebesar 4,5m² dengan kapasitas 3 orang. Mereka semua melakukan berbagai kegiatan mulai dari tidur hingga bersih diri pada satu modul ini (Häuplik-Meusburger, 2011). Modul ini terbuat dari material paduan aluminium dan juga titanium (Grumman, 1968).

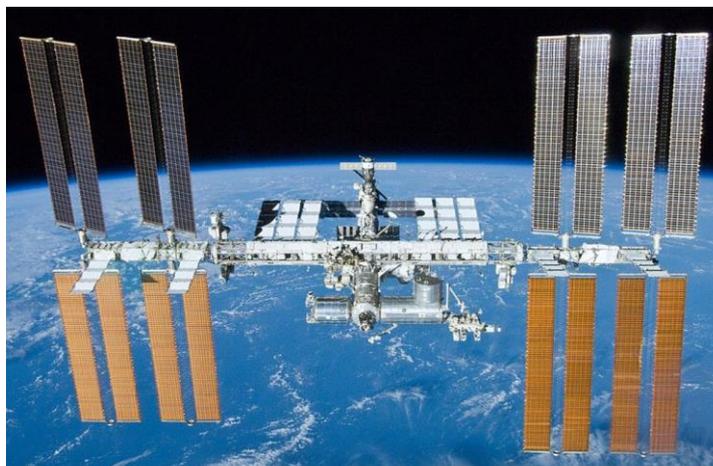
Tabel 2.1 Aspek Arsitektural pada *Lunar Module*

<i>Lunar Module</i>	
Bentuk	Satu modul kecil yang terdiri atas dua bagian, yakni <i>ascent stage</i> dan <i>descent stage</i>
Ruang	Memiliki satu volume saja tanpa sekat, dengan total volume 4,5 m ² yang menampung 3 orang. Seluruh aktivitas dilakukan pada satu modul ini mulai dari tidur hingga membersihkan diri
Fungsi	Membawa manusia mendarat dan kembali dari permukaan bulan
Material	Menggunakan paduan aluminium dan titanium sebagai struktur pembentuk.

Sumber: Perancang

2.1.2 Kajian Preseden 2 – International Space Station

International Space Station atau yang biasa disingkat ISS adalah salah satu konstruksi multi nasional stasiun luar angkasa yang letaknya berada di area *Low Earth Orbit* (LEO). ISS pada dasarnya adalah sebuah laboratorium, karena fungsi ISS adalah sebagai fasilitas yang digunakan untuk melakukan penelitian di luar angkasa. Beberapa negara yang terlibat pada ISS antara lain Amerika Serikat, Rusia, Kanada, Jepang dan beberapa negara lain anggota *European Space Agency* (ESA). Mengutip pada webiste boeing, total panjang ISS adalah 109 meter dari ujung ke ujung. ISS mulai dihuni pada November tahun 2000 hingga sekarang (Rod Jones, 2011). Proses konstruksi ISS sendiri dimulai dari tahun 1998 hingga 2011 yang dimana memakan waktu sekitar 13 tahun dengan total peluncuran roket lebih dari 40 kali (NASA, 2023).



Gambar 2.2 Foto International Space Station di Luar Angkasa dengan Latar Belakang Bumi (Kompas, 2018)

Karena letaknya yang jauh dari permukaan bumi, sehingga mereka harus memperoleh energi untuk keperluan di dalam ISS secara mandiri. Mereka menggunakan *Photovoltaic Array* dengan panjang yang mencapai 73 meter dengan jumlah delapan buah (NASA, 2015), masing-masing ada empat di sisi ujung ISS. Namun sistem penghasil energi kemudian diubah ke IROSA yang dimulai dari tahun 2021 hingga 2023. IROSA memiliki fungsi yang sama, namun perbedaannya terletak pada sifatnya yang lentur dan dapat digulung. Pasokan oksigen dan kontrol udara adalah salah satu hal yang sangat diperlukan. ISS menggunakan teknologi ECLSS

atau *Environmental Control and Life Support System*. Melalui teknologi ini, para astronot tidak bergantung pada pasokan yang dikirimkan dari bumi, karena sistem ini akan memberikan oksigen dan air dari proses elektrolisis yang terjadi dari input yang berupa air bekas.

Bentuk ISS sendiri diakibatkan dari susunan beberapa modul-modul kecil. Mayoritas bentuk modul-modul tersebut diakibatkan oleh alat transportasi yang membawa modul tersebut. Pada ISS, alat transportasi yang membawa modul-modul itu adalah *Space Shuttle Orbiter* dan *Russian Proton Rocket*. Hal ini dikarenakan limitasi manusia yang masih belum dapat membangun sesuatu di luar angkasa, sehingga harus membawa modul-modul yang sudah jadi dari bumi, untuk kemudian di susun di luar angkasa (Robert Frost, 2015). ISS berfungsi sebagai sebuah tempat untuk melakukan penelitian yang dimana tersusun atas berbagai macam modul berstruktur paduan aluminium yang dibawa dari bumi dan dirakit di luar angkasa.

Tabel 2.1 Aspek Arsitektural ISS

ISS	
Bentuk	Kumpulan modul-modul kecil berbentuk silinder yang dibawa dari bumi dan dirakit di luar angkasa.
Ruang	Modul-modul yang dihubungkan menciptakan lorong-lorong aktivitas.
Fungsi	Tempat penelitian dan eksperimen ilmiah pada lingkungan luar angkasa.
Material	Menggunakan material plat aluminium sebagai struktur utama pembentuk ruang.

Sumber: Perancang

2.2 Dasar Teori

Melalui keberhasilannya misi Apollo 11 yang mengirimkan dan juga memulangkan kembali manusia, maka bukan tidak mungkin bahwa manusia akan melakukan ekspansi ke luar angkasa dan melalui keberhasilan ini juga mencatat sejarah tentang perkembangan teknologi dan pengetahuan manusia.

Space Architecture adalah teori dan praktik mendesain dan membangun lingkungan hunian di luar angkasa. *Space Architecture* ditetapkan pada tahun 2002 pada *International Space Architecture Symposium* yang diselenggarakan di *World Space Congress*. Sandra Häuplik-Meusburger berpendapat bahwa *Extra-terrestrial Habitat* adalah rumah dan kendaraan dimana manusia hidup dan bekerja diluar bumi, baik berbasis non planet, maupun berbasis planet, yang berletak di lingkungan ekstrim (Häuplik-Meusburger, 2011). Bagi Neil Leach, *Space Architecture* adalah habitat jangka panjang di luar angkasa, yang dimana luar angkasa adalah sebuah tempat yang memiliki kombinasi dari berbagai kondisi yang belum pernah kita jumpai sebelumnya (Leach, 2015). March M. Cohen, berpendapat bahwa *Space Architecture* adalah desain lingkungan untuk hidup dan bekerja yang dapat berupa pesawat luar angkasa, habitat luar angkasa, ataupun hal lainnya yang dapat mengakomodasi pada lingkungan ekstrim mulai dari orbit bumi, hingga bulan, asteroid, mars, galaksi, atau bahkan lebih dari itu (Leach, 2015). Dari pernyataan beberapa arsitek ini, ada hal-hal yang menjadi suatu benang merah, yakni menciptakan lingkungan hunian pada sebuah lingkungan yang memiliki kondisi ekstrim di luar bumi.

Menurut Melodie Yashar, yang fokus pekerjaannya pada pengembangan teknologi konstruksi bangunan hunian di luar angkasa, melalui wawancara personal dengan Ece Yegen pada tahun 2019, bahwa ketika membicarakan tentang arsitektur luar angkasa, maka kita tidak akan terlepas dengan permasalahan lingkungan dan manusia itu sendiri. Lingkungan ekstrim tidak memiliki suatu definisi yang pasti. Lingkungan memiliki beberapa unsur didalamnya, antara lain suhu, radiasi, tekanan, komposisi atmosfer dan juga gravitasi. Jika salah satu unsur berada tahap ekstrim atau pada tahap yang anomali, maka lingkungan tersebut akan menjadi sulit untuk dihuni dan ditinggali oleh manusia. Sebagai contoh lingkungan ekstrim yang ada di bumi, adalah area kutub bumi yang memiliki suhu dibawah nol. Sebuah lingkungan yang memberikan limitasi khusus dan memberikan tingkat kesulitan tertentu bagi manusia untuk bertahan hidup dan menjaga kenyamanan fisik dan psikologi dapat didefinisikan sebagai lingkungan ekstrim (Bannova, 2014). Luar angkasa bisa didefinisikan sebagai lingkungan ekstrim, karena minimnya tekanan dan oksigen yang merupakan komponen esensial bagi manusia. Tipisnya lapisan atmosfer pada bulan tidak mampu melindungi permukaan bulan dari paparan radiasi. Tidak seperti lapisan atmosfer bumi yang tebal, yang tidak hanya melindungi kita dari radiasi, namun juga menjaga suhu bumi tetap nyaman bagi manusia untuk tinggal dan menetap.

Karena lingkungan yang ekstrim dan sangat berbahaya bagi manusia, maka hal utama dan pertama yang perlu dipertimbangkan dari arsitektur luar angkasa adalah perlindungan manusia terhadap lingkungan ekstrim itu sendiri. Selain itu, faktor psikologis manusia juga menjadi salah satu pertimbangan berikutnya, karena tantangan untuk dapat hidup di lingkungan berbahaya dan sepenuhnya bergantung pada lingkungan buatan (arsitektur). Sehingga faktor penting selanjutnya adalah, bagaimana menciptakan sebuah kualitas spasial yang memberikan kenyamanan bagi para peneliti yang melakukan penelitian di bulan, sebagai konsekuensi dari keadaan yang jauh dari bumi dan juga waktu durasi misi yang dijalankan tidak sebentar.

Melalui tesis yang berjudul *S.E.ARCH: Science Fiction and Extra-terrestrial Architecture* oleh KaiMei Shum dan didukung oleh buku *Architecture for Astronauts* oleh Sandra Häuplik-Meusburger, terdapat tiga prinsip yang perlu diperhatikan dalam menciptakan lingkungan hunian di luar angkasa. Tiga prinsip tersebut antara lain:

1. *Usability*
2. *Livability*
3. *Flexibility*

Mengutip *Cambridge Dictionary*, *Usability* merupakan fakta dimana sesuatu mudah digunakan, atau Tingkat dimana sesuatu itu mudah digunakan. Pada konteks luar angkasa, pengertian *Usability* yakni layout, konfigurasi serta desain yang mendukung selama kegiatan manusia selama berada di luar angkasa. Karena luar angkasa adalah tempat yang dapat terbilang susah untuk dijangkau, maka perlu pula kita menghadirkan infrastruktur-infrastruktur yang mendukung berbagai kegiatan di luar angkasa. Ketika di bumi kita terbiasa dengan menghasilkan energi listrik dari tenaga angin, uap air dan sebagainya. Semuanya pembangkit tersebut memiliki sumber dari bumi yang kemudian diolah dan disalurkan ke berbagai bangunan untuk berbagai macam kebutuhan. Berbeda dengan luar angkasa, yang tidak memiliki hal-hal tersebut, sehingga perlu adanya hal yang mampu memenuhi kebutuhan energi. Selain itu, kebutuhan utama seperti oksigen dan air juga sangat penting bagi kehidupan manusia, maka

dalam hal ini, digunakan teknologi-teknologi yang mampu mendukung itu semua seperti ECLSS yang digunakan pada ISS. Secara arsitektural seperti pengaturan spasial dapat berdampak pada kesuksesan misi. Bagaimana hubungan antar tempat saling terhubung sehingga dapat tercipta sebuah susunan/tatanan konfigurasi yang efisien ketika digunakan.

Livability mengutip *Cambridge Dictionary*, adalah tingkat kesesuaian atau baik untuk ditinggali. Pada konteks luar angkasa, pengertian *Livability* artinya menyediakan ruang semaksimal mungkin meskipun dalam volume yang terbatas, minimal, dan secara sosial terisolasi bagi individu maupun kru. Batasan yang dimaksud adalah pada rendahnya kenyamanan yang ditimbulkan akibat dari lingkungan yang terpencil, terbatasnya volume yang tersedia dalam melakukan aktivitas, serta sedikitnya kesempatan untuk pergi ke lingkungan luar karena keadaan yang ekstrim. Menurut astronot Jean Pierre Haignere, ruang privasi sangat penting dan perlu diintegrasikan ketika merancang sebuah tempat hunian (Häuplik-Meusburger, 2011)

Flexibility berdasarkan pengertian Cambridge Dictionary, yakni kemampuan untuk berubah atau dirubah dengan mudah sesuai dengan situasi. *Flexibility* memungkinkan adanya perubahan atau pengaturan pada hal-hal yang menyangkut dengan kegiatan selama berada di luar angkasa. Fleksibilitas dapat diterapkan pada fungsi spasial ruangan yang bervariasi, maupun fleksibilitas dari objek atau furniture bangunan itu sendiri yang memiliki variasi penggunaan.

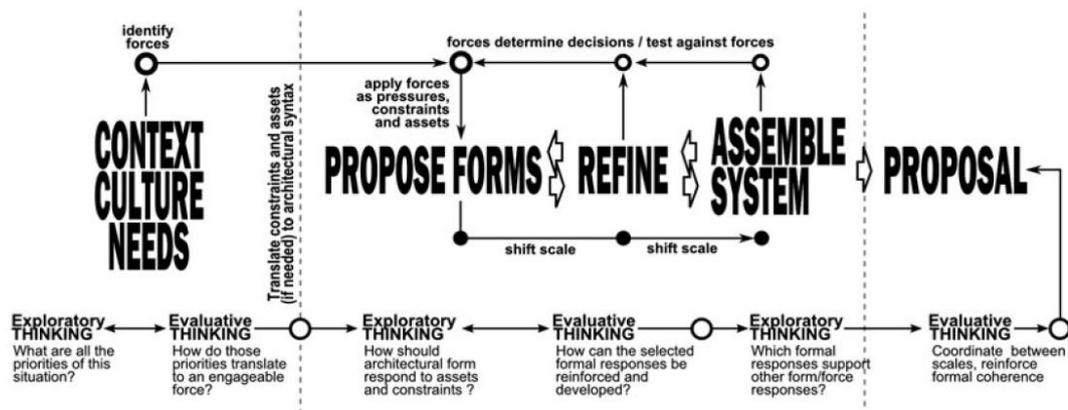
Pada perancangan ini, perancang mendesain bangunan dengan teknik prafabrikasi. Prafabrikasi adalah, produksi elemen-elemen bangunan yang digunakan dalam konstruksi suatu bangunan di luar site / lokasi konstruksi dengan Tingkat penyelesaian yang tinggi sehingga dapat dirakit ketika berada site / lokasi (Timberlake & Smith, 2010). Dengan mengkonstruksi elemen di bumi lalu di bawa ke permukaan bulan, tentunya akan mengurangi beban kerja dari manusia. Ditambah lagi dengan lingkungan bulan yang ekstrim, kemudahan dalam proses konstruksi menjadi sangat penting. Prafabrikasi sendiri dapat diklasifikasikan dari segi elemen apa yang selesai dan siap untuk digabungkan, yang terdiri atas material, komponen, panel, dan modul (Timberlake & Smith, 2010). Modul disini berarti unit konstruksi terstandar yang didesain untuk kemudahan penyusunan dan cenderung memiliki tingkat penyelesaian yang lebih tinggi dibandingkan dengan berbagai metode prafabrikasi lainnya (Timberlake & Smith, 2010).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Metode yang Digunakan

Dalam perancangan, perancang menggunakan kerangka berpikir *force-based framework* oleh Plowright pada bukunya yang berjudul *Revealing Architecture Design*, yang dimana berfokus pada berpikir sistem dan merespon *force* yang ada yang dijadikan sebagai batasan maupun aset yang perlu direspon oleh perancang. *Force* ini dapat berupa apapun yang nantinya bisa dijadikan sebuah *constraint* ataupun *asset* dan mampu direspon oleh aspek formal dalam arsitektur.



