

Morphological Plasticity and Allometric Growth of Sea Urchin (Echinoidea) on Lembeh Island, North Sulawesi

(Plastisitas Morfologi dan Pertumbuhan Allometri Bulu Babi (Echinoidea) di Pulau Lembeh, Sulawesi Utara)

Dewi F. Manabung¹, Lawrence J. L. Lumingas^{1*}, Khristin I. F. Kondoy², Stephanus V. Mandagi¹, John L. Tombokan², Deislie R. H. Kumampung²

Program Studi Ilmu Perairan Pascasarjana Universitas Sam Ratulangi, ² Jurusan Manajemen Sumber Daya Perairan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Sam Ratulangi

*Corresponding author: ljlumingas@unsrat.ac.id

Manuscript received: 19 April. 2026. Revision accepted: 17 June 2026

Abstract. This study investigates the allometric growth patterns of four sea urchin species (*Diadema savignyi*, *Tripneustes gratilla*, *Echinothrix calamaris*, and *Echinometra mathaei* Type C) on Lembeh Island as a manifestation of morphological plasticity. Researchers collected samples from Paser Panjang (protected habitat) and Pancoran (high hydrodynamic pressure). Morphometric analysis utilized Huxley's (1932) equation to evaluate the relationship between test diameter (DC) and test height (TC). Results indicate that environmental energy significantly dictates shell morphology. *D. savignyi* exhibits negative allometry at both sites, yet individuals in Pancoran possess taller tests to enhance stability against currents. Notably, *T. gratilla* displays distinct plasticity, shifting from isometric growth in Paser Panjang to positive allometry in Pancoran; this dome-shaped adaptation effectively reduces hydrodynamic drag and lowers the center of gravity. While *E. calamaris* and *E. mathaei* Type C primarily show isometric growth, *E. mathaei* maintains a significantly higher TC in exposed habitats. These morphological shifts demonstrate vital survival mechanisms against habitat variability. The study underscores that such adaptive strategies enhance structural integrity, positioning sea urchins as reliable ecological indicators for coastal resource management.

Keywords: Allometric growth; Lembeh Island; morphological plasticity; sea urchin

Abstrak Penelitian ini bertujuan menganalisis pola pertumbuhan allometri empat spesies bulu babi (*Diadema savignyi*, *Tripneustes gratilla*, *Echinothrix calamaris*, dan *Echinometra mathaei* Type C) di Pulau Lembeh sebagai manifestasi plastisitas morfologi terhadap variabilitas habitat. Sampel dikoleksi dari Stasiun Paser Panjang (relatif terlindungi, lamun padat) dan Stasiun Pancoran (hidrodinamika kuat, lamun kurang padat). Analisis menggunakan persamaan Huxley (1932) untuk mengevaluasi hubungan diameter cangkang (DC) dan tinggi cangkang (TC). Hasil menunjukkan bahwa tekanan hidrodinamika secara signifikan memodifikasi morfologi test. *D. savignyi* menunjukkan pola allometri negatif di kedua lokasi, namun populasi di Pancoran memiliki TC lebih tinggi (kurang pipih) untuk meningkatkan stabilitas. *T. gratilla* menunjukkan plastisitas transisional yang mencolok, bergeser dari isometri di Paser Panjang menjadi allometri positif di Pancoran, menghasilkan bentuk *dome* (bulat) guna memitigasi *drag* arus kuat. Sementara itu, *E. calamaris* dan *E. mathaei* Type C cenderung isometrik, meski *E. mathaei* secara signifikan mempertahankan TC yang lebih tinggi di habitat terbuka. Disimpulkan bahwa plastisitas morfologi berfungsi sebagai mekanisme pertahanan struktural utama terhadap variabilitas spasial habitat, memperkuat peran bulu babi sebagai bioindikator integritas ekosistem pesisir.

Kata Kunci: Pertumbuhan allometri; Pulau Lembeh; plastisitas morfologi; bulu babi

PENDAHULUAN

Plastisitas fenotipik diartikan sebagai mekanisme yang, dengan memodifikasi genotipe, bertindak sebagai penyangga terhadap variabilitas spasial dan temporal kondisi habitat (Bradshaw, 1965, 1973; Caswell, 1983; Marcus, 1983). Organisme dengan genotipe yang sama dapat menunjukkan variasi fenotipe tergantung pada kondisi lingkungan (Kelly *et al.*, 2012; Narvaez *et al.*, 2020). Plastisitas fenotipik mengacu pada kemampuan fenotipe suatu organisme untuk bervariasi sebagai respons terhadap perubahan kondisi lingkungan, tanpa perubahan pada genotipe individu (Dubois *et al.*, 2025). Secara umum, plastisitas fenotipik lebih penting bagi organisme yang tidak bergerak dari pada organisme bergerak (Schlichting, 1986).

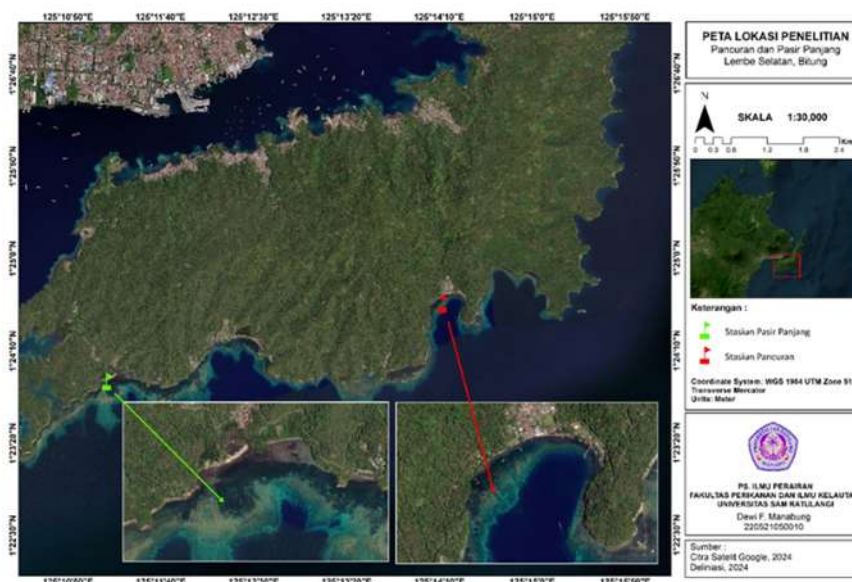
Bulu babi (Echinoidea) merupakan salah satu komponen penting ekosistem terumbu karang dan lamun, berperan dalam siklus energi serta sebagai indikator kesehatan ekosistem

pesisir. Sebagian besar spesies bulu babi terdiri dari populasi yang secara morfologis dan fisiologis berbeda satu sama lain tergantung pada lingkungan tempat mereka berkembang (Lumingas 1994; Ebert, 1996). Variasi morfologi bulu babi sering kali mencerminkan plastisitas fenotipik, yaitu kemampuan organisme untuk menyesuaikan bentuk tubuhnya terhadap kondisi lingkungan (Pigliucci, 2001; West-Eberhard, 2003).

