

Borlu Bileşiklerin Emprenye Maddesi Olarak Ağaç Malzeme ve Kompozitlerde Kullanımı
The use of Boron as Wood Preservative Systems for Wood and Wood-Based Composites

S. N. Kartal, Y. ũnamura

Kyoto University, Laboratory of Innovative Humano-habitability, Research Institute for Sustainable Humanosphere, , Kyoto, Japan

ÖZET: Ağaç malzemenin empenyesi amacıyla geniş spektrumlu biyositlerin kullanımının sınırlanması ve ağır metaller içeren kimyasal maddelerin oluşturduğu çevresel sorunlar nedeniyle, bor esaslı koruyucu empenye maddeleri son yıllarda büyük önem kazanmakta ve bu konuda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bor esaslı empenye maddeleri hem masif hem de odun esaslı kompozit malzemelerin korunmasında oldukça önemli maddeler olup, hem odunu degrade eden mantarlara hem de termit ve böcek gibi zararlılara karşı yüksek oranda toksik özellikler taşımaktadır. Bu yüzden borlu empenye maddeleri odun esash malzemeleri toprak üstü yapılarda korumak için önemli kimyasal maddeler olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, bor esaslı maddelerin özellikleri, ağaç malzemenin ve kompozitlerde kullanım olanakları ve borun ağaç malzemedden yıkanmasını önleyecek yeni sistemler incelenmiştir.

ABSTRACT: This paper evaluates the potential usage of boron compounds in wood industry as a wood preservative effective against degradation by both organisms and fire. The use of broad-spectrum biocides for wood preservation is being limited because they include components that are toxic to mammals and other non-target organisms in the environment. These concerns have provided incentive to look for new wood preservatives. Boron compounds are considered to be only wood preservatives capable of acting as both insecticides and fungicides which are widely recognized and accepted to be effective and of low toxicity. Boron mobility is another advantage in most applications however natural solubility of boron limits use in exterior applications of boron-treated wood. On the other hand, some other boron compounds which have low solubility are widely used as wood preservatives and fire-retardants in wood-based composite products. Because of increased toxicity and environmental issues and properties as wood-protecting agents, boron compounds have been receiving a lot attention and this has already led to an increased prominence for boron compounds in wood industry.

1. GİRİŞ

Doğada geniş bir yayılış gösteren bor elementi yer kabuğunun yaklaşık %0.001 kısmını oluşturmaktadır olup, toprakta 3-10, okyanus sularında 4.5 ve suda ise 0.01 mikrogram/gram konsantrasyonlarında bulunmaktadır (Lloyd, 1997). Bor aynı zamanda bitki ve hayvan dokularında da bulunmakta ve bitki büyümesi için önemli bir element olarak bilinmektedir. Bor doğada elementel formda mevcut olmayıp, çoğunlukla boratlar ve borik asit gibi oksijen içeren bileşikler halinde bulunmaktadır. Bor bileşikleri canlılar için önemli maddeler iken,

yüksek konsantrasyonları bakteriler, böcekler ve mantarlar için toksik özellik taşımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı bor bileşikleri antiseptikler formunda bakterilere karşı ve koruyucu empenye maddeler formunda ise kozmetik, gıda, ilaç ve empenye endüstrisinde geniş olarak kullanılmaktadır.

Bor bileşikleri ağaç malzemeyi tahrip eden böceklere ve mantarlara hem insektisit ve hem de fungusit özellik gösteren tek empenye maddesi olarak kabul edilmektedir. Bor bileşikleri mantarlarda hüflerin ve sporların anormal

S. N. Kartal, Y. İmanmra

gelişimine ve üreme sırasında gametlerin ayrılmasında başarısızlığa neden olarak mantar gelişmesini durdurmaktadırlar. Aynı zamanda oksit formundaki ko-enzimler bor iyonlarının hedefi olarak, mantar organizmasının metabolik sistemini de bozmaktadırlar (Lloyd, 1998). Bor iyonları biyolojik membranlardan kolaylıkla nüfuz edebilmekte ve oluşturduğu komplekslerle yaşayan organizmalarda açlık etkisi oluşturarak toksik özellik kazanmaktadır (Yamaguchi, 2003). Bor bileşikleri aynı zamanda termitler ve böcekler gibi diğer odun zararlılarına karşı etkin olarak kullanılmaktadır.