Gambar 3.1 Diagram *Force-Based Framework* (Plowright, 2014)

3.2 Bahan dan Peralatan yang Digunakan

Pengumpulan data-data terkait teori dan juga lokasi serta studi preseden dilakukan dengan melakukan studi literatur melalui internet. Pada tahap perancangan, perancang menggunakan sketsa tangan untuk menghasilkan gambaran konsep, yang kemudian akan disempurnakan melalui bantuan perangkat lunak permodelan tiga dimensi. Perangkat lunak permodelan tiga dimensi yang digunakan perancang adalah *Sketchup*. Penyajian gambar akan menggunakan perangkat lunak *Clip Studio Paint*, *Canva*, dan *Figma*.

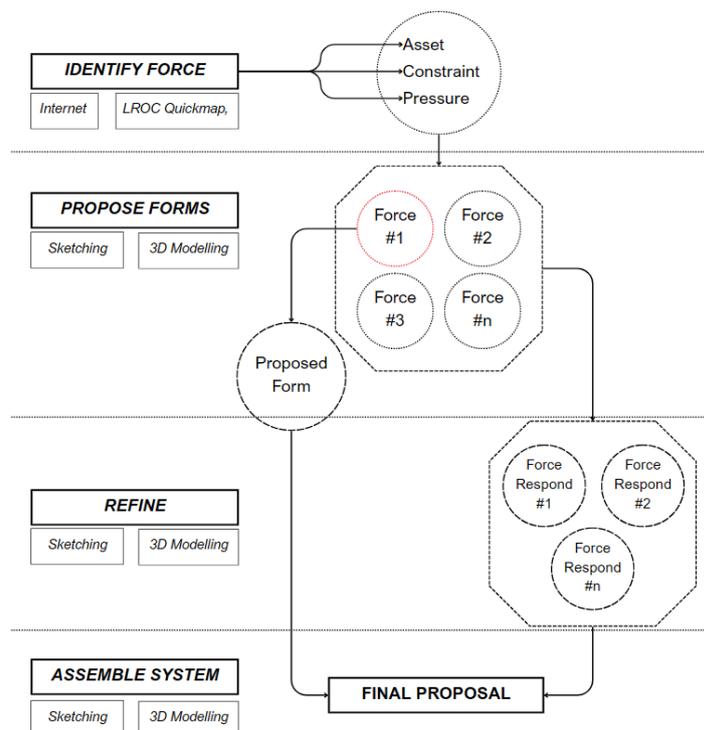
3.3 Urutan Pelaksanaan Riset/Rancangan

Urutan pelaksanaan perancangan, yang dilakukan didasarkan pada diagram *Force-Based Framework* oleh Plowright, adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan dan pemahaman teori yang akan digunakan sebagai dasar dari perancangan, yakni *Space Architecture*. Kemudian dikaitkan dengan konteks-konteks yang hadir saat ini mengenai sains dan ilmu pengetahuan. Tahap ini, perancang menggunakan metode riset berbasis daring, yakni penelitian yang dilakukan dengan menggunakan internet untuk mengumpulkan data (Van Breukelen, 2010)
2. Identifikasi *force*, yang berasal dari teori yang dipilih oleh perancang serta analisa konteks yang ada, yakni site dan juga konteks sains yang ada. Pengumpulan data dilakukan oleh perancang dengan melakukan studi literatur dari internet baik terkait site dan juga konteks sains yang ada, ditambah lagi dengan pencarian data dimensi roket

yang akan digunakan dalam mengangkat modul. Dari *force* ini, kemudian perancang menghasilkan kriteria-kriteria desain. Tahap ini, perancang memanfaatkan internet untuk mencari dan menggali informasi terhadap tapak, juga respon yang dapat diberikan untuk menangani keadaan tapak di bulan. [*IDENTIFYING FORCE*]

3. Dari sekian *force* yang ditemukan, perancang memilih salah satu *force* untuk dijadikan sebagai pemantik utama dalam mulai proses menggagas bentuk. Perancang menggunakan metode sketsa dalam menggambarkan ide-ide awal. Sketsa adalah data awal yang muncul melalui pemikiran yang tidak merepresentasikan kesempurnaan (Özker & Süyük Makaklı, 2017). [*PROPOSE FORMS*]
4. Perancang melakukan iterasi dengan memperhatikan kriteria rancang lain yang merespon *force* lainnya. Pada tahap ini menggunakan dua metode, yakni sketsa dan juga 3D modeling, yakni pembuatan representasi tiga dimensi dari suatu objek atau permukaan dengan software (Shanaya Verma, 2022). Dua metode ini digunakan beriringan. [*REFINE*]
5. Menggabungkan respon terhadap *force* dengan gagasan bentuk di awal menjadi satu kesatuan dalam membentuk desain yang merespon seluruh *force* yang telah diidentifikasi pada tahap *Identify Forces*. Penggabungan seluruh komponen menggunakan metode 3D modeling. [*ASSEMBLY SYSTEM*]



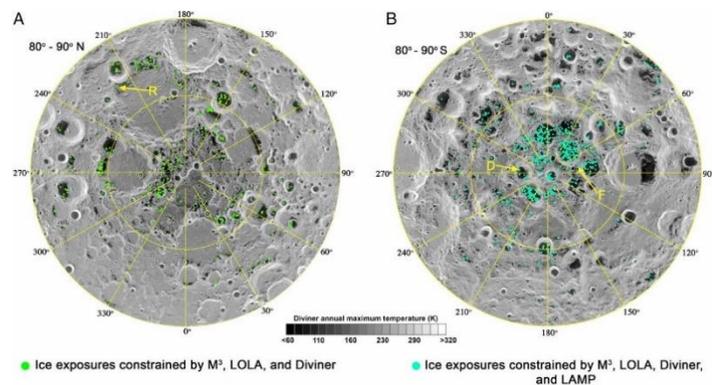
Gambar 3.2 Proses / Tahapan Perancangan mengadopsi *Force-Based Framework* milik Plowright

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Riset/Rancangan

4.1.1 Deskripsi Tapak

Kutub Selatan adalah salah satu area yang selalu dipertimbangan dalam pemilihan lokasi site oleh para peneliti. Hal ini terkait dengan ditemukannya titik-titik air oleh Shuan Li dan beberapa peneliti lain dalam publikasi yang berjudul “*Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions*” pada tahun 2018.



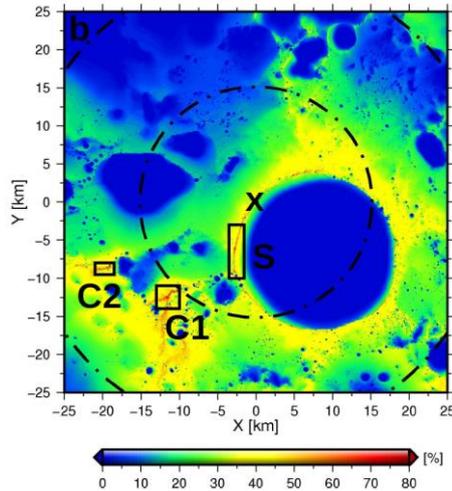
Gambar 4.1 Titik Lokasi Keberadaan Air di Kutub Bulan. (Li et al., 2018)

Pada diagram di atas, titik-titik air yang ditemukan berada di area kutub utara maupun area kutub Selatan, yang pada gambar di atas ditunjukkan pada titik-titik berwarna hijau untuk area di kutub utara, dan titik-titik berwarna biru cerah untuk area di kutub Selatan. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa titik-titik berwarna biru cerah lebih banyak dibandingkan dengan titik-titik berwarna hijau cerah, yang berarti bahwa jumlah titik air di kutub Selatan memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan air di kutub utara, sehingga lokasi yang akan dipilih akan berada pada daerah yang mendekati daerah kutub Selatan.

Shackleton Crater adalah salah satu area yang berada di area kutub selatan. Shackleton Crater sendiri memiliki kawah berdiameter sekitar 20 km (Spudis et al., 2008), yang letaknya berada di dekat dengan area kutub Selatan bulan. Kedalaman dari kawah ini bisa mencapai sekitar 3 km dari permukaan bulan, yang dimana area internal dari kawah ini tidak pernah terkena paparan matahari, sehingga memiliki suhu yang rendah.

Di daerah ini juga, ada Sebagian kecil dari kawah yang terkena iluminasi atau pancaran dari matahari, tepatnya pada area pinggiran kawah yang dimana hal ini dapat dimanfaatkan untuk menempatkan fotovoltaiik yang berfungsi untuk mengubah Cahaya matahari menjadi energi listrik (Gambar 3.6).

Penting dalam memperhatikan bagaimana manusia dapat hidup pada lingkungan-lingkungan yang ekstrim, yang dapat mengancam keberlangsungan hidup seseorang. Dalam lingkungan, terdapat beberapa unsur alam di dalamnya seperti suhu, radiasi, tekanan, komposisi atmosfer dan juga gravitasi, yang bila mana salah satunya tergolong dalam taraf yang membuat manusia terancam, maka dapat diklasifikasikan sebagai lingkungan yang ekstrim.



Gambar 4.2 Tingkat Iluminasi pada Shackleton Crater (Glaser et al., 2017)

Pada lokasi yang ditentukan, ada beberapa faktor yang menjadi pertimbangan dalam perancangan dan perlu direpson dalam rangka untuk menjaga keselamatan manusia saat menggunakan objek perancangan. Suhu yang ekstrim, radiasi, pencahayaan matahari, keadaan atmosfer yang tidak bertekanan dan tak memiliki oksigen, serta keadaan gravitasi yang hanya 1/6 dari gravitasi bumi, menjadi faktor lain yang perlu direpson oleh perancang. Ditambah lagi dari proses pendaratan ke permukaan bulan yang membuat bangunan perlu memiliki bagian yang bertugas untuk memperlambat kecepatan modul bangunan saat memasuki area gravitasi bulan.

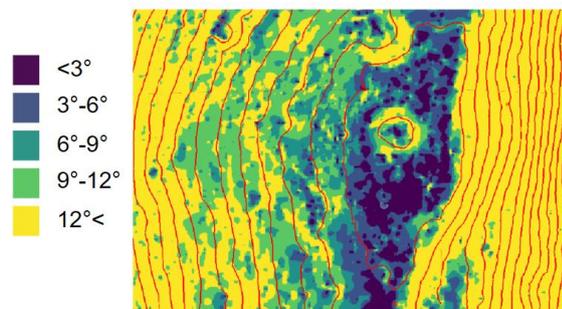
Bulan memiliki sebuah lapisan sama halnya dengan atmosfer bumi. Namun lapisan di sekitar bulan, yang disebut eksosfer, sangatlah tipis yang menyebabkan radiasi maupun suhu dari matahari tidak dapat diredam seperti halnya di bumi, Suhu di bulan dapat menyentuh -173°C hingga 127°C (Benaroya, 2017). Secara spesifik, pada lokasi yang ditentukan, suhu dapat mencapai 54°C ketika terkena paparan matahari (Mahoney, 2023).

Radiasi adalah faktor selanjutnya yang menjadi pertimbangan ketika berada di luar angkasa. Radiasi dapat menyebabkan berbagai permasalahan Kesehatan bagi manusia, karena radiasi dapat merusak sistem kardiovaskular (Mars, 2023). Radiasi adalah energi yang dapat berbentuk gelombang elektromagnetik, ataupun partikel. Radiasi dapat berasal dari benda-benda seperti microwave ataupun hadir secara natural dari matahari. Radiasi harus bisa direpson seminimal mungkin. Salah satu material yang mampu merespon radiasi adalah material Kevlar, yang mampu memiliki efektivitas hampir menyamai polyethylene, yang merupakan material terbaik dalam menghalau radiasi (Pugliese et al., 2010). Material ini juga mampu merespon tubrukan meteorit kecil yang terjadi ketika berada di bulan dan sifatnya yang fleksibel. Salah satu strategi lain yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan regolith itu sendiri. Lapisan regolith yang dibutuhkan adalah lapisan regolith setebal 2 m untuk menekan dosis radiasi yang diterima astronot sebesar 150 mSv per 180 hari (Savage, 2025). NASA sendiri menetapkan batas radiasi yang diterima astronot dalam karir mereka sebesar 600 mSv.

Keadaan di bulan tidak memungkinkan manusia untuk bernafas, dengan kata lain, tidak ada oksigen. Padahal oksigen adalah salah satu hal yang paling penting bagi manusia untuk hidup. Manusia tidak dapat hidup lebih dari tiga menit dengan keadaan tanpa oksigen. Pada ISS, mereka menggunakan *Environmental Control and Live Support System* (ECLSS) yang menghasilkan oksigen dengan mengelektrolisis air.

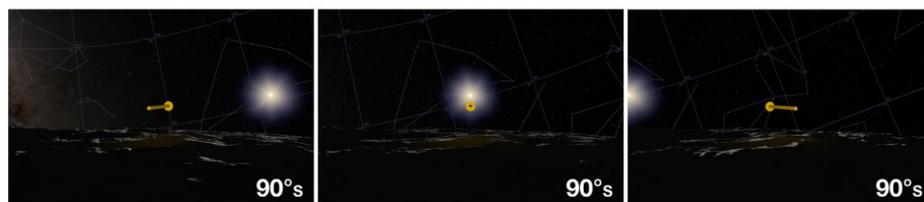
Gravitasi pada bulan sangat berbeda dengan di bumi. Bulan hanya memiliki 1/6 gravitasi bumi, yakni sekitar $1,62\text{m/s}^2$ dibandingkan dengan bumi yang memiliki gravitasi sebesar $9,81\text{m/s}^2$. Hal ini kemudian membuat perilaku manusia dalam bergerak di bulan, berbeda dengan bergerak di bumi. Berjalan di bulan terasa lambat dan tidak praktis (Capps et al., 1989). Pada sebuah studi yang berjudul, “*Exploratory Study of Man’s Self-Loocomotion Capabilities with A Space Suit in Lunar Gravity*” oleh kelompok yang dipimpin Amos A., mereka mensimulasikan dan membandingkan bagaimana ketika manusia bergerak dan melompat di bumi (1G) dengan di bulan (1/6 G). Tinggi lompatan pada 1G adalah sekitar 48 cm hingga 55 cm. Sedangkan pada gravitasi 1/6 G, tinggi lompatan mampu mencapai 365 cm hingga 426 cm. Dalam studi yang sama, juga dikatakan bahwa para individu yang melakukan aktivitas dalam simulasi gravitasi 1/6 G selama 3 jam, tidak merasa kelelahan. Sebaliknya saat melakukan aktivitas di 1 G, individu merasa kelelahan.

Topografi pinggiran kawah *Shackleton* dapat dilihat pada gambar 4.3. interval antar garis kontur adalah 10 m. Topografi pada lokasi yang ditentukan cenderung landai dengan kemiringan kurang dari 8° .



Gambar 4.3 Topografi Lokasi Tapak (Quickmap LROC)

Berbeda dengan di bumi, matahari pada lokasi tapak, tidak mengalami terbit ataupun tenggelam, melainkan seolah-olah bergerak melingkari lokasi pada satu garis horizontal di atas garis *horizone* yang dapat dilihat pada simulasi pergerakan matahari oleh NASA yang ditampilkan pada gambar 4.4. Sehingga area bisa mendapatkan sinar matahari secara konstan dari berbagai sisi, tergantung kedudukan matahari dengan bulan.



