

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	vi
PRAKATA .....	vii
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
ABSTRAK .....	xix
ABSTRACT .....	xxi
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	7
1.3. Tujuan Penelitian .....	9
1.4. Manfaat Penelitian .....	11
1.5. Kebaruan Penelitian .....	11
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....	23
2.1. Perubahan iklim, urbanisasi, dan ketahanan pangan .....	23
2.2. Aplikasi teknologi <i>indoor farming</i> pada <i>urban farming</i> di daerah tropis .....	31
2.3. Peran cahaya dalam proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman .....	34
2.4 Aplikasi teknologi pencahayaan dalam <i>indoor farming</i> .....	35
BAB III. LANDASAN TEORI DAN HIPOTESIS .....	40
3.1 Landasan Teori .....	40
3.1.1 Intensitas dan distribusi cahaya pada <i>indoor farming</i> .....	40
3.1.2 <i>Phenotyping</i> dan stres pada tanaman dalam <i>indoor farming</i> .....	44
3.1.3 Transpirasi pada tanaman dan suhu daun dalam <i>indoor farming</i> .....	46
3.1.4 Kandungan klorofil dan warna daun tanaman dalam <i>indoor farming</i> .....	49
3.1.5 Teknologi <i>image analysis</i> dalam <i>phenotyping</i> tanaman dalam <i>indoor farming</i> . ..	53
3.1.6 <i>Artificial neural network</i> (ANN) dan persamaan matematis dalam <i>phenotyping</i> ..	56
3.1.7 Karakteristik fenotip tanaman Tatsoi ( <i>Brassica rapa subsp. narinosa</i> ) .....	59

3.2 Hipotesis Penelitian.....	62
<b>BAB IV. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>63</b>
4.1 Lokasi Penelitian.....	63
4.2 Bahan.....	63
4.3 Peralatan.....	64
4.4 Prosedur Penelitian.....	66
4.3.1 Prosedur penelitian tahap pertama.....	66
4.3.2 Prosedur penelitian tahap kedua.....	74
4.3.3 Prosedur penelitian tahap ketiga.....	79
<b>BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>88</b>
5.1 Karakterisasi fenotip stres tanaman Tatsoi akibat rendahnya intensitas cahaya matahari dan waktu pengairan .....	89
5.1.1 Kondisi iklim mikro di dalam <i>greenhouse</i> penelitian tahap pertama .....	90
5.1.2 Pertumbuhan tanaman Tatsoi dalam kondisi stres cahaya dan waktu pengairan .....	94
5.1.3 Berat segar dan parameter fisiologi tanaman Tatsoi pada kondisi stres cahaya .....	103
5.1.4 Kebutuhan air dan efisiensi penggunaan air tanaman Tatsoi pada kondisi stres cahaya.....	109
5.1.5 Suhu kanopi daun dan evapotranspirasi tanaman Tatsoi pada kondisi stres cahaya .....	111
5.1.6 Analisis korelogram dan nilai kepentingan untuk karakterisasi fenotip stres tanaman pada kondisi stres cahaya .....	117
5.1.7 Sintetis.....	121
5.2 Karakterisasi fenotip stres tanaman Tatsoi akibat rendahnya nutrisi .....	122
5.2.1 Kondisi iklim mikro di dalam <i>greenhouse</i> penelitian tahap kedua.....	123
5.2.2 Pertumbuhan tanaman Tatsoi pada kondisi stres nutrisi .....	126
5.2.3 Berat segar dan parameter fisiologi tanaman Tatsoi pada kondisi stres nutrisi dan waktu pengairan.....	132
5.2.4 Indeks SPAD, RGB, dan klorofil daun tanaman Tatsoi pada kondisi stres nutrisi .....	134
5.2.5 Analisis korelogram untuk karakterisasi fenotip stres tanaman akibat nutrisi terbatas.....	141