Borlu bileşikler diğer geleneksel emprenye maddeleri ile karşılaştırıldığında düşük oranlarda çevresel etkiye sahip olup, çok az miktarlarda akut toksisiteye neden olmaktadır. İnsanlara ve hayvanlara normal sofradan daha fazla toksik olmayıp, rensiz ve kokusuz olmakta, koroziv özellikleri olmamakta ve yanmaya karşı direnç taşımaktadırlar.

2. AĞAÇ MALZEMENİN DEGRADASYONU

Ağaç malzeme insanoğlunun ilk çağlardan beri çok çeşitli amaçlarla kullandığı en önemli hammaddelerden birisidir. Dünyadaki teknolojik gelişmelerle birlikte ağaç malzemenin kullanım alanları oldukça çeşitlenmiş ve kullanılan miktar da artmıştır. Bunun nedeni, ağaç malzemenin anatomik, kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri olup, bu özellikler hammadde olarak ağaç malzemenin dirençli, stabil, elastik ve estetik olmasında rol oynamaktadır. Ancak ağaç malzeme aynı zamanda organik bir madde olduğundan, birçok biyotik ve abiyotik faktörler tarafından degradasyona uğratılmaktadır. Bu faktörlerin başlıcaları odun tahrip eden ve renklendiren mantarlar, odun tahrip edici böcekler, termitler, deniz canlıları, bakteriler, ve açık hava etkileri olarak adlandırılan sıcaklık, rutubet, radyasyon vb. faktörlerdir. Bunun yanında ağaç malzeme yanıcı özellikte olup yüksek sıcaklıklarda yanmaya eğilim göstermektedir. Ağaç malzemenin sahip olduğu tüm bu olumsuz özellikler bazı koruyucu önlemler ve emprenye teknikleri ile azaltılabilmektedir. Ağaç malzeme kimyasal maddeler kullanılmadan da alınabilecek önlemlerle bu etkilere karşı bir dereceye kadar dirençli hale gelebilmekte fakat risk

faktörlerinin şiddetli ve sürekli olması durumunda kimyasal önlemlere gereksinim duyulmaktadır.

Ağaç malzemenin emprenyesi, odunun çeşitli koruyucu özelliklere sahip kimyasal maddelerle işleme sokulması anlamına gelmekte olup, bu amaçla yüzyıllardır çok çeşitli maddeler kullanılmış ve çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bu maddeler genel olarak organik solventlerde çözünen, suda çözünen ve yağlı emprenye maddeleri olarak sınıflandırılmaktadır. Herbir sınıfa ait maddeler farklı kullanımlarda ve degradasyon şartlarında farklı etkinliklere sahip olmaktadır. Son yıllarda bazı emprenye maddelerinin, emprenye edilmiş ağaç malzemenin ve aynı zamanda hizmet ömrünü tamamlamış emprenyeli ağaç malzeme atıklarının yaratabileceği çevre problemleri nedeniyle yeni emprenye maddelerinin geliştirilmesi ve çevreye zararı en az olanlarının kullanımının artırılmasına yönelik çalışmalar yoğunlaşmış bulunmaktadır (Kartal et al 2004a). Bu noktada inorganik ve organik bor bileşikleri son yıllarda gerek masif ağaç malzemenin ve gerekse odun esaslı kompozit malzemelerin korunmasında büyük önem kazanmıştır.

3. BORLU BİLEŞİKLERİN AĞAÇ MALZEME EMPRENYE ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI

Bugün koruyucu emprenye maddesi olarak borlu bileşikler en güvenli kimyasallardan biri olarak kabul edilmekte ve insan ve çevreye olan etkisi minimum düzeylerde kaldığından kullanımı gittikçe önem kazanmaktadır. Borlu bileşikler diğer ağır metal içeren emprenye maddelerinden daha az toksik özellik taşıması nedeniyle geleceğin en önemli emprenye maddesi olarak görülmektedir. 1900'lü yılların başından itibaren emprenye maddesi olarak kullanılmaya başlayan borlu bileşikler, izleyen yıllarda birçok geleneksel emprenye maddesinin yerini almaya başlamış ve çeşitli emprenye maddesi karışımlarının aktif maddesi olmuştur. Borlu bileşikler sadece mantar ve termit gibi zararlılara karşı etkinliğinden değil, aynı zamanda yanmaya karşı direncinden dolayı da ağaç malzemenin yanmaya karşı korunmasında 1930'lu yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır (Lloyd, 1998).