Gambar 4.4 Simulasi Pergerakan Matahari pada Area Kutub Selatan Bulan (NASA, 2022)

Maka dari uraian di atas, maka bagian dari tapak yang menjadi pertimbangan adalah radiasi, gravitasi, kondisi tanpa oksigen dan air. Kondisi ini juga kemudian membuat manusia sulit untuk beraktivitas meskipun mereka menggunakan pakaian khusus.

4.1.2 Program Ruang

Penelitian geologi memiliki beberapa tujuan mengenai bulan itu sendiri. Peneliti geologi harus bisa melakukan inspeksi visual secara langsung untuk mengambil sampel, sehingga diperlukan peralatan-peralatan seperti palu, ataupun bor kecil untuk mengumpulkan sampel dan

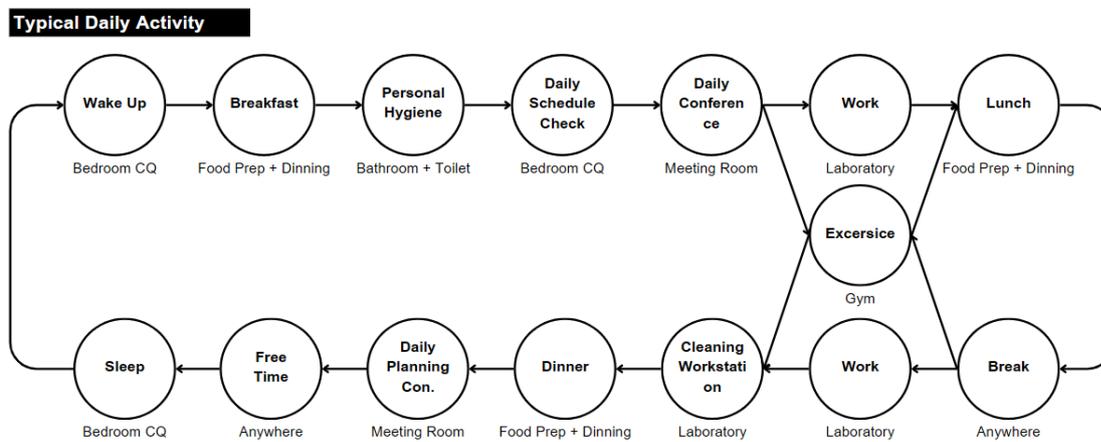
dipersiapkan sebelum dianalisa lebih lanjut, atau dibawa pulang ke bumi untuk diteliti lebih lanjut (Heinicke et al., 2018).

Material Science mempelajari struktur dan komposisi dari suatu material. Bidang ini juga mempelajari dan mengembangkan material-material baru. Penelitian Material Science di bulan akan berfokus pada penelitian Lunar Regolith yakni tanah yang ada di permukaan bulan, dengan tujuan besarnya dalam pengembangan kedepannya terhadap In-Situ Resource Utilization (ISRU) atau pemanfaatan sumber daya bulan (Heinicke et al., 2018).

Bulan sudah mengumpulkan berbagai materi organik baik dari asteroid, komet, Carbonaceous Chondrites yakni komet batuan dari tata surya awal, dan debu kosmik selama kurang lebih 4 juta tahun lamanya. Hal ini berpotensi bagi penelitian astrochemistry dalam memahami dan mengerti tentang evolusi senyawa karbon yang berasal dari sejarah tata surya. Melakukan penelitian ini di bulan, akan menurunkan resiko kontaminasi organisme-organisme bumi ketika akan dilakukan penelitian, sehingga keadaan sampel akan selalu bersih dan steril. (Heinicke et al., 2018).

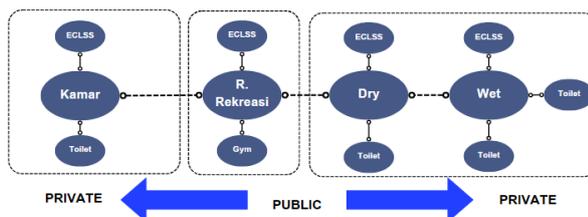
Penelitian astrobiologi memiliki beberapa hal yang menjadi tujuan dalam melakukan penelitian di bulan, antara lain mengetahui batas kemampuan kehidupan di luar bumi, pencarian kehidupan ekstraterestrial, asal usul dan perkembangan kehidupan, mempelajari Biological Life Support System, dan evolusi mikrobioma. (Heinicke et al., 2018)

Kegiatan yang akan terjadi diperkirakan dengan mengambil referensi dari kegiatan yang dilakukan para astronot selama berada di ISS. Skema kegiatan tersebut lebih kurang dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 Skema Aktifitas Pengguna

Kegiatan ini kemudian digunakan dalam menentukan relasi antar ruangan pada perancangan ini. Dari aktivitas tersebut, perancang kemudian membaginya menjadi tiga aktivitas utama, yakni beristirahat, berekreasi dan bekerja. Beristirahat erat kaitannya dengan kegiatan tidur dan bangun tidur. Sedangkan berekreasi, lebih kepada aktifitas yang dilakukan oleh pengguna untuk mengisi waktu luang mereka. Berolahraga wajib dilakukan oleh astronot ISS selama 2 jam sehari untuk menjaga kekuatan fisik tubuh mereka agar tidak terdegradasi.



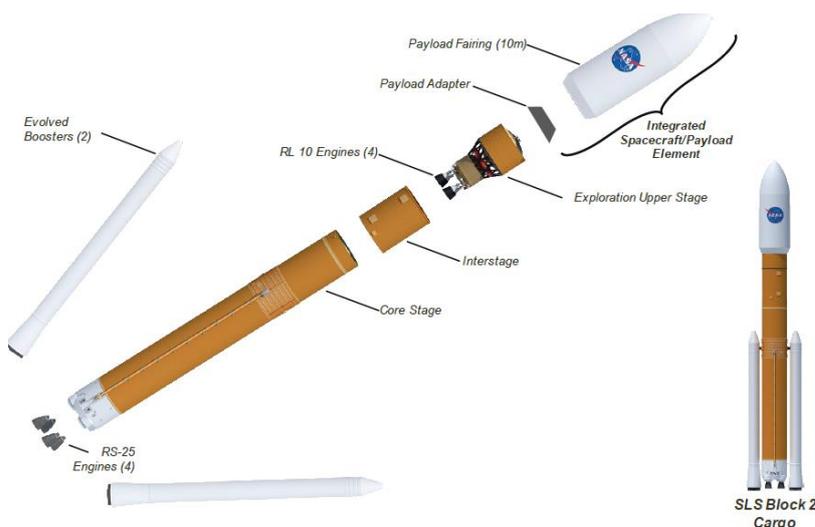
Gambar 4.6 Diagram Hubungan Ruang

Melansir LabXchange.org, Lab dapat terdiri dari 20 hingga 30 orang. Asumsi yang diambil jika setiap lab memiliki 25 orang, ditambah 2 orang yang bertindak sebagai pendukung kegiatan ataupun pemelihara peralatan, maka total keseluruhan ada 108 orang. Dalam menentukan luasan ruangan, ada beberapa hal yang diperhatikan termasuk standar dan fungsi ruang. Hal tersebut tersaji pada bagian Lampiran A.

4.1.3 Konsep Rancangan

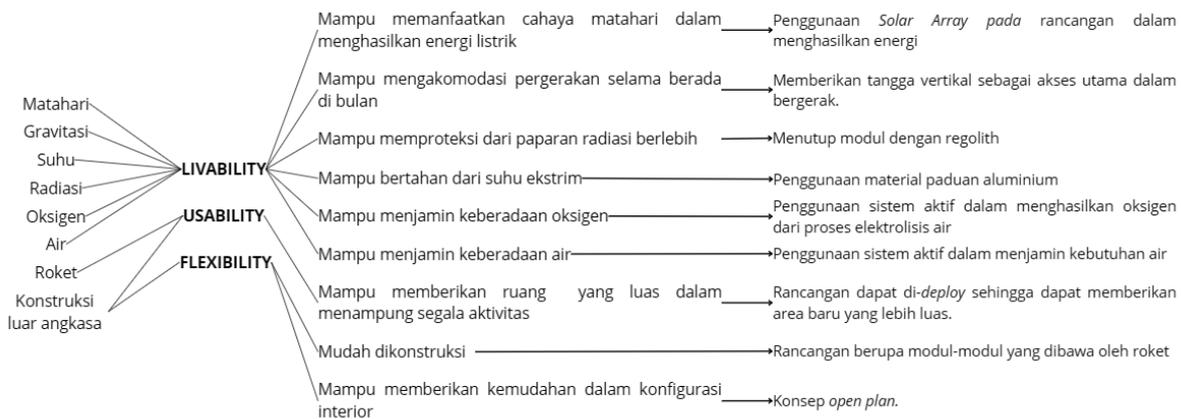
Langkah awal adalah melakukan identifikasi dan menganalisa *force* apa saja yang sekiranya berpengaruh pada perancangan ini, yang kemudian dari sana, akan muncul kriteria-kriteria desain. Selain *Force* yang sedikit banyak telah dibahas pada bagian deskripsi tapak, ada satu *force* lagi yang dirasa penting untuk diulas dan menjadi *force* utama, yakni mengenai transportasi. Transportasi yang dimaksud adalah roket yang akan membawa rancangan pada lokasi yang dituju, dan faktor ini adalah faktor yang cukup penting, mengingat roket memiliki batasan dimensi yang mampu dibawa.

Pada perancangan ini, perancang menggunakan roket *SLS Block 2 Cargo*, yang merupakan roket milik NASA untuk membawa modul-modul rancangan ke bulan. Sebelum membahas lebih lanjut, perlu diketahui bahwa bagian, tempat menaruh rancangan yang akan dikirim ke luar angkasa disebut dengan *payload fairing*. *Payload fairing* sendiri berfungsi untuk melindungi benda di dalamnya dari gaya gesekan saat berada dan akan keluar dari atmosfer bumi (Wessels, 2025). Sedangkan bagian lainnya dari roket ini adalah bahan bakar yang akan mendorong roket ini ke luar angkasa.



Gambar 4.7 Gambar Roket SLS Block 2 Cargo (NASA, 2018)

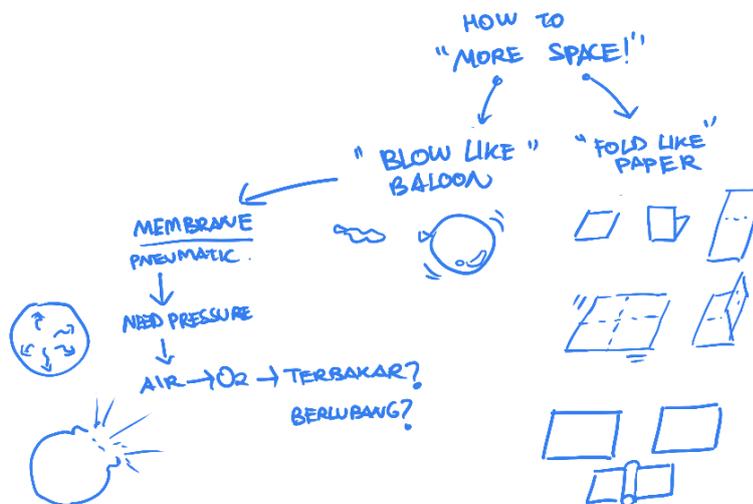
Setelah mengidentifikasi *force* apa saja yang sekiranya perlu direspon dalam perancangan, maka perancang kemudian menghasilkan kriteria-kriteria desain apa saja yang muncul pada perancangan ini (Gambar 4.8).



Gambar 4.8 Kriteria Rancang

4.1.3.1 Deployable Module

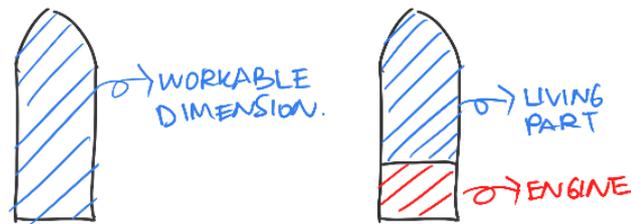
Dalam menggagas bentuk, perancang mengambil salah satu *force* yang telah diidentifikasi sebelumnya, yakni kehadiran volume semaksimal mungkin dengan Batasan berupa ukuran payload fairing daripada roket *SLS Block 2 Cargo*. Hal ini berkenaan dengan prinsip *Livability* pada teori *Space Architecture*. Untuk memulai desain dengan *force* ini perancang menghadirkan sebuah pertanyaan, yakni “bagaimana cara menghadirkan ruangan yang lebih?”. Seperti yang telah dijelaskan, roket memiliki limitasi dimensi yang berpengaruh pada ukuran dan bentuk rancangan. Namun, apakah ada cara, agar kita dapat menabrak limitasi tersebut. Maka muncul dua gagasan awal yang ditawarkan, yakni seperti balon, menghadirkan ruangan dengan memanfaatkan tekanan. Atau seperti origami yang dapat ditekuk-tekuk untuk menghadirkan luasan yang lebih besar?



Gambar 4.9 Gagasan Awal

Pertimbangan kemudian jatuh pada pilihan origami. Hal ini didasari pada gagasan balon, akan rentan terhadap kebocoran yang terjadi sewaktu-waktu. Bilamana itu terjadi, maka maintenance cenderung akan lebih sulit. Ditambah lagi, dengan sifatnya yang memanfaatkan tekanan udara, apabila terjadi kebakaran maka akan lebih sulit memadamkan api. Hal ini dikarenakan oksigen adalah hal yang diperlukan untuk menjaga tekanan internal dalam ruang namun juga diperlukan pada proses pembakaran. Sehingga jika meniadakan oksigen untuk memadamkan api, maka konsekuensinya pada bentuk ruang tidak dapat dipertahankan. Jikapun asumsi perancang bahwa tekanan yang membentuk ruang tersebut dapat diubah dari oksigen menjadi unsur gas lainnya, maka memerlukan waktu yang cukup banyak sebelum akhirnya oksigen akan terganti.

Karena adanya limitasi, maka perancang mendesain rancangan menjadi modul-modul yang nantinya akan disambungkan. Modul ini kemudian akan melakukan pendaratan, sehingga perancang membagi modul menjadi dua bagian, yakni *Living Part* yang berfungsi sebagai tempat beraktifitas, dan *Engine Part*, yang dimana berfungsi sebagai tempat mesing berada dan tidak dapat diakses oleh pengguna (Gambar 4.10).

