PENGUNAAN LIDAR (*LIGHT DETECTION AND RANGING*) UNTUK MENGUKUR KEDALAMAN PERAIRAN DANGKAL

Oleh

Hollanda A Kusuma¹⁾ dan Nadya Oktaviani²⁾

ABSTRACT

UTILIZATION OF LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING) TO MEASURE SHALLOW WATER DEPTH. *Understanding on seabed characteristics such as the topography, composition and habitat conditions was very important to provide information not only for shipping activities, conservation, management and planning activities, but also for research activities with accurate bathymetry data. Accurate bathymetric data can be obtained from hydrographic surveys and remote sensing technology analysis. The hydrographic survey is used to obtain bathymetry data by applying singlebeam echosounder (SBES) and multibeam echosounder (MBES). At a depth of <15m (shallow water) was difficult to carry out an acoustic survey. At present there is one remote sensing technology that can be used to support hydrographic surveys namely Bathymetric LIDAR (Light Detection and Ranging). LIDAR was able to detect objects on land and waters due to being flown by a vehicle. Wide LIDAR sweep makes data acquisition faster and more effective than acoustic noise. Therefore, LIDAR was an alternative to obtain depth data, especially in coastal areas with a depth of less than 50 m.*

Keyword: *LIDAR, Bathymetry, shallow water*

PENDAHULUAN

Pemahaman mengenai karakteristik dasar laut seperti topografi dasar laut, komposisi dan kondisi habitat sangat penting untuk memberikan informasi bagi kegiatan pelayaran, konservasi, manajemen dan perencanaan, serta kegiatan penelitian yang membutuhkan data batimetri yang akurat. Data batimetri yang akurat dapat diperoleh dari survei hidrografi dan analisa teknologi penginderaan jarak jauh.

Survei hidrografi digunakan untuk memperoleh data batimetri dengan pemeruman secara akustik menggunakan *singlebeam echosounder* (SBES) dan *multibeam echosounder* (MBES). Namun di sisi lain, batimetri pada perairan dangkal (< 15 m) sangat sulit dilakukan karena kesulitan dalam navigasi agar kapal tidak karam dan adanya terumbu karang di perairan dangkal sehingga dapat menyebabkan data menjadi tidak akurat (Eren *et al.*, 2016; Webster *et al.*, 2016; Wright *et al.*, 2016), padahal

¹⁾ Pusat Pemetaan Kelautan dan Lingkungan Pantai, Badan Informasi Geospasial

²⁾ Bidang Penelitian, Badan Informasi Geospasial

informasi spasial di area pesisir ini sangat dibutuhkan. Oleh karena itu, teknologi penginderaan jauh dibutuhkan untuk membantu mendeteksi kedalaman di daerah tersebut.

Salah satu teknologi penginderaan jauh yang dapat digunakan untuk mendukung survei hidrografi ialah *Bathymetric LIDAR (Light Detection and Ranging)*. *Bathymetric LIDAR* memberikan informasi spasial dasar untuk mendukung analisis lanjut seperti distribusi sumber daya kelautan, kelimpahan, hubungan biogeografis biota, mengevaluasi dampak sesaat dan jangka panjang dari tekanan alam dan antropogenik, mempertimbangkan

kebijakan/regulasi pengembangan kawasan pesisir, dan mendukung upaya resiliensi dan restorasi (Kim *et al.*, 2017).

LIDAR mampu mendeteksi objek di darat dan perairan dikarenakan diterbangkan dengan wahana. Sapuan LIDAR yang lebar membuat perolehan data menjadi cepat dan efektif dibandingkan dengan pemeruman akustik. Perbandingan sapuan LIDAR dan pemeruman akustik dapat dilihat pada Gambar 1. Oleh karena itu, LIDAR menjadi salah satu alternatif untuk mendapatkan data kedalaman terutama di daerah pesisir dengan kedalaman kurang dari 50 m (Banic & Cunningham, 1998).

Gambar 1. Konsep LIDAR dibandingkan dengan pemeruman akustik (Banic & Cunningham, 1998).

PERKEMBANGAN *BATHYMETRIC* LIDAR

Lidar diperkenalkan pada pertengahan tahun 1960 dengan demonstrasi pertama pada tahun 1969 (Forfinski-Sarkozi & Parrish, 2016). Secara khusus, *Bathymetric* LIDAR diperkenalkan pada tahun 1970-an di dalam program NASA yang bernama *Airborne Oceanographic Lidar* (AOL). AOL merupakan proyek eksperimental dan uji lapangnya membuktikan bahwa LIDAR sangat berpotensi untuk pemetaan dasar laut. AOL menggunakan laser dengan panjang gelombang 540 nm (Guenther *et al.*, 1978).