5.2.6 Sintetis.....	144
5.3 Karakterisasi fenotip stres tanaman Tatsoi akibat perubahan sudut datang cahaya artifisial dalam <i>indoor farming</i> .....	145
5.3.1 Kondisi iklim mikro dalam <i>indoor farming</i> penelitian tahap ketiga.....	146

5.3.2 Pertumbuhan tanaman Tatsoi pada <i>indoor farming</i> dengan variasi sudut datang cahaya artifisial.....	151
5.3.3 Produksi biomassa, kebutuhan air, dan karakteristik stomata daun Tatsoi.....	157
5.3.4 Suhu daun dan evapotranspirasi tanaman Tatsoi dalam <i>indoor farming</i> .....	162
5.3.5 Indeks SPAD, RGB, dan klorofil daun tanaman Tatsoi dalam <i>indoor farming</i>	165
5.3.6 Analisis korelogram untuk karakterisasi fenotip stres tanaman akibat perubahan sudut datang cahaya dalam <i>indoor farming</i> .....	172
5.3.7 Sintetis.....	176
5.4 Rekomendasi pengembangan pertanian perkotaan di wilayah tropis dengan pertanian tertutup .....	177
<b>BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>183</b>
6.1. Kesimpulan.....	183
6.2. Saran.....	186
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>188</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>203</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Penelitian terdahulu tentang pengamatan karakteristik tanaman .....	13
Tabel 1. 2 Penelitian terdahulu tentang pengembangan <i>indoor farming</i> .....	18
Tabel 4. 1 Variasi perlakuan nutrisi penelitian tahap kedua .....	75
Tabel 4. 2 Variasi perlakuan sudut datang cahaya pada <i>indoor farming</i> .....	81
Tabel 4.3 Standar signifikansi MAPE .....	85
Tabel 5. 1 Data iklim mikro rata-rata di dalam <i>greenhouse</i> penelitian tahap pertama (Agustus – September 2022).....	90
Tabel 5.2 Hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA rata-rata jumlah dan luas kanopi daun tanaman Tatsoi .....	97
Tabel 5.3 Hasil Uji <i>post-hoc Tukey</i> rata-rata jumlah daun dan luas kanopi daun tanaman Tatsoi .....	98
Tabel 5.4 Hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA untuk nilai rata-rata tinggi tanaman dan luas panjang akar tanaman Tatsoi.....	101
Tabel 5.5 Hasil Uji <i>post-hoc Tukey</i> dari rata-rata tinggi tanaman dan luas panjang akar tanaman Tatsoi .....	101
Tabel 5.6 Hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA untuk nilai rata-rata laju fotosintesis, transpirasi dan berat segar daun tanaman Tatsoi.....	105
Tabel 5.7 Hasil Uji <i>post-hoc Tukey</i> dari rata-rata laju fotosintesis ( $A_N$ ), transpirasi ( $T_r$ ) dan berat segar (BS) daun tanaman Tatsoi.....	106
Tabel 5.8 Hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA untuk parameter kebutuhan air pada variasi naungan dan waktu pengairan.....	110
Tabel 5.9 Hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA untuk parameter efisiensi penggunaan air pada variasi naungan dan waktu pengairan.....	111
Tabel 5.10 Data perbandingan suhu daun dan lingkungan ( $\beta$ ) pada variasi naungan dan waktu pengairan .....	116
Tabel 5.11 Rerata data iklim mikro rata-rata di dalam <i>greenhouse</i> penelitian tahap kedua (Nov – Des 2022) .....	124
Tabel 5.12 Persamaan linier, koefisien determinasi ( $R^2$ ), dan nilai p untuk model SPAD dan indeks RGB daun penelitian tahap kedua .....	140