Pulau Lembeh, Sulawesi Utara, memiliki karakteristik lingkungan pesisir yang berbeda antar lokasi, sehingga menjadi laboratorium alami untuk mengkaji hubungan morfometrik bulu babi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola pertumbuhan allometri empat spesies bulu babi (*Diadema savignyi*, *Tripneustes gratilla*, *Echinothrix calamaris*, dan *Echinometra mathaei* Tipe C) di dua lokasi berbeda, serta mengaitkannya dengan konsep plastisitas morfologi.

METODOLOGI PENELITIAN

Pengambilan sampel bulu babi *Diadema savignyi*, *Tripneustes gratilla*, *Echinothrix calamaris*, dan *Echinometra mathaei* Tipe C dilaksanakan pada bulan November-Desember 2023 pada dua lokasi yang berbeda yakni di perairan pantai Pasir Panjang (1°23'53,54"LU dan 125°11'11,31"BT) dan di perairan pantai Pancoran (1°24'35,58"LU dan 125°14'12,03"BT), Pulau Lembeh, Kota Bitung (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Sampel bulu babi diambil dengan menggunakan penjepit lalu dimasukkan ke dalam coolbox dan direndam dengan alkohol 70% dan dibawa ke Laboratorium Terpadu Universitas Sam Ratulangi. Setiap individu diidentifikasi berdasarkan panduan Clark & Rowe (1971). Diameter cangkang dan tinggi cangkang diukur dengan menggunakan vernier caliper (jangka sorong) berketelitian 0,01 mm. Untuk menganalisis aspek morfometrik bulu babi digunakan analisis allometri menurut persamaan Huxley (1932):

$$TC = a DC^b$$

di mana konstanta a (indeks “origin”) adalah nilai TC ketika $DC = 1$, b adalah kemiringan kurva (koefisien pertumbuhan relatif). Untuk menghitung persamaan perpangkatan dan menggambarkan kurva regresinya digunakan program statistika STATGRAPHICS Centurion

dengan memilih analisis regresi model perpangkatan (multiplicative model). Uji-t ($t_{hit} = (b - b_{th})/S_b$; S_b adalah standar error dari b) (Scherrer, 1984) digunakan untuk menguji apakah nilai b sama atau berbeda dengan nilai teoritis $b_{th} = 1$. Jika nilai $t_{hit} <$ nilai t pada tabel dengan $db = n - 1$ untuk taraf nyata = 0,05 maka nilai b sama dengan nilai teoritis b_{th} sehingga hubungan kedua variabel memiliki pola pertumbuhan isometri, dan sebaliknya, jika nilai $t_{hit} \geq$ nilai t pada tabel maka nilai b berbeda dengan nilai b_{th} sehingga hubungan DC-TC mengikuti pola pertumbuhan allometri. Jika nilai kemiringan $b > 1$, pola pertumbuhannya allometri positif yang berarti penambahan tinggi cangkang (TC) lebih cepat dibandingkan dengan penambahan diameter cangkangnya (DC); dan sebaliknya, jika nilai $b < 1$, pola pertumbuhannya allometri negatif yang berarti penambahan TC tidak secepat penambahan DC. Pola pertumbuhan allometri berimplikasi pada bentuk cangkang, pada pola allometri positif berarti cangkang memiliki bentuk bulat (dome), sebaliknya, pola allometri negatif berarti cangkang bulu babi berbentuk agak pipih. Untuk membandingkan garis regresi linear hubungan $\ln TC - \ln DC$ antara populasi Paser Panjang dan populasi Pancoran digunakan analisis kovarian (ANCOVA).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan lingkungan seperti substrat, kedalaman, dan hidrodinamika memengaruhi sebaran serta pola pertumbuhan spesies bulu babi tersebut. Pembahasan berikut akan menguraikan temuan penelitian ini secara komprehensif dengan mempertimbangkan data grafik yang disajikan, serta hubungannya dengan konsep plastisitas fenotipik.

Rataan terumbu di Stasiun Paser Panjang pada umumnya lebih lebar (sekitar 450 m) dibandingkan dengan rata-rata terumbu di Stasiun Pancoran (sekitar 150 m). Stasiun Paser Panjang bersubstrat rubble, pasir, sedikit berlumpur, dan dengan hamparan lamun yang relatif padat. Stasiun Pancoran memiliki substrat rubble berpasir, dengan hamparan lamun yang relatif kurang padat dibandingkan dengan di Stasiun Paser Panjang. Secara hidrodinamika, Stasiun Paser Panjang relatif lebih terlindungi dibandingkan dengan Stasiun Pancoran. Kondisi ini kemungkinan besar memengaruhi distribusi serta adaptasi morfologi bulu babi di kedua lokasi.

D. savignyi pada umumnya menyebar secara berkelompok di antara hamparan lamun. *T. gratilla* juga menyebar di antara hamparan lamun dengan jumlah yang kurang padat dan biasanya menutup tubuh mereka dengan potongan lamun, algae dan rubble (berkamufase). *E. calamaris* menempati pinggiran bongkahan karang. *E. mathaei* Tipe C terdapat meliang di rata-rata terumbu. Hamparan lamun yang lebih padat di Stasiun Paser Panjang memberikan perlindungan tambahan bagi bulu babi, khususnya *D. savignyi* dan *T. gratilla*. Lamun juga menyediakan sumber makanan berupa detritus organik dan mikroalga yang mendukung keberlangsungan populasi bulu babi (Lawrence, 2013). Di sisi lain, kondisi hidrodinamika yang lebih ekstrem di Stasiun Pancoran dapat memengaruhi seleksi alam terhadap bentuk tubuh bulu babi, seperti cangkang yang lebih tinggi atau lebih pendek untuk mengurangi dampak arus kuat.