Kanada juga mengembangkan *Bathymetric* LIDAR yaitu LARSEN 500 hasil kerja sama perusahaan OPTECH dengan Pusat Penginderaan Jauh Kanada (*Canada Centre for Mapping and Earth Observation*). LARSEN 500 menggunakan dua gelombang cahaya yaitu hijau (532 nm) dan inframerah (1.064 nm) untuk mendeteksi kedalaman (Banic *et al.*, 1986). OPTECH mengembangkan versi pertama dengan sistem yang dinamakan SHOAL (*Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey*).

Angkatan Laut Australia dan angkatan bersenjata Swedia kemudian mengikuti dengan membuat sistem yang mereka kembangkan sendiri yaitu *Laser Airborne Depth Sounder* (LADS) dan *Hawk Eye* mulai tahun 1989. Pada tahun

2000, kolaborasi antara *U.S. Army Corp of Engineers*, *U.S. Geological Survey*, *U.S. National Ocean Service*, dan *Canadian Hydrographic Service*, menunjukkan ketertarikan lebih lanjut pada teknologi *Bathymetric* LIDAR dengan membuat sistem yang lebih handal dan mudah digunakan (Saylam *et al.*, 2017).

PRINSIP KERJA *BATHYMETRIC* LIDAR

Bathymetric LIDAR menggunakan laser untuk menduga kedalaman dasar perairan dari perbedaan waktu pengiriman pulsa sinar optik yang ditransmisikan dari wahana ke dasar perairan melewati medium udara dan air. Pulsa optik yang dihasilkan oleh laser ditransmisikan dari wahana menuju permukaan air. Penerima optik yang berada di sebelah transmitter mendeteksi pulsa yang kembali dari permukaan dan dasar air.

Secara umum, *Bathymetric* LIDAR menggunakan dua panjang gelombang cahaya yaitu hijau (532 nm) dan inframerah (1064 nm) untuk mendeteksi permukaan dan dasar perairan (Gambar 2). Sinar hijau digunakan karena mampu menembus air hingga ke dasar. Adapun sinar inframerah digunakan sebagai faktor pengurang jarak yang dideteksi sinar hijau, karena sinar inframerah tidak bisa menembus permukaan air.

Gambar 2. Prinsip Operasi Bathymetric LIDAR (LaRocque & West, 1999).

Bentuk gelombang *Bathymetric LIDAR* biasanya terdiri dari dua puncak signifikan yang merepresentasikan energi sinar laser yang direfleksikan dari permukaan air dan energi yang direfleksikan dari dasar perairan (Eren *et al.*, 2016). Di dalam kolom perairan, energi sinar laser mengalami penghamburan dan penyerapan. Kedalaman perairan

dihitung dari perbedaan waktu antara sinyal kembali dari dua laser ini (waktu kembali dari dasar dan permukaan air). Bentuk sinyalnya dapat dilihat pada Gambar 3. Sinyal akan kembali menjadi derau (*noise*) setelah berinteraksi dengan lingkungan (LaRocque & West, 1999; Kim *et al.*, 2017).

Gambar 3. Bentuk gelombang yang diterima oleh Bathymetric LIDAR (Eren *et al.*, 2016).

INSTRUMEN LIDAR

Instrumen *Bathymetric* LIDAR sudah berkembang saat ini. Beberapa di antaranya ialah:

1. OPTECH *Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey* (SHOALS) *System*

Gambar 4. Bentuk fisik OPTECH SHOALS (GIM International, 2008).

Instrumen ini dikembangkan oleh US Navy dan OPTECH untuk mengukur kedalaman perairan dangkal dan elevasi daratan tepi pantai. Sistem ini bekerja pada frekuensi 200 Hz dan 400 Hz dengan pengoperasian menggunakan helikopter. Ketinggian wahana optimumnya yaitu antara 200-400 m dengan kecepatan 50-70 m/s. Panjang gelombang yang digunakan ialah 532 nm dan 1064 nm. Lebar sapuan sistem ini sepanjang 220 m. Ketelitian pengukuran sistem ini mengikuti standar IHO Ordo 1 yaitu $\pm 0,15$ m secara vertikal dan $\pm 1-3$ m secara horisontal. SHOALS memiliki kemampuan untuk mendeteksi kedalaman 2 sampai 3 kali menggunakan *Secchi Disk*. Pada kondisi perairan yang jernih, SHOALS mampu mendeteksi hingga 60 m (Wozencraft & Lillycrop, 2002).