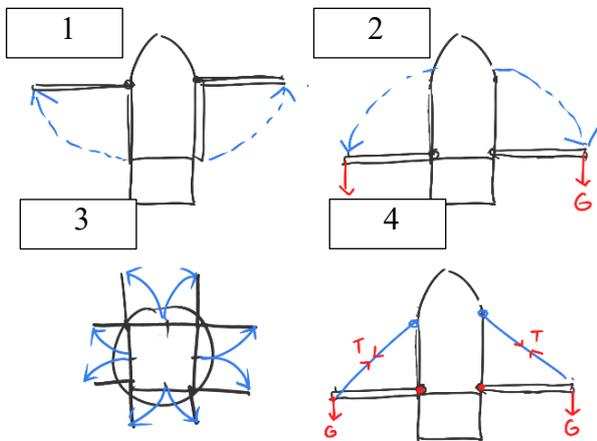


Gambar 4.10 Pembagian *Living Part* dan *Engine Part*

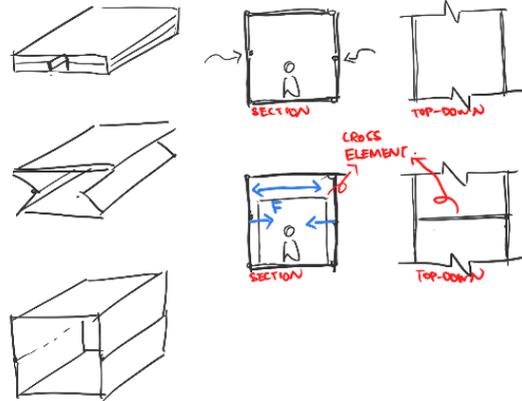
Pada bagian *Engine Part*, perancang menghadirkan volume ruang bagi mesin dan bahan bakar dengan melakukan komparasi dengan *Starship* milik SpaceX yang digadang-gadang akan membawa manusia pergi ke bulan dan kembali. Perancang mengintensikan modul ini agar menetap di bulan, dengan tujuan agar tidak perlu mengirim modul berulang kali ketika akan melakukan penelitian di bulan, maka asumsi yang dibuat adalah *starship* akan melakukan satu kali perjalanan menuju bulan. Asumsi volume maksimal yang mampu dibawa oleh *starship* sebesar $1398,9 \text{ m}^3$ dengan bentuk penampang lingkaran yang berdiameter 9 meter dan tinggi 22 meter, dengan volume bahan bakar/mesin yang diperlukan sebesar 717 m^3 untuk satu kali peluncuran. Maka modul rancangan dengan volume kasaran sekitar $531,5 \text{ m}^3$ memerlukan volume *Engine Part* sebesar $290,3 \text{ m}^3$.

Gagasan awal tadi, kemudian dieksplor lagi. Menghadirkan luasan yang lebih dengan melipat dan membuka (Gambar 4.11). Pada Gambar, nomor 1 memiliki bukaan ke arah atas, nomor 2 memiliki bukaan ke arah bawah, dan nomor 3 memiliki bukaan ke arah samping. Pertimbangan nomor 1, akan memerlukan energi yang cukup besar untuk mendorong sisi ke arah atas karena memerlukan gaya untuk mengangkat modul melawan gaya gravitasi. Nomor 3, dirasa membutuhkan energi yang lebih kecil untuk melakukan pergerakan dibandingkan dengan nomor 1 karena tidak melawan energi gravitasi, namun bergerak ke arah samping.. Nomor 2, memanfaatkan gravitasi bulan untuk membuka sisi modul, yang artinya tidak memerlukan energi dalam melakukan pergerakan tersebut. Sehingga dengan pertimbangan ini perancang menggunakan pilihan nomor 2 sebagai konsep bukaan pada modul. Pada nomor 4,

memanfaatkan tegangan tali untuk mengontrol kecepatan tekukan/bukaan pada sisi-sisi modul sehingga modul tidak bergerak jatuh bebas ketika proses *deploy*.



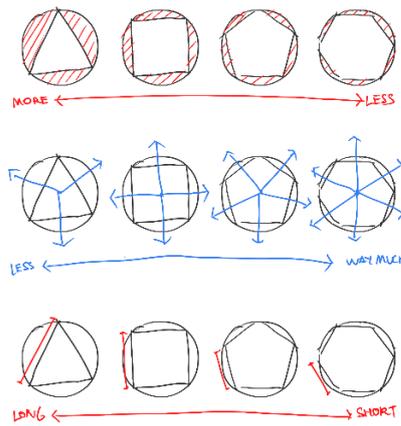
Gambar 4.11 Konsep Bukaan



Gambar 4.12 Konsep Lipatan Ruang

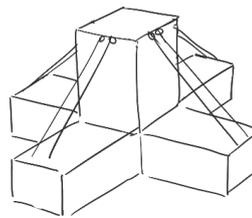
Untuk menghadirkan sebuah ruang, maka diperlukan sisi / bidang di pinggir dan juga di atas. Dengan menggunakan konsep lipat juga, maka perancang mengusulkan untuk menggunakan konsep yang digambarkan pada gambar 4.12. Perancang terinspirasi dari konsep rumah kontainer lipat yang berada di china, sehingga modul ketika berada di bumi, akan dilipat sedemikian rupa, dan ketika berada di bulan, akan terbuka untuk menghadirkan volume yang lebih besar. Untuk memberikan kestabilan dan membuat struktur lebih rigid, maka akan ada bidang yang diletakkan paralel dengan dinding tekuk tadi.

Perancang kemudian berfokus pada jumlah tekukan/bukaan yang akan dihadirkan pada modul. Pertimbangan yang ada yakni semaksimal apa ruangan *payload fairing* yang ada itu digunakan, bagaimana kemudahan navigasi ketika modul tersebut digunakan, dan seberapa lebar masing-masing tekukan/bukaan yang dihadirkan (Gambar 4.13) Pada faktor semaksimal apa ruang yang ada tersebut digunakan, semakin banyak sisi, semakin maksimal pula ruang yang digunakan, dalam artian, luasan ruang yang terbuang tidak terlalu banyak. Pada faktor navigasi oleh para pengguna di dalamnya, semakin banyak sisi, maka akan semakin banyak pula orientasi yang dapat menimbulkan kesulitan dalam menentukan arah pergerakan dan navigasi. Hal ini didukung dari sebuah jurnal *Spatial decision dynamics during wayfinding: intersections prompt the decision-making process*, yang dimana perpotongan adalah titik pengambilan keputusan, terhadap langkah apa yang akan diambil untuk melanjutkan perjalanan mereka (Brunyé et al., 2018). Yang dimana menurut hukum Hick, semakin banyak opsi atau pilihan yang diberikan pada seseorang, maka semakin lama pula seseorang itu akan sampai pada sebuah keputusan (Think 360 Studio, 2024). Faktor selanjutnya, yakni lebar dari tekukan/bukaan, yang dimana semakin sedikit sisinya, maka semakin lebar pula tekukan/bukaan tersebut, begitu sebaliknya. Sehingga, perancang kemudian memutuskan untuk memilih opsi dengan 4 sisi tekukan/bukaan, karena dianggap menengahi dari ketiga faktor yang dijelaskan sebelumnya, cukup maksimal, navigasi terbilang cukup mudah, dan lebar yang tidak terlalu kecil.



Gambar 4.13 Jumlah Tekukan/Bukaan pada Modul

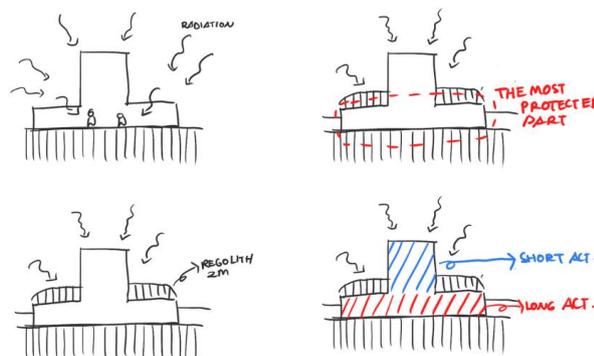
Sampai pada tahap ini, *propose form* yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 4.14 yang menunjukkan bentuk awal daripada bentuk yang digagas dengan 4 lengan dan satu bagian modul yang menjulang, dapat dilihat pada lampiran D. Material yang digunakan dalam perancangan ini adalah material paduan aluminium, yang dimana sudah banyak digunakan pada dunia *aerospace*, salah satu contohnya adalah *Lunar Module* milik program apollo.



Gambar 4.14 Proposed Form

4.3.1.2 Proteksi Terhadap Radiasi

Dalam melindungi kru dari radiasi, strategi yang dapat diterapkan yakni dengan memanfaatkan regolith itu sendiri. Pada sebuah penelitian yang berjudul “*Radiation Shielding for Long-Term Lunar Settlements with Regolith and Other ISRU Options*” oleh Lauren Savage dan tim pada tahun 2025, Regolith dapat menjadi lapisan pelindung yang efektif bagi radiasi. Tetapan dosis radiasi maksimal yang boleh diterima manusia menurut NASA adalah sekitar 600 mSv. Melalui penelitian ini, dengan 2 meter regolith astronot akan menerima dosis sebesar 150 mSv selama 180 hari. Sehingga, perancang mengusulkan untuk menutup modul dengan regolith, untuk mengurangi paparan radiasi yang diterima oleh pengguna (Gambar 4.15).

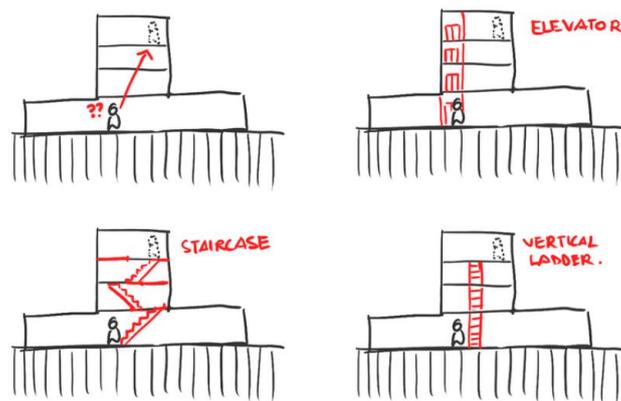


Gambar 4.15 Perlindungan dari Radiasi

Sehingga, hal ini membuat area dasar dari modul menjadi area yang paling terlindungi dari paparan radiasi. Oleh karenanya, aktivitas utama yang akan memakan waktu yang lama akan ditempatkan pada bagian dasar ini. Sedangkan area atas akan ditempatkan aktivitas yang tidak banyak melakukan aktivitas lama.

4.3.1.3 Akses Vertikal

Untuk bergerak ke ruang atas, maka diperlukan akses vertikal. Beberapa opsi akses vertikal dapat dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.16 Konsep Akses Vertikal

Opsi pertama adalah dengan menggunakan tangga pada umumnya ketika kita akan naik ke lantai atas pada rumah. Opsi ini dinilai tidak terlalu efektif, karena memerlukan ruang yang cukup luas untuk menempatkan dan memberikan ruang di atas kepala. Kalau melihat opsi ke 2, penggunaan elevator bisa menjadi pilihan yang cukup efektif, karena tidak memakan terlalu banyak ruang, seperti pada opsi pertama. Namun pertimbangannya adalah, karena menggunakan sistem aktif, maka kebutuhan akan energi listrik akan meningkat. Opsi ke 3, yakni dengan menggunakan *vertical ladder* atau ‘tangga monyet’. Opsi ini dinilai cukup efisien dan cocok untuk diterapkan karena tidak memerlukan luasan lantai yang besar, karena tidak memerlukan kemiringan. Selain itu, sistem ini bukan sistem aktif yang akan membebani kebutuhan akan energi listrik. Didukung dengan besaran gravitasi bulan yang hanya 1/6 dari gravitasi bumi, menaiki tangga vertikal pada kondisi gravitasi bulan tidak menyulitkan (Spady & Krasnow, 1966)

4.3.1.4 Pembangkit Energi

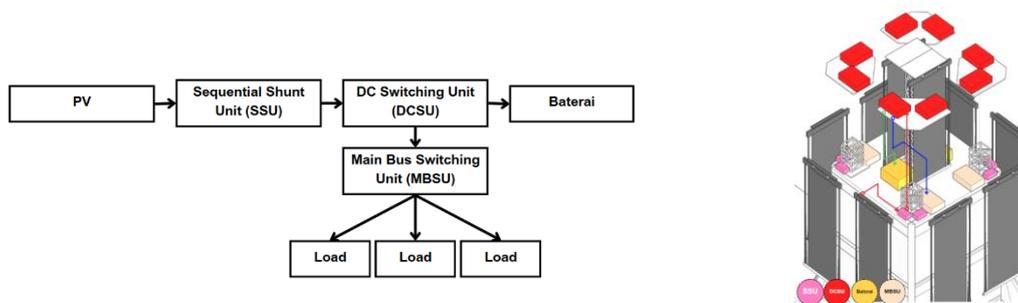
Energi listrik, akan dihadirkan dengan ROSA atau *Roll Out Solar Array* yang dimana dapat digulung dan dibentangkan karena sifatnya yang fleksibel. Penempatan ROSA berada di luar, bagian atas modul. Hal ini ditujukan untuk mendapatkan Cahaya matahari semaksimal mungkin sepanjang waktu. Gambar dari ROSA sendiri dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Roll Out Solar Array (NASA Glenn Research Center, 2025)

Jumlah kebutuhan energi listrik, diambil dari Technical Memorandum NASA yang ditulis oleh J. Mark Hickman tahun 2002, yang dimana didalamnya salah satunya menyatakan bahwa energi yang diperlukan oleh 1 orang pada sebuah habitat di bulan sekitar 3 kW. Sedangkan ROSA dapat menghasilkan 3 kW dengan dimensinya sebesar 5.4 m x 1.7 m (Spence et al., 2018). Sehingga, jika dengan jumlah kapasitas maksimal okupansi sebanyak 108 orang, maka yang diperlukan adalah sekitar 324 kW. Pada setiap modul, ditempatkan masing-masing 10 ROSA. Sehingga dengan total 17 modul, maka terdapat 170 ROSA yang mampu menghasilkan 510 kW untuk memenuhi kebutuhan.

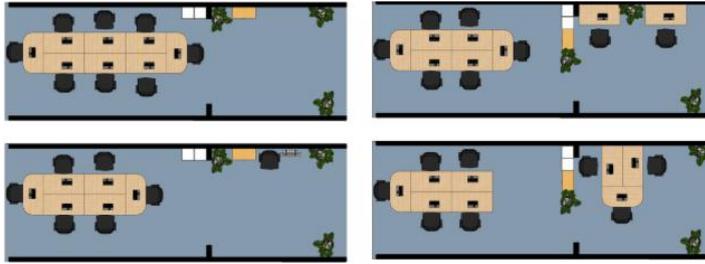
Sistem utilitas listrik yang digunakan, mengacu pada sistem pada *International Space Station*. Sistem utilitas listrik dapat dilihat pada gambar 4.18. Energi listrik dari ROSA (PV), akan distabilkan oleh *Sequential Shunt Unit* (SSU) sebelum nantinya masuk ke *DC Switching Unit* (DCSU). Di DCSU ini, aliran akan didistribusikan ke dua bagian yang pertama adalah untuk mengisi baterai, dan yang ke dua adalah unit *Main Bus Switching Unit* (MBSU). MBSU sendiri yang kemudian nantinya akan menyalurkan listrik ke beban-beban listrik pada modul.



Gambar 4.18 Flowchart dan Isometri Utilitas Listrik mengadaptasi dari sistem elektrikal ISS

4.1.3.5 Open Plan

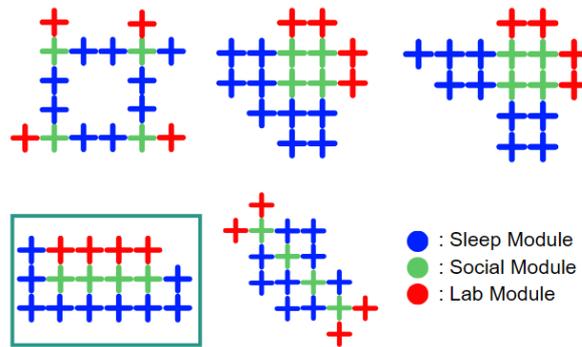
Dalam menghadirkan fleksibilitas, ada dua hal yang dilakukan, yakni dengan minimnya partisi atau dinding yang menyekat antar ruang, dan juga dengan perabot yang mampu dilipat atau diubah fungsinya. Hal ini dapat ditemukan pada bagian *Dry Lab* pada modul laboratorium yang berfungsi sebagai tempat meeting, juga penelitian yang tidak melibatkan bahan kimia dan sejenisnya, melainkan analisis yang dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat keras pengolah data seperti laptop. Dengan minimnya dinding pembentuk ruang, maka memberikan kemudahan ketika para kru ketika ingin melakukan konfigurasi pada modul, sehingga mereka dapat menyesuaikan area bekerja / beraktifitas mereka dengan mudah. Hal ini juga berlaku pada seluruh modul yang terlihat di gambar denah pada lampiran D.



