

TUGAS AKHIR
STUDI TEKNOLOGI INTEGRASI REAKTOR LARVA BSF
DENGAN AKUAPONIK

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan

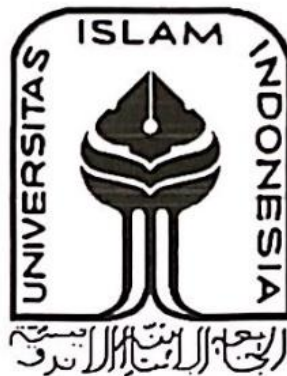


HATTA GUTAMA
22927006

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2024

TUGAS AKHIR
STUDI TEKNOLOGI INTEGRASI REAKTOR LARVA BSF
DENGAN AKUAPONIK

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan



HATTA GUTAMA
22927006

Disetujui,
Dosen Pembimbing

Dewi Wulandari, S.Hut., M. Agr., Ph.D.

Fajri Mulva Iresha, S.T., M.T., Ph.D.

NIK. 185130401

NIK. 155130507

Tanggal:

Tanggal:

Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Lingkungan
FTSP UII

Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T.
NIK. 025100407

Tanggal:

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI TEKNOLOGI INTEGRASI REAKTOR MAGGOR BSF
DENGAN AKUAPONIK**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari :

Tanggal :

Disusun Oleh :

HATTA GUTAMA



22927006

Tim Penguji:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D.

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

()
()

()

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Tulisan ini merupakan hasil orisinal dan belum pernah diajukan untuk tujuan mendapatkan gelar akademik di Universitas Islam Indonesia atau lembaga pendidikan tinggi lainnya.
2. Karya ini merupakan produk dari pemikiran, perumusan, dan penelitian saya sendiri, dengan panduan dan bimbingan dari Dosen Pembimbing, tanpa melibatkan pihak lain.
3. Dalam tulisan ini, tidak ada penggunaan karya atau pandangan orang lain kecuali jika diakui secara jelas dalam teks dengan menyebutkan nama penulisnya dan mengikutsertakannya dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di masa mendatang terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 5 Oktober 2024

Yang membuat Pernyataan,



Hatta Gutama

NIM: 22927006

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim,

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, serta kesehatan, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Teknologi Integrasi Reaktor Larva BSF dengan Akuaponik” ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Tesis ini tidak akan dapat terselesaikan tanpa dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak/Ibu Pembimbing, yang telah memberikan arahan, masukan, dan dukungan selama proses penyusunan tesis ini.
2. Keluarga tercinta, yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan semangat tanpa henti.
3. Rekan-rekan mahasiswa, yang telah menjadi teman berbagi dalam perjalanan akademik ini.
4. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, namun telah memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang integrasi teknologi larva BSF dan akuaponik. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta menjadi inspirasi bagi penelitian lebih lanjut.

Yogyakarta, 5 Oktober 2024

Hatta Gutama

ABSTRAK

Peningkatan jumlah limbah organik di kawasan perkotaan membutuhkan solusi pengelolaan yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi integrasi reaktor larva Black Soldier Fly (BSF) dengan sistem akuaponik. Teknologi ini mengolah limbah organik menjadi sumber protein alternatif melalui biokonversi larva BSF, sekaligus memanfaatkan air lindi hasil produksi sebagai sumber mikronutrien dalam akuaponik. Metode penelitian meliputi perancangan alat, evaluasi kualitas air, dan analisis efektivitas sistem integrasi dibandingkan dengan akuaponik konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi ini mampu mengurangi volume limbah organik secara signifikan, meningkatkan efisiensi produksi tanaman dan ikan, serta memanfaatkan nutrisi dari air lindi secara optimal. Selain itu, sistem ini berpotensi mengurangi risiko pencemaran logam berat dalam lingkungan. Dengan demikian, integrasi teknologi ini dapat menjadi solusi inovatif untuk pengelolaan limbah organik dan produksi pangan berkelanjutan.

ABSTRACT

The increasing amount of organic waste in urban areas requires effective and sustainable management solutions. This study aims to develop the integration of Black Soldier Fly (BSF) larvae reactors with aquaponic systems. This technology converts organic waste into an alternative protein source through BSF larvae bioconversion while utilizing the leachate produced as a source of micronutrients in aquaponics. The research methods included tool design, water quality evaluation, and an analysis of the effectiveness of the integrated system compared to conventional aquaponics. The results showed that this integration significantly reduced organic waste volume, enhanced the efficiency of plant and fish production, and optimally utilized nutrients from leachate. Additionally, the system demonstrated the potential to reduce the risk of heavy metal contamination in the environment. Therefore, this integrated technology offers an innovative solution for organic waste management and sustainable food production.

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	1
HALAMAN PENGESAHAN.....	III
PERNYATAAN	IV
KATA PENGANTAR	V
ABSTRAK.....	VI
DAFTAR ISI.....	VIII
DAFTAR TABEL.....	XI
DAFTAR GAMBAR	XII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Akuaponik	5
2.1.1 Recirculating Aquaculture System (RAS).....	6
2.1.2 Nutrisi Akuaponik	7
2.1.3 Tanaman	9
2.1.4 Media Tanam.....	9
2.1.5 Rumah Kaca (<i>Green House</i>).....	10
2.2 Sampah Organik	11
2.2.1 Sampah Restoran	11
2.2.2 Sampah Pasar.....	12
2.2.3 Air Lindi Sampah	12
2.3 Larva BSF (<i>Black Soldier Fly</i>)	13

2.3.1	Pengolahan Sampah dengan Larva BSF.....	15
2.3.2	Reaktor Produksi Larva BSF.....	17
2.3.3	Kandungan Protein Larva BSF.....	18
2.3.4	Media Sisa Produksi Larva BSF.....	19
2.4	Logam Berat	19
2.4.1	Logam Berat pada Sampah.....	20
2.4.2	Logam Berat pada Air	21
2.4.3	Logam Berat pada larva BSF.....	21
2.5	Integrasi Pengelolaan Sampah yang Berkelanjutan.....	22
BAB III METODE PENELITIAN		24
3.1	Waktu dan Lokasi.....	24
3.2	Alat dan Bahan	24
3.3	Perhitungan Design Akuaponik.....	29
3.4	<i>Survival Rate</i> (SR).....	29
3.5	<i>Waste Reduction Indeks</i> (WRI)	29
3.6	Simulasi Pencahayaan <i>Green House</i>	30
3.7	Model Siklus Nitrogen.....	31
3.8	Analisis Data	33
BAB IV Hasil dan Pembahasan.....		35
4.1	Perencanaan Alat	35
4.2	Produksi Larva BSF	47
4.3	Produksi Selada	51
4.4	Produksi Ikan Nila.....	55
4.5	Produksi Kasgot (Bekas Larva).....	57
4.6	Kadar Logam Berat	63
4.7	Ketersediaan Nutrisi Akuaponik	74
4.8	Sistem Integrasi Produksi BSF dengan Akuaponik.....	79
BAB V Kesimpulan		89

DAFTAR PUSTAKA	90
----------------------	----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konsentrasi Logam Berat pada Rockwool (mg/kg).....	10
Tabel 2.2 Kebutuhan Intensitas Cahaya Pada Tanaman (Bodolan & Brätucu, 2013)	11
Tabel 2.3 Kebutuhan Lama Paparan Matahari Pada Tanaman (Bodolan & Brätucu, 2013).....	11
Tabel 4.1 Model bayangan cahaya matahari dan intensitas cahaya dalam rumah kaca...	37
Tabel 4.2 Perhitungan Penyerapan NO ₃ pada Tanaman Selada.....	43
Tabel 4.3 Perhitungan NO ₃ Pada Sistem Akuaponik	45
Tabel 4.4 Pengujian Kandungan Protein dalam Sample Larva larva BSF.....	49
Tabel 4.5 Hasil Produksi Larva BSF	49
Tabel 4.6 Rangkuman Data Kuantitas dan Kualitas Produksi Larva BSF.....	50
Tabel 4.7 Tingkat Pertumbuhan Selada pada Sistem Integrasi Akuaponik	51
Tabel 4.8 Tingkat Pertumbuhan Luas Daun Pada Selada	53
Tabel 4.9 Perbandingan Berat Kering dan Berat Basah Hasil Tanaman Selada.....	53
Tabel 4.10 Pertumbuhan berat ikan nila	55
Tabel 4.11 Pertumbuhan Panjang Ikan Nila	56
Tabel 4.12 Perubahan Berat Produksi Larva BSF	59
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Kandungan Kualitas Kasgot	60
Tabel 4.14 Kadar logam berat pada sampah	64
Tabel 4.15 Kadar Logam Berat (mg/L) Pada Air Akuaponik.....	66
Tabel 4.16 Kandungan Logam Berat (mg/kg) pada air Akuaponik.....	67
Tabel 4.17 Kadar Logam Berat pada Tanaman Selada.....	69
Tabel 4.18 Tingkat Logam Berat BSF Berdasarkan Umur.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengaruh pH terhadap penyerapan nutrisi pada tanaman (Brady, 1984)	8
Gambar 2.3 Siklus Hidup Larva BSF (Surendra dkk., 2020)	13
Gambar 3.1 Skema tampak atas dan arah aliran alat integrasi.....	24
Gambar 3.2 Ilustrasi Design Alat Integrasi Produksi Larva BSF dengan Akuaponik (Putra, 2024).....	25
Gambar 3.3 Grafik Specific Surface Removal Rate Berdasarkan Suhu	32
Gambar 3.4 Alur Penelitian	33
Gambar 4.1 Instalasi alat integrasi produksi larva BSF dengan akuaponik.....	36
Gambar 4.2 Design model 3D rumah kaca pada kebun benar benih (KBB)	35
Gambar 4.3 Konfigurasi lokasi dan material yang digunakan dalam model velux	37
Gambar 4.4 Tingkat Surface Specific TAN removal.....	39
Gambar 4.5 Tingkat Surface Specific Nitrite Removal Rate	40
Gambar 4.6 Model Ketersediaan NO_3^- Pada Ssistem Akuaponik.....	45
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran Panjang dan Lebar Larva BSF.....	47
Gambar 4.8 Grafik Pengukuran Pertumbuhan Berat Larva BSF selama 21 hari.....	47
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Pertumbuhan Tinggi Selada.....	52
Gambar 4.10 Grafik Perubahan Suhu Pada Reaktor Larva BSF.....	57
Gambar 4.11 Grafik penambahan media pada reaktor.....	58
Gambar 4.12 Neraca massa produksi larva BSF.....	58
Gambar 4.13 Skema Gambaran Logam Berat dalam Akuaponik Integrasi	62
Gambar 4.14 Grafik tingkat kandungan logam berat pada sampah	65
Gambar 4.15 Grafik kandungan logam berat pada air akuaponik	68
Gambar 4.16 Kandungan konsentrasi logam berat mg/L pada tanaman selada akuaponik	70
Gambar 4.17 Grafik logam berat Pb dan Fe pada larva BSF berdasarkan media dan umur	73
Gambar 4.18 Grafik tingkat nutrisi makro dan mikro pada air akuaponik	75
Gambar 4.19 Grafik tingkat keasaman (pH) pada air akuaponik.....	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan penduduk yang semakin meningkat bersamaan dengan tingginya tingkat urbanisasi, menyebabkan daerah perkotaan memiliki sistem pengelolaan sampah kurang beradaptasi dengan timbulan sampah yang ada (Chen, 2018). Meningkatnya jumlah limbah padat atau timbulan sampah tidak bisa diabaikan pada kota besar maupun kota kecil. Mayoritas sampah yang dihasilkan merupakan sampah berasal dari rumah tangga, restoran dan pasar sehingga menimbulkan tantangan lingkungan yang tersendiri karena jumlah dan karakteristiknya cukup berbeda (Sofyan dkk., 2022). Metode pembuangan sampah secara konvensional, seperti pembuangan di *landfill* dan pembakaran liar, berkontribusi besar terhadap pencemaran lingkungan dan dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat (Ramachandra dan Bacamanda, 2007). Adapun kebutuhan yang mendesak terhadap solusi pengelolaan sampah yang ramah lingkungan, sangat diharapkan untuk dapat secara efektif mengurangi volume sampah sembari melakukan *recycle* terhadap sumber daya yang berharga.

Komposisi sampah organik mencapai 51,81%, yang didalamnya terdapat sampah sisa makanan di Indonesia sebesar 39,78% dan sampah ranting-daun 12,03% secara nasional pada Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup (2023). Potensi ini dapat dimanfaatkan secara optimal dan menguntungkan dengan teknologi yang tepat dengan skala yang memadai. Larva *Black Soldier Fly* (BSF) telah banyak menjadi solusi yang menjanjikan dalam pengelolaan sampah organik terkhusus sampah sisa makanan (Setiawan dkk., 2024). Proses ini tidak hanya mengurangi volume sampah tetapi juga menghasilkan larva yang kaya protein dan lemak berkualitas tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak. Tetapi dalam proses konversinya terdapat masalah utama yaitu bau yang berasal dari fermentasi anaerob air lindi sampah makanan (Sari dkk., 2022). Sehingga dalam proses pengolahan sampah makanan dengan larva BSF, kadar air sampah makanan perlu di kurangi terlebih dahulu dengan dengan hidraulik press sehingga air lindinya belum terkelola dengan baik.

Air lindi yang dihasilkan selama proses biokonversi belatung juga kaya akan nutrisi bagi tanaman, menjadikannya sebagai sumber daya potensial pada sektor pertanian (Sari dkk., 2022). Tetapi dalam proses biokonversi sampah menjadi larva BSF sering kali dijumpai masalah seperti adanya bau busuk karena cairan sampah yang berfermentasi terjadi pada kondisi anaerobik. Hal

ini menjadi masalah baru yang jika tidak dikelola dengan baik maka proses pengelolaan sampah ini berpotensi menyebarkan bau pada lingkungan.

Sistem akuaponik menggabungkan akuakultur (budidaya ikan) dengan hidroponik (menanam tanaman tanpa tanah) dalam lingkungan simbiotik. Air limbah dari kolam ikan menyediakan nutrisi penting untuk pertumbuhan tanaman, sementara tanaman membantu memurnikan air untuk ikan. Penelitian terkini pada Yep dan Zheng (2019) dijelaskan bahwa hasil panen sayuran sistem akuaponik dengan kepadatan ikan tinggi memiliki hasil panen sayuran yang sama dengan sistem hidroponik dengan nutrisi sintesis. Pada jurnal tersebut juga dijelaskan bahwa pada air akuakultur terdapat kandungan makronutrient seperti N, P, K yang cukup tinggi, tetapi kekurangan kandungan mikronutrient yang membuat sistem akuaponik memerlukan tambahan mineral logam dan non logam tambahan berupa Mn, Zn, Ca, dan lainnya untuk pertumbuhan tanaman dengan optimal. Permasalahan utamanya adalah setelah beberapa siklus panen sayuran dengan air akuakultur yang tersirkulasi maka mikronutrient akan terserap oleh tanaman dan habis dari sistem akuaponik.

Mengintegrasikan produksi larva BSF dengan sistem akuaponik menawarkan peluang unik untuk menciptakan sistem baru penanaman tanpa tanah dengan sediaan alami dimana air lindi hasil produksi larva BSF dapat berfungsi menjadi sumber mikronutrient pada akuaponik. Air lindi yang berasal dari sampah organik, memiliki kandungan mikronutrient dan makronutrient sebagai nutrisi yang baik untuk tanaman (Sari dkk., 2022). Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa pengolahan lindi sisa produksi larva BSF dengan metode aerobik dapat mengurangi bau sampah dan dapat menekan jumlah bakteri *Salmonella* dan *Escherichia coli*. Hal ini sesuai dengan konsep *Recirculating Aquaculture System* (RAS) dalam akuaponik yang menghasilkan kondisi pengolahan air didalam akuaponik yang memiliki sifat aerobik.

Dalam penelitian ini sangat penting untuk mengetahui bagaimana air lindi sisa budidaya larva BSF dapat menunjang sistem akuaponik secara menguntungkan dengan mengembangkan alat ini merupakan salah satu cara supaya terdapat metode pengolahan volume limbah padat organik, menghasilkan protein yang berkualitas tinggi, pemanfaatan lindi yang kaya nutrisi untuk pertanian, mengevaluasi potensi bahaya dari logam berat, serta menjadi solusi untuk pengelolaan limbah padat dan produksi pangan yang berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini bertujuan sebagai berikut,

1. Bagaimana desain Teknologi Integrasi Reaktor BSF dengan Akuaponik?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan hasil pengolahan reaktor BSF terhadap kualitas air dan pertumbuhan tanaman dalam sistem akuaponik
3. Bagaimana tingkat efektivitas dan efisiensi sistem integrasi dibandingkan dengan akuaponik konvensional tanpa reaktor maggot

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mengevaluasi alat terintegrasi yang menggabungkan biokonversi BSF dengan daur ulang nutrisi akuaponik:

1. Mendesign dan mengembangkan sistem integrasi reaktor BSF dengan akuaponik yang berfungsi mengolah limbah organik sekaligus menghasilkan sumber protein alternatif.
2. Mengevaluasi pengaruh hasil pengolahan reaktor BSF terhadap kualitas air dalam akuaponik dan akuakultur.
3. Membandingkan efektivitas dan efisiensi sistem integrasi dengan sistem akuaponik konvensional dalam konteks pengelolaan limbah organik dan produksi panen

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menangani berbagai tantangan lingkungan dan pertanian dengan mengembangkan sistem pengelolaan limbah dan produksi pangan yang berkelanjutan.

Integrasi biokonversi belatung BSF dengan sistem akuaponik memiliki potensi untuk:

1. Mengurangi volume limbah padat organik dari restoran dan pasar tradisional.
2. Menghasilkan protein berkualitas tinggi dan pupuk cair organik untuk penggunaan pertanian.
3. Meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem akuaponik.
4. Memberikan wawasan berharga tentang keberadaan dan dampak logam berat dalam sistem pengelolaan limbah terintegrasi.
5. Menawarkan solusi yang dapat diskalakan dan secara ekonomi layak untuk pengelolaan limbah dan produksi pangan yang berkelanjutan.

1.6 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan dengan sampah organik yang berasal dari aktivitas pasar dan restoran di sekitar area Universitas Islam Indonesia, Kabupaten Sleman, Provinsi Yogyakarta. Penelitian ini dilaksanakan pada alat akuaponik yang terkontrol dalam rumah kaca pada Kebun

Benar Benih. Sedangkan tanaman yang digunakan merupakan tanaman selada keriting hijau (*Lactuca sativa. L*) ditanam dengan menggunakan sistem tanpa tanah (hidroponik) dengan *rockwool* sebagai media pengikat akarnya, ikan yang digunakan adalah jenis Ikan Nila (*Oreochromis sp*).

BAB II

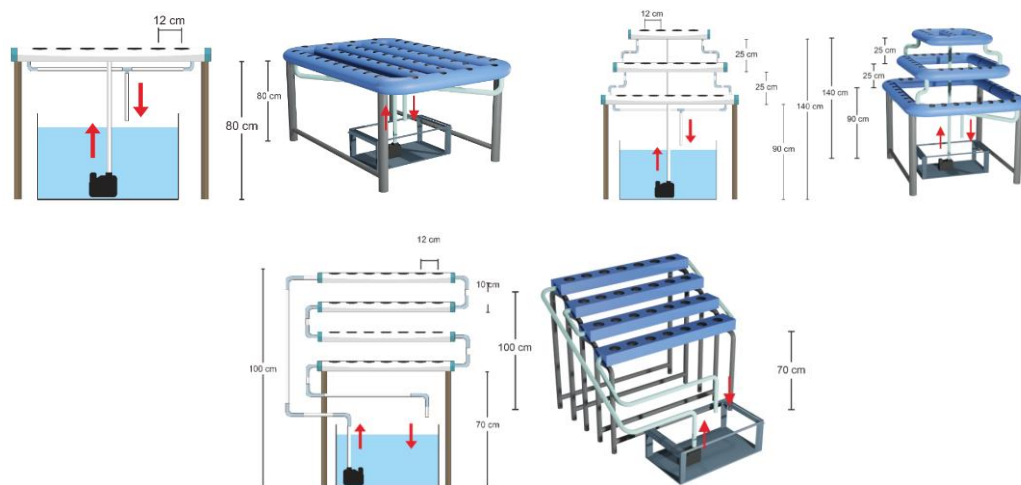
TINJAUAN PUSTAKA

Pengelolaan sampah organik merupakan salah satu tantangan lingkungan yang mendesak, terutama dalam upaya meminimalkan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat dan ekosistem. Salah satu pendekatan inovatif yang mulai banyak diterapkan adalah penggunaan larva BSF dalam mengolah sampah organik menjadi produk bernilai tambah seperti larva, kasgot, dan cairan pupuk organik. Penelitian ini tidak hanya membantu mengurangi volume sampah organik tetapi juga menghasilkan komponen yang dapat dimanfaatkan dalam sistem pertanian akuaponik. Tulisan dalam bab ini menjelaskan dasar teori yang mencakup sistem akuaponik, sistem produksi larva BSF, dan potensi logam berat.

2.1 Sistem Akuaponik

Sistem akuaponik merupakan teknologi yang menggabungkan antara akuakultur (budidaya ikan) dengan hidroponik (menanam tanaman tanpa tanah) dalam sistem tertutup simbiotik yang saling menguntungkan. Dasar-dasar sistem akuaponik melibatkan penggunaan limbah dari ikan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman. Tanaman memiliki fungsi membantu memurnikan air yang kemudian dikembalikan ke kolam ikan, menciptakan sistem tertutup yang efisien dalam penggunaan air dan nutrisi. Komponen utama sistem akuaponik mencakup kolam ikan, biofilter, dan tempat tumbuh tanaman. Kolam ikan adalah tempat dimana ikan dibudidayakan, dan kotoran ikan didalam air dipompa ke biofilter. Biofilter mengandung bakteri nitrifikasi yang mengubah amonia dari limbah ikan menjadi nitrat yang dapat diserap oleh tanaman. Tempat tumbuh tanaman biasanya terdiri dari media tanam seperti rockwool, kerikil, pasir, atau hidrotan, yang menyediakan dukungan fisik bagi tanaman dan membantu dalam proses biofiltrasi. Pada penelitian (Love dkk., 2015) fokus dalam memanfaatkan nutrisi dan air, serta potensi besar untuk produksi pangan yang *sustainable*. Selain itu, penelitian dalam Goddek (2019) menekankan tentang pentingnya desain sistem dan pengelolaan komponen-komponen akuaponik ini untuk memastikan keseimbangan ekosistem dan kesehatan tanaman serta ikan dalam sistem. Sehingga terbentuklah konsep implementasi teknologi modern dan pendekatan alami berbasis ilmu pengetahuan dalam desain dan pengoperasian sistem akuaponik.

Prinsip dasar akuaponik yang menghubungkan akuakultur (budidaya ikan) dengan hidroponik (budidaya tanaman tanpa tanah) untuk menciptakan ekosistem yang efisien dalam penggunaan sumber daya. Dalam sistem akuaponik, air kaya nutrisi dari kolam ikan digunakan untuk memberi nutrisi tanaman, sementara tanaman berperan menyerap zat-zat sisa dan membersihkan air sebelum dikembalikan ke kolam ikan (Baganz dkk., 2022). Perkembangan sistem akuaponik menunjukkan pergeseran dari sistem akuaponik konvensional yang terhubung penuh (*coupled systems*) menuju sistem yang dipisahkan (*decoupled systems*). Sistem yang dipisahkan ini memungkinkan pengelolaan nutrisi dan pH yang lebih baik di setiap komponen, memberikan fleksibilitas lebih bagi tanaman dan ikan untuk tumbuh optimal (Yep dan Zheng., 2019). Namun, meskipun sistem ini menawarkan keuntungan, seperti kemampuan menyesuaikan kondisi nutrisi yang berbeda untuk tanaman dan ikan, biaya awal yang tinggi dan kebutuhan ruang lebih luas menjadi tantangan signifikan dalam implementasi komersial.



Gambar 2.1 Design akuaponik model meja, piramid, dan anak tangga (Wibowo, 2021)

2.1.1 Recirculating Aquaculture System (RAS)

Sistem Akuakultur Resirkulasi (RAS) merupakan bagian penting dalam menjaga kualitas air dan keberlanjutan operasional budidaya perikanan. RAS dirancang untuk mengurangi dampak lingkungan dari akuakultur dengan meminimalkan pembuangan limbah ke ekosistem luar melalui sirkulasi ulang air dan pengolahan limbah internal (Baganz dkk., 2022). Dalam sistem budidaya RAS, limbah organik dan nitrogen dari ikan diolah melalui proses nitrifikasi, di mana amonia diubah menjadi nitrat oleh bakteri, efektivitas sistem RAS sangat bergantung pada manajemen kualitas air yang tepat serta pengendalian parameter seperti suhu dan kandungan oksigen agar proses nitrifikasi dapat

berlangsung dengan optimal. Secara konsep RAS merupakan metode sirkulasi kembali air kolam budidaya perikanan yang di alirkan melalui pompa, menuju sistem pengolahan air, kemudian kembali lagi menuju kedalam kolam budidaya ikan. Dengan menggunakan sistem RAS ini, akan dapat menghemat penggunaan air dan menjaga kualitas air pada budidaya perikanan.

2.1.2 Nutrisi Akuaponik

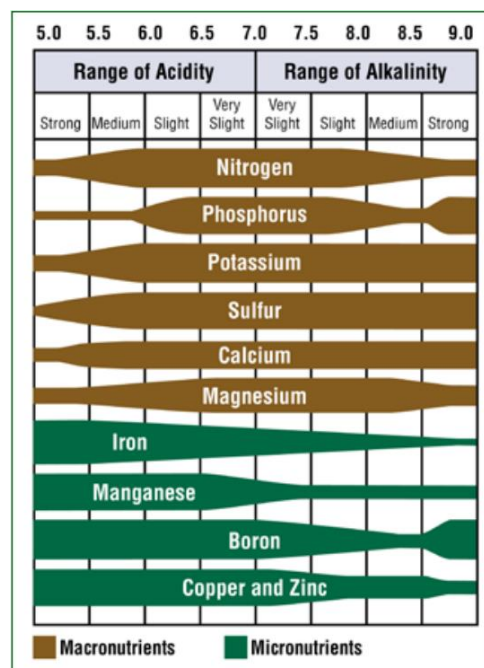
Pengolahan limbah nitrogen dari akuakultur yang diubah menjadi nutrisi tanaman oleh bakteri menjadi pilar utama sistem akuaponik dalam kemampuannya membudidayakan tanaman tanpa tanah. Dinamika nutrisi dalam sistem akuaponik ini lah yang memiliki peranan penting dalam pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Nutrisi yang dihasilkan dari limbah ikan, terutama amonia, diubah oleh bakteri nitrifikasi menjadi nitrat, bentuk nitrogen yang lebih mudah diserap oleh tanaman. Selain nitrogen, tanaman dalam sistem akuaponik juga memerlukan fosfor, kalium, dan berbagai mikronutrien seperti besi, magnesium, dan kalsium untuk pertumbuhan optimal. Penelitian dalam Yep dan Zheng (2019) menunjukkan bahwa pemahaman tentang siklus nutrisi dalam akuaponik adalah kunci untuk mengoptimalkan serapan nutrisi oleh tanaman dan menjaga keseimbangan ekosistem dalam sistem tersebut. Penyerapan nutrisi oleh tanaman dalam sistem akuaponik terjadi melalui akar yang terendam dalam larutan nutrisi yang terus-menerus bersirkulasi. Faktor-faktor seperti pH, suhu, dan oksigen terlarut dalam air juga mempengaruhi ketersediaan dan penyerapan nutrisi oleh tanaman. Studi yang dilakukan dalam Roosta dan Hamidpour (2011) menjelaskan bahwa pengamatan dan penyesuaian kondisi lingkungan dalam sistem akuaponik sangat penting untuk memastikan efisiensi serapan nutrisi dan kesehatan tanaman. Dengan begitu, optimalisasi dinamika nutrisi dalam sistem akuaponik tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman tetapi juga menjaga keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem akuaponik secara keseluruhan.

Secara umum tanaman pada umumnya mendapatkan berbagai nutrisi esensial yang dibagi menjadi makro dan mikro nutrisi. Makro nutrisi, yang dibutuhkan dalam jumlah besar, meliputi nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), serta kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S). Nitrogen biasanya disuplai melalui proses nitrifikasi limbah ikan, di mana amonia diubah menjadi nitrat oleh bakteri nitrifikasi, yang kemudian diserap oleh tanaman. Fosfor dan kalium juga merupakan komponen penting dari limbah ikan yang digunakan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangan. Mikro nutrisi, yang diperlukan dalam jumlah lebih kecil tetapi tetap krusial, termasuk besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), boron (B), dan molibdenum (Mo). Penelitian dalam Graber dan

Junge (2009) menunjukkan bahwa keseimbangan yang tepat antara makro dan mikro nutrisi sangat penting untuk kesehatan dan produktivitas tanaman dalam sistem akuaponik. Studi lanjutan pada (Licamele dkk., 2009) menekankan bahwa kekurangan atau ketidakseimbangan salah satu nutrisi dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menyebabkan berbagai masalah fisiologis.

Berbagai penelitian terkait nutrisi yang ada pada akuaponik telah menyoroti bahwa salah satu tantangan utama dalam akuaponik adalah keterbatasan nutrisi seperti kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) yang esensial bagi tanaman berbuah. Meskipun demikian, penggunaan mikroba yang mendukung pertumbuhan tanaman dalam sistem akuaponik dapat meningkatkan penyerapan nutrisi, sehingga memungkinkan hasil yang sebanding dengan hidroponik meskipun kadar nutrisi lebih rendah (Yep dan Zheng., 2019).

Penyerapan nutrisi tanaman dalam bentuk mineral logam maupun non logam ini dipengaruhi oleh tingkat keasaman atau pH dalam sistem akuaponik sesuai pada gambar 2.2. Bersamaan dengan budidaya ikan nila, lele, dan ikan pelangi tingkat keasaman akan berada pada kisaran antara 7,5 hingga 7,6 yang menunjukkan bahwa kondisi ideal untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan aktivitas biologis dalam sistem (Wijaya & Fajeriana, 2018). Dalam penelitian tersebut juga dijelaskan tentang nilai pH yang mendekati netral memastikan bahwa bakteri nitrifikasi dapat berfungsi optimal, mengubah amonia menjadi nitrat yang mudah diserap oleh tanaman.



Gambar 2.1 Pengaruh pH terhadap penyerapan nutrisi pada tanaman (Brady, 1984)

2.1.3 Tanaman

Tanaman yang biasa ditanam pada akuaponik adalah sayuran yang berdaun gelap, diantaranya adalah selada, bayam, basil, dsb. Penelitian ini menggunakan tanaman Selada (*Lactuca sativa L.*) sebagai tanaman yang diamati perkembangannya. Selada yang ditanam dalam sistem akuaponik memiliki tingkat pertumbuhan yang lebih tinggi dan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional (Somerville dkk., 2014). Dijelaskan juga tentang keunggulan lain dari akuaponik adalah efisiensi penggunaan air, karena sistem ini menggunakan hingga 90% lebih sedikit air dibandingkan dengan pertanian tradisional. Selain itu, dalam penelitian Tyson (2011) menunjukkan bahwa selada yang ditanam dalam sistem akuaponik memiliki nilai nutrisi yang setara atau lebih tinggi dibandingkan dengan selada yang ditanam di tanah.

Penelitian terkait juga dilakukan untuk membandingkan hasil dan kualitas tanaman selada (*Lactuca sativa L.*) pada Pantanella (2012) yang ditanam pada sistem akuaponik dan hidroponik. Dalam penelitian ini menunjukkan bahwa dalam kondisi ideal, produktivitas akuaponik bisa menyamai hidroponik. Pada panen pertama, selada yang ditanam pada sistem akuaponik dengan kepadatan ikan tinggi menghasilkan 2,7 kg/m², hampir sama dengan 2.8 kg/m² yang diperoleh pada sistem hidroponik. Pada siklus kedua, tidak ada perbedaan signifikan antara kedua sistem, dengan produksi 5,7-6,0 kg/m². Akuaponik mampu menghasilkan sayuran berkualitas dengan efisiensi yang tinggi, meskipun kandungan nitrat dalam air lebih rendah dibandingkan hidroponik.

2.1.4 Media Tanam

Media tanam pada akuaponik memiliki fungsi utama sebagai support berdirinya tanaman pada sistem penanaman tanpa tanah. Salah satu yang sering digunakan di Indonesia adalah *Rockwool*. *Rockwool* adalah media tanam yang terbuat dari serat mineral berbasis batuan seperti basalt dan dolomit, yang dipanaskan hingga meleleh dan kemudian dipintal menjadi serat-serat halus. Awalnya dikembangkan untuk keperluan isolasi, *rockwool* telah diadaptasi untuk digunakan dalam pertanian tanpa tanah (*soilless culture*) seperti hidroponik dan akuaponik karena kemampuannya menyimpan air dan menyediakan aerasi yang baik bagi akar tanaman (Xiong dkk., 2017).

Rockwool telah lama dimanfaatkan sebagai media tanam dalam sistem pertanian karena kemampuannya dalam menyerap air dan mempertahankan keseimbangan udara di sekitar akar tanaman. Dalam penelitian oleh Niyomthongchai (2017), *rockwool* diuji sebagai media tanam untuk tanaman *False Heather* (*Cuphea hyssopifolia*) tanpa penambahan nutrisi selama 60 hari. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa *rockwool*

limbah mampu mendukung pertumbuhan tanaman dengan baik. Selain itu, rockwool menghasilkan konsentrasi logam berat berbahaya dalam leachate atau di dalam tanaman dalam kadar yang kecil, sehingga menjadikannya cukup aman digunakan dalam jangka panjang dan ramah lingkungan.