Tabel 5.13 Persamaan linier, koefisien determinasi ( $R^2$ ), dan nilai p untuk model klorofil dan indeks RGB daun penelitian tahap kedua.....	141
Tabel 5.14 Data iklim mikro rata-rata di dalam <i>indoor farming</i> selama penelitian tahap ketiga (Juli – Agustus 2023).....	147
Tabel 5.15 Karakteristik stomata daun tanaman Tatsoi pada <i>indoor farming</i> .....	159
Tabel 5.16 Nilai RMSE persamaan linier kandungan klorofil daun hasil prediksi dengan persamaan linier yang dibangun pada penelitian tahap kedua .....	169
Tabel 5.17 Persamaan linier kandungan klorofil daun yang dibangun pada penelitian tahap ketiga beserta RMSE-nya .....	170
Tabel 5.18 Rata-rata nilai RMSE, MAPE, dan MASE persamaan RGB untuk prediksi kandungan klorofil daun Tatsoi dalam <i>indoor farming</i> .....	170
Tabel 5.19 Perbandingan parameter tanaman Tatsoi saat panen pada berbagai sistem produksi tanaman.....	178

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Persentase penduduk Indonesia yang tinggal di daerah urban dan rural periode tahun 1950-2050.....	26
Gambar 2.2 Profil suhu udara pada fenomena <i>Urban Heat Island</i> .....	28
Gambar 2.3 Kategori <i>plant factory</i> .....	32
Gambar 2.4 Komposisi energi listrik yang diperlukan dalam <i>indoor farming</i> .....	33
Gambar 3.1 Hubungan antara lumen, FC, lux (Sumber: Lee, 2019) .....	41
Gambar 3.2 Nilai intensitas cahaya pada luas permukaan yang bervariasi (Sumber: Denham (2017)) .....	42
Gambar 3.3 Perbandingan cahaya (lumen) dan daya (Watt) lampu (Sumber: MEPS Building Engineers, 2014) .....	43
Gambar 3.4 Visualisasi spektrum cahaya (Sumber: growlightmeter.com, n.d.)....	43
Gambar 3.5 Hubungan antara sinyal stres dan pertumbuhan tanaman (Sumber: Zhang et al., 2020) .....	45
Gambar 3.6 Diagram <i>Causal loop</i> model karakteristik stres tanaman.....	46
Gambar 3.7 Proses transpirasi pada tanaman dalam indoor farming.....	48
Gambar 3. 8 Struktur daun dan kloroplas ( <i>chloroplast</i> ) (Sumber: Carlson, n.d.)..	49
Gambar 3. 9 Kemungkinan tingkat representasi gambar pada <i>image analysis</i> untuk deteksi dan klasifikasi objek (Sumber: Sonka et al., 2013) .....	53
Gambar 3. 10 Nilai panjang akar berdasarkan <i>image analysis</i> menggunakan Image J dan WinRHIZO (Sumber: Tajima & Kato, 2011) .....	55
Gambar 3. 11 Alat yang digunakan untuk pengambilan gambar; (A) gambar asli, (B) area kepala sari yang terdeteksi, (C) <i>overlay</i> dari kedua gambar (Sumber: Winn et al., 2021).....	55
Gambar 3. 12 Daun kedelai yang dianalisa menggunakan <i>Software Sigma Scan-Pro</i> (Sumber: Vollmann et al., 2010).....	56
Gambar 3. 13 Struktur ANN dengan multi layered perceptron .....	57
Gambar 3. 14 Fungsi ReLU (Sumber: Agarap, 2020) .....	58
Gambar 3.15 Struktur ANN untuk memprediksi panas sensible (H) dan evapotranspirasi dalam satuan $Wm^{-2}$ (Sumber: Saptomo, 2011).....	59
Gambar 3. 16 Foto tampak atas tanaman Tatsoi atau Sawi Pagoda.....	61
Gambar 4.1 Desain <i>layout</i> penelitian tahap pertama (1 = tangki nutrisi, 2 = pipa irigasi utama, 3 = pipa drainase) .....	67