2. *Compact Hydrographic Airborne Rapid Total Survey* (CHARTS) *system*

CHARTS *system* dikembangkan oleh US Navy dan OPTECH untuk memenuhi kebutuhan angkatan laut Amerika Serikat dalam pembuatan peta laut. CHARTS merupakan generasi penerus SHOALS (Gambar 5). Sistem ini memiliki kemampuan untuk mengaktifkan laser yang akan digunakan. Pengguna bisa memilih mengaktifkan sinar inframerah saja atau inframerah dan hijau sesuai dengan peruntukannya. Lebar sapuannya 70% dari ketinggian wahana. Akurasi vertikal dan horizontal memenuhi standar IHO Ordo 1. Kedalaman minimum yang mampu dideteksi sebesar 0,1 m dan kedalaman maksimum sebesar tiga kali kedalaman *Secchi disk* (Wozencraft & Lillycrop, 2002).

CHARTS sensor suite

CHARTS operator station

CHARTS airborne platform

Gambar 5. Instrumen yang ada pada CHARTS System (*Joint Airborne Lidar Bathymetry Technical Center of Expertise & U.S. Army Corps of Engineers*) (Wozencraft & Lillycrop, 2002)

3. Bathymetric and Topographic Survey (BATS) system

BATS system dikembangkan oleh US Navy dan OPTECH untuk operasi taktis. Sistem ini memenuhi standar IHO Ordo 2 (Gambar 6).

Gambar 6. Wahana tak berawak yang mengangkut *BATS System* (Wozencraft & Lillycrop, 2002)

Lebar sapuannya 50% dari ketinggian wahana. Kedalaman minimum yang mampu dideteksi sebesar 1 m dan kedalaman maksimum sebesar 2,5 kali kedalaman *Secchi disk* (Wozencraft & Lillycrop, 2002).

4. *Coastal Zone Mapping and Imaging LIDAR (CZMIL) Nova*

Sistem CZMIL dibuat oleh OPTECH dan digunakan untuk memenuhi permintaan *Joint Airborne Lidar Bathymetry Technical Center of Expertise (JALBTCX)* dalam kegiatan USACE *National Coastal Mapping Program* (Gambar 7).

Gambar 7. Bentuk fisik *Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar (CZMIL) Nova* (www.teledyneoptech.com).

Sistem ini bekerja pada ketinggian 400 m dengan kecepatan wahana 140 knot. Kedalaman maksimum yang dapat dideteksi sebesar 4 kali kedalaman *Secchi disk*. Akurasi horizontal sebesar $3,5 \pm (0,05 \times \text{kedalaman})$ m, dan kedalaman vertikalnya sebesar $\pm (0,32 \pm (0,013 \times$

kedalaman)²) m (Ramnath *et al.*, 2015).

5. *Leica Hawk Eye III*

Hawk Eye III mampu mensurvei darat dan dasar perairan secara simultan menggunakan laser inframerah (1064 nm) dan laser hijau (532 nm).

Gambar 8. Instrumen *Bathymetric Laser* HAWKEYE III (www.teledyneoptech.com).

Alat ini diterbangkan oleh wahana dengan ketinggian terbang antara 250 m hingga 600 m. Sensor ini memiliki lebar sapuan sepanjang 100 m – 330 m. *Hawk Eye III* mampu mengukur kedalaman dengan kerapatan 0,1 dan 0,35 pemeruman per m² (Tulldahl, 2014).

6. *Leica Chiroptera-II*

Instrumen ini dikembangkan oleh Leica AHAB dan memiliki banyak penambahan dari *Chiroptera I*. Instrumen ini memiliki laser inframerah (1064 nm) dan laser hijau (515 nm). Laser

inframerah mengirim pulsa dengan frekuensi 500 kHz sedangkan laser hijau sebesar 35 kHz. Kerapatan titik pengukuran batimetri pada ketinggian jelajah 400 m dengan kecepatan pesawat 60 m/s ialah 1,5 titik/m². Instrumen ini dilengkapi dengan Kamera Leica RCD30 untuk mendapatkan citra resolusi tinggi, dengan keakuratan batimetri sebesar 0,15 m. *Leica Chiroptera II* (Gambar 9) mampu mendeteksi kedalaman hingga 1,5 kali kedalaman *Secchi disk* (Webster, 2016).