Gambar 4.19 Konfigurasi Dry Lab

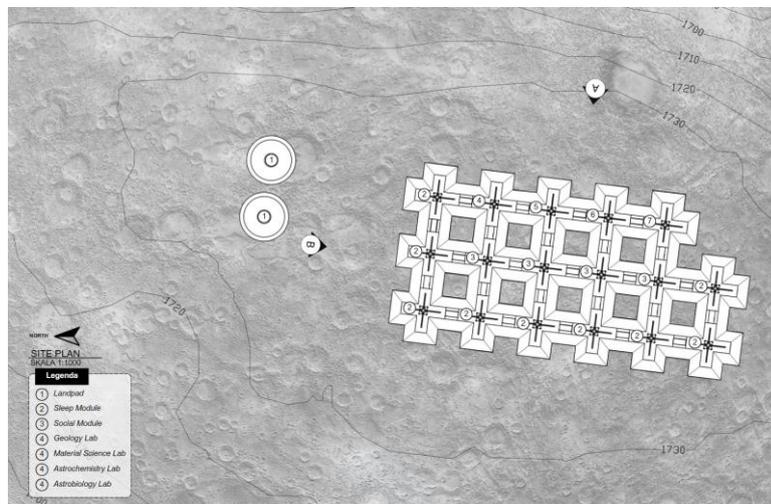
4.3.1.6 Konfigurasi Modul

Konfigurasi antar modul mempertimbangkan pergerakan dan navigasi dari para pengguna. dengan total 17 modul, dengan 4 modul lab, 4 modul sosial dan 9 modul tidur, ada banyak konfigurasi yang bisa dilakukan. Beberapa konfigurasi ditunjukkan pada gambar 4.20 dengan konfigurasi yang dikotak hijau adalah konfigurasi yang dipilih oleh perancang, karena kemudahan dalam menavigasi juga area berkegiatan terkelompokkan, sehingga lebih mudah ketika berada dalam modul.



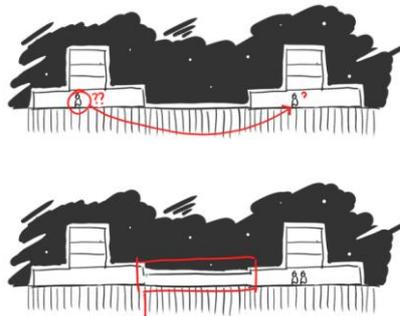
Gambar 4.20 Konfigurasi Antar Modul

Penataan secara grid yang dilakukan pada tapak, dimaksudkan untuk memberikan berbagai alternatif jalur jika terjadi keadaan darurat emergensi pada salah satu modul. Dengan lengan-lengan yang saling terhubung dengan modul lainnya, dapat memberikan pilihan jalan lain jika sewaktu-waktu kru melakukan evakuasi ke modul lainnya (Gambar 4.21).

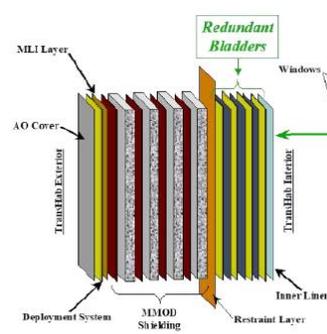


Gambar 4.21 Siteplan

Karena pengiriman antar modul yang terpisah, maka perlu ada penghubung antar modul (Gambar 4.22). Untuk menghubungkan antar modul, maka akan menggunakan material yang fleksibel dengan tujuan agar ketika terjadi pendaratan yang tidak tepat sasaran, maka modul tetap dapat dihubungkan. Salah satu teknologi pendaratan roket yang presisi adalah pada *Heavy Booster* milik SpaceX yang memiliki jarak eror sekitar 10 m. Dengan asumsi sistem komputasi pada modul rancangan dapat melakukan hal yang sama, maka dalam mengantisipasi pendaratan yang tidak presisi, panjang penghubung adalah sekitar 9,6 m. Material yang digunakan disebut *softgood*, yakni material yang fleksibel yang terdiri dari berbagai lapisan pelindung dengan ketebalan total sekitar 30 cm (Valle et al., 2019). Susunan *Softgood* dapat dilihat pada gambar 4.23. Dengan adanya penghubung ini, maka antar modul dapat dihubungkan. Potongan antara dua modul dapat dilihat pada bagian Lampiran E



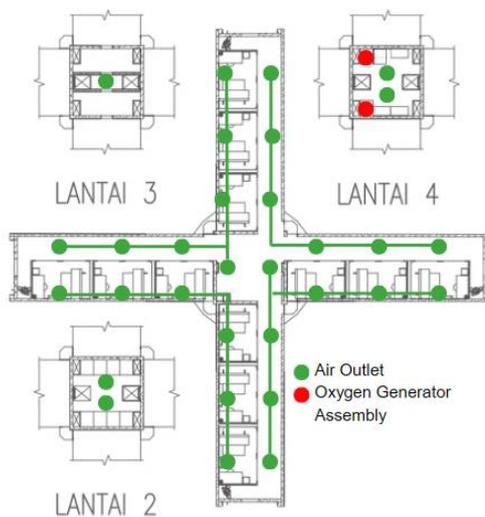
Gambar 4.22 Konsep Penghubung antar Modul



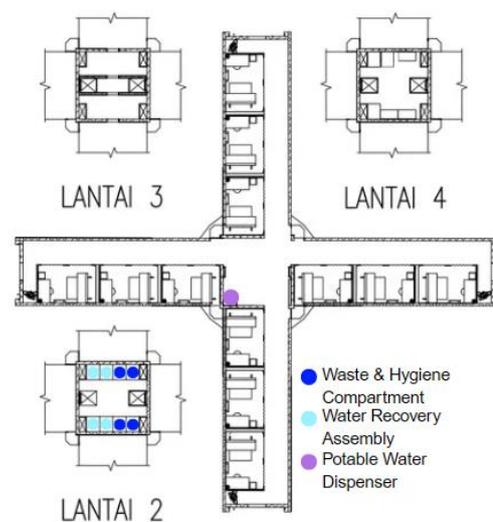
Gambar 4.23 Material Softgood (Valle et al., 2019)

4.3.1.7 Sistem Penunjang

Sistem ventilasi pada setiap modul dimulai dari OGA, atau *Oxygen Assembly System* yang merupakan sistem aktif dalam menghasilkan oksigen yang dibutuhkan untuk bernafas. Oksigen didapat dari hasil proses elektrolisis air yang diperoleh dari sistem daur air. Oksigen yang dihasilkan kemudian akan diteruskan ke ruangan-ruangan dengan air outlet yang berada pada sisi atas setiap interior modul (Gambar 4.24).



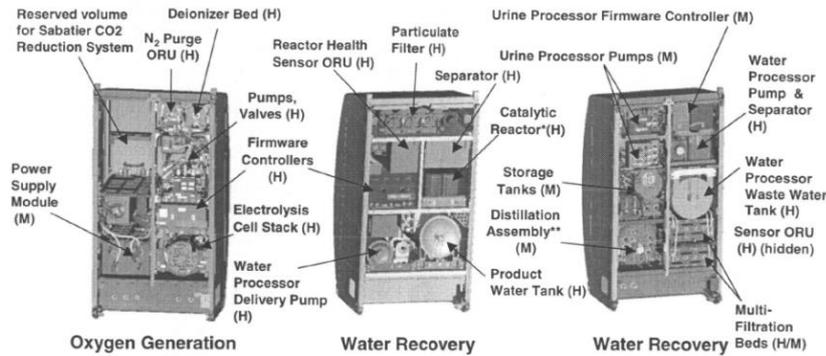
Gambar 4.24 Lokasi OGA



Gambar 4.25 Gambar Lokasi WHC, WRA dan

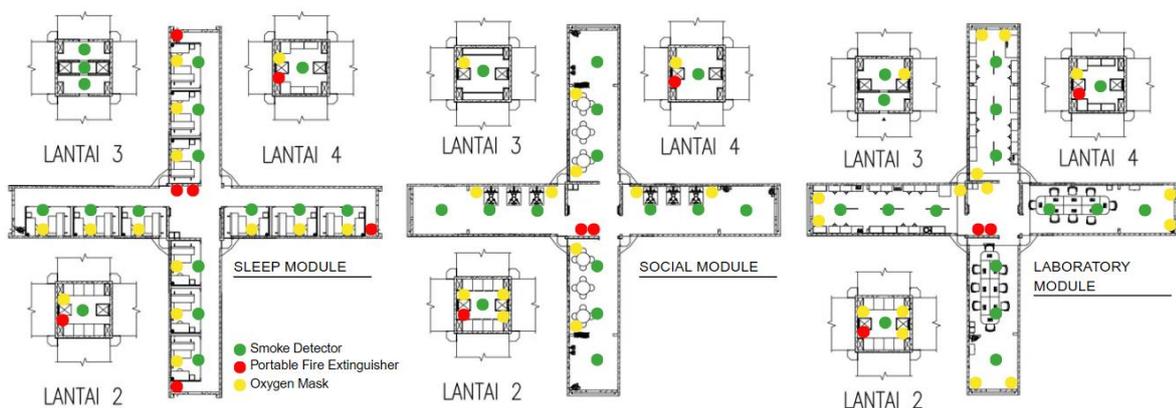
Sisa-sisa metabolisme manusia, baik padat maupun cairan jika pada bumi akan berada pada toilet. Sedangkan pada luar angkasa, 'toilet' tersebut disebut *Waste & Hygiene Compartment*

atau disingkat WHC (Feighery et al., 2001) yang setiap WHC mampu memfasilitasi hingga tiga orang (Link et al., 2007). Sistem utilitas air, mendaur air dari WHC untuk digunakan menjadi air siap pakai, maupun air yang digunakan untuk menghasilkan oksigen. Air yang masuk ke sistem *Water Recovery Assembly* (WRA) yang kemudian digunakan untuk minum, akan masuk ke *Potable Water Dispenser* (PWD) yang merupakan alat yang digunakan oleh para kru untuk mengambil air yang sudah siap dikonsumsi. Sistem utilitas air dapat dilihat pada gambar 4.25 Keterhubungan antara sistem air dan sistem oksigen pada ISS yang digunakan pada perancangan terletak pada bagian lampiran



Gambar 4.26 Rak Sistem OGS, dan WRA (Bagdigian & Cloud, 2005)

Dalam mengantisipasi bahaya kebakaran, maka ada beberapa Langkah yang dapat dilakukan, mengutip dari kanal youtube milik German Space Agency. Ketika ada bahaya api, maka alarm akan menyala dan sistem ventilasi akan mati. Hal ini membuat kadar oksigen dalam ruangan akan berkurang secara perlahan yang diikuti dengan meredanya api. Pada saat ini, astronot dapat mengenakan masker oksigen yang tersedia. Jikalau api tidak kunjung padam, maka akan ada *Portable Fire Extinguisher* (Lampiran C) yang dapat digunakan untuk memadamkan api. Peta penempatan titik masker oksigen dan *Portable Fire Extinguisher* dapat dilihat pada gambar 4.27



Gambar 4.27 Titik Masker Oksigen, dan *Portable Fire Extinguisher*

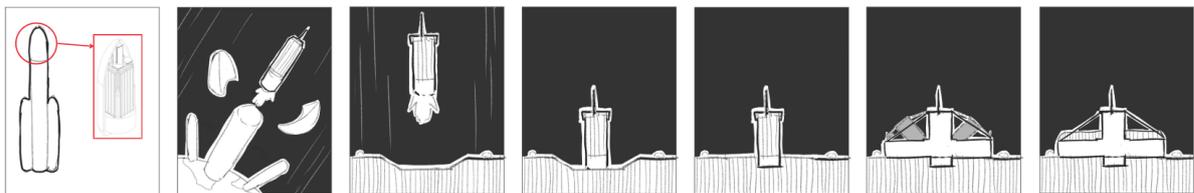
4.3.1.8 Rencana Konstruksi

Ketika roket yang membawa para awak mendarat di permukaan bulan, maka debu / regolith akan beterbangan yang dapat menimbulkan potensi kerusakan pada modul. Oleh karenanya,

perlu adanya strategi untuk mengantisipasi hal tersebut untuk memfasilitasi kedatangan roket tersebut. Asumsi perancang, jenis roket yang akan membawa awak adalah Starship milik SpaceX. Sehingga desainnya mengacu pada diameter daripada starship, yakni 9 m. Dalam mengantisipasi kemungkinan pendaratan yang tidak akurat, maka diameter yang disarankan yakni sebesar 20 m. Penempatan fasilitas pendaratan ini juga diletakkan sejauh 100 m dari area habitat. Hal ini untuk mengantisipasi jika starship mengalami kegagalan pendaratan.

Konstruksi akan dilakukan dalam 3 fase yang terdiri dari, pengiriman robot, pengiriman modul dan pengiriman awak. Pada fase awal, robot-robot akan dikirimkan untuk mempersiapkan lahan. Dalam melakukan ekskavasi, RASSOR menjadi robot yang cocok untuk melakukan tugas ini (Chung, 2024). Proses ekskavasi sendiri bertujuan untuk menggali lubang tempat modul-modul akan berdiri dan kemudian di timbun kembali oleh regolith. RASSOR sendiri dapat melakukan tugasnya secara autonomos. Pemadatan tanah dapat menggunakan robot Helelani. Helelani juga dapat melakukan pemasangan material fasilitas pendaratan yang menggunakan material Basalt (Kelso et al., 2016).

Ketika lahan untuk satu modul telah selesai, modul akan satu-persatu dikirimkan. Satu roket akan mengirimkan satu modul, sehingga dengan 17 total modul, maka akan ada 17 kali peluncuran roket. Ketika modul telah sampai di area yang ditentukan, maka regolith di sekitar modul akan dipadatkan terlebih dahulu, lalu setelahnya akan berlanjut ke tahap *deployment* daripada modul itu sendiri. Setelah proses *deployment* dipastikan selesai, maka modul akan perlahan kembali ditimbun (Gambar 4.28).



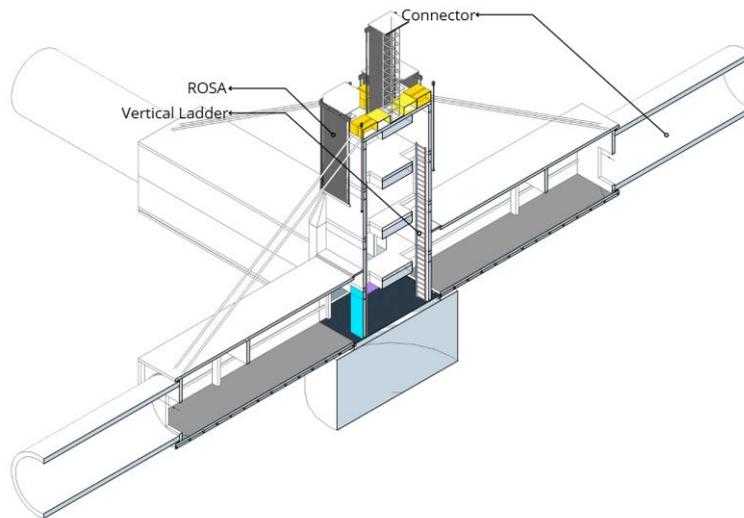
Gambar 4.28 Fase Kedatangan dan *Deployment* Modul

4.2 Pembahasan

Force yang digunakan untuk menghasilkan bentuk adalah dari roket yang membawa modul-modul ke bulan. Untuk memberikan volume yang lebih, maka digunakan konsep *Deployable* yang selaras dengan prinsip *Usability* dari teori *Space Architecture*, yakni menghadirkan volume semaksimal mungkin dalam batasan yang ada. Modul-modul ini juga kemudian saling dihubungkan untuk menciptakan gugusan modul yang mampu mewadahi berbagai aktivitas yang akan dilakukan oleh manusia.