Tabel 2.1 Konsentrasi Logam Berat pada Rockwool (mg/kg)

Substrat	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
Rockwool	< 0,01	< 0,03	< 0,01	0,04	< 0,06	0,08	0,004	0,001
Rockwool Limbah Insulasi	< 0,01	0,21	1,32	0,52	< 0,03	1,50	0,01	0,002

(Niyomthongchai dkk, 2017)

2.1.5 Rumah Kaca (*Green House*)

Greenhouse, atau rumah kaca, merupakan struktur dengan kerangka yang dilapisi material transparan seperti kaca, polietilen, atau polikarbonat. Fungsinya adalah sebagai penghalang udara, sekaligus menangkap energi untuk meningkatkan suhu di dalamnya, sehingga menciptakan kondisi iklim ideal bagi pertumbuhan tanaman. Dalam konteks pertanian modern, greenhouse memungkinkan budidaya tanaman dengan kualitas tinggi seperti buah, bunga, tanaman obat, dan tanaman hias, serta meningkatkan produktivitas per satuan luas melalui eksploitasi penuh potensi genetik tanaman. Teknologi ini juga memungkinkan penanaman di luar musim, melindungi tanaman dari hama, penyakit, dan kondisi iklim ekstrem seperti hujan lebat dan angin kencang (Ashok dan Sujitha, 2021).

Tingkat pencahayaan yang masuk kedalam rumah kaca menjadi salah satu faktor penentu kondisi iklim yang ideal bagi tanaman. Efektivitas pencahayaan alami dalam rumah kaca berfokus pada desain dan konfigurasi bangunan yang memaksimalkan pencahayaan sangat penting untuk pertumbuhan tanaman yang optimal (Jasni dkk., 2021). Rumah kaca berperan penting dalam melindungi tanaman dari panas berlebih, hujan, dan angin, sekaligus mengurangi ketergantungan pada pencahayaan buatan yang memerlukan konsumsi energi tinggi. Simulasi dengan aplikasi *Velux Daylight Visualizer* untuk mengukur pencahayaan harian di konfigurasi rumah kaca. Berikut ini merupakan tabel kebutuhan cahaya pada berbagai jenis tanaman.

Tabel 2.2 Kebutuhan Intensitas Cahaya Pada Tanaman (Bodolan dan Brätucu., 2013)

Jenis Tanaman	Intensitas Cahaya (Lux)
Tanaman dengan kebutuhan tinggi (labu-labuan, kacang, okra, solanaceae)	8.000 – 12.000
Tanaman dengan kebutuhan sedang (umbi, akar, kol, sayuran berdaun, kacang polong)	4.000 – 7.000
Tanaman dengan kebutuhan rendah (bawang daun, bawang tahunan, bit)	1.000 – 3.000

Tabel 2.3 Kebutuhan Lama Paparan Matahari Pada Tanaman (Bodolan dan Brätucu., 2013)

Jenis Tanaman	Jam Paparan Matahari
Paparan tinggi (tomat, paprika, terong, melon, mentimun)	6 – 8 jam
Paparan sedang (brokoli, wortel, lobak, kentang)	4 – 6 jam
Paparan rendah (bayam, selada, sawi hijau, sawi, peterseli, kol, bawang daun)	3 – 4 jam

2.2 Sampah Organik

Sampah organik menduduki peringkat pertama pada jenis timbulan sampah yang ada di Indonesia berdasarkan data SIPSN. Persentasenya berada pada 55-60% dari total keseluruhan timbulan sampah yang dikelola kota/kabupaten. Berdasarkan klasifikasinya sampah sisa makanan menduduki tingkat tertinggi dari timbulan sampah organik, diikuti oleh sampah kayu-ranting. Pengelolaan sampah organik menjadi pilihan efisien untuk dapat mengelola hampir setengah dari timbulan sampah yang ada di Indonesia.

Berdasarkan definisi, sampah organik berasal dari sisa-sisa makhluk hidup seperti daun, ranting, dan sisa makanan, yang dapat terurai secara alami (Setiadi dkk., 2015). Sampah ini terdiri dari bahan-bahan organik yang cepat membusuk (Ramachandra dan Bachamanda, 2007). Menurut penelitian Novianto (2022), jika sampah organik tidak dikelola dengan baik, akan menimbulkan bau menyengat di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST). Pemilahan sampah organik di sumbernya bermanfaat untuk memudahkan proses pengolahan serta pemanfaatannya (Setiawan dkk., 2021). Salah satu inovasi dalam pengelolaan sampah organik adalah memanfaatkannya sebagai pakan untuk larva *Black Soldier Fly* (BSF), yang dapat mengubah sampah tersebut menjadi protein dan lemak berguna bagi pakan ternak atau produk lainnya (Utami dkk., 2022).

2.2.1 Sampah Restoran

Sampah restoran merupakan limbah yang dihasilkan dari aktivitas operasional restoran, termasuk sisa makanan dan bahan baku yang dihasilkan selama proses penyajian

dan konsumsi (Hirsan dkk., 2021). Menurut Food Agriculture Organization (FAO), sisa makanan adalah limbah yang berasal dari pembuatan makanan atau kegiatan makan, yang terkait dengan perilaku penjual dan konsumen. Pada penelitian didalam Lestari (2020) menyatakan bahwa sampah sisa makanan menjadi komponen utama dalam sampah restoran dan membutuhkan pengelolaan yang tepat untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Sampah makanan dari restoran cenderung bersifat organik dan mudah terurai, tetapi jika tidak dikelola dengan baik, dapat menimbulkan masalah lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan pencemaran air tanah (Wahyudi, 2019).

2.2.2 Sampah Pasar

Sampah pasar berasal dari aktivitas jual beli antara pedagang dan pembeli yang mengakibatkan timbunan sampah setiap hari (Panggabean, 2008). Dalam penelitian Lestari (2016) juga menyebutkan bahwa sebagian besar sampah pasar terdiri dari sampah organik, seperti buah-buahan dan sayur-sayuran yang tidak laku terjual. Diperkuat juga dalam penelitian Ramon dan Afriyanto (2015) menambahkan bahwa pemilahan sampah yang efektif dapat mengurangi volume sampah yang masuk ke TPST dan meningkatkan efisiensi daur ulang.

2.2.3 Air Lindi Sampah

Lindi atau cairan sampah yang dihasilkan dari pengomposan sampah organik dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik cair. Proses pengomposan tersebut bisa dilakukan dalam kondisi aerobik maupun anaerobik, di mana mikroorganisme berperan dalam menguraikan bahan organik menjadi zat-zat yang lebih sederhana. Lindi yang dihasilkan umumnya mengandung unsur-unsur makro seperti N, P, dan K yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman (Thoyib dkk., 2016).

Menurut penelitian Sari (2022), dalam proses penguraian sampah dengan larva BSF, residu padat dan cair yang dihasilkan memiliki kandungan hara yang bermanfaat bagi tanaman. Pupuk kompos cair yang dihasilkan memiliki warna hijau kehitaman yang pekat dan berbau menyengat, dengan komposisi yang mampu menyediakan nutrisi secara cepat untuk tanaman. Namun, untuk meningkatkan kualitas pupuk kompos cair ini, perlu dilakukan fermentasi lebih lama agar kandungan nutrisi seperti C-organik dapat memenuhi standar mutu.

Penelitian yang dilakukan oleh Sari (2022) menunjukkan bahwa pengolahan sampah organik rumah tangga dengan bantuan larva BSF menghasilkan pupuk organik cair yang memenuhi beberapa parameter standar mutu yang telah ditetapkan oleh Kementerian

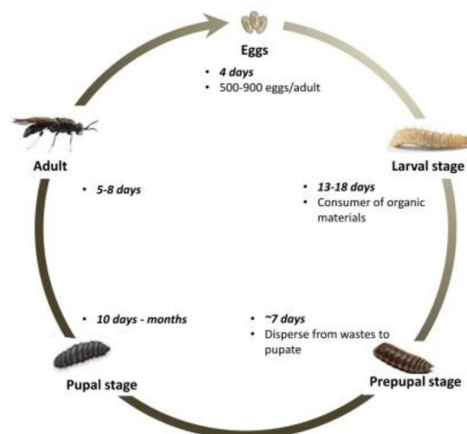
Pertanian Republik Indonesia No. 261 Tahun 2019 mengenai Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenh Tanah. Pupuk organik cair yang dihasilkan dari proses ini diuji di laboratorium untuk menilai kandungan logam berat, pH, dan keberadaan bakteri patogen seperti *Salmonella* dan *Escherichia coli*. Hasil uji menunjukkan bahwa pupuk organik cair tersebut memenuhi standar kualitas untuk parameter yang diuji.

Salah satu aspek penting dalam proses ini adalah pengolahan lindi secara aerasi, yang berperan dalam mengurangi kandungan bakteri patogen *Salmonella* dan *Escherichia coli*. Aerasi terbukti memiliki dampak signifikan dalam memperbaiki kualitas lindi yang dihasilkan dari proses penguraian sampah organik oleh larva BSF (Sari dkk., 2022). Oleh karena itu, penting untuk memperpanjang proses pengomposan dan waktu penyimpanan lindi agar kualitas pupuk organik cair yang dihasilkan dapat lebih optimal dan memenuhi standar mutu yang lebih baik.

2.3 Larva BSF (*Black Soldier Fly*)

Lalat BSF atau *Hermetia illucens*, yang termasuk dalam ordo Diptera: *Stratiomyidae* merupakan serangga yang karakteristik dan kandungan nutrisinya dapat dimanfaatkan sebagai alternatif pakan ternak. Serangga ini berasal dari Amerika dan telah menyebar ke wilayah tropis dan subtropis di seluruh dunia. Siklus hidupnya serupa dengan serangga diptera lainnya, yang meliputi tahap telur, larva, metamorfosis, pupa, dan dewasa (Fahmi, 2015). Metamorfosis lalat tentara hitam berlangsung lebih dari 40 hari yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban udara, dan asupan nutrisi (Alvarez, 2012). Pada tahap akhir, yang disebut pra pupa, serangga ini dapat bermigrasi dari media tumbuhnya, sehingga memudahkan proses panen.

Siklus hidup lalat BSF terdiri dari empat tahap utama: telur, larva, pupa, dan lalat dewasa dalam Surendra (2020), dapat dilihat pada ilustrasi gambar 2.3. Tahap awal dimulai



Gambar 2. 2 Siklus Hidup Larva BSF (Surendra dkk., 2020)

ketika betina dewasa meletakkan telur-telurnya pada bahan organik yang membusuk. Telur-telur ini kemudian menetas menjadi larva dalam waktu sekitar empat hari. Larva lalat tentara hitam sangat efisien dalam mengkonsumsi bahan organik dan dapat mengubahnya menjadi protein berkualitas tinggi, sehingga sangat potensial sebagai pakan ternak alternatif. Tahap larva berlangsung selama sekitar dua minggu, di mana larva aktif memakan dan tumbuh. Setelah mencapai ukuran maksimal, larva memasuki tahap pra-pupa, di mana mereka berhenti makan dan mencari tempat kering dan terlindung untuk bermetamorfosis menjadi pupa.

Proses ini berlangsung selama beberapa hari hingga minggu, tergantung pada kondisi lingkungan. Tahap pupa adalah periode di mana larva mengalami perubahan drastis dalam bentuk dan struktur tubuh, mempersiapkan diri untuk menjadi lalat dewasa. Metamorfosis ini dapat memakan waktu hingga dua minggu, tergantung pada suhu dan kelembaban lingkungan. Setelah metamorfosis selesai, lalat dewasa muncul dan memulai siklus hidup baru.

Siklus hidup lengkap lalat tentara hitam biasanya memakan waktu sekitar empat puluh hari, meskipun durasi ini dapat bervariasi tergantung pada berbagai faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan ketersediaan makanan (Alvarez, 2012). Lalat dewasa biasanya hidup selama sekitar satu minggu, selama waktu ini mereka berfokus pada reproduksi dan tidak makan, hanya minum air. Kondisi lingkungan yang optimal, seperti suhu hangat dan kelembaban tinggi, dapat mempercepat siklus hidup mereka, sementara kondisi yang kurang ideal dapat memperpanjangnya.

Efisiensi larva BSF dalam mengurai bahan organik dan mengubahnya menjadi nutrisi yang bermanfaat, larva BSF telah menarik perhatian sebagai solusi potensial untuk pengelolaan limbah organik dan produksi pakan ternak yang berkelanjutan. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa larva BSF dapat berkembang dengan baik pada berbagai substrat organik, termasuk limbah makanan, kotoran, dan produk sampingan pertanian. Seperti salah satu contohnya, pada penelitian Diener (2011) menemukan bahwa larva BSF yang dibesarkan dengan sampah makanan menunjukkan tingkat pertumbuhan dan hasil biomassa yang lebih tinggi dibandingkan dengan larva yang diberi media organik lain seperti kotoran ayam atau limbah buah dan sayuran. Kandungan protein dalam larva dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada makanannya; larva yang diberi substrat tinggi protein seperti limbah ikan atau limbah daging cenderung memiliki kandungan protein yang lebih tinggi, membuatnya lebih cocok sebagai bahan pakan untuk ternak dan akuakultur. Selain itu, efisiensi larva BSF dalam mengonversi limbah organik dipengaruhi oleh komposisi nutrisi dari limbah tersebut; substrat dengan kandungan nutrisi yang

seimbang umumnya menghasilkan pertumbuhan larva yang lebih baik dan produksi biomassa yang lebih tinggi (Nguyen dkk., 2015). Hal-hal tersebut menjadikan pentingnya memilih jenis limbah yang tepat, untuk mengoptimalkan produksi larva BSF dan meningkatkan nilai nutrisinya sebagai sumber pakan yang berkelanjutan.

Larva BSF telah menunjukkan tingkat efisiensi yang tinggi dalam menguraikan berbagai jenis sampah organik, sehingga dapat mengurangi volume sampah secara signifikan. Penelitian dalam Lalander (2019) menunjukkan bahwa larva BSF dapat mengurangi volume sampah organik hingga 70% dalam waktu yang singkat. Dalam studi tersebut juga dijelaskan bahwa, larva BSF juga dapat diberikan berbagai jenis limbah organik termasuk sisa makanan rumah tangga, sampah pasar, dan kotoran hewan. Hasilnya menunjukkan bahwa larva BSF tidak hanya efektif dalam mengurangi massa sampah, tetapi juga meningkatkan kualitas residu akhir yang dapat digunakan sebagai kompos atau bahan biologi lainnya. Selain itu, penelitian oleh Sheppard (1994) menemukan bahwa larva BSF dapat mengurangi kandungan patogen dalam limbah, menjadikannya pilihan yang lebih aman dan higienis untuk pengelolaan limbah organik. Efisiensi pengurangan limbah oleh BSF juga didukung oleh studi Diener (2011) yang menunjukkan bahwa pemberian makan yang optimal dapat memaksimalkan konversi limbah menjadi biomassa larva. Penelitian tersebut menunjukkan potensi besar larva BSF dapat menjadi solusi masalah sampah organik yang terus meningkat.

Hasil biomassa BSF dalam jumlah besar memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, tergantung pada jenis limbah yang digunakan sebagai pakan. Misalnya, dalam penelitian oleh Liu (2017) menemukan bahwa BSF yang diberi pakan dari berbagai limbah organik, termasuk sisa makanan dan kotoran hewan, dapat menghasilkan biomassa dengan kandungan protein hingga 42%. Larva BSF yang diberi pakan sisa makanan memiliki tingkat konversi yang tinggi, menghasilkan larva yang kaya akan protein dan lemak yang dapat digunakan sebagai pakan ternak, khususnya untuk unggas dan ikan. Penelitian lain oleh Surendra (2020) juga mengonfirmasi bahwa kualitas dan kuantitas biomassa yang dihasilkan oleh larva BSF sangat dipengaruhi oleh komposisi nutrisi dari limbah yang mereka konsumsi. Dalam studi tersebut, BSF yang diberi pakan sisa sayuran menunjukkan kandungan protein yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang diberi pakan limbah buah.

2.3.1 Pengolahan Sampah dengan Larva BSF

Larva BSF memiliki kemampuan luar biasa dalam mengonversi limbah organik menjadi biomassa berharga. Penelitian dalam Liu (2017) menunjukkan bahwa larva BSF yang diberi makan limbah makanan dapat menghasilkan hasil biomassa yang signifikan.

Hasil biomassa ini bergantung pada komposisi nutrisi dari limbah yang digunakan sebagai substrat. Penelitian tersebut menemukan bahwa larva BSF yang diberi pakan dengan limbah makanan memiliki laju konversi yang tinggi, dengan efisiensi pakan mencapai 15-22% berat kering. Dalam hasil ini menandakan bahwa dari setiap 100 gram limbah kering yang dikonsumsi, 15-22 gram diubah menjadi biomassa larva. Penelitian lain dalam Parodi (2020) juga menunjukkan bahwa larva BSF yang diberi pakan campuran limbah sayuran dan buah menghasilkan biomassa dengan tingkat konversi yang tinggi.

Produktivitas larva BSF juga sangat dipengaruhi oleh kualitas dan jenis limbah yang digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh Surendra (2020) ditemukan bahwa limbah organik seperti sisa sayuran, buah, dan limbah dapur dapat mendukung pertumbuhan larva BSF yang optimal, menghasilkan tingkat produktivitas yang tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan kondisi yang tepat, larva BSF dapat menggandakan berat badannya dalam waktu 6-8 hari. Selain itu, hasil studi ini juga menyoroti pentingnya manajemen substrat dan kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan aerasi untuk memaksimalkan produktivitas larva BSF. Pada penelitian Tschirner dan Simon (2015) juga menemukan bahwa larva BSF yang diberi pakan campuran limbah makanan memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan dengan substrat lain, menunjukkan fleksibilitas larva BSF dalam mengonsumsi berbagai jenis limbah organik terutama yang mengandung kadar protein tinggi.

Kualitas nutrisi larva BSF yang diberi makan sampah juga telah dievaluasi dalam berbagai penelitian. Menurut penelitian dalam Cullere (2019), larva BSF yang diberi pakan limbah organik menunjukkan kandungan protein yang tinggi, berkisar antara 35-45% berat kering, serta kandungan lemak yang berkisar antara 20-30% berat kering. Kandungan asam amino esensial dalam larva BSF juga setara atau bahkan lebih tinggi dibandingkan dengan sumber protein konvensional seperti kedelai dan ikan. Penelitian dalam Meneguz (2017) menegaskan bahwa kandungan nutrisi larva BSF membuatnya cocok sebagai bahan pakan alternatif yang berkelanjutan. Ini menjadikan larva BSF sebagai sumber protein yang potensial untuk pakan ternak dan akuakultur.

Laju pertumbuhan dan kelangsungan hidup larva BSF dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan nutrisi. Penelitian dalam Meneguz (2018) menunjukkan bahwa suhu media merupakan salah satu faktor lingkungan paling kritis bagi larva. Larva BSF tumbuh optimal pada suhu antara 25-30°C, sementara suhu yang lebih rendah atau lebih tinggi dapat memperlambat pertumbuhan dan meningkatkan mortalitas. Selain suhu, kelembapan juga memainkan peran penting dalam memastikan pertumbuhan yang sehat. Pada penelitian lain juga disebutkan bahwa tingkat kelembapan relatif media harus berada di

angka sekitar 60-70% untuk mencapai tingkat pertumbuhan ideal larva BSF, dengan tingkat kelembapan yang terlalu rendah akan menyebabkan dehidrasi dan tingkat kelembapan yang terlalu tinggi akan meningkatkan risiko larva terkena penyakit dan infeksi (Holmes dkk., 2017). Kualitas dan jenis substrat yang digunakan sebagai pakan juga sangat mempengaruhi laju pertumbuhan dan kelangsungan hidup larva BSF. Penelitian dalam Nyakeri (2017) menunjukkan bahwa larva yang diberi pakan substrat dengan kandungan protein dan karbohidrat seimbang menunjukkan laju pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan larva yang diberi pakan substrat dengan kandungan nutrisi yang kurang seimbang. Selain itu, ketersediaan nutrisi mikro seperti kalsium dan fosfor juga penting untuk perkembangan larva yang sehat. Studi dalam Barragan-Fonseca (2017) mengungkapkan bahwa defisiensi nutrisi mikro dalam substrat dapat menyebabkan pertumbuhan yang terhambat dan meningkatkan tingkat kematian larva. Kepadatan populasi larva dalam unit pembesaran juga merupakan faktor yang signifikan. Penelitian lain dalam Dortmans (2017) menunjukkan bahwa kepadatan populasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kompetisi untuk sumber daya, yang mengarah pada penurunan laju pertumbuhan dan peningkatan mortalitas, sebaliknya, kepadatan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pemborosan sumber daya dan menurunkan efisiensi produksi. Pengaturan kepadatan yang optimal sangat penting untuk memastikan pertumbuhan yang maksimal dan efisiensi konversi substrat menjadi biomassa. Selain itu, perlunya manajemen sanitasi yang baik, termasuk pembersihan rutin dan pengelolaan kasgot, juga berperan dalam mengurangi risiko penyakit dan infeksi yang dapat mempengaruhi kelangsungan hidup larva BSF.

2.3.2 Reaktor Produksi Larva BSF

Desain reaktor untuk produksi maggot Black Soldier Fly (BSF) memainkan peran kunci dalam menentukan keberhasilan operasional dan keberlanjutan proyek. Pada tahap awal, prinsip Preliminary Project Design (PPD) diterapkan untuk mengevaluasi kelayakan konsep secara menyeluruh. PPD ini memungkinkan analisis awal menggunakan model sederhana yang mengeksplorasi keseimbangan massa dan energi dalam sistem. Dengan pendekatan ini, berbagai parameter seperti komposisi pakan, suhu, dan efisiensi konversi energi dapat diubah untuk memahami dampaknya terhadap hasil produksi. Selain itu, PPD memberikan fleksibilitas bagi pengusaha untuk melakukan iterasi dalam proses desain sebelum melangkah ke tahap formal yang lebih kompleks (Kok, 2021).

Dalam menentukan desain suatu reaktor, terdapat elemen-elemen kritis yang harus dipertimbangkan salah satunya adalah pemilihan kombinasi organisme dan pakan, di mana

nutrisi dalam pakan seperti protein dan karbohidrat akan memengaruhi laju pertumbuhan larva serta hasil akhirnya. Selain itu, sistem operasi yang diterapkan pada reaktor harus mampu menjaga konsistensi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, untuk mengoptimalkan metabolisme larva. Sistem ini juga harus mencakup kontrol terhadap input seperti oksigen, air, dan pakan, serta manajemen emisi karbon dioksida dan panas yang dihasilkan selama proses berlangsung. Efisiensi reaktor sangat ditentukan oleh kemampuan sistem untuk menangani faktor-faktor ini dengan baik (Kok, 2021).

Dalam implementasinya, alur proses reaktor melibatkan input utama seperti pakan, air, udara, dan energi, yang kemudian diolah menjadi output berupa larva dewasa, limbah organik, dan emisi gas seperti karbon dioksida. Unit operasi pendukung, seperti penggilingan dan pencampuran substrat, serta pemisahan larva dari limbah, dirancang untuk meningkatkan efisiensi proses. Melalui pendekatan iteratif ini, reaktor dapat dioptimalkan untuk menyesuaikan kebutuhan lingkungan dan komposisi pakan yang bervariasi. Misalnya, pengaturan suhu yang spesifik dapat meningkatkan pertumbuhan larva, namun membutuhkan kontrol yang lebih kompleks untuk menjaga stabilitas lingkungan. Walaupun demikian reaktor maggot yang sering digunakan adalah berbentuk box yang dapat di tumpuk (Pahmeyer dkk., 2022 ; Kok, 2021).

2.3.3 Kandungan Protein Larva BSF

Larva BSF mampu mengolah sampah organik menjadi sumber nutrisi berkualitas tinggi (Gabler, 2014). Kandungan nutrisi dalam larva BSF mempengaruhi kualitas fisiknya, seperti panjang, lebar, dan berat selama pertumbuhannya. Menurut penelitian Faradila (2023), kandungan protein yang tinggi pada larva BSF, yaitu sekitar 40%, sangat bermanfaat di bidang peternakan karena dapat menjadi sumber gizi yang baik dan mendukung pertumbuhan hewan ternak.

Secara umum, larva BSF mengandung kadar protein yang berkisar antara 37% hingga 63% bahan kering (*dry matter*; DM), yang membuatnya sangat cocok sebagai sumber pakan ternak. Selain itu, larva BSF juga mengandung kadar lemak yang bervariasi antara 7% hingga 39% DM, di mana kadar ini sangat bergantung pada substrat makanan yang dikonsumsi oleh larva tersebut (Nguyen dkk., 2015; Oonincx dkk., 2015). Seperti salah satu penelitian pada larva yang diberi pakan dari limbah organik, seperti kotoran ternak atau sisa makanan dari restoran, menunjukkan kadar protein dan lemak yang lebih tinggi dibandingkan dengan larva yang diberi pakan dari substrat lain (Diener dkk., 2011).

Tidak hanya kaya protein dan lemak, larva BSF juga mengandung berbagai asam amino esensial. Salah satu asam amino penting yang terkandung dalam larva BSF adalah

lisin, yang berperan penting dalam pertumbuhan dan kesehatan ternak (Sheppard dkk., 2008). Selain itu, komposisi asam lemak dalam larva BSF juga patut diperhatikan. Sekitar 58% hingga 72% dari total kandungan lemak pada larva BSF adalah asam lemak jenuh, sementara 19% hingga 40% terdiri dari asam lemak tak jenuh tunggal dan ganda. Komposisi utama asam lemak meliputi asam laurat, palmitat, dan oleat, yang kesemuanya dipengaruhi oleh jenis makanan yang dikonsumsi oleh larva (Kroeckel dkk., 2012).

Larva BSF memiliki kemampuan untuk mengurangi jumlah bakteri patogen berbahaya seperti bakteri patogen *Escherichia coli* dan *Salmonella*, yang umumnya terdapat dalam kotoran ternak. Hal ini menjadikan BSF sebagai alternatif pakan yang lebih aman dibandingkan serangga lain (Nyakeri dkk., 2017). Penelitian lebih lanjut telah dilakukan bahwa penggunaan BSF sebagai pakan ternak juga mendukung konsep ekonomi sirkular, di mana limbah organik diubah menjadi sumber nutrisi yang bernilai tinggi. Konsep ini dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan pakan konvensional yang semakin mahal dan terbatas (Veldkamp dkk., 2012).

Namun demikian, terdapat beberapa tantangan dalam penggunaan BSF sebagai pengganti penuh pakan ternak tradisional. Kandungan lemak yang tinggi pada larva BSF dapat memengaruhi pencernaan dan performa ternak jika digunakan secara berlebihan. Oleh karena itu, pengolahan lanjutan seperti penghilangan lemak (*defatting*) diperlukan sebelum larva BSF dapat digunakan sebagai pakan ternak secara efektif (Makkar dkk., 2014). Pengolahan ini tidak hanya meningkatkan kandungan protein, tetapi juga memungkinkan penggunaan lemak yang dipisahkan untuk keperluan lain, seperti produksi biodiesel (Li dkk., 2011).

2.3.4 Media Sisa Produksi Larva BSF

Kasgot, atau *Black Soldier Fly Larvae Frass*, adalah hasil pencernaan yang dihasilkan oleh larva BSF. Kasgot ini dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik yang berfungsi meningkatkan kesuburan tanah atau media tanam (Putri, 2020). Sisa pencernaan larva ini mengandung berbagai nutrisi penting bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium (Triwijayani dkk., 2023). Penggunaan kasgot sebagai pupuk organik merupakan solusi berkelanjutan yang mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan (Mulyaningsih, 2024).

2.4 Logam Berat

Logam berat merupakan salah satu potensi risiko yang dapat masuk ke dalam lingkungan biotik maupun abiotik. Biomagnifikasi dan bioakumulasi pada tanaman dan

hewan meningkatkan potensi berpindahnya logam berat diantara makhluk hidup pada rantai makanannya. Salah satu resiko dampaknya adalah adanya potensi kandungan logam berat seperti timbal (Pb), besi (Fe), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) dari sampah organik yang harus menjadi perhatian serius.

Sumber utama pencemaran ini berasal dari limbah domestik, industri, dan pertanian yang mengandung bahan organik terkontaminasi. Limbah dari restoran, pasar tradisional, dan rumah tangga sering kali mengandung bahan kimia dan partikel logam dari kemasan makanan dan peralatan masak yang dapat menyebabkan akumulasi logam berat di lingkungan (Kumar dkk., 2019). Ketika limbah organik ini terdegradasi, logam berat dapat larut dan mencemari air tanah serta badan air lainnya, menyebabkan potensi risiko kesehatan bagi manusia dan hewan (Guo dkk., 2018). Logam berat seperti Pb dan Cd dikenal sangat beracun bahkan dalam konsentrasi rendah, dan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk kerusakan sistem saraf, gangguan fungsi ginjal, dan penyakit kardiovaskular (Tchounwou dkk., 2012). Studi dalam He (2019) menunjukkan bahwa Fe dan Cr yang berasal dari limbah organik juga dapat menyebabkan toksisitas pada tanaman, mengurangi pertumbuhan dan hasil tanaman dengan mengganggu penyerapan nutrisi penting.

2.4.1 Logam Berat pada Sampah

Logam berat dalam sampah, khususnya jenis logam seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), kromium (Cr), dan besi (Fe), menjadi perhatian serius dalam pengelolaan lingkungan karena potensi bahaya mereka terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Kadmium (Cd), yang sering ditemukan dalam baterai dan produk elektronik, bersifat toksik dan dapat merusak ginjal serta tulang jika terakumulasi di dalam tubuh (Järup, 2003). Timbal (Pb), yang sering berasal dari cat, baterai, dan limbah elektronik, dapat menyebabkan gangguan perkembangan otak pada anak-anak dan masalah kesehatan serius lainnya pada orang dewasa (Needleman, 2004). Kromium (Cr), yang umumnya digunakan dalam proses pelapisan logam dan industri kulit, berisiko menimbulkan kanker, terutama dalam bentuk heksavalen (Cr(VI)), yang sangat berbahaya jika terlepas ke lingkungan (Saha dkk., 2011). Sementara itu, besi (Fe) meskipun diperlukan dalam jumlah tertentu untuk kesehatan, namun dalam kadar yang berlebihan dalam lingkungan perairan dapat merusak ekosistem dan kualitas air. Dengan berbagai sumber dan dampak tersebut, pengelolaan sampah yang mengandung logam berat ini perlu dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah pencemaran tanah dan air, serta mengurangi risiko paparan pada manusia dan makhluk hidup lainnya (Ghosh dan Singh., 2005).

2.4.2 Logam Berat pada Air

Sumber pencemaran logam berat seperti timbal (Pb), besi (Fe), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) dari sampah organik sering kali berasal dari bahan kimia yang digunakan dalam pertanian, residu industri, dan produk rumah tangga yang dibuang bersama dengan limbah organik. Limbah dari restoran, pasar tradisional, dan rumah tangga dapat mengandung logam berat yang berasal dari pestisida, bahan pembersih, dan kemasan makanan yang mengandung partikel logam (Kumar dkk., 2019). Ketika sampah organik ini terdegradasi, logam berat dapat larut dan mencemari air tanah, yang berdampak negatif pada kualitas air minum dan kesehatan manusia. Penelitian dalam Guo (2018) menunjukkan bahwa logam berat dalam air tanah dapat mengakibatkan akumulasi dalam tanaman yang digunakan untuk konsumsi, meningkatkan risiko kesehatan seperti keracunan logam berat. Dalam konteks sistem akuaponik, logam berat seperti Pb, Fe, Cd, dan Cr dapat terakumulasi dalam air dan menyebabkan toksisitas bagi ikan dan tanaman. Penelitian oleh Wu (2017) menemukan bahwa logam berat ini dapat menyebabkan stres oksidatif pada ikan, mengganggu fungsi fisiologis dan pertumbuhan mereka, serta mengurangi kualitas air dalam sistem akuaponik. Tanaman yang terpapar logam berat dalam air akuaponik juga dapat menunjukkan penurunan laju pertumbuhan, klorosis, dan akumulasi logam dalam jaringan tanaman, yang berpotensi berbahaya jika dikonsumsi oleh manusia.

2.4.3 Logam Berat pada larva BSF

Larva BSF yang tumbuh pada substrat yang terkontaminasi logam berat dapat menyerap dan mengakumulasi logam-logam ini dalam tubuh mereka (Pophali dkk., 2020). Akumulasi logam berat dalam larva BSF tidak hanya mengurangi nilai gizi mereka tetapi juga menimbulkan risiko toksisitas ketika digunakan sebagai pakan ternak, karena logam berat dapat berpindah melalui rantai makanan dan menyebabkan keracunan pada hewan yang mengkonsumsinya (Biancarosa dkk., 2018). Khususnya, kadmium dan timbal diketahui sangat beracun, bahkan dalam konsentrasi rendah, dan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan pada hewan ternak, termasuk kerusakan ginjal, gangguan sistem saraf, dan penurunan fungsi reproduksi. Studi dalam (Charlton dkk., 2015) menekankan perlunya pengawasan ketat terhadap kontaminasi logam berat dalam media yang digunakan untuk produksi larva BSF, serta pengembangan metode pengolahan limbah yang dapat mengurangi atau menghilangkan logam berat sebelum digunakan sebagai substrat.