Ağaç malzeme mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması, binalarda enerji tasarrufu yönünden kabul edilebilir olması, işlenmesinin kolay ve maliyetler bakımından ekonomik oluşu gibi nedenlerden dolayı bina konstruksiyonlarında tercih edilen bir malzemedir. Ağaç malzemenin bu özelliklerine karşın, biyotik ve abiyotik faktörlere karşı korunması gerekmektedir. Borlu bileşikler bina konstruksiyonunda kullanılan birçok ağaç malzeme için uygun koruyucular olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bileşikler, gerek binalarda kullanılan kompozit malzemelerin empenyesinde ve gerekse ana taşıyıcı kolon ve dikmelerin korunmasında önemli olup, uzun yıllar koruma temin edebilmektedir. Bunun yanında, özellikle termit tehlikesinin yüksek olduğu ülkelerde toprağın veya zemin malzemesinin empenye edilmesinde de katkı malzemesi olarak etkin şekilde kullanılmaktadır.

Suda kolay çözünebilirliklerinden dolayı, empenye edilen ağaç malzeme içersinde yüksek oranda mobiliteye sahip olan bor bileşikleri, güç empenye edilen ağaç türlerinde işlem kolaylıkları sağlamak ve aynı zamanda ağaç malzemedeki derine yeknasak şekilde nüfuz ederek empenye işlemi kalitesini artırmaktadırlar. Bor bileşiklerinin mobilitelelerinin yüksek oluşu nedeniyle bakım işlemi adı verilen uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmekte ve işlemden sonra uzun süreler nüfuz devam ettiğinden temin ettiği koruma süresi uzamaktadır.

Borlu bileşikler masif ağaç malzemedeki gerek basınç-vakum ve gerekse batırma-daldırma, yüzeye sürme ve katı peletler şeklinde ağaç malzemeye uygulanmaktadır. Borlu bileşiklerin yüksek oranda çözünebilir olması, bu bileşiklere aynı zamanda bir dezavantaj kazandırmakta ve empenye edilen ağaç malzemedeki kolaylıkla yıkanabilmektedirler. Bu nedenle empenye edilen malzemenin genellikle toprakla ve suyla temas etmeyen yerlerde kullanılması önerilmektedir. Borlu empenye maddelerinin ağaç malzemedeki yıkanmasını önlemek ve zor yıkanan yeni borlu empenye maddeleri ve sistemleri geliştirmek üzere son yıllarda yoğun şekilde araştırmalar yapılmaktadır. Bor ağaç malzemedeki kimyasal yapılara doğrudan bağlanamamakta ve kimyasal bir fiksasyon gerçekleşmemektedir. Bunun sonucu olarak borlu bileşikler yüksek rutubet şartları altında ve ağaç malzemenin dış hava şartlarında kullanımlarında

yıkanma ile karşı karşıya kalmaktadır (Kartal ve Green, 2002).

Yıkanmaya karşı dirençli bor bileşiklerini içeren empenye maddelerinin geliştirilmesinde yapılan araştırmaların bir kısmı, boran fopnülasyonunda aktif bileşen olarak kaldığı ve bunun (yanında bir veya daha çok farklı elementin bulunduğu kompleks karışımlara doğru yönelmiştir (Kartal et al 2004b). Örnek olarak borlu bakır bileşiklerini (bakır bor azole-CBA) ve diğer organik esaslı borlu bileşikler verilebilir. Bunun yanında çinko boratları gibi suda zor çözünen bor bileşiklerini de birçok araştırmaya konu olmuştur. Fakat bu tür bileşikler daha çok kompozit malzemelerin empenyesinde önem kazanmıştır. Geliştirilen diğer yeni borlu maddeler ise organik bor bileşikleridir. Organik bor bileşiklerini borik asit ve boraksa göre yüksek maliyetli bileşikler olup, daha yüksek hidrolitik stabiliteye ve çeşitli polar ve apolar bileşiklerde çözünme kolaylığına sahiptirler (Vinden ve Romero, 1997). Boratları ve boraks, borik asit, borik oksit, çinko borat, kalsiyum borat, metaboratları, tetra, penta ve okto boratları uzun yıllardır hem biyosist hem de yanmayı geciktirici/önleyici olarak masif ve kompozit malzemelerde kullanılan önemli borlu bileşiklerdir. Borik asit genellikle yanmayı önleyici veya geciktirici empenye maddesi çözeltilerine % 15-30 oranında katılmaktadır. Ayrıca boraks-borik asit karışımları formunda da özellikle kompozit materyallerde kullanılmaktadır. Bunların yanında, organik borlu bileşikler de kullanılmaya başlanmış fakat bunlar genel olarak üretim maliyetlerini yükseltmişlerdir. Organik borlu bileşiklerini kullanımı için ise yeni empenye tekniklerini geliştirilmiştir. Bunlar buhar (gaz) faz, sıvı faz ve katı faz olmak üzere sınıflandırılabilirler. En önemlisi trimetilboratları olup, yukarıda sayılan üç metotla da uygun olarak kullanılabilmiştir (Vinden ve Romero 1997). Sayılabilecek diğer bileşikler ise trietil borat, tri-propil-butyl-amil-heksil-oktil-boratları ve tristearil borattır. Bu sistemlerde taşıyıcı organik solventini seçimi önemli olmaktadır. Polar solventler ağaç malzemenin boyutlarının değişimine neden olabilmektedir. Solvent olarak metanol seçiminde, örneğin, aşın solvent alımı gerçekleşmektedir.