Livability adalah poin yang menjadi krusial untuk menciptakan lingkungan yang dapat ditinggali dan nyaman bagi manusia yang mengh abitasi nya. Dalam mendukung keberlangsungan dan kegiatan selama berada di bulan, tentu memerlukan energi listrik, yang dimana pada perancangan ini menggunakan ROSA yang diletakkan di atas modul (Gambar 4.29). ROSA sendiri dapat digulung maupun dibentangkan, sehingga dapat menghemat tempat dalam Batasan payload fairing. Sebagai akses vertikal, digunakan *Vertical Ladder* yang dirasa cukup efisien namun tetap tidak menyulitkan pergerakan para pengguna (Gambar 4.29). Dalam

mengurangi paparan radiasi yang berbahaya, maka modul ditutupi dengan regolith, sehingga sebagian modul akan tertimbun dalam tanah dan sebagian lagi akan terlihat menjulang keluar dari tanah (Gambar 4.30). Sedangkan untuk menghadirkan oksigen, maka digunakan sistem aktif yaitu OGA yang bekerja bersama dengan sistem daur air yang terdiri dari WRA, WHC, dan PWD, guna untuk mencukupi dan menjamin keberlangsungan hidup manusia. Sedangkan penyimpanan air dapat disimpan pada lantai 4 setiap modul. Dengan begitu, prinsip *Usability* dapat dipenuhi, yakni menghadirkan fasilitas yang menunjang kegiatan selama beraktifitas di luar angkasa.



Gambar 4.29 Isometri Modul



Gambar 4.30 Tampak Bangunan

Pada poin *flexibility*, rancangan memiliki partisi minimal yang dimaksudkan untuk memaksimalkan kemudahan dalam mengubah konfigurasi interior dalam bangunan. Tentu akan ada kemungkinan perubahan dalam penggunaan bangunan. Sehingga, penggunaan furniture yang dapat dilipat dapat membantu menghemat tempat, apabila sewaktu-waktu ada bagian yang tidak dibutuhkan. Belum tentu bangunan akan diokupansi 100% dalam setiap waktu. Minimnya partisi juga membuat konfigurasi dan tata letak dapat dengan mudah dirubah sesuai dengan penggunanya, sehingga dapat memberikan adaptasi terhadap perubahan kedepannya.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

4.3 Kesimpulan

Penerapan ketiga aspek habitability *Space Architecture*, yakni *Usability*, *Livability* dan *Flexibility* dapat diterapkan pada perancangan laboratorium di luar angkasa, terkhusus pada rancangan ini pada kutub selatan permukaan bulan. Ketiga prinsip ini digunakan dalam menciptakan lingkungan yang mampu menjamin kehidupan manusia di luar angkasa. Perancangan ini tidak terlepas dari berbagai bidang-bidang lain diluar ranah arsitektur dalam menghadirkan suatu rancangan untuk menghadirkan keadaan habitasi yang menjamin keberlangsungan hidup serta memfasilitasi kegiatan manusia selama berada di bulan. Terkhususnya pada perancangan ini adalah kegiatan penelitian.

Rancangan prafabrikasi berbentuk modul-modul yang mewadahi aktivitas berbeda-beda, yang dalam melindungi dari radiasi berlebih maka modul dibuat terkubur oleh regolith. Gravitasi yang lebih kecil dari bumi, memudahkan manusia dalam dalam bergerak, termasuk bergerak secara vertikal dengan penggunaan *vertical ladder*. Menciptakan lingkungan yang dapat dihidupi, melalui penggunaan dan penempatan sistem oksigen dan pengolahan air. Mengurangi sekat-sekat ruang untuk memberikan fleksibilitas dalam mengkonfigurasi lingkungan dalam modul.

4.4 Saran

Selama proses riset dan perancangan yang telah dilakukan, perancang merasa bahwa waktu yang diperlukan dalam melakukan riset dan menelaah suatu informasi membutuhkan waktu yang sangat lama. Ditambah lagi dengan banyaknya bidang-bidang di luar ranah yang perancang pelajari, semakin meningkatkan kerumitan dalam memahami dan mencerna informasi secara menyeluruh. Hal ini membuat keputusan yang diambil menjadi terlalu tergesa-gesa. Perancang merasa bahwa perlu dalam benar-benar mengalokasikan waktu dalam mencari dan menemukan informasi serta memahami informasi tersebut agar dapat secara efektif digunakan dalam proses perancangan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Artemis III - NASA. (n.d.). NASA. <https://www.nasa.gov/mission/artemis-iii/>
- Bagdigian, R. M., & Cloud, D. (2005b). Status of the International Space Station Regenerative ECLSS Water Recovery and Oxygen Generation Systems. SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2005-01-2779>
- Brunyé, T. T., Gardony, A. L., Holmes, A., & Taylor, H. A. (2018). Spatial decision dynamics during wayfinding: intersections prompt the decision-making process. *Cognitive Research Principles and Implications*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0098-3>
- Carter, D. L., Tobias, B., & Orozco, N. Y. (2013). Status of ISS water management and recovery. 43rd International Conference on Environmental Systems. <https://doi.org/10.2514/6.2013-3509>
- Cristoforetti, S. (2013, June 5). The typical day? Not defined. | Astronaut Class of 2009. <https://blogs.esa.int/astronauts/2013/06/05/the-typical-day-not-defined/>
- Chung, J. (2024, April 22). NASA's RASSOR Robot is Designed for Space Mining on the Moon and Mars - TechEBlog. TechEBlog. <https://www.techeblog.com/nasa-rassor-mining-robot-moon-mars/>
- Feighery, J. E., Edeen, M., Meyers, K., & Dillon, P. (2001). Waste and Hygiene Compartment for the International Space Station. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2001-01-2225
- flexibility. (2025). <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/flexibility>
- German Space Agency at DLR. (2021, November 17). WHAT HAPPENS IF THERE IS a FIRE ON THE ISS? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=drvYWRWYtSI>
- Gillen, R. J., Brady, J. C., & Collier, F. (1972). Apollo experience report: Lunar module environmental control subsystem. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19720013195/downloads/19720013195.pdf>
- Gläser, P., Oberst, J., Neumann, G., Mazarico, E., Speyerer, E., & Robinson. (2017). Illumination conditions at the lunar poles: Implications for future exploration. *Planetary and Space Science*, 162, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.07.006>
- Häuplik-Meusburger, S. (2011). Architecture for astronauts. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0667-9>
- Heinicke, C., Jaret, S., Ormö, J., Fateri, M., Kopacz, N., Baque, M., Verseux, C., Foing, B., & Razeto, A. (2018, January 1). How a laboratory on the moon should be equipped. 69th International Astronautical Congress (IAC), Germany. <https://elib.dlr.de/124896/>
- Hickman, J., Curtis, H., & Landis, G. (2002b). Design consideration for lunar based photovoltaic power systems (pp. 1256–1262). <https://doi.org/10.1109/pvsc.1990.111815>
- Interaction Design Foundation - IxDF. (2016, June 29). What is Hick's Law?. Interaction Design Foundation - IxDF. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/hick-s-law>
- International Space Station. <https://www.boeing.com/space/international-space-station#technical-specifications>

- Jia, Y., Liu, L., Wang, X., Guo, N., & Wan, G. (2022). Selection of Lunar South Pole landing site based on constructing and analyzing fuzzy cognitive maps. *Remote Sensing*, 14(19), 4863. <https://doi.org/10.3390/rs14194863>
- Kelso, R. M., Romo, R., Andersen, C., Mueller, R. P., Lippitt, T., Gelino, N. J., Smith, J. D., Townsend, I. I., Schuler, J. M., Nugent, M., Nick, A. J., Zacny, K., & Hedlund, M. (2016). Planetary Basalt Field Project: Construction of a Lunar Launch/Landing Pad, PISCES and NASA Kennedy Space Center Project update. *Earth and Space* 2021. <https://doi.org/10.1061/9780784479971.061>
- Kitmacher, G. H. (2010). Reference guide to the International Space Station. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060056410>
- LabXchange. <https://www.labxchange.org/>
- Leach, N. (2015). *Space Architecture: The New Frontier for Design Research*. John Wiley & Sons.
- Li, S., Lucey, P. G., Milliken, R. E., Hayne, P. O., Fisher, E., Williams, J., Hurley, D. M., & Elphic, R. C. (2018). Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(36), 8907–8912. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115>
- Link, D. E., Balistreri, S. F., & Gelmis, K. (2008). International Space Station USOS Waste and Hygiene Compartment Development. *SAE International Journal of Aerospace*, 1(1), 429–434. doi:10.4271/2008-01-2137
- livability. (2025). <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/livability>
- Loff, S. A. (2015). Apollo 11 Mission Overview - NASA. NASA. <https://www.nasa.gov/history/apollo-11-mission-overview/>
- Lunar/LROC :: QuickMap. <https://quickmap.lroc.im-ldi.com/?prjExtent=-3650000%2C-1737400%2C3650000%2C1737400&shadowsType=all&layers=NrBsFYBoAZIRnpEBmZcAsjYIHfYFcAbAyAbwF8BdC0yioA&proj=10>
- Mahoney, E. (2023, July 26). Moon's South Pole is Full of Mystery, Science, Intrigue - NASA. NASA. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/moons-south-pole-is-full-of-mystery-science-intrigue/>
- Mars, K. (2023, October 12). Space Radiation is Risky Business for the Human Body - NASA. NASA. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/space-radiation-is-risky-business-for-the-human-body/>
- N. Bhat, B. (2018). *Aerospace Materials and Applications*. <https://doi.org/10.2514/4.104893>
- NASA. (2010). *Human Integration Design Handbook (NASA/SP-2010-3407/REV1)*.
- NASA. (2018). *Space Launch System (SLS) Mission Planner's Guide*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170005323/downloads/20170005323.pdf>
- NASA. (2023, April 27). Why space radiation matters - NASA. NASA. <https://www.nasa.gov/missions/analog-field-testing/why-space-radiation-matters/>
- National Fire Protection Association. (2021). *NFPA 101: Life Safety Code*.
- Neufert, E. (1996). *Data Arsitek /Ernst Neuferts; alih bahasa, Sunarto Tjahjadi*. Erlangga

- Niu, R., Zhang, G., Mu, L. *et al.* Scientific Objectives and Suggestions on Landing Site Selection of Manned Lunar Exploration Engineering. *Adv. Astronaut. Sci. Technol.* **7**, 37–50 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42423-024-00153-3>
- Özker, S., & Süyük Makaklı, E. (2017). IMPORTANCE OF SKETCHING IN THE DESIGN PROCESS AND EDUCATION. *The Online Journal of Science and Technology*, *7*(2), 73–77.
- Plowright, P. D. (2014). Revealing architectural design: Methods, Frameworks and Tools.
- Pugliese, M., Bengin, V., Casolino, M., Roca, V., Zanini, A., & Durante, M. (2010). Tests of shielding effectiveness of Kevlar and Nextel onboard the International Space Station and the Foton-M3 capsule. *Radiation and Environmental Biophysics*, *49*(3), 359–363. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0283-3>
- Savage, L. (2025). Radiation shielding for long-term lunar settlements with regolith and other ISRU options. *22nd IAA Symposium on Building Blocks for Future Space Exploration and Development*, 366-379. <https://doi.org/10.52202/078374-0038>
- Shanaya Verma, S. (2022). A Comprehensive Guide to 3D Modeling and CAD: Applications, Techniques and Tools. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 135.
- Shum, KaiMei (2020). S.E.ARCH: Science Fiction and Extraterrestrial Architecture. Open Access Te Herenga Waka-Victoria University of Wellington. Thesis. <https://doi.org/10.26686/wgtn.17148386>
- SpaceX. SpaceX. <https://www.spacex.com/vehicles/starship>
- Spady, A & Krasnow, W. (1966). Exploratory study of man's self-locomotion capabilities with a space suit in lunar gravity. NASA TN D-2641. Technical note. United States. National Aeronautics and Space Administration. 1-15.
- Spudis, P. D., Bussey, B., Plescia, J., Josset, J., & Beauvivre, S. (2008). Geology of Shackleton Crater and the south pole of the Moon. *Geophysical Research Letters*, *35*(14). <https://doi.org/10.1029/2008gl034468>
- Think 360 Studio. (2024, November 26). Hick’s law: keeping user decisions smooth and speedy. Medium. <https://medium.com/@think360studio/hicks-law-keeping-user-decisions-smooth-and-speedy-ec13a5b6b991>
- Tillman, N. T. (2019, May 9). Apollo 11: First Men on the Moon. Space. <https://www.space.com/16758-apollo-11-first-moon-landing.html>
- Timberlake, J., & Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and construction. https://perpustakaan.itera.ac.id/slims/index.php?p=show_detail&id=2096
- usability. (2025). <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/usability>
- Valle, G. D., Litteken, D., & Jones, T. C. (2019c). Review of habitable softgoods inflatable design, analysis, testing, and potential space applications. *AIAA SCITECH 2022 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1018>
- Van Breukelen, G. (2010). Encyclopedia of Research Design. In SAGE Publications, Inc. eBooks. <https://doi.org/10.4135/9781412961288>
- Wessels, W. (2025, April 10). Payload fairings – what they are and their purpose on orbital rockets. Headed for Space. <https://headedforspace.com/rocket-payload-fairings/>
- Whitaker, A. (2003). Overview of ISS U.S. Fire Detection and Suppression System. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030053429/downloads/20030053429.pdf>
- Wright, E. (2022, October 5). The Sun's Path at Different Lunar Latitudes. NASA Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/5038/>
- Yeğen, E. (2019). An inquiry of space architecture: design considerations and design process. [Thesis (M.Arch.) -- Graduate School of Natural and Applied Sciences. Architecture.]. Middle East Technical University.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