2.5 Integrasi Pengelolaan Sampah yang Berkelanjutan

Prinsip ekonomi sirkular dan praktik pertanian berkelanjutan telah menjadi landasan penting dalam mengembangkan strategi pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Pengurangan limbah melalui desain produk yang efisien, pemanfaatan kembali material, dan daur ulang untuk menjaga sumber daya dalam siklus yang terus berputar (MacArthur, 2015). Dalam konteks pengelolaan sampah organik, larva BSF telah menunjukkan potensi besar sebagai solusi berkelanjutan. Penelitian dalam Gold (2018) menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah berbasis BSF dapat mengkonversi limbah organik menjadi biomassa berharga dan pupuk organik, mengurangi ketergantungan pada pembuangan sampah ke *landfill* dan pembakaran. Praktik pertanian berkelanjutan yang mengintegrasikan penggunaan produk-produk hasil konversi BSF ini, seperti pupuk organik dan pakan ternak, juga mendukung kesehatan tanah dan produktivitas pertanian jangka panjang (Smetana dkk., 2019). Selain itu, integrasi sistem akuaponik dengan produksi larva BSF mempromosikan siklus nutrisi yang tertutup, di mana limbah ikan menyediakan nutrisi untuk tanaman, dan residu organik dari tanaman dapat digunakan kembali sebagai pakan larva (Goddek dkk., 2015). Dengan mengadopsi prinsip ekonomi sirkular dan praktik pertanian berkelanjutan, strategi ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga menciptakan nilai ekonomi dari limbah, menunjukkan potensi besar untuk aplikasi skala besar dalam pengelolaan sampah dan produksi pangan.

Skalabilitas sistem dan kelayakan ekonomi pengelolaan sampah terpadu memainkan peran penting dalam memastikan implementasi yang luas dan berkelanjutan dari solusi pengelolaan sampah yang inovatif. Studi dalam Diener (2015) menunjukkan bahwa penggunaan larva BSF dalam pengelolaan sampah organik dapat mengurangi biaya pengelolaan limbah hingga 50% dibandingkan dengan metode konvensional seperti penimbunan di TPA dan pembakaran. Selain itu, produk sampingan yang dihasilkan, seperti biomassa larva yang kaya protein dan pupuk organik, memiliki nilai ekonomi yang signifikan dan dapat dijual sebagai pakan ternak dan produk pertanian, memberikan tambahan pendapatan bagi sistem pengelolaan sampah (Smetana dkk., 2019). Penelitian dalam Salomone (2017) juga mengindikasikan bahwa sistem pengelolaan sampah berbasis BSF memiliki potensi skalabilitas tinggi, terutama di daerah perkotaan dan semi-urban di mana produksi sampah organik tinggi. Implementasi sistem akuaponik yang terintegrasi dengan produksi BSF juga menunjukkan potensi ekonomis yang kuat, karena mengurangi biaya input seperti pakan ikan dan pupuk, serta meningkatkan efisiensi penggunaan air dan lahan (Goddek dkk., 2015). Dengan demikian, keberhasilan ekonomi dan skalabilitas dari

sistem pengelolaan sampah terpadu ini tidak hanya mendukung lingkungan yang lebih bersih tetapi juga menawarkan model bisnis yang menguntungkan dan berkelanjutan.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei-Juni ditahun 2024 yang berlokasi di Kebun Benar Benih Akuaponik farm yang ber-alamat Desa Ngemplak, Kelurahan Umbulmartani, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584.

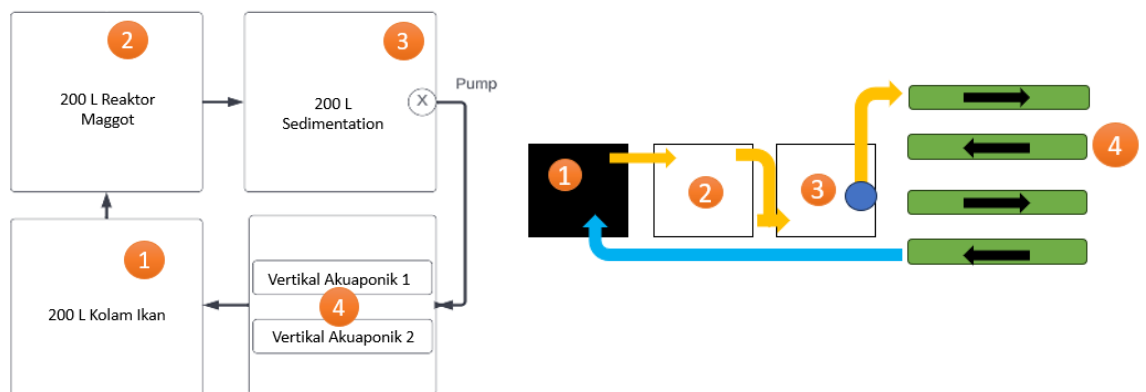
3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan dalam penelitian ini merupakan alat yang dirancang untuk dapat menggabungkan antara pengolahan sampah organik dengan larva BSF dengan digabungkan dengan Akuaponik yang melakukan recycle lindi dari hasil produksi larva.

3.2.1. Alat

A. Design Alat Integrasi Produksi Larva BSF dengan Akuaponik

Alat dibuat dengan mempertimbangkan tiga komponen utama akuaponik yaitu kolam ikan, kolam pengendapan dan sistem hidroponik. Ilustrasi skema sistem yang dibuat dapat dilihat pada gambar 3.1. Dimensi kolam 200 L adalah (0.8 x 0.5 x 0.5) meter, pipa penghubung kolam yang digunakan memiliki diameter $\frac{3}{4}$ inch. Sedangkan untuk sistem sirkulasi air menggunakan pompa dengan head 2.5 meter, dengan tinggi pipa paling atas adalah 1.8 meter. Sistem vertikal akuaponik terdiri dari 4 pipa yang berjajar kebawah dengan tinggi (1.8, 1.5, 1.2 dan 0.9) meter dari atas tanah dengan diameter pipa 3 inch panjang 1 meter, terdapat 5 lubang tanam setiap pipa dengan diameter 5 cm dan jarak antar lubang 15 cm dapat dilihat pada

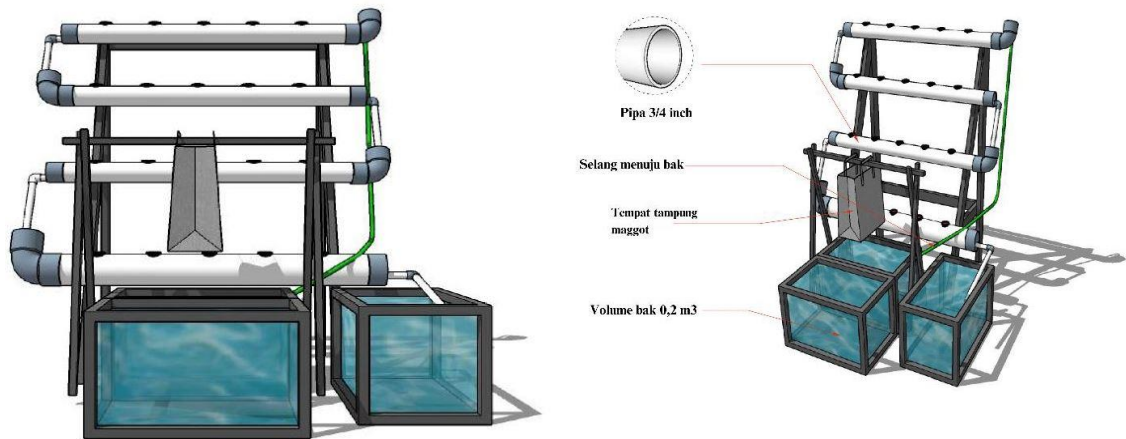


Gambar 3.1 Skema tampak atas dan arah aliran alat integrasi

gambar 3.2. Terdapat 3 set alat yang akan digunakan dalam kegiatan ini, yang

diletakkan didalam rumah kaca sehingga terhindar dari serangga maupun air hujan secara langsung.

Pada gambar 3.1 menjelaskan bahwa dalam sistem akuaponik ini, aliran air dimulai pada kolam nomor 1, kemudian mengalir secara overflow menuju kolam nomor 2, kemudian menuju kearah kolam nomor 3, dan dari kolam nomor tiga dipompakan ke instalasi vertikal akuaponik, kemudian masuk lagi ke kolam nomor 1.



Gambar 3.2 Ilustrasi Design Alat Integrasi Produksi Larva BSF dengan Akuaponik (Putra, 2024)

Penjelasan dari unit-unit:

1. Kolam ikan, disini tempat akuakultur dimana ikan nila akan ditempatkan.
2. Kolam penampung cairan produksi larva BSF yang di gantung. Kolam ini Berfungsi untuk terjadinya proses homogenasi dan pengendapan TSS.
3. Kolam pengendapan lanjutan agar tidak ada endapan pada Instalasi tanaman
4. Instalasi tanaman vertikal dimana akan terjadi remediasi air dengan adanya proses biologis mikroba, akar tanaman selada.

B. Setup Sistem Reaktor Larva BSF

Produksi larva BSF dimulai dari larva yang berumur 3 hari yang didapatkan dari pusat budidaya setempat yang berada di kabupaten Sleman, Provinsi D.I Yogyakarta. Dalam prosesnya Larva BSF di masukkan kedalam reaktor kantong polybag berbahan terpal (kain kanvas ber lapis poliuretan). Reaktor larva BSF diletakkan dengan cara digantungkan diatas kolam guna meningkatkan efisiensi dalam menurunkan kadar air dari sampah organik dan mengurangi adanya serangga seperti semut yang mengganggu dalam produksi maggot BSF. Reaktor yang terbuat dari polybag ini memiliki lubang drain sebagaimana digunakan pada

tanaman yang dapat sebagai keluarnya air juga sebagai ventilasi udara dibagian bawah reaktor. Berikut ini merupakan jenis perlakuan yang dilakukan:

- Reaktor 1: media dedak padi sebagai kontrol (cairan tidak masuk kedalam akuaponik)
- Reaktor 2: sampah restoran
- Reaktor 3: sampah pasar

Setiap kantong gantung reaktor ditambahkan 4 kg sampah setiap 3 hari sekali selama 21 hari. Komposisi sampah restaurant terdiri dari sisa makanan (nasi, mie, telur dan daging ayam) sedangkan sampah pasar terdiri dari sayuran dan buah-buahan (Sinensis, 2024; Nugraha, 2024).

C. Pengujian Nutrisi dalam Akuaponik (mikro dan makro)

1. Nutrisi Makro

Pengamatan sampel dilakukan selama satu minggu sekali selama waktu penelitian berlangsung dengan mengacu pada SNI 6989.11:2019. dan cara pengamatan yaitu mengukur pH yang ada pada air dari alat integrasi akuaponik untuk mengetahui kondisi pH pada air sistem akuaponik dan memastikan kualitas air. Pengambilan sampel air dilakukan pada tiga kolam yang berbeda dari alat integrasi akuaponik. Pengambilan sampel menggunakan ember dan diambil sebanyak 200 mL per sampel. Setelah diambil lalu sampel air dimasukkan ke dalam botol dan diberi label. Pengujian sampel dilakukan berdasarkan masing-masing unsur makronutrien yaitu Nitrat (NO_3), Amonium (NH_4), Fosfor (P) dan Kalium (K) dilakukan di laboratorium dengan mengacu pada SNI 06-6989-52:2005, SNI 6989-31:2021, dan SNI 6989-69:2009 (Albardhawi, 2024).

2. Nutrisi Mikro

Pengambilan sampel air dilakukan pada tiga kolam yang berbeda dari alat integrasi akuaponik. Pengambilan sampel menggunakan ember dan diambil sebanyak 1.000 mL. Setelah diambil lalu dimasukkan ke dalam botol dan diberi label. Metode pengujian menggunakan alat Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-MS) digunakan untuk mendeteksi dari trace metals dalam sampel lingkungan. ICP-MS digunakan untuk menganalisis kadar unsur-unsur logam dari suatu sampel dengan menggunakan metode spektrofotom emisi yang merupakan sebuah metode analisis yang menggunakan pengukuran intensitas emisi pada panjang gelombang yang khas

untuk setiap unsur kimia. ICP-MS menggunakan plasma sebagai sumber atomisasi dan eksitasi dan kemudian pancaran yang dihasilkan unsur dengan mengukur intensitasnya (Respati, 2024).

D. Pengujian Logam Berat (sampah, tanaman, air dan larva)

Metode yang digunakan untuk menganalisis data logam berat mengacu pada SNI 8910:2021 mengenai cara uji kadar logam berat dalam contoh uji limbah padat, sedimen dan tanah dengan metode destruksi asam menggunakan Spektrometer Serapan Atom (SSA) yang dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Persamaan yang digunakan untuk menentukan kandungan logam berat Pb, Cd, Fe dan Cr pada larva BSF, Sampah Pasar dan Restoran, Tanaman, serta Air (Yudanto, 2024).

1. Logam Berat Pada Bekas Kotoran Belatung dan Larva BSF

Sampah organik yang digunakan adalah sampah sayur buah yang diambil di Pasar Pakem dan juga sampah sisa makanan di Rumah Makan Padang. Sampah tersebut akan dimasukkan ke dalam reaktor hidroponik sebanyak 5 kilogram, sementara sampel sampah yang akan diuji di laboratorium dimasukkan ke dalam plastik ziplock sebanyak ± 1 gram.

Pemeliharaan larva BSF dimulai dari fase larva bayi (2-5 hari setelah menetas), dimana larva bayi langsung dimasukkan ke dalam kantong reaktor hidroponik (sampah sayur buah dan limbah restoran serta dedak padi) dengan cara menaburkannya di atas tumpukan sampah. Proporsi larva dan sampah yang digunakan adalah 5 gram untuk setiap 5 kilogram sampah organik basah. Kemudian, dibiarkan selama sekitar 3 minggu, sambil terus dipantau setiap 7 hari. (Syofyan dkk., 2022). Sampel larva BSF dipanen pada hari ke-10 dan hari ke-21 sebanyak ± 1 gram dari setiap kantong reaktor untuk diuji laboratorium untuk mengetahui kandungan logam beratnya. Sampel larva BSF dicuci dengan aquades dan ditimbang mengukur berat kering, serta digiling dalam mortar batu akik untuk analisis logam berat. Sampel yang sudah berada di tahap prapupa dibunuh dengan cara dibekukan ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Diener dkk., 2015).

Sampel disimpan dalam kantong plastik zip lock ganda untuk mencegah dari kerusakan yang mungkin disebabkan oleh gangguan eksternal. Setiap sampel diberi label yang mencakup informasi tentang tanggal dan lokasi pengambilan untuk menghindari tertukarnya sampel satu dengan sampel

lainnya. Sebelum dibawa ke laboratorium, sampel dikeringkan dengan meletakkannya di nampan dan dibiarkan terbuka selama dua hari untuk dianginkan.

2. Logam Berat Pada Tanaman

Penelitian dilakukan selama 2 (dua) bulan untuk waktu semai sampai panen. Semai menggunakan bibit dari selada (*Lactuca sativa L*), tanaman selada diamati setiap 1 hari 2 kali selama masa pertumbuhan. Penelitian ini menggunakan 25 gr bibit tanaman selada yang dibagi menjadi 3 reaktor. Destruksi adalah suatu perlakuan mengubah sampel menjadi bentuk materi yang dapat diukur sehingga kandungan unsur-unsur didalamnya dapat dianalisis. Destruksi juga dapat dikatakan perombakan, hal ini dikarenakan mengubah bentuk organik logam menjadi bentuk logam-logam anorganik. Destruksi terdapat dua (2) macam yaitu Destruksi basah dan kering. Pada pengujian sampel ini menggunakan destruksi basah dan kering.

3. Logam Berat Pada Air

Pengambilan sampel air dilakukan pada tiga kolam yang berbeda dari alat integrasi akuaponik. Pengambilan sampel menggunakan ember dan diambil sebanyak 1.000 mL. Setelah diambil lalu dimasukkan ke dalam botol dan diberi label. Lakukan pengambilan air sampel sebanyak 1 liter dari ketiga reaktor dengan jirigen yang berbeda-beda. Setelah itu lakukan pengawetan dengan HNO₃ pekat sebanyak 5 mL di setiap dirigen. Lalu tempatkan sampel yang telah diawetkan ke lemari pendingin.

3.3 Perhitungan Design Akuaponik

Perhitungan spesifikasi alat akuaponik menggunakan rumus-rumus sebagai berikut.

1. Volume air

$$Volume\ Air\ Total = Volume\ Kolam + Volume\ Pipa$$

Dimana:

Volume Kolam : panjang x lebar x tinggi

Volume pipa : $\frac{1}{2} \pi r^2 \times t$

2. Debit Pompa efektif pompa (70%)

$$Q_{efektif\ pompa} = Q_{pompa} \times 70\%$$

Dimana:

Q efektif pompa : kinerja pompa dalam kondisi 70% akibat adanya elevasi dan

hambatan

Q pompa : debit spesifikasi yang ada pada jenis pompa

3.4 Survival Rate (SR)

$$SR = \frac{Nt}{N0} \times 100\%$$

Dimana:

SR : Survival Rate (%)

Nt : jumlah ikan pada hari (t)

N0 : jumlah ikan pada hari (0)

(Rostika dkk., 2018)

3.5 Waste Reduction Indeks (WRI)

$$WRI = \left(\frac{W - R}{W} \div waktu\ penelitian\ (hari) \right) \times 100$$

Dimana:

WRI : Waste Reduction Index

W : Total Media yang digunakan (g)

R : Total Residu akhir (g)

3.6 Simulasi Pencahayaan *Green House*

Langkah-langkah simulasi pencahayaan alami menggunakan VELUX Daylight

Visualizer adalah sebagai berikut (Jasni dkk., 2021):

1. Pembuatan Model Ruang

Model bangunan atau ruang 3D yang akan dianalisis dibuat menggunakan SketchUp. Model tersebut mencakup detail ruang seperti ukuran, orientasi bangunan, material dinding, jendela, dan elemen pembentuk lainnya yang mempengaruhi distribusi cahaya.

2. Impor Model ke VELUX Daylight Visualizer

Model yang telah selesai dibuat diimpor ke VELUX Daylight Visualizer dalam format yang kompatibel. Pastikan semua elemen penting seperti jendela dan skylight terintegrasi dalam model.

3. Penentuan Parameter Simulasi

- Kondisi cuaca: Menggunakan data cuaca lokal atau preset yang disediakan oleh VELUX.
- Orientasi bangunan: Penentuan arah bangunan terhadap matahari.
- Waktu simulasi: Menentukan waktu spesifik (pukul 08.00, 12.00, dan 16.00)
- Tipe material: Tipe material yang digunakan pada jendela serta material dinding yang mempengaruhi pencahayaan.

4. Penentuan Titik Observasi

Titik-titik observasi di dalam ruang dipilih secara strategis untuk mengukur distribusi cahaya alami. Titik ini mencakup area kerja, area sirkulasi, dan zona yang dianggap penting dalam desain pencahayaan.

5. Simulasi Pencahayaan

Simulasi dilakukan dengan menjalankan VELUX Daylight Visualizer berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Proses ini menghasilkan visualisasi distribusi pencahayaan alami di seluruh ruang serta nilai numerik daylight factor pada tiap titik observasi.

6. Pengumpulan dan Analisis Data

Data hasil simulasi berupa visualisasi pencahayaan (gambar) dan daylight factor dikumpulkan dan dianalisis. Hasil tersebut digunakan untuk mengevaluasi apakah pencahayaan alami di dalam ruang sudah memenuhi standar yang diinginkan.

3.7 Model Siklus Nitrogen

Pemodelan nutrisi nitrogen dilakukan berdasarkan beberapa tahapan yang melibatkan transformasi nitrogen dalam sistem akuaponik, meliputi produksi Total Ammonia Nitrogen (TAN), nitrifikasi, dan serapan nitrogen oleh tanaman. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Produksi TAN Produksi Total Ammonia Nitrogen (TAN) dihitung menggunakan rumus yang disajikan oleh Ebeling (2006) dan Timmons (2002) dalam Wongkiew (2017):

$$P_{TAN} = F \times PC \times 0.092$$

Dimana

P_{TAN} : laju produksi TAN (kg/hari),

F : laju pemberian pakan (kg/hari),

PC : kandungan protein dalam pakan (dalam fraksi),

0.092 : fraksi nitrogen amonia yang diekskresikan dari protein input.

2. Proses Nitrifikasi adalah proses transformasi nitrogen dari amonium (NH_4) menjadi nitrit (NO_2) dan kemudian nitrat (NO_3^-) oleh bakteri nitrifikasi. Dalam penelitian ini, laju penghilangan Total Ammonia Nitrogen (TAN) dan nitrit dihitung menggunakan surface specific removal rate (SSR).

- a. Perhitungan Laju Penghilangan TAN Laju penghilangan Total Ammonia Nitrogen (TAN) dihitung berdasarkan persamaan yang digunakan dalam penelitian Pedersen (2016):

$$SRT(TAN) = \frac{STR_{TAN} \times V_w \times 60 \times 24}{A_m \times 1000}$$

Di mana:

STR_{TAN} : surface specific removal rate untuk TAN (g TAN m^2/day),

S_{TAN} : laju degradasi TAN (mg N/L/min),

V_w : volume air dalam reaktor (m^3),

A_m : luas permukaan dalam reaktor (m^2).

Nilai A_m dihitung berdasarkan rumus

$$A_m = SSA \times V_m$$

Di mana SSA adalah *surface specific area* dari permukaan (m^2/m^3), dan V_m adalah volume reaktor (m^3).

- b. Perhitungan Laju Penghilangan Nitrit Laju penghilangan nitrit dihitung menggunakan persamaan serupa untuk surface specific removal rate (SNR):

$$SNR = \frac{SNO_2 \times V_w \times 60 \times 24}{A_m \times 1000}$$

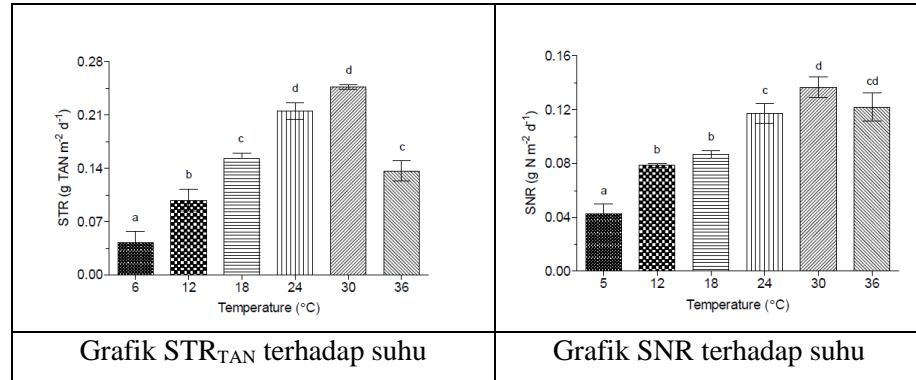
Di mana:

SNR : surface specific removal rate untuk nitrit ($g\ N\ m^2/day$),

SNO_2 : laju degradasi nitrit ($mg\ N/L/min$),

Parameter V_w dan A_m sama dengan yang digunakan untuk TAN.

- c. Pengaruh Suhu pada Nitrifikasi Berdasarkan hasil penelitian oleh Pedersen (2016), laju penghilangan TAN dan nitrit meningkat secara signifikan dengan kenaikan suhu hingga $30^\circ C$, di mana STR_{TAN} mencapai $0.25\ g\ TAN/m^2/day$ dan SNR mencapai $0.14\ g\ N/m^2/day$. Namun, pada suhu $36^\circ C$, laju penghilangan mengalami penurunan karena efek denaturasi enzim bakteri nitrifikasi.



Gambar 3.3 Grafik Specific Surface Removal Rate Berdasarkan Suhu

3. Serapan Nitrogen oleh Tanaman Serapan nitrogen oleh tanaman dalam Wongkiew (2017) dihitung berdasarkan model serapan nitrogen oleh tanaman kubis putih (*Brassica oleracea var. capitata*) yang dinyatakan dalam bentuk:

$$N(t) = aW(t)n(t)$$

Dimana

$N(t)$: jumlah nitrogen yang diserap ($g\ N/m^2$),

$W(t)$: berat basah tanaman per unit area (kg/m^2),

$n(t)$: kandungan nitrogen dalam bahan basah (g nitrogen/kg bahan basah),
dan

$$n(t) = ge^{-kW(t)} + h$$

Dimana a (5.04), g (2.77), k (0.11), h (1.77) adalah konstanta regresi yang memodelkan bagaimana kandungan nitrogen per unit berat basah berubah seiring pertumbuhan tanaman. Rumus untuk $W(t)$, yang mewakili berat basah tanaman per satuan luas (kg/m^2), dinyatakan dengan fungsi Richard sebagai berikut:

$$W(t) = 14.3(1 + e^{a-b \times (\text{hari})})^{-1/c}$$

Dimana konstanta a (5.04), b (0.074), c (0.893) adalah konstanta regresi yang memodelkan bagaimana unit berat basah tanaman berubah seiring pertumbuhan tanaman.

4. Perhitungan Laju Serapan Nitrogen Laju serapan nitrogen harian dihitung dengan rumus:

$$\text{Laju serapan nitrogen pada hari ke } (t) = \frac{N_t - N_{t-1}}{t - (t-1)} \times A$$

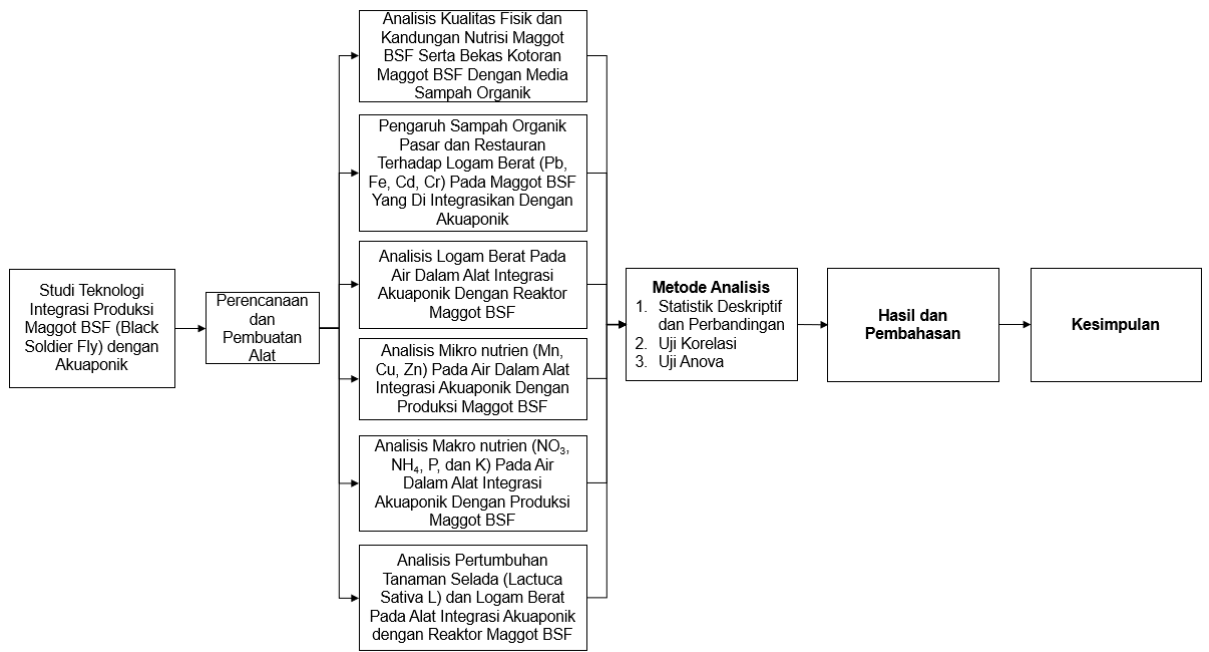
Dimana

A : luas area tanaman.

Penyesuaian keseimbangan Nitrat dalam pemodelan ini, dilakukan perbandingan antara laju produksi nitrat oleh ikan dan laju serapan nitrat oleh tanaman. Berdasarkan hasil analisis, jika terdapat ketidakseimbangan, penelitian kedepannya perlu melakukan penyesuaian dengan menambah atau mengurangi kepadatan ikan atau jumlah tanaman untuk menjaga keseimbangan nitrogen dalam sistem.

3.8 Analisis Data

Menggunakan analisis statistik deskriptif untuk mengetahui gambaran umum data dan dibandingkan dengan penelitian serupa lainnya. Analisis Korelasi untuk mengetahui hubungan antara variabel kuantitatif dan uji One-way ANOVA untuk membandingkan kelompok data apakah ada perbedaan signifikan antara kelompok parameter.



Gambar 3.4 Alur Penelitian

BAB IV

Hasil dan Pembahasan

4.1 Perencanaan Alat

Sistem akuaponik pada kebun benar benih direncanakan dengan mempertimbangkan sistem penanaman, jenis tanaman, dan jenis ikan tertentu yang digunakan. Mengacu pada penelitian Yep dan Zheng (2019) bahwa salah satu sistem tanam paling sering digunakan untuk metode penanaman tanpa tanah dengan budidaya ikan sejak 1978-2018 adalah Nutrient Film Technique (NFT), ikan yang digunakan adalah ikan air tawar, serta sayuran yang biasa dibudidayakan adalah tanaman berdaun gelap. Metode Nutrient Film Technique (NFT) menjadi pilihan terbaik dalam praktik sistem akuaponik.

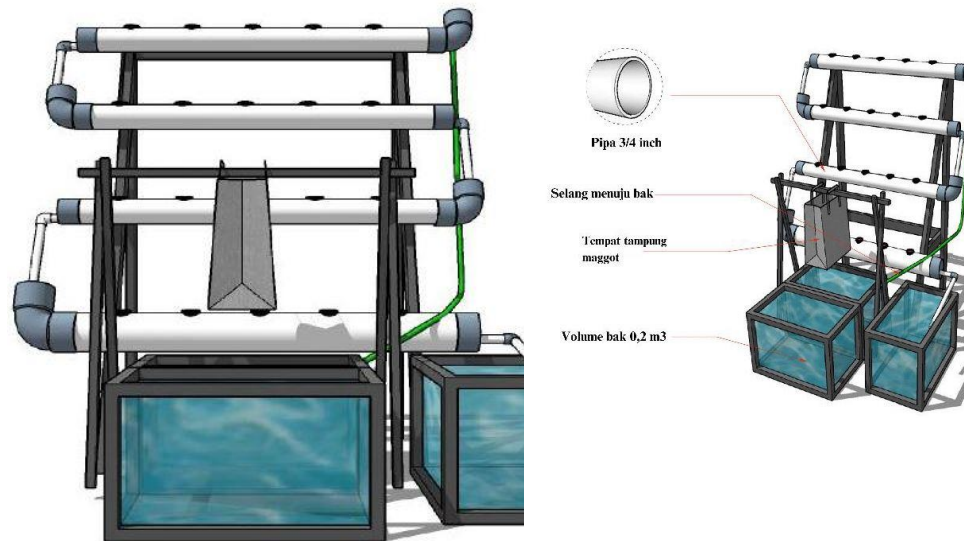
Penelitian ini melakukan perencanaan dan pembuatan alat yang menggabungkan produksi larva BSF dengan sistem Akuaponik. Terdapat beberapa perencanaan yang dilakukan untuk menunjang keberhasilan penelitian, diantaranya adalah pembuatan Instalasi Integrasi Akuaponik, pembuatan Rumah Kaca, Perhitungan Removal Nitrogen, serta model siklus nitrogen pada sistem akuaponik.

A. Instalasi Akuaponik

Sistem akuaponik pada Kebun Benar Benih (KBB) menggunakan sistem NFT dengan *Recirculating Aquaculture System* (RAS), membudidayakan ikan *Oreochromis sp.*, dengan tanaman *Lactuca sativa L.* Sistem penanaman yang paling baik untuk akuaponik adalah NFT berdasarkan penelitian oleh Maucieri (2018) bahwa sistem NFT sangat mudah dioperasikan dan *low maintenance*. Walaupun dalam penelitian tersebut juga dijelaskan bahwa NFT kurang efisien terhadap tingkat produksi dan penyerapan nutrisi. Tetapi berdasarkan yang dijelaskan dalam Wongkiew (2017), bahwa sistem akuaponik sangat bergantung pada ketersediaan mikroba yang ada dalam sistem dalam proses transformasi nutrisi yang ada, sehingga pada saat sistem sudah memiliki tingkat kepadatan mikroba yang tinggi antara metode NFT dan sistem lainnya tidak memiliki perbedaan hasil panen yang signifikan.

Secara umum sistem akuaponik NFT pada penelitian ini terdiri dari 3 kolam dan 1 instalasi hidroponik dengan 4 tingkat yang berbeda sesuai pada gambar 4.1, yang dimana dalam sistem ini bertujuan untuk memaksimalkan lahan dengan menanam dengan NFT vertikal sesuai salah satu design yang telah digunakan pada (Wibowo, 2021). Alat dibuat dengan pipa PVC berukuran 3 inch untuk

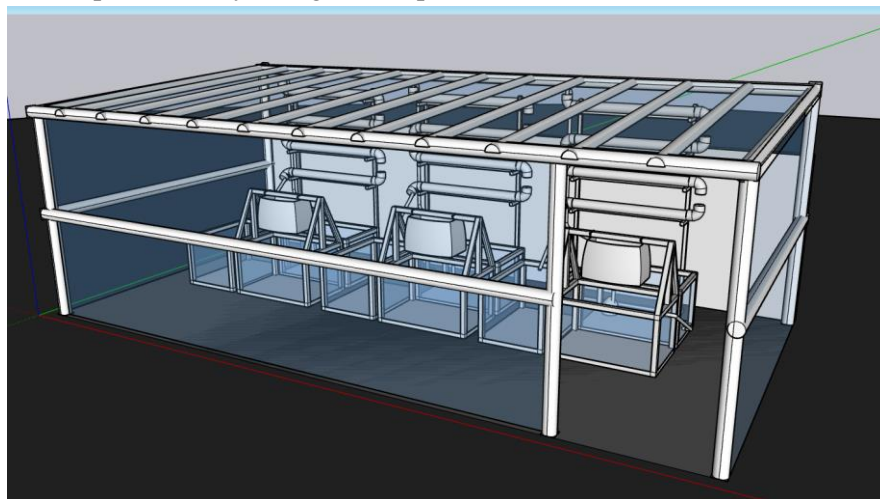
memastikan cukup banyak ruang akar dan *surface area* untuk pertumbuhan akar dan mikroba (Wongkiew dkk., 2017).



