

HUBUNGAN ANTARA FAKTOR KONDISI LINGKUNGAN DAN PRODUKTIVITAS TAMBAK UNTUK PENAJAMAN KRITERIA KESESUAIAN LAHAN: 2. KUALITAS TANAH

Akhmad Mustafa^{*)}, Mudian Paena^{*)}, Tarunamulia^{*)}, dan Jesmond Sammut^{**)}

ABSTRAK

Selain kualitas air, faktor lingkungan lain yang dipertimbangkan dalam evaluasi kesesuaian lahan untuk budidaya tambak adalah kualitas tanah. Namun kriteria kualitas tanah yang digunakan masih bersifat umum untuk semua komoditas perikanan budidaya tambak. Oleh karena itu, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui hubungan antara produktivitas tambak dari berbagai komoditas dengan berbagai peubah kualitas tanah untuk penajaman kriteria kesesuaian lahan untuk budidaya tambak. Penelitian dilaksanakan di kawasan pertambakan yang ada di Kabupaten Pinrang, Sinjai, Luwu, dan Luwu Utara Provinsi Sulawesi Selatan dan Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung. Metode penelitian yang diaplikasikan adalah metode survai, termasuk untuk mendapatkan data primer dari produksi yang dilakukan melalui pengajuan kuisioner dan perekaman pada saat wawancara kepada responden. Pengukuran langsung terhadap peubah kualitas tanah tertentu dilakukan di lapangan dan pengambilan contoh tanah untuk dianalisis di laboratorium dilakukan terhadap peubah kualitas tanah lainnya. Pemilihan model regresi "terbaik" didasarkan pada metode kuadrat terkecil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pH_{H_2O} tanah dari 6,34 menjadi 8,10 dan peningkatan kandungan pasir tanah lebih besar 21,8% dapat meningkatkan produksi dan sebaliknya peningkatan kandungan liat tanah lebih besar 30,0% dapat menurunkan produksi udang vannamei. Produksi rumput laut yang lebih tinggi didapatkan pada tanah dengan pH_F lebih besar 6,5; pH_{FOX} lebih besar 4,0; $pH_F - pH_{FOX}$ lebih kecil 2,5; dan S_{POS} lebih kecil 1,00%. Kandungan Fe tanah yang lebih besar 5.000 mg/L dan Al lebih besar 490 mg/L menyebabkan penurunan produksi rumput laut. Peningkatan pH_F dan pH_{FOX} tanah masing-masing lebih besar 7,5 dan 7,0 sampai nilai tertentu dapat meningkatkan produksi dan sebaliknya peningkatan kandungan Fe dan Al dapat menurunkan produksi udang windu dan ikan bandeng, terutama melalui pengaruh toksisitas dan dampaknya terhadap ketersediaan fosfor.

ABSTRACT: *Understanding the relationship between environmental factors and brackish water pond productivity to enhance land capability assessment: 2. soil quality. By: Akhmad Mustafa, Mudian Paena, Tarunamulia, and Jesmond Sammut*

Soil quality is an important environmental factor to consider in land capability assessment for brackish water aquaculture ponds. However, soil quality criteria are often generalized for all commodities produced in brackish water ponds. This study aims to evaluate the relationship between brackish water pond productivity for common commodities and soil quality factors to improve the underlying criteria for land capability assessment. The research was conducted in the brackish water ponds of Pinrang, Sinjai, Luwu, and North Luwu Regencies South Sulawesi Province and South Lampung Regency Lampung Province. The study involved the collection and analysis of farm management and production data and physicochemical properties of soils. A regression model based on the least quadratic method showed that the pH_{H_2O} of soil

^{*)} Peneliti pada Balai Riset Perikanan Budidaya Air Payau, Maros

^{**)} School of Biological, Earth and Environmental Sciences, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia

in the range of 6.34 to 8.10 and a sand content of more than 21.8% was associated with high pond production provided soils had sufficient clay content. The model also showed that heavy clays (30% clay content) decreased production of the whiteleg shrimp. High seaweed production occurred in ponds with a soil pH_F of more than 6.5, pH_{FOX} more than 4.0, $pH_F - pH_{FOX}$ less than 2.5, and S_{POS} less than 1.00%. Fe concentration in soil more than 5,000 mg/L and Al more than 490 mg/L decreased the productivity of seaweed ponds. The optimal pH_F and pH_{FOX} of soil for tiger prawn and milkfish production was more than 7.5 and 7.0, respectively under polyculture. Elevated concentrations of Fe and Al were found to reduce shrimp and fish production in ponds, principally through their toxic effects and impacts on available phosphorus.

KEYWORDS: soil quality, productivity, land capability criteria, brackish water ponds

PENDAHULUAN

Potensi lahan perikanan budidaya air payau atau tambak di Indonesia mencapai 1,22 juta hektar dengan tingkat pemanfaatannya baru mencapai 40% (DKP, 2005). Oleh karena itu, peluang pengembangan areal budidaya tambak masih sangat luas. Dalam pengembangan areal budidaya tambak, maka evaluasi kesesuaian lahan perlu dilakukan untuk menjadi dasar pertimbangan dalam pengambilan keputusan penggunaan lahan. Menurut Rossiter (1996), evaluasi kesesuaian lahan sangat penting dilakukan karena lahan memiliki sifat fisik, sosial, ekonomi, dan geografi yang bervariasi atau dengan kata lain lahan diciptakan tidak sama. Adanya variasi sifat tersebut dapat mempengaruhi penggunaan lahan yang sesuai termasuk untuk budidaya tambak.

Dalam pelaksanaan program revitalisasi di bidang akuakultur, telah ditetapkan komoditas unggulan untuk budidaya tambak yaitu: udang, rumput laut, kerapu, kepiting/rajungan, dan ikan bandeng (DKP, 2005). Komoditas tersebut termasuk komoditas perikanan yang berbasis lahan, maka untuk dapat hidup, tumbuh, dan berproduksi memerlukan persyaratan-persyaratan tertentu yang dapat berbeda satu sama lain (Mustafa *et al.*, 2007b). Persyaratan tumbuh atau persyaratan penggunaan lahan yang diperlukan oleh masing-masing komoditas tersebut dapat dijadikan dasar dalam menyusun kriteria kesesuaian lahan.

Chanratchakool *et al.* (1995) menyatakan aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kesesuaian lahan untuk budidaya tambak meliputi: sumber air, kualitas tanah, dan ketersediaan infrastruktur. Poernomo (1979) menyatakan bahwa aspek penting yang harus memenuhi persyaratan

dalam evaluasi kesesuaian lahan untuk budidaya tambak adalah aspek ekologi dan topografi, tanah, dan biologi. Aspek rekayasa, kualitas tanah, kualitas air, iklim, dan fasilitas infrastruktur adalah aspek yang umum dipertimbangkan oleh Muir & Kapetsky (1988), Boyd (1995), Hardjowigeno *et al.* (1996), Treece (2000), Karthik *et al.* (2005), dan Mustafa *et al.* (2007a) dalam evaluasi lahan untuk budidaya tambak. Namun demikian, kriteria yang digunakan masih bersifat umum untuk seluruh komoditas perikanan yang dapat dibudidayakan di tambak. Syarat-syarat dalam evaluasi lahan untuk budidaya tambak kadang-kadang memiliki peubah dengan nilai yang berbeda dan tergantung pada letak geografis (Prasita, 2007). Di samping itu, kondisi lingkungan yang dibutuhkan oleh setiap komoditas juga dilaporkan berbeda oleh penulis yang berbeda pula. Faktor kimia air, ketersediaan air, penggunaan lahan, kimia tanah, infrastruktur, sarana pendukung, sarana produksi, faktor risiko, dan keberadaan mangrove sebagai indikator telah digunakan oleh Salam *et al.* (2003) sebagai kriteria dalam penentuan kesesuaian lahan tambak untuk budidaya kepiting bakau (*Scylla serrata*) dan udang windu (*Penaeus monodon*). Untuk peubah kualitas air, Mustafa *et al.* (2007b) telah melaporkan kriteria beberapa peubah kualitas air untuk udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*), udang windu, ikan bandeng (*Chanos chanos*), dan rumput laut (*Gracilaria verrucosa*) di tambak. Selain kualitas air, faktor lingkungan lain yang dipertimbangkan untuk evaluasi kesesuaian lahan budidaya tambak adalah kualitas tanah. Kualitas tanah dapat memegang peran positif dengan sifatnya yang menguntungkan bagi suatu penggunaan lahan dan sebaliknya dapat memegang peran negatif dengan sifatnya yang merugikan atau

menjadi penghambat atau pembatas terhadap penggunaan lahan.

Perubahan sifat-sifat tanah tergantung dari waktu, karena ada peubah kualitas tanah yang berubah hanya dalam hitungan menit atau jam; berubah dalam hitungan beberapa bulan atau beberapa tahun; atau berubah dalam hitungan ratusan atau ribuan tahun (Anonymous, 2001). Pelapukan kimia dan fisik sekalipun dalam kondisi ideal memerlukan ratusan atau bahkan ribuan tahun untuk berkembang menjadi tanah dewasa yang matang. Tanah sulfat masam yang umum dijumpai di kawasan pertambakan di Indonesia mempunyai sifat khas atau spesifik, antara lain mudah berubah akibat bencana alam seperti kekeringan dan akibat ulah manusia seperti reklamasi, pembukaan lahan, perladangan dan pertanian intensif. Oleh karena itu, dalam pemilihan kriteria kualitas tanah untuk budidaya tambak, dipilih peubah yang besar pengaruhnya terhadap budidaya tambak tetapi peubah tersebut bersifat stabil atau agak sulit berubah.