Diadema savignyi

Di Stasiun Paser Panjang diambil 82 individu *D. savignyi* berukuran diameter cangkang (DC) dari 36,22 mm s/d 74,90 mm dengan DC rata-rata 55,875 mm dan standar deviasi (SD) 6,062 mm; tinggi cangkang (TC) berkisar dari 19,08 mm s/d 35,34 mm dengan TC rata-rata 26,724 mm dan SD 3,669 mm. Di Stasiun Pancoran diambil 84 individu *D. savignyi* berukuran DC dari 42,20 mm s/d 70,09 mm dengan DC rata-rata 53,727 mm dan SD 4,983 mm; TC berkisar dari 22,00 mm s/d 35,86 mm dengan TC rata-rata 27,450 mm dan SD 3,005 mm. Uji-t dengan asumsi kesamaan varians menunjukkan bahwa secara statistik, terdapat perbedaan

yang nyata (nilai- $p < 0,05$) antara rata-rata DC dari kedua sampel ($t = 2,4967$; nilai- $p = 0,0135$) pada tingkat kepercayaan 95,0%. Ini berarti bahwa ukuran rata-rata DC di Stasiun Paser Panjang relatif lebih besar dibandingkan dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.

Hubungan antara TC dan DC bulu babi *D. savignyi* di Stasiun Paser Panjang mengikuti model perpangkatan (multiplikatif) dengan persamaan:

$$\text{TC} = 1,2409 \text{ DC}^{0,7619} \text{ atau } \ln \text{TC} = 0,2158 + 0,7619 \ln \text{DC} \text{ (Gambar 2)}$$

Karena nilai- p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio- $F = 49,70$; nilai- $p = 0,0000$), maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *D. savignyi* di Stasiun Paser Panjang pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 38,32% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,62$, menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel TC dan DC. Uji ketidakcocokan, yang dirancang untuk menentukan apakah model yang dipilih memadai untuk menggambarkan data yang diamati, dilakukan dengan membandingkan variabilitas residu model dengan variabilitas antar pengamatan pada nilai replikasi variabel bebas DC. Karena nilai- p (rasio- $F = 3,45$; nilai- $p = 0,0827$) untuk ketidakcocokan dalam tabel ANOVA lebih besar atau sama dengan 0,05, maka secara statistik dapat disimpulkan bahwa model perpangkatan (atau model linear setelah transformasi \ln) tampaknya memadai untuk data yang diamati pada tingkat kepercayaan 95,0%. Uji- t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang nyata secara statistik ($t \text{ hit.} = 2,2036$; nilai- $p < 0,05$) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah allometri negatif. Dengan kata lain, penambahan DC lebih cepat dibandingkan dengan penambahan TC atau semakin pipih bentuknya dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

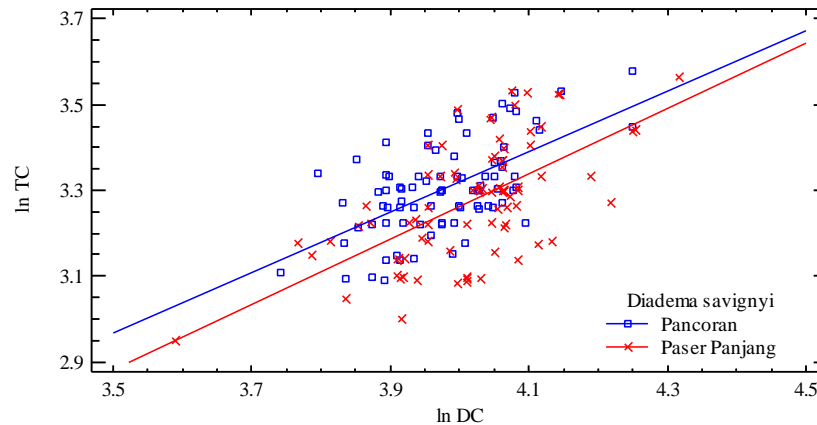
Hasil pemasangan model perpangkatan (multiplikatif) untuk menggambarkan hubungan antara TC dan DC bulu babi *D. savignyi* di Stasiun Pancoran mengikuti persamaan:

$$\text{TC} = 1,6496 \text{ DC}^{0,7051} \text{ atau } \ln \text{TC} = 0,50005 + 0,7051 \ln \text{DC} \text{ (Gambar 2)}$$

Nilai- p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio- $F = 45,30$; nilai- $p = 0,0000$) menunjukkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *D. savignyi* di Stasiun Pancoran pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 35,58% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,60$, menunjukkan hubungan yang cukup kuat antara variabel TC dan DC. Karena nilai- p (rasio- $F = 0,61$; nilai- $p = 0,8254$) untuk ketidakcocokan dalam tabel ANOVA lebih besar atau sama dengan 0,05, maka secara statistik dapat disimpulkan bahwa model perpangkatan (atau model linear setelah transformasi \ln) tampaknya memadai untuk data yang diamati pada tingkat kepercayaan 95,0%. Uji- t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang nyata secara statistik ($t \text{ hit.} = 2,8152$; nilai- $p < 0,05$) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah allometri negatif. Dengan kata lain, penambahan DC lebih cepat dibandingkan dengan penambahan TC atau semakin pipih bentuknya dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

Analisis kovarians (ANKOVA) digunakan untuk membandingkan garis regresi linear hubungan $\ln \text{TC} - \ln \text{DC}$ *D. savignyi* antara Stasiun Pancoran dan Paser Panjang. Karena nilai- $p > 0,05$ untuk uji perbedaan kemiringan (b) antar kedua garis regresi (rasio- $F = 0,14$; nilai- $p = 0,7115$) maka tidak ada perbedaan yang nyata secara statistik antar kemiringan garis $\ln \text{TC} - \ln \text{DC}$ *D. savignyi* di kedua stasiun pengamatan pada tingkat kepercayaan 95%. Untuk uji perbedaan intersep ($\ln a$) antar kedua garis regresi menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik, karena nilai- $p < 0,05$ (rasio- $F = 13,99$; nilai- $p = 0,0003$); sehingga dapat dikatakan bahwa pada ukuran DC yang sama, TC bulu babi *D. savignyi* di Stasiun Pancoran lebih besar

dibandingkan dengan di Stasiun Paser Panjang (Gambar 2). Dengan kata lain, walaupun pola pertumbuhan TC terhadap DC kedua populasi bulu babi tersebut sama yakni allometri negatif, bentuk cangkang *D. savignyi* di Stasiun Paser Panjang agak lebih pipih dibandingkan dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.