Gambar 4.1 Instalasi alat integrasi produksi larva BSF dengan akuaponik

B. Perencanaan Rumah Kaca

Pada KBB didirikan rumah kaca (*greenhouse*) untuk memastikan penelitian dilakukan dalam sistem terkontrol tanpa adanya gangguan serangga maupun hujan. Rumah kaca ini didirikan dengan struktur bambu, dengan dinding paranet 75% dengan atap transparan berbahan plastik uv yang memungkinkan masuknya cahaya matahari. Penggunaan velux daylight model untuk memastikan bahwa rumah kaca mendapatkan cahaya dengan cukup.



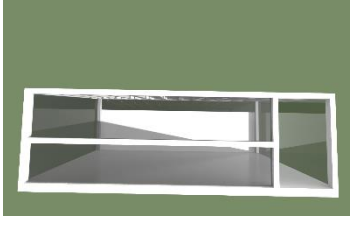
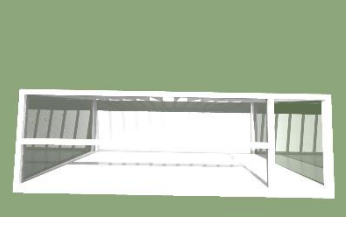
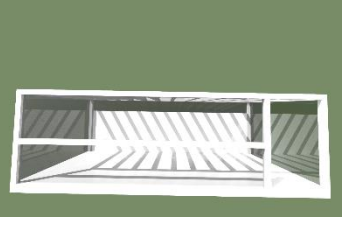
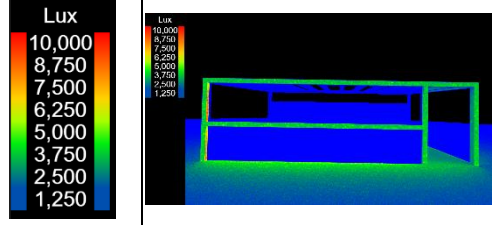
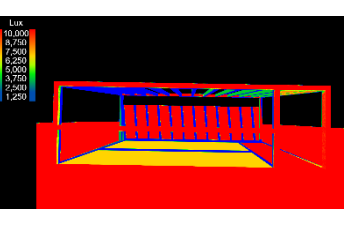
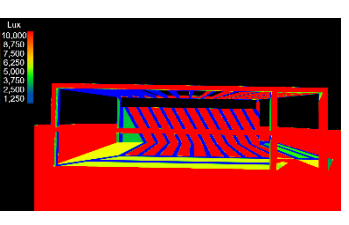
Gambar 4.2 Design model 3D rumah kaca pada kebun benar benih (KBB)

Location						
Custom (latitude: -7.180, longitude: -110.364)						
Element	Surface	(R, G, B)	Roughness	Specularity	Reflectance	
WALL	80% reflectance	(0.800, 0.800, 0.800)	0.030	0.000	0.800	
FACADE_WINDOW_GLASS	80% transmittance	(0.800, 0.800, 0.800)	Transmittance: 0.800			
w_zone_techinc	80% reflectance	(0.945, 0.651, 0.651)	0.030	0.330	0.729	
FLOOR	80% reflectance	(0.400, 0.400, 0.400)	0.030	0.330	0.400	
VRW_GLASS	80% reflectance	(0.710, 0.710, 0.710)	Transmittance: 0.710			
FACADE_WINDOW_FRAME	80% reflectance	(0.800, 0.800, 0.800)	0.030	0.330	0.800	
OBSTRUCTION	80% reflectance	(0.200, 0.200, 0.200)	0.030	0.330	0.200	

Gambar 4.3 Konfigurasi lokasi dan material yang digunakan dalam model velux

Material atap dengan nama element FACADE_WINDOW_GLASS merupakan plastik UV dengan nilai transmittance: 0.8, yang artinya 80% cahaya matahari dapat menembus kedalam material, sedangkan material sekeliling rumah kaca dengan nama element VRW_GLASS dengan material paranet sehingga memiliki nilai transmittance 0,710 atau 71% cahaya dapat masuk kedalam rumah kaca. Sisanya material rangka terbuat dari bambu dan dinding dibelakang instalasi dengan nama emelen WALL, yang diasumsikan merefleksikan cahaya 80% tetapi tidak memiliki nilai transmittance sehingga tidak transparan.

Tabel 4.1 Model bayangan cahaya matahari dan intensitas cahaya dalam rumah kaca

Waktu	08.00 WIB	12.00 WIB	16.00 WIB
Bayangan			
Lux			

Berdasarkan hasil tabel 4.1 bahwa pencahayaan dalam rumah kaca didapatkan nilai yang maksimal dan dianggap tidak mempengaruhi tingkat pertumbuhan tanaman. Dalam Jasni (2021) dikatakan bahwa tanaman *Lactuca sativa L* termasuk jenis tanaman yang membutuhkan nilai intensitas cahaya diantara 1000-3000 lux dengan lama paparan 3-4 jam per hari. Hasil model intensitas cahaya pada rumah kaca menunjukkan nilai intensitas cahaya >10000 lux pada siang hari dan sore hari, sedangkan pada pagi hari berkisar antara 1250 – 5000 lux. Sehingga dalam model ini diketahui bahwa pada rumah kaca memiliki intensitas cahaya yang cukup untuk tumbuh kembang tanaman *Lactuca sativa L* atau Selada. Pada Penelitian Miao (2023) dijelaskan juga bahwa intensitas cahaya sangat penting untuk optimasi hasil pertumbuhan tanaman dalam rumah kaca.

Desain *greenhouse* ini mengikuti Campen (2004), dimana design *greenhouse* tanpa menggunakan ventilasi dibagian atas bangunan. Material yang digunakan sejenis dengan insect-net dengan pori lebih besar yaitu paranet yang memiliki tingkat ventilasi udara *windward* dan (*leeward*) 130 (133) *air change per hour*, selisih antara angin yang masuk dengan angin yang keluar tidak tinggi menandakan sirkulasi udara dapat terjadi dengan baik. Pada sirkulasi udara tersebut dapat menjaga suhu dalam ruangan antara 31-32 °C pada *air flow* 3 m/s dan 35-36°C pada *air flow* 0.5 m/s pada suhu udara luar ruangan berada pada rata-rata 30°C. Dalam kasus rumah kaca yang ada pada KBB suhu rata-rata udara berada di 25°C, sehingga suhu dalam ruangan berkisar antara 26-30°C sesuai tingkat *air flow* yang ada di luar *greenhouse*.

C. Nitrifikasi dalam Akuaponik

Salah satu karakteristik limbah akuakultur pada sistem akuaponik adalah terbentuknya kandungan amonia yang berasal dari sisa metabolisme ikan. Nitrifikasi merupakan proses utama untuk mengubah Total Amonia Nitrogen (TAN) dalam bentuk NH_4^+ dan NH_3 menjadi NO_3^- dalam kondisi aerobik. Secara alami TAN teroksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) oleh keberadaan *Ammonia Oxidizing Bacteria* (AOB) lalu NO_2^- teroksidasi menjadi NO_3^- oleh *Nitrite Oxidizing Bacteria* (NOB). Dalam sistem akuaponik perubahan TAN menjadi NO_3^- menjadi sangat penting agar tidak beracun bagi ikan bahkan dalam konsentrasi yang tinggi hingga 150-300 mg N/l (Graber dan Junge, 2009).

Perhitungan volume air, debit, dan *Surface Specific Total Ammonia Nitrogen Removal Rate* (STR) merupakan elemen krusial dalam desain dan pengelolaan

sistem akuaponik. Volume air yang tepat diperlukan untuk memastikan keseimbangan antara kebutuhan ikan dan tanaman, serta mempertahankan kualitas air yang optimal. Debit air, atau laju aliran air melalui sistem, menentukan seberapa baik nutrisi dan oksigen didistribusikan di seluruh komponen sistem, seperti kolam ikan dan rangkaian hidroponik. Sementara itu, STR berfungsi untuk menentukan kapasitas sistem dalam menangani beban TAN dan mengoptimalkan pengolahan pengelolaan limbah. Memahami dan menghitung ketiga faktor ini dengan tepat adalah langkah penting untuk meningkatkan produktivitas, kesehatan ikan dan tanaman, serta keberlanjutan keseluruhan sistem akuaponik.

- Volume Air Total : V total kolam + V total pipa
 : $(0,2 \text{ m}^3 \times 3) + 0,00912 \text{ m}^3$
 : $0,60912 \text{ m}^3 \rightarrow 609,12 \text{ liter}$

- Debit Aliran Pompa (Kandila PSP-2400-Z)
 - Debit *max* (Q) : 2800 liter/ Jam $\rightarrow 2,8 \text{ m}^3/\text{jam}$
 - Total Head (H) : 2,8 meter
 - Tinggi alat (H) : 1,8 meter
 - Waktu Operasional : 24 jam/hari

- Perhitungan Debit Aliran Sistem Akuaponik
 - H Aktual : Total Head pompa (H) – Tinggi Alat (H)
 : $2,8 \text{ m} - 1,8 \text{ m}$
 : 1 m

Sehingga menggunakan asumsi kinerja Efektif Pompa 70%

 - Debit Efektif (Qef) : Debit max (Q) x 70%
 : $2,8 \text{ m}^3/\text{jam} \times 0,70$
 : $1,96 \text{ m}^3/\text{jam}$
 - Total Debit per hari : Debit Efektif (Qef) x Waktu Operasional
 : $1,96 \text{ m}^3/\text{jam} \times 24 \text{ jam}$
 : $47,04 \text{ m}^3/\text{hari} \rightarrow 47,040 \text{ L/hari}$

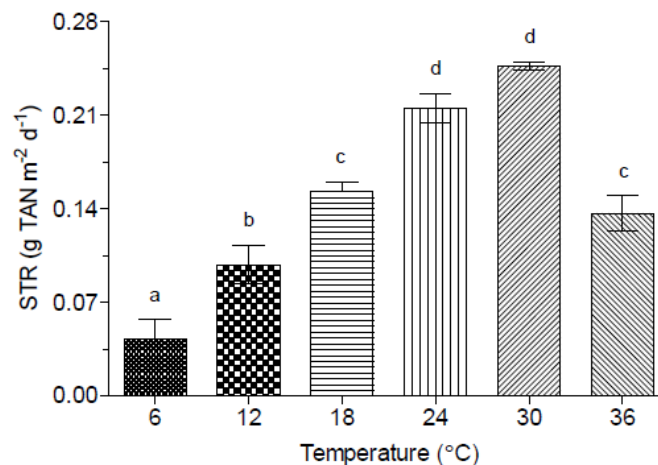
- Spesifikasi Alat Integrasi Produksi Larva Dengan Akuaponik
 - Dimensi Kolam (terisi penuh) : $(p \times l \times t)$
 : $(0,8 \times 0,5 \times 0,5) \text{ m}$
 - Luas Permukaan Kolam : $1,7 \text{ m}^2$ per box
 - Luas Permukaan Total : $3 \times 1,7 \text{ m}^2$
 : $5,1 \text{ m}^2$

 - Luas Permukaan Pipa 3 inch : $\frac{1}{2} \times \text{keliling pipa} \times \text{panjang}$
 ($\frac{1}{2}$ penuh) : $\frac{1}{2} \times 0,239 \times 1$
 : $0,1195 \text{ m}^2$

Luas Permukaan 4 pipa : $4 \times 0,1195 \text{ m}^2$
: $0,478 \text{ m}^2$

Total Luas Permukaan Alat Instalasi Akuaponik adalah $5,1 \text{ m}^2 + 0,478 \text{ m}^2$ adalah $5,57 \text{ m}^2$.

Tingkat removal TAN pada (Brazil, 2006) yang menggunakan *first-order* TAN removal pada suhu air 28°C dalam sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS) pada $0,27 - 0,59 \text{ g TAN/m}^2/\text{hari}$ pada unit RBC luas permukaan $13,380 \text{ m}^2$ dengan volume air 215 m^3 . Sedangkan pada (Losordo dan Hobbs, 2000) tingkat TAN removal yang baik pada akuakultur adalah $0,15 - 1 \text{ g TAN/m}^2/\text{hari}$. Spesifikasi Alat Instalasi Akuaponik memiliki luas permukaan total $5,57 \text{ m}^2$ dengan konsentrasi TAN yang dihasilkan dari metabolisme ikan, dengan perhitungan konsentrasi adalah $0,302 \text{ mg/l}$, debit aliran $47,04 \text{ l/hari}$. Berdasarkan penelitian Kinyage dan Pedersen (2016) nilai *Surface Specific TAN removal rate* (STR) dalam suhu tertentu dapat mengacu pada grafik berikut:



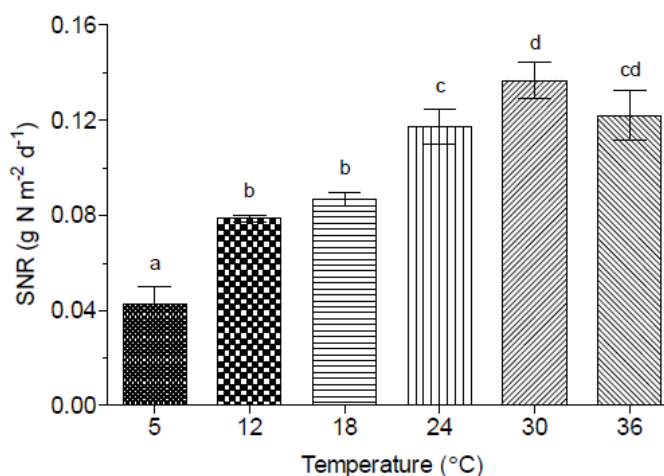
Gambar 4.4 Tingkat Surface Specific TAN removal

Suhu rata-rata pada air dalam instalasi integrasi akuaponik adalah 25°C suhu pada siang hari adalah 31°C sedangkan pada malam hari paling rendah adalah 19°C dengan interpolasi berdasarkan grafik, didapatkan *Surface Specific TAN removal ratenya* (STR) adalah $0,216 \text{ g TAN/m}^2/\text{hari}$, sehingga kapasitas beban yang dapat diterima oleh instalasi adalah sebagai berikut:

- Perhitungan kapasitas tingkat removal TAN menjadi NO_2^- dalam instalasi akuaponik

TAN removal pada Instalasi : luas permukaan instalasi x (STR)
: $5,57 \text{ m}^2 \times 0,216 \text{ g TAN/m}^2/\text{hari}$
: $1,20 \text{ g TAN/hari}$

Sedangkan *Surface Specific Nitrite Removal Rate* (SNR) mengacu pada grafik dibawah ini, dengan suhu air rata-rata adalah 25°C sehingga SNR nya adalah 0,115



Gambar 4.5 Grafik tingkat *surface specific nitrite removal rate* berdasarkan suhu

g N/m²/hari.

- Perhitungan kapasitas tingkat removal NO₂⁻ menjadi NO₃⁻ dalam instalasi akuaponik

NO₂⁻ removal pada Instalasi : luas permukaan instalasi x (SNR)
 : 5,57 m² x 0,115 g Nitrite /m²/hari
 : 0,64 g Nitrite /hari

Sehingga nilai STR dalam sistem design akuaponik adalah sebesar 0,216 g TAN/m²/hari atau jika pada satu instalasi dengan luasan 5,57 m² adalah 1,2 g TAN/hari, sedangkan SNR dalam instalasi sebesar 0,64 g Nitrite/hari. Nilai ini merepresentasikan tingkat oksidasi TAN pada sistem RAS akuaponik yang berubah dari NH₄ menjadi NO₂⁻ lalu menjadi NO₃⁻, dimana dalam sistem ini dapat menampung beban *Total Ammonia Nitrogen* (TAN) dari metabolisme ikan hingga 1,46 g TAN/hari atau 1460 mg TAN/hari. Berdasarkan penelitian (Lekang, 2013) bahwa dalam spesifikasi teknis untuk tingkat removal TAN pada sistem akuaponik adalah 0,8 – 1 mg TAN/m²/hari pada suhu 20-25 °C untuk memberikan tingkat nitrifikasi yang dibutuhkan untuk keberlangsungan tanaman, ikan, serta mikroba yang ada dalam sistem.

D. Nitrogen dalam Akuaponik

Produksi sayuran dengan sistem akuaponik terdiri dari kolam ikan, masing-masing terdapat 3 perlakuan yang didalamnya berisikan ikan nila (*Oreochromis*

sp) dengan berat badan ± 1 kg (3 ekor) untuk setiap unit reaktornya, hal ini tersebut mengacu pada penelitian Pantanella (2012) didapatkan bahwa rasio berat ikan dengan tanaman yang di perlukan adalah 1 kg berat ikan dapat menghidupi 20 tanaman selada. Sehingga pada penelitian ini kan diberikan pakan pelet dengan kadar protein 20% dengan jumlah (1%) dari berat badannya yaitu 10 gram per hari.

Nutrisi pada akuaponik dititik beratkan pada tingkat *nitrogen cycle* yang ada. Dalam penelitian (Wongkiew dkk., 2017) untuk menentukan keseimbangan nutrisi terutama *nitrogen cycle* pada sistem akuaponik terdapat model transformasi protein dalam pakan ikan yang diubah oleh metabolisme ikan untuk menjadi kadar nitrogen Total Amonia Nitrogen (TAN) dalam bentuk NH_4^+ dan NH_3 yang kemudian dalam suasana aerobik berubah menjadi NO_2^- kemudian menjadi NO_3^- yang dibutuhkan untuk tanaman dan tidak beracun bagi ikan dalam sistem akuaponik. Berikut ini merupakan bentuk model *nitrogen cycle* pada sistem akuaponik berdasarkan (Wongkiew dkk., 2017):

- Produksi Total Amonia Nitrogen (TAN) dalam Metabolisme Ikan

Production Rate (P) of Total Ammonia Nitrogen (TAN)

$$P(\text{TAN}) : F \times \text{PC} \times 0,092$$

keterangan

F : pemberian pakan ikan (kg/hari)

PC : *protein content* (%)

TAN : $F \times \text{PC} \times 0,092$

: $0,01 \text{ kg/hari} \times 20\% \times 0,092$

: $0,000184 \text{ kg N/hari} \rightarrow 0,184 \text{ g TAN/hari}$

Berdasarkan hasil perhitungan pada model ini terdapat nilai TAN sebesar 184 g TAN/hari, atau yang dihasilkan oleh metabolisme ikan dalam sistem akuaponik. Nilai ini perlu dibandingkan dengan tingkat penyerapan nitrogen (*uptake*) tanaman dalam bentuk NO_3^- untuk mengetahui keseimbangan sistem akuaponik yang dibutuhkan. Menghitung kebutuhan nitrogen pada tanaman dapat mengacu pada (Fink dan Feller, 1998) yang telah di perbarui dalam (Wongkiew dkk., 2017) dengan pendekatan nitrogen *uptake* tanaman yang disesuaikan untuk tanaman selada, ditanam dalam waktu 30 hari.

- Nitrogen *uptake* pada selada, total nitrogen per luas

$N(t)$: $a W(t) n(t)$

$n(t)$: $g e^{-kW(t)+h}$

$W(t)$: $M_{(\text{standard})} (1+e^{5,04-0,074(\text{hari})})^{-1/0,893}$

A : (lebar pipa) x (panjang pipa) x (jumlah pipa)

keterangan

N(t) : nitrogen pada berat basah pada satuan luas (g N/m²)
n(t) : kadar nitrogen berat basah tanaman (g N/ kg berat basah)
W(t) : Pertumbuhan tanaman (kg/m²)
M(standard) : data rata-rata berat basah saat panen (kg/m²)
t : hari
a,g,k,h : konstanta regresi (5,04; 2,77; 0,11 dan 1,77)
A : Luasan hidropnik (m²)

Dalam model ini, data berat basah tanaman W(30):(kg/m²) menggunakan data hasil panen *Lactuca Sativa L* pada tanah dengan pupuk organik limbah ikan pada Sastro (2015) adalah sebesar 4.16 kg/m² dengan berat rata-rata per tanaman 27,7 g, sehingga dalam satu meter persegi terdapat 150 tanaman selada. Sehingga berikut ini merupakan perhitungan tingkat penyerapan nitrogen oleh tanaman.

A : (Diameter pipa) x ((panjang pipa) * (4 buah))

A : (±0,08 m)x((1 m)x(4 buah))
: 0,32 m²

W(hari-30) : 4,16 kg/m² (1+e^{5,04-0,074(30 hari)})^{-1/0,893}
: 0,165 kg/m²

W(hari-29) : 4,16 kg/m² (1+e^{5,04-0,074(29 hari)})^{-1/0,893}
: 0,153 kg/m²

n (hari-30) : 2,77 e^{-0,11*0,165kg/m²+1,77}
: 4,900 g N/ kg berat basah

n (hari-29) : 2,77 e^{-0,11*0,153kg/m²+1,77}
: 4,937 g N/kg berat basah

N (hari-30) : 5,04 x 0,153 kg/m² x 4,489 g N/kg berat basah
: 3,75 g N/m²

N (hari-29) : 5,04 x 0,153 kg/m² x 4,493 g N/kg berat basah
: 3,47 g N/m²

• Nitrogen uptake rate NO₃⁻ (g N/hari) pada hari ke 30

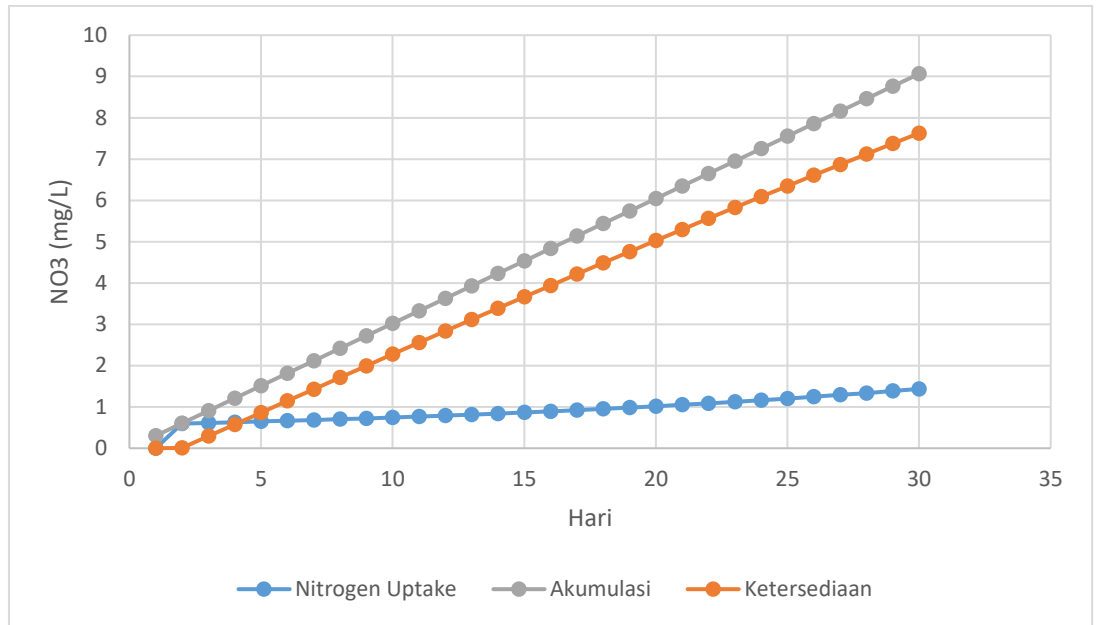
Nitrogen uptake rate : (N_t - N_{t-1}) / ((t-(t-1)) x A)
: (N₃₀ - N₂₉) / (30-29) x (0,32 m²)
: (3,75 g N/m² - 3,47 g N/m²) / (30-1) x (0,32 m²)
: (0,280 g N/m²) / (29) x (0,32 m²)
: 0,874 g N/hari

Tabel 4.2 Perhitungan Penyerapan NO₃ pada Tanaman Selada

t (hari)	N(t) g N/m ²	n(t) g N/kg	W(t) kg/m ²	Plant Uptake NO ₃ g N/hari
1	0,36276	4,53517	0,01587	0,000
2	0,39383	4,53475	0,01723	0,365

t (hari)	N(t) g N/m ²	n(t) g N/kg	W(t) kg/m ²	Plant Uptake NO ₃ g N/hari
3	0,42754	4,53431	0,01871	0,375
4	0,46410	4,53382	0,02031	0,385
5	0,50377	4,53329	0,02205	0,395
6	0,54679	4,53272	0,02393	0,406
7	0,59343	4,53210	0,02598	0,417
8	0,64401	4,53142	0,02820	0,429
9	0,69885	4,53069	0,03060	0,441
10	0,75828	4,52990	0,03321	0,454
11	0,82269	4,52904	0,03604	0,468
12	0,89248	4,52811	0,03911	0,482
13	0,96808	4,52710	0,04243	0,496
14	1,04996	4,52601	0,04603	0,512
15	1,13862	4,52483	0,04993	0,528
16	1,23460	4,52355	0,05415	0,544
17	1,33847	4,52216	0,05873	0,562
18	1,45085	4,52067	0,06368	0,580
19	1,57240	4,51904	0,06904	0,599
20	1,70381	4,51729	0,07484	0,619
21	1,84585	4,51540	0,08111	0,640
22	1,99931	4,51335	0,08789	0,662
23	2,16503	4,51114	0,09522	0,684
24	2,34393	4,50875	0,10315	0,708
25	2,53694	4,50617	0,11170	0,733
26	2,74509	4,50339	0,12094	0,759
27	2,96943	4,50040	0,13092	0,786
28	3,21108	4,49717	0,14167	0,814
29	3,47121	4,49369	0,15327	0,844
30	3,75104	4,48995	0,16576	0,874

Sehingga pada alat akuaponik integrasi dengan luas area tanam 1,6 m² untuk tanaman selada pada awal waktu tanam, produksi TAN dalam sistem adalah 0,184 g N/hari. Berdasarkan tingkat TAN *removal rate* 1,46 g TAN/hari dan tingkat *Nitrite removal rate* 0,77 g N/ hari pada instalasi. Konsentrasi TAN akan berubah menjadi NO₃⁻ dalam 24 jam, sehingga secara design tingkat STR dan SNR mampu menampung 8-kali densitas ikan atau 8 kg, dengan 1% pakan dari berat ikan perhari dengan kandungan protein 20%.



Gambar 4.6 Model Ketersediaan NO₃⁻ Pada Ssistem Akuaponik

Berdasarkan grafik, ketersediaan NO₃⁻ merupakan hasil pengurangan dari produksi TAN yang menjadi NO₃⁻ dengan tingkat penyerapan dari tanaman selada. Terlihat NO₃⁻ terus meningkat konsentrasinya setiap hari, tidak sebanding dengan tingkat penyerapan oleh tanaman selada. Sesuai dengan penelitian sebelumnya menyatakan bahwa, semakin lama sistem akuaponik berjalan maka hasil panen tanaman semakin baik karena tingkat ketersediaan nutrisi yang tinggi dan keberadaan mikroba yang merata (Pantanella, 2010).

Berdasarkan model ini sistem akuaponik tidak mempengaruhi kesehatan ikan maupun pertumbuhan tanaman, karena TAN akan berubah menjadi NO₃⁻ yang secara rasio perbandingan produksi TAN dengan Removal TAN adalah 1:8 sehingga dalam instalasi dapat menampung 8 kali dari beban TAN dari metabolisme ikan. Berdasarkan sisa NO₃⁻ yang tersedia sistem ini dapat di tambah luasan tanaman sehingga dapat menampung lebih banyak tanaman hingga 6 kali dari rencana desain.

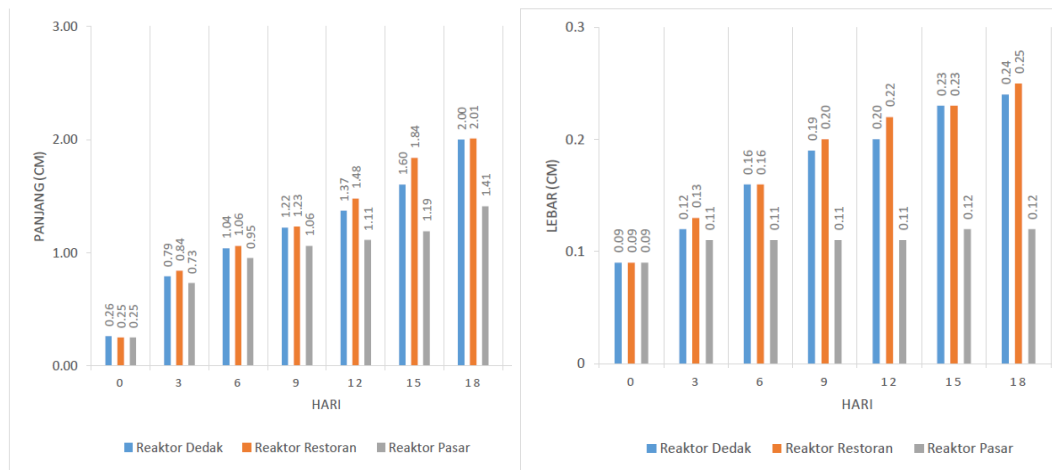
Tabel 4.3 Perhitungan NO₃ Pada Sistem Akuaponik

t (hari)	Akumulasi NO ₃ mg N/hari	Plant Uptake NO ₃ mg N/hari	Plant Uptake (b) mg/l/hari	Akumulasi NO ₃ (a) mg/l/hari	NO ₃ Tersedia (a-b) mg/l/hari
1	184,0	0	0,000	0,302	0,00
2	368,0	365,12	0,599	0,604	0,00
3	552,0	374,69	0,615	0,906	0,29
4	736,0	384,67	0,632	1,208	0,58
5	920,0	395,06	0,649	1,510	0,86

t (hari)	Akumulasi NO₃ mg N/hari	Plant Uptake NO₃ mg N/hari	Plant Uptake (b) mg/l/hari	Akumulasi NO₃ (a) mg/l/hari	NO₃ Tersedia (a-b) mg/l/hari
6	1104,0	405,91	0,666	1,812	1,15
7	1288,0	417,22	0,685	2,115	1,43
8	1472,0	429,02	0,704	2,417	1,71
9	1656,0	441,34	0,725	2,719	1,99
10	1840,0	454,20	0,746	3,021	2,28
11	2024,0	467,62	0,768	3,323	2,56
12	2208,0	481,64	0,791	3,625	2,83
13	2392,0	496,28	0,815	3,927	3,11
14	2576,0	511,57	0,840	4,229	3,39
15	2760,0	527,55	0,866	4,531	3,67
16	2944,0	544,25	0,894	4,833	3,94
17	3128,0	561,71	0,922	5,135	4,21
18	3312,0	579,94	0,952	5,437	4,49
19	3496,0	599,01	0,983	5,739	4,76
20	3680,0	618,93	1,016	6,042	5,03
21	3864,0	639,76	1,050	6,344	5,29
22	4048,0	661,52	1,086	6,646	5,56
23	4232,0	684,27	1,123	6,948	5,82
24	4416,0	708,04	1,162	7,250	6,09
25	4600,0	732,87	1,203	7,552	6,35
26	4784,0	758,81	1,246	7,854	6,61
27	4968,0	785,90	1,290	8,156	6,87
28	5152,0	814,18	1,337	8,458	7,12
29	5336,0	843,70	1,385	8,760	7,38
30	5520,0	874,49	1,436	9,062	7,63

4.2 Produksi Larva BSF

Produksi larva BSF yang efisien memerlukan kepastian data terkait kualitas dan kuantitas produksi larva *Black Soldier Fly* (BSF). Informasi ini memiliki peran penting dalam keberlanjutan pengelolaan limbah organik dan pengembangan selanjutnya dalam skala bisnis. Kualitas larva BSF dinilai berdasarkan parameter fisik seperti panjang, lebar, dan berat rata-rata per ekor. Grafik data yang ditampilkan menggambarkan variasi ukuran dan berat tersebut selama periode pertumbuhan larva.

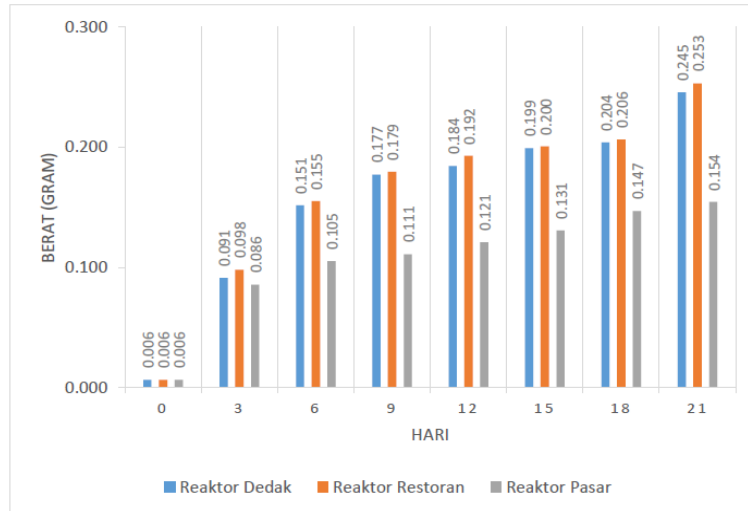


(Nugraha,2024)

Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran Panjang dan Lebar Larva BSF

Pada grafik diatas menunjukkan pertumbuhan panjang dan lebar larva *Black Soldier Fly* dari tiga jenis reaktor pakan yang berbeda: reaktor dedak, reaktor restoran, dan reaktor pasar, selama periode 21 hari. Pada grafik gambar 4.7 pertumbuhan panjang larva BSF, terlihat bahwa panjang larva meningkat secara bertahap dari hari ke-0 hingga hari ke-21. Reaktor restoran menghasilkan larva dengan panjang rata-rata tertinggi (2.22 cm) pada hari ke-21, diikuti oleh reaktor dedak (2,18 cm) dan reaktor pasar (1,47 cm).