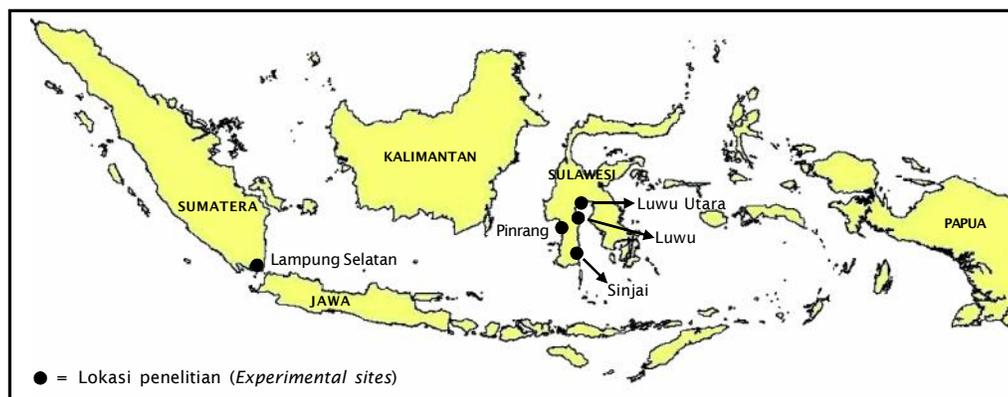
Setiap komoditas yang dibudidayakan di tambak, menuntut kualitas tanah yang dapat berbeda untuk tumbuh secara optimum. Oleh karena itu, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui hubungan antara peubah kualitas tanah dengan produktivitas tambak untuk berbagai komoditas perikanan air payau dalam upaya penajaman kriteria kesesuaian lahan budidaya tambak.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di kawasan pertambakan yang ada di Kabupaten Pinrang,

Sinjai, Luwu, dan Luwu Utara Provinsi Sulawesi Selatan dan Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung (Gambar 1). Untuk mendapatkan informasi awal mengenai kegiatan budidaya tambak di setiap kabupaten tersebut, maka dilakukan pertemuan dengan staf Dinas Kelautan dan Perikanan di setiap kabupaten. Penelitian diawali dengan melihat secara keseluruhan tambak yang ada di setiap kabupaten. Titik-titik pengamatan atau tambak terpilih ditentukan secara acak dari Peta *Mapping Unit* (Satuan Pemetaan) yaitu gabungan Peta *Landscape* (Bentuk Lahan) dan *Land Use* (Penggunaan Lahan). Pembudidaya tambak dari tambak terpilih menjadi responden dalam penelitian ini. Titik-titik pengamatan ditentukan posisinya dengan *Global Positioning System* (GPS).

Metode penelitian yang diaplikasikan adalah metode survai, termasuk untuk mendapatkan data primer dari produksi yang dilakukan melalui pengajuan kuisioner dan perekaman pada saat wawancara kepada responden secara terstruktur. Untuk mengetahui kualitas tanah tambak maka dilakukan pengambilan contoh tanah pada kedalaman 0,00--0,20 m dasar tambak pada tiga tempat di setiap petak tambak yang selanjutnya dikomposit. Kualitas tanah yang diukur secara *in situ* adalah pH_F (pH tanah yang diukur langsung di lapangan) dengan pH-meter (Ahern & Rayment, 1998) dan pH_{FOX} (pH tanah yang diukur di lapangan setelah dioksidasi dengan hidrogen peroksida 30%) dengan pH-meter (Ahern & Rayment, 1998). Untuk analisis peubah kualitas tanah lainnya, maka contoh tanah yang ada dalam kantong plastik di-



Gambar 1. Lokasi penelitian pada tambak di Indonesia

Figure 1. Experimental sites in the brackish water ponds of Indonesia

masukkan dalam *cold box* yang selanjutnya diberi es. Sisa tumbuhan segar, kerikil, cangkang, dan kotoran lainnya dibuang dan bongkahan besar dikecilkan dengan tangan. Contoh tanah diovenkan pada suhu 80°C—85°C selama 48 jam untuk tanah sulfat masam (Ahern & Blunden, 1998) dan dikeringanginkan dalam ruangan khusus bebas kontaminan yang terlindung dari sinar matahari untuk tanah non-sulfat masam. Setelah kering, contoh tanah dihaluskan dengan cara ditumbuk pada lumpang porselin dan diayak dengan ayakan ukuran lubang 2 mm dan selanjutnya dianalisis di Laboratorium Tanah Balai Riset Perikanan Budidaya Air Payau di Maros. Kualitas tanah yang dianalisis di laboratorium meliputi pH_{H_2O} (pH dari ekstrak H_2O) (Menon, 1973), S_{KCl} (sulfur yang diekstrak dengan KCl), S_p (sulfur peroksida), S_{POS} ($S_p - S_{KCl}$) (Ahern *et al.*, 1998b), Fe dengan SSA (spektrofotometer serapan atom), Al dengan SSA, PO_4 dengan metode Olsen atau Bray 1 (Sulaeman *et al.*, 2005), SO_4 dengan metode turbidimetri (Menon, 1973), bahan organik dengan metode *Walkey and Black* (Menon, 1973) dan tekstur dengan metode hidrometer (Bouyoucos, 1962).

Sebagai peubah tak bebas dalam penelitian ini adalah produktivitas tambak untuk budidaya udang vannamei, rumput laut, dan polikultur udang windu dengan ikan bandeng. Sebagai peubah bebas yaitu berbagai peubah kualitas tanah. Koefisien korelasi ditentukan untuk mengetahui keeratan hubungan antar peubah kualitas tanah pada tanah sulfat masam. Koefisien korelasi yang tinggi menunjukkan hubungan yang sangat erat antar peubah dan selanjutnya dipilih satu di antaranya dengan memilih peubah yang lebih mudah ditentukan di lapangan. Estimasi kurva dari analisis regresi digunakan untuk menentukan hubungan antara produktivitas tambak untuk setiap komoditas dengan setiap peubah kualitas tanah. Model regresi “terbaik” ditentukan berdasarkan berturut-turut dari nilai R^2 (koefisien determinasi yang disesuaikan), nilai JKS (jumlah kuadrat sisa) dan nilai P (probabilitas) sesuai metode kuadrat terkecil. Taraf signifikansi dari statistik ditetapkan pada $P < 0,10$. Seluruh data dianalisis dengan bantuan Program *Statistical Product and Service Solution* (SPSS) 15,0 (SPSS, 2006). Apabila model regresi “terbaik” yang didapatkan adalah kuadratik dan bersifat signifikan atau sangat signifikan maka produktivitas tambak maksimum atau minimum dapat ditentukan dengan mencari turunan produksi (y) terhadap

kualitas tanah (x) kemudian menyamakannya dengan nol (“y/x = 0”).

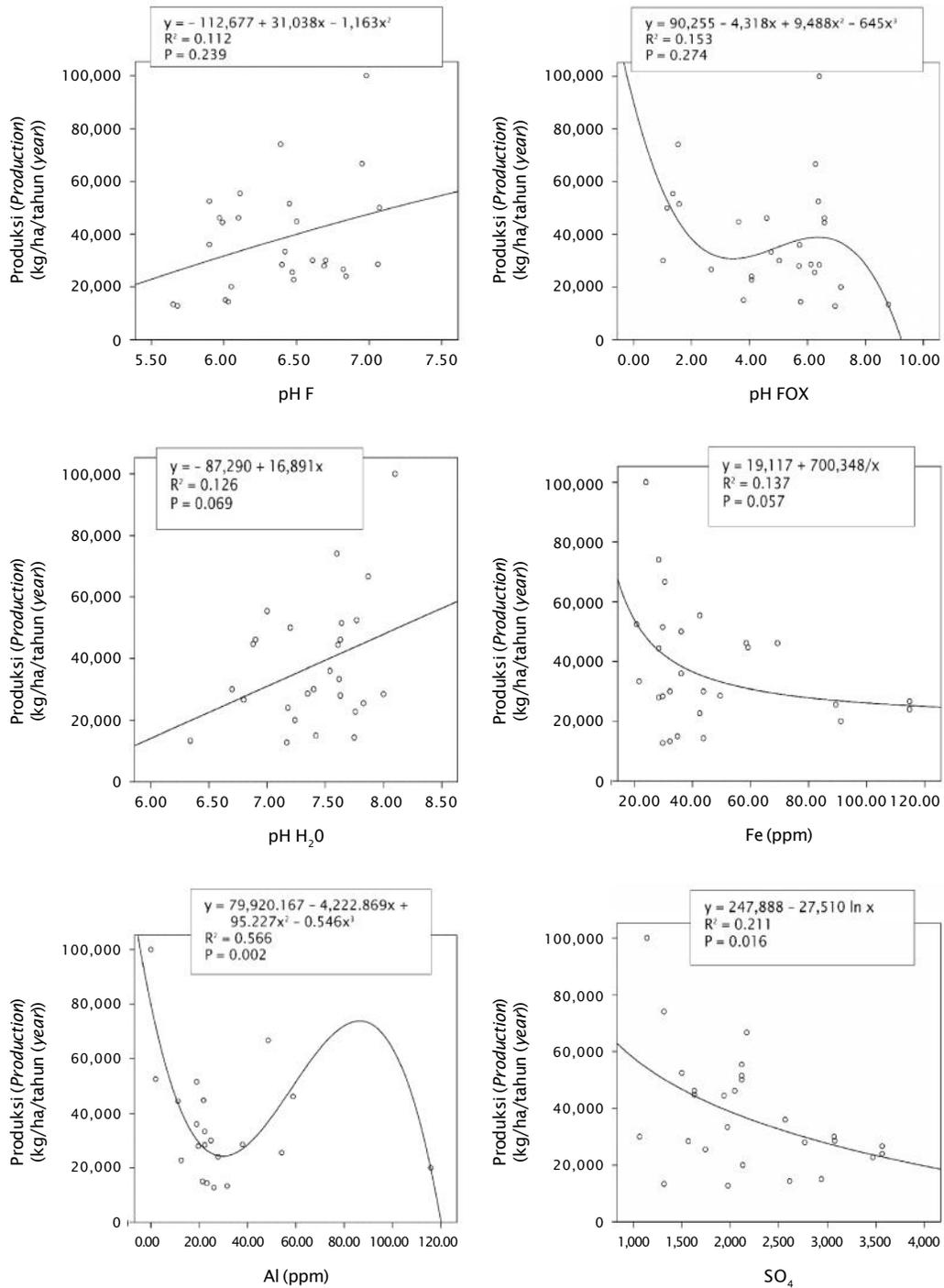
HASIL DAN BAHASAN

Udang Vannamei

Tambak yang digunakan untuk budidaya udang vannamei di Kabupaten Lampung Selatan umumnya dibangun di kawasan supratidal, bahkan di kawasan perbukitan yang dikonstruksi dengan teknik potong dan isi (*cut and fill*). Ada juga tambak yang dibangun di kawasan intertidal yang merupakan tanah sulfat masam yang selanjutnya dilapisi dengan tanah yang berasal dari kawasan perbukitan. Oleh karena itu, peubah kualitas tanah yang dianalisis seperti pH merupakan peubah untuk tanah sulfat masam dan tanah non sulfat masam.