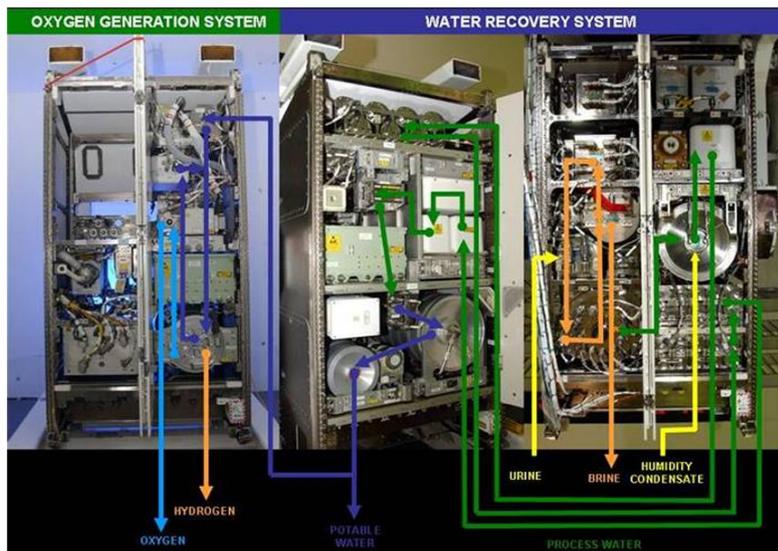
Tabel 5.1 Program Ruang

Tabel Program Ruang						
No	Nama Ruang	Fungsi	Standar Luasan	Sumber	Jumlah	Besaran Minimum (m ²)
1	Laboratorium Geologi	Area penelitian yang melibatkan pengujian sampel	4,6 m ² /orang	NFPA101 - 2021, Tabel 7.3.1.2	27	124,2
2	Laboratorium Material Science	Area penelitian yang melibatkan pengujian sampel	4,6 m ² /orang	NFPA101 - 2021, Tabel 7.3.1.2	27	124,2
3	Laboratorium Astrochemistry	Area penelitian yang melibatkan pengujian sampel	4,6 m ² /orang	NFPA101 - 2021, Tabel 7.3.1.2	27	124,2
4	Laboratorium Astrobiology	Area penelitian yang melibatkan pengujian sampel	4,6 m ² /orang	NFPA101 - 2021, Tabel 7.3.1.2	27	124,2
5	Kamar Tidur	Area privasi bagi para kru untuk beristirahat	10,5 m ² /orang	Tineco.com	108	1134
6	Meeting	Berfungsi sebagai area meeting dan dry lab dalam melakukan penelitian yang tidak melibatkan pengujian langsung terhadap sampel	2 m ² /orang	Neufert	108	216
7	Gym	Area melakukan olahraga bagi para kru	4,6 m ² /orang	NFPA101 - 2021, Tabel 7.3.1.2	108	496,8
8	Ruang Sosial	Area Berkumpul dan berelaksasi bagi para kru dan awak. Bermain permainan papan atau bermain musik	0,76 m ² /Orang	Neufert (Keadaan Duduk di kursi)	108	82,08
			1,53 m ² /Orang	Neufert (Keadaan Orang merentangkan tangan kesamping dan ke depan)	108	165,24
			0,26 m ² /Orang	Neufert (Keadaan berdiri)	108	28,08
			0,65 m ² /Orang	Lemari	16	10,4
			0,38 m ² /Buah	Gitar	16	6,08
9	Ruang Utilitas	Penempatan Rak sistem utama pada utilitas oksigen	0,9 m ² /Mesin	Oxygen Generator Assembly [International Standard Payload Rack]	34	30,6
		Penempatan Rak sistem utama pada utilitas daur air	0,9 m ² /Mesin	WRA [International Standard Payload Rack]	68	61,2
		Area buang kotoran padat dan cair bagi para kru	0,9 m ² /Mesin	Waste & Hygiene Compartment [International Standard Payload Rack]	68	61,2
		Penempatan Sistem penyaluran air siap konsumsi bagi para kru	0,24 m ² /Mesin	Pot Water Dispenser [2 kali ukuran ISS EXPRESS Locker (0,46 x 0,52 x 0,28)]	34	30,6
10	Entrance	Meletakkan Pakaian astronot	0,28 m ² /Pakaian	Airandspace.si.edu	108	30,24
11	Gudang	Meletakkan cadangan air. (Asumsi 1 bulan sesuai durasi misi ARTEMIS III yang akan datang)	3,8L / Orang / Hari	NASA	108	12,312

12	Penghubung antar modul	Menghubungkan modul yang satu dengan yang lainnya. (Lihat pada bagian 4 pembahasan, asumsi panjang 10 meter)	Lebar: 2,125 m untuk dua orang yang berpapasan sambil membawa barang	Neufert	26	552,5
Asumsi sirkulasi yang digunakan adalah 30% dari total luasan bangunan (Tidak termasuk penghubung antar modul)						858,4896
Estimasi luasan keseluruhan						4272,6216

Sumber: Penulis, NASA, NFPA, Neufert, Airandspace, Tineco

LAMPIRAN B



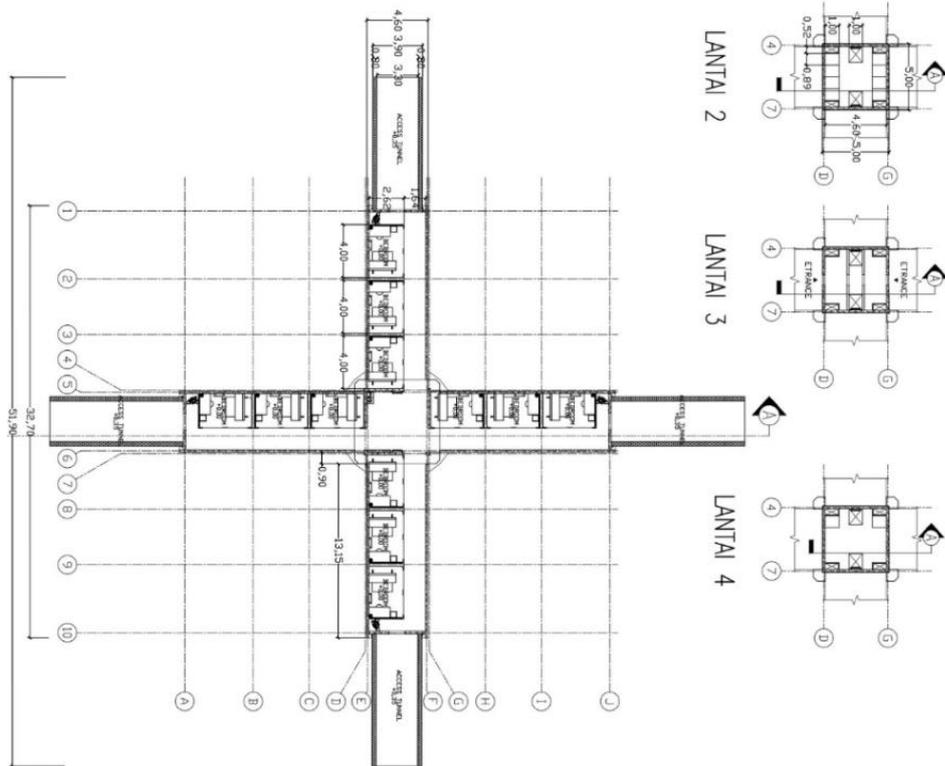
Gambar 5.1 Keterhubungan Sistem Oksigen dan Sistem Daur Air (Carter et al., 2013)

LAMPIRAN C

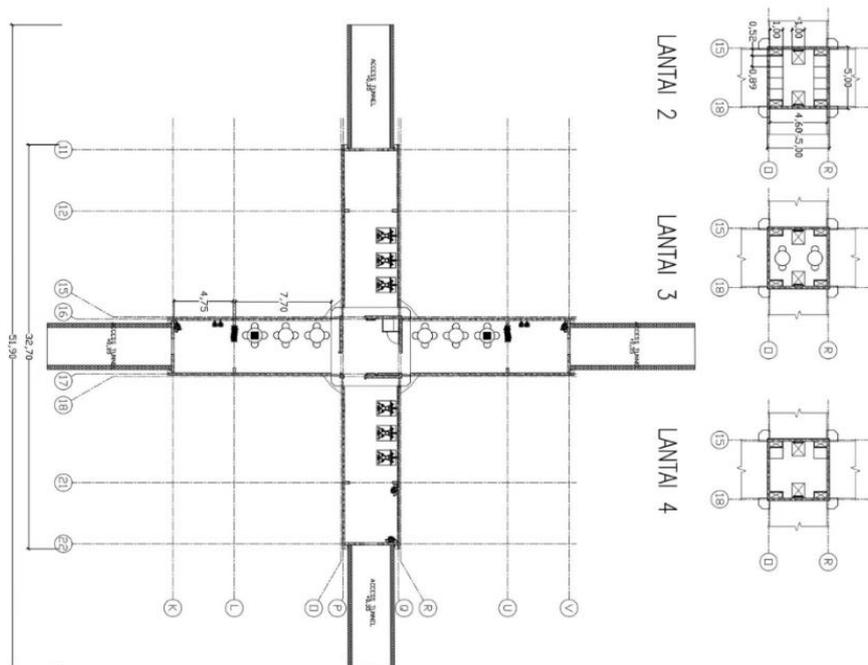


Gambar 5.2 Gambar Masker Oksigen dan *Portable Fire Extinguisher* pada simulasi kebakaran (Cristoforetti, 2013)