Grafik pertumbuhan lebar larva memperlihatkan pertumbuhan larva, yang juga meningkat seiring waktu. Pada hari ke-21, larva dari reaktor restoran dan reaktor dedak menunjukkan lebar yang hampir sama (0,26 cm), sedangkan larva dari reaktor pasar sedikit lebih kecil (0,12 cm). Hasil ini mengindikasikan bahwa jenis pakan yang digunakan dalam reaktor berbeda mempengaruhi laju pertumbuhan panjang dan lebar larva BSF. limbah restoran dan dedak lebih efektif dalam mendukung pertumbuhan larva BSF dibandingkan dengan limbah pasar, baik dari segi panjang maupun lebar, selama periode 21 hari. Hal ini terkait dengan kandungan nutrisi yang lebih beragam dan kaya pada limbah pasar dan restoran, yang berkontribusi pada perkembangan larva yang lebih optimal.



(Nugraha, 2024)

Gambar 4.8 Grafik Pengukuran Pertumbuhan Berat Larva BSF selama 21 hari

Gambar 4.8 tersebut menggambarkan pertumbuhan berat larva *Black Soldier Fly* (BSF) setiap 3 hari dari tiga jenis reaktor pakan yang berbeda: reaktor dedak, reaktor restoran, dan reaktor pasar, selama periode 21 hari. Pada grafik, terlihat bahwa berat larva meningkat secara bertahap dari hari ke-0 hingga hari ke-21 untuk semua jenis reaktor. Pada hari ke-21, larva dari reaktor restoran mencapai berat tertinggi 0,253 gram, diikuti oleh larva dari reaktor dedak 0,245 gram dan reaktor pasar 0,154 gram. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jenis pakan yang digunakan mempengaruhi peningkatan berat larva BSF, dengan pakan dari limbah restoran menghasilkan larva dengan pertumbuhan berat terbaik, diikuti oleh pakan dedak, sedangkan limbah pasar menghasilkan pertumbuhan yang lebih rendah.

Berdasarkan hasil data terkait pengukuran panjang, lebar dan berat larva BSF yang telah dilakukan, didapati bahwa pertumbuhan larva dan berat paling dominan dipengaruhi secara berurutan adalah pakan sampah restoran, pakan dedak, dan yang paling rendah adalah sampah pasar. Berdasarkan komposisi terlihat sampah restoran terdiri dari sisa makanan seperti nasi, telur, mie, tulang ayam, tempe, tahu, tepung, komposisi pada sampah pasar didominasi oleh sayuran busuk dan buah-buahan busuk, sedangkan pada pakan dedak merupakan hasil samping dari pengolahan penggilingan padi yang berupa kulit luar beras yang telah terpisah dari bijinya. Sehingga secara kandungan nutrisi berdasarkan jenis pakan, larva BSF cenderung lebih cepat pertumbuhannya dengan pakan yang terdiri dari banyak karbohidrat dan protein, sedangkan sampah pasar didominasi serat berasal dari sayuran yang terlihat memiliki tingkat pertumbuhan yang rendah.

Tingginya pertumbuhan larva BSF dapat diperkuat dengan pengujian kandungan proteinnya. Pada tabel 4.4 dibawah menunjukkan hasil pengujian kandungan protein pada sampel larva (BSF). Pengujian dilakukan pada saat larva berumur 10 hari dan 20 hari atau pada saat panen.

Tabel 4.4 Pengujian Kandungan Protein dalam Sample Larva BSF

Reaktor	Kadar Protein (%)	
	Hari 10	Hari 20
Reaktor Pasar (R3)	38,69	39,41
Reaktor Restoran (R2)	40,85	48,90
Reaktor Dedak	39,83	44,56

(Sinensis, 2024)

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa semua sampel larva dari ketiga reaktor memiliki kandungan protein yang tinggi. Pada hari ke-20, larva yang diberi pakan sampah restoran memiliki kandungan protein tertinggi sebesar 48,90%, diikuti oleh larva yang diberi pakan dedak padi sebesar 44,56%, dan larva yang diberi pakan sampah pasar sebesar 39,41%. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa jenis media yang digunakan mempengaruhi kadar protein larva, dengan pakan dari sampah restoran menghasilkan larva dengan kandungan protein paling tinggi.

Tabel 4.5 Hasil Produksi Larva BSF

Reaktor	Berat Media (akumulasi)	Berat Akhir (kg)	Hasil Larva (kg)	Persentase berat Larva dari media (%)
Media Sampah Pasar (R3)	30 kg + 10 g BSF	4,2	1,7	40
Media Sampah Restoran (R2)	30 kg + 10 g BSF	11,9	4,3	36
Media Dedak (kontrol)	30 kg + 10 g BSF	6,3	1,7	26

(Nugraha, 2024)

Berdasarkan tabel 4.5 menunjukkan hasil produksi larva BSF pada tiga jenis media yang berbeda. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa media sampah pasar menghasilkan 1,7 kg larva dengan persentase produksi sebesar 40% dari berat akhir reaktor sebesar 4,2 kg. Media sampah restoran menghasilkan 4,3 kg larva dengan persentase produksi sebesar 36% dari berat akhir reaktor sebesar 11,9 kg. Sedangkan media dedak pakan menghasilkan 1,7 kg larva dengan persentase produksi sebesar 26% dari berat akhir reaktor sebesar 6,3 kg. Jika dihubungkan dengan data suhu media selama produksi larva BSF pada gambar

4.3, media sampah pasar dan restoran memiliki rata-rata suhu sebesar 35° C sedangkan media dedak memiliki suhu rata-rata sebesar 38° C. Hal ini diduga menyebabkan rendahnya persentase berat larva dalam reaktor media dedak dikarenakan suhu media yang tidak nyaman bagi pertumbuhan larva. Berdasarkan beberapa jurnal dijelaskan bahwa suhu optimal pertumbuhan larva BSF adalah berkisar antara (27- 35)° C, sehingga jika suhu media pada penelitian ini tidak sesuai dengan suhu optimal untuk produksi larva BSF. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa media sampah pasar memiliki persentase produksi larva tertinggi dibandingkan dengan media lainnya, meskipun berat akhir media lebih rendah dibandingkan media sampah restoran.

Tabel 4.6 Rangkuman Data Kuantitas dan Kualitas Produksi Larva BSF

Reaktor	Kadar Protein (%)	Berat Larva Per-ekor (g)	Panjang (cm)	lebar (cm)	WRI (%/hari)
Media Pasar (R3)	39,41	0,154	1,47	0,12	4,10
Media Sampah Restoran (R2)	48,90	0,253	2,22	0,26	2,87
Media Dedak (Kontrol)	44,56	0,241	2,18	0,25	3,76
100% Food Waste (FW)	29,2	0,228	2,15		5,31
75% FW+25% <i>Chicken feed</i> *	38,6	0,224	2,11		5,4
75% FW+25% <i>Rice barn</i> *	36,5	0,219	2,07		5,01
75% FW+25% <i>GardenWaste</i> *	30,8	0,194	1,89		4,4

* (Ahmad dkk., 2023)

Secara keseluruhan, media sampah restoran menghasilkan larva dengan kualitas terbaik berdasarkan kadar protein tertinggi dan ukuran terbesar. Sementara itu, media pasar menunjukkan persentase produksi tertinggi dalam reaktor, tetapi dengan kadar protein terendah. Media dedak memberikan hasil yang seimbang dengan kadar protein yang cukup tinggi dan ukuran larva yang relatif besar, tetapi perlu memperhatikan lagi terkait suhu media selama proses pembesaran larva BSF. Jika dibandingkan dengan penelitian Ahmad (2023) bahwa hasilnya serupa tetapi menunjukkan hasil nilai larva BSF lebih rendah dari penelitian ini. Hal ini disebabkan oleh perbedaan komposisi media yang digunakan sehingga mempengaruhi pertumbuhan dan kandungan larva BSF.

4.3 Produksi Selada

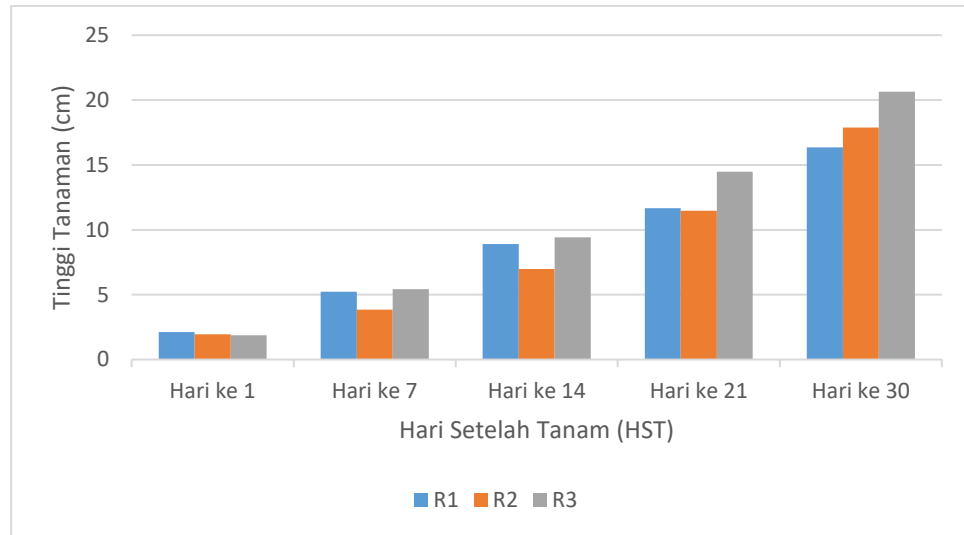
Kualitas dan kuantitas hasil tanaman selada menjadi dua aspek krusial dalam produksi pertanian modern, terutama dalam sistem yang terintegrasi seperti akuaponik. Kualitas selada dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk nutrisi yang tersedia, kondisi lingkungan, serta teknik budidaya yang digunakan. Selada dengan kualitas tinggi memiliki tekstur renyah, warna hijau cerah, serta kandungan gizi yang optimal. Di sisi lain, kuantitas hasil selada tergantung pada efisiensi sistem produksi, mulai dari ketersediaan air dan nutrisi, hingga manajemen hama dan penyakit. Kombinasi antara kualitas yang baik dan kuantitas yang optimal merupakan kunci kesuksesan dalam menjawab permintaan pasar yang terus meningkat akan produk pertanian berkualitas.

Tabel 4.7 Tingkat Pertumbuhan Selada pada Sistem Integrasi Akuaponik

Hari Setelah Tanam (HST)	Rata - Rata Tinggi Tanaman (cm)		
	R1	R2	R3
Hari ke 1	2,12	1,95	1,87
Hari ke 7	5,22	3,85	5,42
Hari ke 14	8,9	6,97	9,42
Hari ke 21	11,67	11,48	14,47
Hari ke 30	16,35	17,87	20,65
Rata-rata	6,98	6,06	7,79

(Putra, 2024)

Dari data pertumbuhan tanaman selada yang ditampilkan, menunjukkan adanya variasi tinggi tanaman antara tiga kelompok perlakuan: Reaktor Kontrol (R1), Reaktor Sampah Restoran (R2), dan Reaktor Pasar Sampah Pasar (R3). Pengukuran dilakukan pada hari ke-1, hari ke-7, hari ke-14, hari ke-21, dan hari ke-30 setelah tanam. Pada hari pertama, tinggi tanaman di semua perlakuan masih sangat kecil, dengan R1 memiliki tinggi 2,12 cm, R2 1,95 cm, dan R3 1,87 cm. Seiring berjalannya waktu, tanaman di semua kelompok perlakuan terus bertumbuh, tetapi dengan laju yang berbeda-beda. Pada hari ke-7, tanaman di R1 tumbuh hingga 5,22 cm, R2 3,85 cm, dan R3 5,42 cm. Perlakuan R3 mulai menunjukkan laju pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan R1 dan R2, terutama setelah hari ke-14, di mana tanaman R3 mencapai 9,42 cm, lebih tinggi dari R1 (8,9 cm) dan R2 (6,97 cm). Pada hari ke-21 dan ke-30, R3 terus mempertahankan laju pertumbuhan tertinggi, mencapai 20,65 cm pada hari ke-30, sedangkan R1 dan R2 masing-masing hanya mencapai 16,35 cm dan 17,87 cm. Dari rata-rata tingkat pertumbuhan, terlihat bahwa R3 memiliki rata-rata pertumbuhan tertinggi, yaitu 7,79 cm, diikuti oleh R1 dengan 6,98 cm, dan R2 dengan 6,06 cm.



(Putra, 2024)

Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Pertumbuhan Tinggi Selada

Berdasarkan grafik, terlihat bahwa perlakuan R3 memiliki performa pertumbuhan terbaik di antara ketiga perlakuan, dengan tingkat pertumbuhan yang lebih cepat dan hasil akhir yang lebih tinggi. Sementara itu, R2 menunjukkan pertumbuhan paling lambat, yang mungkin mengindikasikan bahwa ada faktor lingkungan atau perlakuan yang perlu diperbaiki agar pertumbuhan tanaman lebih optimal.

Dibandingkan dengan penelitian Wijaya (2018) melakukan penanaman tanaman selada dengan membandingkan jenis ikan (lele, nila, dan ikan pelangi) terhadap pertumbuhan selada, mendapatkan tinggi tanaman terbaik pada selada yang tersirkulasi air ikan lele dengan tinggi tanaman 20,9 cm, diikuti dengan air ikan pelangi 20,2 cm, dan paling rendah adalah tinggi selada pada air ikan nila 17,9 cm. Jika dengan penelitian ini artinya akuaponik dengan ikan nila akan sangat baik jika terdapat nutrisi tambahan dengan adanya tetesan lindi air sampah pasar sehingga dapat membuat pertumbuhan selada menjadi lebih optimal dengan tinggi selada mencapai 20,6 cm, tetapi penambahan air lindi sampah pasar ini perlu diperhatikan kuantitasnya sehingga tidak mengganggu *Survival Rate* ikan.

Jika dibandingkan terkait metode instalasi penanaman yang digunakan oleh Wibowo (2021) design sistem penanaman yang memiliki tinggi optimal adalah bentuk piramida dengan tinggi selada 21,8 cm, diikuti oleh bentuk meja 19,4, dan anak tangga 18,0. Design ini mempengaruhi sirkulasi air dalam sistem, sehingga mempengaruhi suhu, dan sirkulasi nutrisi dalam sistem penanaman. Pada penelitian ini menggunakan bentuk penanam mirip dengan tangga, tetapi juga paling optimal jika ditambahkan dengan air lindi sampah pasar.

Tabel 4.8 Tingkat Pertumbuhan Luas Daun Pada Selada

Hari Setelah Tanam (HST)	Luas Daun (cm ²)		
	R1	R2	R3
Hari ke 1	0,29	0,31	0,35
Hari ke 7	2,13	1,17	1,84
Hari ke 14	4,47	1,90	7,37
Hari ke 21	9,45	5,56	13,48
Hari ke 30	15,47	13,57	29,87
Rataan	6,36	4,50	10,58

(Putra, 2024)

Pada tabel 4.8 di atas menunjukkan perkembangan luas daun (dalam cm²) pada tiga perlakuan (R1, R2, dan R3) pada berbagai hari setelah tanam (HST), yaitu hari ke-1, ke-7, ke-14, ke-21, dan ke-30. Setiap replikasi menunjukkan perbedaan dalam pertumbuhan luas daun seiring berjalannya waktu. Pada hari ke-1, luas daun di semua reaktor masih sangat kecil, dengan R1 sebesar 0,29 cm², R2 sebesar 0,31 cm², dan R3 sebesar 0,35 cm². Hari ke-7 menunjukkan peningkatan luas daun yang cukup signifikan, terutama pada R1 yang mencapai 2,13 cm², sementara R2 dan R3 masing-masing 1,17 cm² dan 1,84 cm². Pada hari ke-14, R3 mulai menunjukkan peningkatan yang lebih cepat, dengan luas daun mencapai 7,37 cm², sedangkan R1 mencapai 4,47 cm² dan R2 sebesar 1,90 cm². Hari ke-21 memperlihatkan pola yang serupa, dengan R3 memiliki luas daun tertinggi sebesar 13,48 cm², diikuti oleh R1 sebesar 9,45 cm² dan R2 sebesar 5,56 cm². Akhirnya, pada hari ke-30, R3 secara signifikan memiliki luas daun terbesar, yaitu 29,87 cm², diikuti oleh R1 sebesar 15,47 cm² dan R2 sebesar 13,57 cm². Dari rata-rata keseluruhan, R3 menunjukkan pertumbuhan luas daun terbesar dengan rata-rata 10,58 cm², diikuti oleh R1 sebesar 6,36 cm², dan R2 memiliki rata-rata luas daun terendah sebesar 4,50 cm². Secara keseluruhan berdasarkan data luas daun menunjukkan bahwa tanaman di R3 mengalami pertumbuhan luas daun yang paling cepat dan konsisten dibandingkan dengan R1 dan R2, terutama setelah hari ke-14.

Tabel 4.9 Perbandingan Berat Kering dan Berat Basah Hasil Tanaman Selada

Reaktor	Berat Basah	Berat Kering	Kadar Air
R1	67,03	2,36	96%
R2	50,2	1,35	97%
R3	125,19	2,03	98%

(Putra, 2024)

Kuantitas hasil panen dari data yang diperoleh, terlihat bahwa terdapat perbedaan antara hasil panen pada berat basah dan berat kering pada tiga kelompok perlakuan: R1, R2, dan R3. Pada berat basah, perlakuan R3 menunjukkan hasil tertinggi dengan 125,19 gram, hampir dua kali lipat lebih besar dibandingkan R1 yang memiliki 67,03 gram, dan lebih dari dua kali lipat dibandingkan R2 dengan 50,2 gram. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman pada perlakuan R3 mengalami pertumbuhan yang lebih besar dalam hal biomassa basah, yang disebabkan oleh penyerapan air atau nutrisi yang lebih optimal. Di sisi lain, R2 menunjukkan hasil terendah, yang mengindikasikan adanya kendala dalam pertumbuhan, seperti kekurangan nutrisi atau pengelolaan air yang kurang tepat.

Pada berat kering, perlakuan R1 memiliki hasil tertinggi dengan 2,36 gram, diikuti oleh R3 dengan 2,03 gram, sementara R2 menunjukkan hasil terendah dengan 1,35 gram. Meskipun R3 memiliki berat basah yang jauh lebih tinggi, berat keringnya tidak terlalu berbeda dengan R1. Ini menunjukkan bahwa tanaman pada perlakuan R3 mungkin mengandung lebih banyak air, namun akumulasi biomassa keringnya tidak sebaik tanaman pada perlakuan R1. Sebaliknya, R2 dengan berat kering yang paling rendah menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman perlakuan perlakuan ini sangat terbatas, baik dari segi ukuran maupun efisiensi pertumbuhan. Secara keseluruhan, perlakuan R3 menunjukkan pertumbuhan yang lebih besar secara visual dengan berat basah yang tinggi, tetapi R1 lebih efisien dalam menghasilkan biomassa kering.

4.4 Produksi Ikan Nila

Pertumbuhan ikan dalam sistem akuaponik ditandai oleh penambahan berat dan panjang yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas air, nutrisi yang tersedia, dan kondisi lingkungan. Pada umumnya, ikan mengalami peningkatan berat dan panjang secara signifikan ketika lingkungan akuaponik mendukung keseimbangan antara kebutuhan nutrisi ikan dan tanaman. Peningkatan berat ikan sering kali lebih cepat dibandingkan dengan panjangnya, karena akumulasi massa tubuh lebih dipengaruhi oleh asupan pakan dan metabolisme ikan.

Dalam sistem akuaponik, pertumbuhan panjang ikan cenderung lebih dipengaruhi oleh faktor genetik, meskipun kondisi lingkungan seperti suhu dan kualitas air juga dapat memainkan peran penting. Oleh karena itu, nilai perubahan berat dan panjang ikan menjadi indikator penting untuk mengevaluasi keberhasilan sistem akuaponik, di mana ikan yang tumbuh sehat akan menunjukkan kenaikan yang konsisten dalam kedua parameter tersebut.

Tabel 4.10 Pertumbuhan berat ikan nila

Reaktor	Berat Ikan Awal hari 0 (g)				Berat Ikan Akhir hari ke 30 (g)			
	Ikan 1	Ikan 2	Ikan 3	Total	Ikan 1	Ikan 2	Ikan 3	Total
Kontrol (R1)	323,1	378,7	321,4	1023,2	348,1	408,7	346,4	1103,2
Sampah Restoran (R2)	317,8	381,1	318,4	1017,3	317,8	381,1	318,4	1017,3
Sampah Pasar (R3)	373,1	356,5	288,4	1018,0	402,1	356,5	316,4	1075,0

Tingkat *survival rate* ikan adalah (SR) yang dimana total ikan ada 3 ekor pada masing-masing reaktor, pada akuaponik R1 SR 100%, sedangkan R2 0% dan R3 66,7%. hal ini disebabkan oleh tingginya kadar organik cairan sampah yang masuk kedalam sistem, sehingga menurunkan tingkat DO yang tersirkulasi dalam akuaponik.

Dibandingkan pada penelitian Christin (2021) didapatkan bahwa perlakuan budidaya ikan nila dengan akuaponik sebagai filter memiliki tingkat *Survival rate* paling tinggi mencapai 78,7% dibandingkan dengan biofilter yaitu 74,8%. Dalam hal ini artinya sistem akuaponik tidak absolut dalam mengolah kembali air akuakultur, tetapi akuaponik dapat lebih disesuaikan berdasarkan tingkat kepadatan ikan dan tingkat limbah yang akan dihasilkan dan tersirkulasi dalam air.

Tabel 4.11 Pertumbuhan Panjang Ikan Nila

Reaktor	Panjang hari ke 0 (cm)			Panjang hari ke 30 (cm)		
	Ikan 1	Ikan 2	Ikan 3	Ikan 1	Ikan 2	Ikan 3
Kontrol (R1)	24,9	26,0	24,8	28,0	29,7	28,0
Sampah Restoran (R2)	24,8	26,0	24,8	24,8	26,0	24,8
Sampah Pasar (R3)	25,9	25,5	24,2	29,5	25,5	27,7

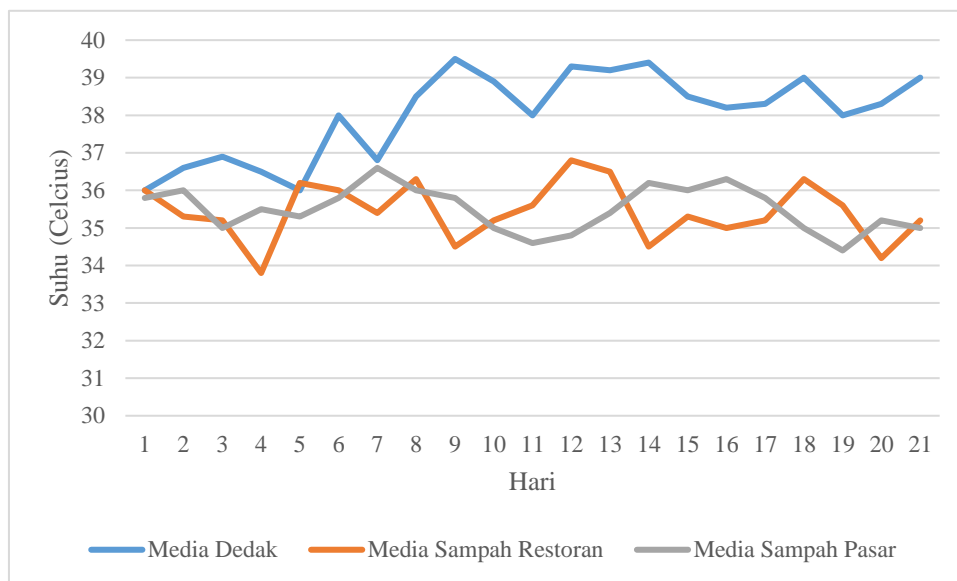
Pada R1, panjang ikan mengalami peningkatan yang konsisten dari hari ke-0 ke hari ke-30, dengan ikan mencapai panjang 28 cm hingga 29,7 cm setelah 30 hari. Hal yang serupa terjadi pada reaktor Sampah Pasar (R3), di mana panjang ikan meningkat tetapi ada satu ikan mati. Pada reaktor Sampah Restoran (R2) tidak ada ikan yang masih bertahan hidup. Pertumbuhan dan mortalitas ikan nila di berbagai kondisi reaktor, dengan reaktor Sampah Restoran (R2) menunjukkan tingkat kematian yang paling tinggi.

Dibandingkan dengan Thenu dan Tinglioy (2021) budidaya ikan nila pada air payau selama 6 bulan, didapatkan hasil pada bulan ke 0 panjang ikan 6 cm berat ikan di 12,5 gram, sedangkan pada bulan ke 2 panjang ikan 10,5 cm dengan berat 67 gram. Pada bulan ke 3 berat ikan dengan panjang 19,5 cm memiliki berat 198,5 g, pada bulan ke 4 memiliki panjang 24 cm, dengan berat 272 g, pada bulan ke 5 ikan nila memiliki panjang 28,5 cm dengan berat 348,5 g, pada bulan ke 6 ikan memiliki panjang 32 cm dengan berat 421 g. Dibandingkan dengan pertumbuhan pada R1, perkembangan dan berat ikan memiliki ke miripan. Pada peneltiian ini tepat satu bulan panjang akhir ikan 1 pada reaktor kontrol adalah 28 cm dengan berat 348 g, sedangkan pada ikan 2 memiliki panjang 29,7 cm dengan berat 408,7 g, ikan tiga memiliki berat yang sama.

4.5 Produksi Kasgot (Bekas Larva)

Hasil residu atau sisa hasil budidaya larva *Black Soldier Fly* (BSF), sering disebut atau dinamakan "bekas larva" atau kasgot. Secara definisi kasgot merupakan bahan organik yang terdiri dari sisa pakan yang tidak terurai dan ekskreta larva yang dihasilkan selama proses pertumbuhan larva. Sebagai produk sampingan dari budidaya larva, bekas larva memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti pupuk organik padat yang kaya nutrisi untuk tanaman.

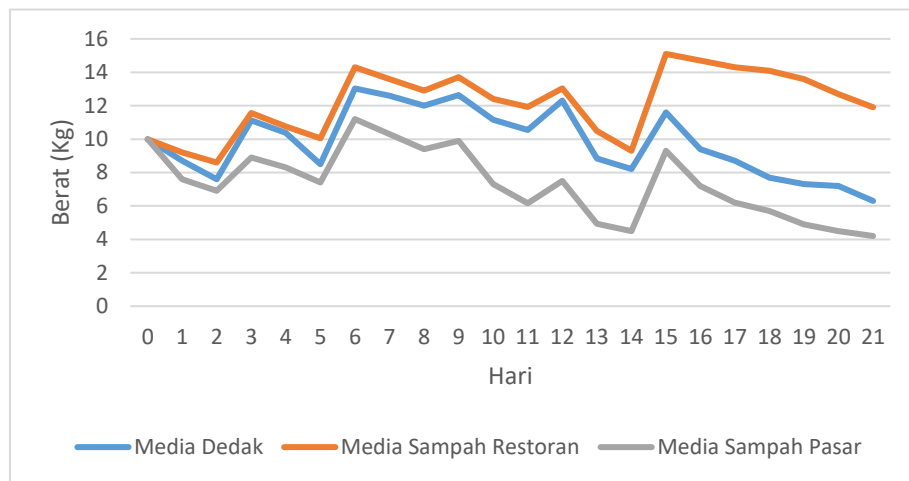
Selama proses budidaya larva BSF selama 21 hari telah dilakukan pengamatan terhadap suhu terhadap masing-masing media reaktor. Reaktor-reaktor tersebut diberikan pakan secara berkala dengan dedak padi, sampah restoran serta sampah pasar. Berikut ini merupakan perubahan suhu pada masing-masing reaktor selama 21 hari (gambar 4.10).



Gambar 4.10 Grafik Perubahan Suhu Pada Reaktor Larva BSF

Berdasarkan data yang telah didapatkan diketahui bahwa selama proses produksi larva BSF terjadi fluktuasi suhu harian pada reaktor. Pengamatan suhu udara pada saat penelitian ini berkisar antara (19-31)°C. Tetapi data yang ada, menunjukkan bahwa media dedak memiliki rata-rata suhu paling tinggi yaitu 38°C dari media dedak sedangkan media sampah restoran dan pasar di angka 35°C. Hal ini diperkirakan disebabkan karena media dedak memiliki ukuran partikel kecil dan lembut membuat lebih mudah menyerap air dan menjadikan berbentuk adonan pekat yang tidak memiliki celah sirkulasi udara, sehingga proses fermentasi terjadi sangat tinggi dan menyeluruh, dibuktikan dengan tingginya suhu pada media ini. Berbeda dengan sampah restoran dan pasar memiliki rongga dan ukuran partikel yang lebih besar, menyebabkan terjadinya sirkulasi udara.

Perubahan suhu pada media dalam reaktor ini terlihat tidak sejalan dengan penambahan sampah pakan larva selama proses pertumbuhan. Dimana secara alami akan terjadi proses fermentasi pada semua media organik. Jika pada grafik perubahan suhu reaktor gambar 4.3 yang dibandingkan dengan berat rata-rata larva dan tingkat pertumbuhannya, maka ditemukan bahwa suhu tinggi atau rendah tidak mempengaruhi ukuran, berat dan kadar protein pada larva. Tetapi suhu ini lebih memiliki dampak terhadap tingkat produksi total berat larva per berat akhir dalam reaktor. Dibandingkan dengan penelitian Yuwono (2021) suhu rata-rata dalam media perkembangan larva BSF dapat mempengaruhi pertumbuhan sehingga perlu dipertahankan pada suhu (24-30)°C, tetapi suhu yang ada pada penelitian ini yaitu (35-38)°C sehingga pada reaktor media dedak tidak mendapatkan hasil yang optimal. Padahal tingkat WRI terbaik dicapai pada suhu rendah pada angka 91.2%. Pada penelitian tersebut juga dijelaskan terkait tingkat produksi bekas maggot atau kasgot juga dipengaruhi oleh temperatur, sehingga hasil paling tinggi didapat pada saat suhu sedang berkisar antara (25-27)°C, pada penelitian ini yang termasuk suhu sedang yang memiliki suhu rata-rata 25°C.



(Nugraha, 2024)

Gambar 4.11 Grafik penambahan media pada reaktor

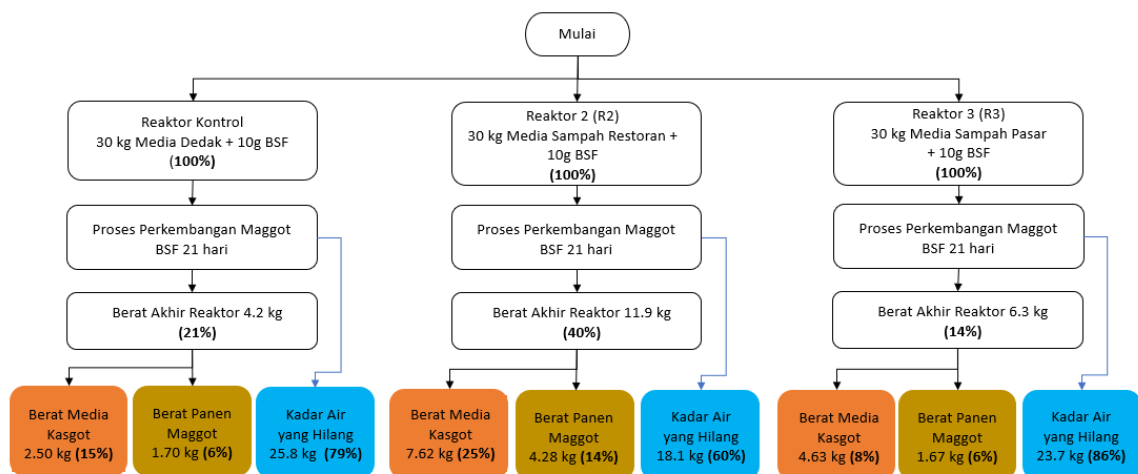
Berdasarkan gambar 4.11 penambahan akumulasi berat pada reaktor larva dilakukan secara rutin dengan berat awal ±10 kg dengan penambahan 4 kg setiap 3 hari sebanyak 5 kali dengan total akumulasi penambahan media dalam reaktor adalah 30 kg. Dapat dilihat pada gambar bahwa penambahan media dilakukan pada hari ke 3, 6, 9, 12, dan 15 menunjukkan kenaikan pada grafik berat media sehingga pada akhir di-hari ke 21 dilakukan pemanenan larva dan kasgot. Terjadinya kenaikan pada grafik pada hari-hari penambahan sampah ini sangat normal terjadi. Hilangnya

berat pada reaktor disebabkan oleh beberapa faktor seperti penguapan, lindi yang masuk kedalam sistem akuaponik, serta konversi media menjadi biomasa larva BSF. Berikut ini merupakan tabel akumulasi berat pada reaktor dan hasilnya.