Baik pH_F maupun pH_{FOX} tanah tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produksi udang vannamei, sedangkan pH_{H_2O} memberikan pengaruh signifikan terhadap produksi udang vannamei di tambak. pH_F dan pH_{FOX} tanah adalah peubah kualitas yang khas untuk tanah sulfat masam, sehingga tidak dapat memberikan gambaran yang sebenarnya terhadap kemasaman tanah secara umum, sebab pada umumnya tambak udang vannamei di Kabupaten Lampung Selatan dibangun pada tambak tanah non-sulfat masam. Sebaliknya pH_{H_2O} tanah yang menyatakan kemasaman aktif atau aktual merupakan jenis pH yang umum untuk tanah non-sulfat masam memiliki hubungan signifikan dengan produksi udang vannamei ($P = 0,069$) dengan nilai $R^2 = 0,126$ dan model regresi “terbaik” adalah model linier positif (Gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa 12,6% produksi udang vannamei ditentukan oleh pH_{H_2O} tanah dan sisanya, 87,4% ditentukan oleh faktor lainnya yang tidak dapat diperhitungkan dalam model. Juga mengindikasikan bahwa peningkatan pH_{H_2O} tanah berdampak pula pada peningkatan produksi udang vannamei. Nilai pH_{H_2O} tanah tambak untuk budidaya udang vannamei berkisar antara 6,34 dan 8,10 dengan rata-rata 7,40. Belum ada informasi mengenai pH tanah optimum untuk budidaya udang vannamei, tetapi Karthik *et al.* (2005) menyatakan bahwa tanah tambak dengan pH antara 6,5 dan 8,5 digolongkan sebagai *slight* karena nilai pH tanah tersebut tergolong baik dan pembatasnya sangat mudah sekali diatasi.

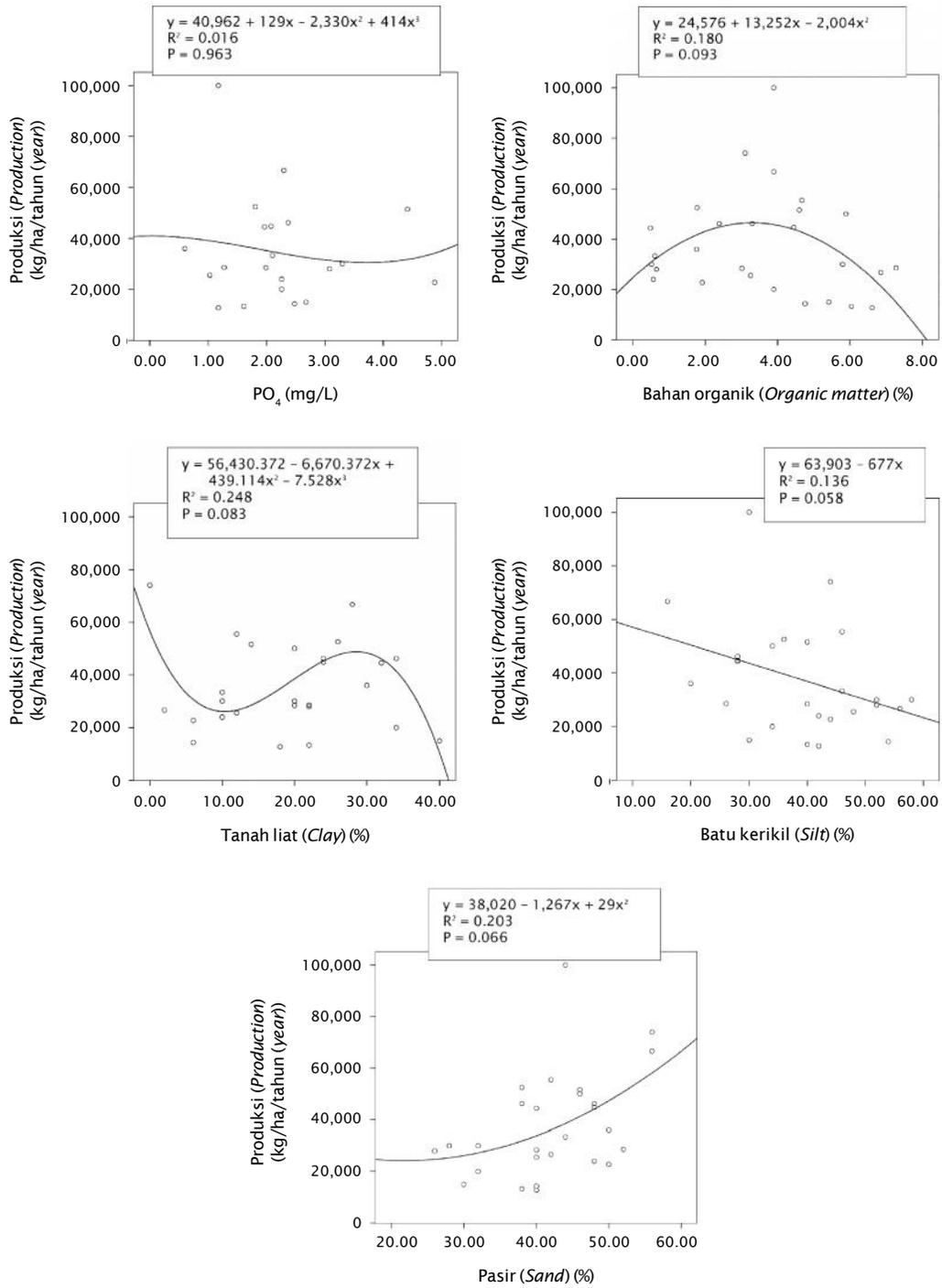
Hubungan antara faktor kondisi lingkungan (Akhmad Mustafa)



Gambar 2. Hubungan antara produksi udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) dan kualitas tanah tambak

Figure 2. Relationship between production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and soil quality in the brackish water ponds

Lanjutan Gambar 2 (Figure 2 continued)



Dengan demikian, peningkatan pH tanah yang digunakan untuk budidaya udang vannamei masih dapat meningkatkan produksi udang vannamei secara signifikan, sebab batas atas pH tanah yang baik untuk udang vannamei belum tercapai.

Unsur atau senyawa toksik dalam tanah yang dievaluasi dalam hubungannya dengan produktivitas tambak untuk udang vannamei dalam penelitian ini seperti Fe, Al, dan SO_4 , ternyata memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produksi udang vannamei. Secara umum, peningkatan kandungan unsur atau senyawa tersebut berdampak pada penurunan produksi udang vannamei, walaupun dengan model regresi "terbaik" yang berbeda. Model regresi "terbaik" dalam hubungan antara produksi udang vannamei dengan Fe, Al, dan SO_4 berturut-turut adalah model kebalikan, kubik, dan logaritmik (Gambar 2). Secara umum logam seperti Fe dan Al dapat menyebabkan gangguan pada proses fisiologis organisme akuatik. Besi dapat menyebabkan penyumbatan pada insang ikan dan udang (Sammut, 1999). Penyumbatan pada insang ikan dan udang berarti mempersempit luas permukaan insang yang berdampak pada berkurangnya difusi oksigen ke permukaan organ pernafasan pada saat inspirasi dan difusi karbondioksida pada saat ekspirasi. Keberadaan Al berdampak negatif pada pakan alami, ikan, dan udang (Sammut, 1999). Oleh karena itu, peningkatan kandungan logam tersebut menyebabkan penurunan produksi udang vannamei.

Dalam budidaya udang vannamei di Kabupaten Lampung Selatan, teknologi yang diaplikasikan adalah intensif dan superintensif dengan padat penebaran 75 sampai 240 ekor/ m^2 dengan rata-rata 148 ekor/ m^2 . Dalam hal ini, pakan buatan menjadi kebutuhan yang mutlak untuk pertumbuhan dan penghidupan udang vannamei, sebaliknya pakan alami bukan menjadi kebutuhan yang utama. Oleh karena itu, PO_4 yang merupakan senyawa yang dibutuhkan untuk penumbuhan pakan alami memberikan pengaruh yang tidak signifikan terhadap produksi udang vannamei ($P=0,963$).

Hubungan antara kandungan bahan organik tanah dengan produksi udang vannamei adalah signifikan ($P=0,096$). Nilai R^2 antara kandungan bahan organik tanah dan produksi udang vannamei adalah 0,180 yang berarti bahwa 18,0% bahan organik mempengaruhi produksi udang vannamei.