Gambar 4.2 (a) pengambilan data suhu daun ( $T_c$ ) dengan termometer tembak, (b) pengukuran ketinggian air tangki nutrisi, (c) tampilan data iklim mikro pada LCD, (d) sensor GY-49 untuk mengukur intensitas cahaya .....	68
Gambar 4.3 Pengukuran parameter fisiologi tanaman Tatsoi dengan LI-COR 6400 .....	71
Gambar 4.4 Arsitektur ANN pada penelitian tahap pertama .....	72
Gambar 4.5 Diagram alir penelitian tahap pertama .....	73

Gambar 4.6 Desain <i>layout</i> penelitian tahap kedua.....	75
Gambar 4.7 (a) pengukuran indeks warna daun dengan SPAD-meter, (b) pengambilan foto daun dengan kamera hp, (c) analisa RGB warna daun Tatsoi dengan <i>Software Image J</i> .....	77
Gambar 4.8 Contoh tampilan pengaturan kamera <i>handphone</i> untuk mengambil data foto kanopi daun.....	77
Gambar 4.9 Diagram alir penelitian tahap kedua.....	79
Gambar 4.10 Model simulasi gerak semu harian cahaya artifisial yang diterapkan pada penelitian tahap ketiga.....	80
Gambar 4.11 Desain 3D <i>indoor farming</i> penelitian tahap ketiga .....	82
Gambar 4.12 Diagram alir penelitian tahap ketiga .....	86
Gambar 5.1 Sistem kultivasi tanaman hortikultur dalam <i>greenhouse</i> dengan cahaya alami untuk mengkaji pengaruh faktor cahaya dan air .....	89
Gambar 5.2 Penggunaan paranet untuk mereduksi intensitas cahaya matahari pada blok B dan C di dalam <i>greenhouse</i> .....	93
Gambar 5.3 Jumlah daun (a) dan luas kanopi daun (b) tanaman Tatsoi pada berbagai perlakuan naungan selama 27 HST.....	94
Gambar 5.4 Perubahan kanopi tanaman Tatsoi pada berbagai perlakuan intensitas cahaya dan waktu pengairan .....	96
Gambar 5.5 Tinggi tanaman (a) dan panjang akar (b) tanaman Tatsoi pada berbagai perlakuan hingga 27 HST.....	99
Gambar 5.6 Rerata laju fotosintesis ( $A_N$ ), laju transpirasi ( $T_r$ ), dan berat segar (FW) saat panen pada variasi perlakuan naungan dan waktu pengairan .....	104
Gambar 5.7 Perbandingan antara konduktivitas stomata ( $g_{sw}$ ) dengan (a) laju fotosintesis ( $A_N$ ) dan (b) transpirasi ( $T_r$ ).....	107
Gambar 5.8 Grafik kebutuhan air (KA) dan efisiensi penggunaan air (EPA) tanaman Tatsoi pada berbagai variasi naungan dan waktu pengairan .....	109
Gambar 5.9 Suhu daun dan suhu udara pada berbagai perlakuan naungan dan waktu pengairan selama 28 HST .....	112
Gambar 5.10 Hubungan antara konsumsi air tanaman ( $\Delta V$ ) dan perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) pada variasi perlakuan intensitas cahaya dan waktu pengairan.....	114
Gambar 5.11 Grafik regresi linier perbedaan suhu dengan konsumsi air tanaman .....	114
Gambar 5.12 Grafik korelogram parameter tanaman Tatsoi pada perlakuan variasi intensitas cahaya dan waktu pengairan .....	117
Gambar 5.13 Model ANN untuk memprediksi nilai luas kanopi daun tanaman Tatsoi menggunakan data iklim mikro dalam <i>greenhouse</i> .....	119
Gambar 5.14 (a) Hasil analisa metode Garson untuk model ANN prediksi luas kanopi daun pada tiap waktu pengairan, dan (b) nilai kepentingan untuk prediksi parameter pertumbuhan lainnya.....	120

Gambar 5.15 Sistem kultivasi tanaman hortikultur dalam <i>greenhouse</i> dengan cahaya alami untuk mengkaji pengaruh faktor nutrisi dan air .....	122