Tabel 4.12 Akumulasi Berat Produksi Larva BSF

Reaktor	Berat Akumulasi Media (kg)	Berat Akhir Media (kg) Hari 21	Total Berat Larva (kg)	Total Berat Kasgot (kg)	Berat Hilang Air (kg)
Media Sampah Pasar (R1)	30 (100%)	4,2 (14%)	1,70	2,50	25,8
Media Sampah Restoran (R2)	30 (100%)	11,9 (40%)	4,28	7,62	18,1
Media Pakan Dedak (R3)	30 (100%)	6,3 (21%)	1,67	4,63	23,7

Berdasarkan tabel 4.12 dapat dibuat sebagai bagan neraca massa proses produksi larva BSF, sebagai berikut:



Gambar 4.12 Neraca massa produksi larva BSF

Pada gambar 4.12 terlihat bagaimana proses produksi larva BSF yang menghasilkan kasgot (bekas larva) dan larva BSF. Proses ini dimulai dengan memasukkan media untuk masing-masing reaktor seberat 10 kg pada awal dan 10 gram larva larva BSF yang berumur 2 hari, dimasukkan ke dalam Reaktor 1 (R1) menggunakan media sampah pasar, Reaktor 2 (R2) menggunakan media sampah restoran, dan Reaktor 3 (kontrol) menggunakan media dedak. Selama 21 hari proses produksi, terjadi penurunan berat media dikarenakan hilangnya kadar air dan berpindah menjadi berat larva dan penguapan. Dalam proses ini R1 kehilangan kadar air sebesar 25,8 kg, R2 kehilangan kadar air sebesar 18,1 kg, dan R3 kehilangan kadar air sebesar 23,7 kg.

Setelah proses 21 hari R1 memiliki berat akhir sebesar 4,2 kg, R2 sebesar 11,9 kg, dan R3 sebesar 6,3 kg. Dari proses ini, diperoleh dua hasil utama: kasgot dan larva BSF. R1 menghasilkan 2,5 kg kasgot dan 1,7 kg larva BSF, sementara R2 menghasilkan 7,62 kg kasgot dan 4,28 kg larva BSF. R3 menghasilkan 4,63 kg kasgot dan 1,67 kg larva BSF. Hasil ini menunjukkan bahwa media sampah restoran (R2) lebih efektif menghasilkan kasgot dan larva dibandingkan dengan media lainnya, sementara sampah pasar (R1) memiliki tingkat kehilangan air yang tertinggi.

Berdasarkan Miwardhono (2021) dalam 1 kg 100% dedak padi fermentasi dengan 1 gram telur larva BSF menghasilkan 525 g larva BSF, pada 1 kg 50% kelapa fermentasi dengan 50% dedak padi fermentasi menghasilkan 467,5 g. Berdasarkan penelitian tersebut hampir 45-55% media akan berubah menjadi berat masa larva BSF.

Pengujian lebih dalam juga dilakukan untuk mengetahui potensi kasgot sebagai media tanam. Analisis hasil komposisi kimia kasgot sebagai media tanam dibandingkan dengan baku mutu SNI nomor 7763:2018 tentang Pupuk Organik Padat. Berdasarkan tiga jenis media yang digunakan dalam produksi larva BSF, yaitu media dedak (K1), media sampah restoran (K2), dan media sampah pasar (K3) dilakukan pengujian pada setiap hasil kasgotnya, untuk mengetahui kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), karbon organik (C-Organik), rasio karbon terhadap nitrogen (rasio C/N), dan kadar air. Hasil ini memberikan gambaran mengenai perbedaan karakteristik kimia dan potensi masing-masing media dalam proses pengomposan.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Kandungan Kualitas Kasgot

Parameter	Kadar Kasgot (K)			Baku Mutu SNI 7763:2018
	K3	K2	K1	
N	2,02%	2,22%	2,21%	Min 2%
P	0,067%	0,071%	0,074%	
K	4,03%	4,42%	5,58%	
C-Organik	18,44%	19,11%	23,33%	Min 15%
Rasio c/n	9,33	8,6	10,56	Max 25
Kadar Air	18,53%	19,66%	18,27%	Rentang 8-25 %

(Sinensis, 2024)

Dari data tabel 4.13, kasgot media dedak K1 memiliki kandungan nitrogen (N) sebesar 2,21%, sedikit lebih rendah dari kasgot media sampah restoran K2 2,22% tetapi lebih tinggi dibandingkan kasgot media sampah pasar K3 2,02%. Kandungan fosfor (P) tertinggi ada pada kasgot K1 0,074%, sementara kasgot K2 dan K3 memiliki nilai yang lebih rendah, masing-masing 0,071% dan 0,067%. Kandungan kalium (K) tertinggi juga ditemukan kasgot K1 5,58%, diikuti

oleh kasgot K2 4,42% dan kasgot K3 4,03%. Kandungan karbon organik tertinggi terdapat pada K1 23,33%, diikuti oleh K2 19,11% dan K3 18,44%. Kasgot K1 atau dedak ini memiliki potensi pengomposan yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor lainnya. Rasio C/N, yang penting untuk proses dekomposisi, bervariasi antara K3 (10,56), K2 (8,6) dan K1 (9,33), menunjukkan potensi pengomposan yang berbeda, nilai C/N pada penelitian ini termasuk rendah sehingga tingkat proses komposting dalam kasgot ini cenderung kurang optimal. Kadar air yang mempengaruhi mikroorganisme selama pengomposan, sedikit lebih tinggi pada K2 19,66% dibandingkan K1 18,27% dan K3 18,53%, menggambarkan perbedaan tingkat retensi kelembaban di masing-masing kasgot.

Berdasarkan tabel 4.5 hasil pengujian kandungan kualitas kasgot yang dibandingkan dengan baku mutu SNI 7763:2018, berikut adalah evaluasi kualitas kasgot dari tiga media (K1, K2, K3):

1. **Nitrogen (N):**

Kandungan nitrogen minimal 2% berdasarkan SNI. Dari data, K2 (2,22%), K3 (2,21%) dan K1 (2,02%) sudah di atas standar, tetapi hanya K2 yang sedikit di atas batas minimum.

2. **Fosfor (P):**

Berdasarkan SNI ditetapkan bahwa kandungan fosfor (P) minimal 2%. Dari hasil pengujian semua sampel (K1: 0,067%, K2: 0,071%, K3: 0,074%) berada di bawah nilai minimum sehingga tidak ada yang memenuhi standar untuk fosfor.

3. **Kalium (K):**

Standar SNI mensyaratkan kalium (K) minimal 2%. Semua sampel memenuhi standar, dengan K3 memiliki kandungan kalium tertinggi (5,58%), diikuti oleh K2 (4,42%) dan K1 (4,03%).

4. **Karbon Organik (C-Organik):**

Kadar karbon organik minimal sebesar 15% diatur dalam standar SNI. Semua sampel memenuhi persyaratan standar. Nilai K3 memiliki kandungan tertinggi (23,33%), diikuti oleh K2 (19,11%) dan K1 (18,44%).

5. **Rasio C/N:**

Berdasarkan SNI ditetapkan nilai rasio C/N maksimum sebesar 25. Semua sampel berada dalam batas, dengan K3 (10,56), K1 (9,33), dan K2 (8,6) semua di bawah batas maksimum, namun masih dalam rentang yang sesuai untuk proses pengomposan yang baik.

6. **Kadar Air:**

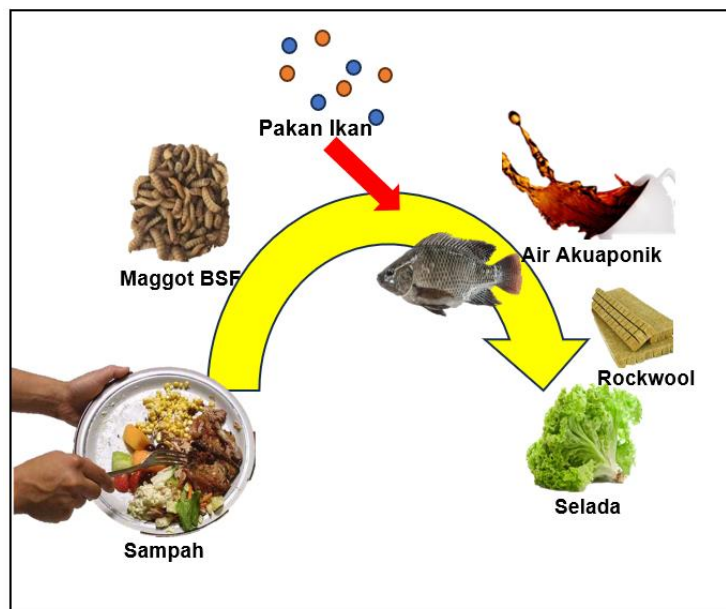
Standar SNI untuk kadar air adalah dalam rentang 8-25%. Semua sampel memenuhi standar SNI, dengan nilai K1 (18,53%), K2 (19,66%), dan K3 (18,27%) yang berada dalam rentang yang sesuai.

Berdasarkan standar SNI 7763:2024, kompos dari media K1 (Kasgot Dedak) memiliki kandungan. K3 memenuhi semua standar SNI termasuk kandungan nitrogen, kalium, karbon organik, rasio C/N, dan kadar air. Meskipun tidak ada sampel yang memenuhi standar minimum untuk fosfor (P), K3 tetap unggul dalam hal kandungan nutrisi keseluruhan, khususnya dengan nilai kalium dan karbon organik tertinggi. Tetapi jika terkait jumlah kuantitas produksi secara berurutan paling tinggi adalah yang berasal dari reaktor R2 media sampah restoran, R1 media dedak, dan R3 media sampah pasar. Hasil kualitas bekas maggot yang akan dimanfaatkan sebagai kompos memiliki kualitas yang baik berdasarkan SNI, jika dibandingkan dengan penelitian Miwardhono (2022) didapati bahwa dalam penelitian ini termasuk dalam produksi larva BSF pada suhu udara sedang, sehingga memiliki kadar yang cukup baik dalam produksi larva dan kasgot.

4.6 Kadar Logam Berat

Teknologi integrasi yang memanfaatkan larva dalam pengolahan sampah dan mendukung sistem akuaponik, membawa potensi yang besar dalam pengelolaan limbah dan peningkatan hasil tanaman. Namun, salah satu tantangan utama yang perlu diperhatikan adalah potensi akumulasi logam berat dalam berbagai komponen sistem ini, yaitu pada sampah, larva, tanaman, dan air yang mengandung cairan sampah. Sampah organik yang digunakan sebagai sumber nutrisi untuk larva yang kandungan air sampah dapat menjadi sumber kandungan logam berat, seperti besi (Fe), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr). Logam berat ini dapat termakan dan terakumulasi di tubuh larva serta dapat diserap oleh tanaman melalui cairan sampah yang ikut terakumulasi didalam air pada sistem akuaponik. Sehingga terdapat risiko adanya logam berat yang terkandung dalam sampah untuk berpindah ke tanaman dan larva.

Kontaminasi logam berat dalam air dapat memengaruhi kualitas air dan tanaman yang tumbuh dalam sistem tersebut, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia jika hasil panen tanaman yang terkontaminasi dikonsumsi. Oleh karena itu, pemantauan berkala terhadap kandungan logam berat pada setiap komponen pada sampah, larva, tanaman, dan air sangat penting untuk memastikan bahwa teknologi ini aman, efektif, dan tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan kesehatan manusia.



Gambar 4.13 Skema Gambaran Logam Berat dalam Akuaponik Integrasi

A. Logam Berat Pada Sampah

Pengujian logam berat pada sampah dibatasi pada jenis logam seperti Fe, Pb, Cd, dan Cr yang berdasarkan penelitian sebelumnya, memang terdapat potensi logam berat didalamnya. Tetapi dari hasil laboratorium diketahui bahwa hanya kandungan logam Pb dan Fe yang terdeteksi, untuk Cr dan Cd tidak ditemukan atau kadarnya sangat kecil sehingga kadarnya *Not Detected* (ND) seperti pada tabel berikut.

Tabel 4.14 Kadar logam berat pada sampah

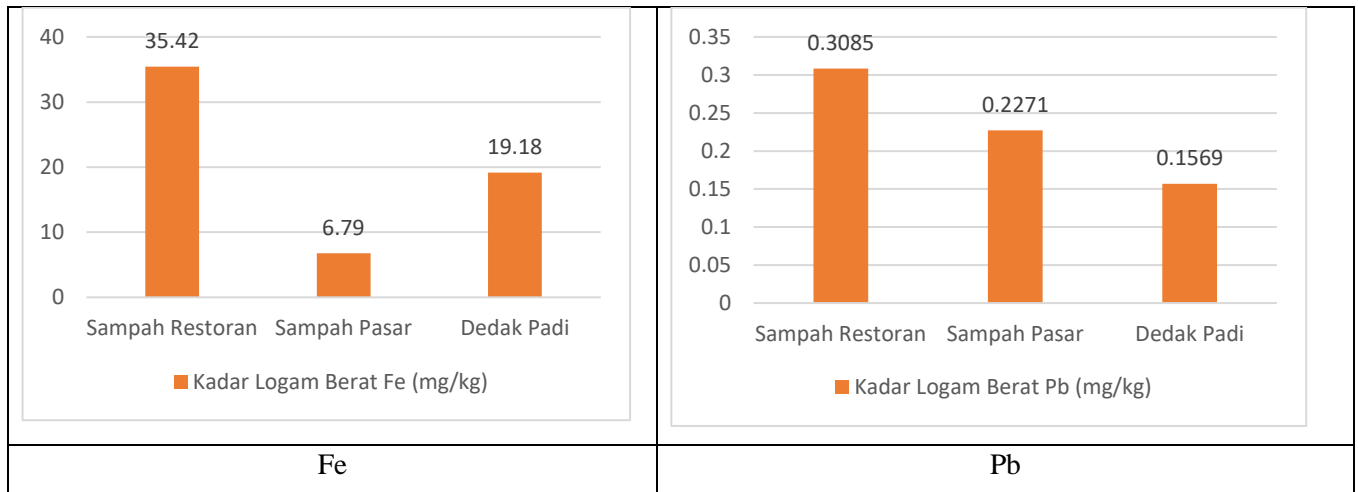
Sampel	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cr (mg/kg)
Sampah Restoran	0,3085	ND	35,42	ND
Sampah Pasar	0,2271	ND	6,79	ND
Dedak Padi	0,1569	ND	19,18	ND

(Sinensis, 2024)

Berdasarkan tabel hasil uji kadar logam berat pada tiga jenis sampel: sampah restoran, sampah pasar, dan dedak padi, menunjukkan bahwa hanya logam Pb dan Fe yang terdeteksi, sementara Cd dan Cr tidak terdeteksi pada semua sampel. Beberapa parameter logam berat seperti Cd, Pb, dan Zn juga ditemukan pada beberapa sayuran dari beberapa sumber yang berbeda (Diener et al, 2015). Pada sayuran yang berasal dari kebun, kandungan Cd, Pb, dan Zn masing-masing berkisar antara 0,05–0,4 mg/kg, 0,2–1,7 mg/kg, dan 11–54 mg/kg. Sementara itu, pada sayuran dari pasar, kandungan logam tersebut lebih tinggi, yaitu 1–5,5 mg/kg untuk Cd, 0,3–2,2 mg/kg untuk Pb, dan 41–150 mg/kg untuk Zn. Adapun sayuran dari perkebunan di area urban memiliki kandungan Cd sebesar 0,5–4,3 mg/kg, Pb sebesar 3–16 mg/kg, dan Zn sebesar 3–41 mg/kg (Alam dkk. 2003; Marshall dkk. 2003; Sharma dkk. 2007).

Pada logam Pb, sampah restoran memiliki kadar tertinggi dengan 0,3085 mg/kg, diikuti oleh sampah pasar sebesar 0,2271 mg/kg, dan dedak padi sebagai kontrol memiliki kadar Pb terendah, yaitu 0,1569 mg/kg. Ini menunjukkan bahwa sampah restoran dan pasar berpotensi terkontaminasi Pb yang lebih tinggi dibandingkan dedak padi. Sedangkan untuk logam Fe, kadar tertinggi ditemukan pada sampah restoran dengan 35,42 mg/kg, diikuti oleh dedak padi sebesar 19,18 mg/kg, dan sampah pasar yang memiliki kadar Fe terendah sebesar 6,79 mg/kg. Ini menunjukkan bahwa sampah restoran memiliki kandungan besi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dua sampel lainnya. Dari hasil ini, dapat diketahui bahwa sampah restoran memiliki konsentrasi logam berat Fe dan Pb yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampah pasar dan dedak padi. Hal ini juga sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa bahwa nilai konsentrasi Pb

dan Fe lebih tinggi ditemukan pada makanan magot berbahan dasar sayuran dan sampah organik dibandingkan dengan dedak padi (Addeo dkk., 2024; Bessa dkk., 2021).



Gambar 4.14 Grafik tingkat kandungan logam berat pada sampah

Pada grafik pertama yang menunjukkan kadar Fe, sampah restoran memiliki kandungan tertinggi sebesar 35,42 mg/kg, diikuti oleh dedak padi dengan 19,18 mg/kg, dan sampah pasar memiliki kadar terendah yaitu 6,79 mg/kg. Kandungan Fe yang lebih tinggi pada sampah restoran dan dedak padi disebabkan oleh komposisi makanan yang kaya zat besi yang terbuang dalam proses konsumsi atau produksi. Sementara itu, pada grafik kedua yang menunjukkan kadar Pb, sampah restoran juga memiliki kandungan tertinggi sebesar 0,3085 mg/kg, diikuti oleh sampah pasar dengan 0,2271 mg/kg, dan dedak padi dengan 0,1569 mg/kg. Kadar Pb ini menunjukkan adanya potensi kontaminasi timbal pada ketiga jenis sampel, dengan sampah restoran dan sampah pasar yang mungkin berasal dari sumber kontaminasi lingkungan atau kemasan yang digunakan dalam proses pengolahan makanan.

B. Logam Berat Pada Air Akuaponik

Berdasarkan tabel yang menampilkan data logam berat pada air akuaponik di hari pertama, kita dapat melihat hasil uji kandungan logam berat Pb (timbal), Fe (besi), Cr (kromium), dan Cd (kadmium) pada tiga jenis reaktor: Kontrol, Sampah Restoran, dan Sampah Pasar. Pada tabel, terlihat bahwa logam Pb tidak terdeteksi di reaktor Kontrol dan Sampah Pasar ND, yang menunjukkan di bawah limit deteksi), tetapi terdeteksi dalam jumlah kecil sebesar 0,12 mg/L di reaktor Sampah Resto.

Pada logam Fe, reaktor Kontrol menunjukkan kadar tertinggi dengan 1,08 mg/L, sementara pada Sampah Resto dan Sampah Pasar, Fe tidak terdeteksi. Logam Cr (kromium) terdeteksi dalam jumlah kecil pada Sampah Resto sebesar 0,02 mg/L dan Kontrol sebesar 0,003 mg/L, namun tidak terdeteksi pada Sampah Pasar. Sementara itu, Cd (kadmium) hanya terdeteksi dalam kadar yang sangat rendah pada Kontrol dengan 0,03 mg/L, dan tidak terdeteksi pada dua reaktor lainnya.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa reaktor Sampah Resto mengandung sedikit Pb dan Cr, sementara reaktor Kontrol menunjukkan kadar Fe tertinggi serta sedikit kandungan Cr dan Cd. Sebaliknya, pada reaktor Sampah Pasar, hampir semua logam berat tidak terdeteksi. Hasil ini mengindikasikan adanya variasi kandungan logam berat berdasarkan jenis sampah yang digunakan dalam sistem akuaponik, yang dapat memengaruhi kualitas air serta potensi dampaknya terhadap organisme dalam sistem tersebut. Pemantauan lebih lanjut diperlukan untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan penggunaan air dalam akuaponik, khususnya terhadap keberadaan logam berat seperti Pb dan Fe yang bisa memengaruhi lingkungan dan hasil budidaya.

Tabel 4.15 Kadar Logam Berat (mg/L) Pada Air Akuaponik

Jenis Reaktor	Hari ke 1			
	Pb	Fe	Cr	Cd
Kontrol	ND	1,08	0,003	0,03
Sampah Resto	0,12	ND	0,02	ND
Sampah Pasar	ND	ND	ND	ND

(Yudiantono, 2024)

Berdasarkan tabel yang menampilkan data kandungan logam berat pada air akuaponik pada hari ke-30, terlihat bahwa terdapat variasi kadar logam berat Pb (timbal), Fe (besi), Cr (kromium), dan Cd (kadmium) di tiga jenis reaktor: Kontrol, Sampah Resto, dan Sampah Pasar. Pada logam Pb, reaktor Kontrol menunjukkan kadar sebesar 0,41 mg/L, sedangkan pada reaktor Sampah Resto kadar Pb lebih tinggi yaitu 0,55 mg/L. Namun, Pb tidak terdeteksi di reaktor Sampah Pasar ND. Ini menunjukkan bahwa reaktor yang menggunakan sampah restoran memiliki kandungan timbal yang lebih tinggi dibandingkan kontrol, sementara reaktor sampah pasar relatif lebih aman dari kontaminasi timbal. Untuk logam Fe, reaktor Sampah Resto memiliki kadar tertinggi yaitu 2,41 mg/L, diikuti oleh Sampah Pasar dengan 1,93 mg/L. Sementara pada reaktor Kontrol, Fe tidak terdeteksi ND. Ini menunjukkan bahwa penggunaan sampah restoran dan pasar dalam sistem akuaponik menghasilkan peningkatan kadar Fe yang signifikan dibandingkan dengan kontrol.

Logam Cr terdeteksi dalam jumlah kecil pada semua reaktor. Sampah Resto memiliki kadar Cr tertinggi yaitu 0,036 mg/L, diikuti oleh Kontrol sebesar 0,03 mg/L, dan Sampah Pasar dengan

kadar Cr sebesar 0,024 mg/L. Kadar Cr yang terdeteksi relatif rendah di semua reaktor, namun masih menunjukkan adanya kontaminasi. Untuk logam Cd, reaktor Kontrol memiliki kadar tertinggi sebesar 0,33 mg/L, diikuti oleh Sampah Resto dengan 0,24 mg/L, dan Sampah Pasar dengan kadar terendah sebesar 0,17 mg/L. Kadar Cd pada reaktor kontrol lebih tinggi daripada dua reaktor lainnya, meskipun nilainya masih dalam rentang yang perlu diwaspadai.

Kandungan logam berat dalam air akuaponik terindikasi berasal dari sumber air sumur. Penelitian sebelumnya oleh Ismayanti (2019) menunjukkan bahwa analisis kandungan logam pada air minum dengan sumber air sumur di sekitar lingkungan studi yang sama memperoleh hasil Pb, Fe, Cr, dan Cd, sebesar 0,21, 0,62, <0,0004, dan 0,008 mg/L secara berturut-turut. Penelitian lainnya juga menganalisis kandungan logam berat pada air tanah di sekitar lokasi studi yang sama menunjukkan logam Pb berkisar 0,0006 – 0,016 mg/L dan Fe sekitar 0,0148 – 0,1039 mg/L (Khuwarizmi, 2023). Hal ini menunjukkan adanya kontaminasi logam berat pada sumber air yang digunakan dalam sistem akuaponik, sehingga terdapat potensi akumulasi logam berat di dalam sistem tersebut.

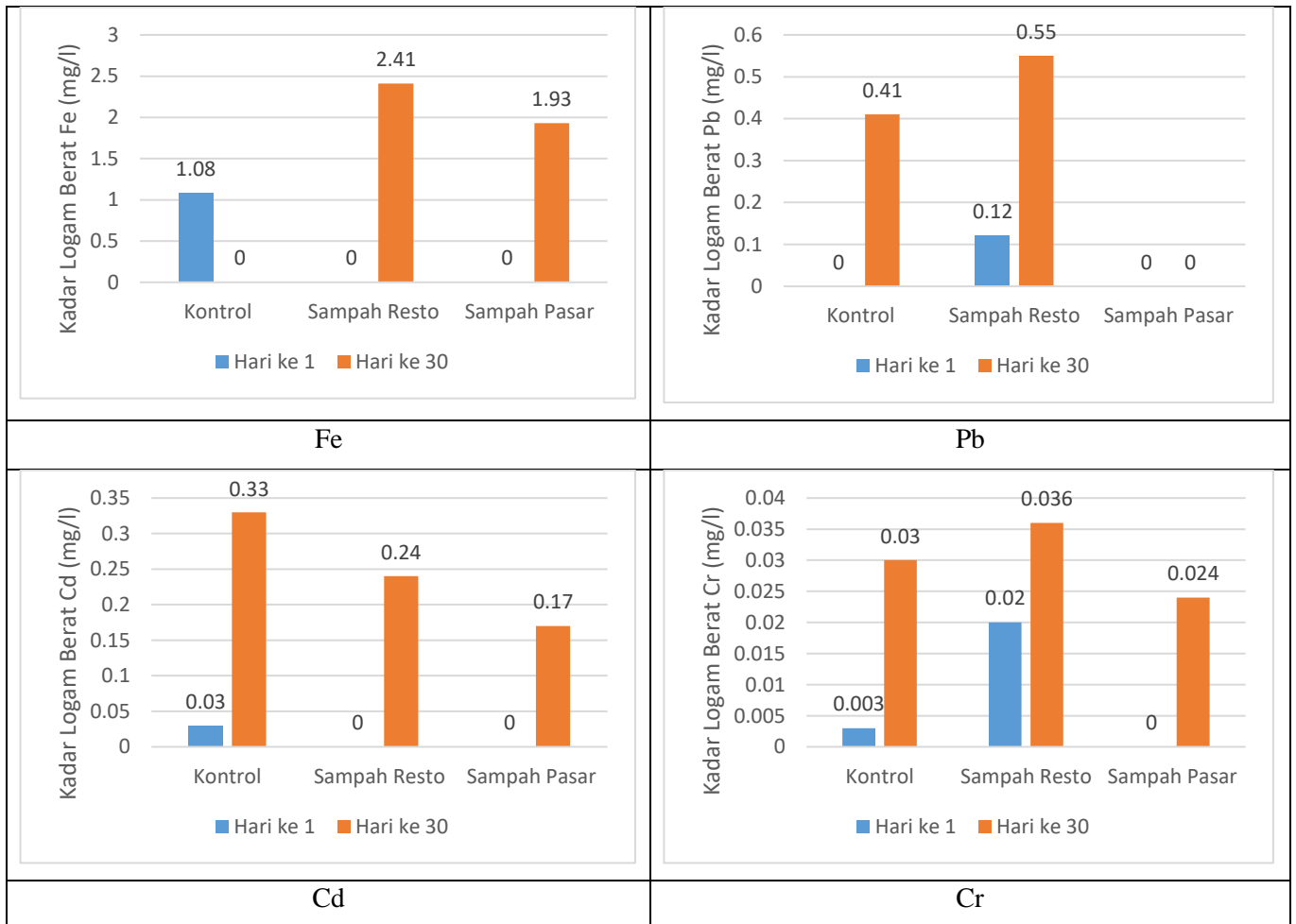
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa reaktor Sampah Resto memiliki kadar logam berat yang lebih tinggi, khususnya pada Fe dan Pb, yang menunjukkan potensi risiko lebih besar terhadap kualitas air akuaponik. Sampah Pasar memiliki kadar Fe yang juga tinggi, namun relatif lebih rendah untuk Pb dan Cd. Pemantauan kadar logam berat sangat penting dalam sistem akuaponik untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan memastikan bahwa logam berat tidak terakumulasi hingga level yang membahayakan tanaman, ikan, dan lingkungan sekitarnya.

Tabel 4.16 Kandungan Logam Berat (mg/kg) pada air Akuaponik

Jenis Reaktor	Hari ke 30			
	Pb	Fe	Cr	Cd
Kontrol	0,41	ND	0,03	0,33
Sampah Resto	0,55	2,41	0,036	0,24
Sampah Pasar	ND	1,93	0,024	0,17

(Yudantono, 2024)

Berikut ini merupakan grafik perbandingan kadar logam berat pada air akuaponik pada hari 1 dan 30:



Gambar 4.15 Grafik kandungan logam berat pada air akuaponik

C. Logam Berat Pada Tanaman Selada

Berdasarkan grafik yang ditampilkan, dapat dilihat bahwa kadar logam berat Fe (besi), Pb (timbal), Cd (kadmium), dan Cr (kromium) diuji pada tiga jenis reaktor: Reaktor Kontrol (R1), Sampah Restoran (R2), dan Sampah Pasar (R3). Hasilnya menunjukkan bahwa Sampah Resto (R2) memiliki kadar logam berat tertinggi di semua parameter. Pada Fe, Sampah Resto mencatatkan 60,95 mg/kg, jauh lebih tinggi dibandingkan Sampah Pasar (41,03 mg/kg) dan Bak Kontrol (30,96 mg/kg), yang menunjukkan bahwa sampah dari restoran berkontribusi besar terhadap kadar besi yang tinggi dalam tanaman.

Tabel 4.175 Kadar Logam Berat pada Tanaman Selada

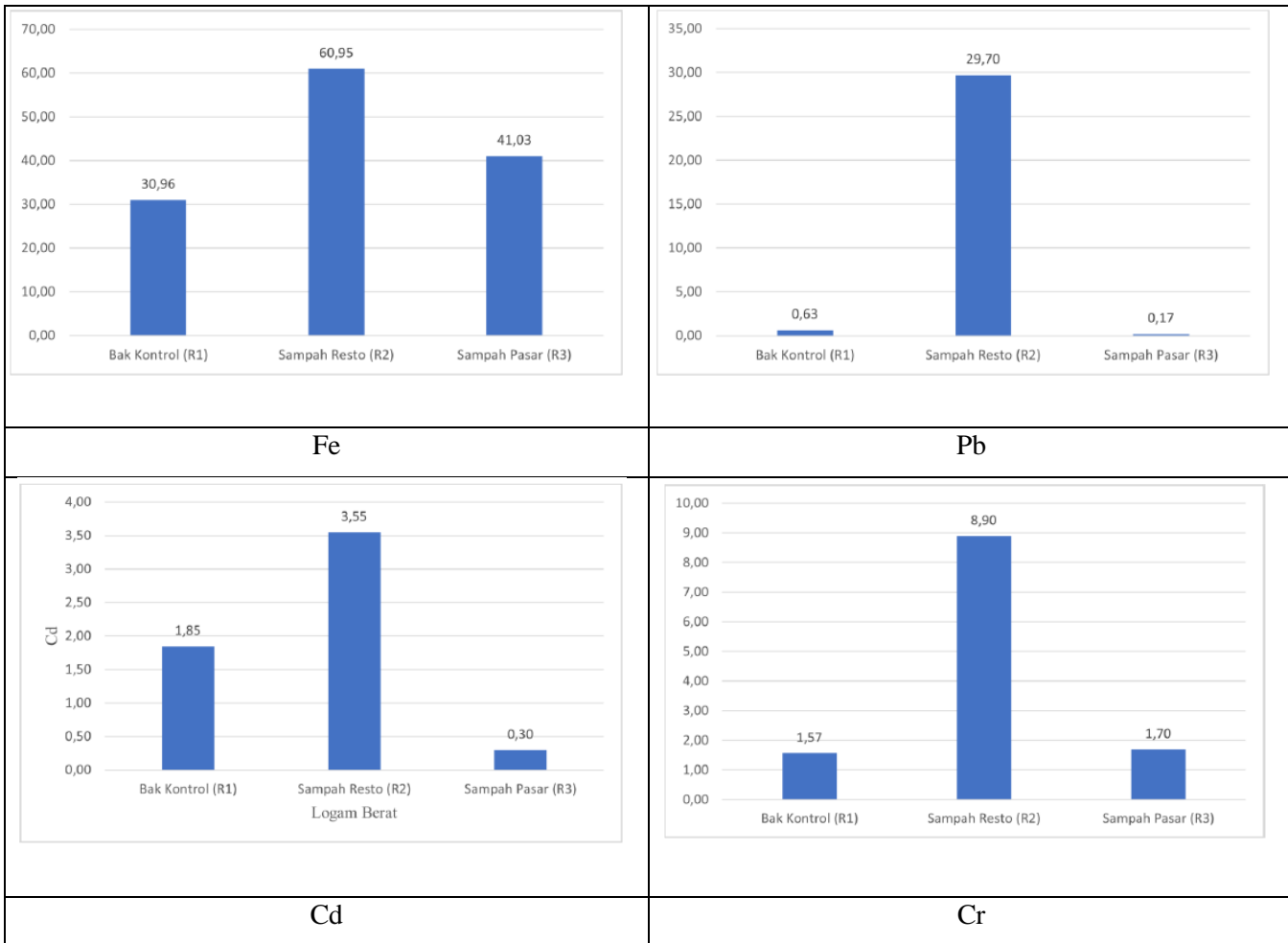
Reaktor	Logam Berat (mg/kg)			
	Cd	Fe	Pb	Cr
Bak Kontrol (R1)	1,85	30,96	0,63	1,57
Sampah Resto (R2)	3,55	60,95	29,70	8,90
Sampah Pasar (R3)	0,30	41,03	0,17	1,70

(Putra, 2024)

Pada logam Pb, Sampah Restoran juga menunjukkan kadar tertinggi dengan 29,70 mg/kg, sedangkan Bak Kontrol dan Sampah Pasar hanya memiliki kadar Pb masing-masing 0,63 mg/kg dan 0,17 mg/kg. Ini menunjukkan bahwa sampah restoran berpotensi menimbulkan risiko kontaminasi timbal yang jauh lebih tinggi pada tanaman. Hal serupa terjadi pada Cd, di mana Sampah Resto mencatat 3,55 mg/kg, jauh lebih besar dibandingkan reaktor kontrol 1,85 mg/kg dan Sampah Pasar (0,30 mg/kg). Pada Cr, kadar tertinggi juga tercatat pada Sampah Resto dengan 8,90 mg/kg, sementara Sampah Pasar dan Bak Kontrol memiliki kadar yang hampir sama, yaitu 1,70 mg/kg dan 1,57 mg/kg.

Berdasarkan Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 5 Tahun 2018 tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan Olahan, kadar maksimum logam Pb dan Cd adalah 0,20 dan 0,05 mg/kg secara berturut-turut. Dari hasil penelitian, kandungan Pb dan Cd pada semua reaktor melebihi batas maksimum yang ditetapkan, kecuali pada reaktor Sampah Pasar, di mana kandungan Pb masih memenuhi baku mutu. Sebaliknya, hasil penelitian terhadap kandungan logam pada selada yang beredar di pasar tradisional dan supermarket di Yogyakarta menunjukkan kadar Pb sekitar 0,07793 – 0,1338 mg/kg (Wardhani & Aditiyarini, 2024). Kadar tersebut masih dalam batas yang sesuai dengan baku mutu yang berlaku.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa sampah dari restoran memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kadar logam berat, terutama Pb, Fe, Cd, dan Cr, dibandingkan dengan sampah pasar dan kontrol.