Gambar 2. Regresi linear hubungan ln DC- ln TC bulu babi *D. savignyi* di kedua stasiun

Echinothrix calamaris

Di Stasiun Paser Panjang diambil 52 individu *E. calamaris* berukuran diameter cangkang (DC) dari 25,66 mm s/d 78,02 mm dengan DC rata-rata 62,051 mm dan standar deviasi (SD) 9,763 mm; tinggi cangkang (TC) berkisar dari 11,96 mm s/d 42,27 mm dengan TC rata-rata 27,677 mm dan SD 6,826 mm. Di Stasiun Pancoran juga diambil 52 individu *E. calamaris* berukuran DC dari 23,65 mm s/d 73,10 mm dengan DC rata-rata 59,959 mm dan SD 9,223 mm; TC berkisar dari 9,09 mm s/d 41,87 mm dengan TC rata-rata 28,079 mm dan SD 6,662 mm. Uji-t dengan asumsi kesamaan varians menunjukkan bahwa secara statistik, tidak terdapat perbedaan yang nyata (nilai-p > 0,05) antara rata-rata DC dari kedua sampel ($t = 1,1234$; nilai-p = 0,2639) pada tingkat kepercayaan 95,0%. Ini berarti bahwa ukuran rata-rata DC di Stasiun Paser Panjang tidak berbeda dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.

Hasil pemasangan model perpangkatan untuk hubungan antara TC dan DC bulu babi *E. calamaris* di Stasiun Paser Panjang mengikuti persamaan:

$$TC = 0,3633 DC^{1,0450} \text{ atau } \ln TC = -1,0124 + 1,0450 \ln DC \text{ (Gambar 3)}$$

Karena nilai-p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 45,75; nilai-p = 0,0000), maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *E. calamaris* di Stasiun Paser Panjang pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 47,78% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,69$, menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel TC dan DC. Uji ketidak-cocokan, yang dirancang untuk menentukan apakah model yang dipilih memadai untuk menggambarkan data yang diamati, dilakukan dengan membandingkan variabilitas residu model dengan variabilitas antar pengamatan pada nilai replikasi variabel bebas DC. Karena nilai-p (rasio-F = 2,65; nilai-p = 0,3119) untuk ketidak-cocokan dalam tabel ANOVA lebih besar atau sama dengan 0,05, maka secara statistik dapat disimpulkan bahwa model perpangkatan (atau model linear setelah transformasi ln) tampaknya memadai untuk data yang diamati pada tingkat kepercayaan 95,0%. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang tidak nyata secara statistik ($t_{hit.} = 0,2915$; nilai-p > 0,05) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah isometri. Dengan kata lain, pertambahan

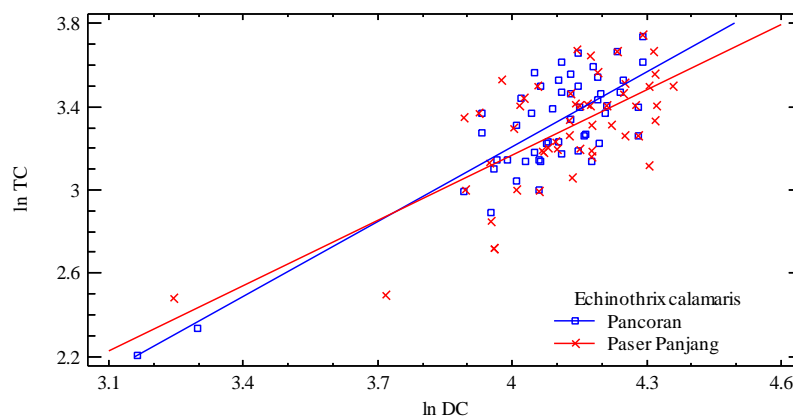
TC seiring dengan penambahan DC atau bentuknya konstan (tidak berubah) dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

Hasil pemasangan model perpangkatan untuk hubungan antara TC dan DC bulu babi *E. calamaris* di Stasiun Pancoran mengikuti persamaan:

$$TC = 0,2084 DC^{1,1941} \text{ atau } \ln TC = -1,5683 + 1,1941 \ln DC \text{ (Gambar 3)}$$

Nilai-p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 111,24; nilai-p = 0,0000) menunjukkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *E. calamaris* di Stasiun Pancoran pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 68,99% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,83$, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara variabel TC dan DC. Karena nilai-p (rasio-F = 2,45; nilai-p = 0,4670) untuk ketidakcocokan dalam tabel ANOVA lebih besar atau sama dengan 0,05, maka secara statistik dapat disimpulkan bahwa model perpangkatan (atau model linear setelah transformasi ln) tampaknya memadai untuk data yang diamati pada tingkat kepercayaan 95,0%. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang tidak nyata secara statistik ($t_{\text{hit.}} = 1,7141$; nilai-p > 0,05) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah isometri. Dengan kata lain, penambahan DC seiring dengan penambahan TC atau tidak ada perubahan bentuk cangkang selama pertumbuhan populasi bulu babi tersebut.