Gambar 5.16 Penelitian tahap kedua dengan variasi konsentrasi nutrisi .....	123
Gambar 5.17 Jumlah daun (a) dan luas kanopi (b) daun tanaman Tatsoi selama 27 HST pada variasi konsentrasi nutrisi (A0 = tanpa stres nutrisi, A1 = stres nutrisi sedang, A2 = stres nutrisi ekstrim) dan waktu pengairan (24 jam, 12 jam, dan 6 jam) .....	126
Gambar 5.18 Rata-rata jumlah daun (a) dan kanopi (b) Tanaman Tatsoi setelah panen (27 HST) penelitian tahap kedua.....	127
Gambar 5.19 Perubahan tinggi tanaman (a) dan panjang akar (b) Tatsoi pada berbagai perlakuan selama 27 HST.....	128
Gambar 5.20 Rata-rata tinggi tanaman (a) dan panjang akar (b) pada berbagai perlakuan setelah panen (27 HST).....	130
Gambar 5.21 Tinggi tanaman dan panjang akar pada berbagai perlakuan nutrisi dan waktu pengairan .....	131
Gambar 5.22 Rerata laju fotosintesis (a) and transpirasi (b) pada penelitian tahap kedua dengan variasi nutrisi dan waktu pengairan .....	132
Gambar 5.23 Rata-rata berat segar tanaman pada berbagai perlakuan nutrisi dan waktu pengairan setelah panen (27 HST) .....	133
Gambar 5.24 Nilai SPAD daun Tatsoi selama masa tanam pada setiap perlakuan nutrisi dan waktu pengairan .....	135
Gambar 5.25 Perbandingan antara kandungan klorofil dan SPAD/RGB daun Tatsoi pada perlakuan variasi nutrisi dan waktu pengairan .....	136
Gambar 5.26 Grafik hubungan antara kandungan klorofil dengan nilai SPAD (a) dan nilai SPAD dengan nilai RGB (b) daun Tatsoi .....	139
Gambar 5.27 Grafik korelogram parameter tanaman Tatsoi pada perlakuan variasi konsentrasi nutrisi dan waktu pengairan.....	142
Gambar 5.28 Sistem kultivasi tanaman hortikultur dalam <i>indoor farming</i> dengan cahaya artifisial untuk mengkaji pengaruh faktor sudut datang cahaya .....	146
Gambar 5.29 <i>Indoor farming</i> penelitian tahap ketiga dengan perlakuan sudut datang cahaya statis (L0), dan dinamis (L1, L2, L3) .....	148
Gambar 5.30 Jumlah daun (a) dan luas kanopi daun (b) tanaman Tatsoi selama 31 hari pada perlakuan sudut datang cahaya.....	152
Gambar 5.31 Perbandingan jumlah daun (a) dan luas kanopi daun (b) tanaman Tatsoi saat panen (31 HST) pada perlakuan sudut datang cahaya .....	152
Gambar 5.32 Tinggi tanaman (a) dan panjang akar (b) tanaman Tatsoi selama 31 HST pada perlakuan sudut datang cahaya .....	155
Gambar 5.33 Perbandingan tinggi (a) dan panjang (b) tanaman Tatsoi saat panen (31 HST) pada perlakuan sudut datang cahaya.....	155
Gambar 5.34 Rerata berat segar tanaman Tatsoi saat panen pada perlakuan sudut datang cahaya.....	157

Gambar 5.35 Nilai konsumsi air dan efisiensi penggunaan air tanaman Tatsoi selama masa tanam pada perlakuan sudut datang cahaya.....	158
Gambar 5.36 Penampakan stomata daun tanaman Tatsoi pada perlakuan sudut datang cahaya .....	160
Gambar 5.37 Rata-rata suhu lingkungan ( $T_a$ ) dan suhu daun tanaman Tatsoi ( $T_1$ ) pada perlakuan sudut datang cahaya.....	162
Gambar 5.38 Perubahan suhu daun selama 24 jam dalam <i>indoor farming</i> pada perlakuan sudut datang cahaya.....	163