Borlu bileşikler üzerine yapılan yeni araştırmaların bir bölümü de öte yandan yoğun şekilde borun yıkanmasını önleyecek yeni sistemlerini

geliştirilmesine yoğunlaşmıştır. Bazı çalışmalar su itici maddeler, monomerler ve polimer sistemleri ile borlu bileşiklerle emprenje edilmiş ağaç malzemenin su alımının azaltılması üzerine dururken diğer bir kısım çalışma ise yeni fiksasyon metodları üzerine eğilmiştir. Su itici maddeler veya çeşitli monomer ve polimer sistemlerinin kullanılması borun yıkanmasını önemli derecede engellemiş ve aynı zamanda malzemenin fiziksel özelliklerini de iyileştirmiştir (Kartal ve Green, 2003; Kartal et al 2004c). Ancak bu çeşit uygulamalar emprenye maliyetleini önemli derecede yükseltmektedir. Öte yandan, fiziksel olarak borun ağaç malzeme içerisinde çöktürülmesi işlemleri de borun yıkanmasını önlerken, aynı zamanda da biyolojik zararlılara karşı sinerjistik etki elde edilebilmiştir (Kartal ve Imamura, 2004). Genel olarak geliştirilen sistemler reçine işlemleri, odunun kimyasal olarak modifikasyonu ve asetilasyon, tanen kondensasyonu, su camı-silikat işlemleri, fenil boronik asit uygulamaları, stabilize olmuş bor esterler, protein borat karışımları, asit metal boratlar, amonyaklı metal boratlar, amin metal boratlar, çeşitli elementler ve madde karışımları ile borun fiksasyonu çalışmaları (zirkonyum, silikon, kalsiyum çöktürücüler vb.) sayılabilecek önemli araştırmaların başında gelmektedir (Lloyd et al 2001; Kartal ve Imamura, 2003a; Kartal ve Imamura, 2003b; Kartal ve Imamura 2004).

Borlu bileşiklerin yıkanma problemleri nedeniyle en önemli kullanım yeri kompozit malzemelerin hem biyolojik zararlılara hem de yanma gibi etkenlere karşı korunmasında olacaktır. Bugün endüstriyel anlamda odun esaslı kompozit malzemelerin kullanımı büyük oranda artış göstermekte ve bu tür malzemeler hem iç hem de dış ortamlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Aynı masif ağaç malzeme gibi kompozitler de degradasyon riskinin yüksek olduğu yerlerde emprenye işlemlerine gereksinim duymaktadır. Çoğu kompozit malzeme için özellikle inorganik boratlar uygun emprenye maddeleridir. Borlu bileşikler kompozit üretimi sırasında katı partiküller olarak doğrudan hammadde oduna veya tutkala katılmaktadır. Çinko borat gibi inorganik borat bileşikleri bu amaçla daha çok kullanılmakta ve bu bileşiğin daha düşük çözünürlüğünden dolayı yıkanma riski de azaltılmaktadır. Bunun sonucu olarak bu tip kompozit malzemeler dış şartlarda kullanım için

daha uygun hale gelmekte ve dayanıklılık artmaktadır (Kartal ve Ayrılmis, 2004; Akbulut et al 2004; Ayrılmis et al 2004).