Analisis kovarians (ANKOVA) digunakan untuk membandingkan garis regresi linear hubungan $\ln TC - \ln DC$ *E. calamaris* antara Stasiun Pancoran dan Paser Panjang. Karena nilai-p > 0,05 untuk uji perbedaan kemiringan (b) antar kedua garis regresi (rasio-F = 0,62; nilai-p = 0,4345) maka tidak ada perbedaan yang nyata secara statistik antar kemiringan garis $\ln TC - \ln DC$ *E. calamaris* di kedua stasiun pengamatan pada tingkat kepercayaan 95%. Demikian juga untuk uji perbedaan intersep ($\ln a$) antar kedua garis regresi tidak menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik, karena nilai-p > 0,05 (rasio-F = 2,31; nilai-p = 0,1319); sehingga dapat dikatakan bahwa kedua garis regresi tersebut tumpang-tindih satu sama lain (Gambar 3). Dengan kata lain, tidak terdapat perbedaan bentuk cangkang bulu babi *E. calamaris* antar kedua stasiun.



Gambar 3. Regresi linear hubungan $\ln DC - \ln TC$ bulu babi *E. calamaris* di kedua stasiun

Tripneustes gratilla

Di Stasiun Paser Panjang diambil 41 individu *T. gratilla* berukuran diameter cangkang (DC) dari 41,02 mm s/d 82,00 mm dengan DC rata-rata 61,751 mm dan standar deviasi (SD) 9,818 mm; tinggi cangkang (TC) berkisar dari 23,99 mm s/d 54,36 mm dengan TC rata-rata 38,919 mm dan SD 7,099 mm. Di Stasiun Pancoran juga diambil 34 individu *T. gratilla*

berukuran DC dari 40,90 mm s/d 82,21 mm dengan DC rata-rata 61,633 mm dan SD 9,261 mm; TC berkisar dari 19,87 mm s/d 55,19 mm dengan TC rata-rata 38,017 mm dan SD 7,023 mm. Uji-t dengan asumsi kesamaan varians menunjukkan bahwa secara statistik, tidak terdapat perbedaan yang nyata (nilai-p > 0,05) antara rata-rata DC dari kedua sampel ($t = 0,0532$; nilai-p = 0,9578) pada tingkat kepercayaan 95,0%. Ini berarti bahwa ukuran rata-rata DC di Stasiun Paser Panjang tidak berbeda dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.

Hasil pemasangan model perpangkatan untuk hubungan antara TC dan DC bulu babi *T. gratilla* di Stasiun Paser Panjang mengikuti persamaan:

$$\text{TC} = 0,5765 \text{ DC}^{1,0209} \text{ atau } \ln \text{TC} = -0,5509 + 1,0209 \ln \text{DC} \text{ (Gambar 4)}$$

Karena nilai-p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 206,83; nilai-p = 0,0000), maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *T. gratilla* di Stasiun Paser Panjang pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 84,14% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,92$, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara variabel TC dan DC. Uji ketidakcocokan, yang dirancang untuk menentukan apakah model yang dipilih memadai untuk menggambarkan data yang diamati, dilakukan dengan membandingkan variabilitas residu model dengan variabilitas antar pengamatan pada nilai replikasi variabel bebas DC. Karena nilai-p (rasio-F = 0,71; nilai-p = 0,7581) untuk ketidakcocokan dalam tabel ANOVA lebih besar atau sama dengan 0,05, maka secara statistik dapat disimpulkan bahwa model perpangkatan (atau model linear setelah transformasi ln) tampaknya memadai untuk data yang diamati pada tingkat kepercayaan 95,0%. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang tidak nyata secara statistik ($t_{\text{hit.}} = 0,2940$; nilai-p > 0,05) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah isometri. Dengan kata lain, penambahan TC seiring dengan penambahan DC atau bentuknya konstan (tidak berubah) dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

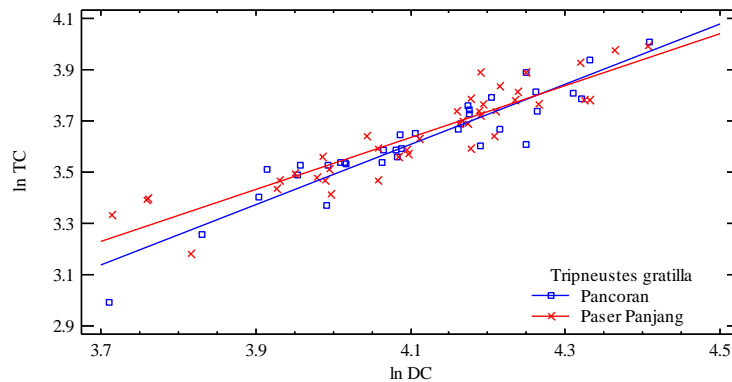
Hasil pemasangan model perpangkatan untuk hubungan antara TC dan DC bulu babi *T. gratilla* di Stasiun Pancoran mengikuti persamaan:

$$\text{TC} = 0,2925 \text{ DC}^{1,1800} \text{ atau } \ln \text{TC} = -1,2294 + 1,1800 \ln \text{DC} \text{ (Gambar 4)}$$

Nilai-p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 211,17; nilai-p = 0,0000) menunjukkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *T. gratilla* di Stasiun Pancoran pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 86,84% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,93$, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara variabel TC dan DC. Rasio-F untuk uji ketidakcocokan dalam tabel ANOVA ini tidak dapat dilakukan karena tidak terdapat pengamatan berulang untuk nilai DC yang sama. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang nyata secara statistik ($t_{\text{hit.}} = 2,2170$; nilai-p < 0,05) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah allometri positif. Dengan kata lain, penambahan TC lebih cepat dibandingkan dengan penambahan DC atau bentuk cangkang bulu babi ini berubah dengan menjadi semakin bulat selama pertumbuhan populasi bulu babi tersebut.