Model regresi "terbaik" antara kandungan bahan organik dengan produksi udang vannamei adalah model kuadrat dengan persamaan regresi:

$$Y = 24.576 + 13.252x - 2.004x^2$$

di mana:

Y = produksi udang vannamei (kg/ha tahun)

x = kandungan bahan organik (%)

Setelah persamaan regresi tersebut diturunkan kemudian disamakan dengan nol, maka didapatkan bahwa produksi udang vannamei tertinggi didapatkan pada kandungan bahan organik tanah sebesar 3,31%. Dalam hal ini bahan organik diperlukan dalam budidaya udang vannamei sampai pada kandungan 3,31% dan kandungan yang lebih tinggi akan berdampak pada penurunan produksi udang vannamei. Kandungan bahan organik yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan populasi bakteri, CO_2 , H_2S , dan CH_4 yang dapat membahayakan kehidupan dan menghambat pertumbuhan udang vannamei. Dikatakan oleh Paquotte *et al.* (1998) bahwa udang vannamei berada dalam kondisi pemeliharaan yang sangat baik apabila udang vannamei tidak kontak dengan bahan organik termasuk limbah organik. Agak berbeda dengan tambak yang dikelola secara tradisional dan semi-intensif yang masih membutuhkan pakan alami seperti klekap untuk pertumbuhan organisme yang dibudidayakan. Di mana bahan organik berupa pupuk kandang secara sengaja ditambahkan kedalam tambak dalam upaya peningkatan biomassa pakan alami. Biomassa klekap melimpah pada kandungan bahan organik tanah 9%-15% dan sangat melimpah pada kandungan bahan organik lebih besar 15% (ASEAN, 1978).

Tekstur tanah merupakan perbandingan relatif antara fraksi liat, debu, dan pasir dari tanah. Ketiga fraksi pembentuk tekstur tersebut memberikan pengaruh signifikan terhadap produksi udang vannamei di tambak, namun dengan model regresi "terbaik" yang berbeda. Model regresi "terbaik" antara produksi udang vannamei dengan kandungan liat, debu, dan pasir berturut-turut adalah kubik, linier, dan kuadrat (Gambar 2). Dari Gambar 2 terlihat bahwa ada kecenderungan penurunan produksi udang vannamei pada kandungan liat lebih besar 30%. Juga terlihat bahwa peningkatan kandungan debu berdampak pada penurunan produksi udang

vannamei. Sebaliknya peningkatan kandungan pasir tanah lebih besar dari 21,8% berdampak pada peningkatan produksi udang vannamei (Gambar 2). Walaupun udang vannamei dapat menempati seluruh badan air dan tidak memiliki sifat seperti udang windu yang lebih banyak berdiam dan beraktivitas di dasar tambak, tetapi udang vannamei juga dipengaruhi oleh tekstur tanah. Udang vannamei memiliki sedikit sifat untuk membenamkan diri dalam sedimen atau tanah dasar tambak (Boddeke, 1983). Kandungan liat atau debu yang tinggi dari tanah dasar tambak dapat berdampak pada peningkatan kekeruhan air. Peningkatan kekeruhan air dapat menghambat penetrasi cahaya dan transfer oksigen dari atmosfer kedalam badan air. Selain itu, peningkatan kekeruhan air akan menghambat daya lihat dan mengganggu kerja organ pernafasan yaitu insang, sehingga terjadi *asphyxiation* pada organisme akuatik. Sebaliknya pada kandungan pasir yang tinggi memudahkan pengelolaan kelebihan bahan organik dari sisa pakan atau kotoran udang. Pada sedimen pasir, laju nitrifikasi lebih tinggi, di samping lebih rendahnya kekeruhan, amonia, dan populasi bakteri (Bratvold & Browdy, 2001).

Kandungan pasir yang tinggi dan liat yang rendah dapat mengakibatkan tingginya porositas pematang tambak. Fraksi pasir memiliki potensi untuk lebih kompak yang tergolong rendah, sedangkan liat tergolong tinggi (Schaetzl & Anderson, 2005). Dikatakan oleh Boyd (1995) bahwa suatu material tanah yang merupakan campuran dari partikel yang berbeda ukuran dan mengandung minimum 30% liat adalah ideal untuk konstruksi tambak. Tekstur tanah yang baik untuk tambak adalah: liat, lempung berliat, lempung liat berdebu, lempung berdebu, lempung, dan lempung liat berpasir (Ilyas *et al.*, 1987). Namun demikian, kemungkinan porositas yang tinggi dengan kandungan pasir yang tinggi pada tambak udang vannamei di Kabupaten Lampung Selatan dapat di atasi dengan pematang tambak yang dibeton atau dilapisi plastik atau pematang tambak dibuat lebih kompak dan lebih lebar.

Rumput Laut

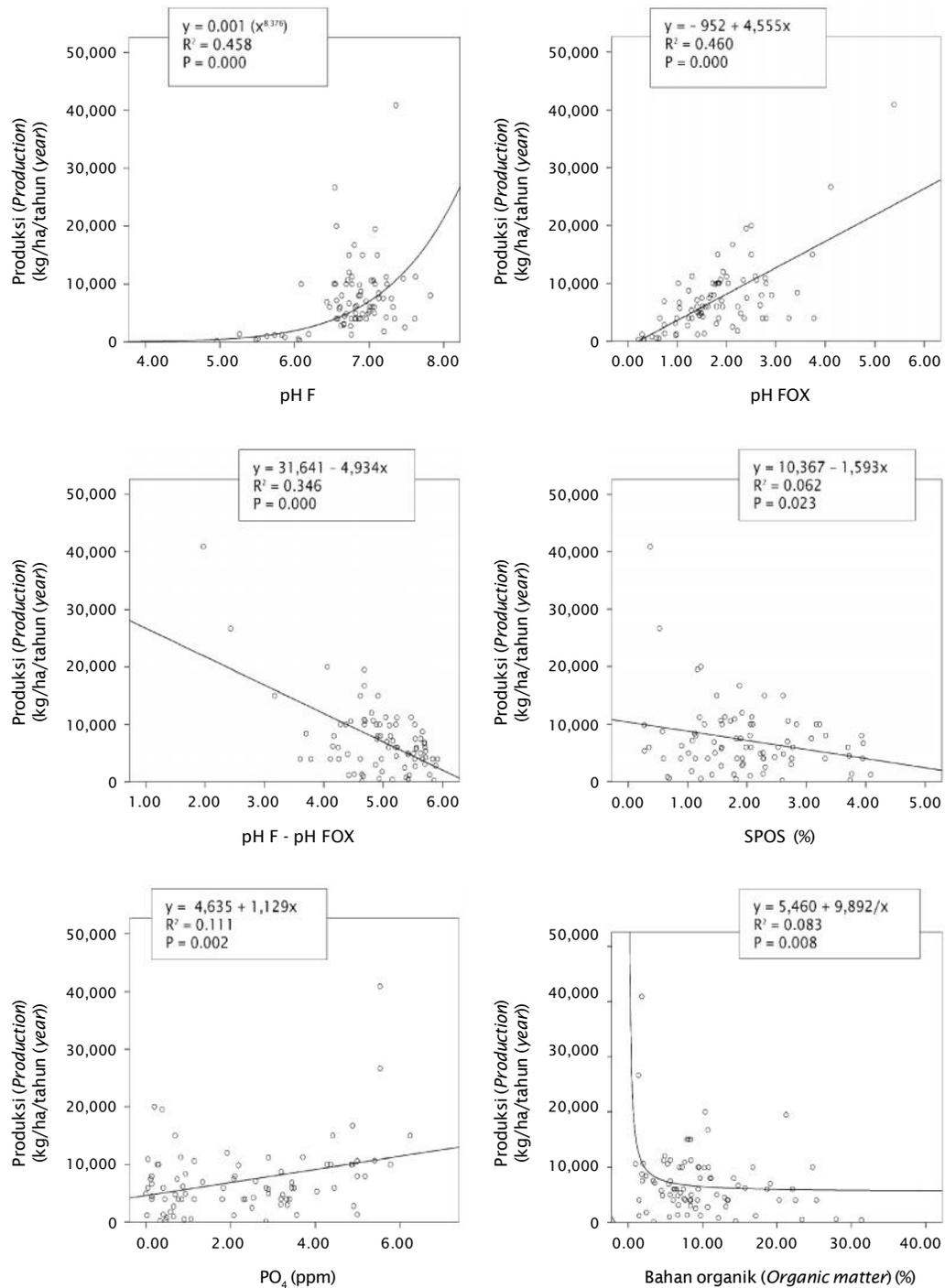
Budidaya rumput laut di tambak Kabupaten Sinjai, Luwu, dan Luwu Utara umumnya dilakukan di tambak tanah sulfat masam. Tanah sulfat masam adalah tanah atau sedimen yang mengandung besi sulfida atau pirit dengan karakteristik tanah ditandai dengan pH yang

rendah, kandungan unsur toksik yang tinggi dan kandungan fosfat yang rendah (Dent, 1986; Schaetzl & Anderson, 2005; Mustafa, 2007). Perbedaan kondisi tanah (teroksidasi atau tereduksi) berdampak pada perubahan karakteristik tanah, sehingga peubah kualitas tanah yang dianalisis untuk tanah sulfat masam adalah juga peubah kualitas tanah yang khas atau menjadi ciri spesifik untuk tanah sulfat masam.

pH tanah merupakan penciri utama tanah sulfat masam dan menggambarkan kondisi kemasaman, proses kimia yang mungkin terjadi serta akibatnya terhadap kualitas tanah. Baik pH_F maupun pH_{FOX} tanah memiliki hubungan yang sangat signifikan terhadap produksi rumput laut di tambak (Gambar 3). Walaupun model regresi "terbaik" untuk kedua peubah kualitas tanah itu berbeda, tetapi terlihat bahwa makin tinggi pH maka makin tinggi pula produksi rumput laut. Model regresi "terbaik" pH_F adalah model *compound* dan untuk pH_{FOX} adalah model linier. Pengaruh keduanya terhadap produksi rumput laut juga relatif sama besarnya yang terlihat dari nilai R^2 masing-masing peubah tersebut. pH_F berkontribusi sebesar 45,8% terhadap produksi rumput laut, sedangkan pH_{FOX} berkontribusi sebesar 46,0% terhadap produksi rumput laut. pH_F adalah pH tanah yang diukur di lapangan dalam kondisi tanah jenuh dengan air, sedangkan pH_{FOX} adalah pH tanah yang diukur di lapangan setelah dioksidasi sempurna dengan H_2O_2 30% (Ahern & Rayment, 1998). Dalam hal ini, kedua jenis pengukuran pH di lapangan ini dapat menggambarkan produktivitas tambak tanah sulfat masam untuk budidaya rumput laut dengan pengaruh yang relatif sama. Makin tinggi nilai pH_F dan pH_{FOX} makin tinggi pula produktivitas tambak untuk rumput laut. Seperti dilaporkan oleh Mustafa & Sammut (2006) bahwa peningkatan 1 unit pH_{FOX} tanah sampai kondisi netral dapat meningkatkan produksi rumput laut 204 kg kering/ha/tahun.