Gambar 4.16 Kandungan konsentrasi logam berat mg/kg pada tanaman selada akuaponik

D. Logam Berat Pada Larva BSF

Empat jenis logam berat yang diukur, yaitu timbal (Pb), kadmium (Cd), besi (Fe), dan kromium (Cr), dengan satuan mg/kg. Setiap sampel, mulai dari umur Larva BSF-0 hingga umur Larva BSF-21 dari berbagai media seperti sampah restoran, sampah pasar, dan kontrol (dedak), menunjukkan variasi kandungan logam berat yang berbeda. Beberapa logam seperti Cd dan Cr tidak terdeteksi (ND) dalam beberapa sampel, sementara Fe menunjukkan kadar lebih tinggi antar sampel. Analisis ini memberikan gambaran mengenai akumulasi logam berat dalam larva BSF yang dapat digunakan untuk evaluasi keamanan dan kualitas lingkungan.

Tabel 4,18 Tingkat Logam Berat BSF Berdasarkan Umur

Sampel	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cr (mg/kg)
Larva BSF-0	0,298	ND	27,23	ND
Larva BSF-10 Sampah Restoran	0,101	ND	0,46	ND
Larva BSF-10 Sampah Pasar	0,146	ND	1,71	0,207
Larva BSF-10 Kontrol	0,098	ND	16,61	ND
Larva BSF-21 Sampah Restoran	ND	ND	1,32	ND
Larva BSF-21 Sampah Pasar	0,087	ND	4,09	ND
Larva BSF-21 Kontrol	0,078	ND	6,08	ND

(Sinensis, 2024)

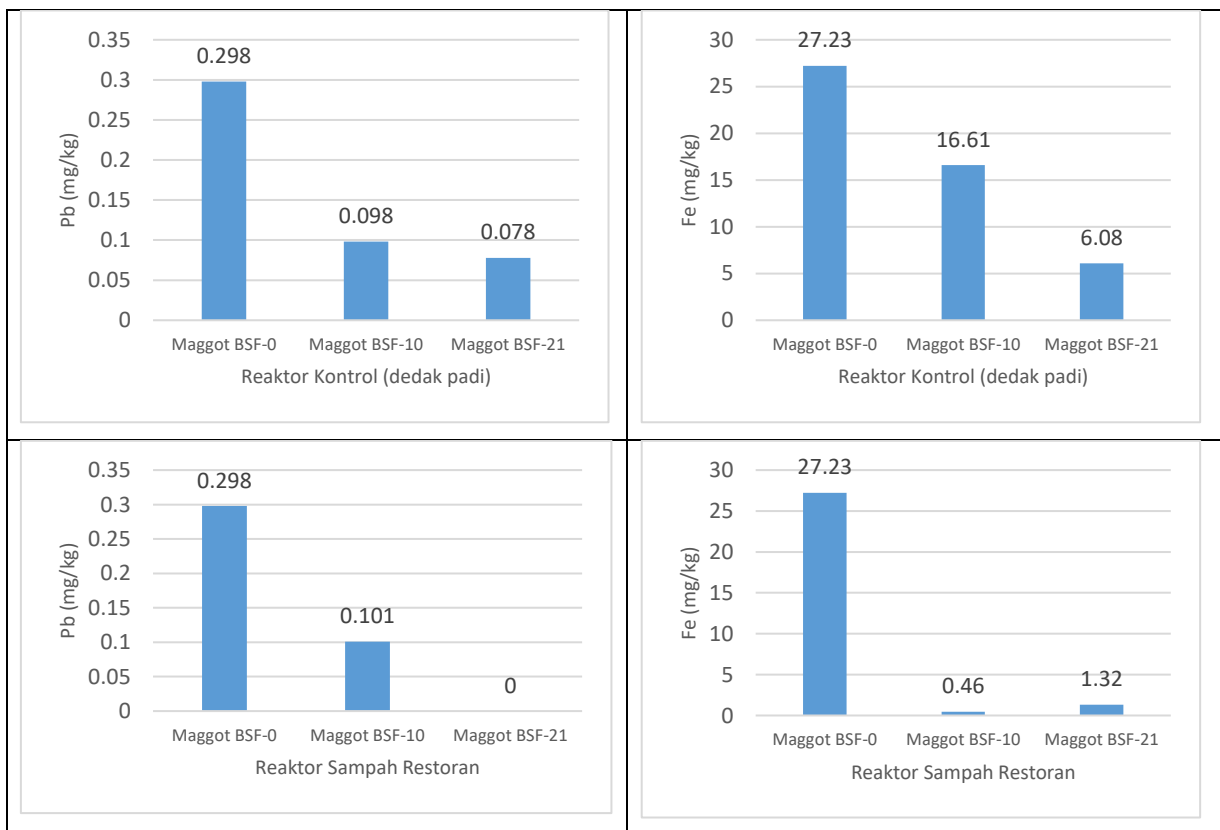
Kadar Logam Berat Pb (Timbal): Pada hari ke-0 (Larva BSF-0), kadar Pb awal sebesar 0,298 mg/kg. Pada hari ke-10, larva yang diberi sampah restoran memiliki kadar Pb sebesar 0,101 mg/kg, larva yang diberi sampah pasar sebesar 0,146 mg/kg, dan larva kontrol sebesar 0,098 mg/kg. Pada hari ke-21, kadar Pb dalam larva dari sampah restoran tidak terdeteksi (ND), sementara kadar Pb dalam larva yang diberi sampah pasar dan kontrol masing-masing sebesar 0,087 mg/kg dan 0,078 mg/kg. Secara umum, kadar Pb dalam larva menurun seiring waktu, namun larva yang mengonsumsi sampah restoran dan pasar menunjukkan konsentrasi Pb lebih tinggi dibandingkan kontrol. Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa kadar Pb pada dedak padi (0,00363 mg/kg) lebih rendah dibandingkan pada larva BSF yang mengonsumsi sayuran (0,258 mg/kg) (Addeo dkk, 2024).

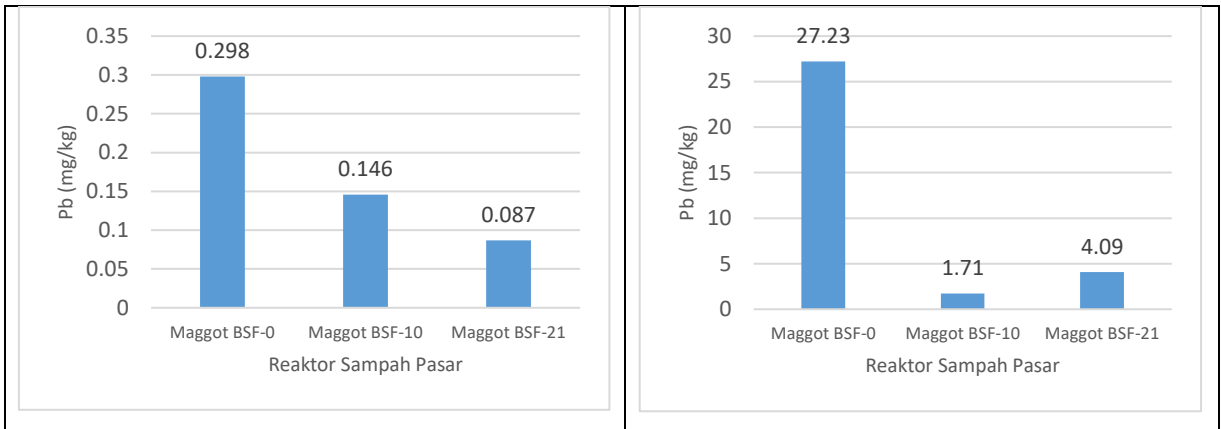
Kadar Logam Berat Cd (Kadmium): Kadmium tidak terdeteksi (ND) pada semua sampel larva baik pada hari ke-0, hari ke-10, maupun hari ke-21. Hal ini menunjukkan bahwa larva BSF mungkin memiliki kemampuan untuk menghindari akumulasi kadmium. Kadar Logam Berat Fe (Besi): Pada hari ke-0, kadar Fe mencapai 27,23 mg/kg. Pada hari ke-10, kadar Fe pada larva yang diberi sampah restoran turun drastis menjadi 0,46 mg/kg, sedangkan larva dari sampah pasar memiliki kadar Fe sebesar 1,71 mg/kg, dan larva kontrol sebesar 16,61 mg/kg. Pada hari ke-21, kadar Fe dalam larva dari sampah restoran sedikit meningkat menjadi 1,32 mg/kg, sementara

kadar pada larva yang diberi sampah pasar dan kontrol naik menjadi 4,09 mg/kg dan 6,08 mg/kg masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan Fe dapat bervariasi tergantung pada jenis pakan dan waktu pemeliharaan. Konsentrasi Fe pada BSF kontrol lebih tinggi dibandingkan larva BSF yang mengonsumsi sampah pasar dan restoran. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa kandungan Fe pada dedak (252,7 mg/kg) lebih tinggi dibandingkan pada larva BSF yang mengonsumsi sampah organik dari produk sereal (197,3 mg/kg) (Bessa dkk., 2021).

Kadar Logam Berat Cr (Kromium): Kromium hanya terdeteksi pada larva yang diberi sampah pasar pada hari ke-10, dengan kadar 0,207 mg/kg. Pada sampel lainnya dan waktu lainnya, kadar Cr tidak terdeteksi (ND), menunjukkan bahwa kandungan Cr dalam larva BSF umumnya rendah.

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa kadar logam berat dalam larva BSF bervariasi tergantung pada jenis sampah yang dikonsumsi dan umur larva. Kadar Pb cenderung menurun seiring waktu, sedangkan kadar Fe menunjukkan variasi yang lebih kompleks dengan peningkatan pada hari ke-21 untuk beberapa jenis sampah. Kandungan Cd dan Cr sebagian besar tidak terdeteksi, menunjukkan bahwa larva BSF mungkin memiliki kemampuan untuk menghindari akumulasi beberapa logam berat tertentu dari pakan yang dikonsumsi.



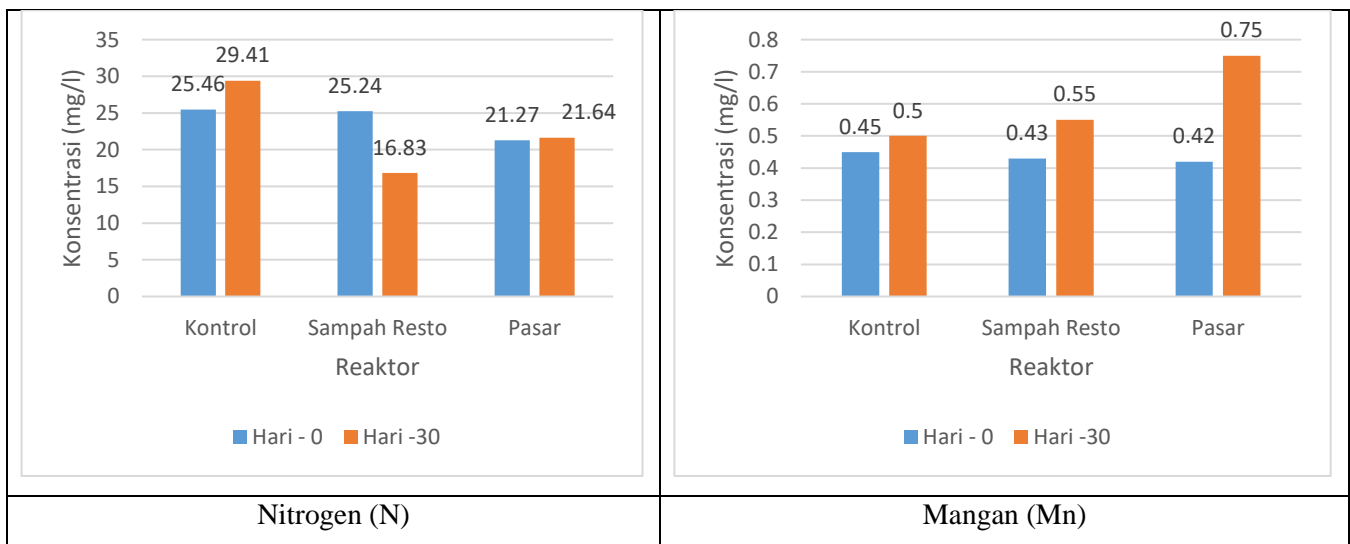


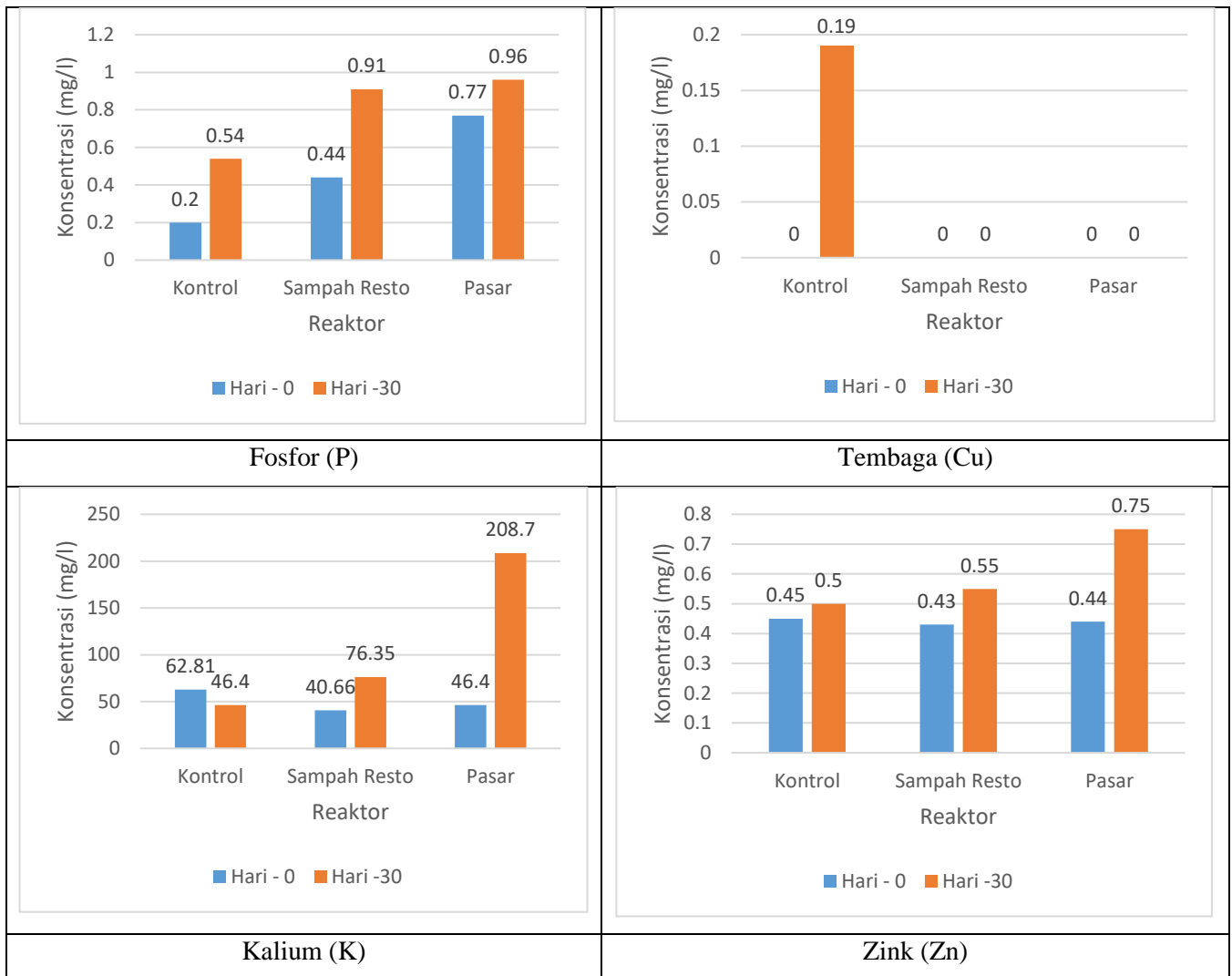
Gambar 4.17 Grafik logam berat Pb dan Fe pada larva BSF berdasarkan media dan umur

4.7 Ketersediaan Nutrisi Akuaponik

Dalam sistem akuaponik, ketersediaan nutrisi mikro dan makro serta pH air sangat dipengaruhi oleh kepadatan ikan dan jumlah pakan yang diberikan. Tetapi berdasarkan penelitian sebelumnya sistem akuaponik perlu adanya tambahan keberadaan mikronutrient yang tidak bisa didapatkan dari pakan maupun ikan. Dalam penelitian ini input yang diberikan adalah pakan ikan pada bak kontrol, serta air sisa produksi larva BSF yang berasal dari media sampah restoran dan sampah pasar. Sistem ini dibuat dalam tiga reaktor, di mana masing-masing reaktor akan diuji ketersediaan nutrisi mikro seperti mangan (Mn), tembaga (Cu), dan seng (Zn), serta nutrisi makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Pakan ikan pada bak kontrol memberikan kontribusi terhadap ketersediaan nutrisi, sementara air sisa produksi larva BSF, yang mengandung bahan organik terdekomposisi dari sampah restoran dan pasar, memperkaya sistem dengan berbagai unsur hara.

A. Nutrisi Tanaman (Makro dan Mikro)





(Albardhawi, 2024; Respati, 2024)

Gambar 4.18 Grafik tingkat nutrisi makro dan mikro pada air akuaponik

Terlihat konsentrasi nutrisi makronutrient pada air akuaponik yang paling tinggi untuk kalium (K) dan Fosfor (P) adalah pada reaktor dengan air lindi sampah pasar, di ikuti oleh dengan air lindi sampah resto. Tetapi berdasarkan kadar Nitrogen (N), paling tinggi berasal dari reaktor kontrol yang tanpa adanya tambahan air lindi sampah. Adapun konsentrasi nutrisi mikro nutrient paling tinggi meningkat untuk logam Mangan (Mn) dan Zink (Zn) adalah dengan air lindi sampah pasar diikuti dengan sampah restoran.

Berdasarkan hasil ini dapat diketahui bahwa adanya metabolisme ikan dapat meningkatkan kandungan N dengan baik, tetapi efisiensinya menurun jika terdapat kandungan organik dari air lindi sampah pasar maupun restoran sehingga nitrifikasi tidak berlangsung optimal. Sedangkan kandungan K, P, dan logam seperti Mn, dan Zn

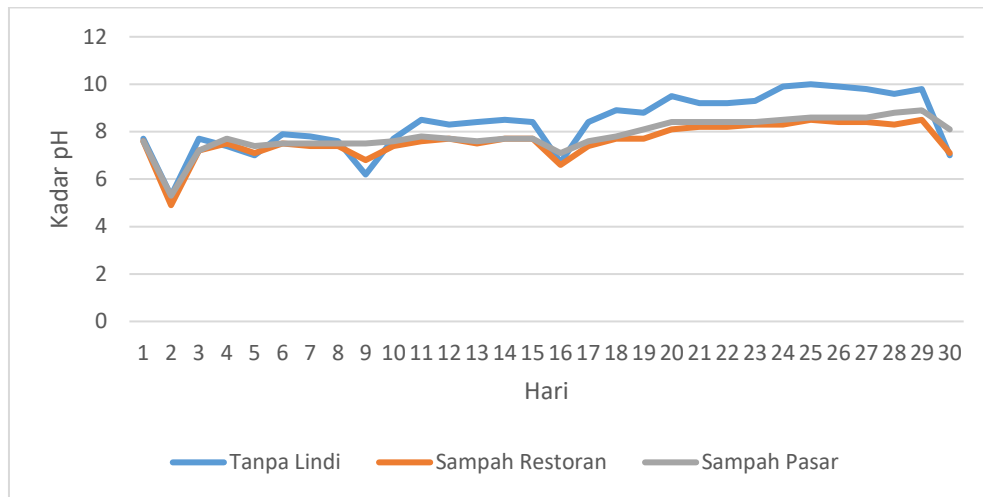
meningkat seiring dengan adanya tambahan air lindi sampah. Sehingga dengan rasio yang tepat kedua cairan ini dapat di optimalisasikan untuk membuat nutrisi tanaman yang baik secara alami.

Berdasarkan Keputusan Menteri Pertanian RI No. 261 Tahun 2019 untuk parameter unsur hara mikro Mn, Cu, Zn untuk pupuk organik cair adalah 25 – 500 ppm (Sumber X). Namun, karakteristik unsur hara mikro dalam penelitian ini belum memenuhi standar mutu tersebut. Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa hasil kasgot dari sampah organik rumah tangga menghasilkan unsur hara makro (N, P, K) dan mikro (Mn, Cu, Cd) yang masih di bawah standar baku mutu (Sari dkk., 2022).

Penggunaan pupuk magot juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan nutrisi pada tanah, di mana kandungan N, P, dan K dilaporkan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan tanah kontrol tanpa pupuk magot (Kesumaningrat et al, 2023). Selain itu, pemanfaatan larva BSF memiliki potensi besar dalam mengelola limbah organik dari industri pertanian, mempercepat proses penguraian sampah organik, serta meningkatkan kualitas unsur hara pada pupuk yang dihasilkan (Palma dkk., 2020).

B. Tingkat Keasaman (pH)

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai pH awal untuk ketiga reaktor berada dalam kisaran normal, dengan pH awal untuk reaktor tanpa lindi (R1) sebesar 7,7, reaktor dengan sampah restoran (R2) sebesar 7,6, dan reaktor dengan sampah pasar (R3) juga sebesar 7,6. Namun, pada hari kedua, terjadi penurunan signifikan pada ketiga perlakuan, terutama pada reaktor R2 dan R3 yang mencapai pH di bawah 5. Hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan akumulasi zat organik dari media sampah yang meningkatkan keasaman sistem.



(Albardhawi, 2024)

Gambar 4.19 Grafik tingkat keasaman (pH) pada air akuaponik

Selama periode penelitian, pH pada masing-masing reaktor menunjukkan pola fluktuatif. Pada beberapa hari, pH meningkat drastis, seperti pada hari ke-10 dan hari ke-18, di mana nilai pH untuk semua perlakuan kembali meningkat mendekati 8. Pada reaktor tanpa lindi (R1), nilai pH tertinggi tercatat pada hari ke-25 dengan pH 10. Fluktuasi serupa juga terlihat pada reaktor dengan sampah restoran (R2) dan pasar (R3), dengan nilai pH tertinggi masing-masing sebesar 8,5 dan 8,6. Menjelang akhir periode penelitian, pH untuk ketiga perlakuan terlihat lebih stabil, dengan rentang antara 7 hingga 8, meskipun terjadi sedikit penurunan pada hari terakhir (hari ke-30). Perubahan ini menunjukkan bahwa sistem akuaponik memiliki mekanisme buffering alami untuk menyeimbangkan tingkat keasaman setelah beberapa waktu.

Pada penelitian ini memperlihatkan bahwa penambahan media sampah restoran dan pasar dalam sistem akuaponik mempengaruhi fluktuasi pH, terutama pada awal-awal masa operasional. Namun, seiring waktu, sistem tampaknya beradaptasi dan menjaga pH dalam kisaran yang relatif stabil, terutama setelah hari ke-20. Sehingga didapatkan bahwa adanya tetesan sampah dapat menetralkan pH air pada akuaponik yang pada dasarnya memiliki nilai tingkat keasaman basa. Dengan adanya cairan sampah atau lindi ini menyebabkan pH air menjadi netral sehingga masuk di range pH yang sesuai untuk tanaman yaitu pada 6-7. Penelitian sebelumnya mengenai pemanfaatan larva BSF untuk pengomposan menunjukkan nilai pH yang cenderung netral, sekitar 7 (Herdiatiningsih dkk., 2023; Purwanto dkk., 2024). Secara keseluruhan, nilai pH dalam penelitian ini masih berada dalam rentang yang aman dan memenuhi standar pupuk organik cair

berdasarkan Keputusan Menteri Pertanian RI No. 261 Tahun 2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenh Tanah, yaitu pH 4 – 9.

4.8 Sistem Integrasi Produksi BSF dengan Akuaponik

A. Kandungan nitrogen pada model dengan nilai aktual

Berdasarkan model ketersediaan nitrogen pada sistem akuaponik di hari ke-30 sebagai NO_3^- akhir adalah 7,6 mg/l sedangkan berdasarkan hasil uji lab pada air akuaponik kontrol di hari ke -30 didapatkan konsentrasi nitrogen sebagai (NH_4 dan NO_3^-) sebesar 3,95 mg/l. Penelitian ini telah menunjukkan adanya perbedaan antara hasil model dan data pengujian laboratorium terkait konsentrasi nitrogen (NO_3). Perbedaan ini menekankan pentingnya perlakuan penyesuaian keseimbangan densitas tanaman dan ikan serta melakukan pendalaman dan validasi lebih lanjut terhadap parameter-parameter input yang digunakan dalam model, seperti produksi TAN oleh metabolisme ikan, efisiensi konversi TAN menjadi nitrat, kapasitas penyerapan nitrat oleh tanaman, *Surface Specific TAN removal rate* dan *Surface Nitrate Removal Rate*. Dengan melakukan pengujian laboratorium yang lebih komprehensif dan mengkalibrasi parameter-parameter tersebut, model diharapkan dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi nyata. Penelitian di masa mendatang perlu fokus pada pengumpulan data empiris yang lebih luas untuk meningkatkan akurasi model dalam sistem akuaponik.

B. Hubungan air lindi sampah, logam berat dan ikan

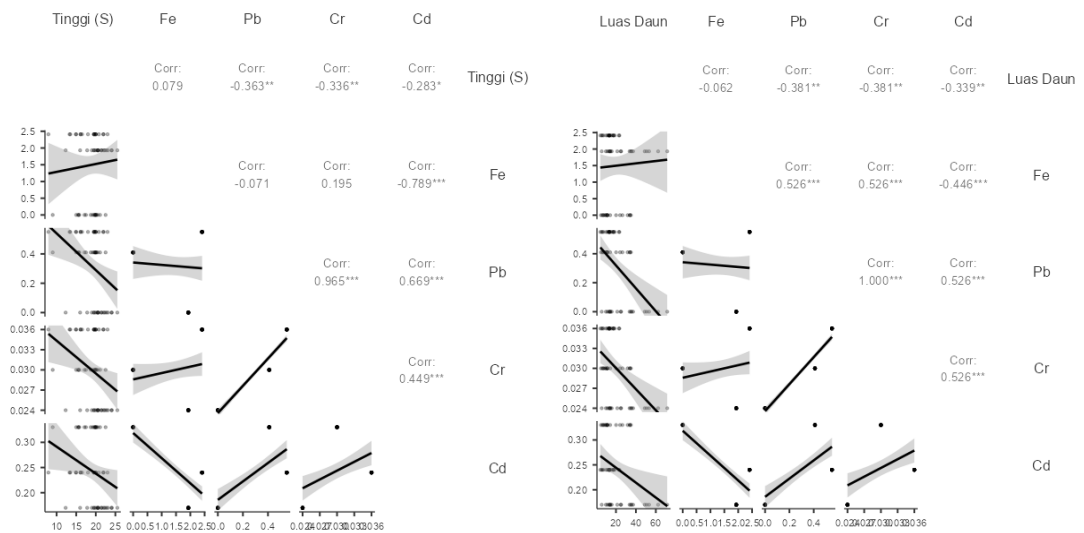
Penambahan air lindi sampah organik yang berasal dari reaktor produksi larva BSF, tidak meningkatkan kadar logam berat Cr dan Cd karena pada hasil uji sampah maupun pada larva kandungan logam berat tersebut *Not Determined* (ND). Tetapi adapun logam berat Pb dan Fe ditemukan konsentrasi pada sampah dan kemungkinan tersirkulasi dalam sistem akuaponik melalui air lindi sampah yang menetes ke dalam sistem. Seperti yang dijelaskan pada flowchart produksi larva BSF, terdapat kadar air yang hilang selama proses yang diasumsikan sangat sedikit tingkat penguapan ataupun penyerapan air oleh larva, maka kadar air yang masuk ke dalam sistem akuaponik adalah berurutan reaktor sampah restoran (R3) 18,1 kg sedangkan reaktor sampah pasar (R2) sebesar 23,7 kg. Masuknya air lindi sampah organik ini mengakibatkan menurunnya tingkat Survival Rate (SR) pada ikan. Pada sistem akuaponik R2 nilai SR 0% dan R3 memiliki nilai SR 66,7%, hal ini terjadi dikarenakan *Total Organic Carbon* (TOC) dari cairan sampah tinggi, mengakibatkan meningkatnya *Biological Oxygen Demand* (BOD) untuk proses dekomposisi sehingga menurunkan nilai *Dissolved Oxygen* (DO). Tingkat pertumbuhan masa dan panjang ikan pun menjadi terganggu akibat adanya penambahan cairan organik.

C. Hubungan air lindi sampah, nutrient, logam berat dan pertumbuhan tanaman

Cairan sampah organik yang masuk kedalam sistem akuaponik dapat meningkatkan ketersediaan nutrient dalam sistem akuaponik. Ketersediaan makronutrient NPK jika dibandingkan dengan kontrol R1 yang dengan pakan ikan, penambahan air lindi sampah organik pada R2 dan R3 dapat meningkatkan konsentrasi K dan P, tetapi ketersediaan N menurun. Rendahnya kadar N ini diakibatkan oleh adanya kandungan organik yang tinggi mengakibatkan menurunnya efektifitas bakteri nitrifikasi untuk memproses ammonia (NH_4) (S Wongkiew dkk, 2017).

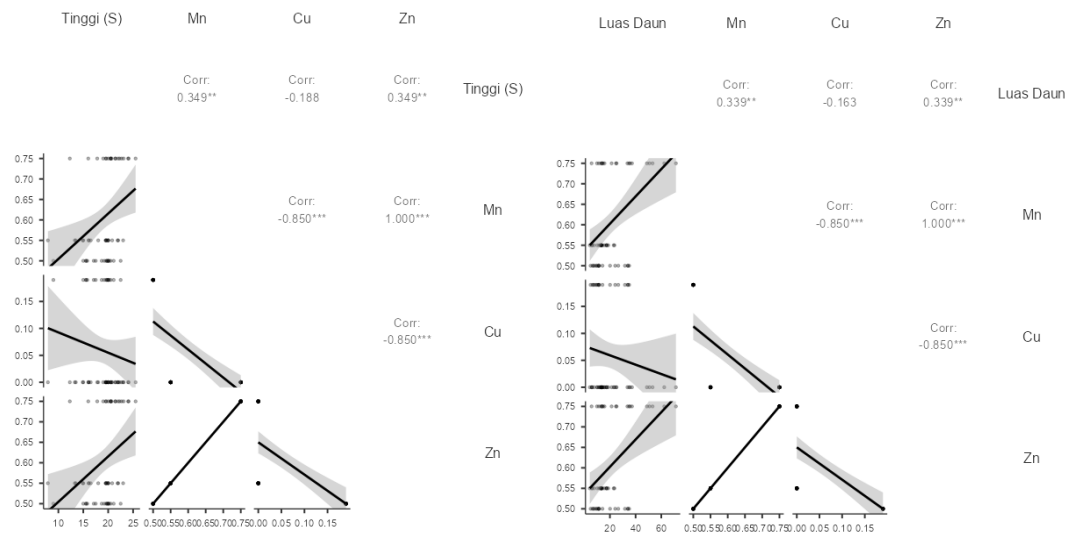
Ketersediaan mineral atau mikronutrient juga meningkat terutama pada kadar Mn dan Zn paling tinggi terdapat pada air lindi sampah pasar R3. Kadar Cu pada R2 dan R3 tidak ditemukan atau ND tetapi terdeteksi kadar Cu pada R1. Dalam dugaan adanya kandungan Cu pada R1 disebabkan oleh adanya kabel atau komponen pompa submersible yang terbuka selama proses penelitian sehingga terjadi elektrolisis dan terlarutnya logam Cu. Kandungan logam berat Cd dan Cr pada air akuaponik tidak dipengaruhi oleh cairan lindi sampah, hal ini dibuktikan dengan tidak ditemukannya kandungan logam berat Cd dan Cr pada sampah restoran dan sampah pasar, serta tidak adanya akumulasi logam berat pada larva BSF. Adapun kandungan Cd dan Cr diduga berasal dari media tanam yang digunakan yaitu *rockwool*. Media tanam ini biasa digunakan di Indonesia sebagai media tanam hidroponik yang bahan bakunya merupakan batuan yang di panaskan lalu di dinginkan dengan cepat sehingga membentuk sebuah fiber. Dalam jurnal Heather, F. (2017) *rockwool* mengandung logam berat tetapi kadarnya masih dibawah standar FDA dan berpotensi melarutkan logam berat dalam suasana asam.