Analisis kovarians (ANKOVA) digunakan untuk membandingkan garis regresi linear hubungan $\ln \text{TC} - \ln \text{DC}$ *T. gratilla* antara Stasiun Pancoran dan Paser Panjang. Karena nilai-p > 0,05 untuk uji perbedaan kemiringan (b) antar kedua garis regresi (rasio-F = 2,15; nilai-p = 0,1466) maka tidak ada perbedaan yang nyata secara statistik antar kemiringan garis $\ln \text{TC} - \ln \text{DC}$ *T. gratilla* di kedua stasiun pengamatan pada tingkat kepercayaan 95%. Demikian juga untuk uji perbedaan intersep ($\ln a$) antar kedua garis regresi tidak menunjukkan perbedaan yang

nyata secara statistik, karena nilai- $p > 0,05$ (rasio-F = 2,05; nilai- $p = 0,1563$); sehingga dapat dikatakan bahwa kedua garis regresi tersebut tumpang-tindih satu sama lain (Gambar 4). Dengan kata lain, tidak terdapat perbedaan bentuk cangkang bulu babi *T. gratilla* antar kedua stasiun. Tetapi walaupun demikian, pola pertumbuhan kedua populasi berbeda secara statistik; populasi di Stasiun Paser Panjang isometrik ($b = 1$) sedangkan di Stasiun Pancoran allometrik positif ($b > 1$).



Gambar 4. Regresi linear hubungan ln DC- ln TC bulu babi *T. gratilla* di kedua stasiun

Echinometra mathaei Tipe C

Di Stasiun Paser Panjang diambil 30 individu *E. mathaei* Tipe C berukuran diameter cangkang (DC) dari 27,99 mm s/d 54,33 mm dengan DC rata-rata 37,777 mm dan standar deviasi (SD) 6,493 mm; tinggi cangkang (TC) berkisar dari 10,09 mm s/d 25,87 mm dengan TC rata-rata 17,263 mm dan SD 4,042 mm. Di Stasiun Pancoran diambil 33 individu *E. mathaei* Tipe C berukuran DC dari 28,09 mm s/d 45,03 mm dengan DC rata-rata 35,794 mm dan SD 4,558 mm; TC berkisar dari 10,00 mm s/d 41,37 mm dengan TC rata-rata 21,553 mm dan SD 8,1821 mm. Uji-t dengan asumsi kesamaan varians menunjukkan bahwa secara statistik, tidak terdapat perbedaan yang nyata (nilai- $p > 0,05$) antara rata-rata DC dari kedua sampel ($t = 0,0532$; nilai- $p = 0,9578$) pada tingkat kepercayaan 95,0%. Ini berarti bahwa ukuran rata-rata DC di Stasiun Paser Panjang tidak berbeda dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.

Hubungan antara TC dan DC bulu babi *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Paser Panjang mengikuti persamaan model perpangkatan:

$$TC = 0,3944 DC^{1,0374} \text{ atau } \ln TC = -0,9305 + 1,0374 \ln DC \text{ (Gambar 5)}$$

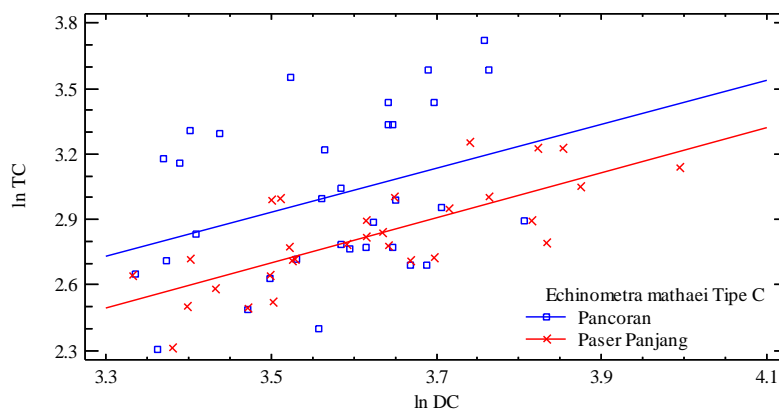
Karena nilai- p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 35,95; nilai- $p = 0,0000$), maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Paser Panjang pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang menjelaskan 56,21% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,75$, menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel TC dan DC. Uji ketidak-cocokan, yang dirancang untuk menentukan apakah model yang dipilih memadai untuk menggambarkan data yang diamati tidak dapat dilakukan karena tidak terdapat nilai replikasi variabel bebas DC. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang tidak nyata secara statistik ($t_{\text{hit.}} = 0,2159$; nilai- $p > 0,05$) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah isometri. Dengan kata lain, penambahan TC seiring dengan penambahan DC atau bentuknya konstan (tidak berubah) dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

Hubungan antara TC dan DC bulu babi *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Pancoran mengikuti persamaan model perpangkatan:

$$TC = 0,5469 DC^{1,0104} \text{ atau } \ln TC = -0,6036 + 1,0104 \ln DC \text{ (Gambar 5)}$$

Nilai-p dalam tabel ANOVA kurang dari 0,05 (rasio-F = 4,42; nilai-p = 0,0437) menunjukkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara TC dan DC *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Pancoran pada tingkat kepercayaan 95,0%. Statistik R^2 (koefisien determinasi) menunjukkan bahwa model yang dipasang hanya menjelaskan 12,48% variabilitas pada TC. Koefisien korelasi $r = 0,35$, menunjukkan hubungan yang lemah antara variabel TC dan DC. Rasio-F untuk uji ketidak-cocokan dalam tabel ANOVA ini tidak dapat dilakukan karena tidak terdapat pengamatan berulang untuk nilai DC yang sama. Uji-t untuk hipotesis $\beta = 1$ dari model perpangkatan tersebut menunjukkan hasil yang tidak nyata secara statistik ($t_{hit} = 0,0217$; nilai-p > 0,05) yang berarti pola pertumbuhan TC terhadap DC adalah isometri. Dengan kata lain, penambahan TC seiring dengan penambahan DC atau bentuknya konstan (tidak berubah) dengan semakin bertambah ukuran cangkangnya.