Gambar 9. Leica Chiroptera II (www.teledyneoptech.com).

KEUNGGULAN DAN KEKURANGAN *BATHYMETRIC* LIDAR

Keunggulan dari *Bathymetric* LIDAR antara lain adalah: (a) akurat dan kemampuan pendeteksian objek, LIDAR mampu memberikan akurasi sesuai dengan standar IHO (*International Hydrographic Organization*) ordo 1; (b) biaya yang dibutuhkan untuk pengoperasian *Bathymetric* LIDAR lebih murah dibandingkan dengan *Multibeam echosounder* (MBES). Rasio biaya antara LIDAR dan MBES ialah 3:10 untuk deteksi kedalaman kurang dari 50 m; (c) area cakupan LIDAR lebih luas dibandingkan dengan MBES. LIDAR mampu memindai area hingga 77 km²/jam. Hal ini dikarenakan lebar sapuan LIDAR tidak dipengaruhi oleh kedalaman; (d) kemampuan operasi di

daerah yang berbahaya dan tidak bisa dilalui oleh survei MBES; (e) tingkat fleksibilitas yang tinggi membuat LIDAR mampu memberikan data yang akurat dan cepat; (f) mampu mendeteksi ketinggian darat dan kedalaman pada waktu yang bersamaan; dan (g) mampu memberikan informasi intensitas yang kembali dari objek untuk digunakan dalam pengelompokan benthik (LaRocque & West, 1999; Brock & Purkis, 2009; Gupta & Zielinski, 2013).

Kekurangan dari *Bathymetric* LIDAR ini ialah: (a) kemampuan pendeteksian kedalaman dipengaruhi oleh kekeruhan perairan dimana semakin keruh perairan semakin dangkal kedalaman yang bisa dideteksi. *Bathymetric* LIDAR hanya mampu mendeteksi kedalaman kurang dari 50 m pada perairan yang jernih dan sekitar 20-

30 m pada perairan tidak terlalu keruh; (b) gelombang yang disebabkan angin memengaruhi produktivitas LIDAR sehingga target yang kecil tidak mampu dideteksi; (c) kondisi lingkungan seperti hujan, angin yang kencang, gelombang yang tinggi, kabut, lereng yang curam menyebabkan kesulitan pada survei LIDAR (Guenther *et al.*, 1978; Sizgoric *et al.*, 1995; Gupta & Zielinski, 2013).

APLIKASI DENGAN MENGGUNAKAN *BATHYMETRIC* LIDAR

Bathymetric LIDAR sudah digunakan di beberapa negara sebagai salah satu solusi untuk mendapatkan data di kawasan pesisir secara cepat, aman, dan berkualitas. Data yang diambil di kawasan pesisir dengan LIDAR tidak hanya data batimetri melainkan data-data lain seperti garis pantai, tutupan lamun, deteksi situs purbakala di dalam air, deteksi tipe substrat dasar perairan dangkal, hingga studi mengenai ekosistem terumbu karang (Guenther *et al.*, 1978, Brock & Purkis, 2009; Doneus *et al.*, 2012).

Secara spesifik, *Bathymetric* LIDAR memberikan nilai kedalaman yang presisi. Banic & Cunningham (1998) menjelaskan kemampuan *SHOALS system* dalam pembuatan peta tiga dimensi Teluk Braviken, Swedia (Gambar 10). Gambar 11 menunjukkan kemampuan *Bathymetric* LIDAR dalam memberikan informasi tentang keberadaan kapal karam di perairan Meksiko dari hasil interpretasi data *Bathymetric* LIDAR (LaRocque & West, 1999). Selain itu, U.S Geological Survey (USGS) memperoleh data batimetri di pesisir Hawai menggunakan *Bathymetric* LIDAR (Gambar 12). Data batimetri dan topografi ini digunakan untuk pembuatan *Seamless Digital Terrain Model* yang dapat digunakan untuk manajemen kawasan pesisir dan desain teknik. Ramnath *et al.*, (2015) melakukan survei hidrografi di Hawai dengan menggunakan CZMIL untuk menyempurnakan data yang diperoleh USGS. Hasil pemindaian CZMIL dianalisis menjadi *Seamless Digital Terrain Model* (Gambar 13). Begitu pula dengan Quadros *et al.*, (2008) yang mampu memindai Teluk Port Phillip, Victoria, Australia dan menggabungkannya dengan *topographic* LIDAR (Gambar 14).