Kompozit malzemelerin borlu bileşiklerle emprenyesinde dikkat edilecek en önemli konu malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olabilecek etkileridir. Burada kullanılan tutkal ile ağaç malzeme arasında gerçekleşen bağlanma etkisi en önemli husustur. Genel olarak borlu bileşiklerin etkileri az olmakla birlikte, kullanılacak tutkal tipinin borlu bileşiklerle uyumlu olması gerekmektedir. Bazı durumlarda borik asit veya sodyum boratlar fenol formaldehit tutkalı ile uyumsuzluklar göstermektedir. Bununla birlikte çinko boratlar veya susuz boraks başanlı bir şekilde fenol formaldehit tutkalı ile kullanılabilir (Laks ve Palardy, 1993). Bunun yanında polimerik tipte difenilmetan diizosiyanat tutkalları çoğu bor bileşeni ile uygun bağlanmalar yapmakta ve kompozit malzeme yapımında güvenle kullanılabilirlerdir.

Borlu bileşikler kompozit malzeme üretiminde doğrudan ağaç malzemeye spreyleme yada daldırma şeklinde uygulanmakta ve ardından malzeme tutkal ile preslenmektedir. Diğer bir metod ise borlu bileşiklerin tutkal ile önce karışılması ve daha sonra ağaç malzemeye uygulanarak presleme aşamasına geçilmesidir. Üretilen kompozit malzemeye üretimden sonra borlu bileşik uygulaması ise tercih edilen bir uygulama olmamaktadır.

Kompozitlerde borlu bileşiklerin genel olarak uygulama miktarları malzemenin beklenen özelliklere göre değişmektedir. Genellikle 1 ile 1.6 % borik asit eşdeğeri borlu bileşik retensiyonları gerek termitler ve gerekse mantarlara karşı koruma için yeterli olmaktadır (Manning et al 1997). Bunun yanında masif ağaç malzemenin odunu renklendiren mantarlara karşı korunmasında ise genellikle 2 kg/m³ borlu bileşik retensiyonları gerekmektedir. Odunu degrade eden mantarlara ve böceklerle karşı korumada ise laboratuvar şartlarında ve yıkanma olmadığı varsayılarak genel olarak 3.5 ile 7 kg/var retensiyonlarında borlu bileşen retensiyonu gerekmektedir. Yıkanma etkisinin yüksek olduğu durumlarda bu miktarlar iki katına kadar çıkarılabilmekte ve yıkanma etkisi sonucu ağaç

malzemede kalabilecek bor miktarı yüksek tutulmaya çalışılmaktadır.

4. SONUÇ

Borlu bileşikler bugün tekstil ve cam endüstrisinde, deterjan ve fiberglass üretiminde, tanımsal amaçlı gübrelerde ve seramiklerde büyük miktarlarda kullanım yeri bulurken, diğer önemli bir alan da ağaç malzeme emprenye endüstrisi olacaktır. Emprenye endüstrisi son yıllarda yeni kimyasal madde ve emprenye sistemleri üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmış ve borlu bileşikler önem kazanmaya başlamıştır. Emprenye endüstrisinde kullanılan ağır metaller içeren veya petrol esaslı kimyasal maddelerin yarattığı çevresel problemler, borlu bileşiklerde ortaya çıkmamakta ve güvenle kullanılabilir. Borlu bileşiklerin belki de tek dezavantajı ağaç malzemeden kolaylıkla yıkanmalarıdır. Ancak ağaç malzeme toprakla temas etmeyen ve yıkanma riski bulunmayan yerlerde kullanıldığında bu problem ortadan kalkmakta ve son derece uygun emprenye maddeleri olmaktadır. Yıkanmayı engellemek için yapılan bilimsel araştırmalar ümit verici sonuçlar vermekte, yeni borlu bileşikler sentezlenmekte ve yeni fiksasyon metodları geliştirilmektedir.