Selisih antara pH_F dan pH_{FOX} ($pH_F - pH_{FOX}$) dapat menggambarkan potensi kemasaman dari tanah sulfat masam (Mustafa, 2007). Nilai $pH_F - pH_{FOX}$ juga berhubungan secara sangat signifikan dengan produksi rumput laut di mana, model regresi "terbaik" adalah model linier negatif yang berarti peningkatan nilai $pH_F - pH_{FOX}$ diikuti dengan penurunan produksi rumput laut. Model regresi yang sama juga ditunjukkan oleh nilai S_{POS} yang juga menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai S_{POS} semakin rendah produksi rumput laut. Korelasi

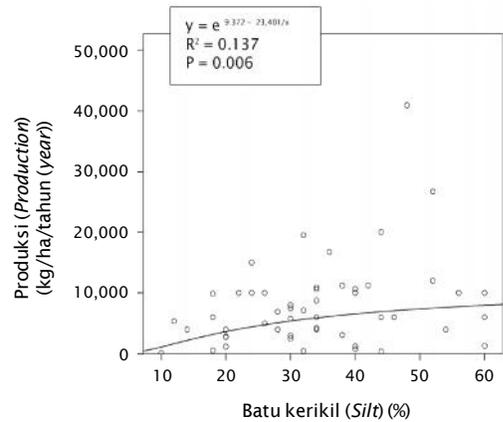
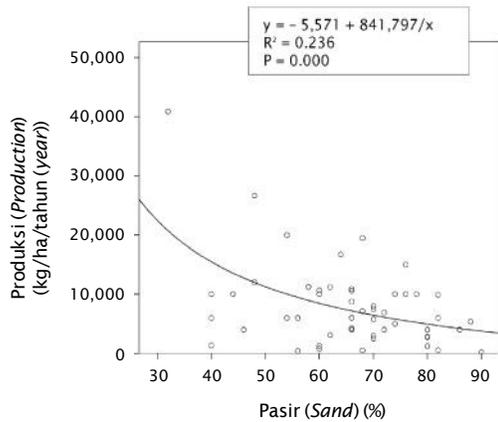
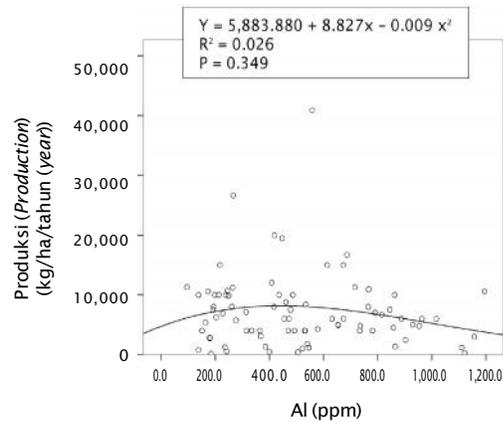
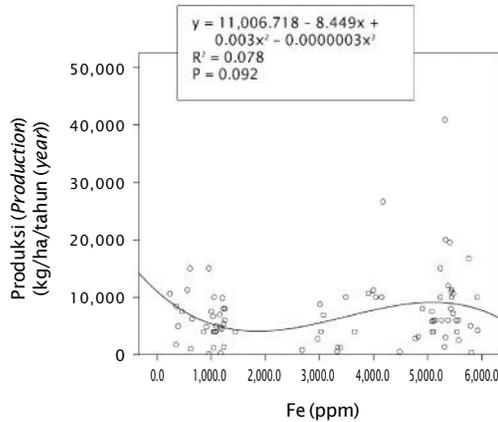
Hubungan antara faktor kondisi lingkungan (Akhmad Mustafa)



Gambar 3. Hubungan antara produksi rumput laut (*Gracilaria verrucosa*) dan kualitas tanah tambak

Figure 3. Relationship between production of seaweed (*Gracilaria verrucosa*) and soil quality in the brackish water ponds

Lanjutan Gambar 3 (Figure 3 continued)



yang sangat signifikan antara pH_F - pH_{FOX} dan S_{POS} telah dilaporkan oleh Mustafa (2007). Makin besar nilai pH_F - pH_{FOX} dan S_{POS} menunjukkan semakin besar pula potensi kemasaman dari tanah sulfat masam yang berarti berpeluang untuk lebih memasamkan tanah atau menurunkan pH tanah. S_{POS} telah digunakan untuk menentukan kebutuhan kapur dari tanah sulfat masam untuk meningkatkan pH tanah (Ahern *et al.*, 1998a). Semakin tinggi nilai S_{POS} tanah berarti kebutuhan kapur juga lebih tinggi yang berarti pula bahwa pada nilai S_{POS} yang lebih tinggi menunjukkan pula kemasaman yang tinggi. Oleh karena itu, pada nilai pH_F - pH_{FOX} dan S_{POS} yang rendah menunjukkan kondisi kemasaman yang lebih baik dibandingkan dengan tanah yang memiliki nilai pH_F - pH_{FOX} dan S_{POS} yang tinggi, sehingga berdampak pada produksi rumput laut yang lebih tinggi.

Dari hasil analisis peubah-peubah kualitas tanah yang menggambarkan kemasaman tanah menunjukkan bahwa rumput laut dapat tumbuh dengan baik pada pH tanah yang lebar dan diperlihatkan oleh model regresi "terbaik" yang umumnya bersifat linier positif. Hal ini menunjukkan bahwa makin tinggi pH makin tinggi pula produksi rumput laut. Dalam kondisi seperti ini, pH optimum belum dapat ditentukan. Namun demikian, produksi rumput laut yang lebih tinggi didapatkan pada tanah dengan pH_F lebih besar 6,5; pH_{FOX} lebih besar 4,0; pH_F - pH_{FOX} kurang dari 2,5; dan S_{POS} kurang dari 1,00%.

Kandungan PO_4 tanah sangat signifikan ($P=0,002$) pengaruhnya terhadap produksi rumput laut dengan nilai R^2 sebesar 0,111 yang berarti PO_4 tanah memiliki pengaruh 11,1% terhadap produksi rumput laut di tambak. Model

regresi “terbaik” antara kandungan PO_4 tanah dengan produksi rumput laut adalah model linier positif yang berarti makin tinggi kandungan PO_4 tanah maka semakin tinggi pula produksi rumput laut. Hal ini berbeda dengan pernyataan Agustina (2004) bahwa hubungan antara unsur hara makro dan produksi tanaman mengikuti model kuadratik. Dalam hal ini produksi maksimum dicapai pada kandungan unsur hara makro yang tidak terlalu tinggi, makin tinggi kandungan unsur hara makro justru menurunkan produksi. Namun hal ini dapat dimengerti, seperti telah diketahui bahwa kandungan PO_4 pada tanah sulfat masam umumnya sangat rendah sebab terikat oleh Fe dan Al, sehingga menjadi tidak tersedia bagi organisme akuatik termasuk rumput laut. Selain itu, pembudidayaan rumput laut seperti di Kabupaten Luwu, Sulawesi Selatan hanya mengaplikasikan pupuk yang mengandung PO_4 dalam dosis yang kecil (Mustafa & Ratnawati, 2005), sehingga kandungan PO_4 tanah tergolong sangat rendah. Padahal fosfor merupakan unsur penting bagi semua aspek kehidupan terutama dalam transformasi energi metabolik (Kuhl, 1974). Hal ini menunjukkan bahwa kandungan PO_4 yang tertinggi pun pada tambak tanah sulfat masam belum sampai dapat menurunkan produksi rumput laut.

Telah disebutkan sebelumnya bahwa tambak yang digunakan untuk budidaya rumput laut di pantai timur Sulawesi Selatan umumnya didominasi oleh tanah sulfat masam. Tanah sulfat masam ini biasanya berasosiasi dengan tanah gambut seperti terlihat pada penelitian ini di mana kandungan bahan organik tanah dapat mencapai 31,4% dengan rata-rata 9,8%. Bahan organik yang telah terdekomposisi dapat menjadi sumber hara bagi rumput laut, namun demikian jika kandungan sangat tinggi dapat menghambat pertumbuhan rumput laut. Juga telah disebutkan sebelumnya bahwa dekomposisi bahan organik dapat menghasilkan CO_2 , H_2S dan CH_4 yang tinggi dapat menghambat pertumbuhan organisme akuatik.