Gambar 10. Peta tiga dimensi Teluk Braviken Swedia yang diambil menggunakan *Bathymetric* LIDAR (Banic & Cunningham, 1998).

Gambar 11. Bagian kapal karam yang teridentifikasi oleh *Bathymetric* LIDAR (kiri); keberadaan kapal karam di dasar perairan dengan menggunakan citra (kanan). (LaRocque & West, 1999).

Gambar 12. Citra dari data *Bathymetric* LIDAR di Hawaii. Garis pantai berada di atas, lepas pantai di bawah, dan warna keabuan mengindikasikan kedalaman dengan warna yang semakin gelap menunjukkan perairan yang semakin dalam (Irish, 2000).

Gambar 13. Peta *Topo-bathy* DEM yang dibentuk dari data CZMIL di Hawai (Ramnath *et al.*, 2015).

Gambar 14. Hasil pemindaian *Bathymetric* LIDAR di Teluk Port Phillip, Victoria, Australia (Quadros *et al.*, 2008)

Pastol (2011) mencoba membandingkan tiga instrumen yaitu *Bathymetri* LIDAR, *Topographic* LIDAR, dan *Multibeam Echosounder* dalam pembuatan peta batimetri di daerah pesisir

Perancis (Gambar 15). Wilson (2011) memperlihatkan bentuk tiga dimensi ekosistem terumbu karang di Laut Merah dari hasil pemindaian *Bathymetric* LIDAR (Gambar 16.).

Gambar 15. Perbedaan hasil nilai kedalaman dari LIDAR dan MBES (kiri); Perbedaan nilai ketinggian yang dihasilkan oleh *Topographic* LIDAR dan *Bathymetric* LIDAR dalam satuan meter (Pastol, 2011).

Gambar 16. Area terumbu karang yang disurvei dengan *Bathymetric* LIDAR di Laut Merah (Wilson, 2011).

PENUTUP

Bathymetric LIDAR sebagai salah satu teknologi penginderaan jauh yang sudah berkembang saat ini mampu menjadi solusi alternatif untuk memperoleh data batimetri di kawasan pesisir dengan kedalaman kurang dari 50 meter. Penggunaan *Bathymetric* LIDAR akan membantu untuk memperoleh data di kawasan pesisir Indonesia dan dapat digunakan untuk kepentingan pembuatan peta lingkungan pantai, peta alur pelayaran, hingga peta tematik lainnya. Namun, adanya kekurangan *Bathymetric* LIDAR yaitu kualitas data dipengaruhi oleh kekeruhan perairan, maka penggunaan *Bathymetric* LIDAR tersebut perlu memperhatikan kondisi daerah yang akan disurvei.

Dengan adanya teknologi *Bathymetric* LIDAR ini diharapkan mampu mempercepat perolehan data batimetri yang selama ini hanya diperoleh dari data pemeruman akustik baik *Singlebeam Echosounder* maupun *Multibeam Echosounder*. Belum banyaknya aplikasi *Bathymetric* LIDAR di Indonesia menjadi peluang bagi peneliti, mahasiswa, dosen hingga praktisi untuk menggunakan dan mengembangkan *Bathymetric* LIDAR ini agar semakin banyak orang yang dapat menggunakannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Banic, J., S. Sizgoric, and R. O'Neil. 1986. Scanning lidar bathymeter for water depth measurement. In *1986 Quebec Symposium*, 187-195.
- Banic, J. R., and A. G. Cunningham. 1998. Airborne laser bathymetry: A tool for the next millennium. *EEZ Technology*, 3 : 75-80.
- Brock, J.C., and S. J. Purkis. 2009. The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 53, 1-5. doi : 10.2112/SI53-001.1.
- Chu, D. 2011. Technology evolution and advances in fisheries acoustics. *Journal of marine Science and Technology*, 19(3) : 245-252
- Cunningham, A. G., W. J. Lillycrop, G. C. Guenther and M. W. Brooks. 2016. Shallow water laser bathymetry accomplishments and applications. US Army Corps of Engineers Mobile United States.
- Doneus M., N. Doneus, C. Briesse, M. Pregesbauer, G. Mandlbauer, and G. Verhouver. 2013. Airborne laser bathymetry-detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science*, 40(4) : 2136-2151. doi : 10.1016/j.jas.2012.12.021.