Gambar 5.39 Rata-rata beda suhu daun dan lingkungan serta konsumsi air harian tanaman Tatsoi pada perlakuan sudut datang cahaya .....	164
Gambar 5.40 Nilai SPAD daun Tatsoi selama masa tanam pada perlakuan sudut datang cahaya.....	166
Gambar 5.41 Indeks SPAD daun tanaman Tatsoi saat panen tanam pada perlakuan sudut datang cahaya .....	167
Gambar 5.42 Perubahan indeks RGB daun Tatsoi selama masa tanam pada perlakuan sudut datang cahaya.....	167
Gambar 5.43 (a) Kandungan klorofil daun tanaman Tatsoi dalam <i>indoor farming</i> saat panen dan (b) hasil uji <i>Two-way</i> ANOVA dan uji lanjut total klorofil dengan <i>Tukey</i> test.....	168
Gambar 5.44 Uji validitas nilai kandungan klorofil prediksi dan aktual dengan persamaan tahap kedua (a) dan tahap ketiga (b) .....	172
Gambar 5.45 Grafik korelogram parameter tanaman Tatsoi pada perlakuan variasi sudut datang cahaya .....	173
Gambar 5.46 Roadmap penelitian pengembangan pertanian perkotaan di wilayah tropis dengan <i>indoor farming</i> berbasis pencahayaan artifisial dinamis yang adaptif .....	182

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Uji Lampu LED.....	203
Lampiran 2. Hasil Uji Li-Cor 6400 Penelitian Tahap Pertama.....	204
Lampiran 3. Hasil Uji Li-Cor 6400 Penelitian Tahap Kedua .....	205
Lampiran 4. Hasil Uji Klorofil Penelitian Tahap Kedua .....	206
Lampiran 5. Hasil Uji Klorofil Penelitian Tahap Ketiga .....	207
Lampiran 6. Tabel dan Grafik Kalibrasi Sensor Jarak HC SR-04 .....	208
Lampiran 7. Data talang, nilai ET <sub>o</sub> dan ET <sub>c</sub> tiap perlakuan naungan .....	210
Lampiran 8. Contoh Perhitungan Efisiensi Penggunaan Air .....	211
Lampiran 9. Contoh Perhitungan Laju Perubahan Karakteristik Tanaman .....	212
Lampiran 10. Contoh Perhitungan Perubahan Karakteristik Tanaman .....	213
Lampiran 11. Contoh program regresi berganda pada R-Studio .....	214
Lampiran 12. Contoh program ANN dan Garson pada R-Studio.....	217
Lampiran 13. Contoh program <i>Two-way</i> ANOVA pada R-Studio.....	219
Lampiran 14. Contoh program korelogram pada R-Studio .....	223
Lampiran 15. Kurva Kalibrasi Klorofil dan SPAD-meter .....	229
Lampiran 16. Grafik konsentrasi larutan nutrisi berdasarkan pengukuran <i>total dissolved solid</i> (TDS) penelitian tahap kedua.....	230
Lampiran 17. Perhitungan variasi konsentrasi larutan nutrisi (TDS) penelitian tahap kedua.....	231
Lampiran 18. <i>Layout</i> modul hidroponik penelitian tahap 1, 2 dan 3 .....	232
Lampiran 19. Gambar stomata penelitian tahap ketiga.....	233
Lampiran 20. Rekap data iklim mikro - suhu udara penelitian tahap 1 .....	236
Lampiran 21. Rekap data iklim mikro - kelembaban udara penelitian tahap 1 ...	237
Lampiran 22. Rekap data iklim mikro - PPFD penelitian tahap 1 .....	238
Lampiran 23. Rekap data iklim mikro penelitian tahap 2.....	239
Lampiran 24. Rekap data iklim mikro - suhu udara penelitian tahap 3 .....	240
Lampiran 25. Rekap data iklim mikro - kelembaban udara penelitian tahap 3 ...	243
Lampiran 26. Rekap data iklim mikro - ppfd penelitian tahap 3 .....	246
Lampiran 27. Foto-foto penelitian .....	249
Lampiran 28. Data variabel iklim di luar <i>greenhouse</i> dari stasiun AWS Berbah20 .....	252