Sedangkan pada tingkat pertumbuhan tanaman pada akuaponik R1, R2, dan R3 memiliki nilai yang bervariasi mempengaruhi tinggi dan lebar daun. Berdasarkan data tinggi tanaman dan lebar daun paling secara berurutan paling baik adalah pada R3, R1 dan R2. Uji korelasi dilakukan berdasarkan keberadaan konsentrasi logam berat dan mikronutrient yang ada dalam air terhadap nilai tinggi dan lebar daun sebagai berikut:



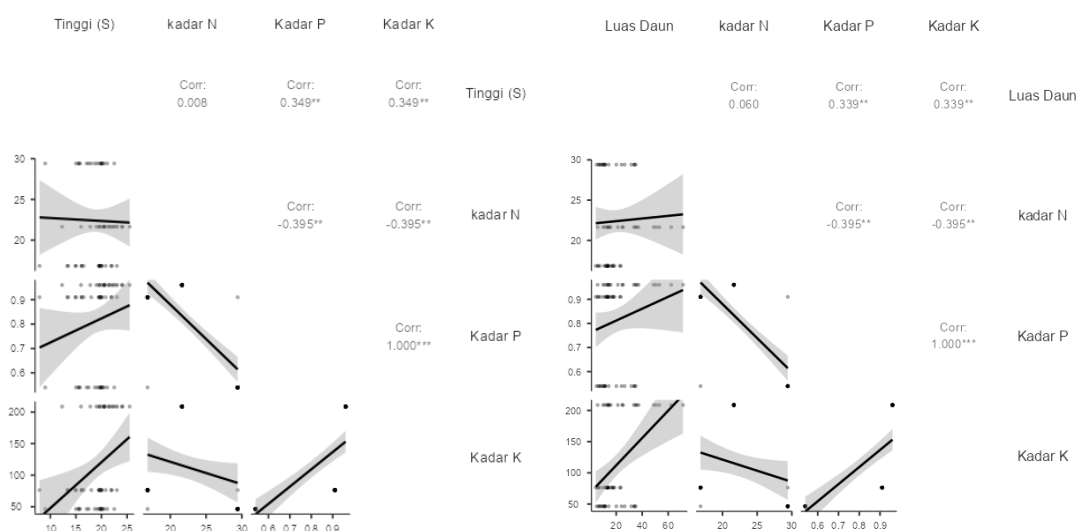
Gambar 4.20 Plot grafik korelasi hubungan pertumbuhan tanaman dengan kadar logam berat pada air akuaponik

Berdasarkan hasil pengujian korelasi, terhadap tanaman kadar Pb menunjukkan korelasi negatif dengan tingkat pengaruh sedang, terhadap luas daun maupun tinggi tanaman, sehingga semakin tinggi kadar Pb dalam air maka nilai luas daun dan tinggi tanaman cenderung menurun. Logam berat Fe menunjukkan korelasi tingkat pengaruh rendah terhadap luas daun maupun tinggi tanaman, sehingga konsentrasi Fe tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap pertumbuhan tanaman. Pada logam berat Cr memiliki korelasi negatif dengan tingkat pengaruh sedang terhadap luasdaun dan tinggi tanaman, yang artinya peningkatan konsentrasi Cr dapat menghambat pertumbuhan tanaman dengan pengaruh sedang pada kedua aspek tersebut. Pengaruh logam berat Cd memiliki korelasi negatif pada luas daun dan tinggi tanaman, dengan tingkat pengaruh sedang, yang berarti semakin tingginya konsentrasi Cd pada air akuaponik maka pertumbuhan tanaman akan semakin terhambat.



Gambar 4.21 Plot grafik korelasi hubungan pertumbuhan tanaman dengan mikronutrient pada air akuaponik

Berdasarkan gambar 4.21 diketahui bahwa pengaruh konsentrasi Mn dalam air akuaponik menunjukkan korelasi positif dengan tingkat pengaruh sedang terhadap luas daun dan tinggi tanaman, sehingga semakin tinggi konsentrasi Mn semakin tinggi nilai luas daun dan tinggi tanaman. Sedangkan pengaruh konsentrasi Cu memiliki korelasi negatif dengan tingkat pengaruh yang rendah, sehingga peningkatan konsentrasi Cu tidak memberikan dampak yang berarti terhadap luas daun dan tinggi tanaman. Sementara konsentrasi Zn menunjukkan korelasi positif terhadap luas daun dan tinggi tanaman dengan tingkat pengaruh sedang, sehingga semakin tinggi konsentrasi Zn maka semakin tinggi nilai luas daun dan tinggi tanaman.



Gambar 4.22 Plot grafik korelasi hubungan pertumbuhan tanaman dengan Makronutrient pada air akuaponik

Berdasarkan gambar 4.22 diketahui bahwa pengaruh konsentrasi N,P,K dalam air akuaponik menunjukkan korelasi positif dengan tingkat pengaruh tinggi terhadap luas daun dan tinggi tanaman, sehingga semakin tinggi konsentrasi NPK semakin tinggi nilai luas daun dan tinggi tanaman.

D. Hasil Uji One-Way ANOVA non Parametrik

1. Tinggi tanaman selada

Pengujian asumsi dilakukan untuk memvalidasi data yang ada. Uji normalitas Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa data tidak memenuhi asumsi normalitas ($W = 0,920$, $p < 0,001$), yang dapat mempengaruhi keandalan hasil ANOVA. Namun, uji homogenitas varians Levene's mengindikasikan bahwa varians antar kelompok tidak berbeda secara signifikan ($F = 0,962$, $p = 0,388$), sehingga menunjukkan bahwa asumsi homogenitas varians terpenuhi. Dari data yang tidak memenuhi asumsi normalitas sehingga digunakan analisis

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Tinggi	0.920	< .001

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Tinggi	0.962	2	55	0.388

ANOVA One-Way non Parametrik dengan metode Kruskal Wallis sebagai berikut hasilnya:

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p
Tinggi Selada	9.33	2	0.009

Hasil uji Kruskal-Wallis yang dilakukan untuk variabel Tinggi Selada, diperoleh nilai Chi-square (χ^2) sebesar 9,33 dengan degree of freedom (df) sebesar 2. Nilai p-value yang dihasilkan adalah 0,009, yang berada di bawah 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara kelompok-kelompok yang diuji terkait tinggi selada. Untuk menentukan perbedaan antar kelompok secara lebih rinci, dilakukan Post-Hoc Test dengan pairwais comparison sebagai berikut:

Pairwise comparisons - Tinggi Selada

		W	p
R1	R2	-0.352	0.967
R1	R3	3.848	0.018
R2	R3	3.580	0.031

Berdasarkan hasil pairwise comparisons variabel Tinggi Selada, dapat dilihat bahwa perbandingan antara kelompok R1 dan R2 menghasilkan nilai W sebesar -0,352 dengan p-value 0,967. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok R1 dan R2 karena p-value jauh di atas 0,05. Selanjutnya, perbandingan antara R1 dan R3, nilai W yang dihasilkan adalah 3,848 dengan p-value sebesar 0,018. Ini menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok R1 dan R3, karena p-value < 0,05. Perbandingan terakhir, antara R2 dan R3, menghasilkan nilai W sebesar 3,580 dengan p-value sebesar 0,031 terdapat perbedaan signifikan antara kelompok R2 dan R3 karena p-value < 0,05. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa kelompok R3 berbeda signifikan baik dari kelompok R1 maupun R2, sementara tidak ada perbedaan signifikan antara R1 dan R2.

2. Luas daun tanaman selada

Pada pengecekan asumsi normalitas dengan uji Shapiro-Wilk, didapatkan nilai W sebesar 0,959 dengan $p = 0,046$, yang menunjukkan bahwa asumsi normalitas tidak terpenuhi, karena nilai p lebih kecil dari 0,05. Selain itu, uji homogenitas varians menggunakan uji Levene menunjukkan hasil yang signifikan ($F = 16,6$, $df1 = 2$, $df2 = 55$, $p < 0,001$), yang berarti asumsi homogenitas varians juga tidak terpenuhi.

	W	p
Luas daun	0.959	0.046

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

	F	df1	df2	p
Luas daun	16.6	2	55	< .001

Dari data yang tidak memenuhi asumsi normalitas sehingga digunakan analisis ANOVA One-Way non Parametrik dengan metode Kruskal Wallis sebagai berikut hasilnya:

	χ^2	df	p
Luas Daun	9.77	2	0.008

Berdasarkan hasil uji Kruskal-Wallis untuk variabel Luas Daun, diperoleh nilai Chi-square (χ^2) sebesar 9,77 dengan degree of freedom (df) sebesar 2 dan p-value sebesar 0,008. Karena $p\text{-value} < 0,05$, ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik dalam luas daun di antara kelompok-kelompok yang diuji.

	W	p
R1 R2	-0.434	0.950
R1 R3	3.452	0.039
R2 R3	4.075	0.011

Berdasarkan hasil pairwise comparisons untuk variabel Luas Daun, dapat dilihat bahwa perbandingan antara kelompok R1 dan R2 menghasilkan nilai W sebesar -0,434 dengan p-value 0,950. Ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok R1 dan R2, karena p-value jauh lebih besar dari 0,05. Perbandingan antara R1 dan R3 menghasilkan nilai W sebesar 3,452 dengan p-value sebesar 0,039. Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan signifikan antara kelompok R1 dan R3, karena p-value < 0,05. Perbandingan antara R2 dan R3 menghasilkan nilai W sebesar 4,075 dengan p-value sebesar 0,011, yang juga menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara R2 dan R3, karena p-value < 0,05. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa kelompok R3 berbeda signifikan dengan kelompok R1 dan R2, sedangkan tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok R1 dan R2.

E. Hasil penilaian produksi larva, ikan dan tanaman

Berikut ini merupakan tabel penilaian hasil produksi larva, ikan, dan tanaman. Nilai yang diberikan antara 1-3, dimana nilai paling tinggi adalah 3, nilai sedang adalah 2, dan nilai paing rendah adalah 1. Berdasarkan penilaian ini produksi larva terbaik adalah pada hasil perlakuan R2 yaitu budidaya dengan media sampah restoran. Sedangkan pada produksi ikan, hasil paling baik adalah pada perlakuan R1 yaitu hanya berisi air akuaponik saja tanpa adanya tambahan lindi. Kemudian untuk produksi tanaman hasil terbaik adalah pada perlakuan reaktor R3 yang dimana adanya perlakuan penambahan lindi sampah pasar kedalam sistem akuaponik dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman.

Reaktor	Produksi Larva BSF					Nilai Produksi
	Panjang	Lebar	Protein	Biomasa akhir	WRI	
R1 (air akuaponik)*	2	2	2	2	2	10
R2 (air akuaponik + lindi sampah restoran)	3	3	3	3	1	13
R3 (air akuaponik + lindi sampah pasar)	1	1	1	1	3	7

*R1 merupakan reaktor kontrol larva menggunakan media dedak padi, yang lindinya tidak masuk kedalam sistem akuaponik

Reaktor	Produksi Ikan Nila		Nilai Produksi Ikan
	Survival Rate	Biomassa Akhir	
R1 (air akuaponik)	3	3	6
R2 (air akuaponik + lindi sampah restoran)	1	1	2

R3 (air akuaponik + lindi sampah pasar)	2	2	4
---	---	---	---

Reaktor	Produksi Tanaman Selada			Nilai Produksi Tanaman
	Tinggi	Luas daun	Biomasa Akhir	
R1 (air akuaponik)	2	2	2	6
R2 (air akuaponik + lindi sampah restoran)	1	1	1	3
R3 (air akuaponik + lindi sampah pasar)	3	3	3	9

Reaktor	Produksi Kasgot		Nilai Produksi Kasgot
	Berat	Kualitas	
(K1) Media dedak	1	3	4
(K2) Media sampah restoran	3	2	5
(K3) Media sampah pasar	2	1	3

Reaktor	Nilai Produksi Larva	Nilai Produksi Ikan	Nilai Produksi Tanaman	Nilai Produksi Kasgot	Nilai Produksi Integrasi
R1 (air akuaponik)	10	6	6	4	26
R2 (air akuaponik + lindi sampah restoran)	13	2	3	5	23
R3 (air akuaponik + lindi sampah pasar)	7	4	9	3	23

BAB V

Kesimpulan

1. Perancangan teknologi reaktor BSF dengan akuaponik mampu menghasilkan tanaman selada yang dengan berat basah 67,5 g dengan survival rate (SR) ikan nila 100% pada alat R1. Tetapi hasil panen terbaik adalah R3 dengan menghasilkan 125,19 g berat basah tanaman selada dengan SR 66,7% ikan nila, dan dapat menghasilkan 1,67 kg larva BSF dengan *Waste Reduction Indeks* (WRI) 4,10 %/hari. Sedangkan R2 menghasilkan berat basah selada paling rendah yaitu 50,2 g, dengan SR ikan nila 0%, tetapi menghasilkan 4,3 kg larva BSF paling tinggi dengan WRI sebesar 2,87%/hari.

2. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa hasil pengolahan reaktor BSF, baik lindi maupun kasgot, berkontribusi terhadap peningkatan kualitas air dalam akuaponik. Sistem ini memberikan dampak positif pada pertumbuhan tanaman dengan peningkatan berat basah, tinggi tanaman, dan luas daun dibandingkan sistem akuaponik tanpa reaktor BSF.

3. Efektivitas dan efisiensi sistem integrasi reaktor BSF dengan akuaponik tidak lebih unggul dibandingkan sistem akuaponik konvensional. Sistem integrasi ini dapat menunjang nutrisi tanaman, tetapi berpotensi menurunkan SR akuakultur, sehingga alat ini masih perlu di sesuaikan lagi inputnya agar dapat menghasilkan biomassa maggot, ikan, kasgot dan tanaman yang lebih tinggi, sekaligus menghilangkan kebutuhan input eksternal seperti pupuk tambahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Addeo, N. F., Scivicco, M., Vozzo, S., Bovera, F., Asiry, K. A., Alqurashi, S., ... & Severino, L. (2024). Mineral profile and heavy metals bioaccumulation in black soldier fly (*Hermetia illucens*, L.) larvae and frass across diverse organic substrates. *Italian Journal of Animal Science*, 23(1), 179-188.
- Ahmad, I. K., Peng, N. T., Amrul, N. F., Basri, N. E. A., Jalil, N. A. A., & Azman, N. A. (2023). Potential Application of Black Soldier Fly Larva Bins in Treating Food Waste. *Insects*, 14(5), 434.
- Alam, M. G. M., Snow, E. T., & Tanaka, A. (2003). Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh. *Science of the total environment*, 308(1-3), 83-96.
- Albardhawi, M. (2024). Analisis Makronutrien (No₃, NH₄, P, dan K) pada Air dalam Alat Integrasi Akuaponik dengan Reaktor Maggot Black Soldier Fly (Bachelor thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Alvarez, L. (2012). The role of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.)(Diptera: Stratiomyidae) in sustainable waste management in Northern Climates.
- Ashok, A. D., & Sujitha, E. (2021). Greenhouse structures, construction and design. *Int. J. Chem. Stud*, 9(1), 40-45.
- Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia. (2018). Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 5 Tahun 2018 tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan Olahan. BPOM.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). SNI 06-6989-52:2005 – Air dan air limbah – Bagian 52: Metoda pengujian krom total (Cr) secara spektrofotometri serapan atom. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). SNI 6989-69:2009 – Air dan air limbah – Bagian 69: Metoda pengujian kalium dalam air limbah dengan AAS. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 6989-31:2021 – Air dan air limbah – Bagian 31: Metode pengujian amonia (NH₃-N) dengan spektrofotometri. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 8910:2021 – Cara uji kadar logam dalam contoh uji limbah padat, sedimen, dan tanah dengan metode destruksi asam

- menggunakan Spektrometer Serapan Atom (SSA)-Nyala atau Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometric (ICP-OES). Badan Standardisasi Nasional
- Baganz, G. F., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., ... & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 252-264.
- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed—a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105-120.
- Bessa, L. W., Pieterse, E., Marais, J., Dhanani, K., & Hoffman, L. C. (2021). Food safety of consuming black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: Microbial, heavy metal and cross-reactive allergen risks. *Foods*, 10(8), 1934.
- Biancarosa, I., Sele, V., Belghit, I., Ørnsrud, R., Lock, E. J., & Amlund, H. (2018). Replacing fish meal with insect meal in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) does not affect contaminant accumulation or stress response. *Scientific Reports*, 8(1), 5587.
- Bin Syofyan, P., Sundari, E., & Munzir, A. (2022). Pengolahan Sampah Organik Menggunakan Larva Black Soldier Fly Atau Maggot. *Jurnal Implementasi Riset*, 2(1), 44-54.
- Bodolan, C., & Brătucu, G. (2013). Heat and light requirements of vegetable plants.
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. IUCN.
- Brady, N. C. (1984). *The nature and properties of soils*.
- Campen, J. B. (2004, September). Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions. In *International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys2004* 691 (pp. 419-424).
- Charlton, A. J., Dickinson, M., Wakefield, M. E., Fitches, E., Kenis, M., Han, R., ... & Smith, R. (2015). Exploring the chemical safety of fly larvae as a source of protein for animal feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(1), 7-16.
- Chen, Y. C. (2018). Effects of urbanization on municipal solid waste composition. *Waste management*, 79, 828-836.
- Christin, Yessica, I. Wayan Restu, and Gde Raka Angga Kartika. "Laju Pertumbuhan Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) pada Tiga Sistem Resirkulasi yang Berbeda." *Current Trends in Aquatic Science* 4.2 (2021): 122-127.

- Cullere, M., Tasoniero, G., Giaccone, V., Miotti-Scapin, R., Claeys, E., de Smet, S., & Dalle Zotte, A. (2019). Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: Apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. *Animal*, 13(1), 194-204.
- De Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., & Futter, M. N. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Science of the Total Environment*, 645, 1029-1039.
- Diener, S., Solano, N. M. S., Gutiérrez, F. R., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2015). Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), 357-363.
- Diener, S., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2011). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 29(9), 1076-1080.
- Diener, S., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2015). Bioaccumulation of heavy metals in the black soldier fly, *Hermetia illucens* and effects on its life cycle. *Journal of insects as food and feed*, 1(4), 261-270.
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B. M., & Zurbrügg, C. (2017). *Black Soldier Fly Biowaste Processing—A Step-by-Step Guide*. Eawag-Sandec.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Erickson, M.C., Islam, M., Sheppard, C., Liao, J., & Doyle, M.P. (2004). Reduction of *Escherichia coli* O157 and *Salmonella enterica* serovar Enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly. *Journal of Food Protection*, 67(4), 685-690.
- Fahmi, M. R. (2015, March). Optimalisasi proses biokonversi dengan menggunakan mini-larva *Hermetia illucens* untuk memenuhi kebutuhan pakan ikan. In *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia* (Vol. 1, No. 1, pp. 139-144).
- Faradila, S., Syamsuddin, N. M., Jariyah, A., & Wahyuni, S. (2023). Media Tumbuh yang Berbeda Terhadap Tingkat Produksi dan Kandungan Nutrisi Maggot Black Soldier Fly. *Buletin Veteriner Udayana Volume*, 15(3), 490-497.
- Gabler, F., & Vinnerås, B. (2014). Using black soldier fly for waste recycling and effective *Salmonella* spp. reduction. Theses. Swedish University of Agricultural Sciences, Swedish.

- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 0116.
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18. doi:10.15666/aeer/0301_001018
- Goddek, S., Espinal, C. A., Delaide, B., Jijakli, M. H., Schmutz, Z., Wuertz, S., & Keesman, K. J. (2015). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water*, 7(12), 4189-4213.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer.
- Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrügg, C., & Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302-318.
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156.
- Guo, T., Lou, C., Zhai, W., Tang, X., Hashmi, M. Z., Murtaza, R., ... & Xu, J. (2018). Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-term application of manure. *Science of the Total Environment*, 635, 995-1003.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2018). Heavy metal toxicity in plants: Toxic effects, tolerance mechanisms, and nutrient management to improve crop production. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 1-13.
- He, Z. L., Yang, X. E., & Stoffella, P. J. (2019). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54, 259-263.
- Hendriatiningsih, S. L., Medina, S. I., Affan, I. H., Al-Fitriani, S. R. S., & Radianto, D. O. (2023). Pemanfaatan Larva BSF (Black Soldier Fly) Sebagai Metode Pengomposan Limbah Sisa Makanan Dan Dedaunan. *KOLONI*, 2(2), 306-313.
- Hirsan, F. P., Ibrahim, I., Salikin, S., Ghazali, M., & Nurhayati, N. (2021). Pelatihan Pengelolaan Sampah Sisa Makanan Restoran Apung Berbasis Agen Biologi Black Soldier Fly (BSF). *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 4(3).

- Holmes, L. A., Vanlaerhoven, S. L., & Tomberlin, J. K. (2017). Relative humidity effects on the life history of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 46(5), 1284-1292.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127-141.
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167-182. doi:10.1093/bmb/ldg032
- Jasni, A. S., Ahmad, S. S., & Shaari, M. F. (2021). Greenhouse Daylight Illuminance for Users' Satisfaction in Hot and Humid Climate. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 6(16), 81-91.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). Komposisi Sampah di Indonesia. Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Diakses pada 29 Oktober 2024, dari <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2019). Keputusan Menteri Pertanian Nomor 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenh Tanah. Kementerian Pertanian.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2019). Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia No. 261 Tahun 2019 tentang Standar Kualitas dan Mutu Hasil Pertanian. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Kesumaningwati, R., Darma, S., & Ramadhan, N. M. Aplikasi Pupuk Maggot Terhadap Sifat Kimia Tanah, Pertumbuhan, dan Hasil Tanaman Sawi Hibrida (*Brassica juncea* L). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab* ISSN, 2622, 3570.
- Khuwarizmi, M. A. (2023). Analisis Sebaran Logam Berat Pada Air Tanah Menggunakan Metode Inverse Distance Weighting (IDW) di Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Universitas Islam Indonesia.
- Kok, R. "Preliminary project design for insect production: part 4—facility considerations." *Journal of Insects as Food and Feed* 7.5 (2021): 541-552.
- Kok, R. (2021). Preliminary project design for insect production: part 1—overall mass and energy/heat balances. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 499-510.
- Kok, R. (2021). Preliminary project design for insect production: part 2—organism kinetics, system dynamics and the role of modelling & simulation. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 511-524.

- Kok, R. (2021). Preliminary project design for insect production: part 3–sub-process types and reactors. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 525-539.
- Kroeckel, S., Harjes, A.G.E., Roth, I., Katz, H., Wuertz, S., Susenbeth, A., & Schulz, C. (2012). When a turbot goes black: evaluation of fishmeal replacement with animal protein sources on European seabass and turbot growth performance and product quality. *Aquaculture Research*, 43(10), 773-784.
- Kumar, V., Parihar, R. D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., ... & Thukral, A. K. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, 124364.
- Lalander, C., Diener, S., Zurbrügg, C., & Vinnerås, B. (2019). Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, 208, 211-219.
- Lenz, R., Enders, K., & Nielsen, T. G. (2016). Microplastic exposure studies should be environmentally realistic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(29), E4121-E4122.
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2017). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 122, 52-59.
- Lestari, A., Suwandi, S., & Qurthobi, A. (2020). Pengaruh Suhu Sintesis Aditif Terhadap Nilai Kalor Briket Sampah Organik. *eProceedings of Engineering*, 7(2).
- Lestari, S. (2016). Perilaku Pedagang Dalam Membuang Sampah (Studi Di Kawasan Bandar Jaya Plaza Kelurahan Bandarlaja Timur Kecamatan Terbanggi Besar Kabupaten Lampung Tengah).
- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J.K., & Yu, Z. (2011). Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste Management*, 31(6), 1316-1320.
- Licamele, J. D. (2009). Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system (Doctoral dissertation, The University of Arizona)
- Liu, X., Chen, X., Wang, H., Yang, Q., ur Rehman, K., Li, W., ... & Zheng, L. (2017). Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLoS One*, 12(8).

- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74.
- Marshall, F., Agarwal, R., Te Lintelo, D., Bhupal, D. S., Singh, R. P. B., Mukherjee, N., ... & Singh, S. D. (2003). Heavy metal contamination of vegetables in Delhi. Executive summary of technical report, 1-10.
- Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuze, V., & Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33.
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dabbou, S., Biasato, I., De Marco, M., ... & Gasco, L. (2018). Effect of different substrates on the growth and chemical composition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Journal of Insect Science*, 18(1), 1-9.
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dabbou, S., Biasato, I., De Marco, M., ... & Gasco, L. (2018). Effect of different substrates on the growth and chemical composition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Journal of Insect Science*, 18(1), 1-9.
- Mulyaningsih, L. (2024). Pengaruh Pemberian Dosis Pupuk Kasgot (Bekas Maggot) dan NPK Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tiga Varietas Jagung Manis (*Zea mays Saccharata* Sturt. L). *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 6(4), 504-510.
- Needleman, H. (2004). Lead poisoning. *Annual Review of Medicine*, 55(1), 209-222. doi:10.1146/annurev.med.55.091902.103653
- Nguyen, T. T. X., Tomberlin, J. K., & Vanlaerhoven, S. (2015). Ability of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae to Recycle Food Waste. *Environmental Entomology*, 44(2), 406-410.
- Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K., & Vanlaerhoven, S. (2015). Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development. *Journal of Medical Entomology*, 52(3), 413-419.
- Niyomthongchai, D., Limphitakphong, N., & Chavalparit, O. (2017, April). Reusing Rockwool Insulation Waste as Plant Substrate: A Case Study of Flase Heather (*Cuphea hyssopifolia* Humb.). In *Materials Science Forum* (Vol. 886, pp. 128-132). Trans Tech Publications Ltd.

- Novianto, I., Hudha, M., & Pristisahida, A. O. (2022). Implementasi IoT Pada Monitoring Suhu dan kelembaban Media Budidaya Maggot Berbasis Wemos D1 Mini. *ULIL ALBAB: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 1(9), 3115-3126.
- Nugraha, A. P. (2024). Analisis Kualitas Fisik dan Kandungan Nutrisi Maggot Black Soldier Fly (BSF) Serta Kasgot dengan Media Sampah Organik (Bachelor thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Nurchasanah, S., Syarifah, R. N. K., Bayyinah, L. N. I., Hanifa, H., & Ratnaningsih, H. R. (2024). Application of Maggot Used Organic Fertilizer (Kasgot) in Food Crops and Horticulture Cultivation. *Prospect: Jurnal Pemberdayaan Masyarakat*, 3(3).
- Nyakeri, E. M., Ogola, H. J., Ayieko, M. A., & Amimo, F. A. (2017). An assessment of waste substrates suitability for organic fertilizer production using black soldier fly larvae. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(3), 259-267.
- Oonincx, D.G.A.B., & de Boer, I.J.M. (2015). Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans – A life cycle assessment. *PLoS ONE*, 7(12), e51145.
- Pahmeyer, M. J., Siddiqui, S. A., Pleissner, D., Gołaszewski, J., Heinz, V., & Smetana, S. (2022). An automated, modular system for organic waste utilization using *Hermetia illucens* larvae: design, sustainability, and economics. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134727.
- Palma, L., Fernández-Bayo, J., Putri, F., & VanderGheynst, J. S. (2020). Almond by-product composition impacts the rearing of black soldier fly larvae and quality of the spent substrate as a soil amendment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12), 4618-4626.
- Panggabean, E. M., Marpaung, R., & Ayuni, S. (2023). Analisis Dampak Limbah Masyarakat Terhadap Pencemaran Lingkungan Di Pasar Mmtc Kecamatan Percut Sei Tuan Kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Wilayah, Kota Dan Lingkungan Berkelanjutan*, 2(2), 137-140.
- Pantanella, E. (2012). Nutrition and quality of aquaponic systems.
- Parodi, A., Leip, A., De Boer, I. J., Slegers, P. M., Ziegler, F., Temme, E. H., ... & Halberg, N. (2020). The potential of future foods for sustainable and healthy diets. *Nature Sustainability*, 3(11), 870-880.

- Pophali, G. R., Patel, C. M., & Chahar, D. S. (2020). Heavy metal accumulation in Black Soldier Fly larvae and its implication for animal feed safety. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 55(1), 29-35.
- Putra, A. F. B. (2024). Analisis Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca Sativa L*) dan Logam Berat pada Alat Integrasi Akuaponik dengan Reaktor Maggot BSF (Bachelor Thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Putri, A. A., & Mirwan, M. (2023). Peningkatan Protein Black Soldier Fly (BSF) Untuk Pakan Ternak Sebagai Hasil Biokonversi Sampah Makanan. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(3), 496-507.
- Ramachandra, T. V., & Bachamanda, S. (2007). Environmental audit of municipal solid waste management. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 7(3-4), 369-391.
- Ramon, A., & Afriyanto, A. (2015). Karakteristik penanganan sampah rumah tangga di kota Bengkulu. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Andalas*, 10(1), 24-31.
- Respati, M. H. (2024). Analisis Mikronutrien (Mn, Cu, Zn) Pada Air dalam Alat Integrasi Akuaponik Dengan Produksi Maggot BSF (Bachelor thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Rist, S., Baun, A., Hartmann, N. B., & Jensen, L. H. (2018). Ingestion of micro- and nanoplastics in *Daphnia magna*—Quantification of body burdens and assessment of feeding rates and reproduction. *Environmental Pollution*, 238, 403-410.
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396-402.
- Rostika, R., Sugiyanto, H. N., & Dewanti, L. P. (2018). The effectiveness of crude papain enzyme supplement for tilapia's (*Oreochromis niloticus*) growth at the floating nets of Cirata Reservoir. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 139, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- Saha, R., Nandi, R., & Saha, B. (2011). Sources and toxicity of hexavalent chromium. *Journal of Coordination Chemistry*, 64(10), 1782-1806. doi:10.1080/00958972.2011.583646
- Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., & Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140, 890-905.

- Sari, D. A. P., Taniwiryo, D., Andreina, R., Nursetyowati, P., & Irawan, D. S. (2022). Pembuatan pupuk organik cair dari hasil pengolahan sampah organik rumah tangga dengan bantuan larva black soldier fly (bsf). *Agro Bali: Agricultural Journal*, 5(1), 102-112.
- Schiavone, A., Dabbou, S., De Marco, M., Cullere, M., Biasato, I., Biasibetti, E., ... & Zotte, A. D. (2017). Black soldier fly larva fat inclusion in finisher broiler chicken diet as an alternative fat source. *Animal*, 11(4), 628-636.
- Setiadi, A. (2015). Studi pengelolaan sampah berbasis komunitas pada kawasan permukiman perkotaan di Yogyakarta. *Jurnal wilayah dan lingkungan*, 3(1), 27-38.
- Setiawan, Y., Sarwono, E., & Asghaf, A. T. F. (2024). Analisis Kualitas Kasgot dari Larva Black Soldier Fy (BSF) dengan Menggunakan Sampah Organik Sayur dan Buah di TPS 3R Pasar Segiri, Kota Samarinda. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(2), 190-195.
- Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2007). Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and environmental safety*, 66(2), 258-266.
- Sheppard, D. C., Newton, G. L., Thompson, S. A., & Savage, S. (1994). A value-added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Technology*, 50(3), 275-279.
- Sheppard, D.C., Newton, G.L., Thompson, S.A., & Savage, S. (2008). A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Technology*, 99(6), 180-186.
- Sinensis, A. T. V. (2024). Pengaruh Sampah Organik Pasar dan Restoran Terhadap Kandungan Logam Berat (Pb, Cd, Fe, Cr) Pada Maggot Black Soldier Fly (Bsf) (Bachelor thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285-296.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, 589, 262.
- Surendra, K. C., Olivier, R., Tomberlin, J. K., Jha, R., & Khanal, S. K. (2020). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. *Renewable Energy*, 147, 679-686.

- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L. H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.))(Diptera: Stratiomyidae)(BSF). *Waste Management*, 117, 58-80.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *Molecular, clinical and environmental toxicology* (pp. 133-164). Springer, Basel.
- Triwijayani, A. U., Lahom, A. W., Bana, F. M. E., Saputra, P. H., Narendra, K. D., Sihombing, E. P., & Elfatma, O. (2023). Kasgot (bekas kotoran maggot) sebagai alternatif pupuk organik dan media tanam cabai merah keriting (*Capsicum annum* L.). *Tropical Plantation Journal*, 2(2), 80-85.
- Tschirner, M., & Simon, A. (2015). Influence of different growing substrates on the nutritional composition of black soldier fly larvae destined for animal feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 249-259.
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6-13.
- Utami, P., Hajoeningtjas, O. D., Nugroho, B., Pamungkas, R. B., Grafiyana, G. A., Budiningsih, S., & Zuhro, R. K. (2022). Egg Hatching Training and Black Soldier Fly Producing Compost as Alternative Feed for Village Chicken Livestock. *Global Community Service*, 1(1), 16-22.
- Veldkamp, T., van Duinkerken, G., van Huis, A., & Lakemond, C.M.M. (2012). Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study. Wageningen University, Livestock Research.
- Wahyudi, J. (2019). Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari pembakaran terbuka sampah rumah tangga menggunakan model IPCC. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK*, 15(1), 65-76.
- Wardhani, C., & Aditiyarini, D. (2024). Analisa Kadar Logam Berat Timbal (Pb) pada Sayur Kubis (*Brassica oleracea* L.) dan Selada (*Lactuca sativa* L.) di Pasar Tradisional dan Supermarket DI Yogyakarta. *Jurnal Biologi Indonesia*, 20(2), 131-140.
- Wibowo, S. (2021). Aplikasi Sistem Aquaponik Dengan Hidroponik DFT Pada Budidaya Tanaman Selada (*Lactuca Sativa* L.). *Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ*, 8(2), 125-133.

- Wijaya, R. (2018). Hasil Dan Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.) Dalam Sistem Akuaponik Ikan Nila, Ikan Lele Dan Ikan Pelangi. *Median: Jurnal Ilmu Ilmu Eksakta*, 10(3), 14-22.
- Wijaya, R. (2018). Hasil Dan Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.) Dalam Sistem Akuaponik Ikan Nila, Ikan Lele Dan Ikan Pelangi. *Median: Jurnal Ilmu Ilmu Eksakta*, 10(3), 14-22.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue?. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647.
- Wu, B., Zhang, Y., Zhang, X. X., & Cheng, S. P. (2017). Health risk assessment of metals in urban soils of Changsha, a developing city in China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(1), 66-78.
- Xiong, J., Tian, Y., Wang, J., Liu, W., & Chen, Q. (2017). Comparison of coconut coir, rockwool, and peat cultivations for tomato production: Nutrient balance, plant growth and fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1327.
- Yudantono, K. Z. (2024). Analisis Logam Berat Pb, Cd, Fe dan Cr Pada Air dalam Alat Integrasi Akuaponik dengan Reaktor Maggot Black Soldier Fly (Bachelor thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges—A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586-1599.