- Eren, F., S. Pe'eri, and Y. Rzhhanov. 2016. Airborne Lidar Bathymetry (ALB) waveform analysis for bottom return characteristics. *Proc. SPIE 9827, Ocean Sensing and Monitoring VIII*, 98270H-98270H. doi:10.1117/12.2224
- Forfinski-Sarkozi, N. A., and C. E. Parrish, 2016. Analysis of MABEL Bathymetry in Keweenaw Bay and Implications for ICESat-2 ATLAS. *Remote Sensing*, 8(9) : 772.
- GIM International. 2008. Optech SHOALS [online]. <http://gim-international.com/content/news/optech-shoals.html>. Diakses pada tanggal 28 Juli 2017.
- Guenther G., L. Goodman, D. Enabnit, R. Swift and R. Thomas. 1978. Laser Bathymetry for Near Shore Charting Application (Preliminary Field Text Results). In *OCEANS '78*. Washington DC, USA, 390-396. doi:10.1109/OCEANS.1978.1151121
- Gupta, S. D., and A. Zielinski. 2013. Acoustic and laser bathymetry systems. *Hydroacoustics*, 16 : 77-88. Retrieved from yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-9cef4f8e-5330-4bff-8c8b-656f9a4f57eb/c/Gupta.pdf.
- Irish, J.L. 2000. An introduction to coastal zone mapping with airborne lidar: The Shoals System. Diunduh dari <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a492313.pdf>
- Kim, H. S. B. Lee, and K. S. Min. 2017. Shoreline change analysis using airborne LiDAR bathymetry for coastal monitoring. In: Lee, J.L.; Griffiths, T.; Lotan, A. K. S. Suh, and J. Lee. (eds.), The 2nd International Water Safety Symposium. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 79: 269-273.
- LaRocque, P. E., and G. R. West. 1999. Airborne laser hydrography: an introduction. In *Proc. ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME sea area and Red Sea*, 4 : 1-15
- Pastol, Y. 2011). Use of airborne LIDAR bathymetry for coastal hydrographic surveying: the French experience. *Journal of Coastal Research*, 6-18.
- Quadros, N. D., P. A. Collier, and C. S. Fraser. 2008. Integration of Bathymetric and topographic LiDAR: a preliminary investigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36: 1299-1304.

- Ramnath, V., V. Feygels, H. Kalluri, and B. Smith. 2015. CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) *Bathymetric* performance in diverse littoral zones. In *OCEANS'15 MTS/IEEE Washington*, 1-10.
- Saylam, K., R. A. Brown, and J. R. Hupp. 2017. Assessment of depth and turbidity with airborne Lidar bathymetry and multiband satellite imagery in shallow water bodies of the Alaskan North Slope. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58: 191-200.
- Sizgoric, S., J. Banic, and P. LaRocque. 1995. The History of Laser Bathymetry. In G. A. Lampropoulos, J. Chrostowski, & R. M. Measures (Eds.), *Applications of Photonic Technology* (pp. 207-217). Boston, MA: Springer US. doi: 10.1007/978-1-4757-9247-8_40
- Tulldahl, H. M. 2014. Processing of airborne lidar bathymetry data for detailed sea floor mapping. In *Proc. SPIE 9250, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VIII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing II*, 92500E. doi:10.1117/12.2068940
- Webster, T., K. McGuigan, N. Crowell, K. Collins, and C. MacDonald. 2016. Optimization of data collection and refinement of post-processing techniques for Maritime Canada's first shallow water topographic-Bathymetric lidar survey. In: Brock, J.C., Gesch, D.B., Parrish, C.E., Rogers, J.N., & Wright, C.W. (eds.), *Advances in TopoBathymetric Mapping, Models, and Applications. Journal of Coastal Research, Special Issue*, 76: 31-43. doi: 10.1117/12.2224335
- Wilson, J. C. 2011. Mapping coral reef complexes using airborne LiDAR bathymetry technology. In *OCEANS 2011* (1-5).
- Wozencraft, J. M., and W. J. Lillycrop. 2002. Total shallow-water survey through airborne hydrography. Corps of Engineers Mobile Al Mobile District
- Wright, C. W., C. Kranenburg, T. A. Battista, and C. Parrish. 2016. Depth Calibration and Validation of the Experimental Advanced Airborne Research Lidar, EAARL-B. *Journal of Coastal Research*, 76 (sp1), 4-17.