Besi dan Al adalah logam yang melimpah di tanah sulfat masam, di mana Fe merupakan produk langsung dari oksidasi pirit dan Al merupakan produksi langsung dari pelapukan alumino-silikat oleh kemasaman (Dent, 1986; Golez & Kyuma, 1997). Kandungan Fe tanah berkorelasi secara signifikan dengan produksi rumput laut ($P= 0,092$) dengan model regresi “terbaik” adalah model kubik. Dari Gambar 3 terlihat bahwa pada kandungan lebih besar

dari 5.000 mg/L berdampak pada penurunan produksi rumput laut. Besi dibutuhkan oleh tanaman termasuk rumput laut sebagai penyusun sitokrom dan klorofil serta berperan dalam sistem enzim dan transfer elektron pada proses fotosintesis (Effendi, 2003). Besi adalah logam yang dibutuhkan alga paling besar dibandingkan dengan logam lainnya (Malea & Haritinodis, 1999; Caliceti *et al.*, 2002). Namun demikian, kelebihan Fe tanah berdampak pada pengikatan unsur hara tertentu seperti fosfat menjadi tidak tersedia bagi rumput laut. Mustafa & Sammut (2007) telah melaporkan adanya korelasi yang sangat nyata antara kandungan Fe dan P-tersedia di mana makin tinggi kandungan Fe maka kandungan P-tersedia makin kecil. Selain itu, kelebihan Fe dapat menyebabkan keracunan pada tanaman seperti pada tanaman padi (*Oriza sativa*), sekalipun tergolong tahan terhadap kondisi kandungan Fe tinggi, sebagian mengalami keracunan pada kandungan Fe 500 mg/L (Ponnamperuma, 1976).

Kandungan Al berhubungan tidak signifikan ($P= 0,349$) dengan produksi rumput laut di tambak. Dalam hal ini, pada kandungan Al tanah antara 96 dan 1.195 mg/L belum memberikan pengaruh terhadap produksi rumput laut. Namun demikian, ada kecenderungan penurunan produksi rumput laut pada tanah dengan kandungan Al melebihi 490 mg/L (Gambar 3). Kelarutan Al yang tinggi menyebabkan pembelahan dan perkembangan sel terhambat akibat enzim yang melakukan sintesis bahan dari dinding sel terganggu (Rorison, 1973). Kandungan Al yang cukup rendah, 1--2 mg/L sudah dapat meracuni tanaman (Dent, 1986) dan pada kandungan Al lebih besar 25 mg/L dapat meracuni padi umur 3--4 minggu (Langenhoff, 1986).

Pada tanah sulfat masam maupun tanah sulfat masam yang berasosiasi dengan tanah gambut menunjukkan kandungan liat yang sangat rendah bahkan beberapa contoh tanah tidak terdeteksi kandungan liatnya. Kandungan pasir sangat signifikan ($P= 0,000$) pengaruhnya terhadap produksi rumput laut dengan model regresi “terbaik” adalah model kebalikan. Dari Gambar 3 terlihat bahwa makin rendah kandungan pasir makin tinggi produksi rumput laut. Hal ini sangat terkait dengan sifat fisik dan kimia dari fraksi pasir. Tambak dengan kandungan pasir yang tinggi berdampak pada tingginya porositas pematang yang menyebabkan tinggi air tambak tidak bisa bertahan. Dikatakan oleh Mubarak *et al.* (1990)

bahwa lahan untuk budidaya rumput laut di tambak sebaiknya mempunyai dasar tambak yang bertekstur lempung berpasir, apabila dasar tambaknya memiliki porositas tinggi maka sangat sulit mempertahankan kedalaman air. Kondisi ini berbeda dengan tambak untuk budidaya udang vannamei yang mengurangi dan bahkan menghilangkan porositas pematang tambak dengan membuat pematang dari beton atau dilapisi plastik atau pematang dibuat lebih kompak dan diperlebar seperti dijelaskan sebelumnya. Ada kemungkinan rendahnya kedalaman air pada tambak yang didominasi fraksi pasir berdampak pada rendahnya produksi rumput laut. Mustafa & Sammut (2006) telah melaporkan bahwa tinggi air selama budidaya rumput laut di tambak tanah sulfat masam Kabupaten Luwu berkisar 0,2 sampai 0,8 m dengan rata-rata 0,53 m. Telah direkomendasikan bahwa tinggi air untuk budidaya rumput laut adalah 0,5--0,8 m (Anonymous, 1991) dan 0,6--0,8 m (Mubarak *et al.*, 1990). Produksi rumput laut, *Gracilaria edulis* yang lebih rendah didapatkan pada kedalaman air yang rendah pula sebagai akibat kelebihan cahaya dan talus rumput laut menjadi lebih kering (Kaladharan *et al.*, 1996).

Dalam hubungannya dengan sifat kimia dari fraksi pasir, rendahnya produksi rumput laut pada tanah dengan kandungan fraksi pasir yang tinggi adalah sebagai akibat kekurangan kemampuan pasir untuk menyerap air, ion-ion anorganik, bahan organik, dan gas-gas pada permukaannya (Boyd, 1995). Sebagai akibatnya, tanah yang didominasi fraksi pasir cenderung kandungan haranya lebih rendah yang berdampak pada lebih rendahnya produksi rumput laut. Tanah dengan kandungan fraksi pasir tinggi cenderung memiliki daya sangga yang rendah sehingga fluktuasi pH dapat lebih besar yang dapat pula mengganggu pertumbuhan rumput laut.

Kebalikan dari pengaruh fraksi pasir terhadap produksi rumput laut adalah adanya pengaruh secara sangat signifikan yaitu dengan meningkatnya kandungan debu menyebabkan peningkatan produksi rumput laut. Secara fisik, lebih tingginya kandungan debu berdampak pada lebih kompaknya dasar tambak maupun pematang tambak sehingga kedalaman air dapat dipertahankan. Secara kimia, dengan lebih tingginya kandungan fraksi debu dan liat sampai nilai tertentu menunjukkan kondisi tanah yang lebih baik. Menurut Schaetzl & Anderson (2005), debu memiliki kemampuan menyimpan unsur hara

yang tergolong rendah dan liat tergolong sedang sampai tinggi, sedangkan pasir tergolong sangat rendah. Tanah bertekstur liat atau liat berdebu, karena lebih halus maka setiap satuan berat mempunyai luas permukaan yang lebih besar sehingga kemampuan menahan air dan menyediakan unsur hara lebih tinggi. Dalam hal ini, ketersediaan unsur hara bagi rumput laut lebih terjamin pada tanah bertekstur halus dibandingkan dengan tanah bertekstur kasar, sehingga pertumbuhan rumput laut dapat lebih baik.