Analisis kovarians (ANKOVA) digunakan untuk membandingkan garis regresi linear hubungan $\ln TC - \ln DC$ *E. mathaei* Tipe C antara Stasiun Pancoran dan Paser Panjang. Karena nilai-p > 0,05 untuk uji perbedaan kemiringan (b) antar kedua garis regresi (rasio-F = 0,00; nilai-p = 0,9561) maka tidak ada perbedaan yang nyata secara statistik antar kemiringan garis $\ln TC - \ln DC$ *E. mathaei* Tipe C di kedua stasiun pengamatan pada tingkat kepercayaan 95%. Untuk uji perbedaan intersep ($\ln a$) antar kedua garis regresi menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik, karena nilai-p < 0,05 (rasio-F = 10,60; nilai-p = 0,0019); sehingga dapat dikatakan bahwa pada ukuran DC yang sama, bulu babi *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Pancoran memiliki TC lebih besar dibandingkan dengan di Stasiun Paser Panjang (Gambar 5). Dengan kata lain, walaupun pola pertumbuhan TC terhadap DC kedua populasi bulu babi tersebut sama yakni isometri, bentuk cangkang *E. mathaei* Tipe C di Stasiun Paser Panjang agak lebih pipih dibandingkan dengan yang terdapat di Stasiun Pancoran.



Gambar 5. Regresi linear hubungan $\ln DC - \ln TC$ bulu babi *E. mathaei* Tipe C di kedua stasiun

PEMBAHASAN

Pemahaman mengenai ketahanan ekosistem pesisir memerlukan eksplorasi mendalam terhadap mekanisme adaptif organisme kunci dalam merespons fluktuasi lingkungan. Plastisitas fenotipik pada bulu babi Echinoidea di wilayah perairan Pulau Lembeh, Sulawesi Utara, merupakan indikator vital bagi kemampuan biota untuk memitigasi tekanan hidrodinamika dan variabilitas habitat tanpa memerlukan alterasi genotipe. Penelitian ini secara strategis menghubungkan parameter lingkungan spesifik, terutama perbedaan lebar rata-rata terumbu dan paparan arus, dengan respons biologis yang diukur melalui analisis morfometrik allometrik guna mengevaluasi integritas struktural populasi di habitat yang kontras.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keempat spesies bulu babi yang diamati di Pulau Lembeh memperlihatkan variasi pola pertumbuhan yang berbeda, yang dapat dipahami dalam kerangka plastisitas fenotipik. Plastisitas fenotipik didefinisikan sebagai kemampuan suatu genotipe untuk menghasilkan fenotipe yang berbeda sebagai respons terhadap variasi lingkungan (Pigliucci, 2001; West-Eberhard, 2003; Kelly *et al.*, 2012; Narvaez *et al.*, 2020; Dubois *et al.*, 2025). Dalam konteks bulu babi, plastisitas ini tercermin pada perubahan morfologi cangkang (test) yang dipengaruhi oleh substrat, kedalaman, dan kondisi hidrodinamika di lokasi penelitian. Populasi bulu babi sering kali menunjukkan karakteristik morfologi dan fisiologis yang berbeda sesuai dengan lingkungan tempat mereka berkembang (Ebert 1996). Ketika populasi tidak terisolasi secara genetik, variasi yang diamati dapat dikaitkan dengan perbedaan kondisi lingkungan: mereka adalah respons terhadap tekanan lingkungan. Variasi ini dapat mempengaruhi berbagai parameter seperti tingkat pertumbuhan, ukuran maksimum, reproduksi dan morfologi tubuh (Regis 1978, Lumingas 1994, Lozano *et al.*, 1995, Turon *et al.*, 1995). Bulu babi dapat menyesuaikan parameter fisiologisnya sebagai respons terhadap suhu (Moore 1935), hidrodinamika (Edwards & Ebert 1991), kualitas lingkungan (Delmas & Regis 1984) dan khususnya kualitas dan kuantitas makanan yang tersedia (Lawrence & Lane 1982).

D. savignyi biasanya hidup berkelompok di perairan dangkal tropis Indo-Pasifik sampai kedalaman 10 m, terutama di hamparan lamun, rataan terumbu atau terumbu karang. Bulu babi ini memiliki bentuk tubuh (test atau cangkang) agak bulat dengan banyak duri panjang. Di kedua lokasi spesies ini menunjukkan pola allometri negatif (DC bertambah lebih cepat daripada TC), namun TC di Pancoran lebih tinggi dibandingkan dengan di Paser Panjang. Hal ini sejalan dengan konsep plastisitas fenotipik, di mana tekanan hidrodinamika dapat memengaruhi bentuk cangkang (Edwards & Ebert, 1991; Lumingas, 1994; Sommer, 2020). Pertumbuhan isometrik *E. calamaris* di kedua lokasi, menunjukkan bentuk cangkang relatif konstan. Hal ini mendukung temuan Fernandez & Boudouresque (1997) bahwa plastisitas morfologi dapat berbeda antar spesies, tergantung pada strategi adaptasi terhadap substrat dan sumber makanan. Spesies ini biasanya menghuni dasar di sekitar bongkahan karang sehingga terlindungi dari pengaruh hidrodinamika yang kuat atau dengan kata lain variasi hidrodinamika tidak memengaruhi morfologi cangkangnya. Populasi *T. gratilla* di Paser Panjang menunjukkan pola pertumbuhan isometrik, sedangkan di Pancoran menunjukkan allometri positif. Perbedaan ini mengindikasikan adanya adaptasi terhadap kondisi hidrodinamika yang lebih kuat di Pancoran, sehingga bentuk cangkang lebih bulat untuk mengurangi risiko terguling (Lawrence & Lane, 1982). Demikian juga secara struktur, bentuk dome (bulat) lebih kuat dan lebih tahan terhadap pengaruh hidrodinamika yang kuat dibandingkan dengan bentuk agak pipih (Lumingas, 1994). Sementara itu, *Echinometra mathaei* Tipe C menunjukkan pola pertumbuhan isometrik di kedua lokasi, tetapi TC di Pancoran lebih tinggi. Hal ini menegaskan bahwa meskipun pola pertumbuhan relatif sama, terdapat perbedaan bentuk tubuh yang mencerminkan adaptasi plastis terhadap tekanan lingkungan. Sommer (2020) menekankan bahwa plastisitas fenotipik merupakan mekanisme universal yang memungkinkan organisme menyesuaikan diri dengan perubahan lingkungan, baik melalui perubahan morfologi maupun fisiologi. Perbedaan bentuk ini juga menunjukkan adanya respons morfologi terhadap lingkungan yang lebih terbuka dan berarus kuat, sesuai dengan konsep plastisitas fenotipik (Whitman & Ananthkrishnan, 2009).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa bulu babi pada kedua lokasi yang berdekatan di Pulau Lembeh menunjukkan plastisitas morfologi yang signifikan, baik dalam bentuk perubahan pola pertumbuhan (isometri vs allometri) maupun perbedaan