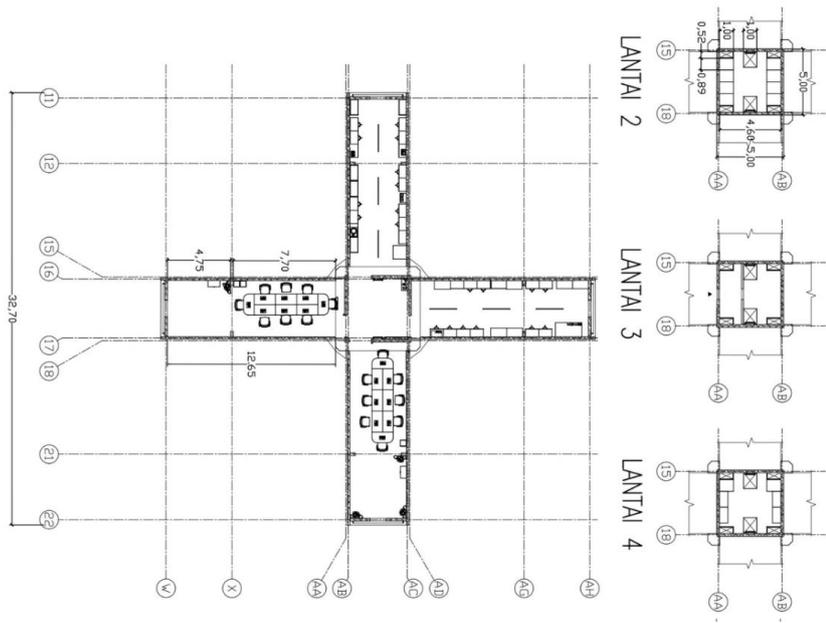
LAMPIRAN D



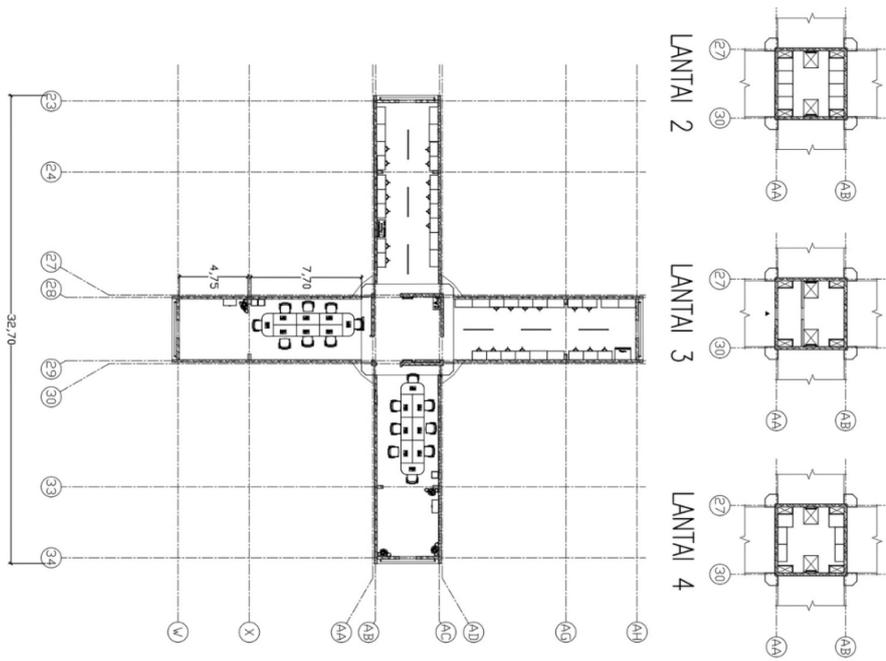
Gambar 5.3 Denah *Sleep Module*



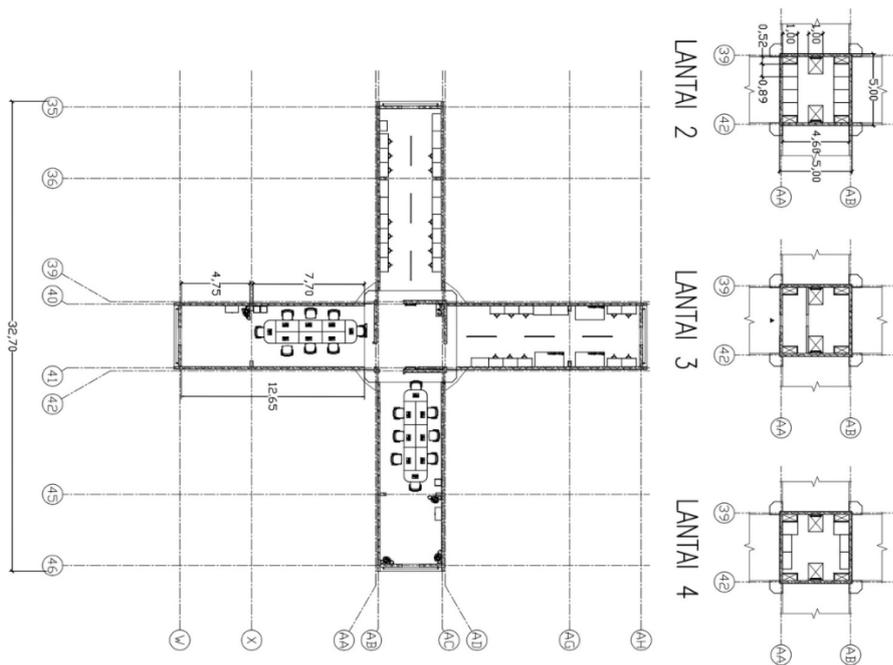
Gambar 5.4 Denah *Social Module*



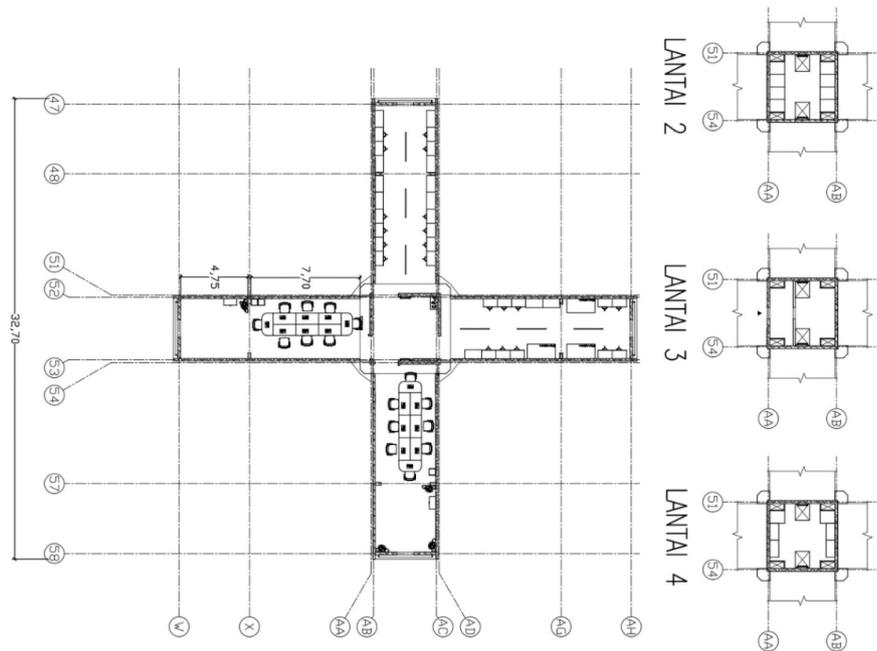
Gambar 5.5 Denah Laboratorium Geologi



Gambar 5.6 Denah Laboratorium Material Science

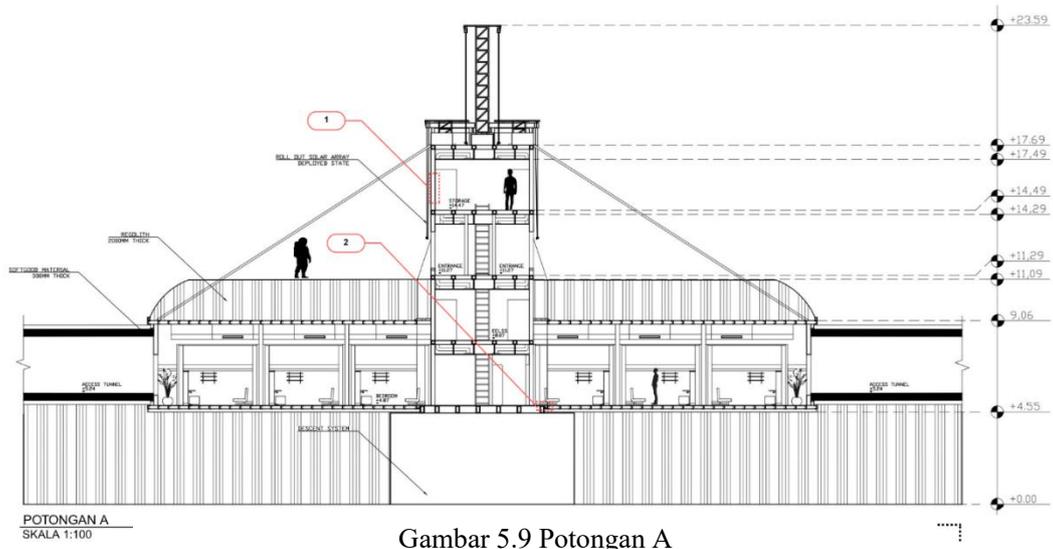


Gambar 5.7 Denah Laboratorium *Astrochemistry*



Gambar 5.8 Denah Laboratorium *Astrobiology*

LAMPIRAN E



Gambar 5.9 Potongan A

LEMBAR REVISI TUGAS AKHIR

NAMA MAHASISWA : Ivander Ichwandy

NOMOR POKOK : 5013211077

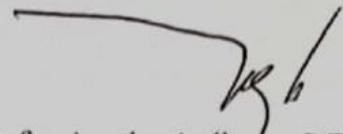
JUDUL TUGAS AKHIR : LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE
ARCHITECTURE PADA PERANCANGAN
LABORATORIUM DI BULAN

DOSEN PEMBIMBING : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

No.	REVISI
1.	<p><i>Catatan</i> : Apa sebenarnya pengertian dari Space Architecture dalam proyek ini? Karena penjelasan yang dituliskan, cenderung menyampaikan bahwa dia sebagai bidang/disiplin.</p> <p><i>Tanggapan</i> : Beberapa arsitek mengemukakan pendapat mereka tentang space architecture. Bagi Neil Leach, Space Architecture adalah habitat jangka panjang di luar angkasa, yang dimana luar angkasa adalah sebuah tempat yang memiliki kombinasi dari berbagai kondisi yang belum pernah kita jumpai sebelumnya. Bagi March M. Cohen, berpendapat bahwa Space Architecture adalah desain lingkungan untuk hidup dan bekerja yang dapat berupa pesawat luar angkasa, habitat luar angkasa, ataupun hal lainnya yang dapat mengakomodasi pada lingkungan ekstrim mulai dari orbit bumi, hingga bulan, asteroid, mars, galaksi, atau bahkan lebih dari itu. Dari pernyataan beberapa arsitek ini, ada hal-hal yang menjadi suatu benang merah, yakni menciptakan lingkungan hunian pada sebuah lingkungan yang memiliki kondisi ekstrim di luar bumi.</p>
2.	<p><i>Catatan</i> : Livability, Usability, dan Flexibility dalam space architecture apakah sama dengan pengertian atas tiga hal tersebut dalam arsitektur di bumi?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Ya, secara umum, ketiga prinsip tersebut sama dalam penerapan arsitektur di bumi. Namun tentunya dari prinsip yang memiliki pengertian sama baik di bumi dan di luar angkasa, tentunya memiliki sedikit perbedaan terhadap penerapannya. Dalam space architecture, unsur yang membedakan dengan arsitektur bumi adalah dari segi lingkungannya. Lingkungan di luar angkasa cenderung ekstrim dan berbahaya bagi manusia dibandingkan dengan arsitektur bumi. Sehingga perlu ada perlakuan khusus, seperti dalam menghasilkan oksigen, perlu ada sistem khusus di dalamnya yang perlu dihadirkan. Memang secara umum, teknologi bukan bidang arsitektur, namun seorang perancang tetap perlu menyediakan dan merencanakan kebutuhan ruang yang cukup agar manusia memang benar-benar dapat bertahan hidup. Karena intinya dari space architecture adalah menciptakan lingkungan habitasi yang nyaman pada lingkungan ekstrim luar angkasa.</p>

3.	<p><i>Catatan</i> : Form finding/form exploration dimulai dengan pertanyaan tentang 'how to provide more space', mengapa hal ini menjadi urgent?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Frank De Winne yang merupakan salah seorang yang pernah merasakan tinggal di ISS pernah berpendapat pada wawancara yang dilakukan oleh Sandra Häuplik-Meusburger dalam bukunya Architecture for Astronauts: An Activity-Based Approach, bahwa saat tidur, terasa sesak karena harus berada pada tempat yang kecil. Terasa seperti berkemah</p>
4.	<p><i>Catatan</i> : Sleep module, social module, dan lab itu sendiri mengapa memiliki luasan yang sama? dan apa yang mendasari konfigurasi grid ketika terapkan di tapak?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Kesamaan ukuran modul didasarkan pada proses manufaktur ketika berada di bumi. Dengan jumlah modul yang cukup banyak, maka waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan seluruh modul juga memerlukan banyak waktu. Sehingga, untuk mengurangi waktu yang dibutuhkan, maka ukuran modul dibuat sama dengan tujuan untuk mempersingkat waktu. Penataan secara grid yang dilakukan pada tapak, dimaksudkan untuk memberikan berbagai alternatif jalur jika terjadi keadaan darurat emergensi pada salah satu modul. Dengan lengan-lengan yang saling terhubung dengan modul lainnya, dapat memberikan pilihan jalan lain jika sewaktu-waktu kru melakukan evakuasi ke modul lainnya.</p>

Surabaya, 4-8-2025
Dosen Penguji,



Dr. Defry Agatha Ardiarta, S.T., M.T.

NAMA
NOMOR
JUDUL

DOSEN

No.	
1.	
2.	

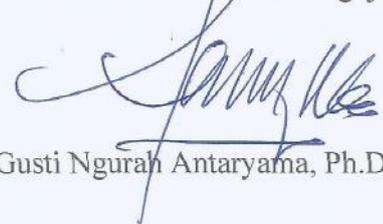
LEMBAR REVISI TUGAS AKHIR

NAMA MAHASISWA : Ivander Ichwandy
NOMOR POKOK : 5013211077
JUDUL TUGAS AKHIR : LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE
ARCHITECTURE PADA PERANCANGAN
LABORATORIUM DI BULAN
DOSEN PEMBIMBING : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

No.	REVISI
1.	<p><i>Catatan</i> : Perbaiki program ruang dan luas dan kesesuaiannya dengan standar yang ditulis dan hasil rancangan.</p> <p><i>Tanggapan</i> : Perubahan diberikan pada bagian lampiran Tabel 4.1 (Pada halaman 33)</p>
2.	<p><i>Catatan</i> : Perjelas perspektif arsitektur untuk bangunan ruang angkasa</p> <p><i>Tanggapan</i> : Apollo Lunar Module: Secara fungsi sebagai tempat berlindung dan habitasi astronot selama menuju ke bulan. Satu module hanya memiliki satu volume dalam artian tidak memiliki ruang lainnya, dengan kapasitas 3 orang. Material yang digunakan adalah Paduan aluminium dan titanium. Sedangkan ISS berfungsi sebagai tempat penelitian yang menggunakan sistem modul yang memerlukan waktu sekitar 13 tahun untuk merakit ISS secara keseluruhan. Modul memiliki bentuk silinder dan terbuat dari material paduan aluminium. Menggunakan sistem modul yang dikirimkan satu persatu dari bumi untuk kemudian di rakit. (Penambahan pada bagian 2.1, halaman 3)</p> <p>Pada rancangan yang saya rancang sendiri, menggunakan sistem modul-modul yang difabrikasi di bumi. Kemudian modul tersebut dibawa oleh roket yang sesampainya di permukaan bulan, dapat di deploy untuk memberikan luasan tambahan. Secara ukuran, dimensi modul mengikuti parameter dari payload fairing roket. Penataan modul dilakukan secara grid, untuk memberikan alternatif sirkulasi ketika seandainya terjadi keadaan emergency dalam satu modul. Modul ditimbun dengan tujuan untuk mengurangi dosis radiasi yang diterima oleh para kru selama melakukan aktivitas di bulan. Karena area yang tertutup adalah bagian lengan daripada modul, maka lantai 1 modul tersebut yang menjadi area yang mewadahi aktivitas-aktivitas yang dilakukan dalam waktu yang lama.</p>

3.	<p><i>Catatan</i> : Elaborasi prinsip dalam konteks ruang angkasa</p> <p><i>Tanggapan</i> : Penambahan deskripsi pada tiga prinsip, yakni usability, livability dan flexibility. (Penambahan pada bagian 2.2, halaman 6)</p>
4.	<p><i>Catatan</i> : Periksa penjelasan proses perancangan yang dikaitkan dengan hasil dan juga sebutkan metode yang dikerjakan.</p> <p><i>Tanggapan</i> : Penambahan metode yang dilakukan oleh perancang dalam melakukan proses perancangan.(Penambahan pada bagian 3.3, halaman 9)</p>
5.	<p><i>Catatan</i> : Lengkapi penjelasan rancangan yang difokuskan pada penerapan atau refleksi teori.</p> <p><i>Tanggapan</i> : Dari teori tersebut ada tiga hal yang kemudian menjadi penting, yakni Usability, Livability dan Flexibility.</p> <p>Pada poin Usability, yang menjadi bentuk penerapan pada perancangan yang saya lakukan yakni pada penimbunan modul, penggunaan vertical ladder, utilitas dari oksigen, sistem air, sistem kelistrikan, juga sistem emergency kebakaran, yang dimana semuanya diperlukan untuk mendukung kegiatan di luar angkasa.</p> <p>Pada poin Livability, mengusung konsep deployable untuk menghadirkan tempat yang lebih luas bagi manusia untuk beraktifitas.</p> <p>Pada poin Flexibility, open plan dan minim partisi untuk memudahkan perubahan / konfigurasi penataan interior, juga penggunaan furniture yang dilipat ataupun multifungsi. (Penambahan pada bagian 4.2, halaman 23)</p>
6.	<p><i>Catatan</i> : Perbaiki tata tulis, format dan bahasa laporan</p> <p><i>Tanggapan</i> : Sudah diperbaiki.</p>

Surabaya, 01/08/2025
Dosen Penguji,



Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D.

LEMBAR REVISI TUGAS AKHIR

NAMA MAHASISWA : Ivander Ichwandy
NOMOR POKOK : 5013211077
JUDUL TUGAS AKHIR : LUNAR LAB: PENERAPAN SPACE ARCHITECTURE PADA PERANCANGAN LABORATORIUM DI BULAN
DOSEN PEMBIMBING : Prof. Dr. Dipl.-Ing Sri Nastiti N. E., M.T.

No.	REVISI
1.	<p><i>Catatan</i> : Mengapa metode konstruksi tidak menggunakan teknologi 3D printing?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Metode konstruksi 3D memang memiliki nilai positif tersendiri, seperti mengurangi benda yang perlu dibawa dari bumi. Namun, konstruksi dengan metode 3D untuk pembangunan hunian masih belum pernah dilakukan. Berbeda dengan metode mengangkat dari bumi untuk kemudian digunakan di luar angkasa. Ada beberapa contoh yang menjadi preseden yang sudah terlaksana, seperti International Space Station, juga Lunar Module milik Apollo yang mendarat di bulan. Keduanya sama-sama masih sangat bergantung dengan membawa modul dari bumi.</p>
2.	<p><i>Catatan</i> : Argumen dan referensi terlalu dangkal, perlu lebih banyak studi referensi yang berkualitas.</p> <p><i>Tanggapan</i> : Penambahan beberapa referensi. (Bagian 2.2 halaman 5, Bagian 3.3 halaman 9, Bagian 4.1.3 halaman 18)</p>
3.	<p><i>Catatan</i> : Bagaimana hidup di bulan?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Manusia memang belum pernah ke bulan. Namun, pada lingkungan luar angkasa <i>International Space Station</i>, manusia mendapatkan oksigen melalui teknologi <i>Oxygen Generation Assembly</i>, dimana memecah molekul air menjadi oksigen melalui proses elektrolisis. Dalam menjaga kesehatan oto mereka, para astronot di ISS melakukan olahraga selama 2 jam per hari.</p>
4.	<p><i>Catatan</i> : Bagaimana pergi ke bulan?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Modul akan dikirimkan dengan roket NASA SLS Block 2 Cargo karena memiliki ukuran kapasitas yang besar, sehingga dapat membuat modul sebesar mungkin. Sedangkan manusia, akan menggunakan roket milik SpaceX, yakni Starship.</p>

5.	<p><i>Catatan</i> : Mengapa pada akhirnya yang dipilih adalah bentuk persegi itu? Mengapa tidak bentuk yang lainnya?</p> <p><i>Tanggapan</i> : Pemilihan jumlah bukaan didasarkan pada tiga pertimbangan. Pada seberapa kecil area yang terbang, para seberapa mudah manusia menavigasi dalam ruangan, serta seberapa lebar bagian tekukan yang dapat dihasilkan. Dari faktor seberapa kecil area yang terbang, semakin banyak sisi maka akan sedikit pula area yang terbang. Pada faktor navigasi, semakin banyak sisi maka akan menyulitkan manusia di dalamnya dalam menavigasi. Hal ini didukung dari penelitian jurnal berjudul “<i>Spatial decision dynamics during wayfinding: intersections prompt the decision-making process</i>” oleh Brunyé et al., pada tahun 2018 yang dimana mengatakan bahwa persimpangan adalah titik pengambilan keputusan terhadap langkah apa yang akan diambil untuk melanjutkan perjalanan mereka. Menurut hukum Hick, semakin banyak opsi atau pilihan yang diberikan pada seseorang, maka semakin lama pula seseorang itu akan sampai pada sebuah keputusan (Think 360 Studio, 2024), sehingga semakin banyak sisi lekukan, akan semakin banyak memberikan opsi pada pengguna saat menavigasi. Maka semakin sedikit sisi akan lebih baik dibandingkan dengan sisi yang lebih banyak. Pada faktor lebar, tentunya semakin banyak sisinya, maka bukaannya semakin kecil yang membuat lebar sisi yang ter-<i>deploy</i> semakin sempit. Oleh karenanya, dipilih lah bentuk persegi yang dianggap paling efisien dari beberapa faktor tersebut.</p>
----	---

Surabaya, 1 Agustus..2025
Dosen Penguji,



Dr.Eng. Didit Novianto, S.T., M.Eng.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Medan, 13 September 2003, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDK Santa Theresia Balikpapan, SMPK Santo Yosef Surabaya dan SMAK St. Louis 1 Surabaya. Setelah lulus dari SMA tahun 2021, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Arsitektur, pada fakultas FTSPK - ITS pada tahun 2021