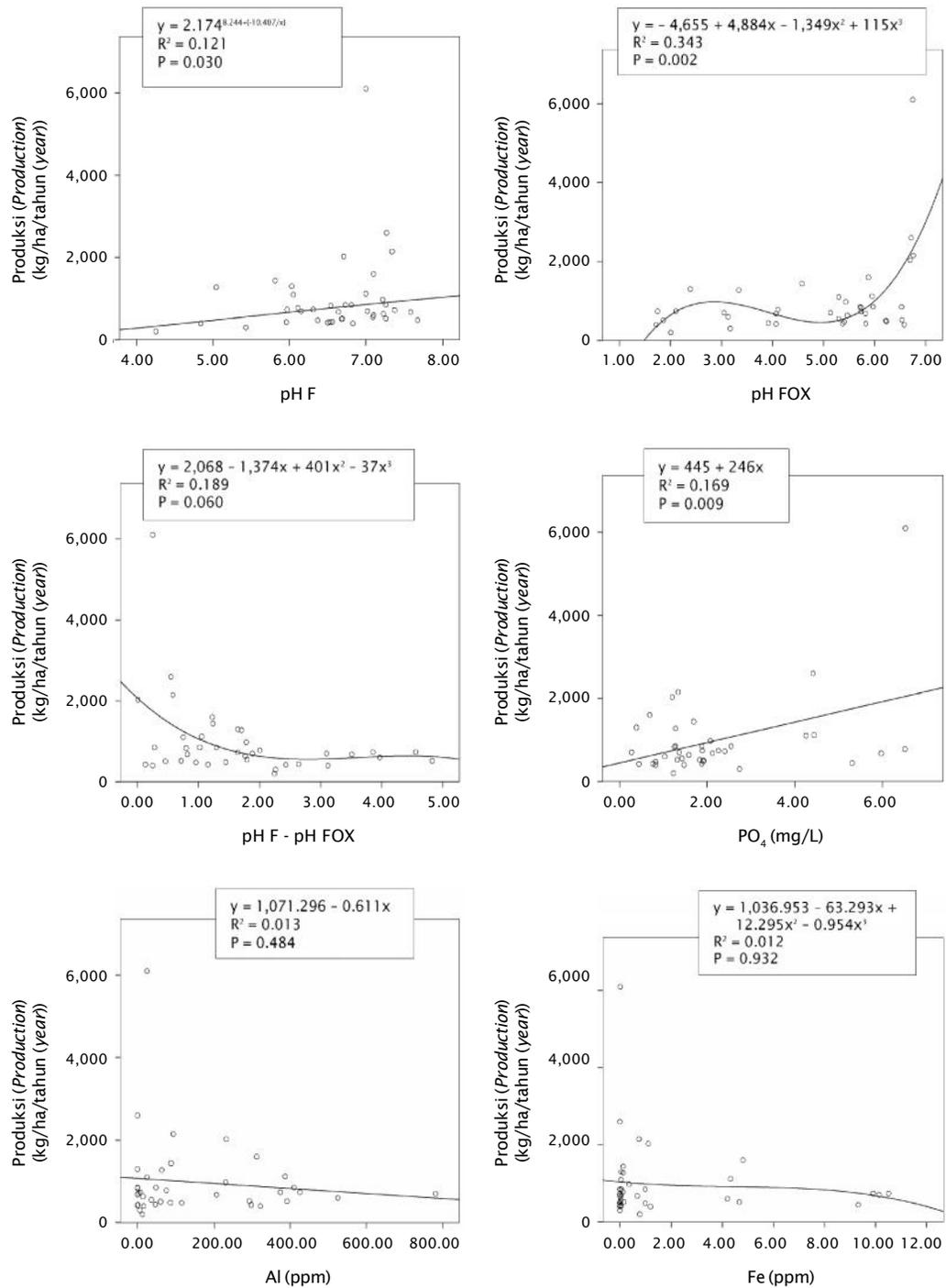
Udang Windu dan Ikan Bandeng

Polikultur antara udang windu dan ikan bandeng di Kabupaten Pinrang umumnya dilakukan di tambak tanah non-sulfat masam dan di beberapa tempat juga dilakukan di tambak tanah sulfat masam. Sebagai akibatnya, variasi pH tanah di tambak Kabupaten Pinrang relatif besar. Nilai pH_F berkisar antara 4,25 dan 7,67 dengan rata-rata 6,56 dan pH_{FOX} berkisar antara 1,72 dan 6,76 dengan rata-rata 4,83. pH_F memiliki hubungan yang signifikan ($P=0,030$) dengan produksi udang windu dan ikan bandeng dan bahkan pH_{FOX} memiliki hubungan sangat signifikan ($P=0,002$) dengan produksi udang windu dan ikan bandeng. Model regresi terbaik antara pH_F dan produksi udang windu dan ikan bandeng adalah model S, sedangkan antara pH_{FOX} dan produksi udang windu dan ikan bandeng adalah model kubik yang memperlihatkan adanya kecenderungan peningkatan produksi udang windu dan ikan bandeng seiring dengan peningkatan pH. Telah dilaporkan bahwa pH tanah optimum untuk udang windu adalah antara 7,5 dan 8,3 (Ilyas *et al.*, 1987; Poernomo, 1992).

Selisih antara pH_F dan pH_{FOX} yang menggambarkan potensi kemasaman tanah juga memiliki hubungan signifikan ($P=0,060$) dengan produksi udang windu dan ikan bandeng di tambak dengan model regresi "terbaik" adalah model kubik. Dari Gambar 4 terlihat bahwa semakin besar nilai pH_F-pH_{FOX} semakin rendah produksi udang windu dan ikan bandeng.

Kandungan PO_4 tanah sangat signifikan ($P=0,009$) hubungannya dengan produksi udang windu dan ikan bandeng. Pada polikultur antara udang windu dan ikan bandeng, teknologi yang umum digunakan adalah teknologi tradisional. Oleh karena itu, pakan alami menjadi penting untuk pertumbuhan dan penghidupan organisme yang dibudidayakan.

Hubungan antara faktor kondisi lingkungan (Akhmad Mustafa)



Gambar 4. Hubungan antara produksi udang windu (*Penaeus monodon*) dan ikan bandeng (*Chanos chanos*) dengan kualitas tanah tambak

Figure 4. Relationship between production of tiger prawn (*Penaeus monodon*) and milkfish (*Chanos chanos*) and soil quality in the brackish water ponds

PO_4 adalah salah satu senyawa yang diperlukan untuk pertumbuhan pakan alami seperti klekap dan plankton. Pada sistem akuatik, fosfor juga merupakan unsur penting karena merupakan unsur esensial untuk produksi primer (Boyd, 1995). Kandungan PO_4 pada tanah tambak tergolong sangat rendah (kurang dari 5 mg/L) sehingga peningkatan kandungan PO_4 tanah berdampak pada peningkatan produksi udang windu dan ikan bandeng. Ketersediaan fosfat lebih besar 60 mg/L dalam tanah tambak dapat digolongkan sebagai *slight* atau tergolong baik dengan faktor pembatas yang sangat mudah diatasi (Karthik *et al.*, 2005).

Kandungan unsur toksik tanah seperti Fe dan Al tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap produksi udang windu dan ikan bandeng, namun memiliki kecenderungan penurunan produksi dengan meningkatnya kandungan Fe dan Al tanah. Hal yang sama juga dijumpai pada udang vannamei seperti dilaporkan sebelumnya yaitu terjadi penurunan produksi yang sangat nyata dengan meningkatnya kandungan Fe dan Al tanah. Seperti dikatakan oleh Poxton (2003) bahwa salah satu model pengaruh lingkungan terhadap "penampilan" yang tercermin pada pertumbuhan dan sintasan suatu organisme akuatik adalah model yang menurun secara perlahan-lahan sampai tidak ada yang bertahan hidup. Model ini biasanya berlaku pada unsur atau senyawa yang bersifat toksik terhadap organisme akuatik. Model ini hanya berlaku pada kondisi umum di tambak dan tentunya model ini akan mengalami perubahan dalam kondisi ekstrem seperti terjadinya serangan penyakit. Kandungan Fe dan Al tanah pada tambak untuk budidaya udang windu dan ikan bandeng (Gambar 4) serta udang vannamei (Gambar 2) jauh lebih rendah daripada kandungan Fe dan Al tanah tambak untuk rumput laut (Gambar 3). Akan tetapi pengaruh toksik kedua unsur tersebut tidak terlihat pada budidaya rumput laut. Hal ini terkait dengan kemampuan tanaman air dan alga untuk menyerap logam seperti Fe dan Al (Malea & Haritinodis, 1999; Caliceti *et al.*, 2002; Gosavi *et al.*, 2004). Lebih lanjut Gosavi *et al.* (2004) menyatakan bahwa alga dapat menyerap Fe dan Al tiga kali lipat dibandingkan dengan logam lainnya. Selain itu, tanaman air dan alga memiliki toleransi yang tinggi dibandingkan dengan ikan dan udang terhadap logam (Effendi, 2003).

KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan pH_{H_2O} tanah dari 6,34 menjadi 8,10 dapat meningkatkan produksi udang vannamei secara signifikan sebaliknya peningkatan kandungan Fe, Al dan SO_4 dapat menurunkan produksi udang vannamei. Kandungan liat tanah lebih besar dari 30,0% menurunkan produksi udang vannamei, sedangkan kandungan pasir tanah lebih besar 21,8% sampai nilai tertentu dapat meningkatkan produksi udang vannamei.

Produksi rumput laut yang lebih tinggi didapatkan pada tanah dengan pH_F lebih besar 6,5; pH_{FOX} lebih besar 4,0; $pH_F - pH_{FOX}$ kurang dari 2,5 dan S_{POS} kurang dari 1,00%. Kandungan Fe tanah yang melebihi 5.000 mg/L dan Al yang melebihi 490 mg/L menyebabkan penurunan produksi rumput laut. Peningkatan kandungan PO_4 tanah lebih besar dari 6,0 mg/L dapat meningkatkan produksi rumput laut secara signifikan.

Peningkatan pH_F , pH_{FOX} , dan PO_4 tanah masing-masing lebih besar 7,5; 7,0; dan 6,0 mg/L sampai nilai tertentu dapat meningkatkan produksi udang windu dan ikan bandeng yang dibudidayakan secara polikultur. Sebaliknya, peningkatan unsur toksik seperti Fe dan Al dapat menurunkan produksi udang windu dan ikan bandeng di tambak.