tinggi cangkang pada ukuran diameter yang sama (morfologi cangkang). Variasi ini merupakan bukti bahwa bulu babi, dengan gen yang sama, mampu menyesuaikan bentuk tubuhnya untuk menghadapi kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga memperkuat peran mereka sebagai indikator ekologi dalam pengelolaan ekosistem pesisir.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pola pertumbuhan dan morfologi bulu babi dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal, seperti substrat, kedalaman, dan hidrodinamika. Perbedaan pola pertumbuhan di antara spesies mencerminkan adaptasi terhadap tekanan lingkungan, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk pengelolaan ekosistem pesisir. Plastisitas fenotipik memainkan peran penting dalam respons adaptif spesies terhadap perubahan lingkungan. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya studi morfometrik dalam memahami dinamika populasi bulu babi dan potensinya sebagai indikator kesehatan ekosistem.

Meskipun penelitian ini memberikan wawasan penting tentang pola pertumbuhan bulu babi, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, ukuran sampel yang relatif kecil untuk beberapa spesies (misalnya, *E. mathaei* Tipe C) dapat memengaruhi validitas statistik hasil penelitian. Kedua, penelitian ini hanya mempertimbangkan dua stasiun pengamatan, sehingga generalisasi temuan ke wilayah lain perlu dilakukan dengan hati-hati. Penelitian lanjutan dengan cakupan geografis yang lebih luas dan ukuran sampel yang lebih besar diperlukan untuk memperkuat hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bradshaw, A. D. (1965). Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. *Adv. Genet.*, 13: 115-155.
- Bradshaw, A. D. (1973). Environment and phenotypic plasticity. *Brookhaven Symp. Biol.*, 25: 75-94.
- Caswell, H. (1983). Phenotypic plasticity in life-history traits demographic effects and evolutionary consequences. *Amer. Zool.*, 23: 35-46.
- Clark, A. M., & Rowe, F. W. E. (1971). *Monograph of Shallow-water Indo-West Pacific Echinoderms*. London: British Museum (Natural History).
- Delmas, G., & Regis, M. B. (1984). Influence d'une pollution complexe á dominante domestique sur les populations de l'échinoïde comestible *Paracentrotus lividus* (Lamarck). *Vie Mar.*, 6: 63-72.
- Ebert, T. A. (1996) Adaptive aspects of phenotypic plasticity in echinoderms. *Oceanol. Acta* 19(3-4): 347-355.
- Edwards, D. C., & Ebert, T. A. (1991). Plastic responses to wave action in sea urchins. *Ecology*, 72(6): 2056–2069.
- Fernandez, C., & Boudouresque, C-F. (1997). Phenotypic plasticity of *Paracentrotus lividus* in a lagoonal environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 152: 145–154.
- Huxley, J. S. (1932). *Problems of Relative Growth*. London: Methuen.
- Kelly, S. A., Panhuis, T. M., Stoehr, A. M. (2012). Phenotypic plasticity: molecular mechanisms and adaptive significance. *Compr. Physiol.* 2: 1417-1439.
Doi:10.1002/cphy.c110008.PMID: 23798305.
- Lawrence, J. M., & Lane, J. M. (1982). The utilization of food resources by echinoids. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 20: 331–371.
- Lawrence, J. M. (2013). *Sea Urchins: Biology and Ecology*. Elsevier.

- Lozano, J., Galera, J., Lopez, S., Turon, X., Palacin, C., & Morera, G. (1995). Biological cycles and recruitment of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) in 2 contrasting habitats. *Mar Ecol Prog Ser* 122:179-191.
- Lumingas, L. J. L. (1994). La plasticité chez l'oursin *Sphaerechinus granularis* en Rade de Brest (Bretagne, France). Ph.D thesis, Univ. Bretagne Occidentale
- Marcus, N. H. (1983). Phenotypic variability in echinoderms. *In* Echinoderms Studies. Jangoux, M. & Lawrence, J. M. (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 19-37,
- Moore, H. B. (1935). A comparison of the biology of *Echlnus esculentus* in different habitats. Part II. *J. Mar. Biol. Assoc. UK.*, 20:109-128.
- Narvaez, C. A., Padovani, A. M., Stark, A. Y., & Russell, M. P. (2020). Plasticity in the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*): Tube feet regeneration and adhesive performance. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 528:151381.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151381>
- Pigliucci, M. (2001). Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture. Johns Hopkins University Press.
- Régis, M. B. (1978). Croissance de deux échinoïdes du golfe de Marseille (*Paracentrotus lividus* Lmk) et *Arbacia lixula* L.). Aspects écologiques de la microstructure du squelette et de l'évolution des indices physiologiques. Ph.D thesis, Univ AIX-Marseille III.
- Saucède, T., Dubois, P., Michel, L., de Ridder, C., Moreau, C., Jossart, Q., Cabessut, M., Mathieu, O., Santoni, A-L., M'Zoudi, S., & Motreuil, S. (2026). Plasticity in the brooding cidaroid *Ctenocidaris nutrix*: a morphological, trophic, and molecular investigation. *J. Mar. Biol. Assoc. U K.*, 106, pp.e1. (10.1017/S0025315425100933). (hal-05460577)
- Scherrer, B. (1984). Biostatistique. Montreal: Gaëtan Morin.
- Schlichting, C. D. (1986). The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 17:667-693.
- Sommer, R. J. (2020). Phenotypic plasticity: from theory and genetics to current and future challenges. *Genetics*, 215(1): 1–13.
- Turon, X., Gibiret, G., Lopez, S., & Palacin, C. (1995). Growth and population structure of *Paracentrotus livldus* (Echlnodermata: Echinoidea) in 2 contrasting habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 122: 193-20
- West-Eberhard, M. J. (2003). Developmental Plasticity and Evolution. Oxford University Press.
- Whitman, D. W., & Ananthakrishnan, T. N. (2009). Phenotypic Plasticity of Insects: Mechanisms and Consequences. Science Publishers.
-