Yazarlar, JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) ve Kyoto University'e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Akbulut, T., Kartal, S.N., Green, F. 2004. Properties of medium density fiberboard (MDF) treated with N'-N-(1, 8-Naphthalyl) hydroxylamine (NHA-Na), borax and boric acid. *Forest Prod J* (in press).
- Ayrilmis, N., Kartal, S.N., Laufenberg, T., Winandy, J.E., White, R.H. (2004). Evaluation of physical and mechanical properties, fire, decay, and termite resistance of variously treated oriented strand board (OSB). *Forest Prod J* (in press).
- Kartal, S.N., Green, F. 2002. Development and application of colorimetric microassay for determining boron-containing compounds. *Forest Prod J*, 52(6):75-79.
- Kartal, S.N., Green, F. 2003. Leachability of boron from treated wood with natural and semi-synthetic polymers and calcium precipitating agent. *Holz als Roh und Werkstoff*, 61: 388-389.
- Kartal, S.N., Imamura, Y. 2003a. Leaching characteristics, decay and termite resistance of treated wood with boron compounds, N'-N-(1, 8-Naphthalyl) hydroxylamine (NHA-Na), and hydroxynaphthalimide (NHA-H). The International Research Group on Wood Preservation 34th Annual Meeting, Brisbane, Australia, 16-23 May 2003, IRG/WP/03-30307.
- Kartal, S.N., Imamura, Y. 2003b. Effects of chemical modification of boron-treated wood by in situ copolymerization of ally glycidyl ether with methyl methacrylate on boron leachability and biological resistance. The 47th Annual Meeting of The Society of Material Science, Japan, 28-29 October 2003, Kyoto, Japan, pp. 93.
- Kartal, S.N., Ayrilmis, N. 2004. Blockboard made from boron-treated veneers: Laboratory evaluation of decay and termite resistance. *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).
- Kartal, S.N., Imamura, Y. 2004. Effects of N'-N-(1, 8-Naphthalyl) hydroxylamine (NHA-Na) and hydroxynaphthalimide (NHA-H) on boron leachability and biological degradation of wood. *Holz als Roh und Werkstoff* (in press).
- Kartal, S.N., Dorau, B., Lebow, S.T., Green, F. 2004a. Effects of inorganic ions on leachability of wood preserving N'-N-hydroxynaphthalimide (NHA). *Forest Prod J*, 54(1):80-84.
- Kartal, S.N., Hwang, W.J., Shinoda, K., Imamura, Y. 2004b. Decay and termite resistance of wood treated with boron-containing quaternary ammonia compound, didecyl dimethyl ammonium tetrafluoroborate (DBF) incorporated with acryl-silicon type resin. The International Research Group on Wood Preservation 35th Annual Meeting, Ljubljana, Slovenia, 6-10 June 2004.

- Kartal, S.N., Yoshimura, T., Imamura, Y. 2004c. Decay and termite resistance of boron-treated and chemically modified wood by in situ copolymerization of allyl glycidyl ether (AGE) with methyl methacrylate (MMA). *International Biodeterioration and Biodegradation*, 53:111-119.
- Laks, P.E., Palardy, R.D. 1993. Properties and process considerations for preservative-containing waferboards. *International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO) Symposium on the Protection of Wood-Based Composite Products*, May 1993, Orlando, FL, Forest Products Society, pp. 12-17.
- Lloyd, J.D. 1997. International status of borate preservative systems. *The Second International Conference on Wood Protection with Diffusible Preservatives and Pesticides, 1997*, Forest Products Society, Madison, WI, pp. 45-54.
- Lloyd, J.D. 1998. Borates and their biological applications. *The International Research Group on Wood Preservation 29th Annual Meeting*, Maastricht, Netherlands, 14-19 June 1998, IRG/WP/98-30178, 24pp.
- Lloyd, J.D., Fogel, J.L., Vigel, A. 2001. The use of zirconium as an inert fixative for borates in preservation. *The International Research Group on Wood Preservation 32nd Annual Meeting*, Nara, Japan, 20-25 May, 2001, IRG/WP/01-30256, 27 pp.
- Manning, M.J., Lloyd, J., Schoeman, M. 1997. The future of diffusible preservative and pesticide systems. *The Second International Conference on Wood Protection with Diffusible Preservatives and Pesticides, 1997*, Forest Products Society, Madison, WI, pp. 157-168.
- Vmden, P., Romero, J. 1997. Developments in the application of organic boron compounds. *The Second International Conference on Wood Protection with Diffusible Preservatives and Pesticides, 1997*, Forest Products Society, Madison, WI, pp. 119-126.
- Yamaguchi, H. 2003. Silicic acid: boric acid complexes as wood preservatives. *Wood Sei Technology* 37,287-297.