Perlu dilakukan penelitian tambahan untuk mendapatkan variasi kualitas tanah yang lebih besar sehingga variasi produksi dari setiap komoditas perikanan air payau juga lebih besar agar kriteria kesesuaian tanah untuk budidaya tambak dapat lebih dipertajam lagi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih kepada Proyek ACIAR FIS/2002/076 "Land Capability Assessment and Classification for Sustainable Pond-based, Aquaculture Systems" atas biaya penelitian dan juga kepada Proyek APBN 2006 "Riset Pemetaan dan Daya Dukung Lahan Budidaya Perikanan Pesisir" atas penggunaan data produksi udang windu dan ikan bandeng serta kualitas tanah tambak di Kabupaten Pinrang. Juga diucapkan terima kasih kepada Hasnawi, Irmawati Sapo, Rosiana Sabang, Sutrisyani, Muhammad Arnold, Darsono, Kamariah, dan Rahmiyah atas bantuannya di lapangan dan di laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, L. 2004. *Dasar Nutrisi Tanaman*. Edisi revisi. Penerbit Rineka Cipta, Jakarta. 80 pp.
- Ahern, C.R. and B. Blunden. 1998. Designing a soil sampling and analysis program. In: Ahern, C.R., Blunden, B. and Stone, Y. (eds.), *Acid Sulfate Soils Laboratory Methods Guidelines*. Acid Sulfate Soil Management Advisory Committee, Wollongbar, NSW. p. 2.1—2.6.
- Ahern, C.R., A. McElnea, and D.E. Baker. 1998a. Acid neutralizing capacity methods. In: Ahern, C.R., Blunden, B., and Stone, Y. (eds.), *Acid Sulfate Soils Laboratory Methods Guidelines*. Acid Sulfate Soil Management Advisory Committee, Wollongbar, NSW. p. 6.1—6.4.
- Ahern, C.R., A. McElnea, and D.E. Baker. 1998b. Peroxide oxidation combined acidity and sulfate. In: Ahern, C.R., Blunden, B. and Stone, Y. (Eds.), *Acid Sulfate Soils Laboratory Methods Guidelines*. Acid Sulfate Soil Management Advisory Committee, Wollongbar, NSW. p. 4.1—4.17.
- Ahern, C.R. and Rayment, G.E. 1998. Codes for acid sulfate soils analytical methods. In: Ahern, C.R., Blunden, B. and Stone, Y. (eds.), *Acid Sulfate Soils Laboratory Methods Guidelines*. Acid Sulfate Soil Management Advisory Committee, Wollongbar, NSW. p. 3.1—3.5.
- Anonymous. 1991. Mariculture of seaweeds. In: S. Shokita, K. Kakazu, A. Tomori, and T. Toma (eds.), *Aquaculture in Tropical Areas*. Midori Shobo Co., Ltd., Tokyo. p. 31–95.
- Anonymous. 2001. *Soil Morphogenesis*. Agro/Hort 100 Intro to Plant Science Soils. <http://weather.nsmu.edu/TeachingMaterial/soil350/Soil%20Morphogenesis.htm>. Diakses tanggal 1 Juli 2003.
- ASEAN (Association of Southeast Asian Nations). 1978. *Manual on Pond Culture of Penaeid Shrimp*. ASEAN National Coordinating Agency of the Philippines, Manila. 132 pp.
- Boddeke, R. 1983. Survival strategies of penaeid shrimps and their significance for shrimp culture. In: Rogers, G.L., Day, R. and Lim, A. (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Warm Water Aquaculture-Crustacea*. Brigham Young University Hawaii Campus, Laie. p. 514—523.
- Bouyoucos, C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*. 54: 464—465.
- Boyd, C.E. 1995. *Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture*. Chapman and Hall, New York. 348 pp.
- Bratvold, D. and C.L. Browdy. 2001. Effects of sand sediment and vertical surfaces (AquaMats™) on production, water quality, and microbial ecology in an intensive *Litopenaeus vannamei* culture system. *Aquaculture*. 195: 81–94.
- Caliceti, M., E. Argese, A. Sfriso, and B. Pavoni. 2002. Heavy metal contamination in the seaweeds of the Venice lagoon. *Chemosphere*. 47: 443–454.
- Chanratchakool, P., J.F. Turnbull, S. Funge-Smith, and C. Limsuwan. 1995. *Health Management in Shrimp Ponds*. Second edition. Aquatic Animal Health Research Institute, Department of Fisheries, Kasetsart University Campus, Bangkok. 111 pp.
- Dent, D. 1986. *Acid Sulphate Soils: A Baseline for Research and Development*. ILRI Publication 39. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. 204 pp.
- DKP (Departemen Kelautan dan Perikanan). 2005. *Revitalisasi Perikanan Budidaya*. Departemen Kelautan dan Perikanan, Jakarta. 275 pp.
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Penerbit Kanisius, Yogyakarta. 258 pp.
- Golez, N.V. and K. Kyuma. 1997. Influence of pyrite oxidation and soil acidification on some essential nutrient elements. *Aquacultural Engineering*. 16: 107–124.
- Gosavi, K., Sammut, J., Gifford, S. and Jankowski, J. 2004. Macroalgal biomonitors of trace metal contamination in acid sulfate soil aquaculture ponds. *Science of the Total Environment* 324(1-3), 25-39.
- Hardjowigeno, S., M. Soekardi, D. Djaenuddin, N. Suharta, dan E.R. Jordens. 1996. *Kesesuaian Lahan untuk Tambak*. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor. 17 pp.
- Ilyas, S., F. Cholik, A. Poernomo, W. Ismail, R. Arifudin, T. Daulay, A. Ismail, S. Koesoemadinata, I N.S. Rabegnatar, H. Supriyadi, H.H. Suharto, Z.I. Azwar, dan S.E. Wardoyo. 1987. *Petunjuk Teknis bagi Pengoperasian Unit Usaha Pembesaran Udang Windu*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perikanan, Jakarta. 99 pp.
- Kaladharan, P., K. Vijayakumaran, and V.S.K.

- Chennubhotla. 1996. Optimization of certain physical parameters the mariculture of *Gracilaria edulis* (Gmelin) Silva in Minicoy lagoon (Laccadive Archipelago). *Aquaculture*. 139: 265--270.
- Karthik, M., J. Suri, N. Saharan, and R.S. Biradar. 2005. Brackish Water Aquaculture Site Selection in Palghar Taluk, Thane district of Maharashtra, India, Using the Techniques of Remote Sensing and Geographical Information System. *Aquacultural Engineering*. 32: 285--302.
- Kuhl, A. 1974. Phosphorus. In: Stewart, W.D.P. (ed.). *Algal Physiology and Biochemistry*. Botanical Monographs. Volume 10. Blackwell Scientific Publication, Oxford. p. 636--654.
- Langenhoff, R. 1986. *Distribution, Mapping, Classification and Use of Acid Sulphate Soils in the Tropics: A literature Study*. STIBOKA, Wageningen. 133 pp.
- Malea, P. and S. Haritonidis. 1999. Metal content in *Enteromorpha linza* (Linnaeus) in Thamaikos Gulf (Greece). *Hydrobiologia*. 394: 103--112.
- Menon, R.G. 1973. *Soil and Water Analysis: A Laboratory Manual for the Analysis of Soil and Water*. Proyek Survey O.K.T. Sumatera Selatan, Palembang. 190 pp.
- Mubarak, H., S. Ilyas, W. Ismail, I.S. Wahyuni, S.T. Hartati, E. Pratiwi, Z. Jangkaru, dan R. Arifudin. 1990. *Petunjuk Teknis Budidaya Rumput Laut*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perikanan, Jakarta. 93 pp.
- Muir, J.F. and J.M. Kapetsky. 1988. Site selection decisions and project cost: the case of brackish water pond systems. In: *Aquaculture Engineering Technologies for the Future*. Hemisphere Publishing Corporation, New York. p. 45--63.
- Mustafa, A. dan E. Ratnawati. 2005. Faktor pengelolaan yang berpengaruh terhadap produksi rumput laut (*Gracilaria verrucosa*) di tambak tanah sulfat masam (studi kasus di Kabupaten Luwu, Provinsi Sulawesi Selatan). *J. Pen. Perik. Indonesia* 11(7): 67--77.
- Mustafa, A. and J. Sammut. 2006. *Dominant Factors that Effect on the Seaweed (Gracilaria verrucosa) Production in Acid Sulfate Soils-affected Ponds of Luwu Regency, Indonesia*. Research Institute for Coastal Aquaculture, Maros. 28 pp.
- Mustafa, A. 2007. *Improving Acid Sulfate Soils for Brackish Water Ponds in South Sulawesi, Indonesia*. Ph.D. Thesis. The University of New South Wales, Sydney. 418 pp.
- Mustafa, A., Rachmansyah, dan A. Hanafi. 2007a. *Kelayakan Lahan untuk Budidaya Perikanan Pesisir*. Dalam: *Kumpulan Makalah Bidang Riset Perikanan Budidaya*. Disampaikan pada Simposium Kelautan dan Perikanan pada tanggal 7 Agustus 2007 di Gedung Bidakara, Jakarta. Pusat Riset Perikanan Budidaya, Jakarta. 28 pp.
- Mustafa, A. and J. Sammut. 2007. Effects of different remediation techniques and doses of phosphorus fertilizer on soil quality and klekap production in acid sulfate soil-affected aquaculture ponds. Research Institute for Coastal Aquaculture, Maros. 29 pp.
- Mustafa, A., Sapo, I., Hasnawi, dan J. Sammut. 2007b. Hubungan antara faktor KONDISI lingkungan dan produktivitas tambak untuk penajaman kriteria kelayakan lahan: 1. kualitas air. *Jurnal Riset Akuakultur*. 2(3): 289--302.
- Paquette, P., L. Chim, J.-L.M. Martin, E. Lemos, M. Stern, and G. Tosta. 1998. Intensive culture of shrimp *Penaeus vannamei* in floating cages: zootechnical, economic and environmental aspects. *Aquaculture*. 164: 151--166.
- Poernomo, A. 1979. Budidaya udang di tambak. Dalam: A. Soegiarto, Toro, V., dan Soegiarto, K.A. (eds.), *Udang: Biologi, Potensi, Budidaya, Produksi, dan Udang sebagai Bahan Makanan di Indonesia*. Lembaga Oseanologi Nasional-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta. p. 77--174.
- Poernomo, A. 1992. *Pemilihan Lokasi Tambak Udang Berwawasan Lingkungan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perikanan, Jakarta. 40 pp.
- Ponnamperuma, F.N. 1976. *Specific Soil Chemical Characteristics for Rice Production in Asia*. IRRI Research Paper Seri No. 2. The International Rice Research Institute, Los Baños. 18 pp.
- Poxton, M. 2003. Water quality. In: Lucas, J.S. and Southgate, P.C. (eds.), *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford. p. 47--73.
- Prasita, V.D. 2007. *Analisis Daya Dukung Lingkungan dan Optimalisasi Pemanfaatan Wilayah Pesisir untuk Pertambakan di Kabupaten Gresik*. Disertasi Doktor.

- Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor. 147 pp.
- Rorison, I.H. 1973. The effect of extreme soil acidity on the nutrient uptake and physiology of plant. In: Dost, H. (ed.), *Proceedings of the International Symposium on Acid Sulphate Soils*. ILRI Publication 18. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. p. 223--254.
- Rossiter, D.G. 1996. A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma*. 72: 165--202.
- Salam, M.A., L.G. Ross, and C.M.M. Beveridge. 2003. A comparison of development opportunities for crab and shrimp aquaculture in southwestern Bangladesh, using GIS modeling. *Aquaculture*. 220: 477--494.
- Sammut, J. 1999. Amelioration and management of shrimp ponds in acid sulfate soils: key researchable issues. In: Smith, P.T. (ed.), *Towards Sustainable Shrimp Culture in Thailand and the Region*. ACIAR Proceedings No. 90. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. p. 102--106.
- Schaetzl, R.J. and S. Anderson. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge. 817 pp.
- SPSS (Statistical Product and Service Solution). 2006. *SPSS 15.0 Brief Guide*. SPSS Inc., Chicago. 217 pp.
- Sulaeman, Suparto, dan Eviati. 2005. *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk*. Diedit oleh: Prasetyo, B.H., Santoso, D. dan Widowati, L.R. Balai Penelitian Tanah, Bogor. 136 pp.
- Treece, G.D. 2000. Site selection. In: Stickney, R.R. (ed.), *Encyclopedia of Aquaculture*. John Wiley & Sons, Inc., New York. p. 869--879.